تحقیقات بتن
سال سیزدهم، شمارهٔ دوم
تابستان ۹۹
ص ۴۳ – ۳۱
تاریخ دریافت: ۹۸/۸/۲۰
تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۱/۲۷

بررسی مشخصات مکانیکی بتن غلتکی روسازی حاوی نانوسیلیس و الیاف فولادی

فرید سیف‌اللهی
دانشجوی دکتری مهندسی عمران- گرایش سازه، دانشگاه محقق اردبیلی.
یعقوب محمدی *
دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی.

چکیده

استفاده از بتن غلتکی در روسازی نسبتاً جدید و تکنولوژی آن در حال پیشرفت است. بتن غلتکی، بتنی با اسلامپ صفراست که در حالت تازه، قابلیت تحمل وزن غلتک و تراکم را داشته باشد. این نوع بتن در احداث سازه‌های مهندسی در دو زمینه مورد استفاده قرار می‌گیرد: در احداث سدها و روسازی‌ها. در این مطالعه استفاده از بتن غلتکی صرفاً در زمینهٔ روسازی موردمطالعه قرار می‌گیرد. با هدف رفع نقایص بتن غیرمسلح و بهبود مشخصات مکانیکی و دوام بتن غلتکی روسازی، از الیاف فولادی و ذرات نانوسیلیس استفاده شده‌است. افزودن الیاف فولادی به بتن غلتکی تا ۱ درصد حجم بتن، باعث افزایش مقاومت فشاری، مقاومت کششی شکافت و مقاومت خمشی به ترتیب به مقدار ۱۸,۹، ۶۲,۸ و ۸۷,۲ درصد می‌شود و افزودن نانوسیلیس به بتن غلتکی تا ۱ درصد وزن سیمان، باعث افزایش مقاومت فشاری، مقاومت کششی شکافت و مقاومت خمشی به ترتیب به مقدار ۶,۸، ۱۳,۸ و ۱۱,۲ درصد می‌شود. افزودن الیاف فولادی و نانوسیلیس به بتن غلتکی باعث افزایش زمان وی‌بی و کاهش کارایی مخلوط شده و همچنین نانوسیلیس با افزایش لزجت خمیر سیمان باعث کاهش خارج شدن ملات سیمان از بتن در مدت تراکم می‌شود.

واژه‌های کلیدی: بتن غلتکی روسازی، مشخصات مکانیکی، الیاف فولادی، نانوسیلیس، طاقت.

* نویسنده مسئول: yaghoubm@uma.ac.ir

۱- مقدمه

بتن غلتکی روسازی راه[1] مخلوط نسبتاً سختی از مصالح سنگی (بزرگ‌ترین اندازهٔ سنگ‌دانه‌ها کمتر از ۱۹ میلی‌متر)، مصالح سیمانی و آب است که توسط غلتک ارتعاشی متراکم و سخت شده است[۱]. بتن‌ها بر اساس مقدار روانی آن‌ها به ۶ دستهٔ بسیار پلاستیک، پلاستیک، پلاستیک سخت، سخت، خیلی سخت و بی‌نهایت خشک تقسیم‌بندی شده‌اند. جهت تعیین روانی در بتن های بسیار پلاستیک تا سخت که روانی آن‌ها بیشتر از ۲۵ میلی‌متر است از آزمایش اسلامپ و برای بتن‌های با روانی سخت تا بی نهایت خشک که روانی آن‌ها کمتر از ۲۵ میلی‌متر اسلامپ است از دستگاه Vebe استفاده می‌شود[۲]. بتن غلتکی روسازی باید به‌اندازهٔ کافی خشک باشد تا بتواند وزن غلتک ارتعاشی را که جهت ایجاد تراکم از روی آن عبور می‌کند تحمل نماید همچنین لازم است تا به‌اندازهٔ کافی مرطوب باشد تا خمیر سیمان بتواند در طول اختلاط و تراکم در بین سنگ‌دانه‌ها توزیع شود. به دلیل اینکه روانی بتن غلتکی در محدودهٔ سخت تا بی‌نهایت خشک است (روانی بتن معمولی در محدودهٔ بسیار پلاستیک تا سخت است) و بتن غلتکی دارای دانه‌بندی متفاوت نسبت به بتن معمولی است، روش‌های طرح اختلاط و مشخصات RCC، با روش‌های به‌کاررفته برای بتن‌های معمولی متفاوت است. این روش‌ها به دو دستهٔ کلی تقسیم‌بندی می‌شوند:

۱- طرح اختلاط با استفاده از آزمایش‌های روانی[2] بتن طبق استاندارد ACI 211.3 [۲].

۲- طرح اختلاط با استفاده از آزمایش‌های تراکم خاک[3] طبق استاندارد ASTM D1557 [۳] [۱].

جهت دست‌یابی به مشخصات فیزیکی مطلوب در بتن، مواد افزودنی و تسلیح‌کننده به مخلوط بتن اضافه می‌شود[۴].

بتن مسلح به الیاف فولادی[4]، کامپوزیتی است که از بتن خالص به اضافهٔ الیاف فولادی مجزای غیر پیوسته تشکیل شده‌است.SFRC بتنی با ظرفیت کرنش، مقاومت در برابر ضربه، جذب انرژی، مقاومت خستگی و مقاومت کششی افزایش‌یافته است. مشخصات SFRC به مشخصات الیاف، مشخصات بتن و مشخصات ناحیهٔ انتقال بین الیاف و بافت بتن بستگی دارد. کامپوزیت‌های الیافی، جهت بهبود مشخصات مکانیکی مصالح ترد توسعه یافته‌اند. وقتی‌که ماتریس‌های ترد غیرمسلح، تحت کشش قرار می‌گیرند، ابتدا تغییرشکل الاستیک می‌دهند، به دنبال تغییرشکل الاستیک، ترک های میکروسکوپی ایجاد می‌شوند که ترک‌های ماکروسکوپی ایجاد می‌کنند و درنهایت شکست ایجاد می‌شود. افزودن الیاف به بتن، منجر به تغییرات در محدودهٔ پس‌الاستیک می‌شود. در بسیاری از کاربردهای عملی، مقاومت اولین ترک معمولاً افزایش نمی‌یابد. در این موارد، نتیجهٔ اصلی افزایش الیاف، پاسخ پس‌ترک کامپوزیت‌ها است. این موضوع توسط آزمایش‌های طاقت[5] اندازه گیری و کنترل می‌شود (مانند تعیین مساحت زیر منحنی بار-تغییر مکان). همچنین اضافه کردن الیاف منجر به کاهش مقدار اسلامپ خواهد شد. از آزمایش Vebe جهت تعیین کارآیی مخلوط FRC تازه استفاده می‌شود[۵].

نانوتکنولوژی شاخه‌ای از علوم در حال گسترش است که دارای زمینه‌های تحقیقاتی وسیعی است. نانوذرات یا نانومواد، موادی هستند که محدودهٔ ذرات آن‌ها مابین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر است[۴]. کاربرد نانوتکنولوژی در مصالح با پایهٔ سیمانی در سال‌های اخیر توجهات بسیاری را به خود جلب کرده است[۶]. رفتار مکانیکی مواد ساخته شده از بتن، تا حد زیادی به المان‌های سازه‌ای و پدیده‌هایی بستگی دارد که در مقیاس میکرو و نانو به وقوع می‌پیوندد. کامپوزیت‌های نانو، با افزودن ذرات نانو به موادی که قصد بهبود مشخصات آن وجود دارد تهیه می‌شوند[۴].

در میان محصولات حاصل از واکنش‌های سیمانی، C-S-H نقش اصلی را در مقاومت خمیر سیمان هیدراته شده و در نتیجه بتن ایفا می‌کند. CH علاوه بر اینکه نقش مطلوبی در مشخصات مکانیکی بتن ندارد، سبب کاهش دوام بتن در مقابل محیط‌های مخرب می‌گردد. لذا اتخاذ شیوه‌ای با هدف مصرف هر چه بیشتر آن به‌منظور دستیابی به افزایش در سطح تولید بلورهای مفید در واکنش‌های سیمانی بتن می‌تواند با ایجاد ناحیهٔ انتقال قوی‌تری بین خمیر سیمان و سنگ‌دانه‌ها، در بهبود مشخصات مکانیکی و دوام بتن مؤثر باشد[۷]. به علت نرمی و واکنش‌پذیری بالا، نانوسیلیس

[1] Roller Compacted Concrete Pavements (RCCP)
[2] Consistency
[3] Soil-compaction
[4] Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC)
[5] Toughness

تأثیرات زیر را در مصالح با پایهٔ سیمانی دارد: ۱)NS در داخل محصولات ناشی از هیدراسیون به دلیل اینکه می‌تواند نقش هسته[1] را داشته باشد، مانع از تشکیل کریستال‌های (مانند هیدرواکسیدکلسیم[2] و اترینگایت) با اندازهٔ بزرگ می‌شود. ۲) ذرات نانوسیلیس به‌صورت فیزیکی تمایل دارند که فضاهای خالی بین ذرات بزرگ‌تر را پر کنند. ۳) فعالیت پوزولانی NS می‌تواند کریستال CH را مصرف کند که منجر به کاهش کریستال CH و کاهش اندازهٔ CH در ناحیهٔ انتقال می‌شود. به‌دلیل این تأثیرات در بسیاری از مطالعات گزارش شده است که NS مشخصات مکانیکی و دوام مصالح با پایهٔ سیمانی را بهبود بخشیده است[۶].

محمدی و سیف‌اللهی، تأثیر نانوسیلیس را بر برخی از خواص مکانیکی بتن غلتکی در سدها مورد بررسی قرار داده و آزمایش‌های مقاومت فشاری و نفوذپذیری بر روی نمونه‌ها انجام داده‌اند که نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان‌دهندهٔ افزایش مقاومت فشاری و کاهش نفوذپذیری بتن غلتکی در سدها است[۸].

در مطالعه‌ای دیگر محمدی و سیف‌اللهی، تأثیر نانوسیلیس و الیاف پلی‌پروپیلن را بر خواص مکانیکی و دوام بتن معمولی و بتن سبک بررسی کرده و آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت کششی غیر مستقیم، التراسونیک و مقاومت الکتریکی روی نمونه‌ها انجام داده‌اند که افزایش مقادیر این مشخصات نشان دهندهٔ تأثیر مثبت نانوسیلیس و الیاف پلی‌پروپیلن بر مشخصات مکانیکی و دوام بتن معمولی و بتن سبک است[۹]. محمدی و همکاران در تحقیقی مشخصات بتن حاوی الیاف فولادی با نسبت‌های ظاهری مختلف الیاف را در حالت تازه و سخت‌شده بررسی نموده و نتیجه گرفته‌اند که ترکیب ۶۵ درصد حجم الیاف فولادی به طول ۵۰ میلی‌متر و ۳۵ درصد حجم الیاف به طول ۲۵ میلی‌متر، مناسب‌ترین ترکیب نسبت‌های مختلف الیاف برای افزایش مقاومت فشاری، مقاومت کششی غیرمستقیم و مقاومت خمشی است[۱۰]. ناظری‌گیوی و همکاران در تحقیقی تأثیر نانوسیلیس را روی مکانیسم شکست نمونه‌های بتنی بررسی و نتیجه گرفته‌اند که ذرات نانوسیلیس رشد میکرو ترک‌ها را تحت بارگذاری فشاری کنترل نموده است، همچنین بیشترین مقاومت فشاری ۲۸ روزه، در نمونه‌های حاوی ۱ درصد نانوسیلیس به دست آمده است[۱۱]. در تحقیق دیگری Adamu و همکاران تأثیر خرده لاستیک و نانوسیلیس را روی مشخصات بتن غلتکی حاوی خاکستر بادی بررسی و نتیجه گرفته‌اند که بهینه‌ترین نتایج با جایگزینی ۵۰ درصد حجمی خاکستر بادی به‌جای سیمان مصرفی و ۱٫۰۱ درصد وزنی نانوسیلیس به‌جای مصالح سیمانی به دست می‌آید، همچنین نتیجه گرفته‌اند که با افزودن خاکستر بادی و نانوسیلیس زمان وی‌بی افزایش می‌یابد[۱۲].

Sukontasukkul و همکاران مطالعه‌ای روی کاربرد الیاف فولادی در بتن غلتکی روسازی در تایلند انجام داده‌اند. در این مطالعه از الیاف فولادی با دو انتهای خم‌شده و با نسبت‌های حجمی ۰٫۵ و ۱٫۰ درصد استفاده کرده‌اند و نتیجه گرفته‌اند که مقاومت خمشی، طاقت و مقاومت باقیمانده با افزایش درصد حجم الیاف فولادی، افزایش داشته است. همچنین افزایش سن نمونه‌ها باعث بهبود مشخصات مکانیکی مورد بررسی شده است[۱۳].

۲- مصالح مصرفی

در انتخاب نوع مصالح جهت استفاده در مخلوط‌های RCC، مقاومت طراحی، ملزومات دوام و نوع کاربرد تأثیرگذار می‌باشند. مصالح اصلی که در تولید RCC استفاده می‌شوند شامل آب، مصالح سیمانی و مصالح ریزدانه و درشت‌دانه می‌باشند[۱]. همچنین از نانوسیلیس و الیاف فولادی جهت ساخت کامپوزیت‌های بتن غلتکی استفاده شده است.

۲-۱- سیمان

مصالح سیمانی استفاده شده در مخلوط‌های روسازی RCC شامل سیمان پرتلند، سیمان هیدرولیکی مخلوط، سیمان به همراه پوزولان یا سربارهٔ کوره است. انتخاب نوع سیمان بر اساس مقاومت طراحی و سنی که این مقاومت مورد نیاز است صورت می‌گیرد. همچنین شرایط محیطی و واکنش‌های قلیایی نیز در این انتخاب مؤثر است[۱].

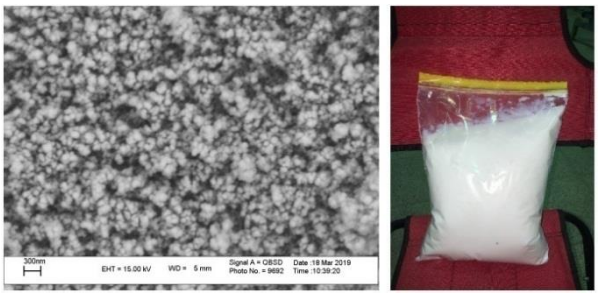
سیمان مصرف شده از نوع سیمان پرتلند پوزولانی تولید شده در کارخانهٔ سیمان آرتا اردبیل با وزن مخصوص ۳٫۱۳ است که استاندارد ASTM C595-79[۱۴] را مجاب می‌سازد.

[1]Nucleus

[2]Calcium hydroxide (CH)

۲-۲- نانوسیلیس

نانوسیلیس مورد استفاده به‌صورت پودری و تولید شرکت دگوسا است. شکل ظاهری نانوسیلیس مورد استفاده با متوسط اندازهٔ ذرات ۱۰ الی ۲۰ نانومتر و تصویر SEM با بزرگنمایی 50k در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- نانوسیلیس پودری مورد استفاده و تصویر SEM از ذرات نانوسیلیس با بزرگنمایی 50k

۲-۳- الیاف فولادی

برای استفاده‌های آزمایشگاهی و تجاری، انواع مختلف الیاف وجود دارد. الیاف فولادی، شیشه‌ای، مصنوعی و طبیعی، اصلی‌ترین دسته‌بندی است. الیاف فولادی، مقاومت و مدول‌الاستیسیتهٔ نسبتاً بالا دارند و در محیط قلیایی ماتریس سیمان نسبت به خوردگی مقاوم می‌باشند و چسبندگی آن‌ها به ماتریس سیمان را می‌توان با قلاب مکانیکی یا زبری سطح افزایش داد.

مقاومت تسلیم کششی حداقل مورد نیاز طبق استاندارد ASTM A 820 ، ۳۴۵ مگاپاسکال [۱۵] و طبق استاندارد SCE، ۵۵۲ مگاپاسکال است[۵].

الیاف فولادی دارای مقطع دایره‌ای (شکل۲) و مشخصات فیزیکی جدول ۱، تولید شرکت DUROCEM ایتالیا مورد استفاده قرار گرفته است.

۲-٤- سنگ‌دانه‌ها

مخلوط‌های RCC چسبندگی مخلوط‌های بتنی معمولی را ندارند، به همین دلیل موضوع جدایی دانه‌ها در این نوع بتن باید مورد توجه قرار گیرد. استفاده از ماکزیمم اندازهٔ اسمی سنگ‌دانهٔ ممکن، مقدار فضای خالی موجود در بتن را کاهش می‌دهد و بنابراین خمیر مورد نیاز مخلوط نیز کاهش می‌یابد. اما به‌منظور کم‌کردن جدایی دانه‌ها در طول حمل و ریختن و ایجاد سطح روسازی صاف، بزرگ‌ترین اندازهٔ اسمی سنگدانِ نباید بیشتر از ۱۹ میلی‌متر باشد. دانه‌بندی طبق استاندارد ASTM C136 [۱۶] انجام گرفته است. منحنی دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها در شکل ۳ ارائه شده‌است که طبق دانه‌بندی پیشنهادی ACI 325.10R جهت استفاده در بتن غلتکی است. همچنین محدودیت‌های استاندارد ASTM C33 را نیز جهت استفاده در بتن معمولی مجاب می‌سازد. استفاده از مصالح ریزتر از ۷۵ میکرومتر (الک No.200) به شرطی که غیرپلاستیک باشد، به علت اینکه فضاهای خالی کوچک را پر می‌کند می‌تواند مفید باشد[۱].

شکل۲- الیاف فولادی مورد استفاده

جدول ۱- مشخصات الیاف فولادی مصرفی

الیاف فولادی	مشخصات
۵۰	طول الیاف(mm)
۰٫۸	قطر الیاف(mm)
۶۲٫۵	نسبت ظاهری متوسط(l/d)
۱۰۰۰	مقاومت کششی(Mpa)
۲۰۰	مدول الاستیسیته(Gpa)
۷٫۸۵	وزن مخصوص
دو انتهای قلاب‌دار	شکل الیاف

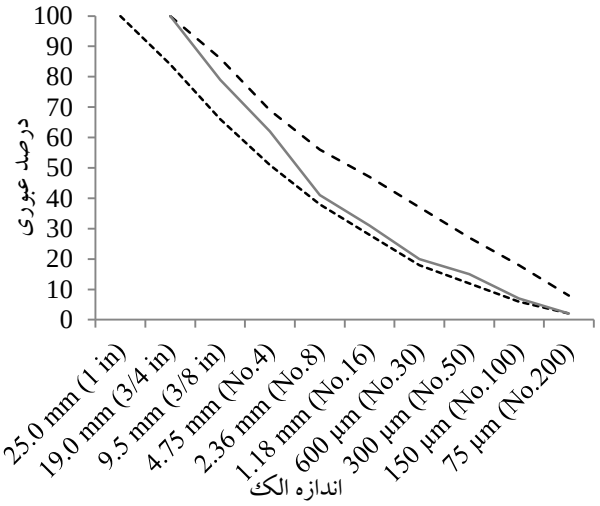
سنگ‌دانه‌های مصرفی در این مطالعه، از شن و ماسه‌های استخراج شده از روستای گیله‌ده آستارا تهیه شده است. سنگ‌دانه‌های درشت از نوع شکسته با بزرگ‌ترین اندازهٔ اسمی ۱۲٫۸ میلی‌متر می‌باشند. چگالی انبوهی شن، طبق استاندارد ASTM C29 [۱۷]، و وزن مخصوص و درصد جذب آب آن طبق استاندارد ASTM C 127 [۱۸]، به دست آمده است. همچنین وزن مخصوص و درصد جذب آب سنگ‌دانه‌های ریز طبق استاندارد ASTM C128 [۱۹] به دست آمده است که در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- مشخصات سنگ‌دانه‌های مصرفی

سنگ‌دانه‌های ریز	سنگ‌دانه‌های درشت	مشخصات
۲,۶۴	۲,۶۹	وزن مخصوص (gr/cm^3)
–	۱۶۰۰	وزن مخصوص انبوهی (kg/m^3)
۵,۰	۱,۳	جذب آب (%)
۳,۰	–	مدول نرمی

۲-۵- آب

کیفیت آب روسازی RCC، مشابه بتن معمولی است[۱]. آب اختلاط مورد استفاده آب شرب شهر اردبیل است.



شکل۳- منحنی دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها

۳- طرح اختلاط و ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها

طرح اختلاط بتن متداول روسازی طبق ACI 211.1 [۲۰] و بتن غلتکی روسازی طبق ACI 211.3R [۲] انجام گرفته است. متوسط مقاومت فشاری مورد نیاز بتن روسازی معمولاً ۳۰ (Mpa) در نظر گرفته می‌شود. همچنین مقدار اسلامپ بتن متداول روسازی بین ۲۵ و۷۵ (mm) در نظر گرفته می شود[۲۰].

در این مطالعه ۷ نوع طرح اختلاط برای بتن غلتکی و ۱ طرح اختلاط برای بتن متداول خالص (بدون نانوسیلیس و الیاف فولادی)، در مجموع ۸ نوع طرح اختلاط در نظر گرفته شده است که از هر طرح اختلاط ۹ عدد نمونه (۶ عدد نمونه استوانه‌ای و ۳ عدد نمونهٔ تیری) و در مجموع ۷۲ عدد نمونه ساخته شده است. همچنین نسبت وزنی آب به مصالح سیمانی نیز ثابت و برابر ۰,۵۴ در نظر گرفته شده است. نانوسیلیس به مقدار ۰,۵، ۱ و ۱,۵ درصد وزنی سیمان مصرفی و الیاف فولادی به مقدار ۰,۳۳، ۰,۶۷ و ۱ درصد حجم بتن به کار رفته است. نسبت های اختلاط در جدول ۳ ارائه شده است.

به دلیل اینکه مخلوط‌های بتن غلتکی بدون اسلامپ می‌باشند، روش‌های ساخت نمونه‌های بتن متداول، نمی‌توانند جهت ساخت نمونه‌های RCC به کار برده شوند. روش‌هایی که اغلب مورد استفاده قرار می‌گیرند شامل ارتعاش نمونهٔ RCC تازه روی میز ویبرهٔ تحت سربار ASTM C1176 [۲۱] یا متراکم‌کردن نمونه توسط نوعی چکش ویبره ASTM C1435 [۲۲] است. می‌توان از چکش ویبره و میز ویبرهٔ تحت سربار، جهت تراکم نمونه‌های استوانه‌ای استفاده نمود، اما برای نمونه‌های تیری که دارای سطح قابل توجه هستند، کاربرد روش تراکم با چکش ویبره غیرعملی است و روش تراکم ارتعاشی تحت سربار مناسب‌تر است[۱]. بتن بدون اسلامپ باید با استفاده از میکسر مخلوط شود، همچنین میکسرهای اسپیرال[1] و پن میکسر[2] برای بتن بدون اسلامپ از میکسرهای معمولی مؤثرتر هستند[۲].

در این مطالعه جهت ساخت نمونه‌های استوانه‌ای ۱۵۰×۳۰۰ میلی-متر از میز ویبره و تحت سربار به جرم ۹,۱ کیلوگرم، طبق استاندارد ASTM C1176 استفاده شده است. به علت اینکه برای ساخت نمونه‌های تیری ۱۰۰×۱۰۰×۳۵۰ میلی‌متر، استاندارد معینی تدوین نشده است، از میز ویبره استفاده شده است و سربار متناسب با فشار تماسی نمونه‌های تیری مورد نظر، معادل سازی شده و جرم آن ۶ کیلوگرم تعیین شده است.

ابتدا طبق طرح اختلاط، شن، ماسه، آب، سیمان، نانوسیلیس یا الیاف فولادی را به مقدار تعیین شده آماده می‌کنیم. نانوسیلیس را که به‌صورت پودری است در تقریباً یک‌سوم آب اختلاط و توسط همزن مخلوط می‌کنیم تا به‌صورت کلوئیدی درآید. ابتدا شن را داخل میکسر ریخته و مقداری آب اضافه کرده و میکسر را روشن می‌کنیم، ماسه را اضافه کرده و یک‌سوم آب اختلاط را به میکسر

[1] Spiral-blade

[2] Pan-type

چرخان اضافه می‌کنیم. سپس سیمان را اضافه کرده و یک‌سوم آب که حاوی نانوسیلیس است را اضافه می‌کنیم. درنهایت الیاف فولادی را اضافه کرده و یک‌سوم آب باقیمانده را داخل میکسر می‌ریزیم. این عمل باعث می‌شود تا نانوسیلیس به همه جای مخلوط برسد و به‌صورت یکنواخت توزیع شود. بعد از اضافه کردن کلیهٔ اجزای بتن داخل میکسر، اجازه می‌دهیم که اختلاط ۳ دقیقه انجام شود. سپس به مدت ۳ دقیقه میکسر را خاموش می‌کنیم و درنهایت عمل اختلاط را ۲ دقیقهٔ دیگر انجام می‌دهیم.

جدول۳- طرح‌های اختلاط بتن‌های موردمطالعه

نام اختلاط	نانوسیلیس (kg)	الیاف فولادی (kg)	آب (kg)	سیمان (kg)	سنگ‌دانه‌های ریز (kg)	سنگ‌دانه‌های درشت (kg)	اسلامپ (mm)
CC	۰	۰	۱۹۹	۳۶۸,۵	۷۸۱,۵	۱۰۴۰	۵۰
R1	۰	۰	۱۶۸	۳۱۱	۴۶۶	۱۴۴۲	۰
R2	۰	۲۵,۹	۱۶۸	۳۱۱	۴۶۶	۱۴۴۲	۰
R3	۰	۵۱,۸	۱۶۸	۳۱۱	۴۶۶	۱۴۴۲	۰
R4	۰	۷۸,۵	۱۶۸	۳۱۱	۴۶۶	۱۴۴۲	۰
R5	۱,۵۵۵	۱۱۱	۱۶۸	۳۱۱	۴۶۶	۱۴۴۲	۰
R6	۳,۱۱۰	۱۱۱	۱۶۸	۳۱۱	۴۶۶	۱۴۴۲	۰
R7	۴,۶۶۵	۱۱۱	۱۶۸	۳۱۱	۴۶۶	۱۴۴۲	۰

جهت جلوگیری از جدایی دانه‌ها و اختلاط یکنواخت بتن، بتن داخل میکسر را داخل ظرف مخصوص اختلاط دستی بتن ریخته و با بیل و کمچه مجدداً مخلوط می‌کنیم. بتن غلتکی را داخل قالب که روی میز ویبره قرار دارد می‌ریزیم و سربار را روی بتن و داخل قالب قرار می‌دهیم. میز ویبره را روشن کرده و اجازه می‌دهیم عمل تراکم صورت گیرد. زمانی که بتن متراکم می‌شود، ملات فضای حلقوی بین سربار و دیوارهٔ داخلی قالب را پر می‌کند. زمانی که حلقهٔ کاملی اطراف سربار تشکیل شد ویبره را متوقف می‌کنیم. در نمونه‌های استوانه‌ای این عملیات را در ۳ لایه انجام می‌دهیم و در نمونه‌های تیری منشوری در ۱ لایه. بتن باید در مدت ۴۵ دقیقه بعد از اتمام اختلاط قالب‌گیری شود. همچنین برای جلوگیری از تداخل احتمالی عملکرد نانوسیلیس و فوق روان‌کننده، در هیچ‌یک از طرح اختلاط‌ها از فوق‌روان‌کننده استفاده نگردید. پس از ۲۴ ساعت از ساخت نمونه‌ها، قالب‌ها را باز کرده و جهت عمل‌آوری، بتن‌ها را در مخزن آب با دمای ۲±۲۳ درجه قرار می‌دهیم. پس از گذشت مدت زمان عمل‌آوری تعیین‌شده، نمونه‌ها را از آب خارج کرده و برای انجام آزمایش‌ها آماده می‌کنیم. معمولاً آزمون‌های مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روز و آزمون‌های مقاومت خمشی در سنین ۱۴ و ۲۸ روز انجام می‌شوند[۲۳].

٤- روند انجام آزمایش‌ها

بعد از اختلاط و عمل‌آوری نمونه‌ها، آزمایش‌های تعیین روانی، مقاومت فشاری، مقاومت کششی شکافت، مقاومت خمشی و طاقت انجام گرفته‌است. دستگاه آزمایش مقاومت فشاری و کششی از نوع tecnotest با ظرفیت ۲۰۰ تن و از نوع کنترل نیرو است. در آزمایش‌های تعیین مقاومت فشاری و کششی شکافت اگر در حین انجام آزمایش، بار وارد بر نمونه به مقدار ۱۰ درصد زیر بار نهایی وارد بر نمونه برسد، بارگذاری متوقف می‌شود درحالی‌که در آزمایش‌های تعیین مقاومت خمشی و طاقت، بارگذاری تا جایی ادامه می‌یابد که نمونه مقاومت خود را از دست بدهد و بار وارده به صفر برسد. آزمایش‌های تعیین مقاومت روی نمونه‌های مرطوب عمل‌آوری شده، بلافاصله بعد از خروج از مخزن انجام می‌گیرد [۲۴،۲۵،۲۶،۲۷].

٤-١- آزمایش تعیین روانی بتن غلتکی

طبق استاندارد ASTM C1170 جهت تعیین روانی RCC دو روش A (دارای سربار) و B (بدون سربار) وجود دارد که برای بتن‌های با روانی خیلی سخت تا بی‌نهایت خشک از روش A استفاده می‌شود.

بعد از اختلاط بتن، بتنی به جرم حداقل ۱۳٫۴±۰٫۷ کیلوگرم، داخل قالب استوانه‌ای مخصوص می‌ریزیم، بتن را به گونه‌ای پخش و صاف می‌کنیم تا جدایی دانه‌ها رخ ندهد. سربار استوانه‌ای به جرم ۲۲٫۷±۰٫۵ کیلوگرم را روی نمونهٔ داخل قالب قرار می‌دهیم. تایمر و ویبراتور را روشن کرده و با استفاده از چراغ‌قوه، بتن را از فضای حلقوی بین لبه سربار و جدارهٔ داخلی قالب مشاهده می‌کنیم. زمانی که بتن متراکم می‌شود، ملات فضای حلقوی بین سربار و دیوارهٔ داخلی قالب را پر می‌کند. زمانی که حلقهٔ کاملی اطراف سربار تشکیل شد، ویبره و تایمر را متوقف نموده و زمان سپری‌شده را به‌عنوان زمان Vebe درروش A ثبت می‌نماییم[۲۸].

دستگاه آزمایش Vebe در شکل ۴ نشان داده شده است.

شکل ۴- دستگاه آزمایش Vebe

٤-۲- آزمایش تعیین مقاومت فشاری

جهت تعین مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای از استاندارد ASTM C39 [۲۴] استفاده شده‌است. در این آزمایش بار فشاری محوری و با سرعت معین ثابت به نمونه استوانه‌ای وارد می‌شود تا زمانی که نمونه شکسته شود. مقاومت فشاری با تقسیم بار ماکزیمم به دست آمده بر سطح مقطع نمونه تعیین می‌شود. بار باید به سرعتی اعمال شود که منطبق با سرعت بارگذاری در محدوده ۰٫۱۵ تا ۰٫۳۵ مگاپاسکال بر ثانیه باشد[۲۴].

نمونه‌ای از آزمایش مقاومت فشاری انجام‌یافته در شکل ۵ نشان داده شده است.

٤-۳- آزمایش تعیین مقاومت کششی

جهت تعین مقاومت کششی شکافت نمونه‌های استوانه‌ای از استاندارد ASTM C496 [۲۵] استفاده شده است. در این آزمایش بار فشاری به‌صورت قطری، در امتداد محور طولی نمونه وارد می‌شود تا زمانی که نمونه شکسته شود. مقاومت کششی با تعیین بار ماکزیمم به دست آمده و طبق فرمول (۱) تعیین می‌شود.

$$T = 2P/\pi ld \qquad (۱)$$

T مقاومت کششی شکافت، P بار ماکزیمم وارد بر نمونه، l طول نمونه و d قطر نمونه است. سرعت بارگذاری در محدودهٔ ۰٫۷ تا ۱٫۴ مگاپاسکال بر دقیقه قرار دارد [۲۵]. نمونه‌ای از آزمایش مقاومت کششی انجام‌یافته در شکل ۵ نشان داده شده است.

شکل ۵- آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی

٤-٤- آزمایش تعیین مقاومت خمشی و طاقت خمشی

جهت تعین مقاومت خمشی نمونه‌های تیری از استاندارد ASTM C78 [۲۶] استفاده شده است. تیرهای قالب‌گیری شده، تحت بارگذاری سه‌نقطه‌ای با سرعت بارگذاری در محدودهٔ ۰٫۸۶ تا ۱٫۲۱ مگاپاسکال بر دقیقه قرار می‌گیرند. اگر شکست در سطح کششی که در بازهٔ یک‌سوم میانی طول دهانه قرار دارد آغاز شود، مدول گسیختگی از رابطهٔ (۲) محاسبه می‌شود.

$$R = PL/bd^2 \qquad (۲)$$

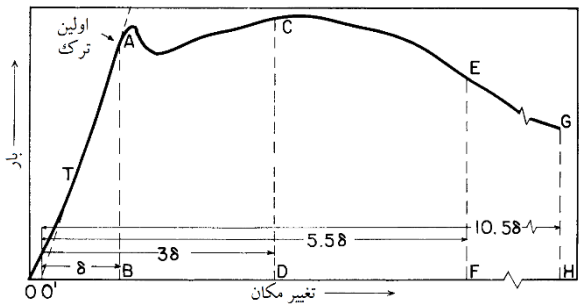
R مدول گسیختگی، P بار ماکزیمم وارد بر نمونه، L طول دهانه، b متوسط عرض نمونه در سطح شکست و d متوسط عمق نمونه در سطح شکست است.

اگر شکست در سطح کششی خارج از بازهٔ یک‌سوم میانی طول دهانه آغاز شود و سطح شکست از این بازه بیش از ۵ درصد طول دهانه فاصله نداشته باشد، مدول گسیختگی از رابطهٔ (۳) محاسبه می‌شود.

$$R = 3Pa/bd^2 \qquad (۳)$$

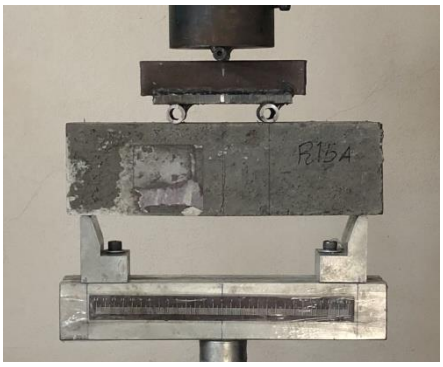
A فاصلهٔ متوسط بین خط شکست و نزدیک‌ترین تکیه‌گاه روی سطح کششی تیر است[۲۶].

طاقت خمشی با استفاده از استانداردهای ASTM C1018 [۲۷] و SCE SF-4 [۲۹] و از تحلیل منحنی بار-تغییر مکان همانند شکل ۶ به دست آمده است. نمونه‌ها تحت بارگذاری سه‌نقطه‌ای که در استاندارد C78 تعیین شده است، قرار می‌گیرند. بار وارده و تغییر مکان وسط دهانهٔ تیر در نمودار ترسیم می‌شوند. بار و تغییر مکان اولین ترک که جهت تعیین مقاومت خمشی اولین ترک و جهت تثبیت‌کردن تغییرمکان‌های نقاط انتهایی برای محاسبات طاقت استفاده می‌شوند تعیین شده و محاسبات طاقت و شاخص‌های طاقت (I_5، I_{10} و I_{20}) و ضرایب مقاومت باقیمانده ($R_{5,10}$ و $R_{10,20}$) طبق استاندارد ASTM C1018 و ضریب طاقت خمشی $\overline{\sigma_B}$ طبق استاندارد SCE SF4 تعیین می‌شود.



شکل۶- مشخصات منحنی بار-تغییر مکان[۲۳]

مقاومت اولین ترک، رفتار بتن الیافی را تا شروع ترک در ماتریس مشخص می‌کند درحالی‌که شاخص‌های طاقت، طاقت را بعدازآن تا تغییر مکان نقطهٔ انتهایی معین‌شده، تعیین می‌کند.



شکل ۷- آزمایش مقاومت خمشی و طاقت انجام‌یافته

ضرایب مقاومت باقیمانده، متوسط باقیماندهٔ بار پس ترک در فاصلهٔ مکانی معین را به‌صورت درصدی از بار اولین ترک مشخص می‌کند. در نمونه‌های استاندارد ۱۰۰×۱۰۰×۳۵۰ میلی‌متر، سرعت افزایش تغییر مکان وسط دهانه باید در محدودهٔ ۰٫۰۵ تا ۰٫۱ میلی‌متر بر دقیقه باشد تا به تغییر مکان نقطهٔ انتهایی تعیین‌شده برسد. سرعت متناظر برای نمونه‌هایی با ابعاد و اشکال دیگر، بر این اساس است که در عرض ۳۰ تا ۶۰ ثانیه بعد از شروع آزمایش به مقاومت اولین ترک برسد.

مقاومت خمشی که با استفاده از ماکزیمم بار به دست آمده از منحنی بار تغییر مکان و فرمول مدول گسیختگی استاندارد C78 تعیین می‌شود با مقدار به دست آمده از استاندارد C78 به علت تفاوت در سرعت بارگذاری متفاوت است[۲۷،۲۹].

دستگاه آزمایش مقاومت خمشی از نوع SANTAM STM-150 و ظرفیت ۱۵ تن است که در شکل ۷ نمونه‌ای از آزمایش تعیین مقاومت خمشی و طاقت نشان داده شده است.

۵- بحث بر روی نتایج آزمایشگاهی

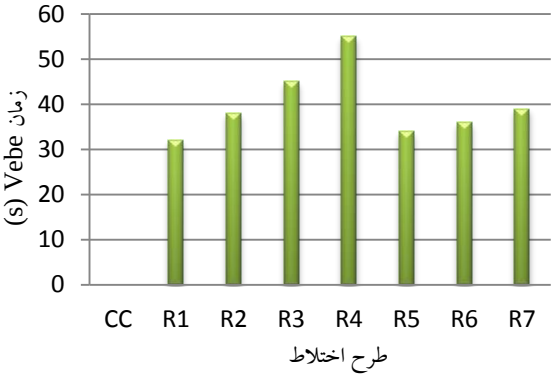
۵-۱- روانی

نتایج حاصل از انجام آزمایش تعیین زمان Vebe نمونهٔ شاهد بتن غلتکی (R1) و نمونه‌های حاوی درصدهای مختلف الیاف فولادی(R4,R3,R2) و نانوسیلیس(R7,R6,R5) در جدول ۴ و شکل ۸ نشان داده شده است.

جدول۴- نام‌گذاری طرح اختلاط‌ها و نتایج آزمایش‌های روانی، مقاومت فشاری و مقاومت کششی (شکافت)

نام اختلاط	نانوسیلیس (٪)	الیاف فولادی (٪)	زمان وی بی (s)	مقاومت فشاری (Mpa)	مقاومت کششی (Mpa)
CC	۰٫۰	۰٫۰۰	۰	۲۵٫۳۷	۳٫۱۳
R1	۰٫۰	۰٫۰۰	۳۲	۲۵٫۵۷	۳٫۰۴
R2	۰٫۰	۰٫۳۳	۳۸	۲۸٫۲۳	۳٫۷۱
R3	۰٫۰	۰٫۶۷	۴۵	۲۸٫۸۹	۴٫۷۶
R4	۰٫۰	۱٫۰۰	۵۵	۳۰٫۴۰	۴٫۹۵
R5	۰٫۵	۰٫۰۰	۳۴	۲۵٫۶۷	۳٫۰۷
R6	۱٫۰	۰٫۰۰	۳۶	۲۷٫۳۲	۳٫۴۶
R7	۱٫۵	۰٫۰۰	۳۹	۲۴٫۶۹	۲٫۹۰

با افزایش درصد حجمی الیاف فولادی از ۰٫۳۳ تا ۱٫۰۰ درصد حجم بتن، زمان Vebe افزایش‌یافته است که در نمونهٔ حاوی ۱٫۰۰ درصد الیاف فولادی نسبت به نمونهٔ شاهد، زمان Vebe، ۴۲ درصد افزایش داشته است که باعث کاهش کارایی مخلوط می‌شود.



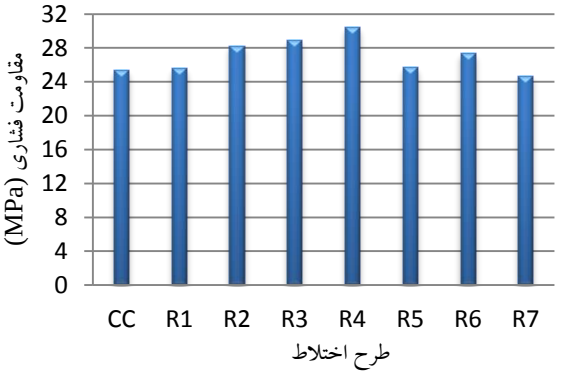
شکل ۸- تغییرات زمان Vebe

بتن حاوی الیاف باید دارای کارآیی لازم باشد تا ریختن، تراکم و پرداخت با حداقل انرژی صورت گرفته و الیاف به‌صورت یکنواخت توزیع شوند. در یک مخلوط، درجهٔ تراکم مخلوط، مقاومت و سایر مشخصات بتن سخت شده را تحت تأثیر قرار می‌دهد، لذا لازم است دقت کافی در تعیین مقدار الیاف صورت گیرد تا ضمن افزایش مشخصات مطلوب، امکان تراکم مناسب نیز وجود داشته باشد. همچنین با افزایش درصد وزنی نانوسیلیس از ۰٫۵ تا ۱٫۵ درصد، زمان Vebe افزایش‌یافته است که در نمونهٔ حاوی ۱٫۵ درصد نانوسیلیس نسبت به نمونهٔ شاهد، زمان Vebe، ۱۸ درصد افزایش‌یافته است. نانوسیلیس با افزایش لزجت خمیر سیمان باعث کاهش خارج شدن ملات سیمان از بتن در مدت تراکم شده و کارایی مخلوط را کاهش می‌دهد.

۵-۲- مقاومت فشاری

نتایج حاصل از انجام آزمایش‌های تعیین مقاومت فشاری در جدول ۴ و شکل ۹ نشان داده شده است.

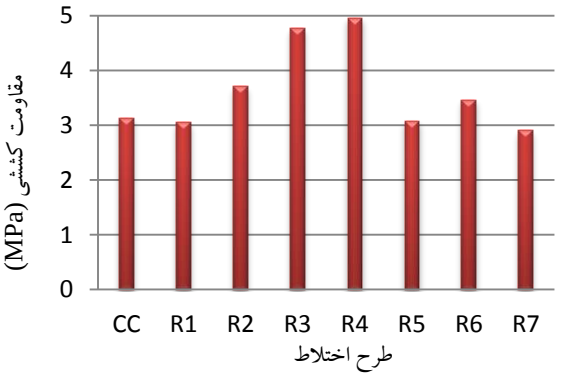
در نمونه‌های بتن غلتکی حاوی الیاف فولادی، مقاومت فشاری تحت تأثیر الیاف افزایش می‌یابد، بیشترین افزایش مقاومت فشاری در نمونهٔ حاوی ۱٫۰۰ درصد الیاف فولادی و به مقدار ۱۸٫۹ درصد است. در نمونه‌های بتن غلتکی حاوی نانوسیلیس، مقاومت فشاری به مقدار ناچیزی افزایش‌یافته است که بیشترین افزایش مقاومت در نمونهٔ حاوی ۱٫۰۰ درصد نانوسیلیس و به مقدار ۶٫۸ درصد است. همچنین در نمونهٔ حاوی ۱٫۵ درصد نانوسیلیس، مقاومت فشاری ۳٫۴ درصد کاهش‌یافته است. در طرح اختلاط بتن غلتکی، حجم خمیر سیمان به‌اندازه‌ای در نظر گرفته می‌شود تا بتواند فضای خالی بین سنگ‌دانه‌ها را پر کند. با افزایش مقدار نانوسیلیس تا ۱٫۵ درصد، لزجت خمیر سیمان افزایش‌یافته و باعث می‌شود تا خمیر سیمان نتواند به‌صورت کامل در فضای بین سنگ‌دانه‌ها قرار گیرد. در نتیجه در بتن غلتکی حاوی ۱٫۵ درصد نانوسیلیس، مقاومت فشاری به علت عدم تراکم کامل و وجود فضاهای خالی کوچک مابین سنگ‌دانه‌ها کاهش‌یافته است.



شکل ۹- تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ها

۵-۳- مقاومت کششی شکافت

نتایج حاصل از انجام آزمایش‌های تعیین مقاومت کششی در جدول ۴ و شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۰- تغییرات مقاومت کششی نمونه‌ها

با توجه به شکل ۱۰، روند مشابه مقاومت فشاری در مقاومت کششی نمونه‌ها مشاهده می‌شود. در نمونه‌های بتن غلتکی حاوی الیاف فولادی، مقاومت کششی تحت تأثیر الیاف افزایش می‌یابد، بیشترین افزایش مقاومت کششی در نمونهٔ حاوی ۱٫۰۰ درصد الیاف فولادی و به مقدار ۶۲٫۸ درصد است. در نمونه‌های بتن غلتکی حاوی نانوسیلیس نیز مقاومت کششی افزایش‌یافته است که بیشترین افزایش مقاومت در نمونهٔ حاوی ۱٫۰۰ درصد نانوسیلیس و به مقدار ۱۳٫۸ درصد است. همچنین در نمونهٔ حاوی ۱٫۵ درصد نانوسیلیس، مقاومت فشاری ۴٫۶

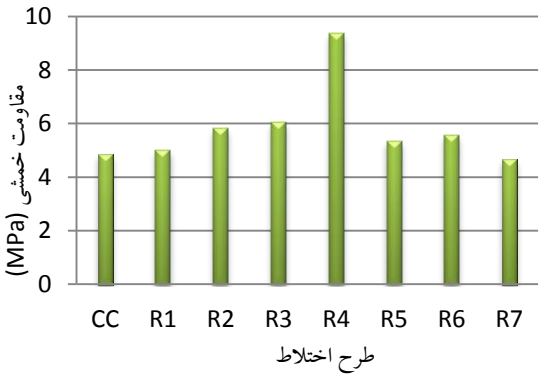
درصد کاهش‌یافته است. طبق شکل‌های ۹ و ۱۰، در بتن متداول (CC) و بتن غلتکی (R1) با مقاومت فشاری تقریباً یکسان، مقاومت کششی شکافت بتن معمولی بیشتر از بتن غلتکی است. در آزمایش مقاومت کششی شکافت، نمونه تحت تنش‌های کششی خالص قرار می‌گیرد و این تنش‌ها باعث ایجاد شکافت در نمونه و از بین رفتن تماس بین سنگ‌دانه‌ها در سطح شکافت می‌شوند. به علت تراکم، چفت‌وبست بین سنگ‌دانه‌ها در بتن غلتکی نسبت به بتن متداول بیشتر بوده و از عوامل مؤثر در مقاومت فشاری بتن غلتکی است درحالی‌که چفت‌وبست بین دانه‌ها در کشش خالص عامل مؤثری نبوده و باوجود خمیر سیمان کمتر بین سنگ‌دانه‌ها در بتن غلتکی نسبت به بتن متداول، مقاومت کششی بتن غلتکی کمتر از بتن متداول با مقاومت فشاری یکسان است.

۵-٤- مقاومت خمشی

نتایج حاصل از انجام آزمایش‌های تعیین مقاومت خمشی در جدول ۵ و شکل ۱۱ نشان داده شده است.

جدول ۵- نتایج آزمایش‌های مقاومت خمشی

نام اختلاط	نانوسیلیس (%)	الیاف فولادی (%)	تغییر مکان اولین ترک (mm)	بار اولین ترک (N)	مقاومت اولین ترک (MPa)	بار ماکزیمم (N)	مقاومت ماکزیمم (MPa)
CC	۰,۰	۰,۰۰	۰,۵۶	۱۶۱۷۴,۲	۴,۸۵	۱۶۱۷۴,۲	۴,۸۵
R1	۰,۰	۰,۰۰	۰,۵۸	۱۶۶۷۴,۵	۵,۰۰	۱۶۶۷۴,۵	۵,۰۰
R2	۰,۰	۰,۳۳	۰,۷۱	۱۹۳۴۱,۷	۵,۸۰	۱۹۳۴۱,۷	۵,۸۰
R3	۰,۰	۰,۶۷	۰,۷۸	۱۹۶۱۴,۶	۵,۸۸	۲۰۰۸۶,۷	۶,۰۳
R4	۰,۰	۱,۰۰	۰,۸۳	۲۰۲۹۰,۸	۶,۰۹	۳۱۲۰۰,۰	۹,۳۶
R5	۰,۵	۰,۰۰	۰,۵۸	۱۷۷۸۳,۷	۵,۳۳	۱۷۷۸۳,۷	۵,۳۳
R6	۱,۰	۰,۰۰	۰,۷۰	۱۸۵۴۱,۲	۵,۵۶	۱۸۵۴۱,۲	۵,۵۶
R7	۱,۵	۰,۰۰	۰,۵۹	۱۵۴۵۸,۱	۴,۶۴	۱۵۴۵۸,۱	۴,۶۴



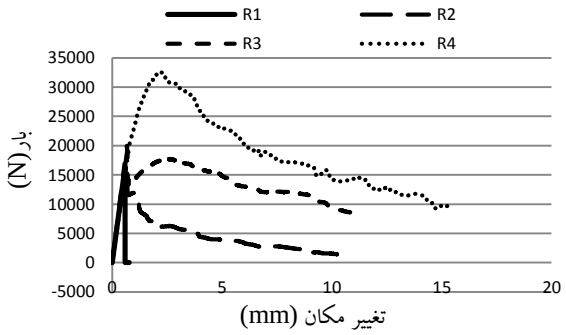
شکل ۱۱- تغییرات مقاومت خمشی نمونه‌ها

در نمونه‌های بتن غلتکی حاوی الیاف فولادی، تغییر مکان اولین ترک، مقاومت اولین ترک و مقاومت نهایی خمشی تحت تأثیر الیاف افزایش می‌یابد، بیشترین افزایش تغییر مکان اولین ترک، مقاومت اولین ترک و مقاومت نهایی در نمونهٔ حاوی ۱,۰۰ درصد الیاف فولادی و به ترتیب به مقدار ۴۳ درصد، ۲۱,۸ درصد و ۸۷,۲ درصد است. در نمونه‌های بتن غلتکی حاوی نانوسیلیس نیز تغییرمکان اولین ترک، مقاومت اولین ترک که در این نمونه‌ها برابر با مقاومت نهایی است با افزودن نانوسیلیس به مقدار ۰,۵ و ۱ درصد افزایش‌یافته است که بیشترین افزایش تغییر مکان اولین ترک و مقاومت اولین ترک به ترتیب برابر با ۲۰,۶ درصد و ۱۱,۲ درصد در نمونهٔ حاوی ۱ درصد نانوسیلیس است. مقاومت خمشی بتن غلتکی به مقدار ناچیزی بیشتر از مقاومت خمشی بتن متداول با مقاومت فشاری یکسان است. این موضوع نشان می‌دهد که باوجود مقاومت کمتر بتن غلتکی نسبت به بتن متداول در ناحیهٔ کششی نمونه تیری، مقاومت فشاری بتن غلتکی در ناحیه فشاری نمونهٔ تیری بیشتر از بتن متداول بوده و این موضوع باعث متعادل شدن رفتار بتن غلتکی در خمش در مقایسه با بتن متداول می‌شود.

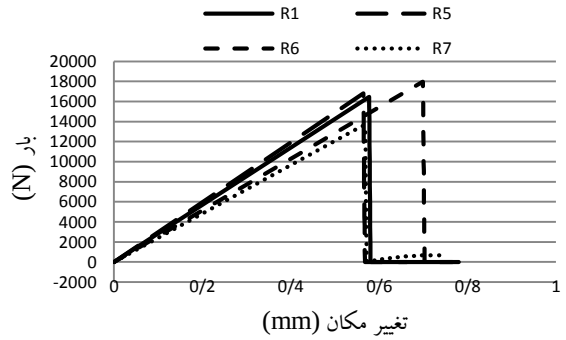
۵-۵- طاقت خمشی

نتایج حاصل از انجام آزمایش طاقت خمشی در جدول ۴ نشان داده شده است. در نمونه‌های بتن غلتکی حاوی الیاف فولادی، طاقت

اولین ترک (چقرمگی)، شاخص‌های طاقت و ضرایب مقاومت باقیمانده و ضریب طاقت خمشی با افزایش الیاف، افزایش‌یافته است. نمودار نیرو- تغییر مکان نمونهٔ شاهد و نمونه‌های حاوی الیاف در شکل ۱۲ نشان داده شده است. در نمونه‌های بتن غلتکی حاوی نانوسیلیس، طاقت اولین ترک با افزایش نانوسیلیس تا مقدار۱ درصد افزایش‌یافته است. نمودار نیرو- تغییر مکان نمونهٔ شاهد و نمونه‌های حاوی نانوسیلیس در شکل ۱۳ نشان داده شده است. طبق اشکال ۱۲ و ۱۳، خرابی نمونه‌های بدون الیاف به‌صورت ترد و نمونه‌های دارای الیاف به‌صورت شکل‌پذیر است.



شکل ۱۲- نمودار بار- تغییر مکان نمونهٔ شاهد و نمونه‌های حاوی الیاف فولادی تحت بارگذاری خمشی



شکل ۱۳- نمودار بار- تغییر مکان نمونهٔ شاهد و نمونه‌های حاوی نانوسیلیس تحت بارگذاری خمشی

٦- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیرات استفاده از الیاف فلزی و نانوسیلیس بر مشخصات مکانیکی بتن غلتکی موردمطالعه قرار گرفت. بر اساس یافته‌های حاصل از انجام آزمایش‌ها، نتیجه‌گیری‌های زیر قابل ارائه است:

- افزودن الیاف فولادی و نانوسیلیس به بتن غلتکی باعث افزایش زمان Vebe و کاهش کارایی مخلوط می‌شود.

- نانوسیلیس با افزایش لزجت خمیر سیمان باعث کاهش خارج شدن ملات سیمان از بتن در مدت تراکم می‌شود.

- افزودن الیاف فولادی به بتن غلتکی تا ۱ درصد حجم بتن، باعث افزایش مقاومت فشاری، مقاومت کششی شکافت و مقاومت خمشی می‌شود که در نمونه‌های حاوی ۱ درصد الیاف، مقاومت فشاری ۱۸,۹ درصد، مقاومت کششی ۶۲,۸ درصد و مقاومت خمشی ۸۷,۲ درصد افزایش داشته است.

- افزودن نانوسیلیس به بتن غلتکی تا ۱ درصد وزن سیمان، باعث افزایش مقاومت فشاری، مقاومت کششی شکافت و مقاومت خمشی می‌شود که در نمونه‌های حاوی ۱ درصد نانوسیلیس، مقاومت فشاری ۶,۸ درصد، مقاومت کششی ۱۳,۸ درصد و مقاومت خمشی ۱۱,۲ درصد افزایش داشته است.

- مقاومت کششی شکافت بتن غلتکی کمتر از بتن متداول با مقاومت‌های فشاری یکسان است.

-مقاومت خمشی بتن غلتکی به مقدار ناچیزی بیشتر از مقاومت خمشی بتن متداول با مقاومت فشاری یکسان است.

- الیاف فولادی، طاقت، شاخص‌های طاقت، و ضرایب مقاومت باقیمانده را به مقدار زیادی افزایش می‌دهند درحالی‌که مقاومت خمشی اولین ترک را به مقدار ناچیزی نسبت به نمونهٔ شاهد افزایش می‌دهند.

۷- مراجع

[1] ACI 325.10R-95, Report on Roller-Compacted Concrete Pavements, Reapproved 2001.
[2] ACI 211.3R-02, Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete, Reapprooved 2009.
[3] Narender Reddy, A.,Meena, T., A Comprehensive Overview on Performance of Nano Silica Concrete, International journal of Pharmacy and Technology, 9(1), 5518-5529, 2017.
[4] ASTM D1557-12, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort.
[5] ACI 544.1R-96, Report on Fiber Reinforced Concrete, Reapproved 2002.
[6] Ouyang, ., Han, B., Cheng, G., Zhao, L.,Ou, G., A Viscosity Prediction Model for Cement Paste With Nano-Sio_2 Particles. Construction and Building Materials.185, 293-301, 2018.
[7] Dham, M., Nano Modification of Cement Matrix for Enhanced Ductility and Fracture Properties in

Concrete, Doctoral dissertation, University of Florida, 2007.

[۸] محمدی، ی.، سیف‌اللهی، ف.، بررسی تأثیر نانوسیلیس بر خواص مکانیکی (مقاومت فشاری و نفوذپذیری) بتن غلتکی در سدها، نشریه سد و نیروگاه برق‌آبی ایران، جلد ۲، شماره ۷، صفحات۱۳-۲۴، ۱۳۹۴.

[۹] محمدی، ی.، سیف‌اللهی، ف.، بررسی تأثیر نانوسیلیس و الیاف پلی‌پروپیلن بر خواص مکانیکی و دوام بتن معمولی و بتن سبک، مجله علمی پژوهشی عمران مدرس، دوره هفدهم، شماره ۴، صفحات۱۸۷-۱۹۸، ۱۳۹۶.

[10] Mohammadi, Y., Singh, S. P., Kaushik, S. K., Properties of Steel Fibrous Concrete Containing Mixed Fibers in Fresh and Hardened State, Construction and Building Materials, 22(5),956-965, 2008.

[11] Nazerigivi, A., Nejati, H. R., Ghazvinian, A., Najigivi, A., Influence of Nano-silica on the Failure Mechanism of Concrete Specimens, Computers and Concrete, 19(4),427-432, 2017.

[12] Adamu, M., Mohammed, B. S., Shafiq, N., Liew, M. S., Alaloul, W. S., Effect of Crumb Rubber and Nano Silica on the Durability Performance of High Volume Fly Ash Roller Compacted Concrete Pavement, International Journal of Advanced and Applied Sciences, 5(10),53-61, 2018.

[13] Sukontasukkul, P., Chaisakulkiet, U., , N., Jamsawang, P., Horpibulsuk, S., Jaturapitakkul, C., Chindaprasirt, P., Case Investigation of Steel Fibers in Roller Compacted Concrete Pavement in Thailand, Case Studies in Construction Materials, V.11, 2019.

[14] ASTM C595-03, Standard Specification for Blended Hydraulic Cements.

[15] ASTM A820-96, Standard Specification for Steel Fibers for Fiber-Reinforced Concrete.

[16] ASTM C136-01, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates.

[17] ASTM C29/C29M-97, Standard Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate.

[18] ASTM C127-01, Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate.

[19] ASTM C128-01, Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate.

[20] ACI 211.1-91, Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete, Reapprooved 2002.

[21] ASTM C1176-92, Standard Practice for Making Roller-Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Table.

[22] ASTM C1435-99, Standard Practice for Molding Roller-Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Hammer.

[23] ASTM C192, Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory.

[24] ASTM C39, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.

[25] ASTM C496, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens.

[26] ASTM C78, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading).

[27] ASTM C1018, Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading).

[28] ASTM C1170-91, Standard Test Methods for Determining Consistency and Density of Roller-Compacted Concrete Using a Vibrating Table.

[29] SCE SF4, Method of Tests for Flexural Strength and Flexural Toughness of Steel Fiber Reinforced Concrete by Third-Point Loading.

The effects of nano silica and steel fibers on mechanical properties of roller-compacted concrete pavement

Farid Seifollahi
Phd Candidate, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
Yaghoub Mohammadi *
Associate Professor, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

Abstract

Roller Compacted Concrete is defined as a concrete with zero slump. It will support a roller while being compacted in its unhardened state. RCC is used in two general areas of engineered constructions: dams and pavements. In this study, RCC will be discussed only in the context of its use in pavements. In this regard, Some material savings may be possible due to the lower cement content normally needed in RCC pavement mixtures to achieve strengths equivalent to those of conventional concretes. The other advantages of using RCC include cost savings as a result of the construction method and the increased placement speed of the pavement. Unreinforced concrete has a low tensile strength and a low strain capacity at fracture. It was reported in many studies that NS significantly improved the mechanical properties and durability of cement-based materials. In this study we carried out a comprehensive investigation of the results caused by the addition of steel fibers and nano silica particles in mechanical properties of RCCP. Therefore, with varying amounts of steel fibers (0.00%, 0.33%, 0.67% and 1.00% by the volume of concrete) and nano silica particles (0.0%, 0.5%, 1.0% and 1.5% by the weight of cement), RCCP was prepared and consistency and mechanical properties (compression strength, tension strength, flexural strength, and thoughness) were investigated. The results indicated that the addition of steel fibers and nano silica leads to positive mechanical properties of RCCP.

Keywords: Roller Compacted Concrete Pavement, Mechanical Properties, Steel Fibers, Nano Silica,Toughness.

* Corresponding Author: yaghoubm@uma.ac.ir