

ویژگی‌های بتن فوق‌توانمند و رفتار ترک‌خوردگی نمونه‌های کششی بتن مسلح

حسین علی رهدار^۱، منصور قلعه‌نوی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده

بتن به‌عنوان پر مصرف‌ترین مصالح ساختمانی مدت‌هاست جوابگوی نیازهای روبه‌گسترش جامعه بشری است. انواع بتن معمولی و بتن با عملکرد بالا مدت زمان زیادی است که تشکیل‌دهنده اصلی سازه‌های بتنی بوده‌اند، اما نیاز به ساخت سازه‌های مرتفع‌تر، مقاوم‌تر و دارای المان‌های سازه‌ای با ابعاد کوچک‌تر و عمر طولانی‌تر، محققان را وادار به جستجو و تحقیق برای ساخت بتن مقاوم‌تر و با دوام‌تر نموده است. تحقیقات دانشمندان طی دو دهه اخیر منجر به پیدایش نوع جدیدی از بتن با خواص فوق‌العاده و مقاومت فشاری بسیار بالا شده است، که این بتن تحت عنوان بتن فوق‌توانمند شناخته می‌شود این نوع بتن دارای مقاومت فشاری بیشتر از ۱۲۰ مگاپاسکال است و در برابر عوامل مهاجم همچون یون کلر و سیکل‌های یخبندان از دوام فوق‌العاده برخوردار است. در این تحقیق پس از به دست آوردن طرح اختلاط مناسب سایر ویژگی‌های مکانیکی این نوع بتن با آزمایش‌هایی بر اساس استانداردهای مربوطه به دست آمده است و با انجام آزمایش کشش بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به طول ۱۵۰ میلی‌متر که با یک میلگرد فولادی در مرکز مسلح شده‌اند تأثیر نوع میلگرد، قطر میلگرد و اثر نسبت ضخامت پوشش بتن روی میلگرد به قطر میلگرد بر رفتار ترک‌خوردگی بتن فوق‌توانمند در کشش اعضای بتن مسلح بررسی شده است. با بررسی رفتار نمونه‌ها پس از مرحله ترک‌خوردگی برای متوسط، حداقل و حداکثر فاصله ترک‌ها روابطی ارائه شده است که نتایج سایر محققان را بهبود داده است و با نتایج حاصل از آزمایش نیز همخوانی بسیار خوبی دارد.

کلمات کلیدی: بتن فوق‌توانمند، مقاومت کششی بتن، مدول الاستیسیته، عضو کششی مسلح.

*نویسنده مسئول: منصور قلعه‌نوی

پست الکترونیکی: ghalehnovi@um.ac.ir

۱- مقدمه

بتن فوق توانمند دسته جدیدی از بتن است که در سال‌های اخیر، با رشد فن‌های تولید مواد سیمانی ریز توسعه یافته است. اگرچه میان گونه‌های مختلف بتن فوق توانمند تفاوت‌هایی در نحوه ساخت، مقدار مقاومت فشاری و سایر مشخصات مکانیکی وجود دارد، اما بین تمامی آن‌ها شباهت‌های کلی قابل تشخیص است. حداکثر اندازه دانه‌ها در این نوع بتن، ۰/۶ میلی‌متر است. مقاومت فشاری بتن فوق توانمند بیشتر از ۱۲۰ مگا پاسکال است و مقاومت خمشی آن حداکثر تا ۵۰ مگا پاسکال می‌رسد. بعلاوه طرح اختلاط این نوع بتن نسبت آب به مواد سیمان بسیار پایینی دارد و میزان روانی آن برای کارا بودن بتن بایستی با فوق روان کننده تأمین شود. در مقایسه با سایر مصالح با پایه سیمان معمولی، مشخصات ساختاری بتن فوق توانمند مانند یکنواختی اندازه ذرات، تخلخل و ساختارهای میکروسکوپی بهبود یافته است. این نوع بتن به دلیل تخلخل و مویبگی کم، تقریباً غیرقابل نفوذ است و همین امر باعث شده است تا بسیاری از ضعف‌های بتن معمولی مانند ضعف در برابر سیکل‌های یخبندان، خوردگی آرماتور و حمله یون‌های کلر در بتن فوق توانمند اصلاح شود [۱].

یکی از کاربردهای بتن فوق توانمند استفاده از این نوع بتن در ناحیه اتصال قطعات پیش‌ساخته برای اجرای سریع پل‌ها است زیرا با توجه به خصوصیات ویژه این نوع بتن، می‌توان طول وصله (طول مهاري فولاد مسلح کننده) را به نحو قابل توجهی کاهش داد. علاوه بر این، با مشخص شدن سایر خصوصیات مؤثر فوق توانمند مانند پیوستگی بین بتن و آرماتورهای مسلح کننده، می‌توان از این نوع بتن در کاربردهای مختلف چون تیرهای اصلی پل‌ها بهره‌جویی نمود. پایداری بسیار بالای آن در برابر یخ‌زدایی بانمک، آن را به‌عنوان یک گزینه مناسب برای استفاده در سطوحی که به‌طور متناوب در معرض یخ‌زدایی بانمک قرار می‌گیرند، معرفی نموده است.

۲- تاریخچه تحقیقات درباره بتن فوق توانمند

Trettin, Korpa [۲] استفاده از سیلیس کلئیدی مصنوعی را در ساخت بتن مقاومت بالا و بتن فوق توانمند مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایشگاهی خاطر نشان می‌کنند، استفاده از سیلیس کلئیدی به همراه خاکستر بادی مزیت بیشتری نسبت به میکروسیلیس دارد. همچنین Rougeau, Borys [۳] از اجزاء پوزولانی دیگری مانند خاکستر بادی، پرکننده‌های ریز سنگ آهکی یا افزودنی‌های آلومیناسیلیکات در ساخت بتن فوق توانمند استفاده کردند.

Graybeal [۴] برای ساخت نمونه‌های بتن فوق توانمند علاوه بر مصرف حجم میکروسیلیس بالا، از حجم سیمان زیادی نیز استفاده کردند. این بتن دارای نسبت آب به سیمان کمتر از ۰/۲ می‌باشد و در آن از افزودنی‌های کاهنده آب (بر پایه پلی‌کربوکسیلات) برای دستیابی به کارایی (اسلامپ) مورد نظر استفاده شده است. در طرح اختلاط این بتن از دانه‌بندی زبر و درشت استفاده نشده است و توسط الیاف‌های فولادی بلند مستقیم با طول ۱۳ میلی‌متر که در حدود ۲ درصد حجم بتن را اشغال می‌کردند، مسلح شده بود. مطالعات متعددی در رابطه با ترکیب، مشخصات مکانیکی و دوام بتن فوق توانمند مطالعات متعددی انجام گرفته است [۵، ۶].

Yazici [۷] تأثیر شرایط عمل‌آوری و افزودنی‌های معدنی با حجم زیاد را بر خصوصیات مکانیکی ترکیبات مختلف بتن فوق توانمند مورد بررسی قرار داد. در این نمونه‌ها سیمان با استفاده از خاکستر بادی با نسبت‌های مختلف جایگزین شده است. همچنین از میکروسیلیس و پودر کوارتز با خصوصیات معین و ثابت در تمام ترکیب‌ها استفاده شده است. در این نمونه‌ها سیمان و میکروسیلیس نقش چسباننده را ایفا می‌کردند، به‌علاوه از بازالت و کوارتز با حداکثر اندازه به ترتیب ۴ و ۰/۱ میلی‌متر نیز استفاده شده است. Baena و همکاران [۱۳] رفتار ترک‌خوردگی و سخت‌شدگی کششی در اعضای کششی مسلح شده با FRP را بررسی کرده‌اند.

۳- اجزاء تشکیل دهنده بتن فوق توانمند

اجزاء تشکیل دهنده بتن فوق توانمند عبارت‌اند از: سیمان پرتلند، میکروسیلیس، پودر کوارتز (گرد کوارتز نیز نامیده می‌شود)، شن، فوق روان کننده و آب. از آنجاکه هریک از اجزاء تشکیل دهنده بتن فوق توانمند، در بهینه کردن ویژگی‌های این نوع بتن مؤثرند، در ادامه به بررسی اثر هر یک از این مصالح پرداخته می‌شود.

۳-۱ سیمان پرتلند

سیمان پرتلند چسباننده‌ای است که مصالح تشکیل دهنده این نوع بتن را به یکدیگر می‌چسباند. سیمان پرتلند عملاً مانع به حداقل رساندن تخلخل می‌گردد زیرا با افزایش آب به مخلوط تخلخل داخلی سیمان افزایش می‌یابد. به همین دلیل در برخی موارد برای بالا بردن چگالی و کاهش تخلخل در بتن فوق توانمند نیاز به اعمال فشار برای عمل‌آوری بتن وجود دارد. اندازه دانه‌های موجود در سیمان دارای قطر میانگین تقریبی $0/015$ میلی‌متر هستند.

۳-۲ میکروسیلیس

چگالی بتن با استفاده از ذرات ریزدانه که به‌خوبی در سرتاسر ماتریکس قرار می‌گیرد، افزایش می‌یابد. ذرات کروی برای به حداکثر رساندن تراکم مخلوط، دارای مشکل هستند در نتیجه عمدتاً از مواد کروی در بتن استفاده نمی‌شود. محققان این مشکل را با استفاده از میکروسیلیس به‌عنوان یکی از اجزاء بتن فوق توانمند، برطرف کردند. میکروسیلیس ریزترین جزء بکار برده شده در بتن فوق توانمند است که قطر آن به اندازه‌ای کوچک است که فضای خالی بین سیمان و پودر کوارتز را پر می‌کند. همچنین، به دلیل شکل کروی ذرات میکروسیلیس، روی هم حرکت کردن سایر اجزای این نوع بتن بهبود یافته و در نتیجه پروسه اختلاط راحت‌تر انجام می‌شود. اجزاء کروی میکروسیلیس منافذ میان اجزاء بزرگ‌تر را پر کرده و سبب افزایش تراکم می‌گردند.

۳-۳ پودر کوارتز

پودر کوارتز یا گرد کوارتز یکی از عناصر اصلی بتن پودری است که نام بتن پودری از آن ناشی می‌شود. پودر کوارتز کریستالی خردشده یک عنصر حیاتی در اختلاط بتن پودری و بتن فوق توانمند به شمار می‌رود که ذرات آن دارای قطر میانگین $0/01$ میلی‌متر هستند. از جمله مزایای استفاده از کوارتز می‌توان به دسترسی آسان و ارزانی آن اشاره کرد. این مصالح یک ماده سخت است که خواص ماتریکس را بهبود می‌بخشد.

۳-۴ شن کوارتز

استفاده از دانه‌بندی درشت در مخلوط بتن فوق توانمند توصیه نشده است بنابراین شن بزرگ‌ترین ذرات موجود در ماتریکس را تشکیل می‌دهد. اندازه ذرات شن بر اساس دستیابی به یک مخلوط همگن بهینه تعیین می‌شود. در بتن فوق توانمند، اندازه ذرات شن به $0/8$ میلی‌متر محدود می‌شود که البته نمی‌تواند از $0/15$ میلی‌متر کمتر شود [۸]. در مرجع دیگری تأکید شده است که شن نرم با اندازه دانه‌های بین $0/15$ تا $0/6$ میلی‌متر، به عنوان بزرگ‌ترین اندازه ذرات بکار رفته در بتن فوق توانمند استفاده شود [۹]. این شن نرم از شن خردشده‌ای که الک می‌شود به دست می‌آید که به آن، شن مصنوعی نیز گفته می‌شود. البته می‌توان شن با اندازه ذرات مورد نظر را از معدن شن طبیعی

نیز به دست آورد. با توجه به این که شن طبیعی غالباً به شکل کروی است و به آب کمتری نیاز دارد، بنابراین نسبت به شن مصنوعی دارای مزیت است [۸]. شن کوارتز دارای مزایایی مانند سختی زیاد و دسترسی آسان است.

۳-۵ فوق روان کننده

یکی از خصوصیات منحصر به فرد بتن فوق توانمند آن است که در اختلاط آن از کمترین مقدار آب استفاده می شود، در نتیجه کارایی (اسلامپ) آن کاهش می یابد. این کاهش کارایی ناشی از به وجود آمدن تعداد زیادی بار الکتریکی اشباع نشده در سطح ذرات سیمان در نتیجه آسیاب کردن است [۱۰]. هنگامی که این بارهای الکتریکی اشباع نشده در تماس با آب قرار گیرند، باعث لخته شدن اجزاء سیمان می گردند که برای جلوگیری از لخته شدن به فوق روان کننده نیاز است. قاعدتاً به علت استفاده از حداقل مقدار آب در اختلاط، مقدار فوق روان کننده مورد نیاز افزایش می یابد.

۴- طرح اختلاط

طرح های اختلاط زیادی برای تهیه بتن فوق توانمند در مراجع مختلف وجود دارد. اگرچه محققان و سازندگان به دنبال نوآوری برای ارائه یک طرح اختلاط بهینه هستند، اجزاء اصلی به کارگیری شده در طرح های اختلاط مشابه هستند. این اجزاء اصلی عبارت اند از سیمان پرتلند، میکروسیلیس، پودر کوارتز، شن کوارتز، فوق روان کننده و آب.

در این تحقیق پس از انجام آزمون فشاری بر روی نمونه های ساخته شده از طرح های اختلاط مختلف، طرح با بیشترین مقاومت فشاری جهت انجام سایر آزمایش ها انتخاب شده است. میزان مصالح مصرفی در این طرح برای ساخت یک مترمکعب بتن در جدول ۱ ارائه شده است.

روند اختلاط در بتن فوق توانمند نسبت به روند اختلاط در بتن معمولی طولانی تر است. برای اختلاط بتن فوق توانمند لازم است ترتیب مشخصی برای اضافه کردن عناصر و زمان معینی برای اختلاط اجزاء به کار گرفته شود. به علاوه، برای تعیین مقدار دقیق هر عنصر، به وسایل اندازه گیری با دقت مطلوب نیاز است. زیرا تغییر در مقدار هر یک از عناصر می تواند تأثیر قابل توجهی بر خصوصیات مکانیکی این نوع بتن داشته باشد. آسان ترین روش برای تهیه و حمل بتن فوق توانمند استفاده از یک مخلوط کننده مرکزی در کارخانه است. با این حال مطالعات مختلف نشان می دهند که در صورت لزوم می توان از تراک میکسر استفاده کرد [۱۱، ۱۲].

عموماً روندهای اختلاط در طرح های مختلف یکسان هستند. ابتدا پودرهای خشک تا زمانی که یک مخلوط همگن به دست آید، با یکدیگر مخلوط می شوند. این بخش می تواند چندین دقیقه به طول انجامد. سپس بخشی از آب و نیمی از فوق روان کننده به اختلاط اضافه می شود. مخلوط کردن تا زمانی ادامه می یابد که مایع کاملاً ترکیب شود. سپس باقی مانده آب و فوق روان کننده به مخلوط اضافه می شود.

جدول ۱: طرح های اختلاط مورد بررسی بر حسب کیلوگرم برای یک مترمکعب

مقدار (کیلوگرم)	مصالح
۶۷۰/۰	سیمان
۲۰۰/۰	میکرو سیلیس
۲۸۵/۰	پودر کوارتز
۱۰۲۰/۰	ماسه سیلیسی
۲۰/۱	فوق روان کننده (۳٪)
۱۷۸/۰	آب (لیتر)

۵- بررسی ویژگی‌های مکانیکی بتن فوق توانمند

ویژگی‌های بتن نظیر مقاومت کششی نمونه استوانه‌ای (مقاومت برزیلی، Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens)، مقاومت کششی نمونه هشتی شکل (briquette tension test)، مدول الاستیسیته بتن و مقاومت فشاری بر اساس استانداردهای مربوط به دست آمده است که در بخش‌های بعدی شرح داده شده است.

۱-۵ آزمون مقاومت کششی نمونه استوانه‌ای (مقاومت کششی آزمون برزیلی)

مقاومت کششی بتن فوق توانمند از طریق روش استاندارد ACTM C496 برای نمونه‌های استوانه‌ای بتن اندازه‌گیری شده است. این آزمون اغلب به نام آزمون تقسیم استوانه یا آزمون برزیلی معرفی می‌شود، در این آزمایش با تحت فشار قرار دادن نمونه از طریق یک خط بار در راستای طولی آن به صورت غیرمستقیم مقاومت کششی نمونه اندازه‌گیری می‌شود (شکل ۱). این نوع بارگذاری سبب ایجاد یک تنش کششی جانبی در سرتاسر نمونه در جهت عمود بر راستای بارگذاری می‌شود این امر سبب می‌شود تا یک میدان تنش کششی نسبتاً یکنواخت در بیش از ۷۵ درصد قطر نمونه استوانه‌ای در امتداد صفحه بارگذاری ایجاد شود و حداکثر تنش کششی در مرکز سیلندر رخ دهد (شکل ۱). بر اساس ASTM C496 تنش کششی حداکثر می‌تواند بر اساس معادله (۱) محاسبه می‌شود.

$$f_{\theta} = \frac{2P}{\pi LD} \quad (1)$$

در این معادله، P بار اعمال شده به سیلندر، L و D به ترتیب طول و قطر نمونه و f_{θ} تنش کششی است. وقتی بتن به مقاومت کششی خود برسد نمونه دچار شکست می‌شود بنابراین، اوج بار حمل شده توسط سیلندر را می‌توان برای تعیین مقاومت کششی از طریق معادله (۱) استفاده نمود. نتایج حاصل از آزمون مقاومت کششی استوانه‌ای در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲: مقاومت کششی حاصل از آزمایش شکافت نمونه‌ها در سنین مختلف

سن نمونه (روز)	مقاومت کششی آزمایش شکافت نمونه (f_{sp}) (مگاپاسکال)	میانگین مقاومت کششی آزمایش شکافت نمونه (f_{sp}) (مگاپاسکال)	انحراف معیار	ضریب پراکندگی
۳	۴/۱۰	۴/۴۶۳	۰/۳۳	۰/۰۷۴
	۴/۳۹			
	۴/۹۰			
۷	۸/۴۶	۸/۱۲۳	۰/۲۸	۰/۰۳۴
	۷/۷۸			
	۸/۱۳			
۱۴	۹/۶۲	۹/۱۵۷	۰/۳۶	۰/۰۳۹
	۸/۷۴			
	۹/۱۱			
۲۸	۱۰/۵۶	۱۰/۶۸	۰/۱۶	۰/۰۱۵
	۱۰/۷۸			
	۱۰/۴۹			
	۱۰/۸۹			

نتایج موجود در جدول بالا نشان می‌دهد که این نوع بتن در سن ۳ روز ۴۰ درصد مقاومت نهایی کششی خود را نشان می‌دهد و برای سن ۱۴ روز به نزدیک ۸۵ درصد مقاومت کششی نهایی خود می‌رسد این رشد سریع مقاومت ناشی از درصد سیمان بالا و واکنش پودری مصالح استفاده شده در ساخت این نوع بتن می‌باشد.

۲-۵ آزمون کششی نمونه هشتی شکل

یکی دیگر از روش‌های تعیین مقاومت کششی بتن آزمون کشش نمونه هشتی شکل (briquette tension test) است. این روش آزمون، در AASHTO T132 شرح داده شده است، به طور معمول شامل آزمون کشش مستقیم از نمونه‌هایی به شکل هشت لاتین از مصالح بدون درشت‌دانه (ملات) است. با توجه به اینکه بتن فوق توانمند دارای دانه‌بندی بسیار ریزی است این آزمون برای به دست آوردن مقاومت کششی مستقیم این نوع بتن مناسب است. نمونه‌های به شکل هشت لاتین (dogbone-shaped) و به طول ۷۶۲ میلی‌متر (۳ in) و ضخامت ۲۵۴ میلی‌متر (۱ in) است. در قسمت میانی سطح مقطع نمونه ۵۰۸ در ۲۵۴ میلی‌متر (۱ in * ۲) بوده و دستگاه آزمون به گونه‌ای طراحی شده است که در این سطح مقطع توزیع بار یکنواخت باشد. آزمون توسط یک دستگاه با ظرفیت کششی ۱۲ کیلو نیوتن انجام شده است (شکل ۲). نتایج حاصل از انجام تست کشش مستقیم بر روی نمونه‌های هشتی شکل در جدول ۳ آورده شده است.



شکل ۲: نمونه و دستگاه آزمون کشش نمونه هشتی شکل



شکل ۱: نمونه و دستگاه آزمون کششی برزیلی

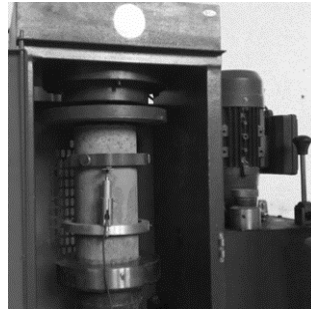
جدول ۳: نتایج حاصل از آزمایش کششی مطابق استاندارد AASHTO T132

ضریب پراکندگی	انحراف معیار	میانگین مقاومت کششی (مگاپاسکال)	مقاومت کششی (مگاپاسکال)
۹/۴			
۱۰/۱			
۹/۸			
۸/۳	۱/۰۲۱	۸/۸	
۷/۸			
۷/۴			

نتایج بدست آمده از آزمایش برای نمونه‌ها با سن ۲۸ روز پراکندگی زیادی از هم دارند که این امر به دلیل کوچک بودن سطح مقطع عضو و حساسیت بالای این نوع بتن می‌باشد. همچنین نتایج بدست آمده از این روش مقدار مقاومت کششی بتن فوق توانمند را حدود ۱۵ درصد کمتر از مقادیر بدست آمده از آزمایشات شکافت (آزمایش برزیلی) نشان می‌دهد با توجه به اینکه در این روش بتن مستقیماً تحت کشش قرار می‌گیرد این کاهش منطقی به نظر می‌رسد.

۳-۵ محاسبه مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته بتن

در این آزمایش دو عدد رینگ در بالا و پایین نمونه قرار می‌گیرد و از حس‌گر اندازه‌گیری جابجایی در راستای عضو برای اندازه‌گیری تغییر شکل محوری نمونه استفاده شده است (شکل ۳). انجام این آزمایش بر اساس استاندارد ASTM C469 انجام شده است. مشخصات مکانیکی این نوع بتن با انجام آزمایش برای بر روی پنج نمونه ساخته شده بر اساس استاندارد مطابق با آزمایش‌های شرح داده شده در بخش‌های بالا به دست آمده است که در جداول ۴ و ۵ مقادیر بدست آمده از آزمایش برای مقاومت فشاری نمونه در سنین مختلف و مدول الاستیسیته بتن برای نمونه‌های مورد آزمایش آورده شده است.



شکل ۳: نمونه و دستگاه آزمون مدول الاستیسیته

جدول ۴: مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین مختلف برحسب مگاپاسکال

ضریب پراکندگی	انحراف معیار	میانگین مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	سن نمونه (روز)
۰/۱۰	۵/۹۱	۵۶/۱۰	۴۹/۲۹	۳
			۶۳/۷۱	
			۹۱/۳۶	
۰/۰۴	۳/۹۷	۹۵/۷۷	۹۴/۹۷	۷
			۱۰۰/۹۸	
			۱۰۳/۳۸	
۰/۰۵	۵/۹۱	۱۱۰/۹۹	۱۱۱/۸۰	۱۴
			۱۱۷/۸۰	
			۱۳۸/۲۴	
۰/۱۳	۱۵/۳۲	۱۲۰/۲۱	۱۳۲/۲۳۱	۲۸
			۱۰۸/۲۰	
			۱۰۲/۱۸	
			۱۰۵/۷۸	
۰/۱۲	۱۵/۶۱	۱۳۱/۳۳	۱۳۲/۲۳	۵۶
			۱۴۰/۶۵	
			۱۴۶/۶۶	

با توجه به جدول ۴ می‌توان دریافت که مقاومت فشاری نمونه‌های بتن فوق‌توانمند در ۷ روز ابتدایی به سرعت رشد نموده است و حتی به میزان ۸۰ درصد مقاومت فشاری ۲۸ روزه نیز رسیده است. این واقعیت می‌تواند ناشی از مقدار زیاد سیمان و میکروسیلیس مورد

استفاده همراه با مقدار کم W/C باشد. رشد مقاومت فشاری نمونه‌های UHPC در سن ۱۴ روزه به ۹۲ درصد بالغ می‌گردد که رشدی بیشتر از بتن‌های معمولی دارد.

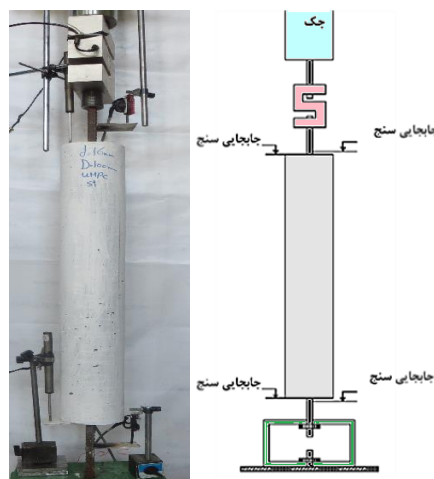
جدول ۵: مدول کشسانی بتن فوق‌توانمند بر اساس نتایج آزمایش‌ها

ضریب پراکنندگی	انحراف معیار	میانگین مدول لاستیسیتیته (مگاپاسکال)	مدول الاستیسیتیته (مگاپاسکال)
۴۰/۹۶			
۴۱/۴۱			
۴۱/۲۵	۰/۱۶۳	۴۱/۱۸	
۴۱/۱۵			
۴۱/۳۲			
۴۱			

۶- تحلیل ترک‌ها در اعضای کششی مسلح شده با میلگرد فولادی

۶-۱ روش آزمایش

نمونه‌ها در شرایط آزمایشگاهی نگهداری شده و پس از بیست و هشت روز عمل‌آوری، تحت آزمایش کششی قرار گرفتند، در این آزمایش میزان سرعت جابجایی جک کششی ۰/۷ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شده است. میزان جابجایی میلگرد و بتن توسط چهار عدد جابجایی سنج با دقت مناسب که در بالا و پایین نمونه بر روی میلگرد و بتن قرار داده شده‌اند، ثبت می‌گردد. میزان نیرو وارد بر نمونه نیز توسط یک دستگاه نیروسنج (load cell) با ظرفیت ۲۰۰ کیلو نیوتن و دقت ۰/۰۱ کیلو نیوتن در هر لحظه ثبت شده و مجموعه داده توسط کارت داده نصب شده بر روی یک دستگاه رایانه جهت آنالیز و بررسی آماده گردیده است (شکل ۴). برای ثبت رفتار ترک‌های به وجود آمده بر روی نمونه مورد آزمایش در لحظات مختلف از نمونه عکس برداری گردیده است تا مراحل گسترش و پیشرفت ترک‌ها به‌خوبی قابل مطالعه و بررسی باشد.



شکل ۴: جزئیات و مشخصات نمونه‌های بتنی مورد آزمایش.

۲-۶ معرفی مشخصات نمونه‌های مورد آزمایش

تعداد ۱۲ نمونه از بتن فوق توانمند و تسلیح فولادی ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفته است. هر نمونه آزمایشگاهی دارای مقطع دایره‌ای است که در مرکز آن یک میلگرد فولادی به عنوان مسلح کننده قرار گرفته است. طول نمونه‌ها ۸۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده و میلگرد تسلیح از دو طرف آن به میزان ۱۵۰ میلی‌متر جهت مهار در دستگاه آزمون کششی خارج شده است. جهت بررسی اثر قطر میلگرد از دو قطر ۱۲ و ۱۶ میلی‌متر شده و برای اعمال اثر ضخامت پوشش بتنی روی میلگرد (نسبت c/d) و نسبت تسلیح (ρ) برای نمونه‌ها، قطرهای ۶۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌متر انتخاب شده است، همچنین برای اعمال تأثیر ویژگی‌های تسلیح نظیر مقاومت و مدول کشسانی بر رفتار سخت شدگی کششی عضو بتنی از دو نوع میلگرد فولادی AIII, AII استفاده شده است.

نام‌گذاری نمونه‌های بتنی به صورت کلی X-Y-M است که در این نام‌گذاری حرف X معرف قطر نمونه بتنی، حرف Y معرف قطر میلگرد تسلیح و حرف M معرف جنس و نوع میلگرد تسلیح است، به عنوان مثال عبارت 100-12-AII معرف نام‌گذاری یک نمونه بتنی به قطر ۱۰۰ میلی‌متر است که با یک میلگرد فولادی به قطر ۱۲ میلی‌متر و از جنس AII در مرکز نمونه مسلح شده است.

در این بخش برای همه نمونه‌ها نیروی پیدایش ترک و محدوده گسترش ترک‌ها آورده شده است و در پایان برای هر نمونه مقادیر فاصله ترک‌ها با هم مقایسه شده است. برای نمونه 100-12-AII اولین ترک در نیروی ۲۴/۶ کیلو نیوتن ایجاد شده است. سایر ترک‌ها در این نمونه در نیروهای ۲۶، ۲۷، ۲۹، ۳۰ و ۳۷ کیلو نیوتن اتفاق افتاده است، گسترش و تولید ترک‌ها تا نیروی ۴۶ تا ۵۰ کیلو نیوتن ادامه داشت، حداقل و حداکثر فاصله ترک‌ها در این نمونه به ترتیب ۴۴ و ۸۹ میلی‌متر است و متوسط فاصله ترک‌ها ۵۰ میلی‌متر است (شکل ۵). در نیروی ۱۵ کیلو نیوتن اولین ترک در نمونه 65-12-AII ایجاد شد و ترک‌های بعدی در نیروهای ۱۷، ۱۹، ۲۰، ۲۳ و ۲۶ کیلو نیوتن، اتفاق می‌افتاد و در فاصله نیروی ۴۰ تا ۴۷ کیلو نیوتن گسترش و بازشدگی ترک‌ها اتفاق افتاده است، برای این نمونه متوسط فاصله ترک‌ها ۵۰ میلی‌متر است.

برای نمونه 150-12-AII در نیروی ۳۵ کیلو نیوتن به یک‌باره تعدادی ترک اتفاق افتاد و بعد از آن با افزایش نیرو در ۴۸ کیلو نیوتن ترک‌های بعدی به وجود آمد، مرحله تولید و گسترش ترک در این نمونه تا نیرو ۵۲ کیلو نیوتن ادامه داشت. در این نمونه حداکثر و حداقل فاصله ترک‌ها به ترتیب ۹۶ و ۱۳۰ میلی‌متر است. متوسط فاصله ترک‌ها برای این نمونه ۱۰۲ میلی‌متر به دست آمده است.



شکل ۵ الف: مقایسه ترک‌های موجود در نمونه‌ها با میلگرد قطر ۱۲ از نوع AII (نیروها برحسب کیلوگرم).



65-12-AII



100-12-AII

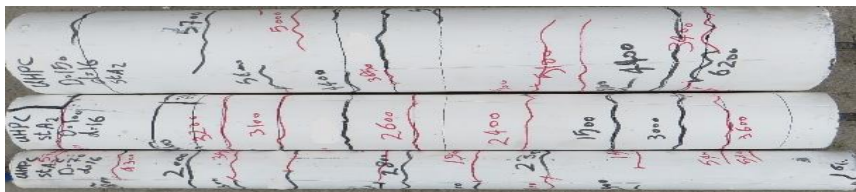


150-12-AII

شکل ۵ ب: نمونه‌ای از بازشدگی ترک در نمونه‌ها.

مطابق شکل ۶ برای نمونه 150-16-AII اولین ترک در ۳۲ کیلو نیوتن ایجاد شد و ترک‌های بعدی در نیروهای ۴۴، ۴۹، ۵۱، ۵۴ و ۶۴ کیلو نیوتن به وجود آمده است، در محدوده نیروهای ۷۰ تا ۷۸ کیلو نیوتن گسترش و بازشدگی ترک رخ داده است و بعد از این نیرو مرحله پایداری ترک اتفاق افتاده است. متوسط فاصله ترک‌ها ۹۰ میلی‌متر است در حالی که حداقل و حداکثر فاصله ترک‌ها در این نمونه به ترتیب ۷۰ و ۱۱۵ میلی‌متر است. برای این نمونه فاصله ترک از لبه‌های نمونه برابر با ۸۰ میلی‌متر است.

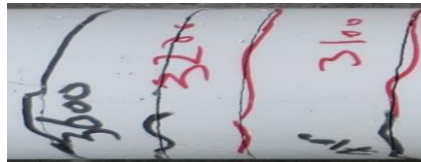
در نیروی ۱۹/۵ کیلو نیوتن اولین ترک برای نمونه 65-16-AII اتفاق افتاد و سپس ترک‌ها بعدی در نیروهای ۲۳، ۲۶، ۲۸، ۳۵ و ۴۰ کیلو نیوتن رخ داد. در محدوده نیروی ۴۳ تا ۵۱ کیلو نیوتن ترک‌ها گسترش یافته و کامل شده‌اند و در نیروی ۶۰ کیلو نیوتن یک ترک کوچک قائم در راستای نمونه ایجاد شد. در این نمونه متوسط فاصله بین ترک‌ها ۶۱ میلی‌متر به دست آمده است در حالی که حداکثر فاصله ترک‌ها ۸۳ میلی‌متر است.



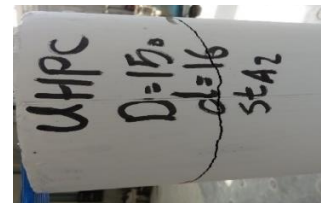
شکل ۶ الف: مقایسه ترک‌های موجود در نمونه‌ها با میلگرد قطر ۱۶ از نوع AII (نیروها بر حسب کیلوگرم)



65-12-AII



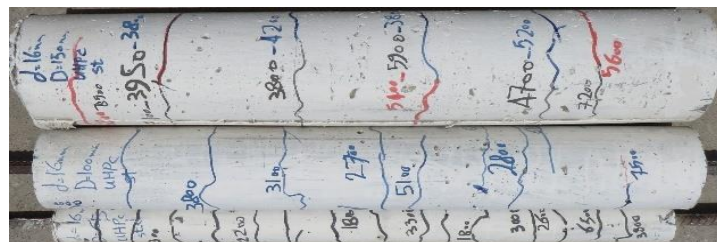
100-16-AII



150-16-AII

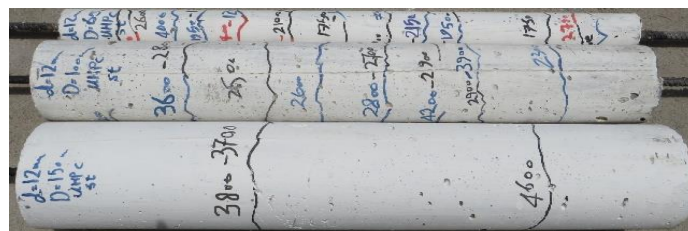
شکل ۶ ب: نمونه‌ای از بازشدگی ترک در نمونه‌ها

شکل ۶ نشان می‌دهد که اولین ترک در نمونه 100-16-AII در نیروی محوری ۲۴/۸ کیلو نیوتن اتفاق افتاده است و ترک‌های بعدی در نیروهای ۲۶، ۳۱، ۳۲، ۳۶ و یک ترک در نیروی ۷۰ کیلو نیوتن اتفاق افتاده است. در محدوده نیروهای ۵۱ تا ۶۸ کیلو نیوتن ترک‌ها گسترش یافته و کامل شده است، در این نمونه در نیروی ۷۳ کیلو نیوتن بازشدگی ترک‌ها به خوبی مشاهده گردیده است. در نیروی ۷۵ کیلو نیوتن در بالای نمونه بین ترک‌های دوم و سوم (یک‌سوم بالای نمونه) در راستای نمونه یک ترک طولی به وجود آمده است. در این نمونه حداقل و حداکثر فاصله به ترتیب ۵۵ و ۸۵ میلی‌متر است که متوسط فاصله ترک‌ها ۶۳ میلی‌متر به دست آمده است.



شکل ۷: مقایسه ترک‌های موجود در نمونه‌ها با میلگرد قطر ۱۶ از نوع AIII (نیروها بر حسب کیلوگرم).

برای نمونه 65-12-AIII اولین ترک در نیروی ۱۷ کیلو نیوتن آغاز شد و تولید و گسترش ترک‌ها تا نیروی ۳۱ کیلو نیوتن ادامه پیدا کرد. برای این نمونه حداقل و حداکثر فاصله ترک به ترتیب ۳۱ و ۸۳ میلی‌متر و متوسط فاصله ترک‌ها ۵۴ میلی‌متر است (شکل ۸). نیروی ترک آغازین برای نمونه 100-12-AIII، ۲۶ کیلو نیوتن است و پیدایش و گسترش ترک‌های بعدی تا نیروی ۳۸ کیلو نیوتن ادامه یافته‌است. حداقل و حداکثر فاصله ترک‌ها در این نمونه به ترتیب ۶۳ و ۱۱۰ میلی‌متر است و متوسط فاصله ترک‌ها ۸۲ میلی‌متر است (شکل ۸). برای نمونه 65-16-AIII در نیروی ۱۸ کیلو نیوتن اولین ترک به وجود آمد. تولید و گسترش ترک‌ها تا نیروی ۵۰ کیلو نیوتن ادامه یافت و در نیروی ۵۳ کیلو نیوتن یک ترک عمودی از آخرین ترک در بالای نمونه منشعب شد. برای این نمونه حداقل و حداکثر فاصله ترک‌ها به ترتیب ۳۵ و ۷۵ میلی‌متر و متوسط فاصله ترک‌ها ۵۷ میلی‌متر است؛ و در نهایت برای نمونه 100-16-AIII اولین ترک در نیروی ۲۷ کیلو نیوتن افتاده است و گسترش ترک‌ها تا نیروی ۷۰ کیلو نیوتن ادامه داشت در این نمونه حداقل و حداکثر فاصله ترک برای این نمونه به ترتیب ۵۸ و ۱۰۹ میلی‌متر است که متوسط فاصله ترک برای این نمونه ۷۹ میلی‌متر است (شکل ۷). برای بررسی بهتر، نتایج آنالیز ترک‌ها که شامل نیروی آغاز ترک خوردگی و متوسط فاصله ترک‌ها است در جدول ۳ آورده شده است.



شکل ۸: مقایسه ترک‌های موجود در نمونه‌ها با میلگرد قطر ۱۲ از نوع AIII (نیروها برحسب کیلوگرم).

بررسی رفتار ترک در نمونه‌های مورد آزمایش نشان می‌دهد که در کلیه نمونه‌ها با افزایش ضخامت پوشش روی میلگرد، نیروی ترک آغازین در نمونه‌ها افزایش یافته است. در نمونه‌های با قطر مشابه افزایش قطر میلگرد که منجر به افزایش درصد تسلیح نمونه می‌شود سبب گردیده است تا نیرویی که باعث ایجاد ترک نخستین در نمونه می‌شود افزایش یابد. از سوی دیگر برای نمونه‌ها با قطر مشابه تغییر نوع میلگرد بر نیروی پیدایش اولین ترک تأثیر کمی داشته است. همچنین افزایش ضخامت پوشش روی میلگردها سبب افزایش متوسط فاصله ترک‌ها و کاهش تعداد ترک‌ها شده است. افزایش درصد تسلیح (افزایش قطر میلگرد) برای نمونه‌ها با قطر مشابه باعث شد تا متوسط فاصله ترک‌ها افزایش یابد. هرچند که مدول کشسانی دو نوع میلگرد AII, AIII باهم تفاوت چندانی ندارد ولی تغییر نوع میلگرد در نمونه‌های مشابه سبب شده است تا میزان متوسط فاصله ترک‌ها به مقدار کمی افزایش پیدا کند.

۷- رابطه سازی برای رفتار ترک خوردگی بتن فوق توانمند در اعضای کششی مسلح

۷-۱ بررسی فواصل حداقل و حداکثر ترک‌ها

در آزمایش کششی نمونه بتن مسلح، نیروی وارده بر میلگرد، به تدریج به وسیله تنش‌های پیوستگی به بتن منتقل می‌شود. با افزایش بار وارده، نیروی کششی انتقال یافته به بتن در یک فاصله معینی از انتهای نمونه به مقاومت کششی بتن رسیده و از آن تجاوز می‌کند در این لحظه یک ترک عرضی در آن محل از نمونه بتنی اتفاق می‌افتد. اگر طول به وجود آمده بین ترک جدید و انتهای نمونه، بزرگ‌تر از فاصله ترک پایدار (فاصله مربوط به آخرین ترک) باشد، همانند وضعیت قبلی ترک‌های جدیدی در نمونه به وجود می‌آید؛ بنابراین نمونه اصلی تبدیل به چندین قطعه با طول‌های متغیر خواهد شد. لذا می‌توان گفت که فاصله به وجود آمده بین ترک‌ها، طبیعتاً کاملاً تصادفی دارند.

نتایج آزمایشگاهی به دست آمده برای حداقل فاصله بین ترکها (S_{min})، حداکثر فاصله بین ترکها (S_{max}) و متوسط فاصله ترکها (S_m) در جدول ۳ ارائه شده است. مقایسه مقادیر حداکثر و حداقل فاصله ترکها با مقدار متوسط فاصله ترکها بیانگر این نکته می‌باشند که فاصله بین ترکها به صورت تصادفی در یک محدوده‌ای بین S_{min} و S_{max} اتفاق می‌افتد. نتایج حاصل از آزمایش نشان می‌دهد که با افزایش متوسط فاصله ترکها، مقادیر حداکثر و حداقل فاصله بین ترکها نیز افزایش می‌یابند. همچنین ملاحظه می‌شود که تغییرات حداکثر فاصله ترکها دارای شیب تندتری نسبت به تغییرات حداقل فاصله ترکها است.

جدول ۳: مقایسه نیروهای عضو بتن مسلح برای آغاز ترک و متوسط فاصله ترکها

شماره	نام نمونه	نیروی آغاز ترک (KN)	حداکثر فاصله ترکها (mm)	حداقل فاصله ترکها (mm)
۱	65-12-AII	۱۵/۰	۸۱	۲۸
۲	65-12-AIII	۱۷/۰	۸۳	۳۱
۳	100-12-AII	۲۴/۶	۸۹	۴۴
۴	100-12-AIII	۲۶/۰	۱۱۰	۶۳
۵	150-12-AII	۳۹/۰	۱۳۰	۹۶
۶	150-12-AIII	۳۹/۵	۱۵۸	۷۵
۷	65-16-AII	۱۹/۵	۸۳	۳۷
۸	65-16-AIII	۱۸/۰	۷۵	۳۵
۹	100-16-AII	۲۴/۸	۸۵	۵۵
۱۰	100-16-AIII	۲۷/۰	۱۰۹	۵۸
۱۱	150-16-AII	۲۴/۰	۱۱۵	۷۰
۱۲	150-16-AIII	۳۸/۰	۱۴۸	۸۱

بر اساس نتایج حاصل از آزمایش به روش کمترین مربعات، روابط زیر (واحد برحسب میلی‌متر) بین حداقل، حداکثر و متوسط فاصله ترکها به دست آمده می‌آید.

$$S_{min} = 0.7864S_m - 4.9687 \quad (۲)$$

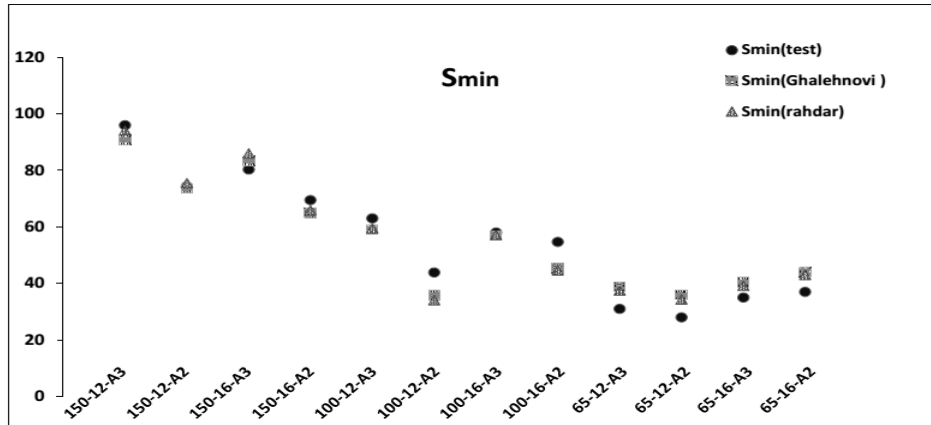
$$S_{max} = 1.0357S_m + 25.347 \quad (۳)$$

قلعه‌نوی و شایان فر [۱۵] با انجام آزمایش برای حداکثر، حداقل و متوسط فاصله ترکها در نمونه‌های کششی مسلح روابط زیر را ارائه داده‌اند.

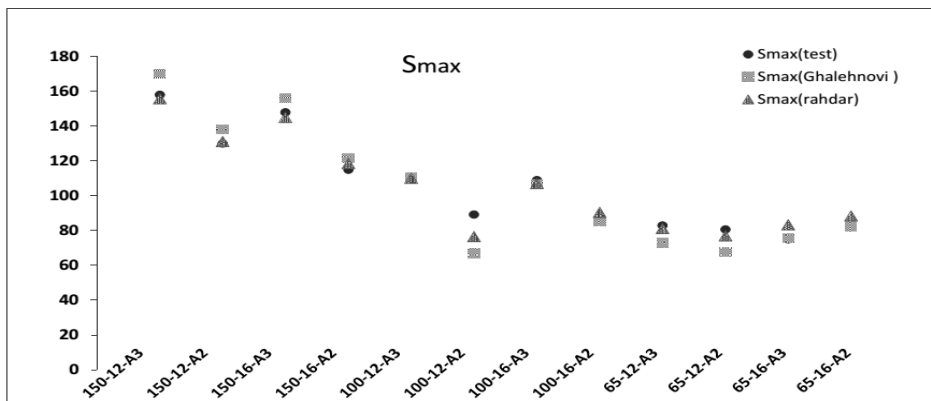
$$S_{min} = 0.72S_m \quad (۴)$$

$$S_{max} = 1.35S_m \quad (۵)$$

در شکل‌های ۹ و ۱۰ مقادیر حاصل از نتایج آزمایشها و روابط ارائه‌شده توسط نگارنده این مقاله و روابط ارائه‌شده توسط قلعه‌نوی و شایان فر مقایسه شده است.



شکل ۹: مقایسه مقادیر حداقل فاصله ترک‌ها به دست آمده از نتایج آزمایش و روابط ارائه شده.



شکل ۱۰: مقایسه مقادیر حداکثر فاصله ترک‌ها به دست آمده از نتایج آزمایش و روابط ارائه شده.

مقایسه نتایج حاصل از آزمایش‌ها و روابط ارائه شده (شکل‌های ۱۰ و ۹) نشان می‌دهد که برای مقادیر حداکثر و حداقل فاصله ترک‌ها روابط ارائه شده در این پژوهش (روابط ۲ و ۳) با نتایج آزمایش همخوانی بهتری دارد، در حالی که مقادیر به دست آمده از روابط ارائه شده توسط قلعه‌نوی برای حداکثر فاصله ترک‌ها در نسبت‌های تسلیح کم مقادیر دست بالاتر و در نسبت‌های تسلیح زیاد مقادیر دست پایین‌تری نسبت به نتایج آزمایش ارائه می‌دهد.

۲-۷ بررسی فاصله متوسط ترک‌ها

با انجام آزمایش بر روی نمونه‌های معرفی شده در بخش‌های قبلی میزان نیروی پیدایش اولین ترک و فواصل ترک‌های مختلف که در طول نمونه در حین انجام آزمایش اتفاق افتاده، اندازه‌گیری شده است و میزان حداقل فاصله ترک، حداکثر فاصله ترک و نیروی پیدایش اولین ترک در جدول ۳ ارائه شده است. متوسط فاصله ترک‌ها از تقسیم طول نمونه بر تعداد ترک‌ها بعلاوه یک بدست آمده است که از تحلیل عددی نتایج به دست آمده در ارتباط با فاصله متوسط ترک‌ها (S_m) می‌توان موارد زیر را عنوان نمود:

- برای نمونه‌ها با قطر میلگرد (d) یکسان هرچه میزان ضخامت پوشش بتن (C) بزرگ‌تر می‌شود (به عبارت دیگر نسبت d/p و c/d بزرگ‌تر باشند)، تعداد ترک‌های عرضی کم‌تر و در نتیجه فاصله ترک‌ها بیشتر می‌شود.
- برای نمونه‌ها با قطر یکسان هرچه قطر میلگرد کوچک‌تر باشد، تعداد ترک‌های عرضی کمتر و در نتیجه فاصله ترک‌ها بیشتر می‌شود.

• برای نمونه‌ها با درصد فولاد یکسان هرچه قطر میلگرد بزرگ‌تر، تعداد ترک‌های عرضی بیشتر و در نتیجه فاصله ترک‌ها کمتر می‌شود.

با استفاده از ملاحظات فوق می‌توان متوسط فاصله ترک‌ها (S_m) را تابعی از اندازه قطر میلگرد (d)، ضخامت پوشش بتنی روی میلگرد (c) و نسبت‌های d/ρ و c/d در نظر گرفت. کمیته اروپایی CEB-FIP [۱۶] برای تعیین فاصله متوسط ترک‌ها رابطه ۶ را ارائه نموده است:

$$S_m = 2C + 0.1 \frac{d}{\rho} \quad (۶)$$

آقایان Rizkalla and Hwang [۱۷] با استفاده از آزمایش‌های انجام شده بر روی قطعات بتن آرمه رابطه (رابطه ۷) زیر را ارائه نموده‌اند:

$$S_m = 5(d - 7.11) + 0.08 \frac{d}{\rho} \quad (۷)$$

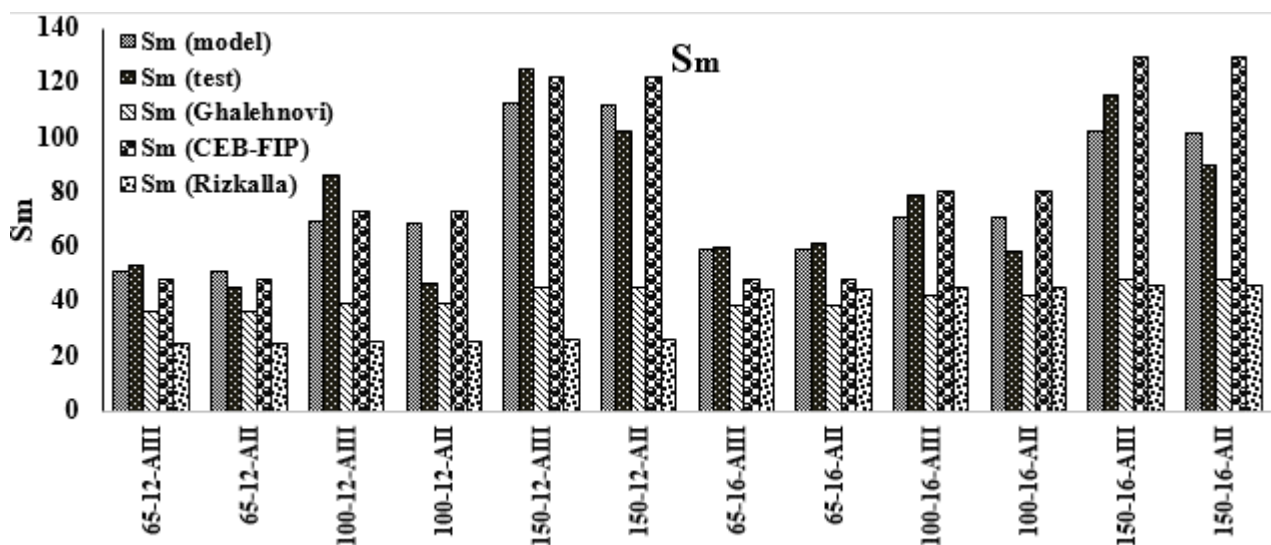
قلعه‌نوی و همکاران [۱۵] نیز با انجام آزمایش بر روی نمونه‌های ساخته شده از بتن C26 برای متوسط فاصله ترک‌ها رابطه زیر را ارائه نموده است:

$$S_m = 0.6(d + 40) + 0.09 \frac{d}{\rho} + 0.21C \quad (۸)$$

در این تحقیق نیز بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های مختلف با روش رگرسیون چند متغیره رابطه ۹ با اعمال تمامی عوامل مؤثر بر متوسط فاصله ترک‌ها ارائه شده است:

$$S_m = 4.434 + 12.238n\rho + 3.811 \frac{d}{\rho} + 0.308C + 1.453d \quad (۹)$$

در شکل ۱۱ نتایج حاصل از آزمایش و روابط ارائه شده جهت مقایسه آورده شده است.



شکل ۱۱: مقایسه مقادیر متوسط فاصله ترک‌ها به‌دست آمده از نتایج آزمایش و روابط ارائه شده.

بررسی نتایج آورده شده در شکل ۱۱ نشان می‌دهد که روابط ارائه شده توسط قلعه‌نوی (رابطه ۸) و Rizkalla and Hwang (رابطه ۷) برای اکثر نمونه‌های مورد آزمایش نتایج بسیار دست پاییی ارائه می‌دهند، این دو رابطه در نسبت‌های تسلیم بالا یعنی جایی که قطر نمونه و ضخامت پوشش بتن کم می‌شود مقداری نزدیک به نتایج ارائه می‌دهند. مقادیر ارائه شده توسط رابطه CEB-FIP با نتایج حاصل از آزمایش به مقدار زیادی همخوانی دارد و به مقدار کمی برای نسبت‌های تسلیم کم (ضخامت پوشش بتن زیاد) مقادیر دست بالا و برای نسبت‌های تسلیم زیاد (ضخامت پوشش بتن کم) مقادیر دست پایین ارائه می‌دهد. رابطه ارائه شده توسط این پژوهش (رابطه ۹) بر نتایج حاصل از آزمایش انطباق بسیار خوبی دارد به گونه‌ای که در نسبت‌های تسلیم بالا (ضخامت پوشش بتن کم) بر نتایج حاصل از آزمایش منطبق است و در نسبت‌های تسلیم کم (ضخامت پوشش بتن بالا) اختلاف مقادیر به دست آمده با نتایج نسبت به سایر روابط کمتر و قابل صرف نظر کردن است.

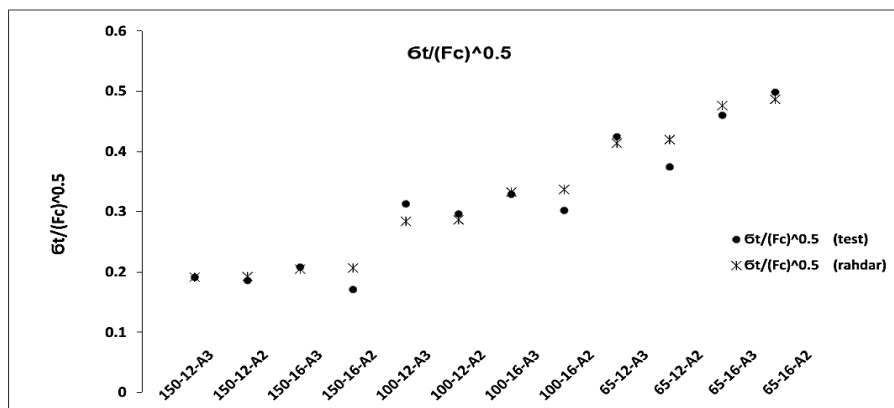
۳-۷ بررسی تنش کششی پیدایش ترک

در فرآیند انجام آزمایش با افزایش نیرو در عضو، تنش‌ها توسط پیوستگی بتن و میلگرد از میلگرد به بتن منتقل می‌شود و در محل‌هایی که تنش موجود در بتن به مقاومت کششی بتن برسد ترک اتفاق می‌افتد و سبب باز توزیع نیرو در عضو می‌گردد این فرآیند تا مرحله پایداری ترک ادامه پیدا می‌کند. از آنجایی که در مراجع مختلف تنش کششی بتن را مضربی از $\sqrt{f_c}$ تعریف می‌نمایند با توجه به مقادیر نیروی پیدایش ترک آغازین در جدول ۳ به روش رگرسیون چند متغیره یک رابطه (رابطه ۱۰) برای نسبت تنش کششی پیدایش اولین ترک به جذر مقاومت فشاری بتن بر اساس پارامترهای تأثیرگذار بر آن ارائه شده است.

$$\frac{f_t}{\sqrt{f_c}} = -0.367 + 0.390n\rho + 0.409 C/d - 0.0818 d/\rho \quad (10)$$

در این رابطه‌ها n نسبت مدول الاستیسیته بتن به مدول الاستیسیته فولاد، ρ نسبت تسلیم، d قطر میلگرد و C ضخامت پوشش بتن روی میلگرد (کاور) است.

در شکل ۱۲ مقادیر حاصل از آزمایش و داده‌های به دست آمده از رابطه با هم مقایسه شده است. بررسی شکل ۱۲ نشان می‌دهد که رابطه ارائه با نتایج آزمایش‌ها همخوانی بسیار خوبی دارد.



شکل ۱۲: مقایسه مقادیر نیروی پیدایش ترک به دست آمده از نتایج آزمایش و رابطه ارائه شده.

۸- نتیجه گیری

در این تحقیق ویژگی‌های بتن فوق توانمند و رفتار ترک‌خوردگی نمونه‌های کششی مسلح با انجام آزمایش مورد مطالعه قرار گرفت. برای بررسی ویژگی‌های مکانیکی این نوع بتن با انجام ۳۶ آزمایش مطابق استانداردهای ارائه شده ویژگی‌های مکانیکی بتن مورد نظر به دست آمده است، از سوی دیگر در این تحقیق با انجام آزمایش کشش مستقیم بر روی ۱۲ نمونه بتنی با مقطع دایره‌ای به طول ۸۵۰ میلی‌متر ساخته شده از بتن فوق توانمند که با یک عدد میلگرد در مرکز نمونه مسلح شده است، رفتار ترک‌خوردگی این نوع بتن را بررسی کرده است. برای انجام آزمایش‌ها سرعت جابجایی جک کششی ۰/۷ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شد و میزان جابجایی‌ها و نیروهای وارد شده بر نمونه در هر لحظه ثبت شد. بر اساس اطلاعات به دست آمده از انجام آزمایش‌ها نتایج زیر حاصل شده است:

- در مرحله پایداری ترک، متوسط فاصله ترک‌ها برای نمونه‌های دارای میلگرد نوع AII نسبت به نمونه‌های دارای میلگرد نوع AIII کمتر است که این موضوع سبب می‌شود تا تعداد ترک‌ها در نمونه‌های دارای میلگرد نوع AII نسبت به نمونه‌های دارای میلگرد نوع AIII بیشتر شود که این افزایش تعداد ترک‌ها باعث افت بیشتر میزان اثر سخت شدگی کششی در این نمونه‌ها می‌شود. همچنین افزایش نسبت c/d منجر به افزایش نیروی موردنیاز برای آغاز مرحله ترک‌خوردگی می‌شود.
- برای نمونه‌ها با قطر میلگرد (d) یکسان هرچه میزان ضخامت پوشش بتن (C) بزرگ‌تر می‌شود (به عبارت دیگر نسبت c/d و d/p بزرگ‌تر باشند)، تعداد ترک‌های عرضی کم‌تر و در نتیجه فاصله ترک‌ها بیشتر می‌شود.
- برای نمونه‌ها با قطر یکسان هرچه قطر میلگرد کوچک‌تر باشد، تعداد ترک‌های عرضی کم‌تر و در نتیجه فاصله ترک‌ها بیشتر می‌شود.
- برای نمونه‌ها با درصد فولاد یکسان هرچه قطر میلگرد بزرگ‌تر، تعداد ترک‌های عرضی بیشتر و در نتیجه فاصله ترک‌ها کم‌تر می‌شود.
- رابطه ارائه شده برای متوسط فاصله ترک‌ها با رابطه ارائه شده از سوی کمیته اروپایی CEB-FIP همخوانی بسیار خوبی دارد و بر نتایج حاصل از آزمایش منطبق است.
- روابط ارائه شده برای حداقل و حداکثر فاصله ترک‌ها در بتن با نتایج حاصل از آزمایش و روابط پیشنهادی سایر محققان همخوانی بسیار خوبی دارد.
- رابطه پیشنهادی برای نسبت تنش کششی پیدایش اولین ترک به جذر مقاومت فشاری بتن توسط این پژوهش با دقت بسیار خوبی نیروی اولین ترک‌خوردگی در نمونه را محاسبه می‌نماید. متوسط نسبت $f_t/V(f_c)$ برای داده‌های حاصل از آزمایش ۰/۳۱۳ و برای داده‌های بدست آمده از رابطه پیشنهادی ۰/۳۲۳ می‌باشد که با مقدار ۰/۳۳ که توسط که توسط ACI224 ارائه شده است نزدیکی بسیار خوبی دارد.

مراجع

- [۱] رمضانیان پور، ع.ا.؛ فیروز مکان، ش. و عبادی، ت.؛ «بررسی اثر محلول کلونیدی نانو سیلیس بر خواص ملات»؛ ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، ۶ و ۷ اردیبهشت، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.
- [2] Korpa, A., and Trettin, R.; "The Use of Synthetic Colloidal Silica Dispersions for Making High Performance and Ultra High Performance Systems (HPC/UHPC)"; *International symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, September 13-15(2004) 155-164.
- [3] Rougeau, P., and Borys, B.; "Ultra High Performance Concrete with Ultrafine Particles Other Than Silica fume in; Ultra High Performance Concrete"; *International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel University Press, Kassel, Germany, September 13-15(2004) 213-225.
- [4] Graybeal, B.; "Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete"; *Federal Highway Administration*, Publication No. FHWA-HRT-06, No.103. (2006)

- [5] Fehling, E., Bunje, K., and Leutbecher, T.; "Design Relevant Properties of Hardened Ultra High Performance Concrete"; *Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel University Press, Kassel, Germany (2004) 327-338.
- [6] Droll K.; "Influence of Additions on Ultra High Performance Concretes – Grain Size Optimization"; *Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel University Press, Kassel, Germany, September 13-15(2004) 285-301.
- [7] Yazici, H.; "The Effect of Curing Conditions on Compressive Strength of Ultra High Strength Concrete with High Volume Mineral Admixtures"; *Building and Environment* 42, No. 5 (2007) 2083-2089.
- [8] Richard, P., and Cheyrezy, M.; "Composition of Reactive Powder Concretes"; *Cement and Concrete Research* 25, No. 7, Oct (1995) 1501-1511.
- [9] Graybeal, B., and Tanesi, J.; "Durability of an Ultrahigh-Performance Concrete"; *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE* 19, No. 10 (2007) 848-854.
- [10] Aïtcin, P. C., Lachemi, M., Adeline, R., and Richard, P.; "The Sherbrook Reactive Powder Concrete Footbridge"; *Structural Engineering International (IABSE)* 8, No.2 (1998) 140-144.
- [11] Bonneau, O., Lachemi, M., Dallaire, E., Dugat, J., and Aïtcin, P.; "Mechanical Properties and Durability of Two Industrial Reactive Powder Concretes"; *ACI Materials Journal* 94, No. 4 (1997) 286-290.
- [12] Bonneau, O., Poulin, C., Dugat, J., Richard, P., and Aïtcin, P. C.; "Reactive Powder Concretes: From Theory to Practice"; *Concrete International*, April (1996) 47-49.
- [13] Baena, M., Torres, L., Turon, A., and Miàs, C.; "Analysis of cracking behavior and tension stiffening in FRP reinforced concrete tensile elements"; *Composites Part B: Engineering* 45, No. 1 (2013) 1360-1367
- [14] CEB-FIP, *CEB-FIP Model Code 1990 for Concrete Structures*, Committee Euro- International du Beton and Federation International de la Precontrainte, Thomas Telford, London (1993).
- [15] Shayanfar, M.A., Ghalehnavi, M. and Safiey, A.; "Corrosion effects on tension stiffening behavior of reinforced concrete"; *Computers and Concrete; An International Journal* 4, No. 5 (2007) 45-70.
- [16] Rizkalla, S.H. and Hwang, L.S.; "Crack Prediction for Members in Uniaxial Tension"; *ACI J.* 81, No. 11 (1984) 572-579.