«مجله علمی علوم و فنون سازندگی»

سال سوم، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۱، صفحه ۳۱ الی ۳۷

علمی – تخصصی

بررسی اثر پارامترهای فرایندی روان‌کننده‌های بر پایه‌ی پلی‌کربوکسیلات بر عملکرد آن‌ها در بتن

محمدعلی قنبری

موسسه شهید رجایی-هلدینگ راه و شهرسازی

(دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۷، پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۲۷)

چکیده

فوق‌روان‌کننده‌ها جزو مهم‌ترین مواد افزودنی بتن هستند که با کاهش گرانروی و تنش تسلیم بتن تازه باعث بهبود روانی آن خواهندشد. یکی از پرکاربردترین مواد فوق‌روان‌کننده رایج در صنعت بتن، فوق‌روان‌کننده‌های بر پایه پلی‌کربوکسیلات هستند. این مواد در اثر جذب‌شدن بر روی سطح ذرات سیمان و با سازوکار قالب ممانعت فضایی از به‌هم‌چسبیدن ذرات در بتن جلوگیری کرده و باعث بهبود روانی آن می‌شوند. در پژوهش انجام‌شده، تاثیر پنج نوع فوق‌روان‌کننده بر روی خواص ملات و بتن تازه و سخت‌شده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که بر اساس آزمون‌های شیمیایی هر پنج نوع فوق‌روان‌کننده از نوع پلی‌کربوکسیلات با گروه‌های عاملی یکسان هستند و تفاوت آنها در جرم مولی و طول شاخه‌های جانبی آن‌ها است. در نهایت با توجه به عملکرد هر پنج نوع فوق‌روان‌کننده مشخص شد که با افزایش طول زنجیر پلیمر و طول شاخه‌های جانبی و همچنین افزایش درصد مواد جامد فوق‌روان‌کننده، گرانروی پلاستیک ملات و بتن کاهش می‌یابد، زیرا ممانعت فضایی زنجیرهای پلیمری جذب‌شده بر سطح ذرات سیمان افزایش یافته و امکان تجمع این ذرات که باعث کاهش روانی بتن می‌شود کاهش می‌یابد. در اثر استفاده از ماده افزودنی ضدکف نیز هوای محبوس در بتن کاهش می‌یابد، اما با افزایش مقدار آن از یک مقدار بهینه، آب‌انداختگی بتن افزایش و کارایی آن کاهش می‌یابد.

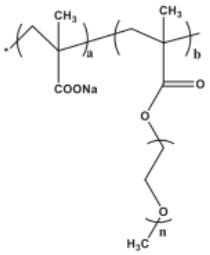
کلید واژه‌ها: مواد افزودنی بتن، فوق‌روان‌کننده، پلی‌کربوکسیلات، جریان‌شناسی

۱. مقدمه

فوق‌روان‌کننده‌ها یکی از مهم‌ترین مواد افزودنی بتن هستند که با بهبود روانی بتن تازه، باعث بهبود فرایندپذیری آن می‌شوند. به طور کلی فوق‌روان‌کننده‌ها به صورت پلیمرهای مایع هستند که در طرح اختلاط بتن به منظور کاهش تنش تسلیم و گرانروی پلاستیک بتن در درصد جامد ثابت مورد استفاده قرار می‌گیرند[۱-۷]. استفاده از این دسته از مواد به عنوان یکی از اجزاء اصلی تشکیل‌دهنده‌ی فرمولاسیون بتن، منجر به تهیه‌ی بتن‌هایی با دوام و طول عمر بالاتر می‌شوند، زیرا که با کاهش مقدار آب مورد نیاز جهت پراکنده کردن ذرات سیمان، منجر به کاهش تخلخل و نفوذپذیری بتن نهایی شده و در نتیجه استحکام بتن افزایش پیدا می‌کند[۸].

یکی از پرکاربردترین فوق‌روان‌کننده‌های مورد استفاده در صنعت بتن، فوق‌روان‌کننده‌های بر پایه پلی‌کربوکسیلات است که به دلیل کاهش میزان آب در بتن به همراه حفظ اسلامپ در دوزهای مصرفی پایین مورد توجه همگان قرار گرفته اند. ساختار شیمیایی این دسته از فوق‌روان‌کننده‌ها تاثیر قابل توجهی بر عملکرد بتن تازه خواهد داشت. تمامی این مواد دارای زنجیر اصلی پلیمری عمدتاً بر پایه‌ی مونومرهای حاوی گروه‌های کربوکسیلیک‌اسید هستند و شاخه‌های جانبی غیریونی اتصال یافته به زنجیر اصلی بر پایه‌ی پلی‌اترها می‌باشند (شکل ۱)[۹]. این نسل جدید فوق روان‌کننده‌ها، به سرعت جایگزین فوق روان کننده‌های پیشین (مانند پلی‌آمین سولفونات‌ها، پلی نفتالن سولفونات‌ها و کوپلیمرهای وینیلی) در بسیاری از کاربردها شدند. فوق روان کننده‌های بر پایه پلی‌کربوکسیلیک‌اتر به ویژه در بتن‌های خود متراکم (SCC) کاربرد دارند. تنها پلی‌کربوکسیلات‌ها قادر به کاهش نسبت آب به سیمان (W/C) تا مقادیر کم‌تر از ۰/۲ با حفظ کارایی و افزایش عمر اسلامپ هستند. به طور کلی این مقدار کم آب به سیمان نیز، مقدار آب لازم جهت هیدراسیون شیمیایی سیمان است[۱۰].

*نویسنده مسئول: reza.tehranchi88@gmail.com



شکل (۱). ساختار پلی‌کربوکسیلات بر پایه متاکریلیک‌اسید

اگرچه تنها تعداد کمی از واحدهای ساختاری اصلی جهت سنتز پلی‌کربوکسیلیک‌اترها مورد استفاده قرار می‌گیرد (مانند مونومرهای حاوی گروه‌های کربوکسیلیک در زنجیر اصلی و واحدهای پلی‌اتیلن اکساید در شاخه‌های جانبی)، با این حال طیف گسترده‌ای از پلیمرها با خواص مورد نیاز مشتری قابل سنتز است. بر اساس امکان تغییر گسترده در ساختار پلی کربوکسیلیک‌اترها، انواع مختلفی از پلیمرها با کاربردها و کارایی‌های متفاوت در صنعت طراحی شده‌اند. طی فرایند کوپلیمری شدن، ماکرومونومرهای حاوی گروه‌های سولفوهیدریل به عنوان عامل اتصالات عرضی بین گروه‌های کربوکسیلیک‌اسید عمل کرده و ساختار فوق‌شاخه‌دار حاصل می‌شود. مطابق نتایج پژوهش‌ها، گروه عاملی استری در ساختار فوق‌شاخه‌دار که به وسیله ماکرومونومر حاوی گروه‌های استری و سولفینیل حاصل شده‌است، در محیط قلیایی آبکافت می‌شود و کوپلیمر موجود در ساختار را به آرامی آزاد می‌کند. این پدیده باعث بهینه‌سازی مصرف فوق‌روان‌کننده می‌شود و میزان هیدراسیون طی این پدیده به اندازه‌ای است که حفظ اسلامپ قابل قبولی مشاهده خواهدشد. از سویی دیگر اضافه کردن این دسته از پلی‌کربوکسیلات‌های نوین بر پایه پلی‌استرآمید به آمیزه حاوی سیمان پورتلند دارای سنگ آهک علاوه بر بهبود جریان‌پذیری مقاومت فشاری نهایی بتن را صرف نظر از اجزای سازنده آن افزایش می‌دهد[۱۱].

با افزایش جرم مولی پلیمرهای بر پایه پلی‌کربوکسیلات، میزان نیروهای در فواصل نزدیک افزایش یافته و میزان جذب پلیمر بر ذرات سیمان افزایش می‌یابد. به همین دلیل پلی‌کربوکسیلات‌های با جرم مولی بالاتر جریان‌پذیری بتن را به میزان بیشتری افزایش داده و همچنین میزان حفظ جریان‌پذیری در نمونه‌های حاوی این فوق‌روان‌کننده‌ها بالاتر است. البته عملکرد جرم مولی پلیمر به طول زنجیرهای جانبی و چگالی بار گروه‌های جانبی بستگی دارد. با افزایش طول شاخه‌های جانبی پلیمر نیز در صورتی که جذب اولیه مولکول‌های پلی‌کربوکسیلات بر روی سطح ذرات سیمان صورت بگیرد، به دلیل تشدیدشدن اثر ممانعت فضایی زنجیرهای پلیمری، جریان‌پذیری بتن تازه بهبود می‌یابد[۱۲–۱۵].

۲. روش تحقیق

۲-۱. آنالیز شیمیایی فوق‌روان‌کننده‌ها

در این پژوهش از پنج نوع فوق‌روان‌کننده پلی‌کربوکسیلات تجاری مختلف با ساختار شیمیایی و جرم مولکولی متفاوت استفاده شده‌است که با شماره‌های ۱ تا ۵ شماره‌گذاری شده‌اند. جهت بررسی ساختار شیمیایی فوق‌روان‌کننده‌ها از آزمون‌های طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل‌شده با تبدیل فوریه (FTIR) و رزونانس مغناطیسی هسته‌ای هیدروژن (H-NMR) استفاده شد. همچنین جهت تعیین جرم مولکولی پلیمرهای تشکیل دهنده فوق‌روان‌کننده از آزمون کروماتوگرافی ژل‌ترولیی (GPC) استفاده گردید. جهت انجام آزمون‌های شناسایی شیمیایی ابتدا پنج نمونه پلی کربوکسیلات در کوره با دمای ۶۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شدند تا آب موجود در آن‌ها تبخیر شده و در نتایج طیف جذبی خللی ایجاد نشود.

۲-۲. بررسی خواص ملات تازه حاوی فوق‌روان‌کننده‌ها

جهت بررسی خواص ملات خود متراکم تازه حاوی پنج نوع فوق‌روان‌کننده، نمونه‌های ملات مطابق طرح اختلاط‌های موجود در جدول (۱) برای ۱۰ لیتر ملات ساخته شد. لازم به ذکر است که برای تعیین اثر روان‌کننده بر ملات‌های تازه و خشک مقدار و درصد این روان‌کننده‌ها در طرح اختلاط ثابت در نظر گرفته شد. جهت بررسی میزان جریان‌پذیری ملات تازه آزمون‌های اسلامپ کوچک (مطابق استاندارد ASTM C143)، آزمون T20، آزمون حلقه J کوچک (مطابق استاندارد ASTM C1621) انجام شد و میزان جدایش ملات با شاخص SI سنجیده شد. همچنین مقادیر درصد هوا و وزن مخصوص بتن تازه پیش از انجام آزمون‌های ملات تازه ثبت شد.

جدول (۱). طرح اختلاط مواد مورد استفاده در ساخت ملات

ماسه (گرم)	سیمان تیپ ۲ (گرم)	فیلر پودر سنگ (گرم)	آب (میلی‌لیتر)	فوق‌روان‌کننده (گرم)	آب به سیمان
۱۲۸۵۰	۷۵۰۰	۹۶۰	۲۵۵۲	۳۲	۰/۳

۲-۳. بررسی خواص بتن تازه حاوی فوق‌روان‌کننده‌ها

در نهایت تاثیر حضور فوق روان کننده‌های مختلف، که در ملات نیز بررسی شده بود، بر بتن خود متراکم نیز بررسی گردید و در این فاز از پژوهش بتن‌های خودمتراکم دارای مواد فوق روان کننده تحت آزمون رئومتری نیز قرار گرفتند. دستگاه رئومتر مورد استفاده، با نام تجاری رئومان-۱۱۸ و با قطر سیلندر

۸۴ سانتی متر مورد استفاده قرار گرفت. در این فاز از پژوهش به دلیل بالا بودن تعداد آزمایش ها در بررسی خواص بتن تازه، از ماده تاخیردهنده برای جلوگیری از افت سریع اسلامپ نیز استفاده گردید.

به همین منظور، ۴۳ لیتر بتن برای هر دوز از فوق روان کننده ساخته شد و آزمون‌های بتن تازه و همچنین آزمون رئومتری برای آن انجام شد. دوزهای مصرفی فوق‌روان‌کننده ۰/۳۵٪، ۰/۴۵٪ و ۰/۵۵٪ جرم سیمان مصرفی درنظر گرفته شد و درصد ماده تاخیردهنده نیز بر اساس نتایج آزمون‌های اولیه ۲۳ درصد در نظر گرفته‌شد. مدل مورد استفاده برای اندازه‌گیری گرانروی پلاستیک بتن‌های خودمتراکم، مدل بینگهام است که معادله مورد استفاده آن مطابق معادله (۱) است.

$$\tau = \mu\gamma + \tau_0 \qquad (۱)$$

مطابق معادله ۱، τ تنش برشی، μ گرانروی پلاستیک، γ سرعت برش و τ_0 تنش تسلیم است. همچنین آزمون‌های بتن تازه در این قسمت مطابق استاندارد مربوطه، آزمون های جریان اسلامپ، آزمون J-ring ، آزمون V-funnel و آزمون تعیین درصد هوا و وزن مخصوص هستند. طرح اختلاط مورد استفاده برای ۴۳ لیتر بتن در این فاز مطابق جدول (۲) است.

در نهایت نیز جهت بررسی تاثیر ضدکف بر عملکرد بتن تازه، فوق‌روان‌کننده ۲ با دوز مصرفی ۰/۵۵ درصد در حضور یک دیفومر تجاری مورد بررسی قرار گرفت و همه آزمون‌های بتن تازه به همراه آزمون رئومتری در آن انجام شد. به همین منظور سه نمونه حاوی ضدکف با مقادیر صفر، ۰/۲ و ۰/۴ درصد نسبت به فوق‌روان‌کننده ساخته شد و آزمون‌های مورد نظر برای آن‌ها انجام شد.

جدول (۲). طرح اختلاط مواد مورد استفاده در ساخت بتن

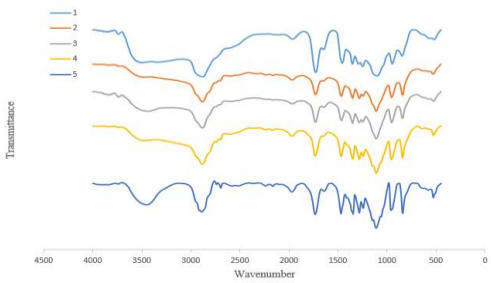
ماسه (گرم)	سیمان تیپ ۲ (گرم)	نخودی (گرم)	بادامی (گرم)	عیار سیمان (کیلوگرم بر	آب (میلی‌لیتر)	آب به سیمان (گرم)
۴۲۳۸۵	۱۸۹۲۰	۸۶۰۰	۱۹۵۳۴	۴۴۰	۷۸۳۰	۰/۴۱

شکل (۲). بتن خود متراکم تحت آزمون پخش‌شدگی اسلامپ و حلقه J

۳. نتایج و بحث

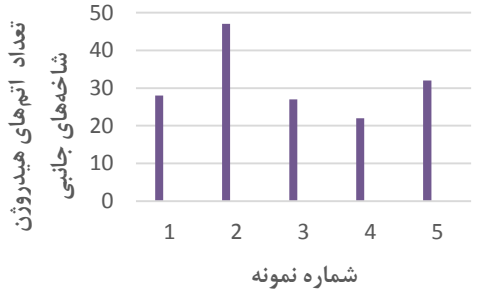
۳-۱. آنالیز شیمیایی فوق‌روان‌کننده‌ها

در آزمون FTIR پس از قرار دادن نمونه ها در برابر امواج مادون قرمز، مقادیر درصد انتقال موج بر حسب عدد موجی (که عکس طول موج است) در بازه $400\,cm^{-1}$ تا $4000\,cm^{-1}$ مطابق شکل (۳) تهیه شد. نتایج این آزمون نشان می دهد که گروه های عاملی مشابهی در طول زنجیرهای پلی‌کربوکسیلات وجود دارد و احتمالا تفاوت آن ها در جرم مولکولی و طول شاخه های جانبی است.



شکل (۳). طیف FTIR پنج نمونه پلی‌کربوکسیلات

همچنین نتایج آزمون H-NMR نشان می دهد که تعداد اتم های هیدروژن در زنجیرهای جانبی هر پنج نمونه با یکدیگر متفاوت است و بنابراین می توان گفت که جرم مولی و طول زنجیرهای جانبی پلی کربوکسیلات با یکدیگر تفاوت دارد. تعداد اتم‌های هیدروژن برای هر پنج نمونه مطابق شکل (۴) است.



شکل (۴). مقایسه تعداد اتم‌های هیدروژن و طول شاخه‌های جانبی در پنج نمونه پلی‌کربوکسیلات

در آزمون GPC مقادیر متوسط جرم مولکولی وزنی (M_W)، متوسط جرم مولکولی عددی (M_n) و نسبت این دو نوع جرم مولکولی که PDI نام دارد به دست می آید. هر چه مقدار PDI به یک نزدیک تر باشد، توزیع جرم مولکولی زنجیرهای پلی کربوکسیلات باریک تر و اندازه زنجیرها به یک نزدیک تر است.

جدول (۳). مقادیر M_n، M_w و PDI پنج نمونه پلی‌کربوکسیلات

نمونه	M_n	M_w	PDI
۱	۲۱۴۰	۲۵۲۲	۱/۱۷
۲	۳۲۹۵	۴۲۵۵	۱/۲۹
۳	۲۷۳۱	۳۳۴۲	۱/۲۲
۴	۳۶۷۳	۴۵۴۲	۱/۲۳
۵	۳۵۵۹	۴۵۹۳	۱/۲۹

در جدول (۳) مقادیر M_w، M_n و PDI برای هر پنج نمونه پلی‌کربوکسیلات نشان داده شده است.

۳-۲. بررسی خواص ملات تازه حاوی فوق‌روان‌کننده‌ها

مقادیر به‌دست آمده در آزمون‌های ملات تازه که شامل آزمون پخش‌شدگی اسلامپ، T20، افت ارتفاع حلقه J، شاخص SI، درصد هوا و همچنین چگالی بتن در سن یک روز مطابق جدول (۴) به دست آمده‌است.

جدول (۴). مقادیر به‌دست‌آمده در آزمون‌های ملات تازه

نمونه	پخش‌شدگی مینی اسلامپ (میلی‌متر)	T20 (s)	SI(%)	افت ارتفاع J-ring (میلی‌متر)	وزن مخصوص ملات تازه (Kg/m^3)	درصد هوا
۱	۲۴۰	۶/۲۵	۴/۴	۱۲	۲۱۶۷	۶/۵
۲	۲۰۵	۴	۹/۷	-	۲۰۹۰	۱۰
۳	۲۷۲/۵	۲/۷	۱۱/۳	۱۰	۲۲۱۴	۵
۴	۲۳۷/۵	۵/۲۵	۱/۱	۴	۲۱۶۴	۷/۵
۵	۲۶۵/۳	۲/۷۵	۴/۶	۲	۲۱۷۶	۷

نتایج به دست آمده در آزمون‌های ملات تازه نشان می‌دهد که با افزایش جرم مولی پلیمر و همچنین افزایش طول شاخه‌های جانبی مولکول‌های پلی‌کربوکسیلات، به دلیل افزایش خاصیت ممانعت فضایی پلیمرهای جذب‌شده بر سطح سیمان، ذرات سیمان به میزان بیشتری بر روی هم می لغزند و روانی ملات افزایش می‌یابد، به‌گونه‌ای که فوق‌روان‌کننده ۵ که دارای بیشترین جرم مولی است و طول شاخه‌های جانبی بالایی نیز دارد، دارای بیشترین پخش شدگی اسلامپ و کم ترین زمان T20 است. در طرف مقابل وجود جرم مولی بالا با طول شاخه‌های جانبی کم یا جرم مولی کم با طول شاخه های بالا باعث افت خواص اسلامپ و روانی ملات خواهدشد.

در سازوکاری دیگر، با کاهش جرم مولی پلیمر و با میل کردن PDI به سمت ۱ و همچنین وجود شاخه های فرعی با طول متوسط در زنجیرهای پلی کربوکسیلات، به علت همگن بودن ساختار پلیمرها و کاهش پدیده قفل‌شدن شاخه‌های جانبی، میزان پخش‌شدگی اسلامپ افزایش می‌یابد[۱۶ –۱۸].

۳-۳. بررسی خواص بتن تازه حاوی فوق‌روان‌کننده‌ها

نتایج آزمون های بتن تازه نشان داد که از میان سه دوز مصرفی ۰/۳۵، ۰/۴۵ و ۰/۵۵ درصد برای هر پنج نوع فوق روان کننده، روانی بتن در دوز مصرفی ۰/۳۵ قابل توجه نبوده و بتن در مدت زمان کوتاهی دچار افت اسلامپ می گردد. همچنین در دوز مصرفی ۰/۵۵ روانی بتن بسیار بالا بوده، اما در طرف مقابل میزان آب‌انداختگی بتن بسیار بالا مشاهده گردید.

به همین دلیل برای توجیه ارتباط میان خواص شیمیایی و خواص بتن تازه، فوق روان کننده های مصرفی در درصد بهینه ۰/۴۵ درصد مورد بررسی قرار گرفت. در آزمون های بتن تازه مقادیر پخش‌شدگی اسلامپ، افت ارتفاع حلقه J، V-funnel، درصد هوا و وزن مخصوص بتن مطابق جدول (۵) به دست آمد.

جدول (۵). مقادیر به‌دست‌آمده در آزمون‌های بتن تازه

نمونه	پخش‌شدگی مینی اسلامپ (میلی‌متر)	V- funnel (s)	افت ارتفاع J-ring (میلی‌متر)	وزن مخصوص ملات تازه (Kg/m^3)	درصد هوا
۱	۷۰۰	۵/۷	۲۵	۲۳۰۶	۳/۲
۲	۵۰۰	انسداد	انسداد	۲۲۴۷	۶/۵
۳	۶۷۰	۱۴/۶	۱۲	۲۲۸۴	۳/۲
۴	۶۴۰	۱۰/۶	۷	۲۲۵۶	۵/۲
۵	۷۰۰	۱۸/۵	۲۰	۲۳۱۵	۳/۸

در آزمون رئومتری نیز مقادیر گرانروی پلاستیک هر بتن‌های حاوی پنج فوق‌روان‌کننده به دست آمد که در شکل (۵) نشان داده‌شده است.

شکل (۵). مقایسه گرانروی پلاستیک در پنج نمونه بتن حاوی فوق‌روان‌کننده‌های پلی‌کربوکسیلات

با استفاده از نتایج به دست آمده در آزمون‌های تعیین خواص شیمیایی و همچنین نتایج به‌دست‌آمده در آزمون رئومتری و دیگر آزمون‌های بتن تازه می‌توان گفت که رفتار بتن‌های تازه و ملات‌های تازه حاوی پنج نوع پلی‌کربوکسیلات بسیار شبیه به یکدیگر بوده و تاثیرگذاری فوق‌روان‌کننده بر عملکرد بتن و ملات با سازوکاری شبیه به یکدیگر است. در تعیین ارتباط رفتار بتن تازه با ساختار شیمیایی فوق‌روان‌کننده می‌توان گفت که با افزایش جرم مولی پلیمر و همچنین افزایش طول شاخه‌های جانبی مولکول‌های پلی‌کربوکسیلات، به دلیل افزایش خاصیت ممانعت فضایی پلیمرهای جذب‌شده بر سطح سیمان، ذرات سیمان در دوز مصرفی ۰/۴۵ درصد که دوز بهینه محسوب می‌شود، به میزان بیشتری بر روی هم می‌لغزند و روانی بتن افزایش می‌یابد، به‌گونه‌ای که فوق‌روان‌کننده ۵ که دارای بیشترین جرم مولی است و طول شاخه‌های جانبی بالایی نیز دارد، دارای کم‌ترین گرانروی پلاستیک، بیشترین پخش‌شدگی اسلامپ است. در طرف مقابل وجود جرم مولی بالا با طول شاخه‌های جانبی کم یا جرم مولی کم با طول شاخه‌های بالا پیش‌بینی رفتار بتن را دشوار می‌کند و احتمالا می‌توان گفت که خواص بتن تازه دچار افت خواهد شد. همچنین با کاهش جرم مولی پلیمر با طول زنجیرهای نزدیک به یکدیگر و همچنین وجود شاخه‌های فرعی با طول متوسط در زنجیرهای پلی‌کربوکسیلات، به علت همگن بودن ساختار پلیمرها و کاهش پدیده قفل‌شدن شاخه‌های جانبی، میزان پخش‌شدگی اسلامپ افزایش و گرانروی پلاستیک بتن تازه کاهش می‌یابد[۱۹–۲۱]. نتایج آزمون‌های انجام شده بر نمونه بتن حاوی فوق‌روان‌کننده ۲ در حضور ضدکف نیز نشان می‌دهد که در نمونه دارای ۰/۲ درصد از ضدکف و با ثابت ماندن مقدار سایر اجزای تشکیل دهنده طرح اختلاط، میزان هوای موجود در بتن کاهش یافت و وزن مخصوص بتن به دلیل کاهش هوای موجود در آن افزایش یافت که نشان از بهبود عملکرد بتن در حضور ضدکف است، اما میزان پخش‌شدگی اسلامپ کاهش و گران‌روی پلاستیک و تنش تسلیم بتن افزایش یافت. با این وجود کارایی بتن در عمل قابل قبول مشاهده شد. با افزایش دوباره درصد ضدکف تا ۰/۴ درصد، درصد هوا گران‌روی پلاستیک، تنش تسلیم و میزان پخش شدگی اسلامپ دچار تغییر محسوسی نشد، اما میزان آب انداختگی بتن افزایش یافت. این موضوع نشان می‌دهد که ۰/۲ درصد ضدکف برای بتن درصد بهینه است.

۴. نتیجه گیری

در این پژوهش تاثیر پنج نوع فوق‌روان‌کننده پلی‌کربوکسیلات مختلف بر عملکرد ملات و بتن تازه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- با تغییر جرم مولکولی و طول شاخه‌های جانبی پلی‌کربوکسیلات، روانی و عملکرد کلی بتن دچار تغییر می‌شود.

- با افزایش جرم مولکولی پلیمر و همچنین افزایش طول شاخه های جانبی مولکول های پلی کربوکسیلات، به دلیل افزایش خاصیت ممانعت فضایی پلیمرهای جذب‌شده بر سطح سیمان، ذرات به میزان بیشتری بر روی هم می لغزند و روانی بتن افزایش می‌یابد.
- با افزایش جرم مولکولی پلیمر و کاهش طول شاخه‌های جانبی آن و همچنین کاهش جرم مولی پلیمر به همراه افزایش طول شاخه های پلیمر، عملکرد بتن دچار افت خواهدشد.
- با کاهش جرم مولی پلیمر با طول زنجیرهای نزدیک به یکدیگر و همچنین وجود شاخه های فرعی با طول متوسط ، به علت همگن بودن ساختار پلیمرها و کاهش پدیده قفل شدن شاخه های جانبی، میزان روانی بتن افزایش می‌یابد.
- با افزودن ضدکف به بتن تازه، میزان هوای محبوس در بتن کاهش می یابد، اما در صورت افزودن ضدکف به بتن بیش از حد بهینه، میزان آب انداختگی بتن افزایش می یابد و تغییر چندانی در سایر خواص مشاهده نخواهدشد.

۵. مراجع

[1] H. Zhao *et al.*, "Synthesis, characterization, and performance of a novel polycarboxylate superplasticizer with a crosslinked topological structure," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 135, no. 45. 2018, doi: 10.1002/app.46716.

[2] S. Qian *et al.*, "Synthesis, characterization and working mechanism of a novel polycarboxylate superplasticizer for concrete possessing reduced viscosity," *Construction and Building Materials*, vol. 169. pp. 452–461, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.212.

[3] Y. Jun, Y. Jeong, J. E. Oh, J. Park, J. H. Ha, and S. G. Sohn, "Influence of the structural modification of polycarboxylate copolymer with a low dispersing ability on the set-retarding of Portland cement," *KSCE J. Civ. Eng.*, vol. 19, no. 6, pp. 1787–1794, 2015, doi: 10.1007/s12205-014-1189-4.

[4] S. Lv, H. Ju, C. Qiu, Y. Ma, and Q. Zhou, "Effects of connection mode between carboxyl groups and main chains on polycarboxylate superplasticizer properties," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 128, no. 6, pp. 3925–3932, 2013, doi: 10.1002/app.38608.

[5] T. Zheng, D. Zheng, X. Qiu, D. Yang, L. Fan, and J. Zheng, "A novel branched claw-shape lignin-based polycarboxylate superplasticizer: Preparation, performance and mechanism," *Cem. Concr. Res.*, vol. 119, no. September 2018, pp. 89–101, 2019, doi: 10.1016/j.cemconres.2019.03.007.

[6] Q. Ren, H. Zou, M. Liang, Y. Wang, and J. Wang, "Preparation and characterization of amphoteric polycarboxylate and the hydration mechanism study used in portland cement," *RSC Adv.*, vol. 4, no. 83, pp. 44018–44025, 2014, doi: 10.1039/c4ra05542j.

[7] X. Lin, H. Pang, D. Wei, M. Lu, and B. Liao, "Effect of the cross-linker structure of cross-linked polycarboxylate superplasticizers on the behavior of cementitious mixtures," *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 608, no. June 2020, p. 125437, 2021, doi: 10.1016/j.colsurfa.2020.125437.

[8] P. H. Chuang, Y. H. Tseng, Y. Fang, M. Gui, X. Ma, and J. Luo, "Effect of side chain length on polycarboxylate superplasticizer in aqueous solution: A computational study," *Polymers (Basel).*, vol. 11, no. 2, pp. 13–15, 2019, doi: 10.3390/polym11020346.

[9] X. Wang, J. Zhang, Y. Yang, X. Shu, and Q. Ran, "Effect of side chains in block polycarboxylate superplasticizers on early-age properties of cement paste," *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 133, no. 3, pp. 1439–1446, 2018, doi: 10.1007/s10973-018-7231-x.

[10] F. Winnefeld, S. Becker, J. Pakusch, and T. Götz, "Effects of the molecular architecture of comb-shaped superplasticizers on their performance in cementitious systems," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 29, no. 4, pp. 251–262, 2007, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2006.12.006.

[11] M. Liu, J. Lei, Y. Bi, X. Du, Q. Zhao, and X. Zhang, "Preparation of polycarboxylate-based superplasticizer and its effects on zeta potential and rheological property of cement paste," *J. Wuhan Univ. Technol. Mater. Sci. Ed.*, vol. 30, no. 5, pp. 1008–1012, 2015, doi: 10.1007/s11595-015-1265-8.

[12] M. M. Alonso, M. Palacios, and F. Puertas, "Compatibility between polycarboxylate-based admixtures and blended-cement pastes," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 35, no. 1, pp. 151–162, 2013, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.08.020.

[13] B. Felekoğlu and H. Sarikahya, "Effect of chemical structure of polycarboxylate-based superplasticizers on workability retention of self-compacting concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 9, pp. 1972–1980, 2008, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.07.005.

[14] Q. Ran, J. Liu, Y. Yang, X. Shu, J. Zhang, and Y. Mao, "Effect of Molecular Weight of Polycarboxylate Superplasticizer on Its Dispersion, Adsorption, and Hydration of a Cementitious System," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 28, no. 5, p. 4015184, 2016, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001460.

[15] J. A. Sainz-aja *et al.*, "applied sciences Determination of the Optimum Amount of Superplasticizer Additive for Self-Compacting Concrete," 2020.

[16] F. Huang, H. Li, Z. Yi, Z. Wang, and Y. Xie, "The rheological properties of self-compacting concrete containing superplasticizer and air-entraining agent,"

Constr. Build. Mater., vol. 166, pp. 833–838, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.169.

[17] X. Q. Huang, X. R. Li, D. W. Zhang, C. J. Xue, and A. Q. Zhang, "Application of polycarboxylate superplasticizer in the concrete," *Mater. Sci. Forum*, vol. 898 MSF, pp. 2076–2080, 2017, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.898.2076.

[18] Z. Wang, Z. Lu, F. Lu, and H. Li, "Relationship between structure and performance of polycarboxylate superplasticizer," *Key Eng. Mater.*, vol. 509, pp. 57–64, 2012, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.509.57.

[19] K. Yamada, T. Takahashi, S. Hanehara, and M. Matsuhisa, "Effects of the chemical structure on the properties of polycarboxylate-type superplasticizer," *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, no. 2, pp. 197–207, 2000, doi: 10.1016/S0008-8846(99)00230-6.

[20] R. Flatt and I. Schober, *Superplasticizers and the rheology of concrete*. Woodhead Publishing Limited, 2012.

[21] F. R. Kong, L. S. Pan, C. M. Wang, D. La Zhang, and N. Xu, "Effects of polycarboxylate superplasticizers with different molecular structure on the hydration behavior of cement paste," *Constr. Build. Mater.*, vol. 105, pp. 545–553, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.178.