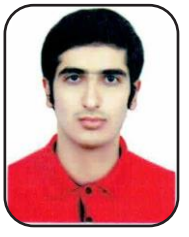
ارزیابی تغییرات زمان شروع ترک خوردگی در روسازی های بتنی عمل آوری شده با ماده ی عمل آوری در شرایط محیطی سخت با استفاده از روش تحلیل تصاویر



سید جواد وزیری کنگ علیائی
دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران - راه و ترابری
دانشگاه علم و صنعت ایران
محقق و مشاور مستقل در زمینه فناوری بتن
عضو حقیقی انجمن بتن ایران

وجیهه عباسی
کارشناس ارشد، شیمی تجزیه
مدیر تحقیق و توسعه
دپارتمان تحقیق و توسعه شرکت ژیکاوا

پویا احمدی
کارشناس ارشد، مهندسی عمران- سازه،
مدیر بخش آموزش و پژوهش
دپارتمان تحقیق و توسعه شرکت ژیکاوا

مریم بازپور
کارشناس، فیزیک، مدیر کنترل و کیفیت، دپارتمان تحقیق و توسعه
شرکت ژیکاوا

چکیده

ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری یکی از انواع شایع خرابی در روسازی های بتنی بوده که باعث کاهش سطح خدمت دهی و دوام این سازه ها در طول عمر بهره داری آن می گردد. عمل آوری مناسب روسازی بتنی می تواند از رشد و گسترش این ترک خوردگی ها جلوگیری کند. با وجود استفاده ی گسترده از روش عمل آوری با آب، این روش با معایبی همچون نیاز به اجرا و کنترل مداوم، هدر رفت منابع آبی و مشکلات تهیه و حمل آب به خصوص در مناطق کم آب کشور به همراه است. از این جهت تحقیق حاضر به ارزیابی تغییرات زمان شروع ترک خوردگی در روسازی های بتنی عمل آوری شده با ماده ی عمل آوری در شرایط محیطی سخت با استفاده از روش تحلیل تصاویر می پردازد. ماده ی عمل آوری در مقادیر ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ گرم در متر مربع استفاده شده و زمان شروع ترک خوردگی در آزمونه های بتنی با استفاده از روش آزمایش استاندارد ASTM C1579 و تحلیل تصاویر دیجیتال تهیه شده توسط سیستم تصویر برداری ارزیابی گردید. نتایج به دست آمده حاکی از آن بود که ماده ی عمل آوری تاثیر چشمگیری بر افزایش زمان شروع ترک خوردگی دارد. با افزودن ماده ی عمل آوری به میزان ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ گرم بر متر مربع، زمان شروع ترک خوردگی به ترتیب به میزان ۲,۲، ۲,۹ و ۳,۱ برابر نسبت به دال بتنی شاهد افزایش می یابد. دیده شد که میزان پاشش ماده ی عمل آوری اثر محسوسی بر تغییر زمان ترک خوردگی دارد. همچنین نتایج نشان داد که پس از پاشش بیشتر ماده ی عمل آوری از یک مقدار مشخص، که در اینجا ۲۰۰ گرم بر متر مربع بود، زمان شروع ترک خوردگی افزایش چشمگیر بیشتری پیدا نکرد. در انتها، عنوان گردید که با مصرف

ماده‌ی عمل آوری در مقدار بهینه، می توان شدت ترک خوردگی های ناشی از جمع شدگی خمیری در روسازی های بتنی را در شرایط محیطی سخت، کنترل کرد.

کلمات کلیدی: روسازی های بتنی، ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری، ماده ی عمل آوری، زمان شروع ترک خوردگی، تحلیل تصاویر.

۱. مقدمه

رویه های بتنی، از جمله سازه های بتنی پر کاربرد در صنعت عمران بوده که در کاربری های مختلف مورد استفاده قرار می گیرد.

کف های صنعتی، جاده ها، کف پارکینگ ها و سطوح پروازی ازا نواع مختلف سازه های مورد استفاده در صنعت عمران بوده که با استفاده از رویه های بتنی ساخته می‌شود[1–3]. رویه های بتنی به طور کلی از یک دال بتنی ساده و یا مسلح ساخته شده که به طور مستقیم بر روی سطح خاک بستر کوبیده شده قرار گرفته و یا بر روی سطح اساس دانه ای یا تثبیتی ساخته می شود[4]. تداوم دوام و سطح خدمت دهی رویه های بتنی وابسته به کنترل و رشد خرابی های مختلفی بوده که در طول دوره ی بهره برداری از سازه، به وجود می آید. با ایجاد خرابی در این سازه ها، زمینه ی شکست جزئی و یا کلی عضو بتنی به وجود آمده و در نهایت نیاز به عملیات بازسازی، تعمیر و ترمیم در پروژه در حال بهره برداری شکل می گیرد. ترک خوردگی، یکی از انواع شایع خرابی ها در رویه های بتنی بوده به طوری که می توان آن را زمینه ی مرگ بتن در نظر گرفت. از محل ترک خوردگی های به وجود آمده در سازه ی بتنی، امکان نفوذ آب و دیگر مواد خورنده به داخل بتن فراهم بوده، در نتیجه عملکرد بتن و عناصر مسلح کننده در آن را کاهش می دهد. همچنین، ترک خوردگی در بتن، زمینه را برای رشد و گسترش دیگر ترک‌ها به وجود آورده و همچنین می تواند زمینه ساز به وجود آمدن دیگر خرابی‌ها در رویه های بتنی دانست[5,6].

جمع شدگی خمیری یکی از انواع جمع شدگی در مخلوط های بتنی بوده که در ساعات اولیه پس از اجرای سازه اتفاق می افتد. این نوع جمع شدگی در سازه های بتنی، در زمانی رخ می دهد که مخلوط بتنی تازه بوده و کسب مقاومت لازم در آن انجام نشده است. جمع شدگی خمیری می تواند منجر به وقوع ترک خوردگی در سازه ی بتنی شود. ترک خوردگی در هر سازه ی بتنی، زمینه ساز وقوع خرابی های بعدی در سازه بوده و همچنین می تواند منجر به شکست کلی آن می شود. از این جهت، ارزیابی ترک خوردگی در سازه ی بتنی و عوامل ایجاد کننده‌ی آن، در تعیین عملکرد و دوام آن اهمیت فراوان دارد. ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری نیز از این موضوع مستثنی نبوده و نیازمند بررسی و ارزیابی دقیق تر می باشد. جمع شدگی خمیری در مخلوط های بتنی، در ساعات اولیه پس از اجرای سازه ی بتنی رخ می دهد. پس از برابری نرخ آب انداختگی و نرخ تبخیر سطحی بتن، لایه ی آب سطحی در بتن حذف شده و پس از آن فشار های مویینگی منفی شروع به شکل گیری می کنند[7,8]. فشار های مویینگی منفی در سطح بتن منجر به جمع شدگی در مخلوط بتنی گردد. در صورتی که سازه ی بتنی مقید بوده و از حرکت آن ناشی از جمع شدگی در بتن جلوگیری شود، تنش‌های کششی در بتن به وجود می آید. وجود تنش‌های کششی در یک سازه با مخلوط بتنی تازه، می‌تواند با خرابی های متعددی به همراه بوده چرا که پس از تجاوز میزان تنش های کششی ناشی از جمع شدگی خمیری از مقاومت کششی بتن تازه، ترک خوردگی در سازه به وجود می آید[9,10]. شرایط محیطی محل اجرای پروژه، نقش مهمی بر تغییرات رفتار مخلوط های بتنی دارد. شرایط محیطی شامل دمای محیطی، رطوبت نسبی هوا و سرعت جریان باد به صورت ترکیبی، می تواند

شرایط مستعد ایجاد ترک خوردگی و یا شرایط مساعد برای مخلوط بتنی را به وجود آورد[11,12]. همچنین، از آن جا که اغلب سازه های بتنی در محیط هایی اجرا و مورد بهره برداری قرار می گیرند که تحت تاثیر شرایط محیطی سخت قرار دارند، از این جهت در نظر گرفتن شرایط محیطی که بیشترین استعداد ترک خوردگی را در مخلوط بتنی به وجود می آورد، اهمیت پیدا می کند.

عمل آوری مناسب روسازی های بتنی نقش در کنترل و کاهش ترک خوردگی های خمیری داشته به طوری که با ایجاد شرایط عمل آوری مناسب و متناسب با شرایط محیطی محل اجرای پروژه، می توان از رشد این ترک خوردگی ها به میزان محسوسی کاست[13,14]. عمل آوری با آب، روش عمل آوری سنتی در سازه های بتنی از جمله روسازی های بتنی بوده که در شرایط محیطی متفاوت مورد استفاده قرار می گیرد. با وجود پر کاربرد بودن این روش عمل آوری و مزایای آن، معایبی در روش عمل آوری با آب وجود داشته که یافتن راه حل جایگزین با آن در صنعت روسازی را به وجود آورده است. عمل آوری روسازی های بتنی با آب نیازمند تامین آب به مقدار زیاد بوده که این موضوع در مناطق کم آب یا بدون آب با مشکلات اجرایی و ملاحظات اقتصادی به همراه است. همچنین، مصرف آب به مقدار فراوان به منظور عمل آوری، بحران کم آبی در کشور را بیشتر کرده و تهدیدی برای این منبع خدادادی محسوب می شود. از طرفی، نیاز به تکرار روش عمل آوری با آب در زمان های مشخص و کنترل صحیح اجرای آن در هر مرحله از اجرا، مستلزم وجود نیروی های کارآمد و آموزش دیده بوده که فرآیندهای کنترل اجرای صحیح را به طور منظم انجام دهند. در نتیجه، زمان و هزینه های اجرایی افزایش می یابد.

در این شرایط، روش عمل آوری با ماده ی عمل آوری، روشی نوین جهت عمل آوری مناسب و با حداقل مشکلات اجرایی، زمان و هزینه در صنعت بتن و روسازی معرفی گردید. ماده ی عمل آوری به صورت یک غشا بر روی سطح روسازی بتنی تازه اجرا شده پاشیده شده و از تعادل رطوبت دال بتنی با رطوبت محیط اطراف جلوگیری می‌کند[15,16]. به عبارت دیگر، این مواد مانع کاهش رطوبت روسازی بتنی شده و رطوبت مورد نیاز جهت عمل آوری دال بتنی را فراهم می کند. عدم تکرار پاشش ماده‌ی عمل آوری در زمان های متفاوت، کاهش انجام فرآیند های کنترل عمل آوری، کاهش نیاز به منابع آبی و جلوگیری از مصرف بی رویه‌ی آب از جمله مزایای استفاده از این روش بوده که توجه محققان و متولیان صنعت بتن را به خود جلب کرده است. به طور کلی مواد عمل آوری شیمیایی در دو نوع شامل مواد بر پایه ی آب و مواد بر پایه ی پارافین تولید شده و در صنعت بتن مورد استفاده قرار می گیرد[17,18]. میزان پاشش این مواد بر سطح روسازی بتنی، متناسب با ملاحظات فنی و اجرایی پروژه تعیین شده و سپس بر سطح دال بتنی پاشیده می‌شود.

جمع بندی پیشینه‌ی پژوهش حاکی از آن است که ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری یکی از انواع شایع خرابی در روسازی های بتنی بوده و می‌تواند باعث کاهش سطح خدمت دهی و عمر بهره برداری این سازه های بتنی گردد. عمل آوری مناسب روسازی های بتنی، راهکاری موثر جهت کنترل و کاهش ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری می باشد. با وجود مزایا و سابقه ی بلند

مدت استفاده از آب به منظور عمل آوری سازه‌های بتنی، این روش با معایبی همچون نیاز به اجرا و کنترل مداوم، هدر رفت منابع آبی و مشکلات مرتبط با تهیه و حمل آب به خصوص در مناطق کم آب کشور به همراه است. از این جهت نیاز به استفاده از روش های نوین عمل آوری به منظور دستیابی به اهداف مورد نظر عمل آوری و رفع معایب روش های سنتی دیده می شود. روش استفاده از پاشش ماده ی عمل آوری یکی از روش‌های نوین در عمل آوری سازه های بتنی بوده که می تواند به این منظور مورد توجه قرار گیرد. نیاز است تا تاثیر این ماده بر کنترل و کاهش ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در روسازی‌های بتنی مورد ارزیابی قرار گرفته تا بتوان تصمیم مناسبی جهت جایگزین نمودن این روش عمل آوری با روش عمل آوری سنتی با آب در روسازی های بتنی با هدف کنترل و کاهش ترک خوردگی خمیری اتخاذ گردد. بدین منظور تحقیق حاضر به ارزیابی تغییرات زمان شروع ترک خوردگی در روسازی های بتنی عمل آوری شده با ماده ی عمل آوری در شرایط محیطی سخت با استفاده از روش تحلیل تصاویر می پردازد.

۲. مصالح و روش آزمایشگاهی

در این قسمت، در ابتدا مصالح به کار رفته در ساخت مخلوط های بتنی معرفی شده و مشخصات این مواد ارائه می شود. پس از آن، نسبت های اختلاط بتن مطابق با روش ملی طرح مخلوط، تعیین می شود. سپس، روش ارزیابی ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط های بتنی تشریح می گردد.

۱،۲. مصالح

در این تحقیق از سیمان پرتلند تیپ ۱-۴۲۵ کارخانه سیمان شرق مشهد با وزن مخصوص ۳۱۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب استفاده گردید. مشخصات تحلیل شیمیایی این سیمان، ارائه شده توسط تولید کننده، در جدول ۱ آورده شده است.

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

مشخصه ی شیمیایی	SIO^2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	L.O.I	SO_3	IR	Na^2O	K_2O
مقدار (٪)	۲۱	۴،۶	۳،۹	۶۲،۵	۲،۹	۱،۴	۲،۰	۰،۳	۰،۵۰	۰،۴۵
مقدار الزامات مقرارت ملی ایران شماره‌ی ۳۸۹	۲۰،۰ >	<۶	<۶	-	<۵	<۳	<۳	<۰،۷۵	-	-

مصالح سنگی به مورد استفاده در این تحقیق، مصالح سنگی آهکی با حداکثر اندازه ۱۹ میلیمتر بود. مصالح سنگی در سه دسته ابعادی شامل مصالح سنگی ریزدانه ۵-۰ میلیمتر (ماسه)، مصالح سنگی درشت دانه ۱۲-۵ میلیمتر (نخودی) و مصالح سنگی درشت دانه ۱۹-۱۲ میلیمتر (بادامی) بود. مدول نرمی، جذب آب و چگالی نسبی ماسه به ترتیب به میزان ۳،۱۷، ۲،۸۰ و ۲،۶۳، جذب آب، چگالی نسبی نخودی به ترتیب به میزان ۱،۱ و ۲،۶۳ و جذب آب و چگالی نسبی بادامی به ترتیب به میزان ۱،۰ و ۲،۶۲ بود.

ماده ی عمل آوری مورد استفاده در این تحقیق، ماده ی عمل آوری بر پایه ی آب با وزن مخصوص ۱،۰۴ کیلوگرم بر متر مکعب مطابق با استاندارد ملی ایران شماره ی ۸۲۸۸ بود. مشخصات فیزیکی و شیمیایی این ماده ارائه شده توسط تولید کننده در جدول ۲ آورده شده است.

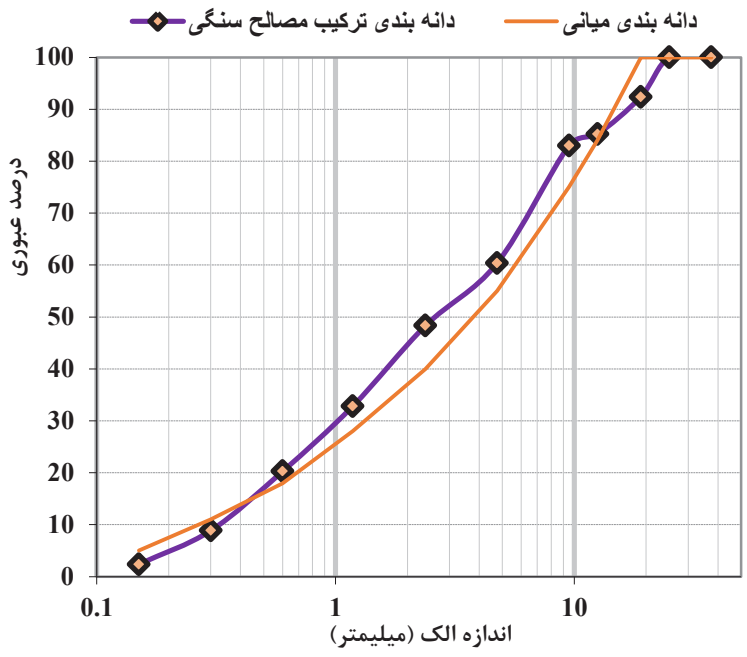
جدول ۲: مشخصات فنی و ظاهری ماده ی عمل آوری مورد استفاده در این تحقیق

حالت فیزیکی	مایع
رنگ	سفید
وزن مخصوص	۱،۰۴ گرم بر سانتی متر مکعب
قابلیت انحلال	در آب
مقدار کلر	فاقد کلر
مقدار مصرف پیشنهادی (توسط عرضه کننده)	۱۰۰ تا ۳۰۰ گرم در متر مربع سطح

از آب آشامیدنی سیستم لوله کشی آزمایشگاه جهت ساخت مخلوط های بتنی استفاده شد.

۲،۲. طرح اختلاط بتن

نسبت های اختلاط بتن مورد استفاده در این تحقیق، مطابق با روش ملی طرح مخلوط، ضابطه‌ی ض-۴۷۹ مرکز تحقیقات وزارت راه، مسکن و شهرسازی تعیین شد. نسبت های اختلاط به گونه‌ای در نظر گرفته شد تا علاوه بر رعایت ضوابط ذکر شده در این روش، حداکثر استعداد ترک خوردگی در مخلوط های بتنی به منظور بررسی بهتر اثر ماده‌ی عمل آوری بر تغییرات رفتار ترک خوردگی، به وجود آید. بدین منظور، نسبت آب به مواد سیمانی به میزان ۰،۵ انتخاب شد. این میزان نسبت آب به مواد سیمانی از حداکثر نسبت آب به مواد سیمانی در اکثر سازه های بتنی کمتر بوده و همچنین، به میزان نسبت آب به مواد سیمانی در پروژه های واقعی نزدیک تر است. مقدار سیمان به میزان ۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب انتخاب شد. این میزان سیمان با توجه به حداقل کسب مقاومت فشاری استاندارد ۳۰ مگاپاسکال، که در طراحی اکثر سازه های بتنی مورد نظر قرار می گیرد، و همچنین دستیابی به میزان اسلامپ رده ۲ (۵۰ تا ۹۰ میلیمتر) که میزان کارایی مناسب در طرح های اختلاط بتنی بوده، انتخاب شده است. سهم مصالح سنگی ماسه، نخودی و بادامی به ترتیب به میزان ۶۰، ۲۵ و ۱۵ درصد انتخاب گردید. این میزان سهم مصالح سنگی باعث می شود تا نمودار ترکیب مصالح سنگی نزدیک به دانه بندی میانی پیشنهادی در روش ملی طرح مخلوط شود. این دانه بندی، از استعداد ترک خوردگی بالایی برخودار بوده، چرا که سهم بالای این ترکیب را مصالح ریزدانه تشکیل می دهند. در شکل ۱، نمودار ترکیب مصالح سنگی به همراه حدود دانه بندی میانی مشاهده می گردد. بدین ترتیب، نسبت های اختلاط بتن شاهد تعیین گردید. در جدول ۳، مقادیر وزنی مصالح جهت ساخت یک متر مکعب بتن تازه در حالت اشباع با سطح خشک مصالح آورده شده است.



شکل ۱: نمودار دانه بندی ترکیب مصالح سنگی و حدود دانه بندی میانی مطابق با روش ملی طرح مخلوط بتن

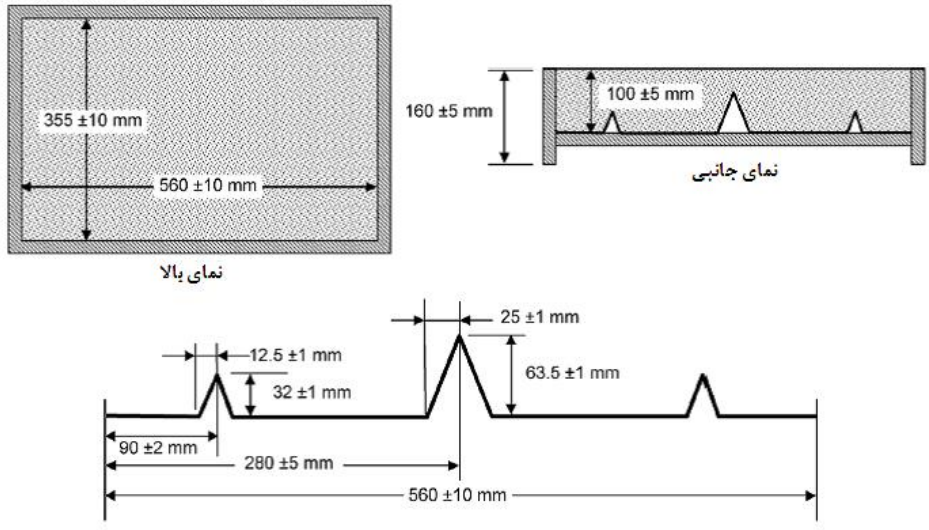
جدول ۳: مقادیر وزنی مصالح طرح اختلاط بتن شاهد

طرح اختلاط	سیمان (Kg/m^3)	مصالح سنگی ریزدانه (0-5 mm) (Kg/m^3)	مصالح سنگی درشت دانه ریز (5-12 mm) (Kg/m^3)	مصالح سنگی درشت دانه متوسط (12-19 mm) (Kg/m^3)	آب (Kg/m^3)
شاهد	400	1039	259	433	200

مـــادهی عمـــل آوری در مقـــادیر پاشـــش ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ گـرم در متـر مربـع سـطح سـازه ی بتنـی، اسـتفاده گردیـد. ایـن میـزان مقـادیر پاشـش مـاده عمـل آوری بـا توجـه بـه مقـادیر پیشـنهاد شـده توسـط تولیـد کننـده و همچنـین بـه منظـور ارزیـابی اثـر مـاده، در نظـر گرفتـه شـد. بـدین ترتیـب تعـداد یـک طـرح اخـتلاط بـتن شـاهد و ۳ طـرح اخـتلاط حـاوی مـاده ی عمـل آوری در رونـد تحقیق در نظر گرفته شد.

۳،۲. ارزیـــابی تـــرک خـــوردگی ناشـــی از جمـــع شدگی خمیری

بـــه منظـــور ارزیـــابی تـــرک خـــوردگی ناشـــی از جمـــع شـــدگی خمیـــری در مخلـــوط هـــای بتنـــی، از روش آزمـــایش ASTM C1579 اســـتفاده گردیـــد. در ایـــن روش از یـــک قالـــب بـــه ابعـــاد ۱۰۰*۵۶۰*۳۵۵ میلیمتـر اسـتفاده مـی شـود. بـه منظـور ایجـاد اسـتعداد تـرک خـوردگی در آزمونـه هـای بتنـی، از یـک ابـزار فـولادی کـه شـامل دو قیـد در طـرفین و یـک افزاینـده تـرک در مرکـز بـوده، در کـف قالـب اسـتفاده مـی شـود. در شـکل۲، مشخصـات قالـب و ابـزار فـولادی مطـابق بـا استاندارد، مشاهده می شود.



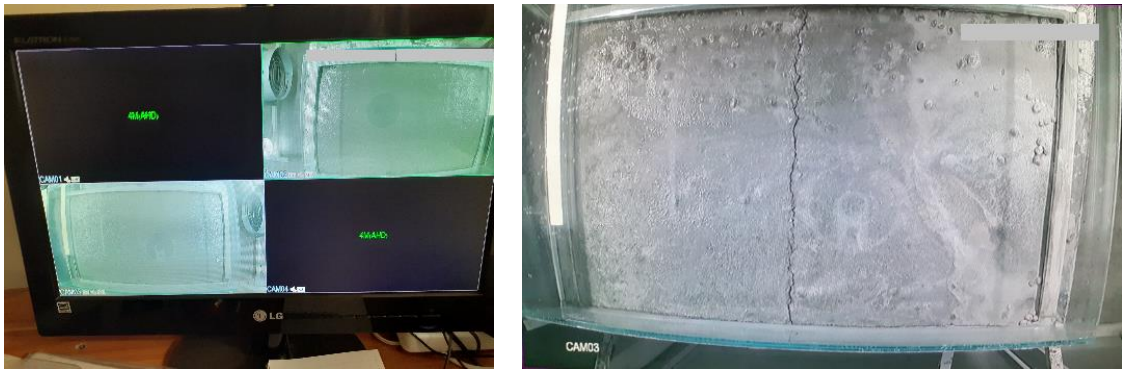
شکل ۲: مشخصات قالب و ابزار فولادی مطابق با استاندارد ASTM C1579

در این روش آزمایش، قالب های حاوی مخلوط بتنی، در یک محفظه با قابلیت کنترل شرایط جوی شامل دمای محیطی، رطوبت نسبی هوا و سرعت جریان باد، قرار داده می شود. در این تحقیق، محفظه ی شبیه ساز عوامل جوی به منظور دستیابی به این امر مورد استفاده قرار گرفت. شرایط محیطی مورد نظر در این مطالعه شامل دمای محیطی ۴۰ درجه سانتی گراد، رطوبت نسبی هوای ۲۰ درصد و سرعت جریان باد ۳۰ کیلومتر بر ساعت بود. این شرایط از نظر ایجاد ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری، از نوع شرایط محیطی سخت محسوب می‌گردد. محفظه‌ی شبیه ساز عوامل جوی، توانایی ایجاد و حفظ این شرایط در طول مدت آزمایش را دارد. در شکل۳، آزمونه ی بتنی تحت آزمایش در محفظه ی شبیه ساز عوامل جوی مشاهده می شود.

شکل ۳: آزمونه ی بتنی تحت آزمایش در محفظه ی شبیه ساز عوامل جوی

پس از ساخت مخلوط های بتنی و ریختن در قالب، عملیات تراکم و تسطیح سطح بتن انجام می گیرد. سپس، آزمونه های بتنی در محفظه ی شبیه ساز عوامل جوی با شرایط محیطی در نظر گرفته شده، قرار داده شده و آزمایش شروع می شود. در طرح های اختلاط حاوی ماده‌ی عمل آوری، پس قرار

دادن آزمونه های بتنی در داخل محفظه، ماده ی عمل آوری به میزان مشخص، در کل سطح آزمونه با استفاده از افشانک، پاشیده گردید. پاشش ماده‌ی عمل آوری به گونه ای انجام می گردید تا ماده‌ی عمل آوری به طور یکنواخت در کل سطح آزمونه پخش شود. مدت زمان آزمایش به میزان ۶ ساعت در نظر گرفته شد. این میزان مدت آزمایش، منجر به ایجاد حداکثر ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط های بتنی می شود. در طول مدت آزمایش، آزمونه‌های بتنی تحت تصویر برداری پیوسته قرار می گرفت. در شکل ۴، تصویر برداری پیوسته از سطح آزمونه های بتنی و تصویر آزمونه ی ترک خورده، مشاهده می شود.



شکل ۴: تصویر دیجیتال گرفته شده از ترک خوردگی در یک آزمونه

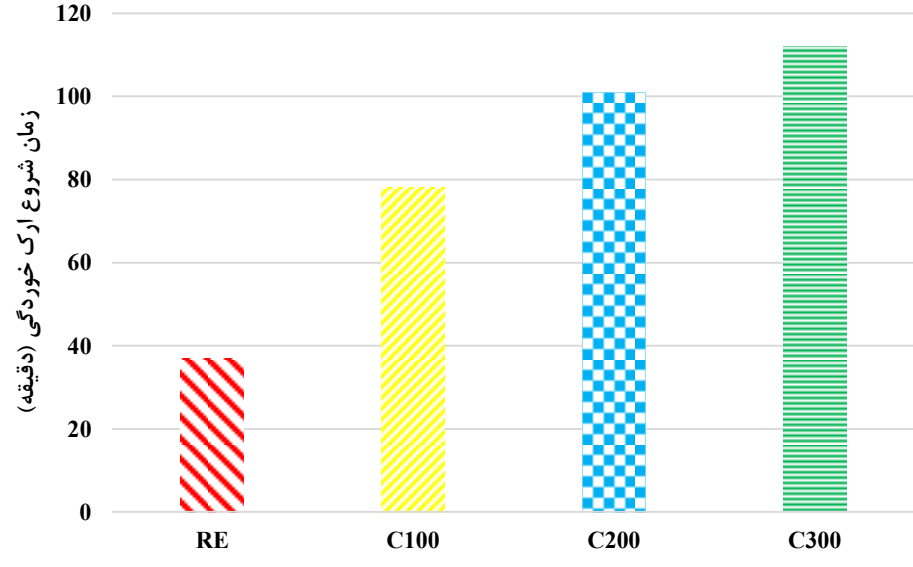
تصاویر گرفته شده در نرم افزار تحلیل تصویر Digimizer مورد تحلیل قرار گرفته و زمان شروع ترک خوردگی در آزمونه های بتنی ارزیابی گردید. روش تحلیل تصاویر به کار گرفته شده در این تحقیق، مطابق با روش ذکر شده در تحقیق انجام شده توسط زیاری و همکاران[7] بوده است.

۳. نتایج و بحث

در این قسمت نتایج به دست آمده از آزمایش های انجام شده در تحقیق مورد تجزیه و تحلیل و بحث قرار می گیرد. شکل ۵ مقادیر زمان زمان شروع ترک خوردگی را در نمونه های شاهد (RE) و بتن عمل آوری شده با ماده عمل آوری در مقادیر ۱۰۰ (C100)، ۲۰۰ (C200) و ۳۰۰ (C300) گرم بر متر مربع نشان می دهند.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، مشاهده می‌شود که با پاشش ماده عمل‌آوری، مقدار زمان شروع ترک‌خوردگی نمونه‌های بتنی افزایش قابل‌توجهی را تجربه می‌کنند. با پاشش ماده عمل آوری به مقدار 100 گرم در متر مربع، زمان شروع ترک در دال بتنی C100 به میزان ۲,۲ برابر نمونه شاهد افزایش می یابد. این نتایج نشان می‌دهد که پاشش ماده عمل آوری بر روی سطح نمونه‌های بتن تأثیر قابل‌توجهی داشته و باعث افزایش قابل‌توجهی در این متغیر زمانی می‌شود. با پاشش ماده عمل آوری بر روی سطح دال بتنی، یک لایه فیلم بر روی سطح بتن تشکیل می شود. این لایه از شکستن سریع مولکول های آب روی سطح بتن و تبخیر آن در شرایط سخت محیطی جلوگیری می کند. در نتیجه زمان رسیدن به تعادل میزان آب انداختگی و تبخیر

در سطح بتن افزایش می یابد. زمان تعادل آب انداختگی و تبخیر به دو میزان آب انداختگی و تبخیر سطحی بتن بستگی دارد. با توجه به اینکه پاشش ماده عمل آوری تأثیری بر میزان آب انداختگی بتن نداشته است، می توان نتیجه گرفت که ترکیب عمل آوری تأثیر محسوسی بر میزان تبخیر سطحی بتن دارد. این موضوع باعث می شود که زمان تعادل آب انداختگی و تبخیر دال بتنی عمل آوری شده با ماده عمل آوری به میزان قابل توجهی افزایش یابد. پاشش ماده عمل آوری همچنین منجر به افزایش زمان شروع ترک در دال بتنی می شود. با کاهش سرعت تبخیر سطحی و افزایش زمان تعادل، از شدت فشار مویینگی منفی کاسته می شود. این موضوع باعث کاهش شدت جمع شدگی خمیری در دال بتنی می شود. از طرفی با افزایش زمان تعادل، زمان تشکیل فشارهای مویینگی منفی روی سطح دال بتنی پس از زمان تعادل به زمان گیرش اولیه بتن نزدیک می شود. این موارد باعث افزایش مقاومت دال بتنی در برابر تنش های کششی ناشی از جمع شدگی خمیری در دال های بتنی می شود که در نتیجه ترک خوردگی در دال بتنی به تاخیر می افتد. بنابراین با پاشش ماده ی عمل آوری بر روی سطح دال بتنی، زمان شروع ترک خوردن دال بتنی افزایش می یابد.



شکل ۵: مقادیر زمان شروع ترک خوردگی در مخلوط بتنی شاهد و مخلوط های بتنی عمل آوری شده با ماده ی عمل آوری در مقادیر پاشش مختلف

بررسی بیشتر نتایج نشان می دهد که با افزایش میزان پاشش ماده ی عمل آوری، روند افزایشی زمان ترک خوردگی خمیری در دال های بتنی ادامه دارد. با پاشش ماده عمل آوری به مقدار ۲۰۰ گرم بر متر مربع، زمان شروع ترک در دال بتنی C200 به میزان ۲,۹ برابر نسبت به دال بتنی شاهد افزایش می باشد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، مشاهده می‌شود که اثر پاشش ماده عمل آوری در این مقدار بر تغییرات زمانی ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری قابل توجه است. با افزایش مقدار

ماده عمل آوری، ضخامت لایه تشکیل شده بر روی سطح دال بتنی افزایش می یابد. این موضوع منجر به کاهش بیشتر میزان تبخیر سطحی در بتن و در نتیجه افزایش زمان تعادل دال بتنی می شود. با کاهش بیشتر نرخ تبخیر به دلیل افزایش میزان پاشش ماده عمل آوری، فشارهای مویینگی منفی بیشتر کاهش می یابد و همچنین زمان تشکیل این فشارها به زمان گیرش اولیه بتن نزدیک می شود. در نتیجه، با افزایش مقدار پاشش ماده عمل آوری، زمان شروع ترک خوردگی بیشتر افزایش می یابد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان نتیجه گرفت که میزان ترکیب عمل‌آوری تأثیر بسزایی بر تغییرات متغیرهای زمانی ترک‌خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در روسازی‌های بتنی دارد. نکته حائز اهمیت در این قسمت تفاوت معنی دار اثر ماده عمل‌آوری به میزان ۲۰۰ گرم بر متر مربع و اثر پاشش این ماده به میزان ۱۰۰ گرم بر متر مربع می باشد. این موضوع نشان می دهد که در مقدار ۲۰۰ گرم در متر مربع، زمان شروع ترک خوردگی با مقدار زمان ترک خوردگی در مقدار ۱۰۰ گرم در متر مربع تفاوت معنی داری دارند. این موضوع دلیل دیگری برای تأثیر قابل توجه مقدار ماده عمل آوری بر تغییرات زمانی ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در روسازی های بتنی است.

با بررسی بیشتر نتایج به‌دست‌آمده، می‌توان دریافت که با پاشش بیشتر ماده عمل آوری، متغیرهای زمانی ترک خوردگی خمیری در دال‌های بتنی افزایش قابل‌توجهی را تجربه نمی‌کنند. با پاشش ترکیب عمل آوری به مقدار ۳۰۰ گرم بر متر مربع، زمان شروع ترک در دال بتنی C300 به میزان ۳/۱ برابر نسبت به دال بتنی شاهد افزایش می باشد. این موضوع نشان می دهد که با وجود افزایش مقدار ماده عمل آوری و متعاقب آن افزایش ضخامت لایه فیلم تشکیل شده بر روی سطح دال بتنی، زمان شروع ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در دال های بتنی افزایش چشمگیری پیدا نمی کند. با توجه به این موضوع می توان نتیجه گرفت که اثر مثبت پاشش ماده عمل آوری در کاهش نرخ تبخیر و فشارهای مویینگی منفی در سطح دال بتنی به حد نهایی خود رسیده است. از این نظر می توان گفت که میزان پاشش ماده عمل آوری به مقدار بهینه خود می رسد تا حداکثر افزایش زمان شروع ترک به دست آید که در این تحقیق این مقدار بهینه در میزان ۲۰۰ گرم در متر مربع مشاهده شد. پس از مصرف بیشتر از مقدار مطلوب این ماده، اثرات مثبت بیشتری انتظار نمی رود. بررسی بیشتر این موضوع به منظور تعیین دقیق مقدار بهینه پاشش ماده عمل آوری نیازمند تحقیقات آتی در این زمینه است.

۴. نتیجه گیری

پژوهش حاضر به ارزیابی تغییرات زمان شروع ترک خوردگی در روسازی های بتنی عمل آوری شده با ماده‌ی عمل آوری در شرایط محیطی سخت با استفاده از روش تحلیل تصاویر پرداخت. مهمترین نتایج به دست آمده از این تحقیق به شرح زیر است:

- پاشش ماده عمل آوری تاثیر بسزایی در تغییرات زمان شروع ترک در روسازی های بتنی دارد.

- با پاشش ماده عمل آوری به میزان ۱۰۰ گرم بر متر مربع، زمان شروع ترک خوردگی به میزان ۲,۲ برابر افزایش می یابد.

- میزان پاشش ماده عمل آوری تأثیر بسزایی در تغییرات زمان شروع ترک داشت، به طوری که با پاشش این ماده به مقدار ۲۰۰ گرم بر متر مربع، زمان شروع ترک خوردگی به میزان ۲,۹ افزایش پیدا کرد.

- پاشش بیش از مقدار معینی از ماده عمل آوری که در این تحقیق ۲۰۰ گرم بر متر مربع بود، تأثیر معنی داری بر تغییرات زمان شروع ترک خوردگی نداشت، به طوری که با پاشش این ماده به میزان ۳۰۰ گرم در متر مربع ، زمان زمان شروع ترک خوردگی به میزان ۳,۱ برابر افزایش می یابد.

- با استفاده مناسب و بهینه از ترکیب عمل آوری در روسازی های بتنی، می توان از بروز و رشد ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در روسازی های بتنی جلوگیری کرد. بنابراین دوام و عملکرد این سازه های بتنی در مدت عمر مفید آنها می تواند افزایش یابد.

۵. منابع

[1] *A.B. Utomo, L.F. Hidayatiningrum, B. Dhanardono, Application of porous concrete to resolveflood on the roads, IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 708 (2021). https://doi.org/10.1088/1755-1315/708/1/012037.*

[2] *Y. Tan, J. Song, Z. Chen, H. Xiao, Experimental Study on the Influence of Buried Geothermal Pipes on the Temperature Field of Concrete Roads, Adv. Civ. Eng. 2021 (2021).*

[3] *F. Hattatoglu, A. Bakis, Usability of ignimbrite powder in reactive powder concrete road pavement, Road Mater. Pavement Des. 18 (2017) 1448–1459. https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1213182.*

[4] *Y.H. Huang, Pavement Analysis and Design，Second Edition, 2004.*

[5] *M.Y. Shahin, Pavement management for airports, roads, and parking lots, Springer New York, 2005.*

[6] *N.J. Delatte, Concrete pavement design, construction, and performance, Crc Press, 2014.*

[7] *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.*

[8] *J.T. Kolawole, R. Combrinck, W.P. Boshoff, Plastic cracking behaviour of concrete and its interdependence on rheo-physical properties, Compos. Part B Eng. 230 (2022) 109527. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109527.*

[9] *G.M. Moelich, J.E. van Zyl, N. Rabie, R. Combrinck, The influence of solar radiation on plastic shrinkage cracking in concrete, Cem. Concr. Compos. 123 (2021) 104182.*

https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104182.

[10] *Q. Liu, J. Xiao, A. Singh, Quantification of plastic shrinkage and cracking in mortars containing different recycled powders using digital image correlation technique, Constr. Build. Mater. 293 (2021) 123509. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123509.*

[11] F. Sayahi, M. Emborg, H. Hedlund, A. Cwirzen, Effect of steel fibres extracted from recycled tyres on plastic shrinkage cracking in self-compacting concrete, Mag. Concr. Res. 73 (2021) 1270–1282. https://doi.org/10.1680/jmacr.20.00116.

[12] H. Rong, W. Dong, W. Yuan, X. Zhou, An improved ring test to assess cracking resistance of concrete under restrained shrinkage, Theor. Appl. Fract. Mech. 113 (2021) 102976. https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2021.102976.

[13] M. Maj, A. Ubysz, Cracking of composite fiber-reinforced concrete foundation slabs due to shrinkage, Mater. Today Proc. 38 (2021) 2092–2098. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.155.

[14] H. Zhang, J. Xiao, Plastic shrinkage and cracking of 3D printed mortar with recycled sand, Constr. Build. Mater. 302 (2021) 124405. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124405.

[15] Y. Ito, Y. Sakai, R. Makiura, S. Na, T. Toyota, Journal of Building Engineering Direct causality between film formation and water-retaining effect of surfactant-based film-forming curing compound for concrete, J. Build. Eng. 43 (2021) 102930. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102930.

[16] A. Joshaghani, D.G. Zollinger, Evaluating the Quality of Curing Applications on Concrete Pavements with Ground-Penetrating Radar, Transp. Res. Rec. (2021). https://doi.org/10.1177/0361198121996361.

[17] S. Surana, R.G. Pillai, M. Santhanam, Performance evaluation of curing compounds using durability parameters, Constr. Build. Mater. 148 (2017) 538–547.

https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.055.

[18] M. Tiznobaik, M.T. Bassuoni, Investigation into enhancing and evaluating curing efficiency of joints in concrete pavements, Road Mater. Pavement Des. 0 (2017) 1–17.

https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1415219.

تأثیر واکنش قلیایی– سیلیسی بر خواص مکانیکی بتن

مریم عباسیان طائب
دانش آموخته گروه مهندسی عمران
دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

فریدون رضایی
دانشیار گروه مهندسی عمران
دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان
عضو حقیقی انجمن بتن ایران

ابراهیم قیاسوند
استادیار گروه مهندسی عمران
دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان
عضو حقیقی انجمن بتن ایران

چکیده

واکنش قلیایی- سیلیسی به عنوان یکی از عوامل اصلی تخریب سازه‌های بتنی در طول زمان شناسایی شده است و تهدیدی جدی برای دوام آنها محسوب می‌شود. این واکنش باعث انبساط خمیر سیمان، ترک‌خوردگی و در نهایت کاهش مقاومت بتن می‌شود. هدف این پژوهش، بررسی تأثیر واکنش‌زایی قلیایی- سیلیسی سنگ‌دانه‌های یکی از معادن کشور بر خواص مکانیکی بتن است. در این راستا، تعدادی آزمونه‌ی مکعبی، استوانه‌ای و منشوری با طرح مخلوط‌های بتنی با نسبت‌های آب به سیمان ۰/۴۵، ۰/۵۰ و ۰/۵۵ تهیه و به مدت ۶ ماه در محلول سدیم هیدروکسید با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. در طول این مدت، میزان انبساط ایجاد شده در هر یک از مخلوط‌های بتنی ثبت شد. مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول گسیختگی این مخلوط‌ها نیز پس از ۳ و ۶ ماه غوطه‌وری اندازه‌گیری شد. نتایج این تحقیق نشان داد که خواص مکانیکی بتن با شدت‌های مختلف تحت تأثیر واکنش قلیایی- سیلیسی قرار گرفتند. بیش‌ترین کاهش مقاومت مربوط به مقاومت کششی و کمترین کاهش مربوط به مقاومت فشاری بود. همچنین مشخص شد که کاهش نسبت آب به سیمان همیشه منجر به کاهش افت مقاومت فشاری ناشی از واکنش قلیایی- سیلیسی نمی‌شود؛ بلکه یک نسبت بهینه آب به سیمان برای کنترل افت مقاومت فشاری وجود دارد. علاوه بر این، هرچند کاهش نسبت آب به سیمان توانست افت مقاومت کششی بتن‌های مستعد واکنش قلیایی- سیلیسی را کنترل کند، اما در بتن‌هایی با نسبت آب به سیمان زیاد که به طور ذاتی دارای مقاومت کمتری هستند، این اثر کمرنگ‌تر بود.

کلمات کلیدی: واکنش قلیایی- سیلیسی، نسبت آب به سیمان، انبساط، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مدول گسیختگی

۱- مقدمه

واکنش قلیایی– سیلیسی پدیده‌ای مخرب است که بتدریج بین قلیایی‌های سیمان و سنگ‌دانه‌های فعال سیلیسی اتفاق می‌افتد. وقوع این واکنش موجب تولید ژل خاصی در بتن می‌شود که تمایل زیادی به جذب آب دارد و با جذب آن متورم می‌شود و باعث ایجاد فشار به خمیر سیمان می‌شود که به‌تدریج ترک‌هایی در بتن ایجاد می‌کند [۱ و۲]. این ترک‌ها باعث تضعیف بتن می‌شوند و تأثیر نامطلوبی بر ویژگی‌های مکانیکی و دوام بتن

دارنـد[۳]. البتـه مشخصـات مکـانیکی و دوام بـتن بـا توجـه بـه نـوع سـنگ‌دانـه‌هـای واکـنش‌زا، شـرایط و کیفیـت و شـدت واکـنش، تحـت تـأثیر قـرار مـی‌گیـرد[۴]. انـدازه‌گیـری تغییـرات مکـانیکی ایجـاد شـده ناشـی از واکـنش قلیـایی- سیلیسـی مـی‌توانـد نمایـانگر تصـویری واضـح‌تـر از تـأثیرات ایـن واکـنش بـر تخریـب داخلـی بـتن باشـد [۵]. تحقیقـات متعـددی در مـورد تـأثیر ایـن واکـنش بـر مـدول الاستیسـیته، مقاومـت کششـی، فشـاری و خمشـی بـتن انجـام شـده اسـت. اغلـب ایـن مطالعـات در شـرایط تسـریع شـده، یعنـی در دمـا و قلیاییـت زیـاد، صـورت گرفتـه‌انـد. اگرچـه انتظـار مـی‌رود کـه انجـام آزمـایش‌هـا در شـرایط غیرتسـریع شـده بـه نتـایج واقعـی‌تـری منجـر شـود، امـا بـا ایـن وجـود، رابطـه معنـاداری بـین واکـنش قلیـایی- سیلیسـی و برخـی از ایـن مشخصـات مکـانیکی گـزارش شـده اسـت. مـرور بـر تحقیقـات [۶] حـاکی از آن اسـت کـه اغلـب مشخصـات مکـانیکی تحـت تـأثیر ایـن واکـنش کـاهش مـی‌یابـد. البتـه برخـی مشخصـات، رفتـار یکنـواختی در طـول واکـنش نشـان نمـی‌دهنـد. رینهـارد و همکـاران [۷] در سـال ۲۰۱۸، تـأثیر واکـنش قلیـایی- سیلیسـی نـوعی سـنگ‌دانـه بـا سـرعت واکـنش‌زایـی کـم و بـا منشـاء کـوارتز را روی مشخصـات مکـانیکی شـامل مقاومـت فشـاری، کششـی برزیلـی و مـدول الاستیسـیته اسـتاتیکی بررسـی کردنـد. نتـایج نشـان داد، مقاومـت فشـاری بـا گـذر زمـان افـزایش یافـت. امـا مقاومـت کششـی در مقایسـه بـا ابتـدای آزمـایش کـاهش یافـت و ایـن کـاهش در طـول زمـان متفـاوت بـود، بـه طـوری کـه در برخـی سـنین، بخشـی از ایـن افـت مقاومـت بازیـابی شـد. بنـابراین، مقاومـت کششـی نسـبت بـه مقاومـت فشـاری، شـاخص بهتـری بـرای ارزیـابی واکـنش قلیـایی- سیلیسـی بـه شـمار مـی‌آیـد. رفتـار مـدول الاستیسـیته اسـتاتیکی نیـز در طـول زمـان متفـاوت بـود؛ امـا عمومـاً در سـن کـم افزایشـی و بعـداً کاهشـی بـود. دیـاب و همکـاران [۴] در سـال ۲۰۲۰ مطالعـه‌ای بـر روی همبسـتگی بـین انبسـاط ناشـی از واکـنش قلیـایی- سیلیسـی و مشخصـات مکـانیکی و شـاخص‌هـای دوام بـتن سـخت شـده انجـام دادنـد. نتـایج ایـن پـژوهش نشـان داد کـه مقاومـت فشـاری و کششـی بـا گذشـت زمـان کـاهش یافـت و هـر دو بـا نـرخ یکسـانی افـت کردنـد. بـا پیشـرفت انبسـاط، ایـن کـاهش بسـیار چشـمگیرتر شـد. همچنـین، همبسـتگی‌هـای خطـی بـین انبسـاط بـا مـدول الاستیسـیته و نسـبت پواسـون مشـاهده شـد. هفسـی و همکـاران [۸] در سـال ۲۰۲۱ تـأثیر واکـنش قلیـایی- سیلیسـی بـر مشخصـات مکـانیکی بـتن، از جملـه مقاومـت فشـاری، خمشـی، کششـی برزیلـی، مـدول الاستیسـیته و مقاومـت پیوسـتگی را مـورد بررسـی قـرار دادنـد. نتـایج نشـان داد کـه انبسـاط بـیش از ۰/۰۴ درصـد، منجـر بـه افـت قابـل تـوجهی در مشخصـات مکـانیکی بـتن شـد، البتـه ایـن افـت بـا نـرخ‌هـای متفـاوتی همـراه بـود. در بـین مشخصـات مکـانیکی مـورد مطالعـه، مقاومـت پیوسـتگی بیشـترین میـزان زوال را داشـت. ایـن امـر مـی‌توانـد ناشـی از بـاز شـدن تـرک‌هـا بـا پیشـرفت واکـنش قلیـایی- سیلیسـی باشـد. بنـابراین بـا افـزایش انبسـاط، پیوسـتگی بـین بـتن و میلگـرد بـیش‌تـر زایـل مـی‌شـود. نسـبت افـت مقـاومتی ایجـاد شـده ناشـی از انبسـاط ۰/۱۰ درصـد بـه افـت مقـاومتی ناشـی از انبسـاط ۰/۰۴ درصـد، در مـورد مقاومـت پیوسـتگی ۳/۲ و در مـورد سـایر مشخصـات مکـانیکی بـین ۱/۴و ۲/۱ بود.

همـانطور کـه اشـاره شـد، تحقیقـات پیشـین نشـان داد کـه انبسـاط ایجـاد شـده ناشـی از واکـنش قلیـایی- سیلیسـی بـا تضـعیف مشخصـات مکـانیکی بـتن در ارتبـاط اسـت. لـذا در ایـن پـژوهش، سـعی بـر آن اسـت

که میزان تأثیرگذاری این واکنش مخرب بر مشخصات مکانیکی بتن شامل مقاومت فشاری، کششی و مدول گسیختگی بررسی شود. بی‌شک نتیجه این مطالعه در تصمیم‌گیری برای مصرف یا عدم مصرف سنگ‌دانه واکنش‌زا در تهیه بتن که لاجرم پر مصرف‌ترین مصالح در ساخت و سازهای جهان امروز، بخصوص سازه‌های حجیم و زیربنایی بشمار می‌رود، مفید می‌باشد. در این راستا، چهار مخلوط بتنی با استفاده از سنگ‌دانه‌های واکنش‌زا از یکی از معادن کشور و با نسبت‌های آب به سیمان مختلف (۰/۴۵، ۰/۵ و ۰/۵۵) در آزمایشگاه تهیه شد. سپس مقاومت فشاری، کششی، مدول گسیختگی و میزان انبساط ایجاد شده در بتن آسیب‌دیده اندازه‌گیری شد.

۲- برنامه‌ی آزمایشگاهی

روش انجام این پژوهش تجربی بود و نیاز به انجام آزمایش‌هایی در محیط آزمایشگاه داشت. برای این منظور، مصالح لازم جهت ساخت مخلوط بتن، شامل سیمان و سنگ‌دانه‌های مناسب، تهیه شد. سپس مخلوط بتن بر اساس روش استاندارد ملی ایران[۹] آماده گردید و نمونه‌های آزمایشگاهی بتن‌ریزی شدند. از آنجا که وقوع واکنش قلیایی-سیلیسی به گرما، رطوبت و قلیایی کافی نیاز دارد[۱۰]، نمونه‌های ساخته شده برای مدتی در محیطی شبیه‌سازی شده قرار گرفتند تا این واکنش به طور کامل رخ دهد. در طول این مدت، وضعیت نمونه‌ها به‌طور مداوم رصد و بررسی می‌شد. در نهایت، آزمایش‌های اندازه‌گیری خصوصیات مکانیکی بتن در یکی از آزمایشگاه‌های دانشگاه بوعلی‌سینا واقع در دانشکده فنی مهندسی کبودرآهنگ انجام شد.

۲-۱- مشخصات مصالح و طرح مخلوط‌های بتن

برای تهیه بتن، از سیمان نوع دو کارخانه‌ی هگمتانه همدان با قلیایی معادل ۰/۶۵ درصد (Na_2O +0.658 K_2O) استفاده شد. ترکیب شیمیایی سیمان در جدول ۱ نشان داده شده‌است.

جدول ۱- خصوصیات شیمیایی سیمان

ترکیب	مقدار برحسب درصد
SiO_2	۲۱/۸۱
Al_2O_3	۴/۵۲
Fe_2O_3	۳/۶۹
CaO	۶۳/۶۴
MgO	۱/۴۸
Na_2O	۰/۴۲
K_2O	۰/۳۵
TiO_2	۰/۱۵
SO_3	۲/۲۶
LOI	۱/۴

سنگ‌دانه‌ی شکسته واکنش‌پذیر به صورت مخلوطی از ریزدانه و درشت‌دانه از یک معدن در دامغان (شرکت ماسه سرای البرز) و سنگ‌دانه‌ی شکسته غیر واکنش‌زا به صورت مخلوطی از ریزدانه و درشت‌دانه از یک معدن در همدان تهیه شد. مشخصات فیزیکی سنگ‌دانه‌ها در جدول ۲ درج شده‌است. حداکثر اندازه‌ی سنگ‌دانه‌ی واکنش‌زا و غیر واکنش‌زا ۱۹ میلی‌متر و ضریب نرمی ترکیب شن و ماسه آن‌ها ۴/۸۵ بود. مقادیر مانده روی هر الک در جدول ۳ نشان داده شده‌است.

جدول ۲- مشخصات فیزیکی سنگ‌دانه

سنگ‌دانه		جذب آب (٪)	چگالی اشباع با سطح خشک	شکستگی (٪)
سنگ‌دانه واکنش‌زا	ماسه	۲/۲	۲/۵۱	–
	شن	۱/۹	۲/۵۳	۲۰
سنگ‌دانه غیر واکنش‌زا	ماسه	۲/۱۵	۲/۵۵	–
	شن	۱/۳	۲/۶۳	۷۰

جدول ۳- مقادیر مانده روی هر الک

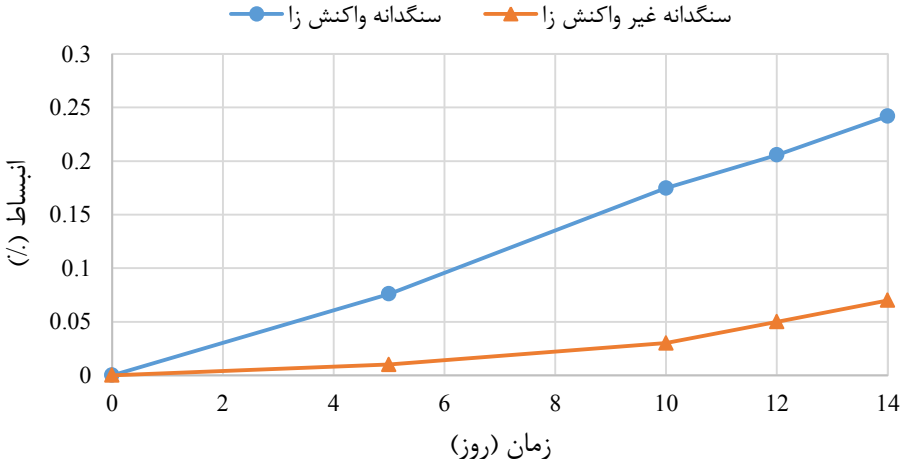
نام الک	قطر چشمه‌های الک (میلی‌متر)	درصد عبوری تجمعی (٪)	درصد مانده تجمعی (٪)
۳/۴	۱۹	۱۰۰	۰
۱/۲	۱۲/۵	۸۳	۱۷
۳/۸	۹/۵	۷۳	۲۷
۴	۴/۷۵	۵۲	۴۸
۸	۲/۳۸	۳۷	۶۳
۱۶	۱/۱۹	۲۵	۷۵
۳۰	۰/۶	۱۶	۸۴
۵۰	۰/۳	۹	۹۱
۱۰۰	۰/۱۵	۴	۹۶
۲۰۰	۰/۰۷۵	۰	۱۰۰

جهت ارزیابی واکنش‌زایی سنگ‌دانه‌های مصرفی، آزمایش منشور ملات تسریع‌شده مطابق با استاندارد ASTM C1260 [۱۱] انجام شد. به این منظور، آزمونه‌های منشوری ملات با ابعاد ۲۸۵×۲۵/۴×۲۵/۴ میلی‌متر تهیه و جهت تسریع واکنش، در محلول یک مولار سدیم هیدروکسید با دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد غوطه‌ور شدند. مطابق با استاندارد ASTM C1260، چنانچه انبساط ایجاد شده در نمونه‌های مورد آزمایش پس از طی ۱۴ روز بیش‌تر از ۰/۲ درصد باشد، سنگ‌دانه واکنش‌زا و اگر کم‌تر از ۰/۱ باشد، غیر واکنش‌زا تلقی می‌شود. مقدار انبساط اندازه‌گیری شده برای دو سنگ‌دانه‌ی دامغان و همدان در شکل ۱ نشان داده شده‌است. همانطور که مشاهده می‌شود، سنگ‌دانه‌ی دامغان واکنش‌زا و سنگ‌دانه‌ی همدان غیر واکنش‌زا می‌باشد.

با توجه به مشخصات بتن‌های متداول مصرفی در ساخت و سازهای معمول، چهار نوع بتن همگی با عیار سیمان ۳۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب و مقاومت هدف ۳۰ مگاپاسکال و نسبت‌های آب به سیمان ۰/۴۵، ۰/۵ و ۰/۵۵ و ترکیبات مختلف سنگ‌دانه‌ی واکنش‌زا و غیر واکنش‌زا بر اساس روش استاندارد ملی ایران [۹] تهیه شد. جزییات طرح مخلوط‌ها در جدول ۴ خلاصه شده‌است. لازم به ذکر است به جهت افزایش قلیاییت مخلوط بتنی مقداری پودر Na_2O با خلوص ۹۹ درصد در آب مخلوط حل شد.

جدول ۴- جزییات طرح مخلوط مورد استفاده در آزمایشگاه (kg/m^3)

شماره	نام مخلوط	W/C	سیمان	آب	شن	ماسه	Na_2O
			kg/m^3				
۱	N-0.5	۰/۵	۳۸۰	۱۹۰	۸۴۰	۹۱۸	–
۲	R-0.5	۰/۵	۳۸۰	۱۹۰	۸۲۲	۸۹۰	۳/۹۳
۳	R-0.45	۰/۴۵	۳۸۰	۱۷۱	۸۴۵	۹۱۸	۳/۹۳
۴	R-0.55	۰/۵۵	۳۸۰	۲۰۹	۷۹۷	۸۶۵	۳/۹۳



شکل ۱- نتایج آزمایش منشور ملات تسریع شده

۲-۲- ساخت بتن و نمونه‌های آزمایشی

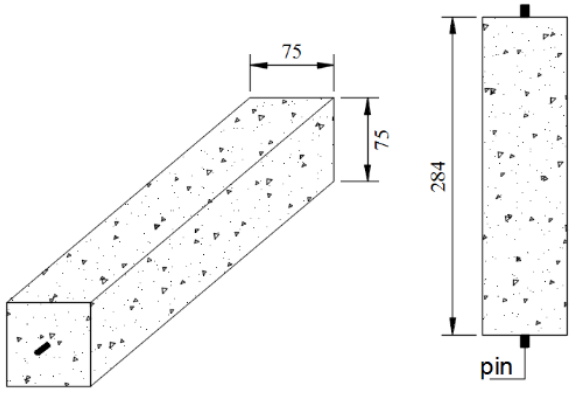
بتن در آزمایشگاه با کمک مخلوط‌کن برقی ساخته، در قالب ریخته و با تخماق متراکم شد. لازم به ذکر است پیش از ریختن بتن، کلیه قالب‌ها با روغن چرب شد. قالب‌های مورد استفاده و نمونه‌های بتن‌ریزی شده در شکل ۲ نشان داده شده است. جهت عدم جذب آب و تغییرشکل ندادن قالب‌ها از ورق‌های فومیزه PVC به ضخامت ۸ و ۱۶ میلی‌متر برای ساخت قالب‌های منشوری استفاده شد. بلافاصله پس از عملیات تراکم، سطح نمونه‌های بتنی تازه با نایلون پوشیده شد. پس از ۲۴ ساعت تمام نمونه‌ها از قالب خارج و داخل یک لایه چتایی که مرتباً رطوبت رسانی می‌شد و سپس یک لایه پلاستیک پیچیده شد. نمونه‌ها به مدت ۷ روز در اتاقی با دمای ۲۳±۲ درجه سانتی‌گراد به شرح فوق عمل‌آوری شد. لازم به توضیح است که برای عمل‌آوری نمونه‌ها از روش غرقاب کردن اجتناب شد؛ چرا که در صورت غرقاب کردن نمونه‌ها، به دلیل اختلاف غلظت یون‌های منفی در محلول منفذی و آب عمل‌آوری، یون هیدروکسید موجود در محلول منفذی شستشو پیداکرده و به بیرون از نمونه‌ها تراوش می‌کرد.

الف

ب

شکل ۲- قالب‌های مورد استفاده برای بتن‌ریزی (الف) آزمونه‌های مکعبی و استوانه ای (ب) آزمونه‌های نمونه‌های منشوری

برای اندازه‌گیری انبساط ایجاد شده در هریک از طرح مخلوط‌های بتنی ناشی از واکنش قلیایی- سیلیسی، به ازای هر طرح شش آزمونه‌ی منشوری مطابق با شکل ۳ ساخته شد. در طرفین این آزمونه‌ها دو پین فولادی ضدزنگ، برای اندازه‌گیری تغییرات طول، داخل بتن مدفون شده‌است. لازم به ذکر است، از همین آزمونه‌ها برای اندازه‌گیری مدول گسیختگی نیز، استفاده شد. در مجموع ۲۴ آزمونه‌ی منشوری ساخته شد.



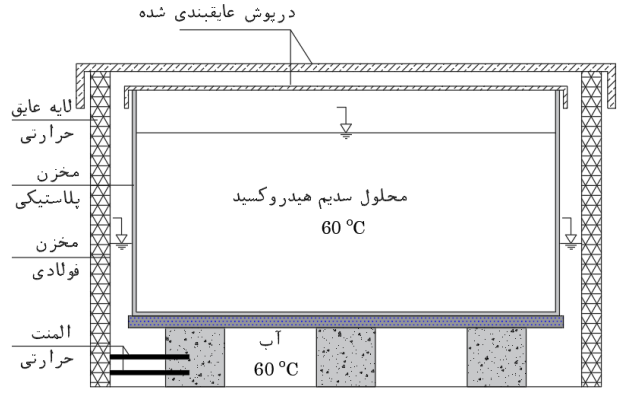
شکل ۳- جزییات نمونه‌ی منشوری برای اندازه‌گیری انبساط ناشی از واکنش (ابعاد برحسب میلی‌متر)

برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری و کششی هریک از طرح مخلوط‌های بتنی نیز به ترتیب شش آزمونه‌ی مکعبی با ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر و شش آزمونه‌ی استوانه‌ای با ابعاد ۱۰۰×۲۰۰ میلی‌متر بتن‌ریزی شد. روش‌های مختلفی، همچون آزمایش کشش مستقیم، غیر مستقیم و کشش ناشی از خمش، برای ارزیابی مقاومت کششی وجود دارد. در این تحقیق آزمایش کشش غیر مستقیم و کشش ناشی از خمش استفاده شد، چرا که بر اساس یافته‌های پیشین [۱۲]، واکنش قلیایی بر روی مقاومت کشش مستقیم تأثیر کم‌تری داشت. در مجموع ۲۴ آزمونه‌ی مکعبی و ۲۴ آزمونه‌ی استوانه‌ای ساخته شد.

۲-۳- نحوه اعمال تسریع در واکنش قلیایی- سیلیسی

بعد از ۷ روز عمل‌آوری، نمونه‌ها به مخزن ویژه‌ی تسریع واکنش قلیایی- سیلیسی منتقل شدند. جزییات مخزن در شکل ۴ نمایش داده شده است. این مخزن از دو مخزن فلزی و پلاستیکی تشکیل شده است. مخزن پلاستیکی درون مخزن فلزی و بر روی سکویی متشکل از ترکیب قطعات سنگی و بلوک‌های بتنی قرار داشت. فضای بین دو

مخـزن پلاسـتیکی و فلـزی بـا آب تـا تـراز مشـخص شـده در تصویر پـر شـد. آب بـین دو مخـزن پلاسـتیکی و فلـزی توسـط دو المنـت حرارتـی قابـل تنظـیم کـه در کـف مخـزن فلـزی تعبیه شده بود، پیوسـته گـرم مـی‌شـد تـا دمـا و رطوبـت مـورد نظر تأمین گـردد. بـرای جلـوگیری از اتـلاف دمـا، بدنـه مخـزن فلـزی بـه کمـک پوشـش آلومینیـومی و پشـم شیشـه بخـوبی عـایق‌بنـدی شـده بـود. همـانطور کـه در شـکل ۴ مشـاهده می‌شود، نمونـه‌هـا در مخـزن پلاسـتیکی و داخـل محلـول یـک مـولار سـدیم هیدروکسـید بـا دمـای بـالا غوطـه‌ور بودنـد تـا واکـنش قلیـایی- سیلیسـی تسـریع گـردد. پـس از قـراردادن نمونـه‌هـا درون مخـزن، درپوشـی روی آن قـرار گرفـت تـا محـیط داخـل و خـارج مخـزن کـاملاً از هـم جداسـازی شـود. در مورد دمـای بـالای محـیط آزمـایش بایـد اشـاره داشـت، کـه افـزایش دمـای محـیط تـأثیر قابـل‌تـوجهی بـر نتـایج واکـنش قلیـایی- سیلیسـی نـدارد و صـرفاً سـرعت واکـنش را افـزایش می‌دهد[۳]. لذا در ایـن پـژوهش دمـای ۶۰ درجـه سـانتی‌گـراد برای تسریع واکنش در نظر گرفته شد.



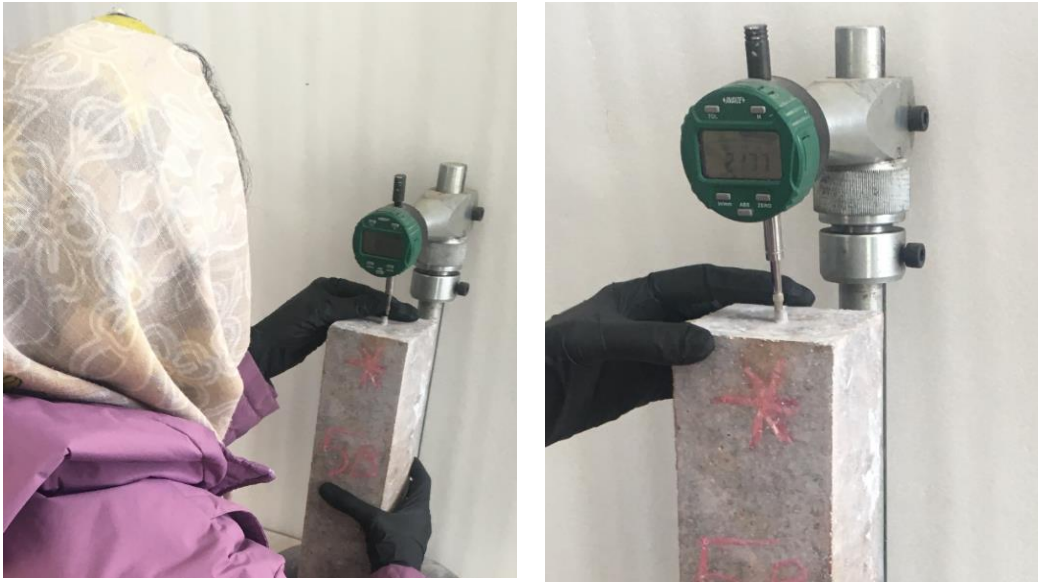
الف

ب

شکل ۴- مخزن ویژه‌ی تسریع واکنش قلیایی- سیلیسی (الف) شماتیک (ب) واقعی

۲-۴- روش انجام آزمایش‌ها

مهمتـرین شاخصـه بـرای اطـلاع از وقـوع واکـنش قلیـایی- سیلیسـی، انـدازه‌گیـری انبسـاط ایجـاد شـده در بـتن مـی‌باشـد کـه معیـار بسـیاری از اسـتانداردها بـرای ارزیـابی واکـنش‌زایـی سـنگ‌دانـه‌هـا نیـز مـی‌باشـد [۴]. بـرای انـدازه‌گیـری انبسـاط ایجـاد شـده در هریـک از طـرح مخلـوط‌هـای بتنـی در دوران غوطـه‌وری، از آزمونـه‌هـای منشـوری بـا ابعـاد ۷۵×۷۵×۲۸۴ میلـی‌متـر، مطـابق بـا اسـتاندارد ASTMC 1293 [۱۴]، اسـتفاده شـد. بـه فاصـله هـر ۷ تـا ۱۴ روز یکبـار آزمونـه‌هـای منشـوری از مخـزن ویـژه واکـنش قلیـایی- سیلیسـی خـارج مـی‌شـد. آزمونـه‌هـای مـذکور بـه مـدت حـداقل ۸ سـاعت در محـیط آزمایشـگاه قـرار مـی‌گرفـت تـا خنـک و هـم‌دمـای محـیط آزمایشـگاه شـوند. سـپس طـول آزمونـه‌هـا بـه کمـک وسـیله انـدازه‌گیـری بـا دقـت ۱ میکـرون مطـابق بـا شـکل ۵ انـدازه‌گیـری مـی‌شـد. لازم بـه ذکـر اسـت، پـس از اتمـام دوره‌ی غوطـه‌وری از همـین آزمونـه‌هـا بـرای انـدازه‌گیـری مـدول گسـیختگی نیز، استفاده شد.



شکل ۵- نحوه‌ی اندازه‌گیری تغییرات طول نمونه

مقاومت فشاری بتن مطابق با استاندارد BSEN12390-3 [۱۵] و با استفاده از آزمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. مقاومت کششی بتن به روش دونیم شدن (آزمایش برزیلی) مطابق با استاندارد ASTM C496 [۱۶] و با استفاده از آزمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد ۱۰۰×۲۰۰ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. مدول گسیختگی بتن نیز مطابق با استاندارد ASTM C293 [۱۷] و با استفاده از آزمونه‌های منشوری با ابعاد ۷۵×۷۵×۲۸۴ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. نحوه انجام آزمایش در شکل ۶ نشان داده شده‌است.

شکل ۶- نحوه‌ی اندازه‌گیری مدول گسیختگی بتن

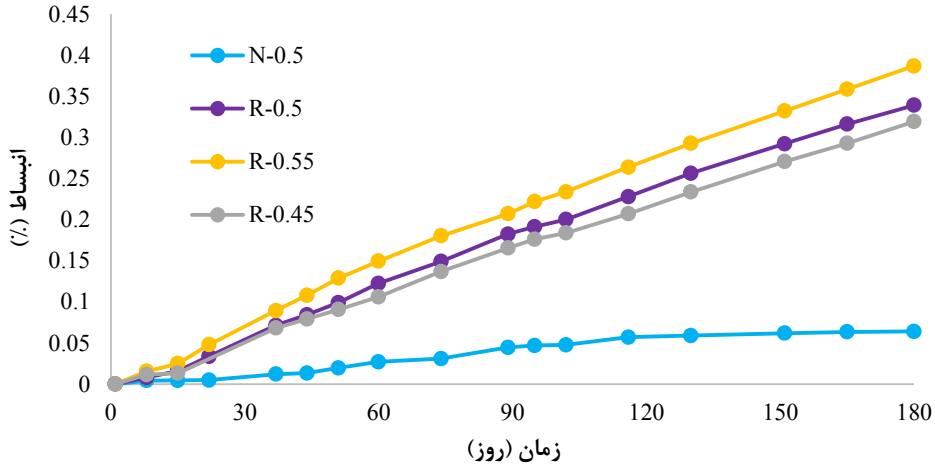
۳- بحث و بررسی نتایج

۳-۱- انبساط نمونه‌ها

انبساط ایجاد شده در نمونه‌های منشوری در شکل۷ نشان داده شده است. لازم به ذکر است، هر قرائت میانگین سه آزمونه می‌باشد. اندازه‌گیری انبساط تا سن ۱۸۰ روز به طور مستمر ادامه داشت. با دقت در نتایج ارائه شده در این شکل، مشاهده می‌شود که از همان آغاز غوطه‌وری آزمونه‌ها در محلول سود، در کلیه آن‌ها انبساط ایجاد شده است و این انبساط سیر صعودی دارد. حتی انبساط در طرح مخلوط شاهد (N-0.5) نیز رخ داد که میزان آن در مقایسه با سایر طرح‌ها بسیار ناچیز بود. همانطور که در شکل ۱ ملاحظه شد، هرچند سنگ‌دانه‌های همدان از نظر استاندارد ASTM C1260 واکنش ناپذیر تلقی می‌شد اما به هر حال مقداری انبساط داشت. بنابراین طبیعی است که استفاده از چنین سنگ‌دانه‌ای در مخلوط بتنی که در شرایط محیطی تسریع شده قرارگرفته است، منجر به انبساط ناچیز بتن شود. انبساط نهایی ایجاد شده در طرح مخلوط‌های N-0.5 و R-0.5 به ترتیب ۰/۰۶۴ و ۰/۳۳۹درصد می‌باشد. استفاده از سنگ‌دانه واکنش‌زا در مخلوط بتن منجر به افزایش انبساط به مقدار ۵/۳ برابر شده است. بنابراین نتایج پژوهش حاضر، حاکی از آن است که مصرف سنگ‌دانه‌ی واکنش‌زا در مخلوط بتن منجر به وقوع واکنش قلیایی- سیلیسی و تولید ژل سیلیکاتی شده است. در ادامه با جذب آب توسط این ژل و متورم شدن آن، در نمونه‌های بتنی مورد مطالعه افزایش طول ایجاد شده است.

با دقت در شکل ۷ بوضوح روشن است پس از ۱۰۰ روز از آغاز غوطه‌وری نرخ انبساط ایجاد شده در هریک از طرح مخلوط‌ها تقریباً ثابت است. به عبارت دیگر نوسانات قابل ملاحظه‌ای در افزایش انبساط (شیب) ملاحظه نمی‌شود. همچنین نرخ انبساط ایجاد شده (شیب نمودار) در ن طرح مخلوط‌های مختلف، متفاوت است. بیش‌ترین نرخ انبساط مربوط به طرح مخلوط R-0.55 و بعد از آن طرح مخلوط R-0.5 می‌باشد. کم‌ترین نرخ هم به طرح مخلوط R-0.45 تعلق دارد.

انبساط نهایی در طرح مخلوط‌های R-0.45، R-0.5 و R-0.55 به ترتیب ۰/۳۲۰، ۰/۳۳۹ و ۰/۳۸۷ درصد می‌باشد. پس با افزایش نسبت آب به سیمان، انبساط ایجاد شده در طرح مخلوط‌های حاوی سنگ‌دانه‌ی واکنش‌زا افزایش یافته است. افزایش نسبت آب به سیمان از ۰/۴۵ به ۰/۵ و از ۰/۵ به ۰/۵۵ به ترتیب منجر به افزایش ۶ و ۱۴ درصد انبساط در این طرح‌ها شده است. بنابراین هرچند نسبت آب به سیمان به مقدار یکسانی اضافه شده است اما تفاوت در میزان انبساط ایجاد شده یکسان نیست. به بیان دیگر با افزایش نسبت آب به سیمان در مخلوط‌های مورد بررسی، انبساط ایجاد شده ناشی از واکنش قلیایی- سیلیسی تشدید شده است و این افزایش انبساط، با افزایش نسبت آب به سیمان، رابطه خطی ندارد.



شکل ۷- انبساط ایجاد شده در نمونه‌های مورد آزمایش

ترک‌های سطحی ایجاد شده در آزمونه‌های منشوری ناشی از واکنش قلیایی- سیلیسی پس از ۶ ماه غوطه‌وری در محلول سود در شکل ۸ نشان داده شده است. وسعت و مقدار ترک‌ها با انبساط آزمونه‌ها رابطه مستقیم دارد. علاوه بر این تصویربرداری‌های دوره‌ای نشان داد، این ترک‌ها از لبه‌های آزمونه شروع شده و به سمت وسط وجوه پیشروی کرده است. با دقت در شکل ۸، مشاهده می‌شود که ترک‌های ظاهر شده در سطح آزمونه‌ها، الگوی نقشه‌وار و جهات تصادفی دارد، که مؤید مطالعات پیشین [۸ و۱۸] می‌باشد.

شکل ۸- ترک‌های ایجاد شده در نمونه‌های مورد آزمایش

۳-۲- مقاومت‌های مکانیکی بتن

نتایج مقاومت فشاری، کششی و مدول گسیختگی هریک از طرح مخلوط‌ها پس از ۹۰ و ۱۸۰ روز غوطه‌وری در محلول سود در جدول ۵ خلاصه شده است. همانطور که بر اساس مطالعات پیشین [۸،۶،۴ و۱۹] انتظار می‌رفت، در این پژوهش نیز، مقاومت فشاری و کششی و مدول گسیختگی تمام آزمونه‌های مورد مطالعه در مقایسه با آزمونه مشابه خود با گذر زمان و افزایش انبساط ناشی از واکنش قلیایی- سیلیسی کاهش پیدا کرده است. البته مقدار افت مقاومت در آزمونه‌های مختلف متفاوت است.

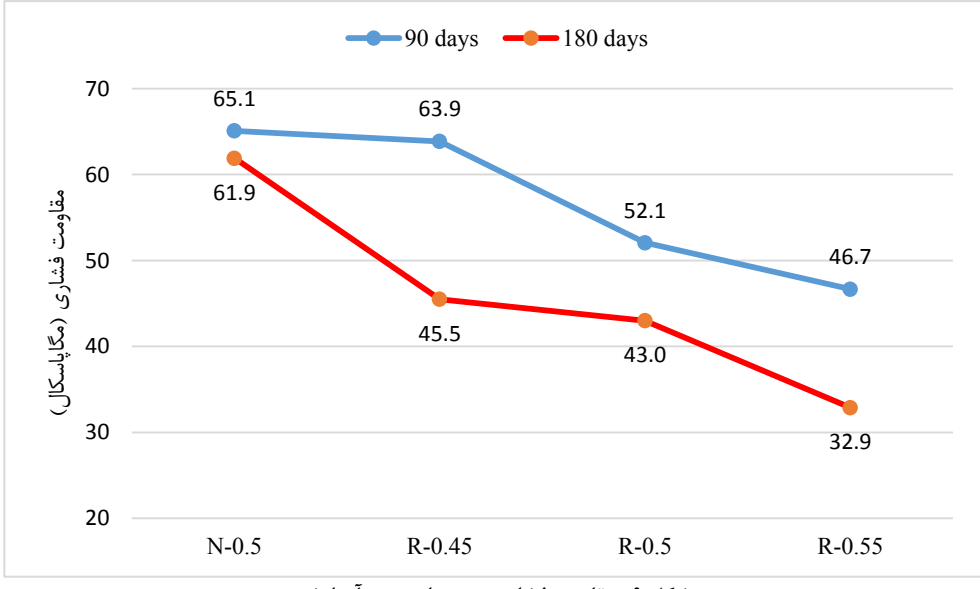
جدول ۵- مقاومت های مکانیکی بتن(مگاپاسکال)

شماره	نام مخلوط	مقاومت فشاری (نمونه مکعبی)		مقاومت کششی		مدول گسیختگی	
		۹۰ روز	۱۸۰ روز	۹۰ روز	۱۸۰ روز	۹۰ روز	۱۸۰ روز
۱	N-0.5	۶۵/۰۹	۶۱/۹	۳/۸۶	۳/۷	۸/۲۵	۷/۸۳
۲	R-0.5	۵۲/۰۷	۴۲/۹۹	۲/۵۶	۲/۰۳	۵/۸۵	۴/۸
۳	R-0.45	۶۳/۸۵	۴۵/۵	۳/۱	۲/۴۱	۶/۶	۵/۲۱
۴	R-0.55	۴۶/۶۶	۳۲/۸۸	۲/۱۷	۱/۹۳	۴/۹	۴/۲۶
* هر کدام از اعداد مندرج در جدول میانگین سه آزمونه هستند.							

۳-۲-۱- مقاومت فشاری بتن

همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، مقاومت فشاری طرح مخلوط‌های N-0.5 و R-0.5 به

ترتیب پس از ۹۰ روز غوطه‌وری در محلول سود به ترتیب ۶۵/۱، و ۵۲/۱ و پس از ۱۸۰ روز غوطه‌وری به ترتیب ۶۱/۹ و ۴۳ مگاپاسکال می‌باشد.



شکل ۹- مقاومت فشاری نمونه‌های مورد آزمایش

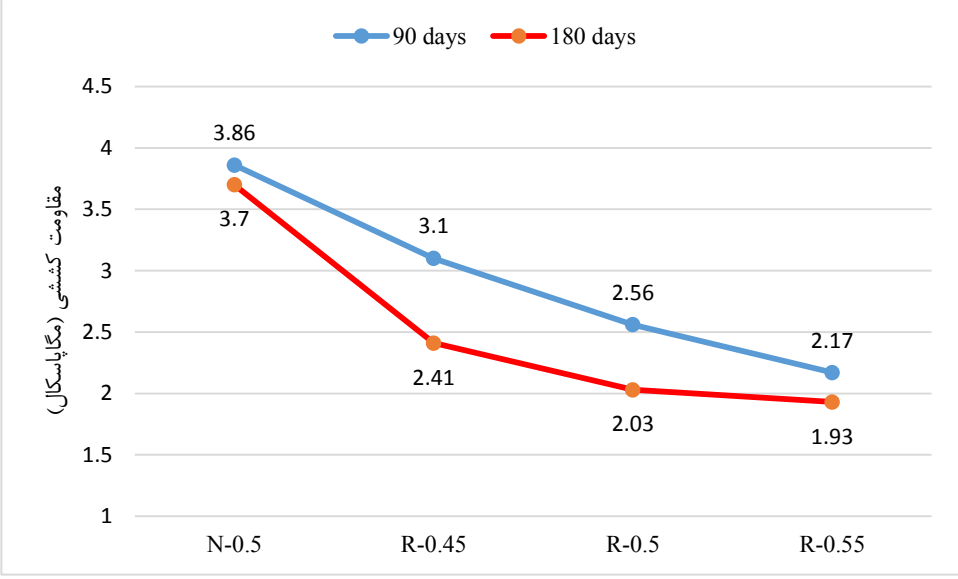
نتایج حاکی از آن است که استفاده از سنگدانه واکنش‌زا در مخلوط R-0.5 مقاومت فشاری بتن را در مقایسه با طرح مخلوط شاهد (N-0.5) در سن ۹۰ و ۱۸۰ روز به ترتیب مقدار ۲۰ و ۳۰/۵ درصد کاهش داده است. بنابراین ترک‌های داخلی ایجاد شده در بتن ناشی از انبساط ژل سیلیکاتی منجر به تضعیف مقاومت فشاری بتن شده است. و ضعف ایجاد شده به مرور زمان و افزایش بیش‌تر انبساط تشدید شده است.

مقاومت فشاری طرح مخلوط‌های R-0.45، R-0.5 و R-0.55 پس از ۹۰ روز غوطه‌وری در محلول سود به ترتیب ۶۳/۹، ۵۲/۱ و ۴۶/۷ و پس از ۱۸۰ روز غوطه‌وری به ترتیب ۴۵/۵، ۴۳ و ۳۲/۹ مگاپاسکال می‌باشد. یعنی با افزایش میزان واکنش از سن ۹۰ روز تا ۱۸۰ روز مقاومت فشاری هریک از این مخلوط‌ها به ترتیب ۲۹ و ۱۷ و ۳۰ درصد کاهش یافته است. همانطور که ملاحظه می‌شود، هرچند با افزایش میزان واکنش مقاومت فشاری همه مخلوط‌ها کاهش یافته است، اما مقدار این کاهش در مخلوط‌های بتن با نسبت‌های آب به سیمان مختلف متفاوت است و یک روند ثابت ندارد؛ طوری که کم‌ترین افت مقاومت فشاری در مخلوط بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۵ رخ داده است و در دو مخلوط بتن دیگر با نسبت‌های آب به سیمان ۰/۵۵ و ۰/۴۵ افت مقاومت بیش‌تر و تقریباً یکسان است. بنابراین کاهش هر چه بیش‌تر نسبت آب به سیمان برای کنترل افت مقاومت فشاری بتن ناشی از واکنش قلیایی- سیلیسی همواره مؤثرتر یا کارآمدتر نیست و همواره توصیه نمی‌شود، بلکه یک مقدار بهینه برای نسبت آب به سیمان وجود دارد. بنظر می‌رسد، در این پژوهش نسبت بهینه عددی بین ۰/۴۵ و ۰/۵ باشد.

۳-۲-۲- مقاومت کششی بتن

همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، مقاومت کششی طرح مخلوط‌های N-0.5 و R-0.5 به ترتیب پس از ۹۰ روز

غوطه‌وری در محلول سود به ترتیب ۳/۸۶ و ۲/۵۶ و در سن ۱۸۰ روز به ترتیب ۳/۷ و ۲/۰۳ مگاپاسکال می‌باشد.



شکل ۱۰- مقاومت کششی نمونه‌های مورد آزمایش

نتایج حاکی از آن است که استفاده از سنگدانه‌ی واکنش‌زا در مخلوط R-0.5 مقاومت کششی بتن را در مقایسه با طرح مخلوط شاهد (N-0.5) در سن ۹۰ روز به مقدار ۳۳/۷ درصد و در سن ۱۸۰ روز به مقدار ۴۵/۱ درصد کاهش داده است. بنابراین ترک‌های داخلی ایجاد شده در بتن ناشی از انبساط ژل سیلیکاتی منجر به تضعیف مقاومت کششی بتن شده است. و ضعف ایجاد شده به مرور زمان و افزایش بیش‌تر انبساط تشدید شده است.

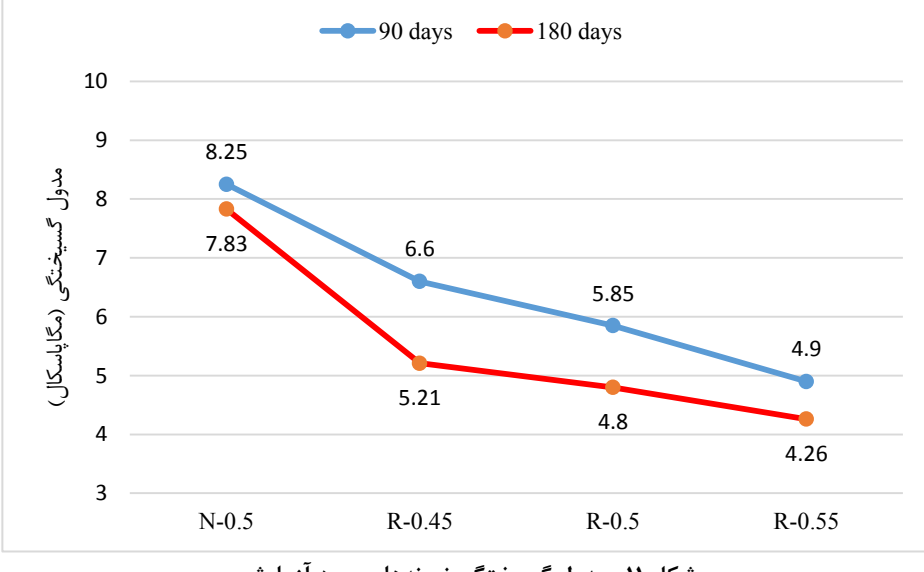
همچنین مقدار افت مقاومت کششی در مقایسه با مقدار افت مقاومت فشاری در تمام سنین بیش‌تر می‌باشد. بر خلاف مقاومت فشاری که در ابتدای واکنش افت زیادی ندارد، مقاومت کششی از همان ابتدای واکنش، مشابه مطالعات پیشین [۸ و۱۳] افت چشمگیری نشان داده است. در واقع انبساط ژل سیلیکاتی منجر به کاهش بیش‌تر مقاومت کششی در مقایسه با مقاومت فشاری بتن می‌شود و این کاهش مقاومت از همان سنین پایین مشهود است.

مقاومت کششی طرح مخلوط‌های R-0.45، R-0.5 و R-0.55 پس از ۹۰ روز غوطه‌وری در محلول سود به ترتیب ۳/۱، ۲/۵۶ و ۲/۱۷ مگاپاسکال و پس از ۱۸۰ روز استغراق به ترتیب ۲/۴۱، ۲/۰۳ و ۱/۹۳ می‌باشد. یعنی با افزایش میزان واکنش از سن ۹۰ روز تا ۱۸۰ روز مقاومت کششی هریک از این مخلوط‌ها به ترتیب ۲۲ و ۲۱ و ۱۱ درصد کاهش یافته است. همانطور که مشاهده می‌شود، افت مقاومت کششی از سن ۹۰ روز تا ۱۸۰ روز به ازای نسبت‌های آب به سیمان مختلف متفاوت است؛ طوری که کم‌ترین افت مقاومت کششی در مخلوط بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۵۵ رخ داده است و در دو مخلوط بتن دیگر با نسبت‌های آب به سیمان ۰/۵ و ۰/۴۵ افت مقاومت بیش‌تر و تقریباً یکسان است. به نظر می‌رسد،

کاهش نسبت آب به سیمان در بتن‌های حاوی سنگ‌دانه‌های واکنش‌پذیر می‌تواند، افت مقاومت کششی را به تأخیر بیندازد. اما در مورد بتن‌های با نسبت آب به سیمان زیاد (برابر با ۰/۵۵) که مخلوط بتن ذاتاً دارای مقاومت کمی است، واکنش قلیایی-سیلیسی از همان سنین ابتدایی تأثیر داشته، به نحوی که بخش عمده افت مقاومت کششی قبل از سن ۹۰ روز اتفاق افتاده است.

۳-۲-۳- مدول گسیختگی بتن

همانطور که قبلاً اشاره شد، از آزمونه‌های منشوری علاوه بر اندازه‌گیری انبساط طول، برای اندازه‌گیری مدول گسیختگی بتن نیز استفاده شد. پس از اندازه‌گیری انبساط طول، این آزمونه‌ها تحت آزمایش بارگذاری خمش سه نقطه‌ای تیر قرار گرفتند. مدول گسیختگی هریک از طرح مخلوط‌ها در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، استفاده از سنگ‌دانه‌ی واکنش‌زا در مخلوط R-0.5 مدول گسیختگی بتن را در مقایسه با طرح مخلوط شاهد (N-0.5) در سن ۹۰ روز به مقدار ۲۹ درصد و در سن ۱۸۰ روز به مقدار ۳۸/۷ درصد کاهش داده است. بنابراین ترک‌های داخلی ایجاد شده در بتن ناشی از انبساط ژل سیلیکاتی منجر به تضعیف مدول گسیختگی بتن شده است. و ضعف ایجاد شده به مرور زمان و افزایش بیش‌تر انبساط تشدید شده است. از طرفی دقت در نتایج نشان می‌دهد، تغییرات مدول گسیختگی در طرح مخلوط‌های مورد مطالعه بیش‌تر به تغییرات مقاومت کششی شباهت دارد تا تغییرات مقاومت فشاری. چراکه مدول گسیختگی در واقع همان مقاومت کششی بتن تحت بارگذاری خمشی است.



شکل ۱۱- مدول گسیختگی نمونه‌های مورد آزمایش

مدول گسیختگی طرح مخلوط‌های R-0.45، R-0.5 و R-0.55 پس از ۹۰ روز غوطه‌وری در محلول سود به ترتیب ۶/۶، ۵/۸۵ و ۴/۹ مگاپاسکال و پس از ۱۸۰ روز استغراق به ترتیب ۵/۲۱، ۴/۸ و ۴/۲۶ مگاپاسکال می‌باشد. یعنی با افزایش میزان واکنش از سن ۹۰ روز تا ۱۸۰ روز، مدول

گسیختگی هریک از این مخلوط‌ها به ترتیب ۲۱ و ۱۸ و ۱۳ درصد کاهش یافته است. در اینجا هم به طرز مشابهی ملاحظه می‌شود که در گذر زمان و با وقوع واکنش قلیایی- سیلیسی، افت مدول گسیختگی در مخلوط‌های بتنی با نسبت‌های آب به سیمان مختلف متفاوت است؛ طوری که مخلوط بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۵۵ کم‌ترین افت را دارد و دو مخلوط دیگر با نسبت‌های آب به سیمان ۰/۵ و ۰/۴۵ افت مدول گسیختگی بیش‌تر و تقریباً یکسان دارند. بنابراین به دلیل مقاومت ذاتی کم‌تر مخلوط بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۵۵، اینجا هم بخش عمده‌ی افت مدول گسیختگی (همانند مقاومت کششی)، قبل از سن ۹۰ روز رخ داده است.

۴- نتیجه گیری

- هدف این پژوهش، بررسی تأثیر واکنش قلیایی- سیلیسی بر خواص مکانیکی بتن بود. در این راستا، تعدادی آزمونه‌ی مکعبی، استوانه‌ای و منشوری در چند طرح مخلوط بتن با نسبت‌های آب به سیمان ۰/۴۵، ۰/۵۰ و ۰/۵۵ ساخته شد و به مدت ۶ ماه در محلول سدیم هیدروکسید با غلظت یک مول بر لیتر و در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول گسیختگی این مخلوط‌های بتنی پس از ۳ و ۶ ماه غوطه‌وری در محلول سدیم هیدروکسید اندازه‌گیری شد. علاوه بر این، میزان انبساط ایجاد شده در طول دوره‌ی غوطه‌وری نیز ثبت گردید. اهم نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر است:
- وقوع واکنش قلیایی- سیلیسی با ایجاد انبساط در آزمونه‌های بتنی همراه بود. انبساط ایجاد شده در مخلوط بتنی R-0.5 مقدار ۵/۳ برابر انبساط طرح مخلوط شاهد بود.
- مقاومت فشاری، کششی و مدول گسیختگی مخلوط R-0.5 در مقایسه با N-0.5 پس از گذشت ۱۸۰ روز غوطه‌وری در محلول قلیایی به ترتیب مقدار ۳۰/۵، ۴۵/۱ و ۳۸/۷ درصد افت داشت. بنابراین میزان حساسیت و تأثیرپذیری هریک از مشخصات مکانیکی بتن نسبت به واکنش قلیایی- سیلیسی متفاوت بود.
- مقدار افت مقاومت فشاری از سن ۹۰ روز تا ۱۸۰ روز در طرح مخلوط‌های R-0.45، R-0.5 و R-0.55 به ترتیب ۲۹ و ۱۷ و ۳۰ درصد بود. بنابراین کاهش هر چه بیش‌تر نسبت آب به سیمان برای کنترل افت مقاومت فشاری بتن ناشی از واکنش قلیایی- سیلیسی همواره توصیه نمی‌شود، بلکه یک مقدار بهینه برای نسبت آب به سیمان وجود دارد.
- تغییرات و افت ایجاد شده در مقاومت کششی و مدول گسیختگی بتن تحت تأثیر واکنش قلیایی- سیلیسی در طرح مخلوط‌های مورد مطالعه روند مشابهی داشت.
- کمترین افت مقاومت کششی (یا مدول گسیختگی) از سن ۹۰ روز تا ۱۸۰ روز در مخلوط R-0.55 مشاهده شد، در حالی که دو مخلوط R-0.45 و R-0.5 افت مقاومت بیش‌تری را تجربه کردند و تقریباً یکسان بودند. به نظر می‌رسد، بخش عمده افت مقاومت کششی (یا مدول گسیختگی) در مخلوط R-0.55 قبل از ۹۰ روزگی رخ داده است.

- هرچند کاهش نسبت آب به سیمان در بتن‌های مستعد واکنش قلیایی- سیلیسی می‌تواند به کنترل افت مقاومت کششی بتن کمک کند، اما این روش در بتن‌هایی با نسبت آب به سیمان زیاد که به طور ذاتی دارای مقاومت کمتری هستند، تأثیر کمتری دارد.

مراجع

[1] *Figueira, R., Sousa, R., Coelho, L., Azenha, M., De Almeida, J., Jorge, P., Silva, C. (2019). "Alkali-silica reaction in concrete: Mechanisms, mitigation and test methods". Construction Building Materials, Vol. 222, pp 903-31.*

[2] *Schlangen, E., Çopuroglu, O. (2007). "Concrete damage due to alkali-silica reaction: A new method to determine the properties of expansive gel", Fracture mechanics of concrete concrete structures–high-performance concrete, brick-masonry environmental aspects. London: Taylor Francis Group, pp 1835-1841*

[3] *Fanijo, E. O., Kolawole, J. T., Almakrab, A. (2021). "Alkali-silica reaction (ASR) in concrete structures: Mechanisms, effects and evaluation test methods adopted in the United States". Case Studies in Construction Materials, Vol. 15, pp e00563.*

[4] *Diab, S., Soliman, A., Nokken, M. (2020). "Changes in mechanical properties and durability indices of concrete undergoing ASR expansion". Construction Building Materials, Vol. 251, pp 118951.*

[5] *Ghiasvand, E., Rezaei, Z., Mohammadi, H., Ayyoubi, M., Dehghani S. (2023). "Evaluation of Long-Term Properties of Products Containing Alkali-Activated Slag Exposed to Alkali-Silica Reaction by Mechanical Parameters". Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 35(8) , pp 04023240.*

[6] *Mohammadi, A., Ghiasvand, E., Nili, M. (2020). "Relation between mechanical properties of concrete and alkali-silica reaction (ASR); a review". Construction Building Materials, Vol. 258, pp 119567.*

[7] *Reinhardt, H. W., Özkan, H., Mielich, O. (2018). "Changes in mechanical properties of concrete due to ASR. Hormigón y Acero, Vol. 6, pp 15-19*

[8] *Hafçı, A., Turanlı, L., Bektas F. (2021). "Effect of ASR expansion on mechanical properties of concrete". Cement-Wapno-Beton= Cement Lime Concrete, Vol. 26(1) , pp 12-23.*

[9] *Ministry of Housing and Urban Development of Iran. (2008). "The National Method for Concrete Mix Design". Tehran: Road, Housing and Urban Development Research Center, pp 3-21.*

[10] *Chéruel, A., Ftima, M. B. (2023). "Unrestrained ASR volumetric expansion for mass concrete structures: Review and experimental investigation using 3d laser scanning" .Construction Building Materials, Vol. 399, pp 132565.*

[11] ASTM C. 1260, (2007). "Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method) ". West Conshohocken, PA: ASTM International, pp 676-680.

[12] Ahmed, T., Burley, E., Rigden, S., Abu-Tair, A. I. (2003). "The effect of alkali reactivity on the mechanical properties of concrete". Construction Building Materials, Vol. 17(2) , pp 123-44.

[13] Gautam, B. P., Panesar, D. K. (2017). "The effect of elevated conditioning temperature on the ASR expansion, cracking and properties of reactive Spratt aggregate concrete". Construction Building Materials, Vol. 140, pp 310-320.

[14] ASTM C. 1293, (2008). "Standard test method for determination of length change of concrete due to alkali–silica reaction". West Conshohocken, PA: ASTM International.

[15] BS. EN 12390-3, 2009. "Testing hardened concrete—compressive strength of test specimens". London, UK: British Standard Institution.

[16] ASTM C. C496/C496M-11, (2011). "Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens". West Conshohocken, PA: ASTM International.

[17] ASTM C. 293/C293M-16. (2016) "Flexural strength of concrete using simple beam with center-point loading– Test method. ". West Conshohocken, PA: ASTM International.

[18] Thomas, M. D., Fournier, B., Folliard, K. J. (2013). "Alkali-aggregate reactivity (AAR) facts book". United States. Federal Highway Administration. Office of Pavement Technology.

[19] Islam, M. S., Ghafoori, N. (2015). "Relation of ASR-induced expansion and compressive strength of concrete". Materials Structures, Vol. 48(12) , pp 4055-66.

بررسی تاثیر استفاده از مواد بازیافتی پلی اتیلن ترفتالات بر روی خواص مکانیکی و فیزیکی بتن خود تراکم

بیت اله بدرلو
استادیار سازه،گروه عمران
دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه صنعتی قم

حمیدرضا کوهستانی
دانشجو کارشناسی ارشد عمران سازه
دانشگاه شهاب دانش قم
عضو حقیقی انجمن بتن ایران

چکیده

با توجه به گسترش به‌کار گیری بتن خودتراکم در زمینه ساخت و ساز و فقدان شناخت کافی از رفتار بتن خودتراکم و معیارهای لازم جهت طراحی این نوع بتن، همچنان انجام تحقیقات نظری و عملی در این زمینه ضروری است. تا کنون تحقیقات وسیعی در زمینه به کارگیری ضایعات در بتن معمولی انجام شده است، اما در زمینه استفاده از ضایعات به ویژه پلی اتیلن ترفتالات در بتن خودتراکم تحقیقات چندانی صورت نگرفته است. در این پژوهش خواص بتن خودتراکم تازه حاوی سیمان، شن، ماسه، فوق روان کننده و همچنین ماده بازیافتی PET به عنوان جایگزین نسبی ماسه و شن تحت آزمایش‌های جریان اسلامپ، قیف V و وزن مخصوص و در سنین ۲۸ و۹۰ روزه تحت آزمایشات مقاومت فشاری، مقاومت کششی جهت تعیین خواص مکانیکی قرار می‌گیرند. نتایج حاکی از آن است که می‌توان از با افزایش درصد جایگزینی دانه-های بازیافتی PET در نمونه‌های بتن خودتراکم در رده C25 و چگالی در رده C25 کاهش می‌یابد. با افزایش درصد جایگزینی دانه‌های بازیافتی PET، افزایش و ایجاد پدیده جداشدگی مشاهده می‌شود. افزایش درصد جایگزینی دانه‌های بازیافتی PET موجب کاهش مقاومت فشاری شده است. افزایش درصد جایگزینی دانه‌های بازیافتی PET موجب تغییر شکل هندسی مواد تشکیل دهنده بتن شده است. افزایش درصد جایگزینی دانه‌های بازیافتی PET در نمونه‌های بتنی ۹۰ روزه موجب کاهش مقاومت فشاری این نمونه‌ها شده است. افزایش درصد جایگزینی دانه‌های بازیافتی PET با کاهش چگالی بتن و نیز کاهش مقدارمیانگین مقاومت فشاری ۲۸ و ۹۰ روزه همراه است.

کلمات کلیدی: بتن خودتراکم، پلی اتیلن ترفتالات، بازیافتی، مقاومت فشاری، مقاومت کششی.

۱-مقدمه

بتن یکی از مصالح ساختمانی است که از مخلوط کردن نسبت‌های مناسب سیمان، سنگدانه، ماسه و آب حاصل می‌شود. در صنعت بتن حجم زیادی از منابع طبیعی و معدنی نظیر آب، شن و ماسه شسته رودخانه یا سنگدانه‌های معدنی خرد شده و نیز خاک رس و سنگ آهک به عنوان مواد تشکیل‌دهنده سیمان به مصرف می‌رسد. ساخت این ماده کامپوزیت با استفاده از مواد ارزان و در دسترس

از یک سو، انعطاف پذیری، ویژگی‌های مقاومتی و طول عمر آن از سوی دیگر و نیز به کارگیری مواد اولیه که به کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی منجر می‌شود، بتن را به یک ماده منحصربه‌فرد در صنعت ساخت و ساز تبدیل نموده است. یکی از پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی برای ساخت سازه‌ها، تونل‌ها و پل‌های با دهانه بلند در سراسر جهان است و روز به روز بر به‌کارگیری آن افزوده می‌شود. به طوری که مصرف بتن در سال ۲۰۵۰، ۱۸ میلیارد تن تخمین زده شده است. از این رو محققان سعی بر جایگزینی مواد سازنده بتن با مصالح مناسب به منظور کاهش مصرف منابع طبیعی نظیر ماسه و شن که بیشترین درصد مواد تشکیل دهنده بتن را به خود اختصاص می‌دهند، دارند[۱, ۲]. گسترش علم و فناوری در حوزه بتن و استفاده از مواد و مصالح مختلف در آن، نظیر افزودنی‌ها و مواد زائد آلاینده محیط زیست و نیز روش‌های نوین و پیشرفته تولید، باعث ساخت بتن‌هایی با طول عمر زیاد در سال‌های اخیر شده است. علی رغم دستیابی چنین پیشرفت‌هایی، دانش مهندسان عمران در حوزه مواد و مصالح و فناوری بتن به ویژه در کشورهای در حال توسعه چندان تحولی نداشته و شاهد آثار نامطلوب عدم شناخت این ماده در ساخت و سازهای عظیم عمرانی در این کشورها هستیم. چنانکه سازه‌های بتنی تحت تاثیر بارهای اعمال شده و شرایط محیطی حین مدت بهره‌برداری از آنها دچار تخریب‌های گسترده شده و دوام کمی داشته‌اند. در دهه‌های اخیر، تحقیقات این امر را ممکن ساخته که مواد زایدی نظیر خاکستر بادی، دوده سیلیسی، تفاله کوره‌های ذوب آهن، خرده شیشه و غیره در صنعت ساختمان‌سازی استفاده می‌شود. قابلیت استفاده از تولیدات صنعتی در بتن با جایگزینی آنها توسط بخشی از مصالح سنگی و سیمان مورد استفاده به ترکیب شیمیایی و اندازه دانه‌های این مواد بستگی دارد. به کارگیری این مواد در بتن به دلیل به کارگیری ایمن این مواد زاید جهت جلوگیری از آلودگی‌های زیست‌محیطی است. در دو دهه اخیر، تمرکز زیادی بر پتانسیل به‌کارگیری انواع زباله شهری در مواد ساختمانی مرسوم شده و تحقیقات بسیاری در این زمینه صورت گرفته است. که در بسیاری از موارد افزودن مواد بازیافتی علاوه بر حفظ محیط زیست موجب تاثیرات مثبت بر ویژگی‌های محصولات نهایی شده است. یکی از مواد بازیافتی که به تازگی در صنعت بتن از آن استفاده می‌شود پلاستیک است.

مصرف سالانه مواد پلاستیکی در جهان در دهه ۱۹۵۰ حدود ۵ میلیون تن بود که در حال حاضر به ۱۰۰ میلیون تن افزایش یافته که منجر به تولید بیشتر ضایعات پلاستیکی می‌شود. معضل بحرانی زباله‌های جامد از دو منظر اقتصادی و زیست‌محیطی اهمیت زیادی دارد. یکی از مشکلات زیست‌محیطی مرتبط با پلاستیک این است که مقادیر زیادی بطری‌های پلاستیکی، مواد پلیمری و سایر مواد پلاستیکی به محل‌های دفن زباله در اکثر کشورها ریخته می‌شود. این مواد پلاستیکی حتی در مدت زمان طولانی تجزیه نمی‌شوند. از این رو، مکان‌های بیشتری جهت دفن زباله لازم است. امروزه زباله‌های پلاستیکی سوزانده و یا دفن می‌شوند. که می‌تواند

بسیار پرهزینه باشد. به‌کارگیری مجدد این زباله‌های پلاستیکی موجب کاهش آلودگی‌های ناشی از سوزاندن یا دفن این مواد و هزینه بالای مدیریت زباله می‌گردد. تجزیه ناپذیری پلاستیک‌های ضایعاتی به عنوان یکی از بزرگ‌ترین مشکلات زیست‌محیطی در دنیا و، بازیافت و کابرد مجدد این ضایعات انبوه در چرخه تولید به عنوان یکی از چالش‌های بزرگ زیست‌محیطی، ارائه راه‌کاری جهت استفاده مجدد این ضایعات را ضروری می‌سازد. ویژگی‌هایی مانند دانسیته پایین، الاستیسیته بالا و انعطاف‌پذیری پلاستیک‌های فرسوده و مستعمل موجب کاربرد آنها در تولید موادی همچون بتن و آسفالت در سال‌های اخیر گردیده است. از آنجایی که پلاستیک زیست‌تخریب‌پذیر نمی‌باشد، به کارگیری پلاستیک‌ها به عنوان یک ماده خنثی در بستر سیمان راه‌کار مطلوبی برای حل معضل زباله‌های پلاستیک به نظر می‌رسد. به خصوص، خرده‌های مواد پلاستیکی می‌توانند در بتن به عنوان سنگدانه استفاده شوند. با توسعه به کارگیری بتن، ویژگی‌هایی مانند طول عمر و ماندگاری، کیفیت، تراکم و بهینه‌سازی آن اهمیت زیادی یافته است. بتن خود تراکم (SCC) یک بتن سیال و همگن و فاقد مشکلات بتن معمولی نظیر جدا شدن، ریزش و جذب آب، نفوذپذیری و ... است و بدون نیاز به لرزاننده، تحت وزن خود تراکم می‌یابد و بدون نیاز به لرزش خارجی ماده را به خوبی پوشش می‌دهد. با به‌کارگیری بتن خودتراکم می‌توان بر ارتفاع آزاد بتن‌ریزی افزود. این امر موجب کاهش تعداد چرخه‌های بتن‌ریزی در فرایند ساخت و کاهش زمان ساخت می‌شود. از سوی دیگر به دلیل تراکم بالاتر بتن خودتراکم به‌کارگیری پرکننده، نسبت به بتن‌های معمولی، امکان بارگذاری و بهره‌برداری سریع‌تر از سازه ممکن شده و بهره‌وری افزایش یافته و تسریع برگشت سرمایه صورت می‌گیرد.

رویکرد بتن بدون نیاز به ویبراسیون به عنوان رویکردی جهت رفع معضل کمبود کارگران ماهر و کاهش دوام سازه و افزایش کیفیت بتن ویژگی‌های قابل توجهی نظیر جریان‌پذیری بالا، مقاومت در مقابل جدا شدگی و قابلیت خود متراکم شدن بدون نیاز به ویبره سطح تمام شده بهتر به دلیل چسبندگی زیاد و ویژگی خودتراکمی، کیفیت بهتر سطوح کار تمام شده در مقایسه با بتن معمولی در این نوع از بتن تامین گردید. به دلیل سیالیت مناسب بتن خودتراکم در قالب، امکان ساخت مقاطع ظریف و با شکل‌های پیچیده امکانپذیر می‌شود. افزون بر این، عبور بتن خودتراکم در میان آرماتوربندی سنگین، طراحی سازه‌های بتن آرمه با حجم بالای آرماتور ممکن می‌شود. کاهش تراز صدا به علت حذف ایجاد لرزش، ایمن‌تر نمودن محیط ساخت و ساز، دوام بیشتر قالب‌ها به دلیل حذف لرزش خارجی و کاستن نیمی از فشار اعمال شده به قالب‌ها و در نتیجه افزایش عمر مفید قالب‌ها می‌گردد. تمام وجوه قالب‌ها را کاملا پر می‌کند که به اجرای اعضای ساختمان با تراکم بالای آرماتور کمک زیادی خواهد کرد. ویژگی‌هایی مانند عدم نیاز به تراکم داخلی یا خارجی و عبور از شبکه‌های آرماتور متراکم، متمایزکننده این بتن نسبت به بتن معمولی است. سنگدانه یکی از مواد تشکیل‌دهنده

این بتن مانند دیگر بتن‌ها است. سبک‌سازی و کاهش وزن نهایی ساختمان با به‌کار گیری تکنیک‌های نوین ساخت، به کارگیری مصالح جدید و بهینه نمودن روش های کاربردی که افزون بر کاهش وقت و انرژی لازم، خسارت‌ها و صدمات ناشی از حوادث طبیعی مانند زلزله را به حداقل می‌رساند به عنوان مباحث نوین در صنایع ساختمانی می‌باشد. در حال حاضر PET از پر استفاده‌ترین پلاستیک‌ها در سراسر دنیا است. بطری‌های نوشابه، آب معدنی و ... از جنس PET بعد از استفاده به دلیل ماندگاری طولانی در محیط و عدم تجزیه‌پذیری زیستی معضلاتی نظیر اشغال فضای زیاد مراکز دفن زباله و آلودگی شدید محیط را به دنبال دارند. تا کنون تحقیقات وسیعی در زمینه به کارگیری ضایعات در بتن معمولی انجام شده است، اما در زمینه استفاده از ضایعات به ویژه پلی اتیلن ترفتالات در بتن خودتراکم تحقیقات چندانی صورت نگرفته است. هدف از این مقاله، بررسی اثر افزودن PET بازیافتی[1]، بر خواص مکانیکی و فیزیکی و بتن خودتراکم، دستیابی به میزان بهینه PET بازیافتی برای بتن خودتراکم با هدف حفظ کارایی بتن خودتراکم بررسی رفتار مکانیکی و فیزیکی خودتراکم معمولی و خودتراکم حاوی PET بازیافتی می‌باشد.

۲-ادبیات پژوهش

مطالعه هاما[2] و همکاران با هدف بررسی تأثیر به کارگیری ضایعات پلاستیکی به عنوان جایگزینی جزئی سنگدانه‌های ریز، بر ویژگی‌های تازه بتن خود تراکم انجام شد. برای این منظور، مخلوط‌های بتن خود متراکم مختلف با نسبت ثابت آب به سیمان ۰,۳۲ و $520 kg/m^3$ طرح ریزی شدند. محتوی ضایعات پلاستیکی در شش نمونه ۰، ۲,۵، ۵، ۷,۵، ۱۰، و ۱۲,۵ درصد و ضایعات پلاستیکی با اندازه‌های مختلف (ضایعات پلاستیکی ریز، درشت و مخلوط) به عنوان پارامترهای آزمایشی در نظر گرفته شدند. خواص مخلوط‌های بتن خود متراکم با توجه به جریان اسلامپ، زمان جریان اسلامپ، زمان جریان قیف انجام شد. مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن‌های خود تراکم نیز اندازه گیری شد. بر اساس داده‌های آزمایشگاهی که ضایعات پلاستیکی با اندازه‌های مختلف، می‌توانند با موفقیت به عنوان یک سنگدانه ریز در بتن خود تراکم استفاده شوند[۳].

مطالعه رویلا-کوئستا۳ و همکاران با هدف تحلیل و مدل‌سازی تغییر شکل بتن خودمتراکم حاوی ۱۰۰ درصد سنگدانه بازیافتی درشت و ۰ - ۱۰۰ درصد سنگدانه بازیافتی ریز، سنگ آهک تحت فشار و خمش است. در بتن حاوی ۱۰۰ درصد سنگدانه بازیافتی درشت سطوح تغییر شکل‌پذیری مطابق با استانداردهای بین المللی به همراه داشت، در حالی که محتوای بیشتر سنگدانه بازیافتی ریز موجب افزایش تغییر شکل تحت فشار و کاهش آن تحت تنش خمشی شد. مقاومت بتن خودمتراکم با افزودن سرباره گرانولی کوره بلند[4] (GGBS) افزایش یافت.

[1] *Recycled PET*

[2] *Hama*

[3] *Revilla-Cuesta*

[4] *Ground Granulated Blast Furnace Slag*

استفاده از پودر سنگ آهک و پودر سنگدانه بازیافتی اثر معکوس داشت. با توجه به رفتار تغییر شکل، که با موفقیت با حداکثر انحرافات ۱۰ درصد مدل‌سازی شد، سنگدانه بازیافتی ریز ممکن است در ترکیب با شدن سرباره گرانولی کوره بلند و پودر سنگ آهک استفاده شود، اگرچه توصیه می‌شود که سنگدانه بازیافتی ریز نباید از نسبت ۵۰ درصد تجاوز کند[۴]

۳. بخش آزمایشگاهی

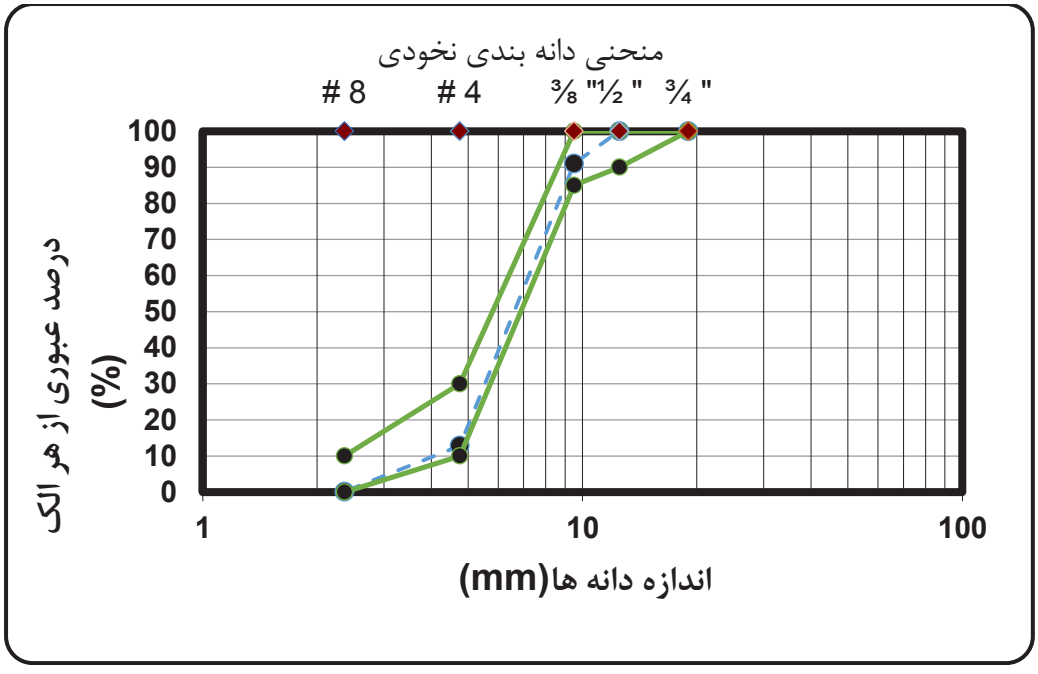
۳-۱- مشخصات مصالح مصرفی

۳-۱-۱-شن(نخودی)

شن مصرفی از نوع نخودی از شرکت ماسه شویی الوند منطقه طغرود لوله تهیه شده است. اندازه سنگدانه صفر تا ۱۲ میلی متر است. دانه بندی شن مصرفی (نخودی) در جدول ۱ و منحنی مربوطه در شکل ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱ دانه بندی شن مصرفی(نخودی)

ردیف	نمره الک (in)	اندازه الک (mm)	وزن مانده (g)	درصد عبوری
۱	۱/۲	۱۲.۵	۰	۱۰۰
۲	۳/۸	۹.۵	۱۸۰	۹۱
۳	۴	۴.۷۵	۱۵۶۹	۱۳
۴	۸	۲.۳۶	۲۵۶	۱
۵	۱۶	۱.۱۸	۲	۰
۶	درصد مواد ریزتر از الک ۲۰۰			۰.۶۵
۷	درصد کلوخه‌های رسی			۱.۰۰
-	چرت			۰.۰۰
-	ذغال سنگ و لیگنیت			۰.۰۰
۸	درصد سلامت سنگدانه			۱۰۰
۹	درصد دانه‌های با عرض و طول یکسان			۰
۱۱	درصد سایش (لوس آنجلس)			۱۷
-	درصد شکستگی (شکسته)			۴۷



شکل۱- منحنی دانه‌بندی شن مصرفی (نخودی)

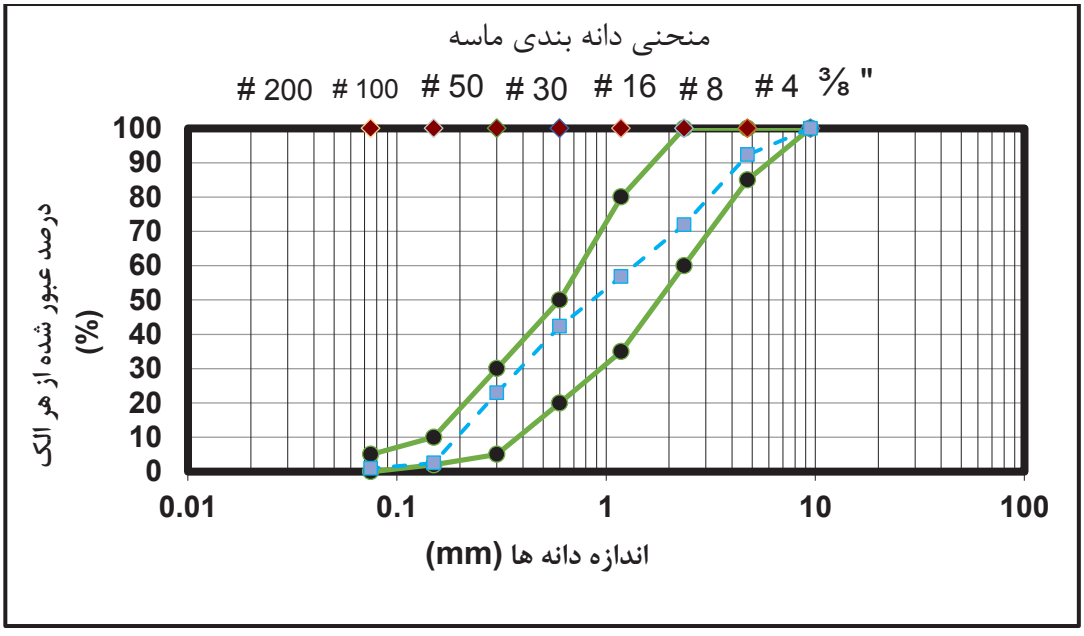
۳-۱-۲- ماسه

در جدول ۲ دانه‌بندی ماسه مصرفی بیان شده است. ماسه طبیعی مصرفی از شرکت همایی جاده قمرود و با اندازه ۶-۰ میلی متر تهیه شده است..

جدول ۲ دانه‌بندی ماسه مصرفی

ردیف	نمره الک(in)	اندازه الک(mm)	وزن مانده(g)	درصد عبوری
۱	۳/۸	۹.۵	۰.۰	۱۰۰
۲	۴	۴.۷۵	۹۴.۰	۹۳
۳	۸	۲.۳۶	۲۵۰.۰	۷۴
۴	۱۶	۱.۱۸	۱۸۴.۰	۶۰
۵	۳۰	۰.۶	۱۷۸	۴۷
۶	۵۰	۰.۳	۲۳۷.۰	۲۹
۷	۱۰۰	۰.۱۵	۲۵۰.۰	۱۰
۸	درصد مواد ریزتر از الک ۲۰۰			۳.۵۰
۹	درصد کلوخه های رسی			۰.۰۹
۱۰	ضریب نرمی			۲.۸۳

منحنی دانه بندی ماسه مصرفی در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱ منحنی دانه بندی ماسه مصرفی

۳-۱-۴- سیمان

در این مطالعه از سیمان نیزار قم نوع ۲ تولید کارخانه سیمان نیزار با چگالی (سطح مخصوص) ۳۰۰ cm^2/gr استفاده شد. در جدول ۳ مشخصات سیمان مصرفی و مشخصات خواص فیزیکی و شیمیایی سیمان در جدول۴ آورده شده است.

جدول ۲ ویژگی فیزیکی سیمان

ویژگی فیزیکی سیمان نیزار	مقدار ویژگی فیزیکی
زمان گیرش اولیه	۱۸۰ دقیقه
زمان گیرش ثانویه	۲۲۵ دقیقه
مقاومت فشاری ۲ روزه (kg/cm^2)	۲۸۱
مقاومت فشاری ۲۸ روزه (kg/cm^2)	۵۵۱

جدول ۴ ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی مواد سیمانی

مشخصات شیمیایی	Na2O	K2O	SO3	MgO	CaO	Fe2O3	Al2O3	SiO2
سیمان	۰/۳۳	۰/۷۳	۲/۶۹	۱/۵۲	۶۳/۶۳	۳/۴۵	۴/۶۵	۲۰/۳۵

۳-۱-۵- آب

آب مصرفی در ساخت بتن‌ها از آب شرب شهرستان قم می‌باشد.

۳-۱-۶- مواد پلی اتیلن ترفتالات

در این تحقیق برای جایگزینی ماسه و شن با PET از دو نوع مختلف مواد بازیافتی PET استفاده شده است: گرانول بازیافتی PET تهیه شده از شرکت صنایع بازیافت را تا شمال واقع در شهر آمل و مواد بازیافتی پرک PET تهیه شده از شهرستان قم. مشخصات گرانول PET مصرفی و خواص فیزیکی PET مصرفی به ترتیب در جداول ۵ و ۶ آورده شده است.

جدول ۳ مشخصات گرانول PET مصرفی

ماده	PET	Grade	G1121
تولید کننده	شرکت صنایع بازیافت راتا شمال		
کاربرد	شیت، بسته بندی، بافت		
رنگ	شفاف		
ظاهر	گرانول		

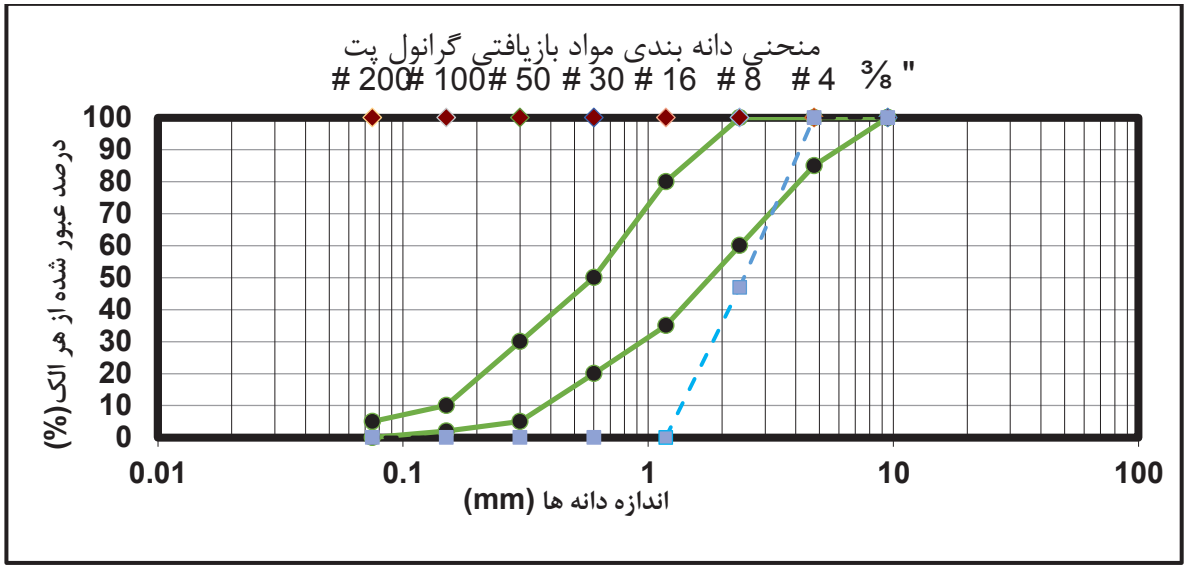
جدول ۴ خواص فیزیکی PET مصرفی

گرید	فیلم بطری
چگالی(gr/cm^3)	۱,۳۵
ویسکوزیته ذاتی(dl/gr)	۰,۷

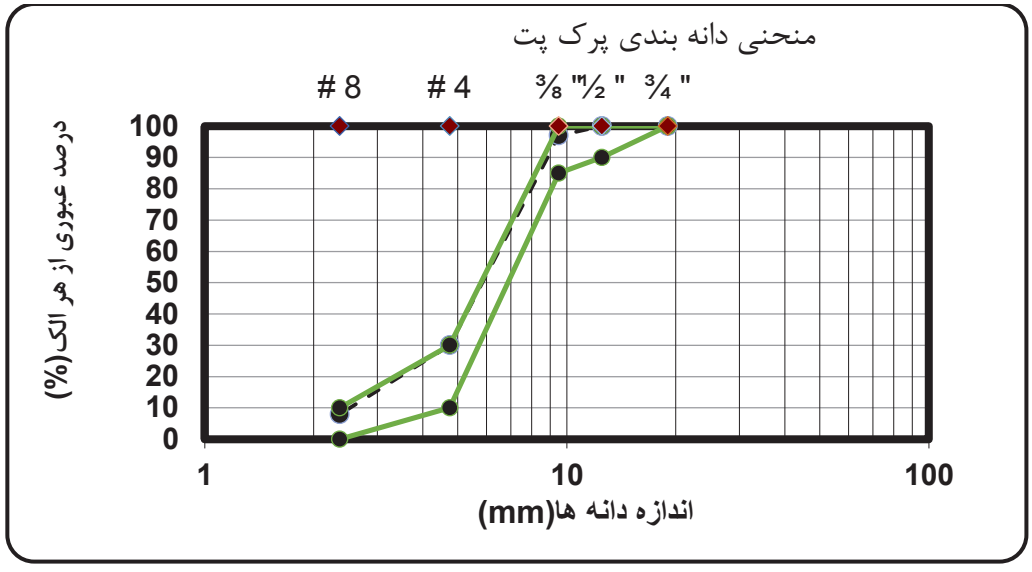
منحنی دانه‌بندی مواد بازیافتی گرنول و پرکPET به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ و پرک پت وگرانول بازیافتی PET به ترتیب در شکل ۳ و ۴ نشان داده شده است.

شکل ۳ مواد بازیافتی پرک پت

شکل ۴ مواد بازیافتی گرانول پت



شکل۵ منحنی دانه بندی گرانول پت



شکل۶ منحنی دانه بندی پرک پت

۳-۱-۷- فوق روان کننده

در این مطالعه از ابر روان کننده بر پایه کربوکسیلات استفاده شده است. برای استفاده از این فوق روان کننده، باید پس از مخلوط نمودن مواد خشک، به میزان نزدیک به دو برابر حجم فوق روان کننده، آب به آنها اضافه شود. ویژگیهای فیزیکی و شیمیایی فوق روان کننده در جدول ۷ آورده شده است.

جدول ۵ ویژگیهای فیزیکی و شیمیایی فوق روان کننده

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی	
ویژگی شیمیایی	پلی کربوکسیلات
حالت	مایع غلیظ
رنگ	بنفش تیره
وزن مخصوص (g/cm^3)	۱/۱ ±۰/۳
یون کلر	ندارد
PH	۵±۲

۳-۱-۸- طرح اختلاط

تعیین نسبت‌های اختلاط بتن به دست آوردن ترکیب مناسب سیمان، سنگدانه، آب و مواد افزودنی برای تولید بتن خود تراکم مطابق با مشخصات مربوطه بود. هدف از تعیین نسبت‌های اختلاط، به دست آوردن بتنی است که الزامات عملکرد را با کمترین هزینه برآورده کند. طرح اختلاط بتن خود تراکم موجود در تحقیق بر اساس راندمان بتن بر اساس معیارهای مقررات EFNARC و خواص بتن تازه و سخت شده انتخاب شد. پس از انجام آزمایشات بتن تازه تراکم بر روی بتن‌های به دست آمده و اصلاح موانع طبقه بندی بتن به عنوان بتن خودتراکم، نسبت سیمان، سنگدانه، آب و مواد افزودنی مناسب در بتن به دست آمد (جدول۸). به‌علاوه، آزمایش‌هایی که در کارگاه‌ها برای تأیید و تأیید خواص بتن جدید خود تراکم انجام شده است. در صورت لزوم، تنظیمات و تنظیم مجدد با توجه به ترکیب مخلوط انجام شد.

جدول ۶ جزئیات طرح‌های اختلاط بتن

رده بتن	نمونه	درصد PET	مقدار PET	نخودی	ماسه	سیمان	آب	w/C	مواد افزودنی
C25	Scc-c25	۰	۰	۷۰۰	۱۱۰۰	۳۷۰	۱۴۸	۰/۴۰	۱.۵
	Scc-05s	۵	۵۵	۷۰۰	۱۰۴۵	۳۷۰	۱۴۸	۰/۴۰	۱.۵
	Scc-10s	۱۰	۱۱۰	۷۰۰	۹۹۰	۳۷۰	۱۴۸	۰/۴۰	۱.۵
	Scc-20s	۲۰	۲۲۰	۷۰۰	۸۸۰	۳۷۰	۱۴۸	۰/۴۰	۱.۵
	Scc-05g	۵	۳۵	۶۶۵	۱۱۰۰	۳۷۰	۱۴۸	۰/۴۰	۱.۵
	Scc-10g	۱۰	۷۰	۶۳۰	۱۱۰۰	۳۷۰	۱۴۸	۰/۴۰	۱.۵
	Scc-20g	۲۰	۱۴۰	۵۶۰	۱۱۰۰	۳۷۰	۱۴۸	۰/۴۰	۱.۵
	Scc-05sg	۵	۹۰	۶۶۵	۱۰۴۵	۳۷۰	۱۴۸	۰/۴۰	۱.۵
	Scc-10sg	۱۰	۱۸۰	۶۳۰	۹۹۰	۳۷۰	۱۴۸	۰/۴۰	۱.۵
	Scc-20sg	۲۰	۳۶۰	۵۶۰	۸۸۰	۳۷۰	۱۴۸	۰/۴۰	۱.۵

۳-۲- تهیه بتن خود تراکم

برای تهیه بتن خود تراکم مواد مختلف طرح اختلاط برای مقدار معینی از بتن تعیین شد. طبق تجربه آزمایشگاهی، قبل از مخلوط کردن مواد در مخلوط-کننده، ابتدا آب به مخلوط‌کننده اضافه می‌شود تا اصطکاک مواد با مخلوط‌کننده کاهش یابد و مخلوط‌کننده اجازه داده شد تا چند ثانیه با آب بچرخد. از جذب آب افزوده شده به مواد سیمانی به بدن جلوگیری می‌کند. ابتدا ماسه، شن، PET را با مقداری از آب اختلاط (تقریباً نیمی از آب اختلاط) مخلوط نموده و این مرحله حدود ۳ دقیقه طول کشید تا سنگدانه‌ها از قبل خیس شوند. سپس مواد سیمانی حاوی سیمان و اجزای آن را به مخلوط اضافه می‌کنند، سپس آب باقیمانده را به مخلوط اضافه می‌کنند و در نهایت به تدریج فوق روان‌کننده بر پایه کربوکسیلات را به مخلوط اضافه می‌کنیم. پس از اختلاط مصالح با یکدیگر، بتن را به داخل قالب‌هایی که از قبل آماده و روغن کاری شده‌اند، ریخته و نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت جهت سخت شدن در محیط آزمایشگاه قرار گرفتند. سپس از قالب خارج شده و در حوضچه آب نگهداری شدند.

۳-۳- آزمایشات

۳-۳-۱- آزمایش جریان اسلامپ

زمان پخش بتن روان دایره ۵۰۰mm از درون مخروط ناقص به وسیله کرونومتر با دقت ۰/۱ sec اندازه گیری شد. در این آزمایش مقدار مخلوط پخش شده باید بین ۵۵۰ تا ۸۵۰mm قرار بگیرد. زمان رسیدن بتن به قطر ۵۰ cm، T50 نیز به عنوان شاخصی از لزجت بتن ثبت گردید.

۳-۳-۲- آزمایش قیف وی شکل

ابتدا سطوح دستگاه را مرطوب نموده سپس مخلوط را بدون اعمال فشار یا تراکم به داخل قیف می-ریزیم. پس از ده ثانیه از گذشت ریختن مخلوط به داخل قیف، دریچه را باز کرده زمان خروج مخلوط به صورت کامل به داخل سطل به عنوان زمان جریان قیف وی ثبت شد.

۳-۳-۳- نمونه‌های تحت بررسی

نمونه‌های بتن تحت آزمایش جهت مشخص کردن رفتار مهندسی بتن خودتراکم شامل مواد بازیافتی PET نظیر مقاومت فشاری، مقاومت کششی (تست برزیلی) بصورت استوانه‌ای به ابعاد mm2 ۱۵۰ × ۳۰۰ و مکعبی به ابعاد mm3 ۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰ است.

۳-۳-۴- عمل آوری بتن

در این مطالعه نمونه‌های بتنی ساخته شده از طرح اختلاط بتن خود تراکم معمولی و بتن خود تراکم شامل مقادیر مختلف ذرات PET پس از ۲۴ ساعت از زمان ریختن بتن و باز کردن قالب‌ها تا زمان اتمام آزمایش در شرایط مرطوب نگهداری شدند.

۳-۳-۵- آزمایش بتن سخت شده

۳-۳-۵-۱- مقاومت کششی

آزمایش مشخص کردن مقاومت کششی بر روی نمونه استوانه‌ای (به ندرت مکعبی) طبق استاندارد ملی ایران ۶۰۴۷ C496 ASTM و 1881-4 BS و بر روی نمونه‌های مکعبی در بخش ۱۱۷ آیین نامه 1881-83 BS انجام شد.

بر طبق 1881-83 BS بار با سرعت ثابت بین ۰,۲ تا ۰,۴ MPa/sec و بر طبق C496- ASTM ۰,۱۱ تا ۰,۲۳ MPa/sec وارد می‌شود. مقاومت کششی انجام شده در این پژوهش از نوع مقاومت کششی دو نیم شدن بوده که در آن نمونه های استوانه‌ای استاندارد ۲۸ روزه پس از خروج از حوضچه آب و خشک شدن سطحی، مطابق با روش استاندارد ASTM C496-90قرار گرفتند.

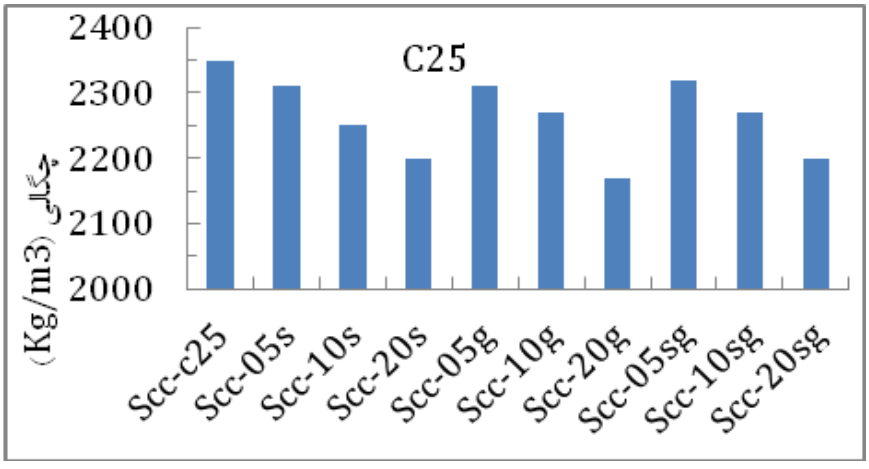
۳-۳-۵-۲- مقاومت فشاری

در این مطالعه از آزمایش مقاومت فشاری مطابق استاندارد ASTM C39-86 استفاده شد. آزمایش‌های مقاومت فشاری بر نمونه‌های مکعبی در اندازه mm2 ۱۵۰×۱۵۰ انجام شد.

۳-۳-۶- نتایج آزمایش‌های بتن تازه

۳-۳-۶-۱- چگالی

تغییرات چگالی نمونه‌های بتنی رده‌های C25 به ازای درصدهای مختلف PET شکل ۷ ورده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش درصد PET چگالی نمونه‌های بتن هر دو رده C25 کاهش می‌یابد. به طوری که برای ۲۰ درصد جایگزینی ماسه و شن و هردو با مواد بازیافتی PET چگالی بتن خودتراکم به ترتیب ۲۲۰۰، ۲۱۷۰ و Kg/m3 ۲۲۰۰ می‌باشد. چگالی کم ذرات مواد بازیافتی PET جایگزین نسبت به چگالی شن و ماسه موجب کاهش چگالی بتن محتوی مواد بازیافتی PET می‌شود. از سوی دیگر مواد بازیافتی PET موجب جای گرفتن حباب‌های ریز هوا در اطراف این ذرات می‌گردد و هوای محبوس در بتن را افزایش می‌دهد . با افزایش میزان هوا در بتن با افزایش مواد بازیافتی PET چگالی بتن کاهش می‌یابد.

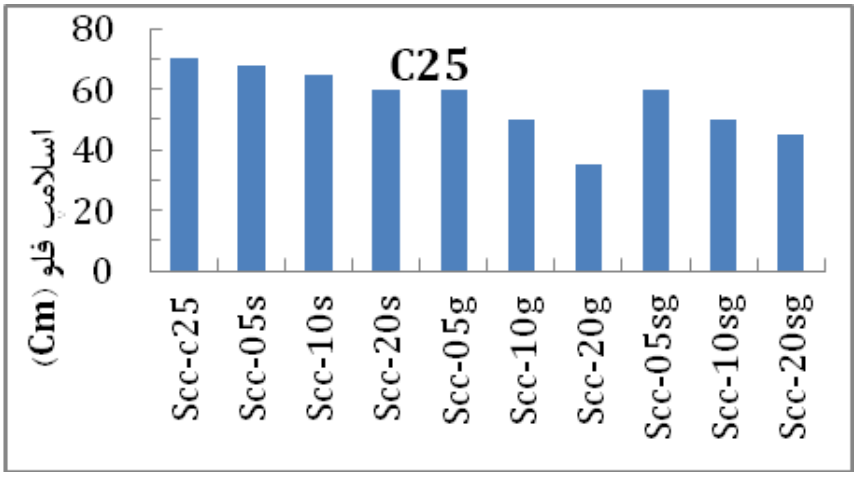


شکل ۷ تغییرات چگالی نمونه‌های بتنی رده‌های (الف) C25 به ازای درصدهای مختلف PET

۳-۳-۶-۲- جریان اسلامپ

نتایج آزمایش جریان اسلامپ نمونه‌های بتنی رده‌های C25 به ازای درصدهای مختلف PET در شکل۸ نشان داده شده است. با افزایش مواد PET بازیافتی، جریان‌پذیری بتن خود تراکم کاهش می‌یابد که یکی از مهم‌ترین دلایل تیز بودن زوایای ذرات PET است. جریان اسلامپ در نمونه‌های بتن در محدوده استاندارد مقررات EFNARC است.

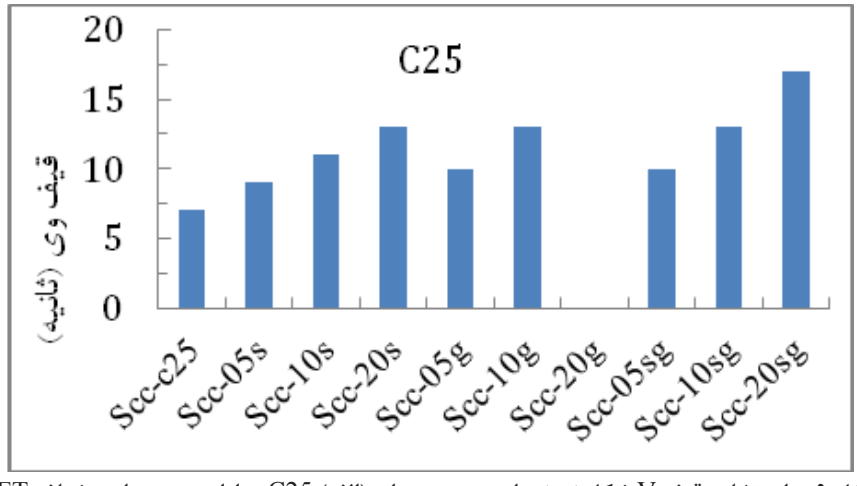
با افزایش درصد PET در مخلوط بتن، پوسته پوسته شدن افزایش یافته و پدیده جداشدگی رخ می‌دهد. این پدیده در نمونه‌های بتنی حاوی درصد بیشتری از PET مشاهده می‌شود. در اینجا تفاوت بین وزن مخصوص دانه‌ها و گوشه‌های تیز و پولکی این ذرات عامل اصلی جدا شدن است.



شکل ۸ جریان اسلامپ نمونه‌های بتنی رده‌های C25 به ازای درصدهای مختلف PET

۳-۳-۶-۳- قیف وی

زمان تخلیه قیف وی شکل نمونه‌های بتنی رده‌های C25 به ازای درصدهای مختلف PET در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹ زمان تخلیه قیف V شکل نمونه‌های بتنی رده‌های (الف) C25 به ازای درصدهای مختلف PET

همانطور که از شکل ۱۸ مشاهده می‌شود که با افزایش درصد جایگزینی PET مدت زمان خروج بتن از قیف، افزایش یافته که به علت جای گرفتن ذرات سبک PET در بالای قیف و جمع شدن دانه های درشت در قسمت پایین قیف می‌باشد. از آنجایی که زمان تخلیه مناسب برای دستیابی به خواص مناسب لزجت بین ۶ الی ۱۲ ثانیه می‌باشد، با وجود افزایش درصد جایگزینی PET، نمونه‌ها در محدوده مجاز قرار گرفته اند. زمان تخلیه بیشتر، نشان دهنده لزجت خمیری بیشتر در نمونه‌های بتنی دارد.

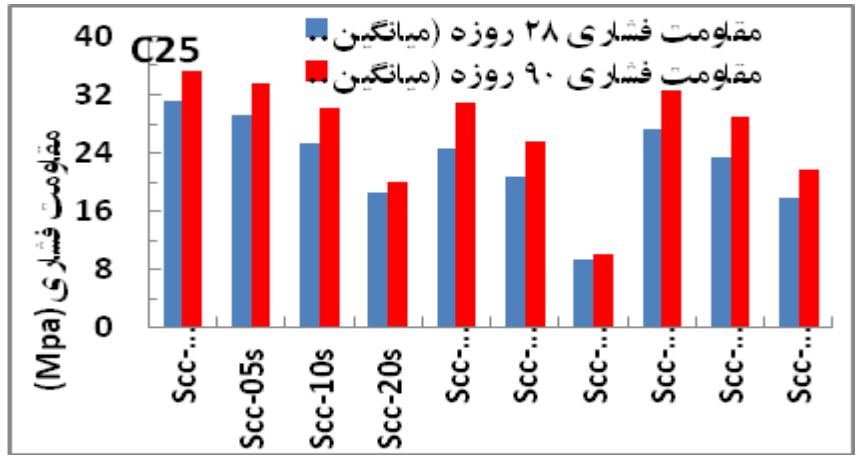
۴- نتایج آزمایش‌های بتن سخت شده

۴-۱- مقاومت فشاری

تاثیر درصدهای مختلف جایگزینی PET مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی رده‌های C25 در سنین ۲۸ و ۹۰ روز در شکل ۱۹ نشان داده شده است.

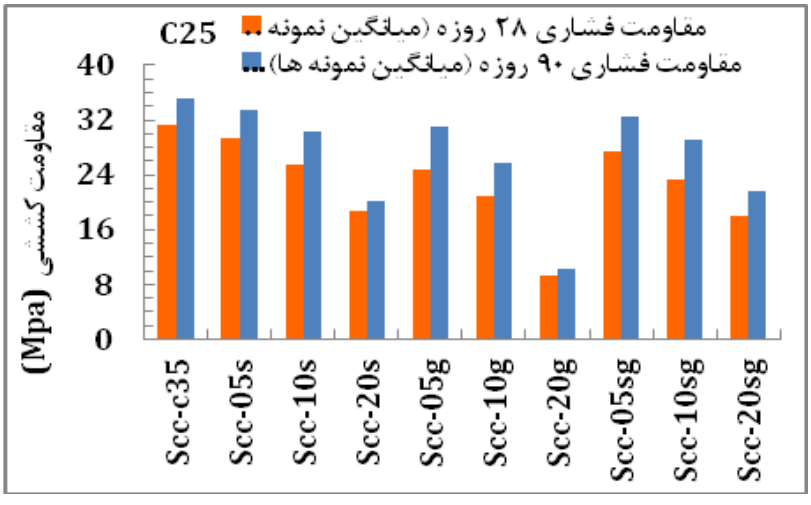
۴-۲- مقاومت فشاری ۲۸ روزه

میانگین مقاومت فشاری ۲۸ و ۹۰ روزه نمونه نمونه‌های بتنی رده‌های C25 به ازای درصدهای مختلف PET در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۰ میانگین مقاومت فشاری ۲۸ و ۹۰ روزه نمونه‌های بتنی رده‌های C25 به ازای درصدهای مختلف PET

رابطه بین میانگین مقاومت فشاری ۲۸ و ۹۰ روزه نمونه‌های بتن تحت تاثیر درصدهای متفاوت PET با چگالی این نمونه‌ها در شکل ۱۰ نشان داده شده است. افزایش درصد PET با کاهش چگالی بتن و نیز کاهش مقدارمیانگین مقاومت فشاری ۲۸ و ۹۰ روزه همراه است. میانگین مقاومت کششی ۲۸ و ۹۰ روزه نمونه‌های بتنی رده‌های c25 به ازای درصدهای مختلف PET در شکل ۱۱ آورده شده است.



شکل۱۱ میانگین مقاومت کششی ۲۸ و ۹۰ روزه نمونه‌های بتنی رده‌های C25 به ازای درصدهای مختلف PET

تغییرات میانگین مقاومت کششی ناشی از آزمایش دو نیم شدن استوانه با میانگین مقاومت فشاری بتن‌های حاوی درصدهای مختلف PET در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با افزایش درصد PET مقاومت فشاری و کششی کاهش می‌یابد. میانگین مقاومت کششی نمونه‌ها با افزایش میانگین مقاومت فشاری آنها، افزایش می‌یابد. افزایش درصد PET میانگین مقاومت کششی را تحت تاثیر قرار داده و موجب کاهش آن می‌گردد.

۸- نتیجه گیری

با افزایش درصد جایگزینی دانه‌های بازیافتی PET در نمونه‌های بتن خودتراکم در هر دو رده C25 چگالی این نمونه‌ها در هر دو رده C25 کاهش می‌یابد. چگالی کم دانه‌های بازیافتی PET جایگزین شده در نمونه‌های مذکور نسبت به چگالی شن و ماسه موجب کاهش چگالی بتن محتوی مواد بازیافتی PET می‌شود. نتایج آزمایش جریان اسلامپ نمونه‌های بتن خودتراکم حاوی دانه‌های بازیافتی PET در هر دو رده C25 نشان می‌دهد توانایی جریان یافتن نمونه‌های مذکور با افزایش درصد جایگزینی دانه های بازیافتی PET، کاهش می‌یابد. با افزایش درصد جایگزینی دانه‌های بازیافتی PET در نمونه‌های بتن خودتراکم حاوی دانه های بازیافتی PET در هر دو رده C25، افزایش یافت. با افزایش درصد جایگزینی دانه‌های بازیافتی PET در نمونه‌های مذکور مدت زمان خروج بتن از قیف، افزایش یافت. افزایش درصد جایگزینی دانه‌های بازیافتی PET در این نمونه ها

موجب کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های مذکور شد. افزایش درصد جایگزینی دانه‌های بازیافتی PET در نمونه‌های بتنی ۹۰ روزه موجب کاهش مقاومت فشاری شد. با افزایش درصد جایگزینی دانه‌های بازیافتی PET، مقاومت کششی نیز مانند مقاومت فشاری کاهش می‌یابد که بیشترین میزان کاهش برای نمونه‌های بتنی با درصد جایگزینی ۲۰ درصد برای شن، ماسه و هردو می‌باشد. با افزایش درصد جایگزینی دانه‌های بازیافتی PET مقاومت فشاری و کششی کاهش می‌یابد. میانگین مقاومت کششی نمونه‌های حاوی دانه‌های بازیافتی PET بتن خودتراکم رده‌های C25 با افزایش میانگین مقاومت فشاری آنها، افزایش می‌یابد. افزایش درصد جایگزینی دانه‌های بازیافتی PET میانگین مقاومت کششی را تحت تاثیر قرار داده و موجب کاهش آن می‌گردد. با افزایش درصد جایگزینی دانه‌های بازیافتی PET در نمونه‌های حاوی دانه های بازیافتی PET بتن خودتراکم در رده‌های 25 ، مقاومت کششی این نمونه‌ها نیز مانند مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. این شرایط برای مقاومت کششی ۹۰ روزه نیز حاکم است.

۹- منابع و مراجع

1. Surahyo A, Surahyo L, Luby. Concrete construction: Springer; 2019.

2. Tošić N, Marinković S, Stojanović A. Sustainability of the concrete industry: Current trends and future outlook. Tehnika. 2017;72(1):38-44.

3. Omnexus. selection-guide polyethylene-terephthalate-pet-plastic. https://omnexusspecialchemcom/selection-guide/polyethylene-terephthalate-pet-plastic. 2024.

4. Ji LN. Study on preparation process and properties of polyethylene terephthalate (PET). Applied mechanics and materials. 2013;312:406-10.

5. Mandal S, Dey A. PET chemistry. Recycling of Polyethylene Terephthalate Bottles: Elsevier; 2019. p. 1-22.

6. Dhaka V, Singh S, Anil AG, Sunil Kumar Naik T, Garg S, Samuel J, et al. Occurrence, toxicity and remediation of polyethylene terephthalate plastics. A review. Environmental Chemistry Letters. 2022:1-24.

7. Panowicz R, Konarzewski M, Durejko T, Szala M, Łazińska M, Czerwińska M, et al. Properties of polyethylene terephthalate (PET) after thermo-oxidative aging. Materials. 2021;14(14):3833.

8. Kumartasli S, Avinc O. Important step in sustainability: polyethylene terephthalate recycling and the recent developments. Sustainability in the Textile and Apparel Industries: Sourcing Synthetic and Novel Alternative Raw Materials. 2020:1-19.

9. Aizenshtein E. Present and future polyethylene terephthalate fibres. Springer; 2013.

10. Sperling LH. Introduction to physical polymer science: John Wiley & Sons; 2005.

11. Mark HF. Encyclopedia of polymer science and technology, 15 volume set: Wiley New York, NY, USA:; 2014.

12. Geyer B, Lorenz G, Kandelbauer A. Recycling of poly (ethylene terephthalate)–A review focusing on chemical methods. Express Polymer Letters. 2016;10(7):559-86.

13. Sadeghi B, Marfavi Y, AliAkbari R, Kowsari E, Borbor Ajdari F, Ramakrishna S. Recent studies on recycled PET fibers: Production and applications: A review. Materials Circular Economy. 2021;3:1-18.

14. Mochizuki M. Textile applications. Poly (Lactic Acid) Synthesis, Structures, Properties, Processing, Applications, and End of Life. 2022:619-29.

15. Oussai A, Bártfai Z, Kátai L. Development of 3D printing raw materials from plastic waste. a case study on recycled polyethylene terephthalate. Applied Sciences. 2021;11(16):7338.

16. Nisticò R. Polyethylene terephthalate (PET) in the packaging industry. Polymer Testing. 2020;90:106707.

17. سرلک م, علی زاده کاشانی م. بررسی وضعیت بازار تولید پلی اتیلن ترفتالات *(PET)* در صنعت پتروشیمی ایران. هشتمین همایش بین المللی نفت، گاز، پتروشیمی و *HSE1402*.

18. Askar MK, Al-Kamaki YS, Hassan A. Utilizing polyethylene terephthalate PET in concrete: A review. Polymers. 2023;15(15):3320.

19. Meena A, Surendranath A, Ramana P. Assessment of mechanical properties and workability for polyethylene terephthalate fiber reinforced concrete. Materials Today: Proceedings. 2022;50:2307-14.

20. Asdollah-Tabar M, Heidari-Rarani M, Aliha M. The effect of recycled PET bottles on the fracture toughness of polymer concrete. Composites Communications. 2021;25:100684.

21. Mohammed AA, Mohammed II. Effect of fiber parameters on the strength properties of concrete reinforced with PET waste fibers. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering. 2021;45:1493-509.

22. Mohammed Ali TK. Shear strength of a reinforced concrete beam by PET fiber. Environment, Development and Sustainability. 2021;23(6):8433-50.

23. Al-Hadithi AI, Noaman AT, Mosleh WK. Mechanical properties and impact behavior of PET fiber reinforced self-compacting concrete (SCC). Composite Structures. 2019;224:111021.

24. Alqahtani FK. Development of composite PET plastic-based aggregate and its utilization in green lightweight concrete. Arabian Journal for Science and Engineering. 2022;47(10):13397-406.

25. Albano C, Camacho N, Hernández M, Matheus A, Gutierrez A. Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios. Waste management. 2009;29(10):2707-16.

26. Yesilata B, Isıker Y, Turgut P. Thermal insulation enhancement in concretes by adding waste PET and rubber pieces. Construction and Building Materials. 2009;23(5):1878-82.

27. Ramadevi K, Manju R. Experimental investigation on the properties of concrete with plastic PET (bottle) fibres as fine aggregates. International journal of emerging technology and advanced engineering. 2012;2(6):42-6.

28. Frigione M. Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete. Waste management. 2010;30(6):11016.

29. Choi Y-W, Moon D-J, Chung J-S, Cho S-K. Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete. Cement and concrete research. 2005;35(4):776-81.

30. Islam M, Rahman M, Ahmed M. Polymer-modified concrete: world experience and potential for Bangladesh. The Indian Concrete Journal. 2011;22:55-63.

31. Baboo R, Rushad T, Bhavesh K, Duggal K. Study of waste plastic mix concrete with plasticizer. International Scholarly Research Network, ISRN Civ Eng. 2012:1-5.

32. Hama SM, Hilal NN. Fresh properties of self-compacting concrete with plastic waste as partial replacement of sand. International Journal of Sustainable Built Environment. 2017;6(2):299-308.

33. Revilla-Cuesta V, Ortega-López V, Skaf M, Manso JM. Deformational behavior of self-compacting concrete containing recycled aggregate, slag cement and green powders under compression and bending: Description and prediction adjustment. Journal of Building Engineering. 2022;54:104611.

بررسی اثر پیش‌تنیدگی بتن در مقاومت دال مسلح تحت مولفه قائم زلزله و آتش‌سوزی با استفاده از روش اجزای محدود

علیرضا باقرشمیرانی

استادیار دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست

دانشگاه شهید بهشتی، تهران

محمد علی‌عسگری

دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

چکیده

ضعف بتن در کشش همواره از چالش های طراحان سازه بوده است. راه حل های بسیاری برای بهبود این مسأله عنوان شده که یکی از آن ها مقاوم سازی به وسیله اعمال نیروی پیش تنیدگی در بتن است. روش دیگری که امروزه در صنعت ساختمان کاربردهای بیشتری پیدا کرده، استفاده از الیاف و ورق های پلیمری است که یکی از روش های استفاده از آن ها نصب در سطح مشخصی از عضو است. در این مطالعه تلاش شده است تا به وسیله تحلیل به روش اجزای محدود و مدل سازی به کمک نرم افزار آباکوس، یک دال بتن مسلح دارای ورق های CFRP ابتدا تحت نیروی قائم زلزله و سپس آتش سوزی (تنش حرارتی) در حالت بتن ساده و بتن پیش تنیده تحلیل و بررسی شود. همچنین نحوه اعمال نیروی پیش تنیدگی به صورت پیش کشیدگی می باشد. نتایج نشان داد که اعمال نیروی پیش تنیدگی می تواند جابجایی وسط دهانه دال را تا ۹۰ درصد و همچنین نیروی متحمل شده در محل تکیه گاه های سازه را تا ۹۱ درصد کاهش دهد. همچنین در بخش دیگری از نتایج مشاهده شد که عضوی که تحت تنش سنگین حرارتی گسیخته شده بود، در حالت پیش تنیده به گسیختگی نرسید و عضو به عملکرد خود ادامه داد.

کلمات کلیدی: بتن پیش تنیده، CFRP، مولفه قائم زلزله، آتش سوزی، روش اجزای محدود.

۱. مقدمه

مصری‌ها در ۵۰۰۰ سال پیش، در ساختن قایق-هایشان از خاصیت پیش‌تنیدگی استفاده می‌کردند. بدین ترتیب که، برای اتصال چوب‌های بدنه قایق، تیغه‌های آهنی گرم به کار می‌بردند تا بعد از سرد شدن و انقباظ آنها قطعات چوبی به هم فشرده شوند[۱]. جکسن (آمریکایی) در سال ۱۸۸۶ با ایجاد تنش فشاری در بتن مقاومت آن را تحت تاثیر لنگر خمشی افزایش داد. دوهرینگ (آلمانی) در سال ۱۸۸۸ با قرار دادن فولاد کشیده در داخل بتن یک دال بتنی پیش تنیده ایجاد کرد. فریسینه (فرانسوی) در سال ۱۹۲۸ بتن پیش‌تنیده را به شکلی که امروزه از آن استفاده می نمایند را اختراع کرد. با استفاده از فولادهایی با مقاومت بالا درصد از دست رفتن تنش ناشی از خزش وانقباض بتن به

تنش اولیه پیش تنیدگی را کاهش داد [۲]. اولین تجربه ساختمان سازی پیش‌ساخته در ایران به حدود ۳۰ سال پیش باز می گردد. اولین کارخانه-جات قطعات پیش‌ساخته توسط بانک ساختمانی سابق با لیسانس کارخانه چیدونیو ایتالیا برای احداث خانه سازمانی ارتش در اهواز تاسیس شد. همزمان با آن کارخانه دیگری با لیسانس کارخانه کالار فرانسه در تهران شروع به کار نمود [۳].

پیش‌تنیدگی عبارت است از ایجاد یک پیش تنش ثابت و دائمی[1] در یک عضو بتنی به نحوه دلخواه و به اندازه لازم، به طوریکه دراثر این تنش، مقداری از تنش‌های ناشی از بارهای مرده و زنده در این عضو خنثی شده و در نتیجه مقاومت باربری آن افزایش پیدا می‌کند [۴]. هدف اصلی از پیش‌تنیده کردن یک عضو بتنی، محدود کردن تنش‌های کششی و ترک‌های ناشی از لنگر خمشی، تحت تاثیر بارهای وارده درآن عضو می‌باشد. بتن جسمی است مقاوم درمقابل فشار، ولیکن مقاومت آن در مقابل کشش بسیار کم می باشد، بنابراین می توان با وارد کردن فشار به بتن، کشش ایجاد شده در اثر بار مرده و زنده را در عضو بتنی تقلیل و در نتیجه مقاومت آن را افزایش داد [۵].

پیش‌تنیدگی به دو صورت کلی انجام می شود: ۱- پیش‌کشیدگی: بسیاری از قطعات بتنی پیش ساخته‌ی پیش تنیده (از جمله تیرهای برق گرد، تیرچه تی شکل، دال‌های مجوف، تراورس راه‌آهن و ...) با این روش تولید می‌گردند. در روش پیش‌کشیدگی، ابتدا سیمها یا کابل ها را به صورت آزاد در داخل قالب قرار می‌دهند و به کمک جک‌های هیدرولیکی، تحت کشش قرار می‌گیرند. سپس عملیات بتن‌ریزی انجام شده و پس از خارج کردن هوای آن به کمک ویبراتور، شرایط لازم را برای گیرش سریع‌تر بتن فراهم می‌نمایند. پس از رسیدن بتن به مقاومت مطلوب، اضافه طول کابل‌ها برش داده شده و بتن تحت فشار قرار می‌گیرد. در این روش مثل بتن مسلح پیش‌ساخته، مقطع و محل قرارگیری کابل‌ها بر اساس بارهای محاسبه شده، مشخص و رعایت می‌گردد. ۲- پس‌کشیدگی در دال‌ها و تیرهای ساختمان‌ها، پارکینگ‌ها، برج‌ها، مخازن بتنی، دال‌های روی سطح زمین و ... از پس‌کشیدگی استفاده می‌کنند. در این روش، موقعیت کابل‌ها و صفحات مهاری را پیش از بتن-ریزی در داخل قالب تثبیت نموده و بعد از بتن‌ریزی انجام می‌گیرد. پس از رسیدن بتن به مقاومت مورد نظر، عملیات کشش کابل‌ها با استفاده از جک‌های هیدرولیکی، انجام می‌شود. مزیت پس‌کشیدگی بر پیش‌کشیدگی این است که در این روش، میتوان مسیر کابل‌ها را به گونه‌ای انحنا داد که در هر مقطع، تنش فشاری برابر با تنش کششی شکل گرفته در آن مقطع، ایجاد شود و به این ترتیب در حجم بتن‌ریزی، صرفه جویی کرد [۶].

روش‌هایی جهت جلوگیری از خوردگی قطعات فولادی الحاقی به سازه و نیز فولاد در بتن مسلح توسعه داده شده و مورد استفاده قرار گرفته است که از بین آن‌ها می‌توان به پوشش اپوکسی بر قطعات فولادی و میلگردها، تزریق پلیمر به سطوح بتنی و حفاظت کاتدیک میلگردها اشاره نمود. با این وجود هر یک از این روش‌ها فقط تا حدودی موفق بوده است [۷]. برای حذف کامل مساله، توجه محقق‌ها به جانشین کردن قطعات فولادی و میلگردهای فولای با مصالح جدید مقاوم در مقابل خوردگی،

[1] *Prestress*

معطـوف گردیـده اسـت. مـواد کـامپوزیتی[2] FRP مـوادی بسـیار مقـاوم در مقابـل محـیط‌هـای خورنـده همچـون محـیط‌هـای نمکـی و قلیـایی هسـتند. بـه همـین دلیـل امـروزه کامپوزیـت‌هـای FRP، موضـوع تحقیـق وسـیعی بـه عنـوان جانشـین قطعـه‌هـا و میلگردهـای فـولادی و کابـل‌هـای پـیش‌تنیـدگی شـده‌انـد. چنـین تحقیقـی بـه خصـوص بـرای سـازه‌هـای در مجـاورت آب و بـه خصـوص در محـیط‌هـای دریـایی و سـاحلی، بـه شـدت مـورد توجـه قـرار گرفتـه‌انـد [۸]. مصـالح FRP بـه طـور معمـول مقاومـت کششـی بسـیار بـالایی دارنـد، کـه از مقاومـت کششـی فـولاد بـه مراتـب بـیش‌تـر اسـت. مقاومـت کششـی بـالای میلگردهـای FRP کـاربرد آن‌هـا را بـرای سـازه‌هـای بـتن‌آرمـه، بـه خصـوص بـرای سـازه‌هـای پـیش‌تنیـده بسـیار مناسـب نمـوده اسـت. مقاومـت کششـی مصـالح FRP بـه مقاومـت کششـی، نسـبت حجمـی، انـدازه و سـطح مقطـع الیـاف‌هـای بـه کـار رفتـه در آن‌هـا بسـتگی دارد. مقاومـت کششـی محصـولات FRP بـرای میلـه‌هـای بـا الیـاف کـربن ۱۱۰۰ تـا ۲۲۰۰ مگاپاسـکال، بـرای میلـه‌هـای بـا الیـاف شیشـه ۹۰۰ تـا ۱۱۰۰ مگاپاسـکال و بـرای میلـه‌هـای بـا الیـاف آرامیـد ۱۳۵۰ تـا ۱۶۵۰ مگاپاسـکال گـزارش شـده اسـت [۹]. بـا ایـن وجـود، بـرای بعضـی از ایـن محصـول، حتـی مقاومـت‌هـای بـالاتر از ۳۰۰۰ مگاپاسـکال هـم گـزارش شـده اسـت. توجـه شـود کـه بـه طـور کلـی مقاومـت فشـاری میلـه‌هـای کـامپوزیتی FRP از مقاومـت کششـی آن‌هـا کمتـر اسـت. بـه عنـوان نمونـه مقاومـت فشـاری محصـولات ISOROD برابـر ۶۰۰ مگاپاسـکال مقاومـت کششـی آن‌هـا ۷۰۰ مگاپاسـکال است [۱۰].

در یـک مطالعـه عـددی انجـام شـده بـر روی رفتـار غیـرخطـی استاتیکی یک تیر بـتن پـیش‌تنیـده دورپـیچ شـده بـا ورق‌هـای GFRP [۱۷]، منحنی نیرو تغییـر مکـان تیـر بـتن پـیش‌تنیـده بدون GFRP با حـالتی کـه بـا آن‌هـا مقـاوم‌سـازی شـده اسـت، مقایسـه گردیـد. ایـن مطالعـه عـددی بـا نتیجـه یـک کـار آزمایشگاهی [۱۸]، صـحت سـنجی شـد. نتـایج نشـان مـی‌دهـد کـه بـار نهـائی تیـر بـتن پـیش‌تنیـده بـدون تقویـت GFRP ۱۴۶٫۸ کیلونیـوتن و بـار نهـایی تیـر بـتن پـیش‌تنیـده دورپـیچ شـده بـا ورق GFRP ۱۹۵٫۵ کیلونیوتـون مـی‌باشـد. تیـر تقویـت شـده بـا کامپوزیـت GFRP نسـبت بـه تیـر بـدون تقویـت ۳۳٫۱ درصـد افـزایش مقاومـت داشـته اسـت. ایـن تیـر همچنـین مقـدار جابجـایی وسـط دهانـه بـیش‌تـری نسـبت بـه تیر بدون تقویت هنگام اعمـال بـار نهـایی داشـته‌انـد کـه میـزان افزایش جابجایی متنـاظر بـا نیـروی حـداکثر مقـدار قابـل توجـه ۱۵۸ درصـد مـی‌باشـد. همچنـین سـختی تیـر تقویـت شـده از روی نمـودار ۳۰٫۸ کیلونیـوتن بـر میلـی‌متـر و سـختی نمونـه بدون تقویت ۳۵٫۴ بـه دسـت آمـده اسـت. نکتـه قابـل تأمـل در مقایسه رفتار نمونـه‌ی تقویـت شـده بـا کامپوزیـت‌هـای GFRP بـا نمونـه‌ی بـدون تقویـت افـزایش چشـمگیر در شـکل‌پـذیری ایـن نمونـه مـی‌باشـد. ایـن افـزایش ۹۸٫۶ درصـد مـی‌باشـد. بـه عبـارتی بـا تقویـت تیـر بـتن پـیش‌تنیـده بـا کامپوزیـت‌هـای GFRP بـه صـورت دورپـیچ، شـکل‌پـذیری آن تقریبـا دو برابـر خواهـد شـد. ضـمنا میـزان انـرژی جـذب شـده بـرای محـدوده بارگـذاری تـا بـار حـداکثر بـرای تیـر تقویـت شـده بـا کامپوزیـت‌هـای GFRP نسـبت بـه تیـر بـدون تقویـت ۲۴۸ درصـد افـزایش داشـته اسـت، کـه بیـانگر تـاثیر قابـل توجـه تقویـت ترکیبـی بـا کامپوزیـت‌هـای GFRP بـر افـزایش میـزان انرژی پذیری تیرهای بتن پیش‌تنیده می‌باشد.

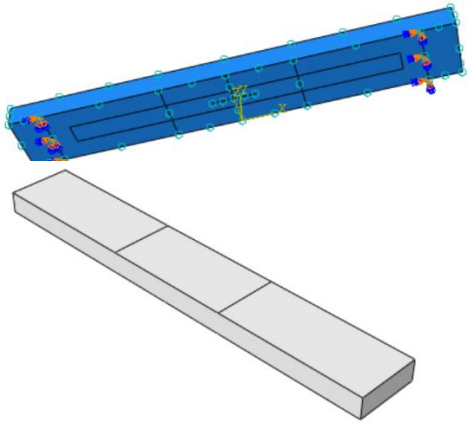
[2] *Fiber Reinforced Polymers/Plastics*

در ایـن مطالعـه یـک دال بـتن مسـلح مقـاوم سـازی شـده بـا ۲ عـدد ورق CFRP تحـت تـاثیر همزمـان نیـروی قـائم زلزلـه و آتش‌سوزی در دو حالـت بـتن سـاده و بـتن پـیش‌تنیـده تحلیـل و مقایسـه شـده اسـت. تحلیـل بـه کمـک روش اجـزای محـدود و مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس انجام شده است.

۲. نحوه مدل‌سازی به کمک روش اجزای محدود و شـرح روش

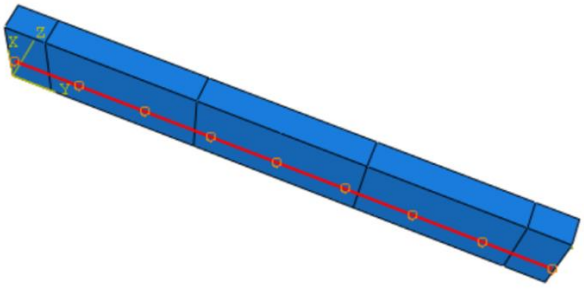
۲-۱. هندسه مدل

مدلسـازی اجـزا و دالهـای بتنـی در برنامـه اجـزای محـدود آبـاکوس متـداول مـی‌باشـد [۱۱ و ۱۲]، در ایـن مطالعـه، یـک دال تخت بتن مسـلح بـه ابعـاد بـه طـول ۲ متـر، بـه عـرض ۳۰ سـانتی‌متـر، و ضـخامت ۱۰ سـانتی‌متـر کـه در شـکل ۱ نشـان داده شـده اسـت، بـرای مـدل‌سـازی در نـرم‌افـزار آبـاکوس در نظر گرفتـه شـده اسـت. دال روی دو تکیـه‌گـاه بـه فاصـله ۰,۱۵ متـر از ابتـدا و انتهـای آن قـرار دارد. همچنـین دو عـدد ورق مسـتطیلی CFRP در مرکـز سـطح زیـرین دال بـه صـورت نصـب در نزدیـک سـطح (NSM) در ابعـاد ۱۵۰ در ۱۰ سـانتی متـر چسـبانده شـده اسـت کـه در شـکل۱ نمـایش داده شده است.

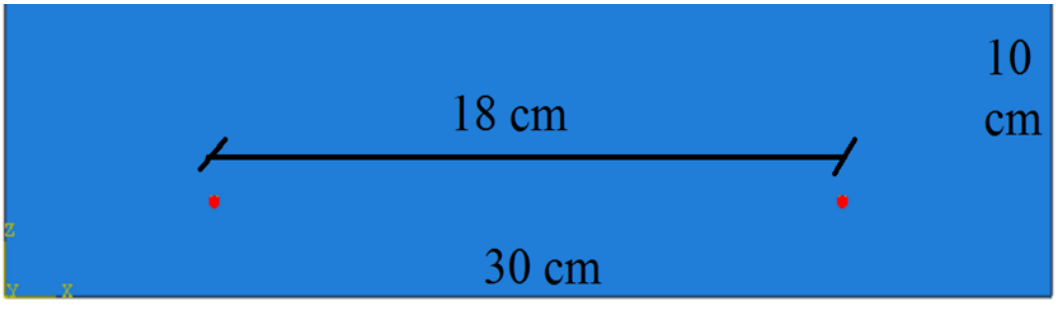


شکل ۱. هندسه دال بتن مسلح به همراه تکیه گاه و ورق CFRP

همچنـین از دو عـدد میلگـرد فـولادی بـه قطـر ۸ میلـی‌متـر (میلگـرد نمـره ۸) بـرای مسـلح‌سـازی دال اسـتفاده شـده اسـت (شـکل ۲). در شـکل ۳، نحـوه جانمـایی میلگـردهـا در دال نشان داده شده است.



شکل ۲. میلگردهای مدل‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس



شکل ۳. نحوه جانمایی میلگردها در مقطع دال

۲-۲. مشخصات مصالح

۲-۲-۱. بتن

در انجام این مطالعه از بتن C70 استفاده شده است، که مقدار مدول الاستیسیته آن برابر ۳۳,۴گیگاپاسکال می‌باشد. همچنین ضریب انتقال حرارت بتن، مقدار ۰,۵۸ ($W\times m^{-1}\times°K^{-1}$) در نظر گرفته شده است [۱۳]. لازم به ذکر است که میزان کاهش مدول الاستیسیته بتن به ازای افزایش دما طبق مطالعه آزمایشگاهی انجام شده [۱۴]، به شرح جدول ۱ می‌باشد.

جدول ۱: تغییرات مدول الاستیسیته بتن با افزایش دما [۱۴]

دما (درجه سلسیوس)	مدول الاستیسیته بتن (گیگا پاسکال)
۲۰	۳۳,۴۰
۱۰۰	۳۱,۷۳
۲۰۰	۳۰,۰۶
۳۰۰	۲۶,۷۲
۴۰۰	۲۳,۳۸
۵۰۰	۱۶,۷۰
۶۰۰	۱۱,۶۹
۸۰۰	۳,۳۴

همچنین مقدار نیروی کششی پیش‌تنیدگی اعمال شده به بتن در حالت پیش‌تنیده طبق آیین‌نامه آبا[۱۵] معادل ۲ مگاپاسکال می‌باشد که به روش پیش‌کشیدگی اعمال شده و برای مدل سازی به جای مدل کردن کابل‌های فولادی از ابزار Predefined Field در مدول بارگذاری استفاده شده است.

۲-۲-۲. میلگردهای فولادی

برای میلگردهای فولادی، از فولاد S550 با تنش تسلیم ۵۵۰ مگاپاسکال استفاده شده است. تغییرات ضریب انبساط فولاد تحت افزایش دما، طبق جدول ۲ در نظر گرفته شده است. همچنین تغییرات مدول الاستیسیته فولاد با افزایش دما، در جدول ۳ ذکر شده است.

۲-۲-۳. ورق‌های پلیمری

ورق‌های پلیمری استفاده شده در مدل از نوع کربنی (CFRP) می‌باشد که مدول الاستیسیته‌ای معادل ۱۲۲,۷ گیگاپاسکال دارد. برای مدل کردن خرابی و گسیختگی CFRP از مدل آسیب هاشین[3] استفاده شده است که جزئیات آن را در جدول ۴ نمایش داده شده است. ورق‌های CFRP تا دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس پایداری خود را حفظ کرده اما دچار کاهش مقاومت می‌شوند و سپس بعد از این دما دیگر کاربرد مقاوتی خود را ندارند.

جدول ۲: تغییرات ضریب انبساط میلگرد فولاد با افزایش دما

دما (درجه سلسیوس)	ضریب انبساط فولاد (1/°C)
۲۰	۰,۰۰۰۱۲۰
۱۰۰	۰,۰۰۰۱۲۴
۲۰۰	۰,۰۰۰۱۲۸
۳۰۰	۰,۰۰۰۱۳۲
۴۰۰	۰,۰۰۰۱۳۶
۵۰۰	۰,۰۰۰۱۴۰
۶۰۰	۰,۰۰۰۱۴۴
۶۵۰	۰,۰۰۰۱۴۶
۷۰۰	۰,۰۰۰۱۴۸
۷۲۵	۰,۰۰۰۱۴۹
۸۰۰	۰,۰۰۰۱۵۲
۹۰۰	۰,۰۰۰۱۵۶

[3] *Hashin Damage*

جدول ۳: تغییرات مدول الاستیسیته فولاد با افزایش دما [۱۶]

دما (درجه سلسیوس)	مدول الاستیسیته فولاد (گیگا پاسکال)
۱۰۰	۲۰۰
۲۰۰	۱۸۹
۳۰۰	۱۶۸
۴۰۰	۱۴۷
۵۰۰	۱۲۶
۶۰۰	۶۵,۱
۷۰۰	۲۷,۳
۸۰۰	۱۸,۹
۹۰۰	۱۴,۲

جدول ۴: مدل آسیب هاشین برای ورق‌های CFRP

مقاومت کششی طولی (مگاپاسکال)	مقاومت فشاری طولی (مگاپاسکال)	مقاومت کششی عرضی (مگاپاسکال)	مقاومت فشاری عرضی (مگاپاسکال)	مقاومت برشی طولی (مگاپاسکال)	مقاومت برشی عرضی (مگاپاسکال)	دما (سلسیوس)
۱۰۲۰	۶۰۰	۸۰	۱۴۰	۱۰۰	۱۰۰	۲۰
۹۴۵	۵۵۶	۷۷	۱۳۴	۹۶	۹۶	۱۰۰
۷۹۰	۴۶۵	۶۴	۱۱۲	۸۰	۸۰	۱۵۰
۶۴۲	۳۷۸	۵۲	۹۱	۶۵	۶۵	۲۰۰
۵۷۷	۳۳۹	۴۷	۸۲	۵۹	۵۹	۲۵۰
۵۴۳	۳۲۰	۴۴	۷۷	۵۵	۵۵	۳۰۰
۴۶۸	۲۷۶	۳۸	۶۷	۴۸	۴۸	۴۰۰
۱۷۲	۱۰۱	۱۴	۲۴	۱۷	۱۷	۵۰۰

۲-۳. بارها و تنش‌های وارده

۲-۳-۱. نیروی قائم زلزله

جهت تحلیل دال تحت نیروی قائم زلزله از رکورد زلزله Chi Chi تایوان استفاده شده است. جهت تحلیل بهتر رکورد زلزله از نرم‌افزار Seismosignal استفاده است. لازم به ذکر است که رکورد ابتدا نرمال شده و سپس با ضریب تاثیر ۰,۰۱۱ به دال وارد شد. سپس تغییرات جابجایی ایجاد شده در نقطه وسط دهانه به صورت شرایط مرزی با ضریب تاثیر ۰,۵ به سازه وارد و تحلیل شد.

۲-۳-۲. تنش حرارتی

برای مدل‌سازی اثر آتش‌سوزی درجه حرارت از دمای اتاق تا ۹۰۰ درجه سلسیوس افزایش داده شد و سپس به مرور به دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس کاهش می‌یابد. مدت زمان اعمال این تنش ۱۰۸۰۰ ثانیه می‌باشد و به کل سطح تماس روی دال اعمال شده است. نحوه افزایش درجه حرارت در جدول ۵ ذکر شده است. لازم به ذکر است که این تنش بعد از اثر نیروی قائم زلزله به سازه اعمال شده است.

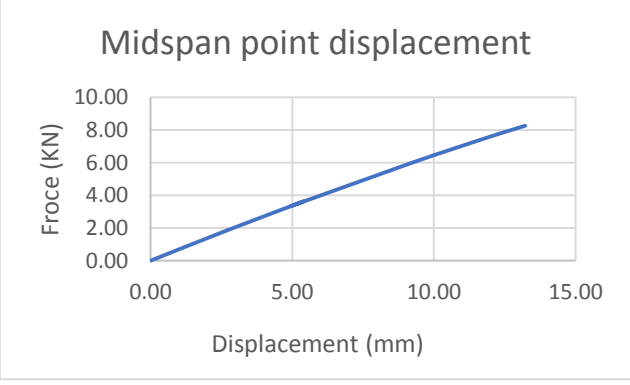
جدول ۵: نحوه افزایش درجه حرارت در مدت زمان اعمال تنش حرارتی

زمان (ثانیه)	دما (درجه سلسیوس)
۰	۲۰
۶۰۰	۴۰۰
۹۰۰	۵۵۰
۱۲۰۰	۶۵۰
۱۵۰۰	۷۲۵
۱۸۰۰	۸۰۰
۲۴۰۰	۹۰۰
۳۰۰۰	۹۰۰
۳۶۰۰	۸۷۰
۴۲۰۰	۸۰۰
۴۸۰۰	۷۰۰
۵۴۰۰	۶۰۰
۶۰۰۰	۵۰۰
۶۶۰۰	۴۰۰
۷۲۰۰	۳۰۰
۷۸۰۰	۲۵۰
۸۴۰۰	۲۲۰
۹۰۰۰	۱۸۰
۹۶۰۰	۱۵۰
۱۰۲۰۰	۱۲۰
۱۰۸۰۰	۱۰۰

۳. تحلیل و بررسی نتایج

۳,۱. صحت سنجی مدل‌سازی و نتایج

برای این منظور و اثبات معتبر بودن نتایج ابتدا با استفاده از اعمال بار ثقلی مشخصی مقدار خیز وسط دهانه دال اندازه گیری و سپس با نتایج یک آزمایش عملی [۱۳] مقایسه شد که دارای همپوشانی نزدیکی بود. طبق نتایج آزمایش عملی با اعمال نیرویی حدود ۹ کیلونیوتون مقدار خیر وسط دهانه دال آزمایش تا نزدیک ۱۳ میلیمتر ادامه می‌یابد و سپس دال گسیخته می‌شود. شکل شماره ۴ نمودار خیز وسط دهانه دال حاصل شده از اعمال نیروی ثقلی به آن در مدل آباکوس می‌باشد.



شکل ۴. نمودار جابجایی وسط دهانه دال به ازای نیروی اعمالی به آن در مدل آباکوس آزمایش

همچنین برای مش بندی مدل از مش بندی مثلثی به مساحت ۰,۵ سانتی‌متر مکعب استفاده شده است تا دقت نتایج تا حد خوبی افزایش یابد.

۳,۲. تفسیر نتایج

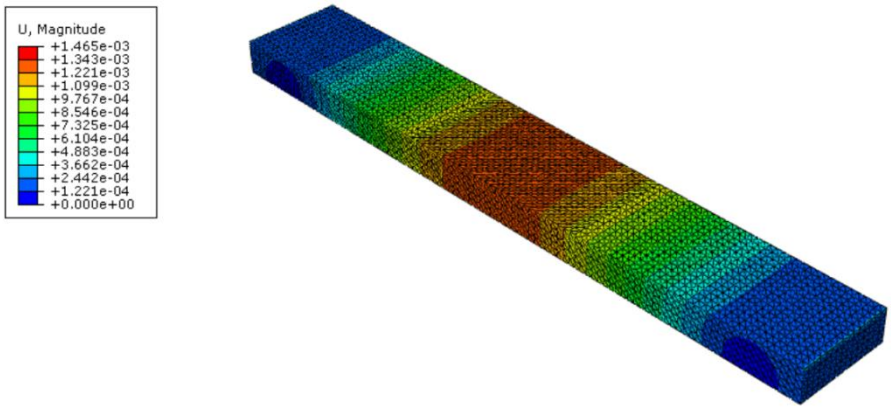
جهت تفسیر نتایج از نقطه وسط دهانه برای تحلیل نتایج جابجایی دال و برای بررسی نیروهای ایجاد شده در سازه از یک نقطه منتخب در محل تکیه‌گاه سازه استفاده شده است. نتیجه حاصل از تحلیل مدل با بتن ساده نشان داد که دال تحت اثر تنش‌های وارده گسیخته می‌شود. مقدار بیشینه جابجایی مثبت و منفی نقطه وسط دهانه در حالت بتن ساده به ترتیب ۱,۶۸ و ۱,۴۷- میلی‌متر گزارش شده است. دال در ادامه حرکت رو به پایین گسیخته می‌شود و عدد ۱,۴۷ آخرین عدد گزارش شده قبل از گسیختگی می‌باشد. همچنین مقدار بیشینه نیروی دریافتی دال به هنگام حرکت رو به بالا در محل تکیه‌گاه مقدار ۰,۷- کیلونیوتون و در حرکت

رو به پایین که منجر به گسیختگی می‌شود عدد ۰٫۶ کیلونیوتون گزارش شده است.

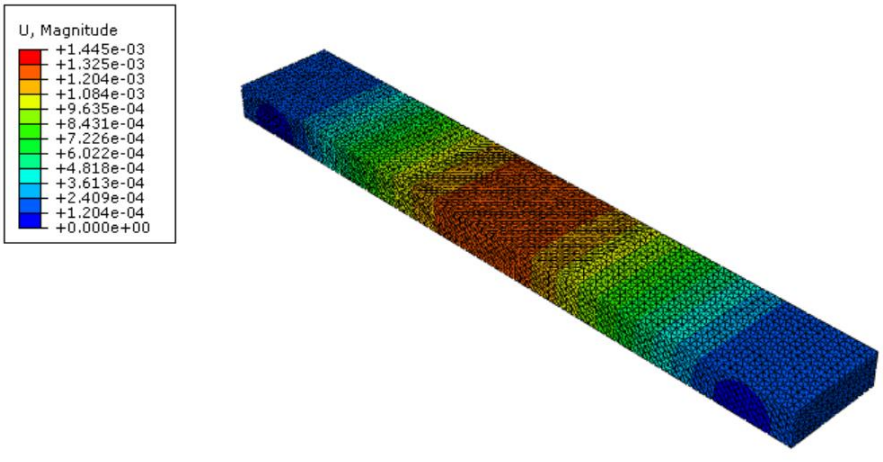
در نتایج تحلیل مدل با بتن پیش‌تنیده مشاهده شد که بتن مقاوم‌تر شده و گسیخته نمی‌شود. مقدار جابجایی وسط دهانه در این حالت در دو حالت اوج بالا و پایین به ترتیب برابر ۱٫۵ و ۰٫۱۳- میلی‌متر گزارش شده است. همچنین مقدار بیشینه نیروی دریافتی دال در محل تکیه‌گاه به ترتیب در اوج بالا و پایین برابر ۰٫۶- و ۰٫۰۵ کیلونیوتون گزارش شده است.

با توجه به نتایج مشاهده شده که مطابق انتظار اعمال نیروی پیش‌تنیدگی در غالب پیش‌کشیدگی باعث افزایش مقاومت سازه، افزایش شکل پذیری و ایجاد نیروی کمتر در محل تکیه‌گاه‌های سازه شده است.

در شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب کانتور جابجایی دال با بتن ساده و دال با بتن پیش‌تنیده در لحظه بیشینه‌ی خیز قابل مشاهده است.

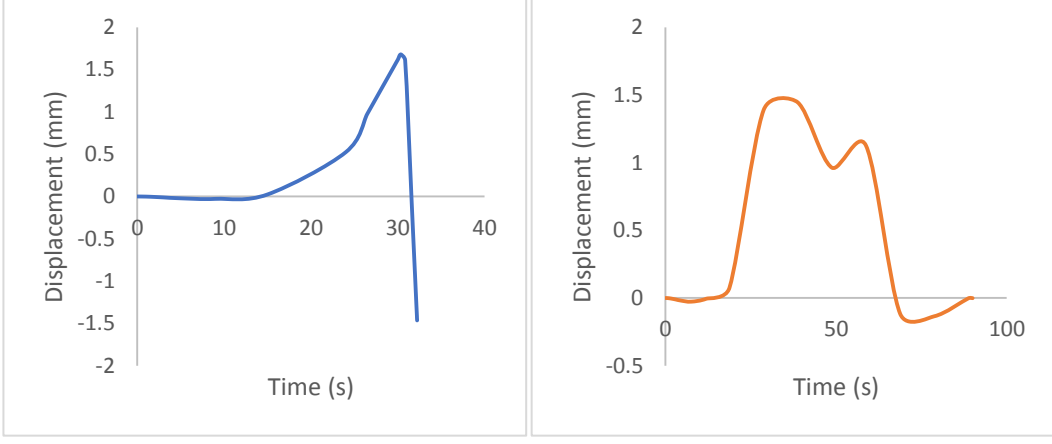


شکل ۵. کانتور جابجایی دال با بتن ساده

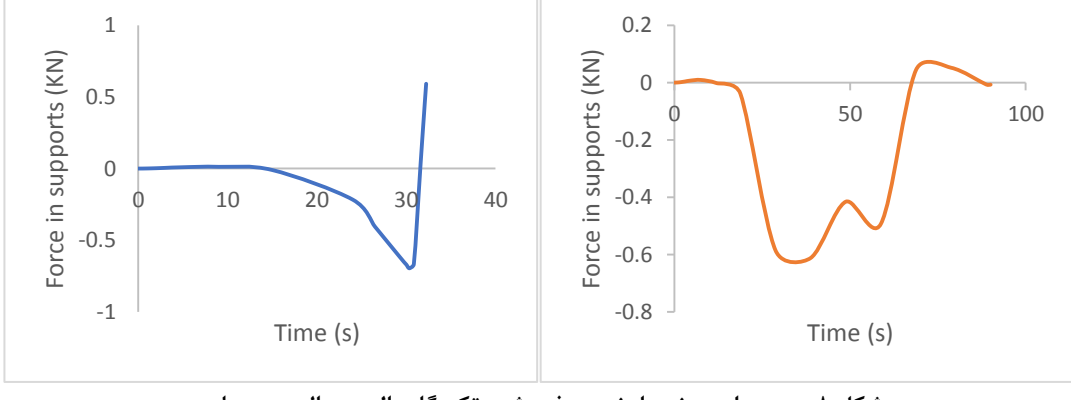


شکل ۶. کانتور جابجایی دال با بتن پیش‌تنیده

برای مقایسه بهتر اثر پیش‌تنیدگی روی دال باید نمودار مسیر طی شده در طول تحلیل بررسی شود. همانطور که در شکل ۶، قابل مشاهده است، تغییر شکل دال در حالت پیش‌تنیده بسیار متفاوت از حالت معمولی است. همینطور در مقایسه نیروهای جذب شده در محل تکیه‌گاه (شکل ۷) روندی به طور کامل متفاوت در حالت بتن پیش‌تنیده مشهود است.



شکل ۷. سمت راست: نمودار جابجایی نقطه وسط دهانه دال در حالت بتن ساده
سمت چپ: نمودار جابجایی نقطه وسط دهانه دال در حالت بتن پیش‌تنیده



شکل ۸. سمت راست: نمودار نیرو جذب شده تکیه‌گاه دال در حالت بتن ساده
سمت چپ: نمودار نیرو جذب شده تکیه‌گاه دال در حالت بتن پیش‌تنیده

اعمال نیروی پیش‌گشیدگی به بتن باعث افزایش جذب انرژی و شکل‌پذیری در بتن شده است. میزان کاهش خیز در حالت پیش‌تنیده برابر ۹۰ درصد است که درصد تغییرات نیروی جذب شده به جز در محل گسیختگی تفاوت چشمگیری نمی‌کند.

۴. نتیجه‌گیری

به طور کلی با توجه با مطالعه انجام شده می‌توان عنوان کرد که اعمال نیروی پیش‌تنیدگی به طور کلی باعث افزایش مقاومت سازه می‌شود. در این بررسی دال تحت شرایط شبیه سازی آتش‌سوزی بعد از زلزله که بسیار محتمل می‌باشد قرار گرفت که یکی از چالش برانگیزترین محک‌ها برای مقاومت سازه است. با این حال مشاهده شد که وجود پیش‌تنیدگی تاثیر بزرگی در افزایش مقاومت خواهد گذاشت. مقدار کاهش جابجایی یک نقطه معیار در این مطالعه تحت اثر پیش‌تنیدگی حدود ۹۰ درصد گزارش شد که این مقدار می‌تواند با تغییر نحوه اعمال پیش‌تنیدگی دچار تغییراتی شود. همچنین مشاهده شد که تاثیر پیش‌تنیدگی در افزایش مقاومت کششی بتن بسیار چشمگیر است. به نحوی که دال با بتن ساده در بخشی از حرکت تناوبی ایجاد شده توسط زلزله که بتن دچار کشش شدید می‌شود، گسیخته شده اما با اعمال نیروی پیش‌تنیدگی این مقدار تا حدود ۹۱ درصد کاهش یافت.

۵. منابع

[۱] فرخی‌زاده، س.، رفیعی‌راد، ا. بررسی پیش‌تنیدگی و پس‌تنیدگی در بتن و مزایای سیستم پیش‌تنیده، دانشگاه آزاد اسلامی واحد میبد، ۱۳۹۳.

[۲] صدرالساداتی، ع.، بتن پیش‌تنیده، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یزد، ۱۳۹۵.

[۳] طاهریان، ر.، دشتی رحمت آبادی، م. معرفی بتن پیش‌تنیده، روش‌های اجرا و ویژگی آن، چهارمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران، معماری و شهرسازی، تهران، ۱۳۹۹.

[۴] خزلی، ف.، دهنوی، م.، بررسی و عملکرد بتن پیش تنیده و خصوصیات آن، ششمین کنفرانس بین‌المللی پژوهش‌های کاربردی در علوم و مهندسی، آخن، آلمان، ۱۴۰۱.

[۵] احمدی، ه.، خدابخشی، ع. مطالعه سقف‌های پیش‌تنیده، تنکابن، ۱۳۹۵.

[۶] فرخی زاده, سعید و افشین رفیعی راد (۱۳۸۳). بررسی پیش‌تنیدگی و پس‌تنیدگی در بتن ومزایای سیستم پیش‌تنیده، دومین همایش ملی مصالح ساختمان و فناوری‌های نوین در صنعت ساختمان، میبد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد میبد.

[7] Razaqpur, A. G., and Kashef, A. H., "State-of-the-Art on Fiber Reinforced Plastics for Buildings," Submitted to: Institute for Research in Construction – National Research Council of Canada, Carleton University, Ottawa, (1993).

[۸] رحمتی، م.، مراحم، حسین.، مقاوم‌سازی سازه‌های بتن‌آرمه با استفاده از مواد کامپوزیتی *FRP*. ششمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران، معماری و شهرسازی. تهران. ۱۴۰۱.

[9] Yamasaki, Y., Masuda, Y., Tanano, H., and Shimizu, A., "Fundamental Properties of Continuous Fiber Bars," Fiber-Reinforced-Plastic Reinforcement for Concrete Structures, International Symposium, ACI-SP-138, (1993), p. 715-730.

[10] Bedard, Claude, "Composite Reinforcing Bars: Assessing Their Use in Concrete", Concrete International, 1992, p. 55-59.

[11] Bagher Shemirani, A., (2022), "Effects of fiber combination on the fracture resistance of hybrid reinforced concrete" Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 46, p. 2161-2172.

[12] Bagher Shemirani, A., (2022), "Experimental and numerical studies of concrete bridge decks using ultra high-performance concrete and reinforced concrete" Computers and Concrete, 29(6), p. 407-418.

[13] Mahmoud, H.S., Hawileh, R.A., Abdalla, J.A., (2021), "Strengthening of high strength reinforced concrete thin slabs with CFRP Laminates", Composite Structures, 275, 114412.

[14] Kodur, V.K.R., Banerji, S., Solhmirzaei, R., (2020), "Test methods for characterizing concrete properties at elevated temperature" Journal of Fire and Materials, 44(3), p. 381-395.

[۱۵] معاونت امور فنی. دفتر تدوین ضوابط و معیارهای فنی (۱۳۸۲). آیین‌نامه طرح و محاسبه قطعات پیش‌تنیده: بخش الحاقی به آیین‌نامه بتن ایران (آبا). نشریه ۲۵۰. ناشر: سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، معاونت امور پشتیبانی، مرکز مدارک علمی و انتشارات.

[16] Outinen, J., (2004), "Mechanical properties of structural steels at elevated temperatures and after cooling down", Fire and Materials, 28(2), p. 237-251.

[۱۷] محمدزاده سرایی، م.، دهستانی، م.، اعظمی، و. تحلیل غیرخطی تیر بتن پیش‌تنیده دورپیچ شده با ورق *GFRP*. دومین همایش ملی پژوهش‌های مهندسی عمران. تهران. ۱۳۹۵.

[۱۸] محمدزاده سرایی، م.، دهستانی، م.، یزدانی، م.، ۱۳۹۴ ،" بررسی عددی رفتار تیر بتن پیش‌تنیده و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی"، همایش ملی مهندسی عمران و پژوهش‌های نیاز محور.