بررسی و مقایسه رفتار فوق‌روان‌کننده‌های پلی‌کربوکسیلات اتر با عملکرد معمولی و حفظ‌کننده اسلامپ طولانی‌مدت در بتن

سعید خالوئی[1*]، هادی چیتگر[2]، علیرضا تاجبخشیان[3]

۱- کارشناس ارشد فنی، واحد فنی و پشتیبانی، شرکت بسپار بتن ایرانیان هوشمند (استرامیکس)

۲- مدیرعامل، شرکت بسپار بتن ایرانیان هوشمند (استرامیکس)

۳- مدیر واحد تحقیق و توسعه (R&D)، شرکت بسپار بتن ایرانیان هوشمند (استرامیکس)

Saeed.khalooee@strumix.com

چکیده

این پژوهش به بررسی و مقایسه عملکرد دو نوع فوق‌روان‌کننده پلی‌کربوکسیلات اتر، شامل نوع با عملکرد معمولی (NA-PCE) و نوع حفظ‌کننده اسلامپ بلندمدت (SR-PCE) ، در بتن‌های معمولی (CC) و خودتراکم (SCC) می‌پردازد. آزمایش‌ها با هدف ارزیابی فنی، اقتصادی و اجرایی این افزودنی‌ها طراحی شدند. نتایج نشان داد که برای رسیدن به روانی اولیه مشابه، مقدار مصرفی SR-PCE به‌طور میانگین ۵۰ تا ۵۵ درصد بیشتر از NA-PCE است. در عوض، SR-PCE توانست اسلامپ بتن را تا بیش از ۹۰ دقیقه بدون نیاز به افزودن مجدد حفظ کند؛ در حالی که NA-PCE پس از افت روانی، تنها با مصرف مجدد قابل بازیابی بود.

در پروژه‌هایی با زمان حمل کوتاه تا متوسط (کمتر از ۴۵ دقیقه) یا زمانی‌که امکان افزودن مجدد روان‌کننده در محل اجرا وجود دارد، استفاده از NA-PCE می‌تواند تا ۱۰ تا ۱۵ درصد کاهش در مصرف کلی افزودنی و تا ۵۰ درصد صرفه‌جویی نسبت به مصرف اولیه SR-PCE ایجاد کند. این مزیت، به‌ویژه در پروژه‌های نزدیک به سایت یا دارای نیروی فنی مجرب، اهمیت بیشتری می‌یابد. در مقابل، SR-PCE گزینه‌ای ایمن و پایدار برای شرایط سخت اجرایی، حمل‌ونقل طولانی، یا کارگاه‌های فاقد امکان مدیریت مصرف مجدد است. به‌طور کلی، این مطالعه نشان می‌دهد که انتخاب هوشمندانه بین NA-PCE و SR-PCE باید بر پایه الزامات فنی پروژه، شرایط کارگاهی، مهارت نیروی انسانی و ملاحظات اقتصادی صورت گیرد.

واژگان کلیدی

بتن خودتراکم، افزودنی‌های شیمیایی، فوق‌روان‌کننده، روانی بتن، مقاومت فشاری، دوام بتن، حفظ اسلامپ، پلی‌کربوکسیلات اتر

۱. مقدمه

بتن پرکاربردترین ماده ساختمانی است و در اغلب سازه‌های عمرانی، از ساختمان‌های مسکونی گرفته تا سدها، پل‌ها، تونل‌ها و سازه‌های صنعتی، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این ماده به‌دلیل در دسترس بودن مواد اولیه، قابلیت شکل‌پذیری زیاد پیش از گیرش، و ایجاد مقاومت مطلوب پس از سخت شدن، جایگاه بی‌رقیبی در صنعت ساخت‌وساز دارد[۱،۲]. همچنین قابلیت تولید انبوه، امکان استفاده در شرایط آب‌وهوایی متنوع و تطبیق‌پذیری با روش‌های مختلف اجرایی، از دیگر عواملی است که موجب گسترش استفاده از بتن در پروژه‌های عمرانی شده است[۳] .

با افزایش سطح انتظارات از کیفیت و دوام بتن، نقش افزودنی‌های شیمیایی در فرموله کردن مخلوط بتن بیش‌ازپیش اهمیت یافته است .در این میان، فوق‌روان‌کننده‌ها به‌عنوان یکی از مهم‌ترین افزودنی‌ها، نقش حیاتی در کاهش نسبت آب به سیمان و در عین حال حفظ یا افزایش روانی بتن ایفا می‌کنند[۴]. استفاده از این ترکیبات، نه‌تنها موجب بهبود خواص بتن تازه مانند کارایی و قابلیت پمپ کردن می‌شود، بلکه بر خواص سخت‌شده نظیر مقاومت فشاری و دوام نیز اثرگذار است[۵] .

با وجود مزایای فوق‌روان‌کننده‌ها، یکی از چالش‌های رایج در استفاده از بتن آماده، کاهش تدریجی اسلامپ در طول زمان حمل، تخلیه و انتظار در کارگاه است[۶]. این پدیده که به‌ویژه در شرایط آب‌وهوایی گرم یا در فواصل طولانی حمل تشدید می‌شود و می‌تواند منجر به افت کارایی بتن، دشواری در اجرا و حتی نیاز به اضافه کردن مجدد فوق‌روان‌کننده در محل اجرا گردد[۷] .

از این‌رو، حفظ کارایی بتن بدون افت شدید اسلامپ به یکی از نیازهای اساسی در پروژه‌های بزرگ و حساس تبدیل شده است [۸] .اطمینان از پایداری روانی بتن در بازه زمانی لازم برای حمل، پمپ کردن و اجرا، نه‌تنها کیفیت نهایی سازه را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بلکه از بروز تأخیر، دوباره‌کاری و افزایش هزینه‌های اجرایی جلوگیری می‌کند[۹،۱۰] .

در همین راستا، توسعه روان‌کننده‌های بتن مبتنی بر پلی‌کربوکسیلات اتر (PCE) تحولی بنیادین در فناوری افزودنی‌های شیمیایی بتن ایجاد کرده است[۱۱]. این دسته از روان‌کننده‌ها با ساختار منحصربه‌فرد شانه‌ای خود، که متشکل از یک زنجیره اصلی حاوی گروه‌های آنیونی و زنجیره‌های جانبی پلی‌اتیلن گلایکول (PEG) می‌باشد، عملکردی متمایز از نسل‌های پیشین نظیر نفتالین‌سولفونات‌ها یا ملامین‌سولفونات‌ها ارائه می‌دهند[۱۲]. سازوکار عملکرد این افزودنی‌ها ترکیبی از جذب الکترواستاتیکی و بازدارندگی فضایی است[۱۳]. گروه‌های کربوکسیلات موجود در زنجیره اصلی با بار منفی، به‌واسطه‌ی نیروی الکترواستاتیکی به سطح ذرات سیمان با بار مثبت جذب می‌شوند[۱۳]. در عین حال، زنجیره‌های جانبی محلول در آب با ایجاد سد فضایی مانع از نزدیک شدن مجدد ذرات سیمان به یکدیگر شده و از تجمیع دوباره آن‌ها جلوگیری می‌کنند[۱۴]. این سازوکار دوگانه موجب پخش مؤثرتر ذرات سیمان، آزادسازی آب محبوس در بین آن‌ها، و در نهایت کاهش تنش تسلیم و افزایش کارایی بتن می‌گردد[۱۹،۲۰] .

ترکیب‌بندی ساختاری این افزودنی‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای در رفتار آن‌ها دارد .در روان‌کننده‌های طراحی‌شده برای حفظ اسلامپ طولانی‌مدت (Slump-Retaining Polycarboxylate Ether (SR-PCE))، معمولاً از زنجیره‌های جانبی بلندتر و متراکم‌تری استفاده می‌شود، که با وجود مزایایشان در حفظ روانی، به‌دلیل حجم زیاد و تراکم کمتر بار الکتریکی، نیاز به مصرف بیشتری دارند[۱۹،۲۰]. در مقابل، روان‌کننده‌هایی که برای تأمین روانی اولیه زیاد و عملکرد معمولی بهینه‌سازی شده‌اند (Normal-Acting Polycarboxylate Ether (NA-PCE))، با تمرکز بر چگالی بار بیشتر و زنجیره‌های کوتاه‌تر، معمولاً در مقدار مصرف کمتر تأثیرگذارند، اما افت اسلامپ سریع‌تری را تجربه می‌کنند[۱۵] .

فرآیند تولید روان‌کننده‌های حفظ‌کننده اسلامپ از پیچیدگی بیشتری برخوردار است[۱۶]. استفاده از منومرهای ویژه و زنجیره‌های با وزن مولکولی زیاد، به‌همراه کنترل دقیق شرایط پلیمره شدن برای دستیابی به ساختاری با وزن مولکولی مناسب و شاخص پخش‌کنندگی کم (PDI) ، موجب افزایش هزینه تولید این نوع روان‌کننده‌ها می‌گردد[۱۷]. در نتیجه، روان‌کننده‌های مخصوص حفظ اسلامپ، علاوه بر نیاز به مصرف بیشتر، از نظر اقتصادی نیز در مقایسه با انواع معمولی، هزینه‌برتر محسوب می‌شوند[۱۸]. این مسئله باعث می‌شود که انتخاب میان این دو نوع روان‌کننده، نیازمند ملاحظات دقیق فنی و اقتصادی بر اساس شرایط پروژه باشد. برای بررسی دقیق‌تر و مقایسه ویژگی‌های کلیدی فوق‌روان‌کننده‌های با عملکرد معمولی (NA-PCE) و فوق‌روان‌کننده‌های حفظ‌کننده اسلامپ طولانی‌مدت (SR-PCE)، جدول ۱ طراحی شده است.

در سال‌های اخیر، با گسترش کاربرد بتن‌های توانمند و خوداتراکم(SCC) ، تولید و استفاده از فوق‌روان‌کننده‌های بر پایه پلی‌کربوکسیلات اتر(PCE) در ایران به‌طور قابل‌توجهی توسعه یافته است. بسیاری از تولیدکنندگان ایرانی موفق شده‌اند با بهره‌گیری از روش‌های نسبتاً ساده اما مؤثر پلیمره شدن آبی رادیکالی آزاد، محصولات قابل قبولی با عملکرد مناسب در بتن تولید کنند[۲۱]. با این حال، چالش‌هایی نیز همچنان وجود دارد که عمدتاً به طراحی ساختار مولکولی پلیمر و کنترل دقیق سنتز مربوط می‌شوند. در برخی فرمول‌های رایج، انتخاب طول زنجیره جانبی یا نسبت مونومرها به‌گونه‌ای است که رفتار روانی بتن در زمان محدود حفظ می‌شود اما پایداری اسلامپ در بازه‌های زمانی طولانی کاهش می‌یابد.

در این تحقیق، عملکرد دو نوع فوق‌روان‌کننده پلی‌کربوکسیلات اتر (PCE) با ساختارهای مولکولی متفاوت شامل فوق‌روان‌کننده با عملکرد معمولی (NA-PCE)و فوق‌روان‌کننده حفظ‌کننده اسلامپ بلندمدت (SR-PCE) مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور، چهار طرح مخلوط بتن شامل دو طرح بتن معمولی و دو طرح بتن خوداتراکم طراحی و اجرا شد.

آزمایش‌ها در دو سناریو مختلف انجام گرفت: نخست، حالتی که بتن با استفاده از روان‌کننده‌های مخصوص حفظ اسلامپ ساخته شد؛ و دوم، حالتی که پس از افت اسلامپ اولیه، افزودن مجدد فوق‌روان‌کننده برای بازیابی روانی بتن ضرورت یافت. پارامترهای مورد ارزیابی شامل اسلامپ معمولی، جریان اسلامپ، ارزیابی چشمی پایداری بتن و مقاومت فشاری در بتن بود. همچنین، ویژگی‌های پایه‌ای خود فوق‌روان‌کننده‌ها از جمله وزن مخصوص، مقدار pH و درصد مواد جامد خشک نیز مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۱- مقایسه ویژگی‌های فوق‌روان‌کننده‌های با عملکرد معمولی (NA-PCE) و حفظ‌کننده اسلامپ طولانی‌مدت (SR-PCE)

ویژگی‌های کلی	فوق روان‌کننده‌های طراحی شده برای عملکرد معمولی (NA-PCE)	روان‌کننده‌های طراحی‌شده برای حفظ اسلامپ طولانی‌مدت (SR-PCE)
ساختار مولکولی	زنجیره اصلی با چگالی زیاد گروه‌های آنیونی و زنجیره‌های جانبی کوتاه‌تر و کم‌تر	زنجیره‌های جانبی بلندتر و متراکم‌تر با وزن مولکولی زیاد و شاخص پخش‌کنندگی کم
سازوکار جذب روی ذرات سیمان	جذب سریع‌تر و قوی‌تر به علت تراکم زیاد بار الکتریکی	جذب کندتر ولی پایدارتر به دلیل حجم بزرگ‌تر و تراکم کمتر بار
کارایی در افزایش روانی اولیه	افزایش سریع روانی و پخش‌شدگی عالی در مقدار مصرف کمتر	روانی قابل‌قبول، اما نیازمند مقدار مصرف بیشتر برای رسیدن به همان سطح
پایداری روانی (حفظ اسلامپ)	افت سریع‌تر اسلامپ و کاهش روانی در زمان کوتاه تر (۳۰ تا ۶۰ دقیقه)	حفظ روانی و اسلامپ طولانی‌مدت حتی در شرایط دشوار مانند حمل‌ونقل طولانی (بیشتر از ۶۰ دقیقه)
تأثیر بر زمان گیرش بتن	معمولاً تأثیر کمتری بر تأخیر گیرش اولیه دارد	ممکن است باعث تأخیر در گیرش اولیه بتن شود
میزان مصرف بهینه (مقدار مصرفی)	مقدار مصرف کمتر برای اثرگذاری اولیه	مقدار مصرف بیشتر برای حفظ روانی طولانی‌مدت
پیچیدگی فرآیند تولید و هزینه‌های مربوطه	فرآیند تولید ساده‌تر و هزینه کمتر	فرآیند تولید پیچیده‌تر، استفاده از منومرهای ویژه، هزینه بیشتر
موارد کاربرد و شرایط بهینه استفاده	پروژه‌هایی با نیاز به روانی اولیه زیاد، فاصله حمل کمتر و سرعت اجرای بیشتر	پروژه‌هایی با نیاز به حفظ اسلامپ و روانی طولانی مانند بتن‌ریزی‌های حجیم یا حمل‌ونقل طولانی
ملاحظات اقتصادی و صرفه‌جویی در پروژه	به دلیل مقدار مصرف کمتر و هزینه کم‌تر مقرون‌به‌صرفه‌تر	هزینه زیادتر به دلیل مقدار مصرف بیشتر و فرآیند تولید پیچیده‌تر

۲. مواد و روش‌ها

در این بخش، مصالح مصرفی، مشخصات فوق‌روان‌کننده‌های مورد بررسی، روش طراحی طرح مخلوط، فرآیند ساخت نمونه‌ها و همچنین روش انجام آزمایش‌های مربوط به بتن تازه و سخت‌شده ارائه شده است. کلیه آزمایش‌ها در شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی و مطابق با استانداردهای مربوطه انجام گرفته است. هدف از این بخش، فراهم‌سازی بستر علمی برای ارزیابی تطبیقی عملکرد فوق‌روان‌کننده‌های پلی‌کربوکسیلات اتر با عملکرد معمولی (NA-PCE) و حفظ‌کننده اسلامپ بلندمدت (SR-PCE) در بتن‌های مختلف است.

۱.۲. مواد و مصالح

۱.۱.۲. سیمان

در این پژوهش، از سیمان پرتلند نوع ۲ نیزار قم مطابق با استاندارد ملی ۳۸۹ ایران استفاده شد. وزن مخصوص ظاهری این سیمان ۳/۱۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب بود.

۲.۱.۲. سنگدانه‌ها

مصالح سنگی شامل شن با حداکثر اندازه اسمی ۱۹ میلی‌متر از معدن کارخانه دی و ماسه طبیعی با حداکثر اندازه ۴/۷۵ میلی‌متر و مدول نرمی ۳ از معدن کارخانه زرنام تهیه شدند. وزن مخصوص ذرات شن و ماسه به ترتیب ۲/۶ و ۲/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب بوده و میزان جذب آب آن‌ها به ترتیب برابر با ۲/۲ و ۲/۶ درصد اندازه‌گیری شد.

۳.۱.۲. فوق‌روان‌کننده‌ها

در این تحقیق از دو نوع فوق‌روان‌کننده پلی‌کربوکسیلات اتر با عملکرد متفاوت شامل فوق‌روان‌کننده با عملکرد معمولی (NA-PCE) و فوق‌روان‌کننده با خاصیت حفظ اسلامپ بلندمدت (SR-PCE) استفاده شد.

هر دو افزودنی از محصولات شرکت استرامیکس و حاصل توسعه واحد تحقیق و توسعه این شرکت هستند. این محصولات به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که روانی بتن را به شکل مؤثری افزایش دهند و در عین حال ویژگی‌های عملکردی مختلفی از جمله حفظ اسلامپ طولانی‌مدت یا روانی اولیه زیاد ارائه دهند.

به منظور اطمینان از مقایسه منصفانه عملکرد افزودنی‌ها و کاهش تأثیر تفاوت درصد مواد جامد، هر دو فوق‌روان‌کننده با درصد خشک مشابه ۴۰ درصد در طرح مخلوط بتن مورد استفاده قرار گرفتند. درصد خشک نشان‌دهنده نسبت وزنی مواد جامد محلول به کل وزن افزودنی مایع است و معیار مهمی در تنظیم مقدار مصرفی و قیمت محصول محسوب می‌شود.

ویژگی‌های فیزیکی این دو فوق‌روان‌کننده با توجه به ساختار مولکولی متفاوت آن‌ها متمایز است. فوق‌روان‌کننده با عملکرد معمولی (NA-PCE) دارای وزن مخصوص ۱/۱۰۶ و pH برابر با ۴/۵ است، در حالی که فوق‌روان‌کننده حفظ‌کننده اسلامپ بلندمدت (SR-PCE) دارای وزن مخصوص ۱/۱۰۳ و pH برابر با ۵/۵ می‌باشد. این مشخصات فیزیکی مطابق با الزامات استاندارد ASTM C494 اندازه‌گیری شدند.

با توجه به اهداف تجاری و حفظ مالکیت فکری شرکت تولیدکننده، جزئیات بیشتر مربوط به ترکیب ساختاری و فرآیند تولید فوق‌روان‌کننده‌ها در این مقاله ارائه نشده است. این اقدام به منظور حمایت از حقوق انحصاری و تضمین مزیت رقابتی محصولات اتخاذ شده است.

۲.۲. طرح مخلوط‌ها

با هدف بررسی عملکرد افزودنی‌های فوق‌روان‌کننده NA-PCE وSR-PCE ، چهار طرح اختلاط بتن طراحی و اجرا شدند. این طرح‌ها شامل دو طرح بتن خودتراکم (SCC) و دو طرح بتن معمولی (CC) هستند که در آن‌ها از مصالح معرفی‌شده در بخش قبل استفاده شده است. در تمامی طرح‌ها نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۳۸ ثابت نگه داشته شد و تنها نوع و مقدار افزودنی مصرفی به‌عنوان متغیر اصلی لحاظ گردید.

در طرح‌های بتن معمولی، فوق‌روان‌کننده‌ها به میزانی به مخلوط اضافه شدند که اسلامپ اولیه حدود ۲۲ سانتی‌متر حاصل شود. پس از رسیدن به اسلامپ هدف، تغییرات اسلامپ در فواصل زمانی ۱۵ دقیقه‌ای اندازه‌گیری شد. در طرح‌های دارای فوق‌روان‌کننده معمولی(NA-PCE) ، به محض آنکه اسلامپ کمتر از ۸ سانتی‌متر شد، عملیات مصرف مجدد با افزودن مقدار مناسبی از فوق‌روان‌کننده انجام گرفت تا روانی مناسب مجدداً حاصل شود. پس از مصرف مجدد افزودنی، اندازه‌گیری اسلامپ ادامه یافت تا زمانی که مقدار آن به ۱۵ سانتی‌متر برسد یا حداکثر مدت زمان ۱ ساعت و ۴۵ دقیقه سپری شود. انتخاب مقدار ۱۵ سانتی‌متر به‌عنوان کف عملکرد پمپ‌پذیری بتن بر اساس محدودیت‌های اجرایی و شرایط رایج پمپ کردن بتن در کشور ایران انجام شده است. در مقابل، برای طرح‌های دارای فوق‌روان‌کننده با خاصیت حفظ اسلامپ بلندمدت (SR-PCE) ، از مصرف مجدد افزودنی خودداری شد و تغییرات اسلامپ صرفاً در فواصل زمانی ۱۵ دقیقه‌ای تا سقف ۱ ساعت و ۴۵ دقیقه مورد بررسی قرار گرفت.

در طرح‌های بتن خودتراکم نیز، هدف دستیابی به جریان اسلامپ اولیه حدود ۷۰ سانتی‌متر بود و فوق‌روان‌کننده‌ها به میزانی به مخلوط اضافه شدند که این مقدار حاصل شود. پس از آن، تغییرات جریان اسلامپ در بازه‌های ۱۵ دقیقه‌ای ثبت شد. در طرح‌های دارای فوق‌روان‌کننده معمولی، در صورت کاهش جریان اسلامپ به کمتر از ۶۰ سانتی‌متر، مجدداً عملیات اضافه کردن مجدد افزودنی انجام شد و روند افت مجدد روانی تا پایان بازه ۱ ساعت و ۴۵ دقیقه دنبال گردید. این مقدار حداقل جریان اسلامپ بر اساس حداقل روانی مورد نیاز برای پمپ‌پذیری و پایداری بتن خودتراکم در شرایط اجرایی تعیین شده است. در طرح‌هایی که از افزودنی SR-PCE استفاده شده بود، پس از رسیدن به جریان اسلامپ اولیه هدف، بدون مصرف مجدد، مقدار جریان روانی هر ۱۵ دقیقه تا پایان بازه ۱ ساعت و ۴۵ دقیقه بررسی و ثبت گردید.

جدول ۲- طرح مخلوط‌های بتن

کد طرح مخلوط	سیمان (Kg/m^3)	آب (Kg/m^3)	ماسه (Kg/m^3)	شن (Kg/m^3)	فوق روان‌کننده مرحله اول (Kg/m^3)	فوق روان‌کننده مرحله دوم (مصرف مجدد) (Kg/m^3)
CC-NA-PCE	۴۰۰	۱۵۲	۱۰۰۰	۷۸۳	۱/۸۰۰	۰/۵۷۰
CC-SR-PCE	۴۰۰	۱۵۲	۱۰۰۰	۷۸۳	۲/۸۰۰	۰
SCC-NA-PCE	۵۰۰	۱۹۰	۱۱۰۵	۴۹۲	۳/۱۰۰	۱/۲۰۰
SCC-SR-PCE	۵۰۰	۱۹۰	۱۱۰۵	۴۹۲	۴/۷۵۰	۰

۳.۲. شرح آزمایش‌ها

۳.۲. ۱. تعیین خواص فیزیکی فوق‌روان‌کننده‌ها (درصد مواد جامد، pH، وزن مخصوص)

برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی دو نوع فوق‌روان‌کننده پلی‌کربوکسیلات اتر شامل نوع با عملکرد معمولی (NA-PCE) و نوع با حفظ اسلامپ بلندمدت (SR-PCE)، آزمایش‌هایی مطابق با الزامات استاندارد ASTM C494 انجام شد. این آزمون‌ها شامل اندازه‌گیری درصد مواد جامد (درصد خشک)، pH و وزن مخصوص بودند. برای تعیین درصد مواد جامد، نمونه‌ها در دمای کنترل‌شده خشک شده و با محاسبه افت وزن، مقدار مواد غیر فرار موجود در ترکیب مشخص گردید pH هر فوق‌روان‌کننده با استفاده از pH متر کالیبره شده اندازه‌گیری شد. همچنین، وزن مخصوص با استفاده از ظرف استاندارد اندازه‌گیری چگالی و طبق روش تعریف‌شده در ASTM C494 محاسبه گردید. این پارامترها به‌منظور مقایسه عملکرد فیزیکی دو نوع فوق‌روان‌کننده مورد بررسی قرار گرفتند.

۳.۲. ۲. اسلامپ، جریان اسلامپ و بررسی چشمی پایداری جریان (VSI)

برای ارزیابی کارایی بتن معمولی، از آزمایش اسلامپ طبق استاندارد ASTM C143 استفاده شد. در این آزمایش، مخروط اسلامپ در سه مرحله به‌صورت یکنواخت با بتن پر شده و در هر مرحله با میله‌ای فلزی متراکم می‌گردد. سپس مخروط به‌صورت عمودی و بدون لرزش برداشته می‌شود و میزان افت بتن (تفاوت ارتفاع اولیه و نهایی) به عنوان مقدار اسلامپ اندازه‌گیری می‌شود. این مقدار بیانگر روانی و قابلیت کار بتن در شرایط اجرا است.

برای ارزیابی قابلیت جریان بتن خودتراکم در غیاب موانع، از آزمایش جریان اسلامپ و شاخص پایداری چشمی مطابق با استاندارد ASTM C1611 استفاده شد. این آزمایش شامل پر کردن مخروط اسلامپ، برداشتن عمودی آن و اندازه‌گیری دو قطر عمود بر هم پس از توقف حرکت بتن است. پس از انجام آزمایش جریان اسلامپ، شاخص پایداری چشمی با اختصاص عددی بین ۰ تا ۳ به بتن، میزان پایداری آن را به‌صورت کمی نشان می‌دهد. جزئیات این شاخص در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- مقادیر شاخص پایداری چشمی (VSI) طبق استاندارد ASTM C1611

مقادیر VSI	معیار
۰= کاملاً پایدار	بدون جداشدگی و آب انداختگی در بتن
۱= پایدار	بدون جداشدگی و با کمی آب انداختگی و درخشندگی در سطح
۲= ناپایدار	با حلقه محیطی کوچک (≤۱۰mm) و یا انباشتگی سنگدانه در توده بتن
۳= کاملاً ناپایدار	جداشدگی قابل توجه به دلیل وجود حلقه محیطی بزرگ (≤۱۰mm) و یا انباشتگی سنگدانه های درشت در مرکز حلقه بتن

۳.۲. ۳. مقاومت فشاری بتن

برای تعیین مقاومت فشاری نمونه‌های بتن، از آزمون فشار مطابق با استاندارد **BS EN 12390-3** استفاده شد. نمونه‌ها به‌صورت مکعب‌هایی با ابعاد ۱۵×۱۵×۱۵ سانتی‌متر قالب‌گیری شده و در شرایط استاندارد عمل‌آوری گردیدند. سپس در سنین ۷ و ۲۸ روز، نمونه‌ها تحت بارگذاری محوری در دستگاه فشار قرار گرفته و نیروی شکست ثبت شد. با تقسیم نیروی وارده بر سطح مقطع نمونه، مقدار مقاومت فشاری در هر سن محاسبه گردید. این آزمون به‌منظور ارزیابی کیفیت بتن و تأثیر افزودنی‌ها یا شرایط اختلاط بر عملکرد مکانیکی آن انجام گرفت.

۳. تحلیل و نتایج آزمایش‌ها

در این بخش، نتایج حاصل از آزمایش بتن‌های حاوی دو نوع مختلف فوق‌روان‌کننده پلی‌کربوکسیلات اتر، یکی با عملکرد معمولی و دیگری با قابلیت حفظ اسلامپ درازمدت، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. تحلیل در دو بخش بتن تازه و بتن سخت‌شده انجام شده است تا تأثیر نوع روان‌کننده بر رفتار بتن در مراحل مختلف ارزیابی گردد.

۱.۳. نتایج و تحلیل آزمایش‌های بتن تازه

در این بخش، پارامترهای مرتبط با بتن تازه شامل اسلامپ معمولی، جریان اسلامپ بتن خودتراکم، درصد هوای محبوس و وزن مخصوص بررسی و تحلیل شده‌اند. هدف از این بررسی، ارزیابی تأثیر دو نوع فوق‌روان‌کننده پلی‌کربوکسیلات اتر با عملکرد متفاوت (NA-PCE و SR-PCE) بر ویژگی‌های تازه بتن است تا تغییرات رفتاری بتن در حالت تازه به‌درستی تشریح شود.

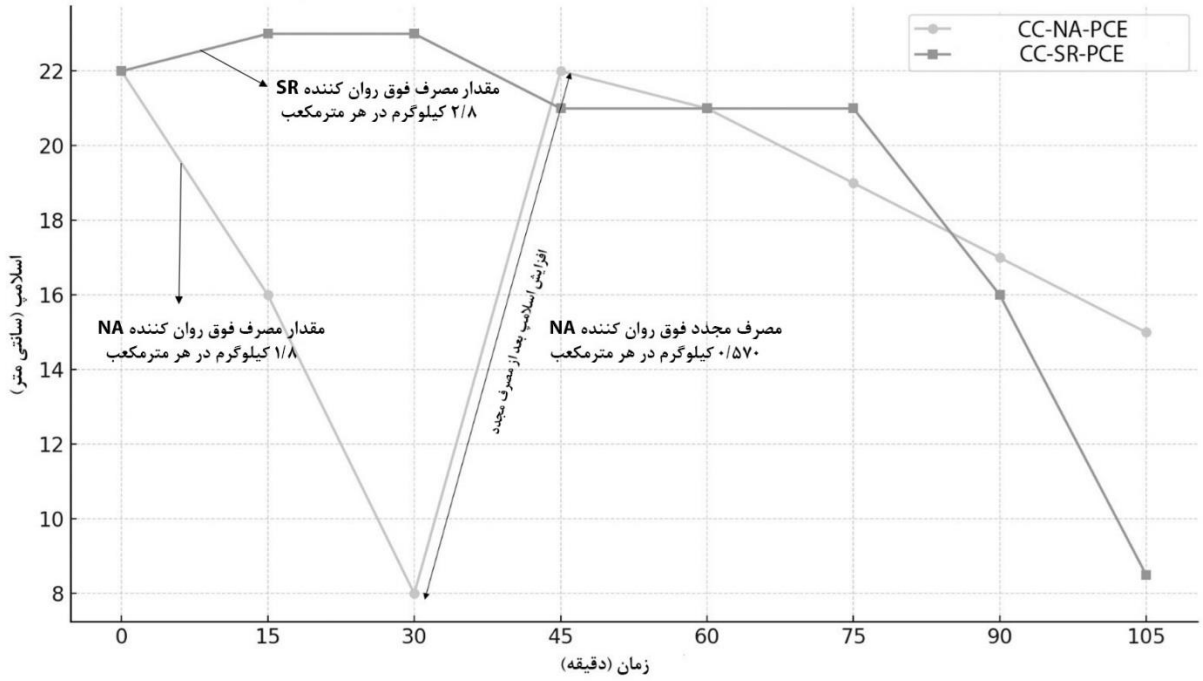
۱.۳. ۱. اسلامپ بتن‌های معمولی (CC)

همانطور که در نمودار ۱ مشاهده می‌شود، هر دو مخلوط بتن معمولی (CC) با روان‌کننده‌های NA-PCE و SR-PCE در ابتدا اسلامپی برابر با ۲۲ سانتی‌متر نشان دادند. اما رفتار آن‌ها در طول زمان متفاوت بود. مخلوط حاوی NA-PCE پس از ۳۰ دقیقه با افت قابل ملاحظه اسلامپ به ۸ سانتی‌متر مواجه شد که با افزودن مجدد ۰/۵۷ kg/m^3 از این ماده، اسلامپ به مقدار اولیه بازگشت و در پایان ۱۰۵ دقیقه به ۱۵ سانتی‌متر رسید. در مقابل، مخلوط SR-PCE بدون نیاز به افزودن مجدد، در ۳۰ دقیقه اول افزایش جزئی اسلامپ تا ۲۳ سانتی‌متر را نشان داد و پس از ۶۰ دقیقه پایداری، در نهایت به ۸.۵ سانتی‌متر کاهش یافت. این تفاوت‌ها ناشی از ویژگی‌های ذاتی این دو نوع روان‌کننده است که در فرآیند سنتز و تولید آن‌ها تعیین می‌شود.

از منظر مصرف مواد فوق روان‌کننده برای رسیدن به اسلامپ اولیه ۲۲ سانتی‌متر، مخلوط حاوی SR-PCE به ۲/۸ kg/m^3 روان‌کننده نیاز داشت، در حالی که این مقدار برای NA-PCE تنها ۱/۸ kg/m^3 بود. این بدان معناست که مصرف SR-PCE حدود ۵۵ درصد بیشتر از NA-PCE برای رسیدن به همان سطح روانی است. در پروژه‌هایی با فواصل حمل کوتاه تا میان مدت، استفاده از SR-PCE نه‌تنها مزیت فنی ندارد، بلکه منجر به افزایش غیرضروری هزینه‌ها می‌شود. متأسفانه در برخی کارخانه‌های بتن آماده ایران، به‌صورت یکنواخت از SR-PCE برای تمامی سفارش‌ها استفاده می‌شود که موجب افزایش حدود ۱ kg/m^3 مصرف روان‌کننده و در نتیجه افزایش چشمگیر هزینه‌ها در پروژه‌های بزرگ می‌گردد.

نکته حائز اهمیت این است که حتی با مصرف مجدد NA-PCE در پای کار و با افزودن ۰/۵۷ kg/m^3 ، مجموع مصرف آن (۲/۳۷ kg/m^3) همچنان حدود ۱۵ درصد کمتر از مصرف اولیه SR-PCE و اسلامپ نهایی آن در ۱۰۵ دقیقه بیشتر از نمونه حفظ اسلامپ‌دار است. این موضوع نشان‌دهنده پتانسیل صرفه‌جویی قابل توجه در مصرف مواد افزودنی با استفاده از افزودنی های NA-PCE است که نیاز به مصرف مجدد در پای کار دارند.

از طرفی باید توجه داشت که استفاده از SR-PCE در بتن‌های معمولی مزایای قابل توجهی نیز دارد، به‌ویژه در پروژه‌هایی با فاصله حمل طولانی، برنامه‌ریزی فشرده، یا شرایطی که امکان مصرف مجدد وجود ندارد. در چنین مواردی، پایداری ذاتی اسلامپ در SR-PCE می‌تواند از بروز خطاهای انسانی و مشکلات اجرایی جلوگیری کند. در نهایت، انتخاب بین این دو روان‌کننده باید بر اساس معیارهای فنی-اقتصادی و با در نظر گرفتن عوامل مختلفی از جمله فاصله حمل، شرایط کارگاهی، و مهارت نیروی انسانی انجام شود تا بهینه‌ترین نتیجه حاصل گردد.



نمودار ۱- اسلامپ بتن های معمولی (CC) در طول زمان

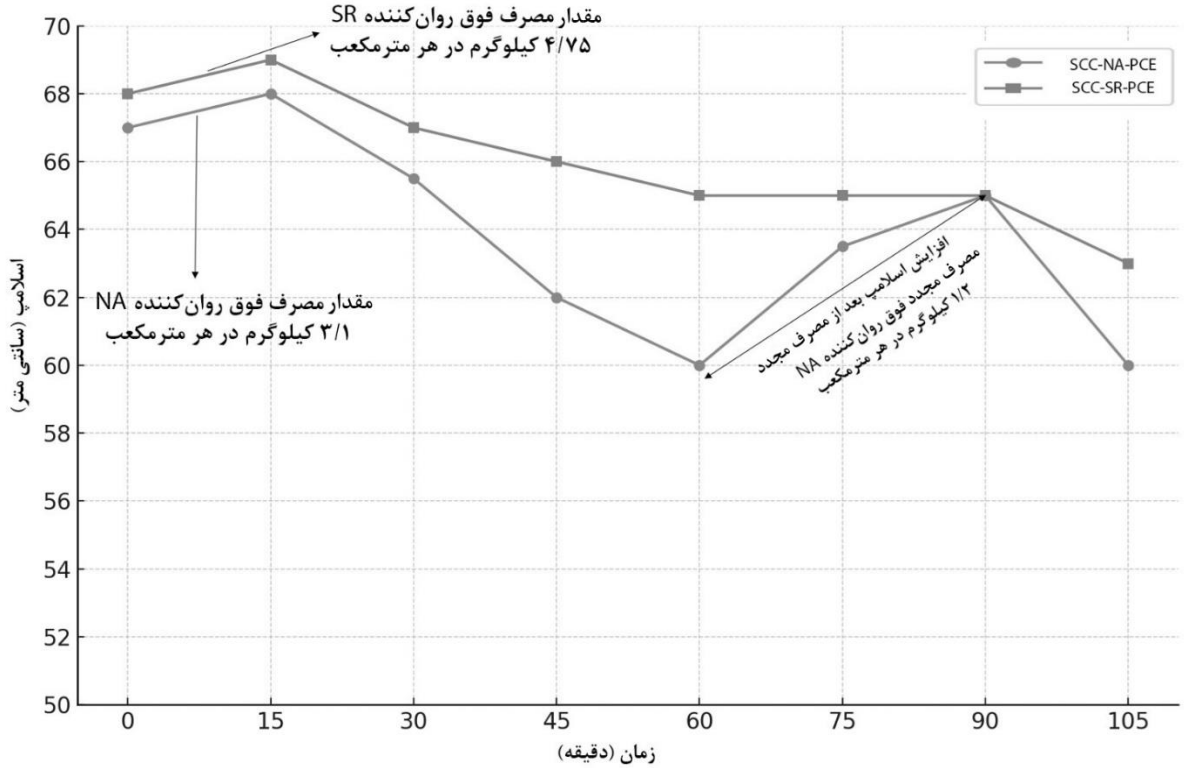
۳.۱. ۲. اسلامپ بتن‌های خودتراکم (SCC)

بر اساس نمودار ۲، هر دو طرح مخلوط SCC-NA-PCE و SCC-SR-PCE در ابتدا روانی تقریباً یکسانی در حدود ۷۰ سانتی‌متر از خود نشان دادند. این در حالی است که برای دستیابی به این سطح روانی، مقدار مصرف فوق‌روان‌کننده در مخلوط SCC-SR-PCE معادل ۴/۷۵ کیلوگرم در هر مترمکعب بوده که نسبت به مقدار مصرفی ۳/۱ کیلوگرم در هر مترمکعب برای SCC-NA-PCE ، حدود ۵۳ درصد بیشتر است.

در ادامه روند، مشاهده می‌شود که با گذشت زمان و تا دقیقه ۶۰، افت اسلامپ در هر دو مخلوط رخ می‌دهد اما شدت این افت در SCC-NA-PCE بیشتر است؛ به‌طوری‌که اسلامپ این مخلوط به ۶۰ سانتی‌متر کاهش یافته، در حالی که SCC-SR-PCE همچنان اسلامپی در حدود ۶۵ سانتی‌متر را حفظ کرده است. این موضوع بیانگر پایداری بهتر روانی در مخلوط حاوی فوق‌روان‌کننده SR می‌باشد.

پس از مصرف مجدد فوق‌روان‌کننده NA به میزان ۱/۲ کیلوگرم در هر مترمکعب در دقیقه ۶۰، اسلامپ مخلوط SCC-NA-PCE مجدداً افزایش یافته و در دقیقه ۹۰ به حدود ۶۵ سانتی‌متر می‌رسد. با این حال، در دقیقه ۱۰۵ مجدداً افت اسلامپ مشاهده می‌شود و مقدار آن به حدود ۶۰ سانتی‌متر کاهش می‌یابد که همچنان کمتر از مقدار ثبت‌شده برای SCC-SR-PCE در همین زمان است.

در مجموع، مقدار کل فوق‌روان‌کننده مصرفی در مخلوط SCC-NA-PCE (با احتساب مصرف مجدد) برابر با ۴/۳ کیلوگرم در هر مترمکعب است که نسبت به مخلوط SCC-SR-PCE ، حدود ۹/۵ درصد کمتر است. این نتایج نشان می‌دهد که اگرچه SCC-SR-PCE به مقدار اولیه بیشتری از فوق‌روان‌کننده نیاز دارد، اما پایداری اسلامپ بهتری را در بازه زمانی طولانی‌تر فراهم می‌کند. در مقابل، SCC-NA-PCE با وجود مصرف کلی کمتر فوق‌روان‌کننده، نیازمند مصرف مجدد و مدیریت دقیق‌تر جهت حفظ روانی در مدت زمان بیشتر است.



نمودار ۲- اسلامپ بتن های خودتراکم (SCC) در طول زمان

۳.۱.۳. تحلیل رفتار بتن بر اساس شاخص پایداری چشمی(VSI)

بررسی نتایج شاخص پایداری چشمی (VSI) نشان داد که تمام طرح‌های بتن در این مطالعه از منظر پایداری مخلوط در حالت تازه، عملکرد خوبی داشتند و مقدار VSI برای همه آن‌ها در محدوده ۰ تا حداکثر ۱ ثبت شد. این مقادیر بیانگر آن است که در هیچ‌کدام از مخلوط‌ها، جداشدگی یا آب‌انداختگی گسترده مشاهده نشده است. با این حال، در بتن خودتراکم حاوی روان‌کننده معمولی (SCC-NA-PCE) ، پس از مصرف مجدد در دقیقه ۶۰، مقدار VSI به ۲ رسید و بروز مقداری آب‌انداختگی و شروع جداشدگی ذرات قابل مشاهده بود (عکس ۱).

این پدیده را می‌توان ناشی از توان زیاد پخش‌کنندگی NA-PCE دانست که در مقدار مصرف دوم، ذرات ریز سیمان را بیش‌ازپیش از یکدیگر دور کرده و گرانروی خمیر سیمانی را کاهش داده است. در نتیجه، مخلوط بتن دیگر توان نگهداری ذرات ریز سیمان را نداشته و این باعث شده است تا شیره‌ای از آب و ذرات ریز در سطح بتن جمع شود .نکته مهم اینجاست که اگر این کاهش گرانروی و جداشدگی سطحی رخ نمی‌داد، چه بسا افزایش بیشتر جریان اسلامپ نیز مشاهده می‌شد. اما خمیر سیمان به دلیل کاهش گرانروی توان کافی برای حفظ یکنواختی را از دست داده بود.

در واقع، جداشدگی موجب کاهش پیوستگی بین سنگدانه‌های درشت و ریز در ماتریس بتن شد. این گسست در ساختار پیوسته مخلوط، حرکت هماهنگ اجزای بتن را مختل کرده و مانع از گسترش جریان اسلامپ شد. به‌طور معمول، وجود پیوستگی میان ذرات درشت و ریز باعث انتقال مؤثر نیرو و تسهیل حرکت کل توده بتن می‌شود؛ به‌ویژه آنکه سنگدانه‌های درشت، به دلیل سطح مخصوص کمتر، در صورت حفظ انسجام، نقش مؤثری در افزایش جریان اسلامپ دارند. اما در این حالت، به دلیل جداشدگی، این پیوستگی از بین رفته و بتن دچار افت حرکت شده است.

نکته کلیدی دیگر به مشخصات مصالح برمی‌گردد. در این پژوهش از ماسه‌ای با مدول نرمی تقریبا نامناسب (مدول نرمی = ۳) استفاده شده که به‌تنهایی قادر به تأمین ریزدانه‌های کافی برای حفظ انسجام بتن نیست .این موضوع نشان می‌دهد که در ترکیب با فوق‌روان‌کننده‌های پرقدرتی مانند NA-PCE ، استفاده از چنین ماسه‌ای می‌تواند باعث کاهش پایداری شود. لذا توصیه می‌شود در طرح‌هایی که مدول نرمی ماسه در محدوده‌های مرزی یا مشکوک قرار دارد، از مواد جایگزین سیمان مانند پودر زئولیت، متاکائولن یا خاکستر بادی بهره‌گیری شود تا حجم خمیر افزایش یافته و گرانروی خمیر تثبیت گردد [۲۲,۲۳,۲۴].

همچنین باید توجه داشت که این پدیده در شرایط آزمایشگاهی و بدون اختلاط دائم پس از مصرف مجدد افزودنی رخ داده است .در شرایط واقعی پروژه و با چرخش مداوم تراک‌میکسر، احتمال بروز چنین جداشدگی‌هایی کاهش می‌یابد، زیرا اختلاط پیوسته باعث جلوگیری از انباشت شیره در سطح و حفظ یکنواختی بتن می‌شود. بنابراین، نتایج حاصل از آزمون آزمایشگاهی، شرایط سخت‌گیرانه‌تری را نسبت به واقعیت‌های کارگاهی منعکس می‌کنند.

در نهایت، این تحلیل تأکید می‌کند که در استفاده از روان‌کننده‌های قوی مانند NA-PCE ، طراحی دقیق طرح مخلوط و توجه به ریزساختار مصالح سنگی نقش کلیدی دارد. برقراری تعادل میان روانی زیاد و پایداری خمیر، مستلزم حضور ذرات ریز کنترل‌شده، افزودنی‌های اصلاح‌کننده رئولوژی و مدیریت صحیح در پای کار است.

عکس ۱- شکل ظاهری بتن خودتراکم حاوی NA-PCE بعد از مصرف مجدد

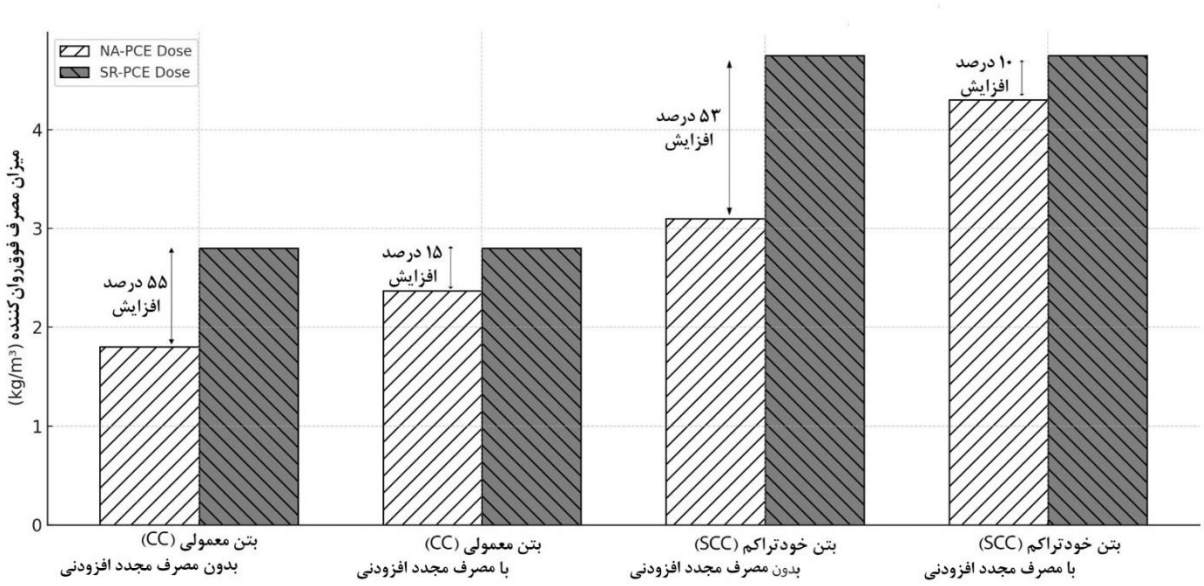
۱.۳. ٤. تحلیل فنی-اقتصادی نتایج بتن تازه

در هر دو نوع بتن (معمولی و خودتراکم)، NA-PCE عملکرد بسیار مؤثری در ایجاد روانی اولیه با مقدار مصرف کمتر از خود نشان داد. این ویژگی از ساختار متراکم با بار الکتریکی بیشتر ناشی می‌شود که باعث جذب سریع‌تر روی ذرات سیمان و پخش‌شدگی بهتر در مصرف‌های کم می‌گردد. از طرف دیگر، SR-PCE با داشتن زنجیره‌های جانبی بلندتر و ساختار بازتر، روانی مشابه در مصرف بیشتر ایجاد می‌کند و پایداری بیشتری در طول زمان ارائه می‌دهد . این رفتار در پروژه‌هایی با زمان اجرای طولانی، حمل دشوار یا زمانی که نیروی فنی جهت مصرف مجدد فوق روان کننده در پای کار وجود ندارد، بسیار مطلوب است.

در مخلوط های حاوی NA-PCE با اینکه روانی بتن در گذر زمان کاهش می‌یابد، اما استفاده مجدد از روان‌کننده NA-PCE در پای کار (مصرف مجدد)، می‌تواند روانی را دوباره به حالت مطلوب برگرداند؛ به‌شرط آن‌که این کار به‌درستی و توسط نیروی باتجربه در محل پروژه انجام شود. این ویژگی یعنی حفظ روانی اولیه زیاد و امکان بازیابی آن از طریق مصرف مجدد افزودنی، باعث می‌شود NA-PCE گزینه‌ای مناسب برای کنترل و مدیریت روانی بتن در شرایط متغیر کارگاهی باشد.

همانطور که در نمودار ۳ نشان داده شده است، در مخلوط‌های CC و SCC ، مصرف کلی SR-PCE پس از مصرف مجدد به‌ترتیب حدود **۱۵٪ و ۹/۵٪** بیشتر از مقدار مصرفی NA-PCE بود. همچنین برای رسیدن به اسلامپ هدف اولیه، مصرف SR-PCE در مخلوط‌های CC و SCC به‌ترتیب حدود ۵۵٪ و ۵۳٪ بیشتر از NA-PCE بود. اگرچه این افزایش مقدار با حفظ روانی طولانی‌تر همراه است، اما باید به این نکته توجه کرد که در بسیاری از پروژه‌های عمرانی، فاصله حمل کوتاه است یا امکان افزودن مجدد فوق‌روان‌کننده در پای کار فراهم می‌باشد. در چنین شرایطی، استفاده از NA-PCE می‌تواند تا حدود ۱۰ تا ۵۵ درصد کاهش در مصرف کلی افزودنی و هزینه تمام‌شده بتن ایجاد کند.

از سوی دیگر، SR-PCE گرچه پایداری بهتری دارد، اما قیمت تمام‌شده بیشتر، هزینه حمل بیشتر (به دلیل مصرف بیشتر) و همچنین تأخیر در گیرش اولیه (در برخی موارد نامطلوب) را نیز به همراه دارد. این عوامل می‌توانند در پروژه‌هایی با زمان‌بندی فشرده، مشکل‌ساز باشند.



نمودار ۳- مقایسه میزان مصرف فوق روان کننده‌های NA-PCE و SR-PCE

۲.۳. نتایج و تحلیل آزمایش‌های مقاومت فشاری بتن

در این تحقیق، نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین ۷ و ۲۸ روز چه در بتن معمولی (CC) و چه در بتن خودتراکم (SCC) نشان می‌دهد که تفاوت معناداری میان طرح‌های حاوی فوق‌روان‌کننده معمولی(NA-PCE) و فوق‌روان‌کننده حفظ‌کننده اسلامپ (SR-PCE) وجود ندارد. مقاومت فشاری تمامی طرح مخلوط ها در سن ۷ روز حدود ۳۷ مگاپاسکال و در سن ۲۸ روز حدود ۴۲ مگاپاسکال بودند. از آن‌جایی که نسبت آب به سیمان در تمامی طرح‌ها ثابت و برابر با ۰/۳۸ بوده و صرفا حجم خمیر سیمان متفاوت شده است و مصالح مصرفی نیز یکسان انتخاب شده‌اند، بنابراین، بروز تغییر قابل توجه در مقاومت فشاری با توجه به ثبات این متغیرها، انتظار نمی‌رود.

به‌طور کلی در یک طرح مخلوط ثابت با فوق روان کننده‌های متفاوت، تغییر در مقاومت فشاری بتن ممکن است زمانی رخ دهد که فوق‌روان‌کننده مورد استفاده باعث افزایش هوای محبوس یا تغییر در فرایند هیدراته شدن سیمان شود. این پدیده عمدتاً به دو دلیل اتفاق می‌افتد: نخست، ناسازگاری شیمیایی افزودنی با نوع سیمان یا سایر اجزای مخلوط بتن، و دوم، استفاده ناکافی یا نامناسب از مواد ضدکف (آنتی‌فوم) در فرمول روان‌کننده. در بررسی حاضر، هیچ‌یک از این موارد در فوق‌روان‌کننده‌های مورد استفاده مشاهده نشده و میزان هوای محبوس در تمام طرح‌ها در محدوده کنترل‌شده قرار داشته است.

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تغییر نوع فوق‌روان‌کننده در محدوده مقدارهای مصرف‌شده، در شرایط حاضر تأثیر قابل توجهی بر مقاومت فشاری یا وزن مخصوص بتن نداشته است. در نتیجه، انتخاب میان NA-PCE و SR-PCE در این زمینه بیشتر باید بر اساس رفتار بتن تازه، دوام، شرایط حمل، و ملاحظات اقتصادی صورت گیرد.

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، رفتار دو نوع فوق‌روان‌کننده پلی‌کربوکسیلات اتر، یکی با عملکرد معمولی (NA-PCE) و دیگری با قابلیت حفظ اسلامپ بلندمدت (SR-PCE)، در دو نوع بتن معمولی (CC) و خودتراکم (SCC) مورد ارزیابی دقیق قرار گرفت. این ارزیابی نه‌تنها بر پایه پارامترهای فیزیکی و مکانیکی بتن انجام شد، بلکه ابعاد اقتصادی و الزامات اجرایی در شرایط واقعی پروژه‌ها نیز مدنظر قرار گرفت. نتایج این مطالعه می‌تواند راهنمایی عملی برای انتخاب هدفمند و فنی فوق‌روان‌کننده‌ها در پروژه‌های عمرانی باشد.

- برای دستیابی به اسلامپ هدف اولیه، مقدار مصرف SR-PCE در بتن معمولی و خودتراکم به‌طور میانگین ۵۰ تا ٪۵۵ بیشتر از NA-PCE بود. حتی با احتساب مصرف مجدد در پای کار، مصرف کل NA-PCE حدود ۱۰ تا ٪۱۵ کمتر از SR-PCE باقی ماند. این اختلاف در مقدار مصرفی را می‌توان به ویژگی‌های ساختاری و بار سطحی مؤثرتر NA-PCE در تعامل اولیه با ذرات سیمان نسبت داد.

- روان‌کننده SR-PCE به‌طور مؤثر توانست اسلامپ و روانی بتن را در بازه زمانی طولانی‌تری (تا ۱۰۵ دقیقه) حفظ کند، بدون آن‌که نیاز به تکرار افزودن ماده در پای کار باشد. این رفتار به دلیل ساختار بازتر و زنجیره‌های جانبی بلندتر این افزودنی است که بازدارندگی فضایی مؤثرتری نسبت به NA-PCE ایجاد می‌کند. در شرایطی مانند بتن‌ریزی حجیم، حمل‌ونقل طولانی یا کارگاه‌هایی با تجهیزات محدود، این ویژگی می‌تواند نقش کلیدی در کاهش خطای انسانی و حفظ کیفیت بتن ایفا کند.

- شاخص پایداری چشمی (VSI) برای تمامی بتن‌ها در محدوده قابل قبول (۰ تا ۱) بود؛ اما در بتن خودتراکم حاوی روان‌کننده معمولی (NA-PCE)، پس از مصرف مجدد این افزودنی، جداشدگی سطحی خفیفی مشاهده شد که به دلیل کاهش گرانروی خمیر و از بین رفتن پیوستگی بین سنگدانه‌های درشت و ریز رخ داد. این پدیده که با مدول نرمی مصالح ماسه‌ای نامناسب نیز مرتبط بود، نشان می‌دهد در چنین شرایطی استفاده از مواد جایگزین سیمان (مانند پودر زئولیت یا خاکستر بادی) برای حفظ انسجام و افزایش حجم خمیر و جلوگیری از جداشدگی ضروری است. همچنین باید توجه داشت که در شرایط واقعی و با اختلاط مداوم تراک‌میکسر، احتمال بروز این مشکل کمتر خواهد بود.

- روان‌کننده NA-PCE با داشتن چگالی بیشتر بار آنیونی و زنجیره‌های جانبی کوتاه‌تر، روانی اولیه بسیار خوبی حتی در مقدار مصرف کمتر ایجاد کرد. هرچند افت روانی آن سریع‌تر بود، اما در هر دو نوع بتن، با افزودن مقدار کم و کنترل‌شده در محل اجرا ، روانی به سطح قابل قبولی بازگشت. این قابلیت مصرف مجدد افزودنی دقیقاً همان نکته‌ای است که در پروژه‌هایی با نیروهای ماهر اجرایی، می‌تواند موجب صرفه‌جویی چشمگیر در مصرف ماده و هزینه‌ها شود.

- نتایج مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روز تفاوت معناداری بین طرح‌ها نشان نداد؛ چرا که نسبت آب به سیمان ثابت و دیگر عوامل کنترل شده بودند. به‌ویژه، عدم افزایش درصد هوای محبوس در تمامی طرح‌ها نشان داد که هیچ‌یک از روان‌کننده‌ها موجب اثر منفی در ساختار نهایی بتن نشده‌اند. این نتیجه از آن جهت حائز اهمیت است که برخی ترکیبات PCE در صورت ناسازگاری با سیمان یا فرمول‌بندی ناقص می‌توانند منجر به افزایش هوای مخرب شوند، اما در این تحقیق چنین پدیده‌ای مشاهده نشد.

- در پروژه‌هایی با زمان حمل کوتاه تا متوسط، دسترسی به نیروی فنی آموزش‌دیده، و امکان مدیریت دقیق اجرایی، استفاده ازفوق روان‌کننده NA-PCE به‌مراتب به‌صرفه‌تر و اقتصادی‌تر است.

- فوق روان‌کننده SR-PCE گرچه گران‌تر و پرمصرف‌تر است، اما در شرایط دشوار اجرا (بتن‌ریزی شبانه، سایت‌های دوردست، کارگاه‌های فاقد اپراتور مجرب) پایداری بیشتری را ارائه می‌دهد و می‌تواند خطر را کاهش دهد. همچنین، SR-PCEبه دلیل ساختار پلیمری خاص خود، در برخی موارد می‌تواند زمان گیرش را کمی به تأخیر بیندازد، که این اثر باید در زمان‌بندی پروژه لحاظ شود.

به طور کلی، هیچ‌یک از دو روان‌کننده مورد بررسی برتری مطلق نسبت به دیگری ندارد .انتخاب هوشمندانه بین NA-PCE وSR-PCE باید بر پایه تحلیل هم‌زمان مشخصات فنی بتن، شرایط اجرایی پروژه، مهارت نیروی انسانی، محدودیت‌های زمانی و الزامات اقتصادی انجام شود.در واقع، SR-PCE راهکاری مطمئن در پروژه‌های حساس و با خطر زیاد است، در حالی که NA-PCE در دست متخصص، به ابزاری دقیق برای کاهش هزینه و کنترل دقیق روانی تبدیل می‌شود .این مقاله نشان می‌دهد که تنها با شناخت کامل خواص و عملکرد افزودنی‌هاست که می‌توان بهره‌وری فنی و اقتصادی پروژه‌های بتنی را بهینه کرد.

۵. پیشنهادها برای تحقیقات آینده

با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش و در نظر گرفتن محدودیت‌های طراحی آزمایش، مسیرهای متعددی برای گسترش این مطالعه و تکمیل دانش فنی موجود پیشنهاد می‌شود:

- **لزوم توجه به بهینه‌سازی فرموله‌کردن SR-PCE جهت کنترل مقدار مصرفی:** در این مطالعه مشخص شد که دستیابی به روانی اولیه مطلوب با استفاده از روان‌کننده‌های حفظ‌کننده اسلامپ(SR-PCE) ، نیازمند مصرف مقدار قابل‌توجهی بیشتر نسبت به انواع معمولی است. اگرچه این افزودنی‌ها در شرایط خاص عملکرد مطلوبی از خود نشان می‌دهند، اما مقدار زیاد موردنیاز آن‌ها می‌تواند موجب افزایش هزینه تمام‌شده بتن و بار اجرایی در مقیاس پروژه‌های بزرگ گردد. از این‌رو، لازم است در تحقیقات آینده به مسئله بهینه‌سازی ساختار این نوع روان‌کننده‌ها با هدف کاهش مقدار مصرفی مورد نیاز، توجه بیشتری مبذول شود.

- **آزمایش‌های میدانی و ارزیابی عملکرد در شرایط واقعی اجرا:** اگرچه نتایج آزمایشگاهی پایه محکمی برای تحلیل اولیه هستند، اما آزمودن بتن حاوی این روان‌کننده‌ها در پروژه‌های واقعی با در نظر گرفتن عوامل اجرایی مانند دمای محیط، زمان انتظار در پمپ، توقف‌های کارگاهی و نحوه مصرف مجدد واقعی، می‌تواند اطلاعات ارزشمندتری درباره عملکرد عملی روان‌کننده‌ها فراهم کند.
- **تحلیل دقیق رفتار رئولوژیکی بتن تازه:** گرچه در این مطالعه از آزمایش‌های اسلامپ و جریان روانی بتن خودتراکم برای سنجش روانی استفاده شده، اما انجام آزمون‌های پیشرفته رئولوژی مانند اندازه‌گیری تنش تسلیم و گرانروی پلاستیک با رئومتر بتن، می‌تواند بینش علمی‌تری نسبت به سازوکار عملکرد دو روان‌کننده فراهم آورد و تفاوت آن‌ها را در قالب مدل‌های عددی توصیف کند.

۶. تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از شرکت بسپار بتن ایرانیان هوشمند (استرامیکس) به‌دلیل تأمین افزودنی‌های شیمیایی مورد نیاز و همچنین فراهم‌سازی زیرساخت‌های لازم جهت انجام این پژوهش، قدردانی به عمل می‌آید. همچنین از همکاری تیم فنی و آزمایشگاهی شرکت در انجام آزمایش‌ها، ثبت داده‌های مربوطه و ارائه گزارش‌های دقیق، که بستر لازم برای تحلیل نتایج تحقیق را فراهم نمودند، سپاس‌گزاری می‌شود. مشارکت این مجموعه در اجرای منظم و دقیق مراحل آزمایشگاهی، نقش مؤثری در تحقق اهداف پژوهش داشته است.

۷. مراجع

[1] Aïtcin, P. C., Eberhardt, A. B. (2016). “Historical Background of the Development of Concrete Admixtures”. In: Science and Technology of Concrete Admixtures, pp. xli–lii. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.09003-2

[2] Makul, N. (2020). “Advanced Smart Concrete – A Review of Current Progress, Benefits and Challenges”. Journal of Cleaner Production, Vol. 274, 122899. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122899

[3] Tian, Q., Zhou, J., Hou, J., Zhou, Z., Liang, Z., Sun, M., Hu, J., Huang, J. (2024). “Building the Future: Smart Concrete as a Key Element in Next-Generation Construction”. Construction and Building Materials, Vol. 429, 136364. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136364

[4] Wang, X. H., Fang, Z. C., Zheng, L. (2024). “Effect of Dose and Types of the Water Reducing Admixtures and Superplasticizers on Concrete Strength and Durability Behaviour: A Review”. Journal of Civil Engineering and Management, Vol. 30 (1), pp. 33–48. https://doi.org/10.3846/jcem.2024.20145

[5] de Hita, M. J., Criado, M. (2023). “Influence of Superplasticizers on the Workability and Mechanical Development of Binary and Ternary Blended Cement and Alkali-Activated Cement”. Construction and Building Materials, Vol. 366, 130272. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130272

[6] Erdoğdu, Ş. (2005). “Effect of Retempering with Superplasticizer Admixtures on Slump Loss and Compressive Strength of Concrete Subjected to Prolonged Mixing”. Cement and Concrete Research, Vol. 35 (5), pp. 907–912. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.08.020

[7] Korovkin, M., Eroshkina, N. (2016). “Influence of a Superplasticizer on Cement Grinding and Its Activity Reduction During Storage”. Procedia Engineering, Vol. 153, pp. 687–692. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.135

[8] Yuan, S., Xu, Z., Feng, T., Liu, J. (2025). “Insight into the Boundary Flow Resistance of High-Workable Concrete in Different States: Placing and Pumping”. Cement and Concrete Composites, Vol. 161, 106094. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2025.106094

[9] Feys, D., De Schutter, G., Fataei, S., Martys, N. S., Mechtcherine, V. (2022). “Pumping of Concrete: Understanding a Common Placement Method with Lots of Challenges”. Cement and Concrete Research, Vol. 154, 106720. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106720

[10] Zhaidarbek, B., Tleubek, A., Berdibek, G., Wang, Y. (2023). “Analytical Predictions of Concrete Pumping: Extending the Khatib–Khayat Model to Herschel–Bulkley and Modified Bingham Fluids”. Cement and Concrete Research, Vol. 163, 107035. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.107035

[11] Yang, J., Zhao, H., Zeng, J., Su, Y., Zhu, M., He, X. (2024). “The Influence of Chemical Admixtures on the Fluidity, Viscosity and Rheological Properties of Ultra-High Performance Concrete”. Fluid Dynamics & Materials Processing, Vol. 20 (10), pp. 2163–2181. https://doi.org/10.32604/fdmp.2024.055448

[12] Karakuzu, K., Kobya, V., Mardani-Aghabaglou, A., Felekoğlu, B., Ramyar, K. (2021). “Adsorption Properties of Polycarboxylate Ether-Based High Range Water Reducing Admixture on Cementitious Systems: A Review”. Construction and Building Materials, Vol. 312, 125366. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125366

[13] Ma, Y., Jiao, D., Sha, S., Zhou, B., Shi, C. (2023). “Effect of Molecular Structure of Polycarboxylate Ether Superplasticizer on Its Tolerance to Montmorillonite”. Construction and Building Materials, Vol. 392, 131966. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131966

[14] Zhou, T., Duan, H., Li, B., Pang, Y., Lou, H., Yang, D., Qiu, X. (2025). “The Interaction Mechanism of Polycarboxylate and β-Naphthalene Sulfonate Superplasticizers: Synergistic Adsorption Rather than Competitive Adsorption”. Cement and Concrete Research, Vol. 191, 107811. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2025.107811

[15] Hanehara, S., Yamada, K. (1999). “Interaction Between Cement and Chemical Admixture from the Point of Cement Hydration, Absorption Behaviour of Admixture, and Paste Rheology”. Cement and Concrete Research, Vol. 29 (8), pp. 1159–1165. https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00004-6

[16] Pourchet, S., Liautaud, S., Rinaldi, D., Pochard, I. (2012). “Effect of the Repartition of the PEG Side Chains on the Adsorption and Dispersion Behaviors of PCP in Presence of Sulfate”. Cement and Concrete Research, Vol. 42 (2), pp. 431–439. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.11.011

[17] Li, R., Xue, J., Wan, X., Wang, Y., Bao, J., Shi, J., Sui, T. (2025). “Influence of the Anionic Charge of PCE Superplasticizers on the Rheology of LC3 Cement – A Mechanistic Comparison with OPC”. Construction and Building Materials, Vol. 486, 141979. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141979

[18] Altun, M. G., Özen, S., Mardani-Aghabaglou, A. (2020). “Effect of Side Chain Length Change of Polycarboxylate-Ether Based High Range Water Reducing Admixture on Properties of Self-Compacting Concrete”. Construction and Building Materials, Vol. 246, 118427. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118427

[19] Qian, S., Yao, Y., Wang, Z., Cui, S., Liu, X., Jiang, H., et al. (2018). “Synthesis, Characterization and Working Mechanism of a Novel Polycarboxylate Superplasticizer for Concrete Possessing Reduced Viscosity”. Construction and Building Materials, Vol. 169, pp. 452–461. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.212

[20] Lei, L., Hirata, T., Plank, J. (2022). “40 Years of PCE Superplasticizers – History, Current State-of-the-Art and an Outlook”. Cement and Concrete Research, Vol. 157, 106826. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106826

[21] Tajbakhshian, A., Chitgar, H. (2020). “Polycarboxylate Ether Superplasticizer Synthesis, Interplay Between the Structure and Properties”. Journal of Concrete Structures and Materials, Vol. 5 (2), pp. 5–15. https://doi.org/10.30478/jcsm.2020.226786.1154

[22] Khalooee, S., Ahmadi, B., Askarinejad, A., Nekooei, M. (2021). “Tackling the Issues of Self-Compacting Concrete Containing High Volume of Waste Glass Aggregate by Zeolite”. Structural Concrete, Vol. 22 (S1), pp. E207–E227. https://doi.org/10.1002/suco.202000252

[23] Khalooee, S., Ahmadi, B., Askarinejad, A., Nekooei, M. (2019). “The Effect of Cementitious Materials Paste Volume and Use of Zeolite on the Properties of Self-Compacting Concrete”. Journal of Concrete Structures and Materials, Vol. 4 (1), pp. 100–109. https://doi.org/10.30478/jcsm.2019.158641.1103

[24] Ahmadi, B., Khalooee, S. (2022). “The Use of High Volume of Glass Powder as a Substitute for Cement in Self-Compacting Concrete”. Journal of Concrete Structures and Materials, Vol. 7 (1), pp. 112–130. https://doi.org/10.30478/jcsm.2022.350039.1283

Evaluation and Comparison of the Performance of Normal Acting and Long Slump-Retaining Polycarboxylate Ether Superplasticizers in Concrete

Saeed Khalooee[1*], Hadi Chitgar[2], Alireza Tajbakhshian[3]
1- Senior Technical Engineer, Technical and Support Division, Baspar Beton Iranian Hooshmand (Strumix), Tehran, Iran
2- Chief Executive Officer (CEO), Baspar Beton Iranian Hooshmand (Strumix) , Tehran, Iran
3- R&D Manager, Baspar Beton Iranian Hooshmand (Strumix) , Tehran, Iran

saeed.khalooee@strumix.com

Abstract

This study investigates and compares the performance of two types of polycarboxylate ether (PCE) superplasticizers: a Normal-Acting type (NA-PCE) and a long Slump-Retaining type (SR-PCE), in both Conventional Concrete (CC) and Self-Compacting Concrete (SCC). The experiments were designed to evaluate the technical, economic, and practical aspects of these admixtures. The findings indicated that to attain comparable initial workability, the required dosage of SR-PCE was, on average, 50–55% higher than that of NA-PCE. However, SR-PCE demonstrated the capacity to sustain concrete slump for a duration exceeding 90 minutes without requiring re-dosing, while NA-PCE necessitated additional dosing to restore slump after its loss. For projects with short to medium transport times (less than 45 minutes), or where re-dosing is feasible at the site, NA-PCE has been shown to reduce total admixture consumption by 10–15%, and to cut costs by up to 50% compared to the initial dose of SR-PCE. The study's findings suggest that the selection of NA-PCE or SR-PCE should be informed by a multifaceted evaluation of project-specific technical requirements, site conditions, labor skill availability, and economic factors.