



بررسی تاثیر پذیری نمودار تنش- کرنش از خواص رئولوژیکی بتن های خود تراکم الیافی

رضا فرخ زاد*، فرنام گروه ای

گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۱۶

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۷/۰۲

پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۷

ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۳/۰۸

کلمات کلیدی:

بتن خودتراکم

الیاف

رفتار رئولوژی

رئومتر

خواص مکانیکی

خلاصه: در بتن خودتراکم الیافی، از یک سو الیاف و از سوی دیگر خواصی مانند قابلیت پرمکنندگی، سبب ایجاد مخلوطی همگن می گردد. در این پژوهش ۱۰ طرح اختلاط مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته که یک طرح آن برای نمونه شاهد و ۹ طرح دیگر شامل درصد های حجمی ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، الیافهایی از نوع فولادی، ماکروسنستیک تک رشته ای (MEX ۱۰۰) و کربن پلیمری تقویت شده (CFRP) می باشد. در این تحقیق رفتار رئولوژی بتن تازه خود تراکم به کمک آزمایش رئومتر و همچنین آزمایش های متداول تعیین خواص خودتراکمی بتن تازه که شامل آزمایش های جریان اسلامپ، حلقه J، جعبه L، جعبه U، قیف V می شود بررسی گردید. در ادامه نیز مدل رفتاری بتن سخت شده بر اساس آزمایش های تعیین خواص مکانیکی (مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته) تحلیل شده است. نتایج این تحقیق نشان می دهد که افزودن الیاف به بتن تازه سبب کاهش خواص خود تراکمی و رئولوژیکی بتن می گردد و همچنین با افزایش درصد های حجمی الیاف این تاثیر بیشتر نمایان می گردد بطوری که زیادترین تاثیر را می توان در طرح های حاوی الیاف CFRP مشاهده کرد. نتایج مربوط به خواص مکانیکی بتن سخت شده نیز نشان دهنده آن است که افزودن الیاف ها با مقادیر پایین به بتن خودتراکم سبب بهبود برخی از این خواص می گردد ولی استفاده از مقادیر بالای الیاف سبب افزایش شکل پذیری و در نتیجه کاهش مقادیر مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته در بتن های خود تراکم می گردد.

۱- مقدمه

تنش - کرنش تاثیرات گذار بوده و همچنین با افزودن این الیاف به بتن ویژگی های مهندسی ملات و بتن به ویژه چگرمگی (سختی) و مقادیر مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت خستگی افزایش یافتند [۳]. در سال ۲۰۰۶ Ponkiewski به بررسی تاثیر انواع الیاف فولادی بر خواص مکانیکی و رئولوژیکی بتن خود تراکم پرداخت. در این تحقیق خواص رئولوژیکی بتن به کمک آزمایش رئومتر و پارامترهای حد جاری شدن و ویسکوزیته پلاستیک بررسی شده و خواص مکانیکی بتن به کمک آزمایش مقاومت فشاری سنجیده شد. براساس نتایج حاصل از این تحقیق افزودن این الیاف سبب ضعیف تر شدن عملکرد بتن تازه و افزایش مقاومت فشاری بتن سخت شده خودتراکم گردید [۴]. در سال ۲۰۰۸ Babu و همکاران به بررسی ویژگی های مکانیکی و رفتار تنش - کرنش بتن های خود تراکم حاوی الیاف شیشه پرداختند. در این تحقیق نسبت اختلاط برای مقاومت بتن خود تراکم براساس روش نان سو و نسبت های دقیق آن به کمک روش اوکامورا تنظیم گردید. براساس نتایج حاصل شده از این مقاله افزودن الیاف شیشه به بتن خود تراکم تاثیر زیادی بر روی خواص خودتراکمی

بتن خود تراکم برای اولین بار در اواخر دهه ۸۰ میلادی در کشور ژاپن به علت وجود مشکلاتی چون ضعف های اجرایی و کافی نبودن کارگران ماهر به منظور دستیابی به بتنی با قابلیت دوام، کارایی و عمر مفید مناسب مورد توسعه قرار گرفت. اولین مدل ساخته شده از این بتن در سال ۱۹۸۸ میلادی در کشور ژاپن تکمیل و مورد استفاده قرار گرفت [۱] اولین تحقیقات انجام شده برای بتن های الیافی نیز در اواخر دهه ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ میلادی به کمک الیاف فولادی انجام گرفت که نشانگر اولین گام برای تولید و ساخت بتن مسلح با الیاف بود ولی هر چند که مجوز رسمی برای بتن های مسلح با الیاف از ابتدای قرن بیستم صادر گردید و در طی این چهار دهه جنس و اشکال الیاف و نحوه ساخت بتن الیافی بهبود یافت و کاربرد آن بیشتر گردید [۲]. در سال ۱۹۹۹ Nataraja و همکاران به بررسی نمودارهای تنش - کرنش بتن های حاوی الیاف فولادی پرداختند. براساس نتایج حاصل از این آزمایش افزودن الیاف به بتن در برخی از پارامتر های اصلی منحنی

* نویسنده عهده دار مکاتبات: R.farokhzad@qiau.ac.ir



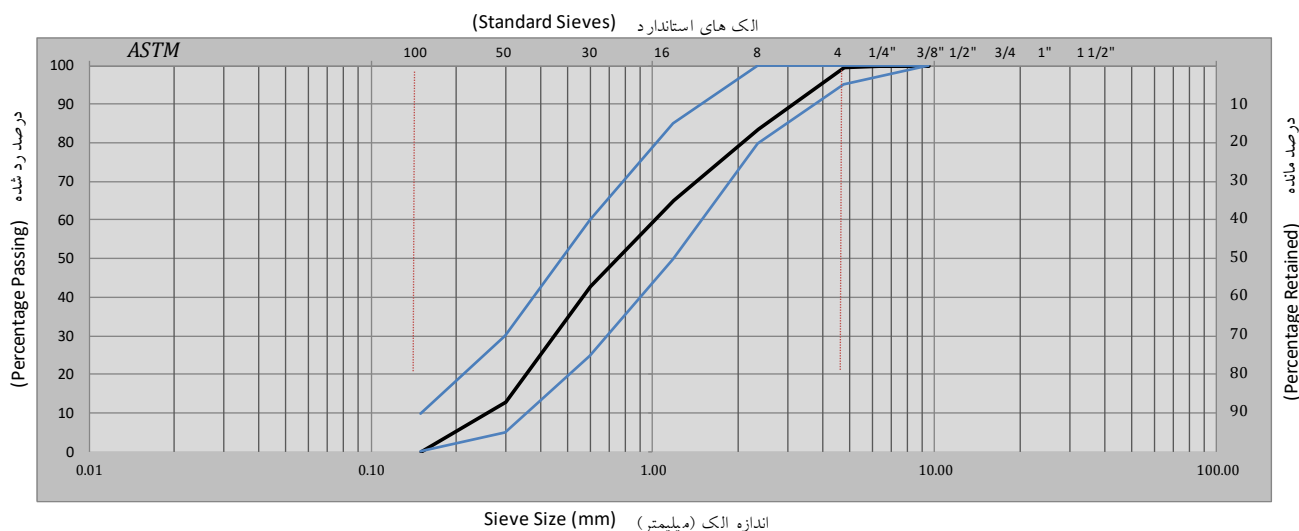
بتن نگذاشت در حالیکه سبب افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه، افزایش مقاومت کششی و مقاومت خمشی بتن گردید [۵]. در سال ۲۰۱۲ Wang و همکاران خواص مکانیکی و عملکرد بتن های الیافی ترکیبی که شامل الیاف های فولادی و پلی پروپیلن می باشد را مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج حاصل شده از این تحقیق الیاف فولادی سبب افزایش مقاومت فشاری، خمشی، کششی و بهبود مقاومت بتن در برابر ضربه و ترک می گردد در حالیکه الیاف های پلی پروپیلن به علت داشتن طول کم و مدول الاستیسیته پایین مقاومت فشاری کمتری را نسبت به بتن معمولی حاصل کرد. [6] در سال ۲۰۱۴ Khaloo و همکاران به بررسی خواص رئولوژیکی و مکانیکی بتن خود تراکم حاوی الیاف فولادی پرداختند. بر اساس نتایج بدست آمده از این تحقیق افزودن الیاف فولادی سبب کاهش کارایی بتن خود تراکم گشته و مقاومت فشاری بتن را نیز کاهش می دهد. همچنین استفاده از درصد های بالای این الیاف به خصوص ۲ درصد آن سبب می شود که کارایی بتن از حداقل مقدار تعیین شده توسط استاندارد افنارک نیز پایین تر بیاید [۷]. در سال ۲۰۱۴ Long و همکاران به بررسی خواص مکانیکی بتن خود تراکم حاوی الیاف های فولادی، پلی پروپیلن و پلی اتیلن پرداختند. بر اساس نتایج بدست آمده از این تحقیق مقادیر جریان اسلامپ برای بتن های خود تراکم حاوی الیاف پلی پروپیلن و الیاف پلی اتیلن با کاهش روبرو شد. همچنین مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن در نمونه های حاوی الیاف پلی پروپیلن و الیاف پلی اتیلن کاهش پیدا کرد ولی نمونه دارای الیاف فولادی سبب افزایش و بهبود مقاومت فشاری بتن گردید [۸]. در سال ۲۰۱۶ Yehia و همکاران به بررسی خواص مکانیکی و دوامی بتن های الیافی خود تراکم پرداختند. در این تحقیق از الیاف های فولادی و سنتتیک استفاده شد. نتایج نشان داد که تمامی مخلوط های بتنی که حاوی الیاف فولادی و سنتتیک بودند به ویژگی های خودتراکمی مناسبی رسیدند. ولی در این تحقیق الیاف مصنوعی قابلیت عبور بتن خودتراکم را در مقایسه با الیاف فولادی در نسبت حجمی مشابه بیشتر دچار کاهش کرد. همچنین نتایج حاصل از آزمایشات بتن سخت شده نشان داد که افزودن الیاف موجب بهبود ویژگی های مکانیکی و بهبود فرآیند هیدراتاسیون در بتن می شود [۹]. در سال ۱۳۹۶ Golpasand و Turkuon به بررسی رفتار تنش - کرنش بتن های الیافی و تاثیر الیاف فولادی بر روی خواص مکانیکی بتن پرداختند. بعد از تحلیل نتایج مشخص گردید که الیاف فولادی تاثیر مثبتی در افزایش مقاومت فشاری، کششی و چقرمگی بتن داشته و در نتایج مربوط به تنش - کرنش نیز منحنی های تنش - کرنش مقاومت فشاری با افزایش الیاف کرنش بتن نسبت به بتن

شاهد افزایش یافته و همچنین در منحنی های تنش - کرنش مقاومت کششی با افزایش الیاف هم تنش و هم کرنش نمونه ها افزایش پیدا کرد [۱۰]. در سال ۲۰۱۷ Tabatabaeian و همکاران به بررسی اثرات الیاف های فولادی، پلی پروپیلن و ترکیب این دو الیاف بر خواص رئولوژیکی، مکانیکی و دوامی بتن خود تراکم پرداختند. براساس نتایج بدست آمده از این تحقیق در آزمایشات رئولوژی بتن الیاف پلی پروپیلن بیشتر از الیاف فولادی سبب کاهش مقادیر می گردد. در آزمایشات بتن سخت شده نیز الیاف فولادی در مقایسه با نمونه شاهد سبب بهبود خواص مکانیکی بتن می گردد در حالیکه الیاف پلی پروپیلن سبب کاهش مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مدول گسیختگی و مقاومت خمشی نمونه های بتن خودتراکم گردید [۱۱]. در سال ۲۰۱۹ Güneysisi و همکاران به بررسی خواص تازه و رئولوژیکی بتن خود تراکم تقویت شده با الیاف شیشه که حاوی پوزولان های نانوسیلیس و خاکستر بادی می باشد پرداختند. بر اساس نتایج بدست آمده از این تحقیق با افزایش درصد حجم الیاف کارایی بتن تحت تاثیر قرار می گیرد بطوری که قطر جریان اسلامپ کاهش پیدا کرده و افزایش زمان در آزمایشات جریان اسلامپ T50 و قیف V مشهود می باشد. با توجه به نتایج حاصل شده از آزمایش رئومتر نیز افزایش درصد الیاف شیشه و همچنین افزایش مقدار نانوسیلیس سبب افزایش مقادیر گشتاور بتن خود تراکم می شود [۱۲]. در سال ۲۰۲۰ Mastali و همکاران به بررسی اثرات الیاف کربن پلیمری تقویت شده (CFRP) و الیاف شیشه پلیمری تقویت شده (GFRP) بر روی خواص بتن تازه و سخت شده خود تراکم پرداختند. براساس نتایج بدست آمده از این تحقیق با افزایش درصد و طول در هر دو نوع الیاف مقادیر قطر جریان اسلامپ با کاهش روبرو شده و در نتیجه منجر به کاهش کارایی بتن خود تراکم تازه گردید که این کاهش در بتن های خود تراکم حاوی الیاف GFRP بیشتر می باشد. براساس نتایج بدست آمده از آزمایشات بتن سخت شده نیز این الیاف ها تاثیر مستقیمی بر روی افزایش یا کاهش مقاومت فشاری بتن خود تراکم ندارند ولی در مقایسه بین دو الیاف، الیاف CFRP مقاومت فشاری بیشتری نسبت به الیاف GFRP داشت [۱۳]. در سال ۲۰۲۰ Jonbi و همکاران به مقایسه خواص مکانیکی بتن های خود تراکم حاوی الیاف فولادی و الیاف کربن پرداختند. براساس نتایج بدست آمده از این تحقیق افزودن الیاف کربن به بتن خود تراکم سبب کاهش خواص خود تراکمی بتن تازه گردیده و همچنین مقاومت فشاری بتن خود تراکم سخت شده را نیز در مقایسه با نمونه مرجع کاهش می دهد، بطور کلی مطابق با نتایج حاصل شده از این تحقیق الیاف کربن برای بتن خود تراکم مناسب

جدول ۱. مشخصات فیزیکی سنگدانه ها

Table 1. Physical properties of aggregate

نوع سنگدانه	حداکثر قطر سنگدانه	چگالی	درصد جذب آب	مدول نرمی
ریز دانه	۴/۷۵ mm	۲/۵۸ gr/cm ³	% ۱/۸۸	۲/۹۶
درشت دانه	۱۹ mm	۲/۵۱ gr/cm ³	% ۱/۶۸	-



شکل ۱. منحنی دانه بندی ماسه مطابق با استاندارد ASTM

Fig. 1. Sieve analysis of sand according to ASTM C33

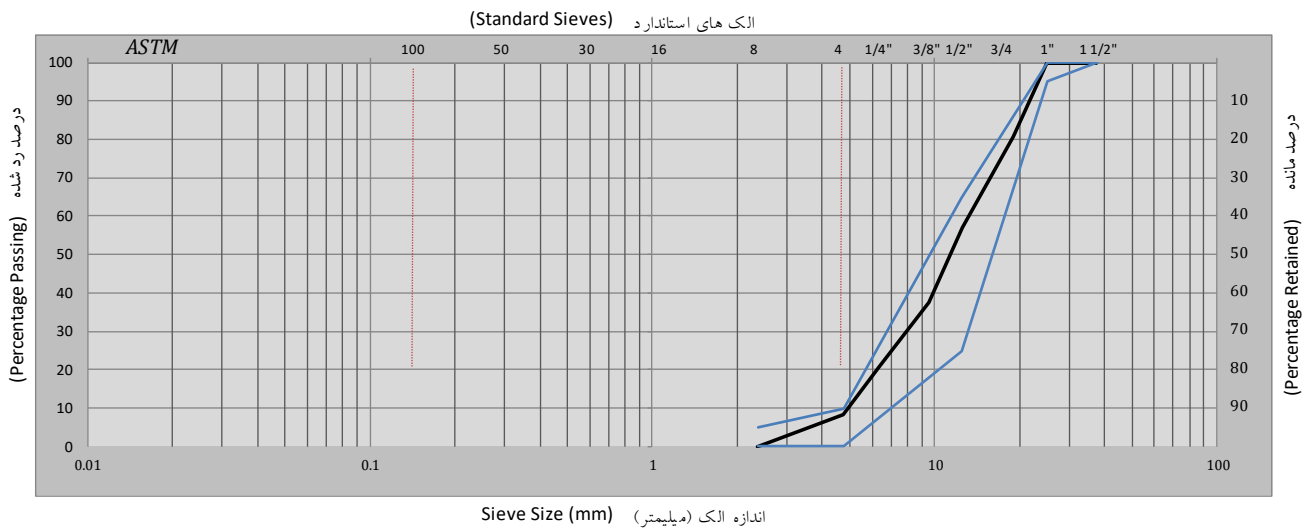
۲- برنامه های آزمایشگاهی

۲-۱- مواد و مصالح مورد استفاده

مصالح ریزدانه مصرفی در این تحقیق از نوع ماسه دو بار شور رودخانه ای بوده و مصالح درشت دانه مصرفی از نوع شن نخودی شکسته می باشد و همچنین فیلر مورد استفاده در این تحقیق از نوع پودر سنگ آهکی حریر شده می باشد که از یکی از معادن استان قزوین تهیه شده است [۱۷].

یکی از آزمایش های مهم به منظور تعیین بزرگترین اندازه سنگدانه ها و همچنین نحوه توزیع سنگدانه ها در اندازه های گوناگون جهت مقایسه و تطبیق با منحنی های استاندارد آزمایش دانه بندی می باشد. در جدول ۱ مشخصات فیزیکی سنگدانه ها آورده شده است، منحنی های دانه بندی ماسه و شن به ترتیب در شکل های ۱ و ۲ نشان داده شده است که مطابق با

نمی باشد ولی الیاف فولادی مقاومت فشاری بتن را افزایش می دهد [۱۴]. بررسی استفاده از الیاف های ماکروسنتتیک تک رشته ای (MEX) و کربن پلیمری تقویت شده (CFRP) بر بتن های خودتراکم با تکیه بر خواص رئولوژیکی (مشخصاً دستگاه رئومتر) تاکنون در تحقیقات گذشته کمتر مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است [۱۵، ۱۶]. این تحقیق به بررسی تاثیر انواع الیاف های نوین بر مدل رفتاری بتن خودتراکم سخت شده براساس آزمایش های تعیین خواص مکانیکی (مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته) و بررسی رفتار رئولوژی بتن تازه خودتراکم به کمک آزمایش نوین رئومتر و همچنین آزمایش های متداول تعیین خواص خودتراکمی بتن تازه که شامل آزمایش های جریان اسلامپ، حلقه J، جعبه L، جعبه U، قیف V می شود، می پردازد.



شکل ۲. منحنی دانه بندی شن مطابق با استاندارد ASTM

Fig. 2. Sieve analysis of gravel according to ASTM C33

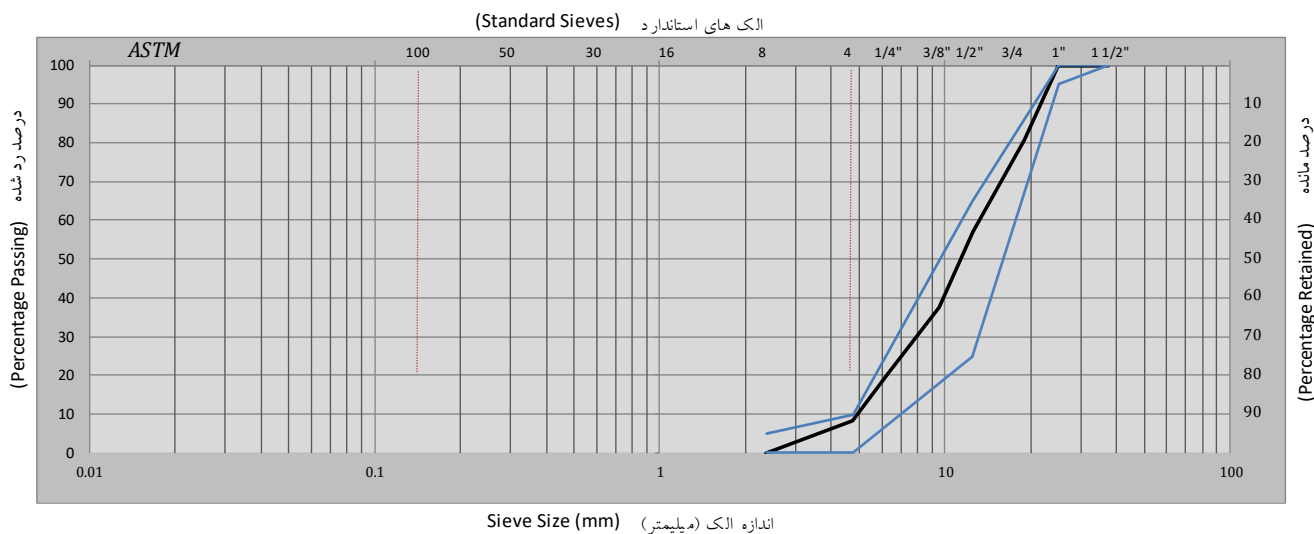
جدول ۲. مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند تیپ ۲

Table 2. Chimecal properties of cement (type 2)

نوع اکسید	میزان اکسید (درصد)
CaO	۶۲/۲۸
SiO ₂	۲۰/۷۹
Al ₂ O ₃	۴/۷۶
Fe ₂ O ₃	۳/۸۶
MgO	۳/۲۲
SO ₃	۱/۸۹
Na ₂ O+K ₂ O	۱/۰۵

تک رشته ای (MEX 100) و کربن پلیمری تقویت شده (CFRP) می باشد. الیاف CFRP استفاده شده بصورت ورقه ای می باشد که با طول های ۲۰ میلی متر برش داده شده و بصورت چاپد (خرد شده) بکار گرفته شدند. تصویر ظاهری الیاف ها در شکل ۳ و خواص فیزیکی آنها در جدول ۳ آورده شده است.

استاندارد ASTM C33 [15] در محدوده استاندارد ذکر شده قرار دارند. سیمان مورد استفاده جهت ساخت نمونه ها در این تحقیق از نوع سیمان پرتلند نوع دو می باشد که مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن به ترتیب در جدول ۲ آورده شده است. الیاف های مصرفی در این تحقیق شامل سه نوع فولادی، ماکروسنتتیک



شکل ۳. تصویر ظاهری الیاف های مصرفی

Fig. 3. Schematics of used fibers

جدول ۳. خواص فیزیکی الیاف های مصرفی

Table 3. Physical properties of fiber

رنگ	نقطه ذوب (°C)	چگالی (گرم/سانتی متر مکعب)	مقاومت کششی (مگاپاسکال)	ضخامت (میلی متر)	طول (میلی متر)	نوع الیاف
طوسی	۱۵۱۶	۷/۸	۱۱۰۰	۰/۸	۵۰	فولادی
طوسی	۱۶۰	۰/۹۱	۶۹۰	۰/۵	۵۴	MEX 100
مشکی	-	۱/۷۸	۴۱۰۰	۰/۱۲	۲۰	CFRP

، ماکروستتیک تک رشته ای (MEX 100) و کربن پلیمری تقویت شده (CFRP) می باشد. در این تحقیق پس از آزمون و خطا های متعددی که به منظور دستیابی به بتن خودتراکم الیافی که کارایی مناسب توصیه شده توسط استاندارد EFNARC [۲۰] را دارا باشد طرح اختلاط جدول ۵ بدست آمد. نحوه اختلاط مصالح در این تحقیق که مطابق استاندارد ASTM C192 [۲۱] انجام شده است به این صورت می باشد که مصالح مورد نظر را به کمک ترازو وزن کرده و در ابتدا مصالح سنگی (شن و ماسه) را داخل میکسر ریخته و به مدت ۳۰ ثانیه با هم مخلوط می شوند. سپس سیمان و فیلر (پودر سنگ) را به مخلوط اضافه کرده و به مدت ۱ دقیقه

در این تحقیق از افزودنی فوق روان کننده بر پایه پلی کربکسیلات شرکت آرا بتن به نام DEGASET AX 5909 استفاده شد که با استاندارد های ASTM C494 [18] و INSO 2930-2 [۱۹] مطابقت دارد. مشخصات این فوق روان کننده در جدول ۴ آورده شده است.

۲-۲- طرح اختلاط های بتن

برای بررسی رفتار الیاف های نام برده بر بتن خودتراکم ۱۰ طرح اختلاط مورد آزمایش قرار گرفته که یک طرح آن برای نمونه شاهد و ۹ طرح دیگر شامل درصد های حجمی ۰,۲۵، ۰,۵، ۰,۷۵، الیاف هایی از نوع فولادی

جدول ۴. مشخصات فوق روان کننده

Table 4. Properties of admixture

مدل	DEGASET AX 5909
نوع	مایع
رنگ	کهربایی
جرم مخصوص	1/10 ± 0/03 kg/L
مقدار PH	7 ± 1
مقدار مصرف	۰/۵ تا ۲ درصد وزن مواد سیمانی

جدول ۵. طرح های اختلاط بتن خودتراکم

Table 5. Concrete mixing types of SCC

شماره	طرح ها	الیاف (kg/m ³)	سیمان (kg/m ³)	آب (kg/m ³)	نسبت آب به سیمان (W/C)	شن (kg/m ³)	ماسه (kg/m ³)	فیلر (kg/m ³)	ابروان کننده (% وزن مواد سیمانی)
۱	نمونه شاهد	۰	۴۵۰	۲۰۲/۵	۰/۴۵	۴۸۵/۵	۱۰۳۲	۲۱۰	۲
۲	الیاف فولادی (۰/۲۵ درصد)	۱۹/۵	۴۵۰	۲۰۲/۵	۰/۴۵	۴۸۵/۵	۱۰۳۲	۲۱۰	۲
۳	الیاف فولادی (۰/۵ درصد)	۳۹	۴۵۰	۲۰۲/۵	۰/۴۵	۴۸۵/۵	۱۰۳۲	۲۱۰	۲
۴	الیاف فولادی (۰/۷۵ درصد)	۵۸/۵	۴۵۰	۲۰۲/۵	۰/۴۵	۴۸۵/۵	۱۰۳۲	۲۱۰	۲
۵	MEX 100 (۰/۲۵ درصد)	۲/۲۷۵	۴۵۰	۲۰۲/۵	۰/۴۵	۴۸۵/۵	۱۰۳۲	۲۱۰	۲
۶	MEX 100 (۰/۵ درصد)	۴/۵۵	۴۵۰	۲۰۲/۵	۰/۴۵	۴۸۵/۵	۱۰۳۲	۲۱۰	۲
۷	MEX 100 (۰/۷۵ درصد)	۶/۸۲۵	۴۵۰	۲۰۲/۵	۰/۴۵	۴۸۵/۵	۱۰۳۲	۲۱۰	۲
۸	CFRP (۰/۲۵ درصد)	۴/۴۵	۴۵۰	۲۰۲/۵	۰/۴۵	۴۸۵/۵	۱۰۳۲	۲۱۰	۲
۹	CFRP (۰/۵ درصد)	۸/۹	۴۵۰	۲۰۲/۵	۰/۴۵	۴۸۵/۵	۱۰۳۲	۲۱۰	۲
۱۰	CFRP (۰/۷۵ درصد)	۱۳/۳۵	۴۵۰	۲۰۲/۵	۰/۴۵	۴۸۵/۵	۱۰۳۲	۲۱۰	۲

ها را از هم جدا کرده و آرام آرام به بتن اضافه می کنیم تا الیاف به طور یکنواخت در تمام بتن پراکنده شده و گلوله گلوله نشود، مدت مخلوط شدن در این مرحله نیز ۲ دقیقه می باشد. این روش طرح اختلاط در مقالات قبلی برای بتن های مختلف مورد استفاده قرار گرفته است [۲۲، ۲۳].

مخلوط می گردد. در ادامه دو سوم از مقدار آب اختلاط را به آرامی به مخلوط اضافه می شود و یک سوم آب باقی مانده را بصورت جداگانه در داخل یک ظرف با ابر روان کننده مخلوط کرده و به آرامی به میکسر اضافه خواهد شد که مدت مخلوط شدن مصالح در این حالت ۲ دقیقه است و در پایان الیاف



شکل ۴. دستگاه رئومتر استفاده شده در این تحقیق

Fig. 4. Rheometer apparatus

جدول ۶. مقادیر داده شده به دستگاه رئومتر برای قسمت آزمایش منحنی جریان

Table 6. Set up of Rheometer apparatus

سرعت پایانی چرخش (rpm)	سرعت اولیه چرخش (rpm)	مدت زمان هر گام (s)	تعداد گام ها	سرعت مهار و همگن شدن بتن (rpm)	زمان مهار شدن بتن (s)
۳	۳۶	۵	۷	۳۶	۲۰

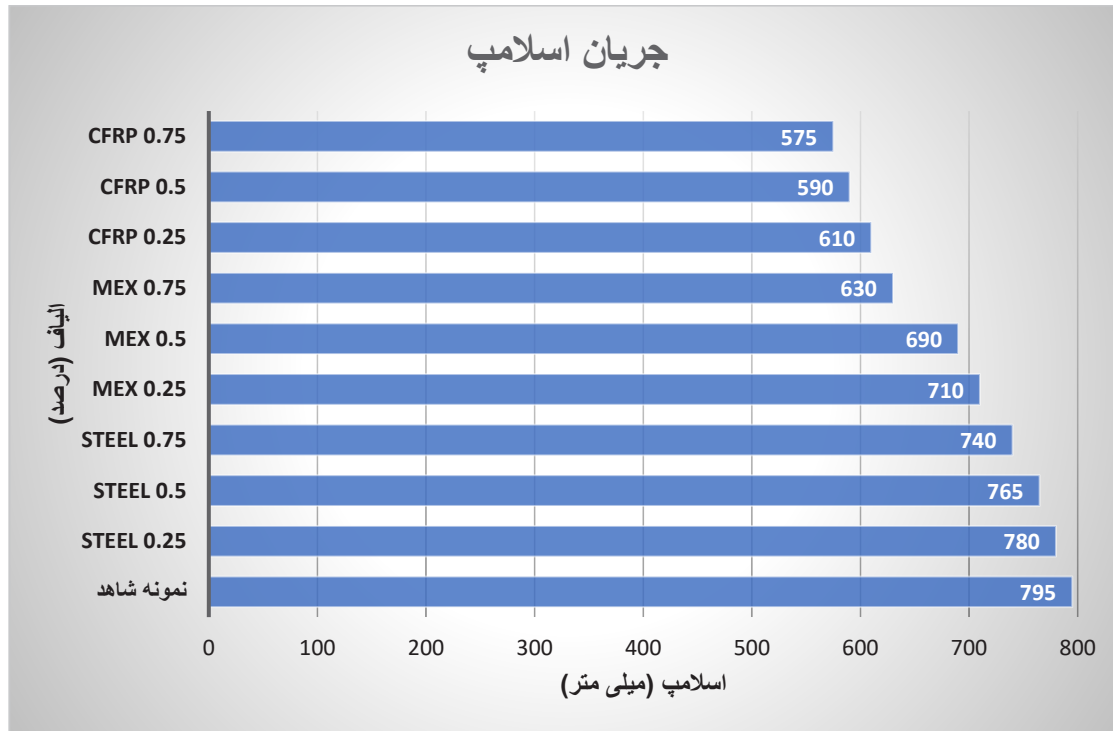
۲-۳- روند انجام آزمایشات

حلقه J، قیف V، جعبه L، جعبه U می باشد از آزمایش رئومتر به منظور بررسی تنش های جاری استاتیکی و دینامیکی، ویسکوزیته پلاستیک و تغلیظ پذیری بتن تازه خودتراکم حاوی الیاف استفاده شد. روش کار دستگاه رئومتر که در شکل ۴ آمده است به این صورت است که با قرار گرفتن دستگاه در داخل ملات بتن و تنظیم سرعت چرخش پره آن گشتاور پیچشی بدست می آید که به کمک نرم افزار دستگاه رئومتر و روابط موجود در آن پارامترهای ذکر شده در دو بخش آزمایشات رشد تنش و منحنی جریان بدست می آید. به منظور محاسبه پارامترهای قسمت رشد تنش که شامل مقادیر گشتاور و تنش جاری استاتیکی می شود رئومتر با سرعت ثابت ۱٫۵ دور بر دقیقه (rpm) می چرخد و مقادیر گشتاور در نموداری براساس زمان اندازه گیری می شود. همچنین برای محاسبه پارامترهای مربوط به قسمت منحنی جریان که شامل مقادیر تنش جاری دینامیکی، ویسکوزیته پلاستیک و تغلیظ پذیری می شود مقادیر جدول ۶ که مطابق با بازه استاندارد ICAR [21] می باشد قرار گرفت.

آزمایشات بتن خود تراکم در دو حالت بتن تازه و بتن سخت شده انجام شده است که شامل موارد، آزمایش های بتن تازه: شامل آزمایش های جریان اسلامپ، حلقه J، قیف V، جعبه L، جعبه U و رئومتر می شود. آزمایش های بتن سخت شده: آزمایش های مکانیکی بتن که شامل مقاومت فشاری، مدول الاستیسته و تنش - کرنش می شود.

۲-۳-۱- آزمایشات بتن خودتراکم تازه

به منظور انجام آزمایشات در این قسمت مخلوط بتن بلافاصله بعد از ساخته شدن در دستگاه میکسر برای انجام آزمایشات مورد استفاده قرار گرفت. آزمایشات مربوط به این قسمت به منظور بررسی خواص رئولوژیکی بتن می باشد که افزودن هر یک از الیاف های نام برده می تواند مستقیماً بر خواص خود تراکمی بتن تاثیر گذار باشد. در این تحقیق علاوه بر انجام کامل آزمایشات سنتی بتن خودتراکم که شامل آزمایش های جریان اسلامپ



شکل ۵. منحنی مقایسه نتایج حاصل از آزمایش جریان اسلامپ

Fig. 5. Slump flow Results with various fibers

$$E = 4700\sqrt{f'_c} \quad (1)$$

$$E = 3300\sqrt{f'_c} + 6900 \quad (2)$$

سپس به کمک مقادیر حقیقی بدست آمده از آزمایش و توسط رابطه موجود (۳) در استاندارد ASTM مقادیر مدول الاستیسیته در دو حالت مدول الاستیسیته وترى (مماسی) و سکانتی بررسی شد.

$$E = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - 0.00005} \quad (3)$$

که در این رابطه E مدول الاستیسیته بر حسب (GPa)، S2 تنش معادل ۴۰ درصد نیرو (بار) ماکزیمم، S1 تنش معادل کرنش طولی ۰,۰۰۰۰۵ و ۴۲ کرنش طولی بدست آمده با تنش S2 می باشد. مدول

۲-۳-۲- آزمایشات بتن خودتراکم سخت شده

به منظور انجام آزمایشات در این قسمت مخلوط بتن در داخل قالب ها ریخته شده و بعد از قرار گرفتن به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط قالب ها باز شده و به منظور رسیدن به سن ۲۸ روزه نمونه ها در داخل مخزنی از آب نگهداری شدند. آزمایش مقاومت فشاری مطابق با استاندارد [۲۱] ASTM C192 و آزمایش مدول الاستیسیته مطابق با استاندارد ASTM C469 [۲۴] انجام گردید. آزمایش های مدول الاستیسیته انجام گرفته در این تحقیق بوسیله نمونه های استوانه ای با ابعاد ۱۵×۳۰ سانتی متر و در سن ۲۸ روزه بتن براساس استاندارد ASTM C469 [۲۴] برای تمامی طرح های ذکر شده انجام گردید. نتایج بدست آمده از این آزمایش بصورت نمودارهای نیرو - تغییر مکان می باشد که به منظور بررسی رفتار بتن منحنی های تنش - کرنش تمامی طرح های مورد آزمایش رسم گردید. مدول الاستیسیته بتن که به عنوان شیب منحنی تنش - کرنش در نظر گرفته می شود در ابتدا به کمک روابط فرضی موجود (۲۱) در استاندارد های ACI 318 [۲۵] و ACI 363 [۲۵] تخمین زده شد که مقادیر آن در بخش نتایج آورده شده است.



شکل ۶. نمونه ای از تصاویر آزمایش اسلامپ

Fig. 6. Slump flow Results with various fibers

های دارای الیاف CFRP می باشد. نتایج بدست آمده از این آزمایش نزدیک به نتایج مقاله Long و همکاران در سال ۲۰۱۴ می باشد [۸]. شکل ۵ منحنی مقایسه نتایج حاصل از مقادیر اسلامپ برای نمونه شاهد و طرح های دارای درصد های مختلف الیاف آورده است. مقادیر بدست آمده با توجه به رده بندی استاندارد EFNARC [۲۰] مطابقت داشته و در محدوده استاندارد قرار دارند. در شکل ۶ نمونه ای از تصاویر آزمایش جریان اسلامپ برای برخی از طرح ها آورده شده است.

۳-۲- آزمایش حلقه J

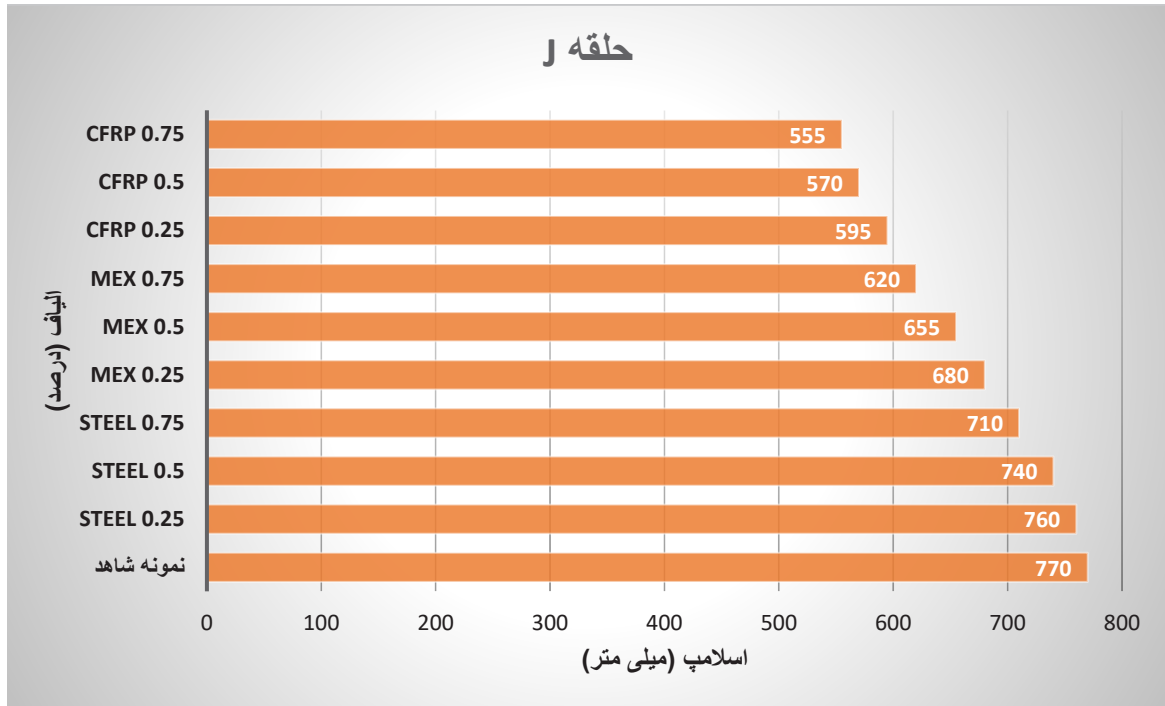
از این آزمایش به منظور ارزیابی قابلیت عبور و رفتار بتن در هنگام عبور از میان آرماتور ها استفاده می گردد. براساس نتایج بدست آمده از این آزمایش با افزایش درصد الیاف مقادیر اختلاف ارتفاع بدست آمده افزایش پیدا کرده است. که این افزایش در طرح های دارای الیاف کربن پلیمری تقویت شده (CFRP) دارای بیشترین مقدار بوده بطوری که طرح دارای ۰,۷۵ درصد الیاف مقدار قابل توجهی نسبت به نمونه شاهد تغییر پیدا کرده و حدوداً ۹ برابر شده و طرح های حاوی الیاف فولادی دارای کمترین تغییر نسبت به نمونه شاهد می باشند بطوری که طرح دارای ۰,۲۵ الیاف حدوداً ۲ برابر تغییر داشته است. نمونه های دارای الیاف ماکروستتیک نیز دارای رفتاری نزدیک به نمونه های الیاف فولادی بود به طوری که مقادیر اختلاف ارتفاع نمونه حاوی ۰,۲۵ این الیاف حدوداً ۳ برابر طرح شاهد بوده و بسیار نزدیک به طرح دارای ۰,۲۵ الیاف فولادی می باشد. همچنین مقادیر اسلامپ اندازه گیری شده در این آزمایش نیز با افزایش مقادیر الیاف با کاهش روبرو شده

الاستیسیته سکانتی شیب خطی است که از مبدا به نقطه ای از منحنی تنش - کرنش که متناظر با ۴۰ درصد تنش حداکثر است، وصل می شود و مدول وتری حالت اصلاح شده ای از مدول سکانت بوده با این تفاوت که به جای مبدا از یک نقطه از منحنی که متناظر با کرنش ۰,۰۰۰۰۵ می باشد، استفاده می شود.

۳-۳ نتایج و تفسیر آزمایشات

۳-۱- آزمایش جریان اسلامپ

این آزمایش به منظور سنجش میزان آب انداختگی و جداسدگی و همچنین قابلیت روانی و جاری شدن بتن تحت اثر وزن خود در بتن تازه انجام می گردد. بر اساس نتایج بدست آمده از این آزمایش افزودن الیاف به بتن خود تراکم سبب کاهش مقادیر اسلامپ می گردد. که در میان الیاف های مورد استفاده بیشترین کاهش مربوط به طرح ۰,۷۵ درصد الیاف کربن پلیمری تقویت شده (CFRP) است که حدوداً ۲۷,۶ درصد نسبت به نمونه شاهد کاهش پیدا کرده و کمترین کاهش نسبت به نمونه شاهد مربوط به طرح ۰,۲۵ الیاف فولادی می باشد که حدوداً ۱,۸ درصد کاهش پیدا کرده است. نمونه های دارای الیاف ماکروستتیک نیز در درصد های پایین الیاف رفتاری نزدیک به نمونه های دارای الیاف فولادی و در درصدهای بالا الیاف دارای رفتاری نزدیک به نمونه های دارای الیاف CFRP را داشت به صورتی که در نمونه دارای ۰,۲۵ الیاف حدوداً ۱۰,۶ درصد نسبت به نمونه شاهد کاهش پیدا کرده و همچنین در نمونه دارای ۰,۷۵ الیاف نیز حدوداً ۲۰,۷ درصد کاهش پیدا کرده است که نشان دهنده رفتاری مشابه با نمونه



شکل ۷. منحنی مقایسه نتایج حاصل از اسلامپ در آزمایش حلقه J

Fig. 7. J-ring Results with various fibers

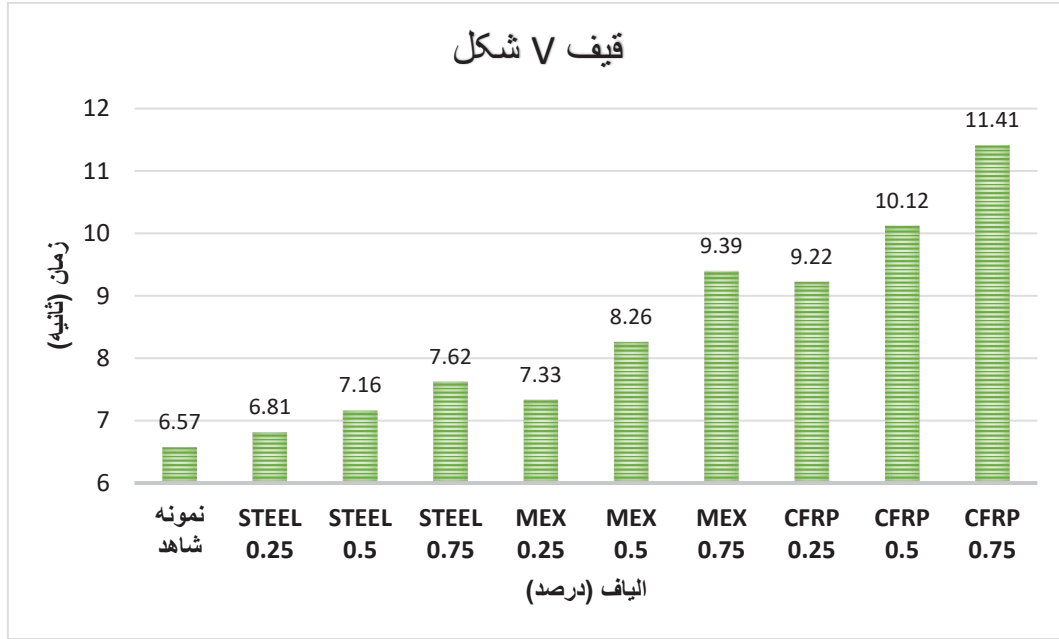


شکل ۸. نمونه ای از تصاویر آزمایش حلقه J

Fig. 8. J-ring Results with various fibers

مقادیر بدست آمده برای تمامی طرح ها در محدوده استاندارد EFNARC [۲۰] قرار دارد. در شکل ۸ نمونه ای از تصاویر آزمایش حلقه J برای برخی از طرح ها آورده شده است.

است که می تواند به علت جمع شدگی و کاهش قابلیت عبور بتن از میان آرماتورها باشد. در شکل ۷ منحنی مقایسه نتایج حاصل از مقادیر اسلامپ برای نمونه شاهد و طرح های دارای درصد های مختلف الیاف آورده است.



شکل ۹. منحنی مقایسه نتایج حاصل از آزمایش قیف V

Fig. 9. V-funnel Results with various fibers

۳-۴- آزمایش جعبه L

از این آزمایش به منظور بررسی قابلیت عبور و انسداد پذیری بتن خود تراکم در میان شبکه آرماتورها استفاده می گردد. براساس نتایج بدست آمده از این آزمایش مقادیر نسبت ارتفاع با افزایش درصد الیاف ها کاهش پیدا کرده است. در بین طرح های مورد آزمایش نمونه های دارای الیاف کربن پلیمری تقویت شده (CFRP) دارای کمترین مقادیر انسداد می باشد بطوریکه در مقایسه با نمونه شاهد حدوداً ۱۷,۳ درصد کاهش پیدا کرده است که نشان دهنده عبورپذیری کمتر در طرح های حاوی این الیاف است. در الیاف ماکروسنتتیک نیز در طرح های حاوی درصد های بالای الیاف رفتاری نزدیک به الیاف های CFRP مشاهده شد بطوری که طرح حاوی ۰,۷۵ این الیاف حدوداً ۱۳,۲ درصد نسبت به نمونه شاهد کاهش پیدا کرد اما در طرح های حاوی الیاف فولادی کمترین مقدار انسداد در مقایسه با دیگر الیاف ها مشاهده شد بطوری که طرح حاوی ۰,۲۵ این الیاف حدوداً ۳ درصد نسبت به نمونه شاهد کاهش پیدا کرد. شکل ۱۱ منحنی مقایسه طرح های مورد آزمایش قرار گرفته است که نشان می دهد تمامی طرح های آزمایش شده در محدوده استاندارد EFNARC [۲۰] قرار گرفته اند. همچنین در شکل ۱۲ نمونه ای از تصاویر آزمایش جعبه L برای برخی از طرح ها آورده شده است.

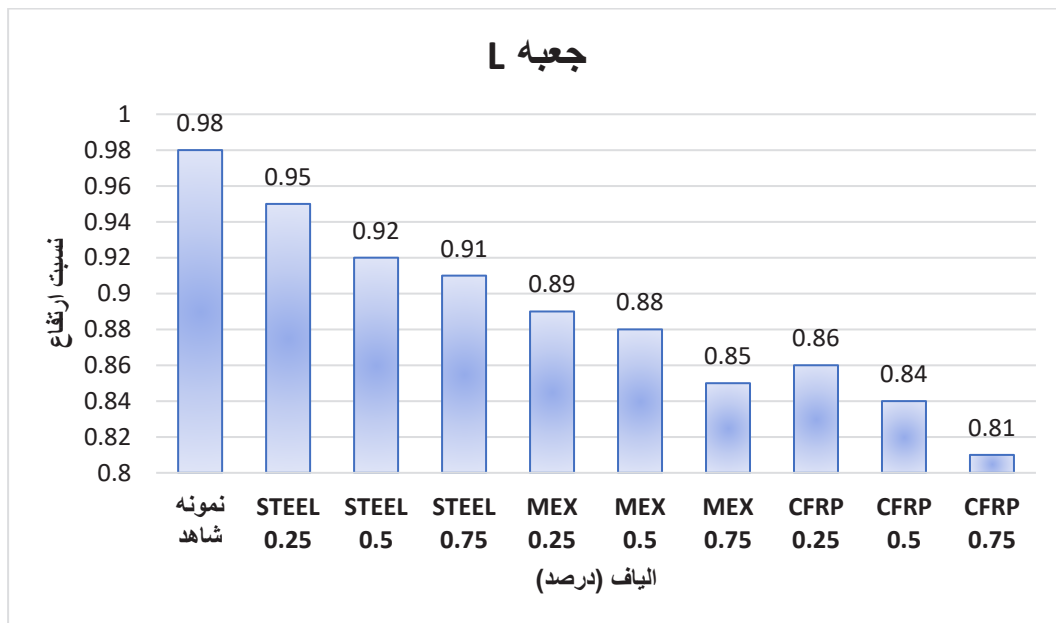
۳-۳- آزمایش قیف V

از این آزمایش به منظور بررسی قابلیت پر کنندگی و همچنین قابلیت روانگرایی بتن خود تراکم استفاده می شود. براساس نتایج بدست آمده از این آزمایش نیز افزایش مقادیر الیاف سبب افزایش زمان آزمایش قیف V شکل گردید که منجر به کاهش کارایی بتن خود تراکم می شود. در میان طرح های دارای الیاف بیشترین زمان تخلیه بتن مربوط به نمونه های دارای الیاف کربن پلیمری تقویت شده (CFRP) می باشد و همانطور که در منحنی مشخص است اختلاف زمان طرح دارای ۰,۷۵ این الیاف با نمونه شاهد برابر ۴,۸۴ ثانیه می باشد علت این افزایش در الیاف CFRP لزجت و چسبندگی بالای بین الیاف و ملات بتن می باشد. بعد از این الیاف ، نمونه های دارای الیاف ماکروسنتتیک تغییرات کمتری را نسبت به طرح شاهد بدست آورد و در آخر کمترین زمان تخلیه بتن در طرح های حاوی الیاف مربوط به طرح های دارای الیاف فولادی می باشد بطوری که در طرح دارای ۰,۲۵ این الیاف اختلاف زمان تخلیه بتن نسبت با طرح شاهد تنها ۰,۲۴ ثانیه می باشد. تمامی طرح های آزمایش شده در بازه زمانی استاندارد EFNARC [۲۰] قرار گرفته اند. شکل ۹ منحنی مقایسه طرح ها با یکدیگر آورده شده است. همچنین در شکل ۱۰ نمونه ای از تصاویر آزمایش قیف V برای برخی از طرح ها آورده شده است.



شکل ۱۰. نمونه ای از تصاویر آزمایش قیف V

Fig. 10. V-funnel Results with various fibers



شکل ۱۱. منحنی مقایسه نتایج حاصل از آزمایش جعبه L

Fig. 11. L-box Results with various fibers



شکل ۱۲. نمونه ای از تصاویر آزمایش جعبه L

Fig. 12. L-box Results with various fibers

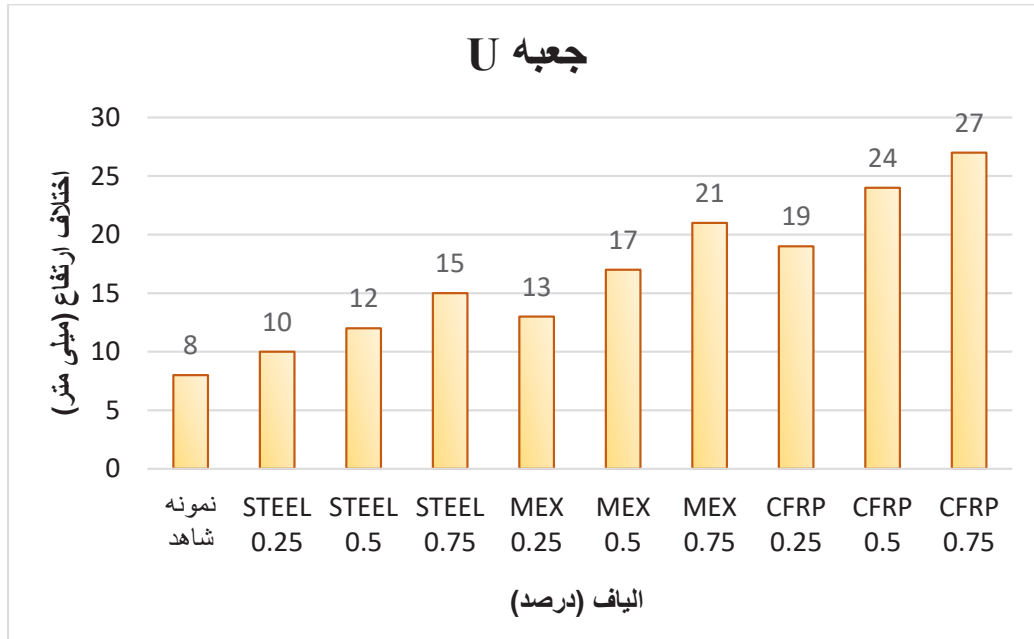
نشان دهنده رفتار نزدیک این الیاف ها نسبت به نمونه شاهد است بطوریکه در طرح دارای ۰,۲۵ این الیاف تنها ۲ میلی متر مقادیر اختلاف ارتفاع افزایش پیدا کرده است. شکل ۱۳ منحنی مقایسه طرح های مورد آزمایش را نشان می دهد که تمامی طرح ها در محدوده استاندارد EFNARC [۲۰] قرار گرفته اند. همچنین در شکل ۱۴ نمونه ای از تصاویر آزمایش جعبه U برای برخی از طرح ها آورده شده است.

۳-۶- آزمایشات دستگاه رئومتر

بر اساس نتایج خروجی از دستگاه رئومتر و آنچه در قبل گفته شد آزمایشات رئومتر به دو بخش آزمایشات رشد تنش و منحنی جریان تقسیم می گردد که در ادامه به آن اشاره می گردد. آزمایشات مربوط به قسمت رشد تنش، آزمایشات استاتیکی و آزمایشات مربوط به قسمت منحنی جریان آزمایشات دینامیکی بتن در نظر گرفته می شود. با توجه به اینکه استفاده از درصد های بالای الیاف در آزمایشات قبلی رئولوژی بتن تازه خود تراکم سبب کاهش کارایی بتن گردید در آزمایش های این قسمت درصد های بهینه ی الیاف ها در نظر گرفته شد.

۳-۵- آزمایش جعبه U

از این آزمایش به منظور بررسی قابلیت عبور و همچنین قابلیت پرکنندگی و حد جاری شدن بتن خود تراکم استفاده می گردد. براساس نتایج بدست آمده از این آزمایش که یکی از سخت گیرانه ترین آزمایشات متداول بتن خود تراکم می باشد افزودن الیاف ها به بتن سبب افزایش مقادیر اختلاف ارتفاع در دو طرف جعبه می گردد. در طرح های مورد آزمایش دارای الیاف بیشترین مقادیر اختلاف ارتفاع مربوط به طرح های دارای الیاف کربن پلیمری تقویت شده (CFRP) می باشد بطوریکه در طرح دارای ۰,۷۵ این الیاف در مقایسه با طرح شاهد این اختلاف ارتفاع ۱۹ میلی متر افزایش پیدا کرده است و نشان دهنده عبور پذیری ضعیف تر طرح های حاوی این الیاف می باشد که می توان علت آن را تجمع الیاف ها و بر هم خوردن همگنی ملات در درصد های بالا دانست. در طرح های دارای الیاف ماکروسنتتیک نیز در درصد ۰,۷۵ رفتاری مشابه با الیاف های CFRP مشاهده شد ولی در درصد های ۰,۲۵ و ۰,۵ رفتار نمونه ها به طرح های حاوی الیاف های فولادی نزدیک بود. اما کمترین تغییرات نسبت به نمونه شاهد مربوط به طرح های دارای الیاف فولادی است که دارای مقادیر نزدیکی نسبت به نمونه شاهد می باشند و



شکل ۱۳. منحنی مقایسه نتایج حاصل از آزمایش جعبه U

Fig. 13. U-box Results with various fibers



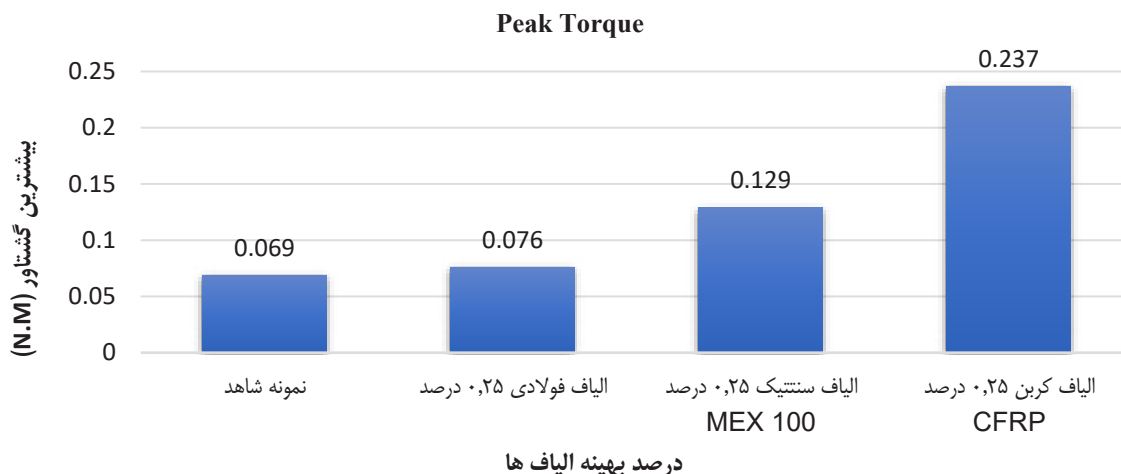
شکل ۱۴. نمونه ای از تصاویر آزمایش جعبه U

Fig. 14. U-box Results with various fibers

بتن در طرح دارای این الیاف دانست. در طرح دارای الیاف ماکروسننتیک رفتار الیاف در مقایسه با الیاف CFRP دارای لزجت کمتر و در مقایسه با الیاف فولادی دارای لزجت بیشتری بود بطوری که مقادیر پیک گشتاور آن حدوداً ۱٫۸ برابر نمونه شاهد گردیده است و اما کمترین مقادیر پیک تنش در نمونه دارای الیاف فولادی مشاهده شد بطوری که مقادیر پیک گشتاور آن

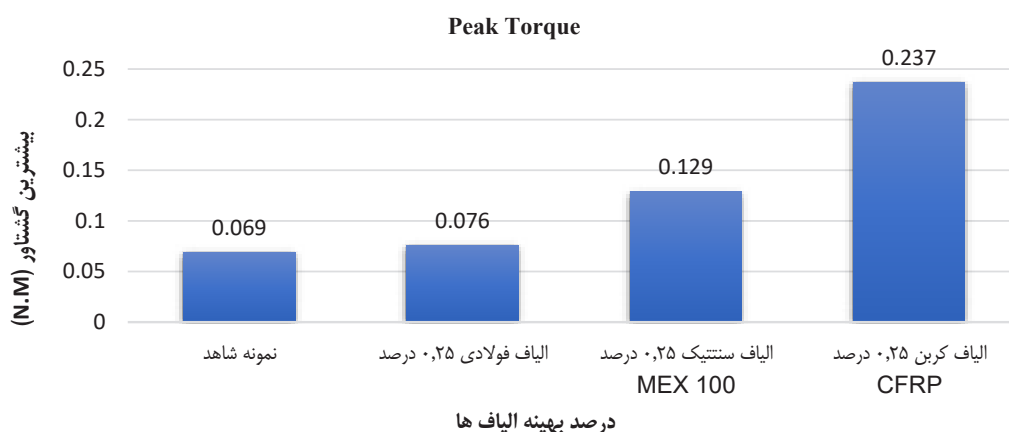
۳-۶-۱- آزمایشات استاتیکی رئومتر

در شکل ۱۵ مقادیر حداکثر گشتاور طرح های مورد آزمایش نشان داده شده است همانطور که مشخص است طرح دارای الیاف CFRP دارای بیشترین مقدار بوده بطوروری که مقادیر پیک گشتاور آن حدوداً ۳٫۴ برابر نمونه شاهد می باشد که می توان علت این تغییر را افزایش یافتن لزجت



شکل ۱۵. منحنی های گشتاور- زمان طرح های بهینه

Fig. 15. Torque-time curves of optimal designs



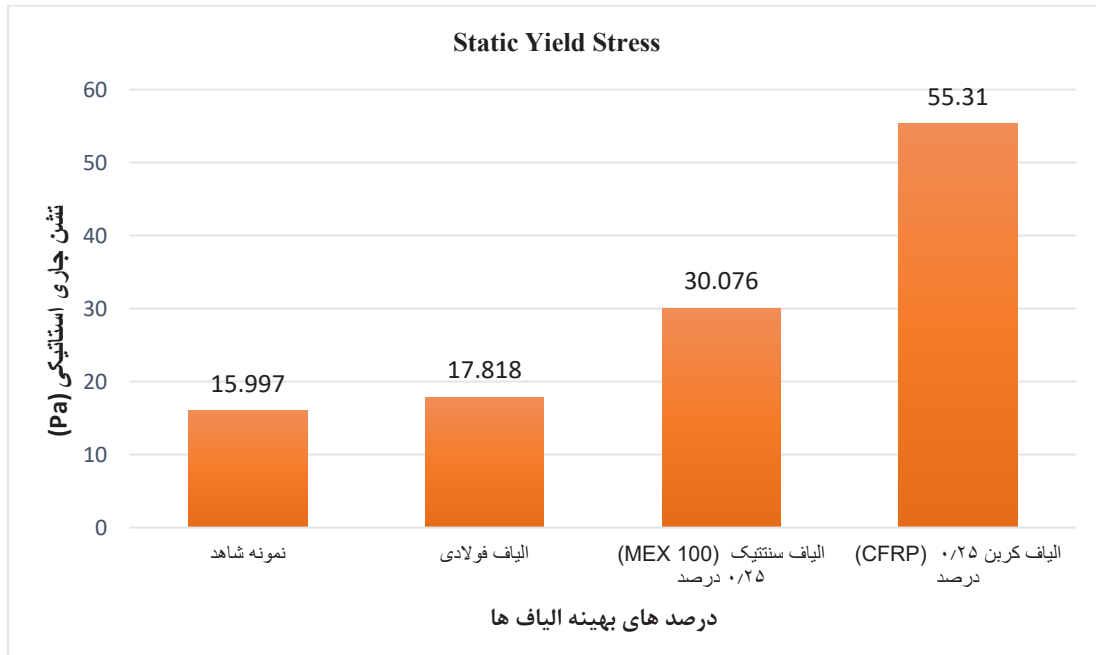
شکل ۱۶. مقادیر تنش جاری استاتیکی طرح های بهینه

Fig. 16. Static yield stress values of optimal designs

استاتیکی بتن خود تراکم می باشد که نتایج مربوط به آن در شکل ۱۷ آورده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده و مقایسه آن با مقادیر حداکثر گشتاور نشان دهنده آن است که تنش جاری استاتیکی با حداکثر گشتاور رابطه مستقیمی دارد بطوریکه هرچه مقدار حداکثر گشتاور افزایش یابد تنش جاری استاتیکی نیز با افزایش روبرو می شود بنابراین مطابق با نتایج بدست آمده بیشترین مقدار مربوط به طرح دارای الیاف کربن پلیمری تقویت شده (CFRP) و کمترین مقدار در طرح های دارای الیاف مربوط طرح دارای الیاف فولادی می باشد.

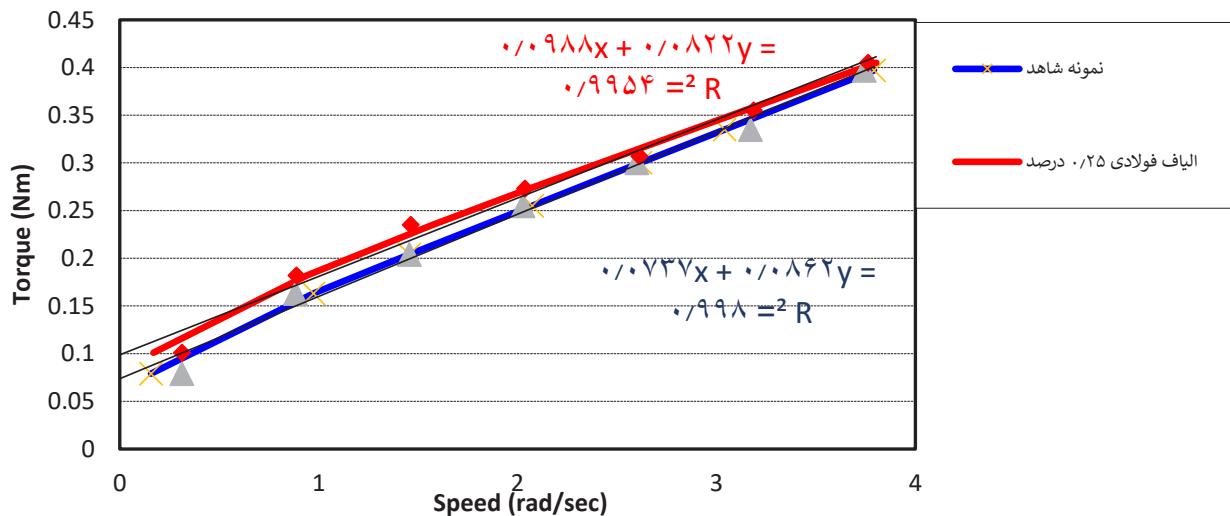
تنها ۱,۱ برابر نمونه شاهد شده است. در شکل ۱۵ منحنی های گشتاور بر حسب مدت زمان آزمایش برای طرح های دارای درصد الیاف بهینه و نمونه شاهد آورده شده است که نشان دهنده آن است که گشتاور در ابتدا تا حداکثر مقدار خود افزایش پیدا کرده و سپس به تدریج با یک مقدار متوسط در حالت پایدار کاهش پیدا می کند.

زمان آزمایش تا هنگامی که مطمئن شویم بیشترین مقدار گشتاور نمایان شده است ادامه می یابد. یکی دیگر از پارامترهای استاتیکی رنومتر که در قسمت نتایج مربوط به آزمایش رشد تنش قرار دارد تنش جاری (تسلیم)



شکل ۱۷. مقادیر تنش جاری استاتیکی طرح های بهینه

Fig. 17. Static yield stress values of optimal designs

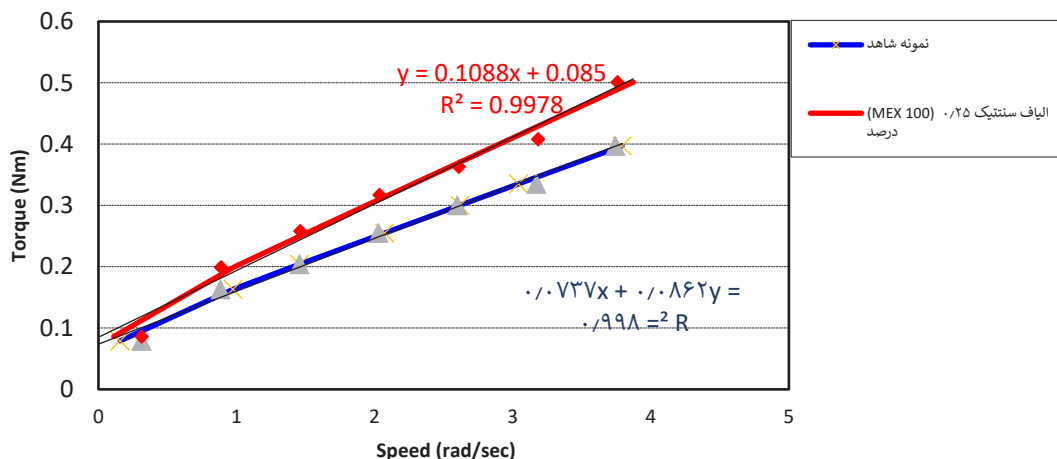


شکل ۱۸. منحنی گشتاور - سرعت نمونه شاهد و الیاف فولادی

Fig. 18. Torque-rate curve of control specimen and steel fibers

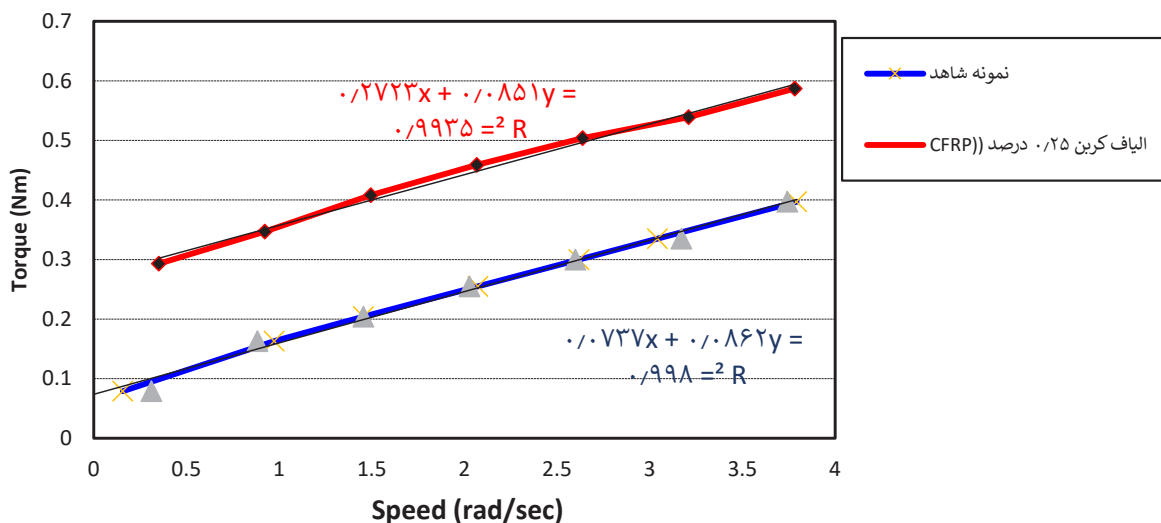
ها طرح دارای الیاف کربن پلیمری تقویت شده (CFRP) دارای بیشترین تغییر نسبت به نمونه شاهد می باشد. به اینصورت که با افزایش پیدا کردن مقادیر ویسکوزیته نسبی و مقاومت در برابر جریان و به همراه آن گشتاور افزایش پیدا کرده و منحنی خطی بدست آمده از این طرح به علت داشتن

۳-۶-۲- آزمایشات دینامیکی رنومتر با توجه به اشکال ۱۸، ۱۹ و ۲۰ که نشان دهنده منحنی های گشتاور- زمان در طرح های دارای مقادیر بهینه الیاف می باشد به مقایسه این طرح ها با نمونه شاهد پرداخته شده است. بر اساس نتایج بدست آمده در منحنی



شکل ۱۹. منحنی گشتاور - سرعت نمونه شاهد و الیاف ماکروسنتتیک

Fig. 19. Torque-rate curve of control specimen and macrosyntetic fibers

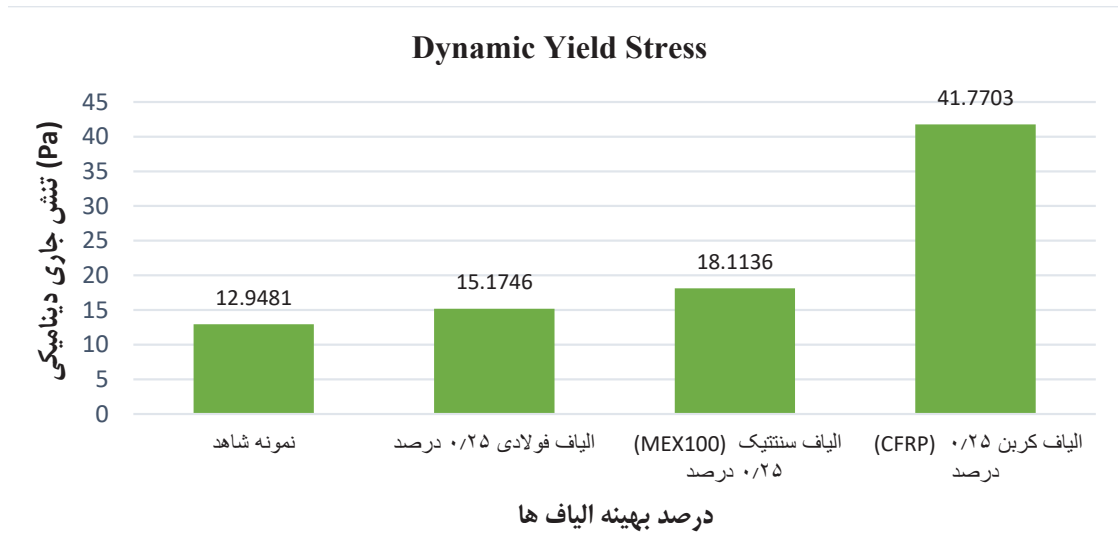


شکل ۲۰. منحنی گشتاور - سرعت نمونه شاهد و الیاف CFRP

Fig. 20. Torque-rate curve of control specimen and CFRP fibers

ماکروسنتتیک (MEX 100) نیز نسبت به نمونه شاهد تغییر داشته و دارای ویسکوزیته نسبی و گشتاور بیشتری نسبت به نمونه شاهد می باشد و همانطور که در منحنی مشخص است در جایگاهی بالاتر نسبت به نمونه شاهد قرار گرفته است.

گشتاور بیشتر در مقایسه با نمونه شاهد شیب بیشتری داشته و در جایگاهی بالاتر قرار گرفته است. طرح دارای مقدار بهینه الیاف فولادی نیز کمترین تغییر را نسبت به نمونه شاهد دارا می باشد که نشان دهنده آن است که الیاف فولادی تاثیر کمی بر رئولوژی و رفتار بتن خود تراکم می گذارد. الیاف



شکل ۲۱. مقادیر تنش جاری دینامیکی طرح های بهینه

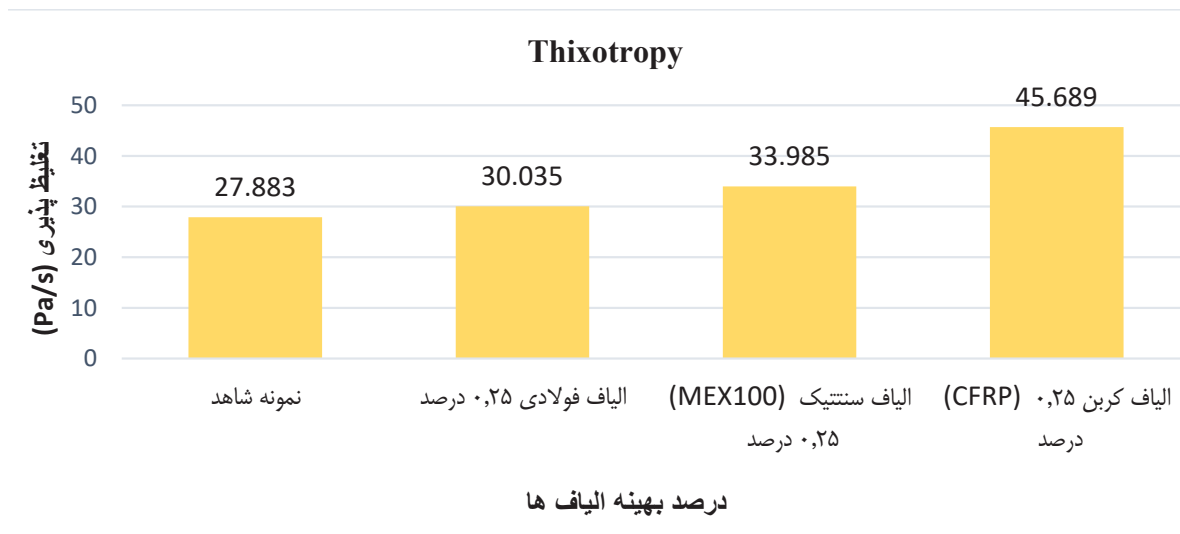
Fig. 21. Dynamic yield stress values of optimal designs

که مقدار آن حدوداً ۳۷ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش پیدا کرده است. در مقایسه دیگر الیاف ها، الیاف فولادی دارای رفتاری مشابه با نمونه شاهد بوده و ویسکوزیته پلاستیک آن نزدیک به نمونه شاهد می باشد بصورتی که مقدار افزایش آن نسبت به نمونه شاهد حدود ۹ درصد می باشد. الیاف ماکروسنتتیک (MEX 100) نیز در مقایسه با نمونه شاهد حدوداً ۲۸ درصد افزایش پیدا کرده و مقدار آن نزدیک به طرح دارای الیاف CFRP می باشد.

تعلیظ پذیری در بتن به شکل پذیری ساختار بتن در حالت استراحت و شکست ساختار در هنگام جریان بتن گفته می شود. با توجه به شکل ۲۳ براساس نتایج بدست آمده از دستگاه رنومتر افزودن الیاف به بتن خود تراکم سبب افزایش مقدار تعلیظ پذیری می گردد. از میان طرح های دارای درصد بهینه الیاف، الیاف CFRP بیشترین تغییر و الیاف فولادی کمترین تغییر را نسبت به نمونه شاهد دارا می باشند. بدین صورت که الیاف فولادی حدود ۷/۷ درصد و الیاف CFRP حدود ۶۳/۸ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش داشته اند. الیاف ماکروسنتتیک (MEX 100) نیز حدود ۲۱/۸ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش داشته است که نشان دهنده رفتاری نزدیک به طرح دارای الیاف فولادی می باشد. علت افزایش مقادیر تعلیظ پذیری در نمونه ها بویژه در نمونه های دارای الیاف CFRP را می توان جدا شدگی ذرات بتن از هم دانست.

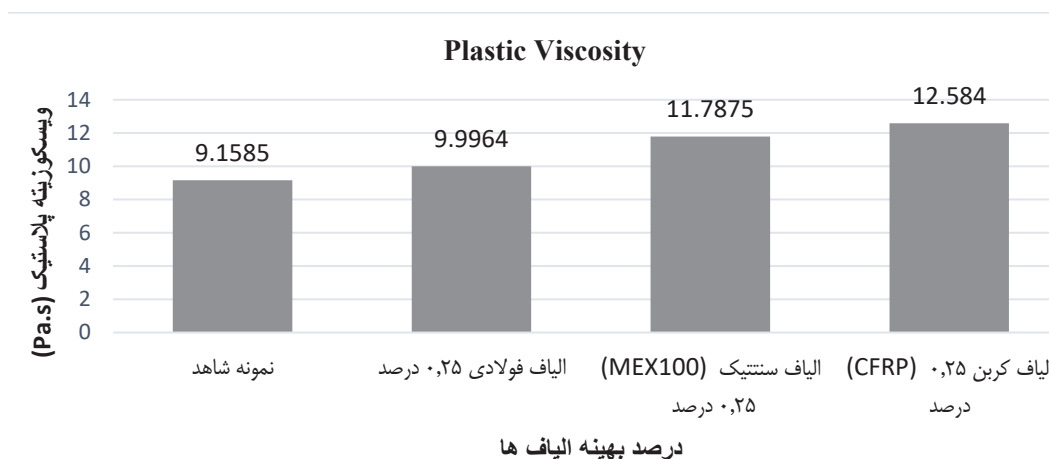
یکی دیگر از پارامترهای دینامیکی رنومتر که در قسمت نتایج مربوط به منحنی جریان قرار دارد تنش جاری (تسلیم) دینامیکی بتن خود تراکم می باشد. در شکل ۲۱ به مقایسه مقدار تنش جاری دینامیکی طرح های دارای درصد الیاف بهینه و نمونه شاهد پرداخته شده است. براساس نتایج بدست آمده از دستگاه رنومتر در تمامی طرح های دارای الیاف این پارامتر نسبت به نمونه شاهد افزایش پیدا کرده است که بیشترین افزایش مربوط به طرح دارای الیاف کربن پلیمری تقویت شده (CFRP) می باشد که حدوداً ۳،۲ برابر نسبت به نمونه شاهد افزایش پیدا کرده است. از میان طرح های دارای الیاف، الیاف فولادی نیز کمترین تغییر را نسبت به نمونه شاهد دارا می باشد بطوری که حدوداً ۱،۱ برابر افزایش داشته و بسیار نزدیک به نمونه شاهد می باشد. بطور کلی براساس نتایج بدست آمده تنش جاری شدن کمتر، به مفهوم این است که بتن تحت وزن خود قابلیت جاری شدن داشته و دارای خواص خود تراکمی بهتری می باشد.

ویسکوزیته پلاستیک که به عنوان مقاومت داخلی مواد در برابر جریان در نظر گرفته می شود در بتن خود تراکم حاوی الیاف به چسبندگی بین ملات بتن و الیاف گفته می شود. با توجه به شکل ۲۲ بر اساس نتایج بدست آمده از دستگاه رنومتر در قسمت منحنی جریان که بر اساس معادلات موجود در رنومتر حاصل شده است افزودن درصد های بهینه الیاف به بتن خود تراکم سبب افزایش مقادیر ویسکوزیته پلاستیک می گردد. که در این تحقیق طرح دارای الیاف CFRP دارای بیشترین مقدار می باشد بصورتی



شکل ۲۲. مقایسه مقادیر ویسکوزیته پلاستیک طرح های بهینه

Fig. 22. Comparison of plastic viscosity values of optimal designs

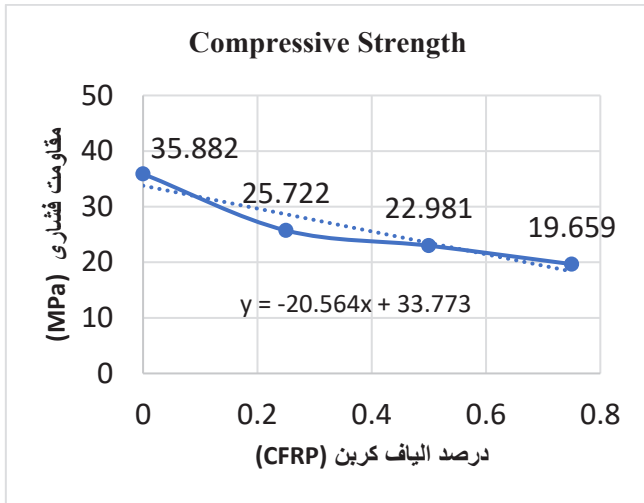


شکل ۲۳. مقایسه مقادیر تغلیظ پذیری طرح های بهینه

Fig. 23. Comparing the concentration values of the optimal designs

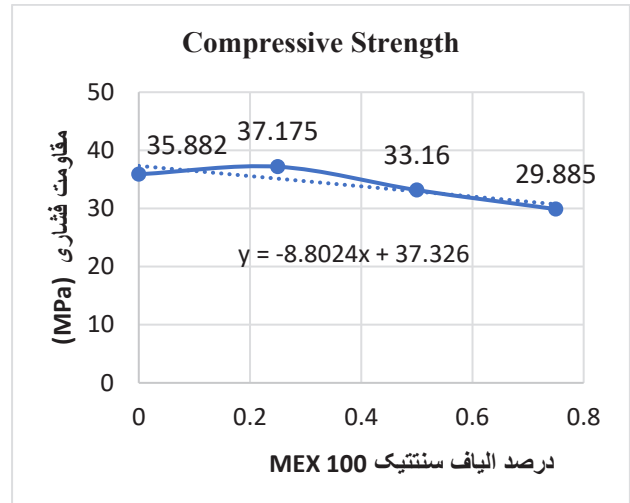
نمونه شاهد داشتند و الیاف ماکروسنتتیک MEX 100 نیز رفتاری بین این دو الیاف داشت بصورتی که در برخی از آزمایشات رفتار آن نزدیک به الیاف CFRP و در برخی از آزمایشات رفتار آن نزدیک به الیاف فولادی بود. در مقایسه با نتایج حاصل شده از تحقیقات پیشین نیز در آزمایشات متداول مربوط به بتن های خود تراکم حاوی الیاف های فولادی نتایج این تحقیق با مقاله Khaloo و همکاران در سال ۲۰۱۴ [۷] مطابقت داشته بدین صورت که افزودن الیاف فولادی سبب کاهش کارایی بتن

بطورکلی براساس نتایج بدست آمده از آزمایشات بتن تازه که شامل آزمایشات متداول: جریان اسلامپ، حلقه J، جعبه L، جعبه U، قیف V و همچنین آزمایشات رئومتر که در دو حالت استاتیکی و دینامیکی انجام گرفت می توان فهمید که افزودن مقادیر بالای الیاف به بتن خود تراکم در رفتار این نوع بتن تاثیر داشته و سبب کاهش کارایی و همچنین کاهش رئولوژی آن می گردد. از بین سه نوع الیاف مورد استفاده در این تحقیق الیاف فولادی کمترین تغییر و الیاف کربن پلیمری (CFRP) بیشترین تغییر را نسبت به



شکل ۲۵. مقادیر مقاومت فشاری طرح های دارای الیاف CFRP

Fig. 25. Compressive strength values of designs with CFRP fibers

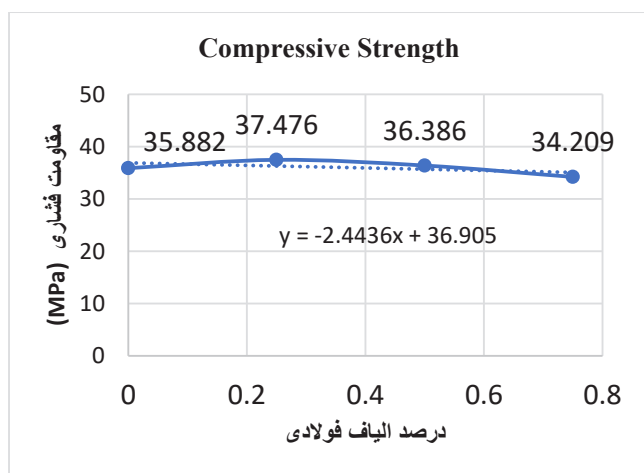


شکل ۲۴. مقادیر مقاومت فشاری طرح های دارای الیاف ماکروسنتتیک

Fig. 24. Compressive strength values of designs with macrosynthetic fibers

۳-۷- آزمایش مقاومت فشاری

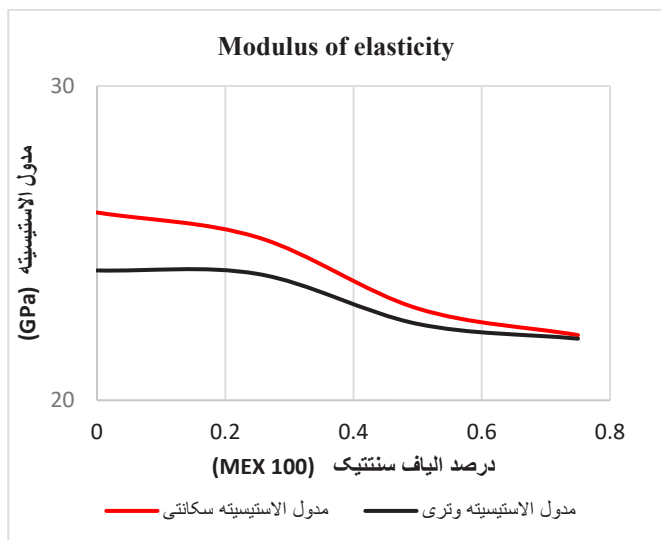
آزمایش های مقاومت فشاری انجام گرفته در این تحقیق بوسیله نمونه های مکعبی ۱۵×۱۵ سانتی متر و در سن ۲۸ روزه بتن توسط دستگاه جک بتن شکن برای تمامی طرح های ذکر شده انجام گردید. براساس نتایج بدست آمده از این آزمایش که در اشکال ۲۴، ۲۵ و ۲۶ منحنی های مربوط به تمامی طرح ها آزمایش شده آمده است می توان فهمید که بیشترین مقادیر مقاومت فشاری مربوط به طرح های دارای الیاف فولادی و کمترین آن مربوط به طرح های دارای الیاف CFRP می باشد.



شکل ۲۶. مقادیر مقاومت فشاری طرح های دارای الیاف فولادی

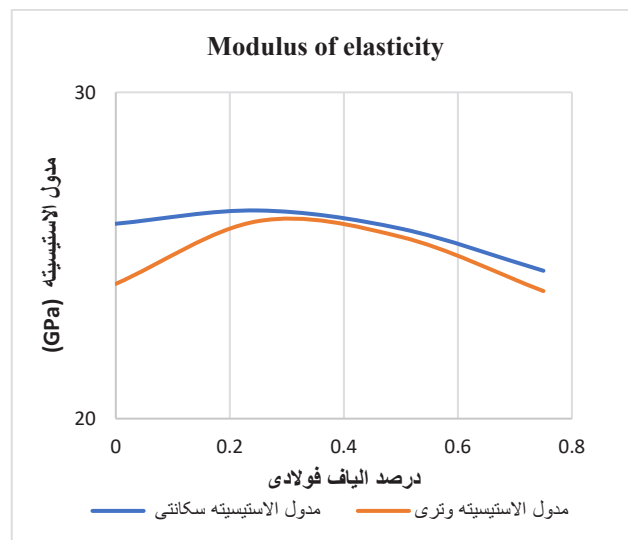
Fig. 26. Compressive strength values of designs with steel fibers

خود تراکم می گردد همچنین استفاده از درصد های بالای این الیاف به خصوص ۲ درصد در این مقاله سبب شد که کارایی بتن از حداقل مقدار تعیین شده توسط استاندارد افنارک نیز پایین تر بیاید. اما در آزمایشات نوین رنومتر نیز در مورد این الیاف نتایج با مقاله Ponkiewski سال ۲۰۰۶ [۴] مطابقت دارد با این تفسیر که پارامترهای تنش های جاری شدن و ویسکوزیته پلاستیک با افزودن این الیاف به بتن خودتراکم افزایش پیدا کردند. در نمونه های دارای الیاف ماکروسنتتیک نیز نتایج آزمایشات متداول بتن خود تراکم حاوی این الیاف به نتایج مقاله Yehia و همکاران در سال ۲۰۱۶ [۹، ۲۶] تا حدی نزدیک بوده و مطابقت دارد به صورتی که در این تحقیق نیز در آزمایشات جریان اسلامپ و حلقه J در طرح های دارای این الیاف کارایی بتن نسبت به نمونه شاهد کاهش پیدا کرده است. اما در مورد آزمایشات رنومتر تحقیقات گذشته ای در مورد این الیاف صورت نگرفته که در این مقاله به آن پرداخته شد. در مورد نمونه های دارای الیاف CFRP با توجه به نتایج حاصل شده از این تحقیق در مورد آزمایشات متداول بتن با مقاله Mastali و همکاران [۱۳] و همچنین مقاله Arini و همکاران در سال ۲۰۲۰ [۱۴] مطابقت دارد بصورتی که با افزایش درصد این الیاف در آزمایشات بتن خودتراکم کارایی بتن کاهش پیدا می کند. در مورد آزمایشات رنومتر نیز تحقیقات گذشته ای در مورد این الیاف صورت نگرفته بود که در این مقاله به آن پرداخته شد.



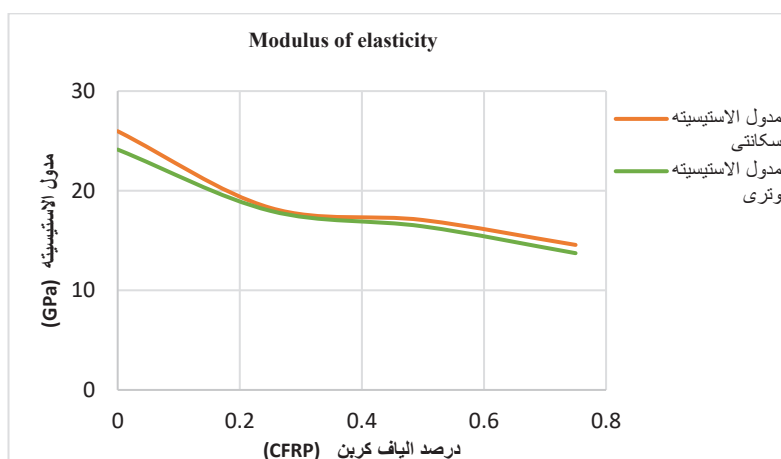
شکل ۲۸. منحنی مدول الاستیسیته طرح های دارای الیاف ماکروسنتتیک

Fig. 28. Elastic modulus curve with macrosynthetic fibers



شکل ۲۷. منحنی مدول الاستیسیته طرح های دارای الیاف فولادی

Fig. 27. Elastic modulus curve with steel fibers

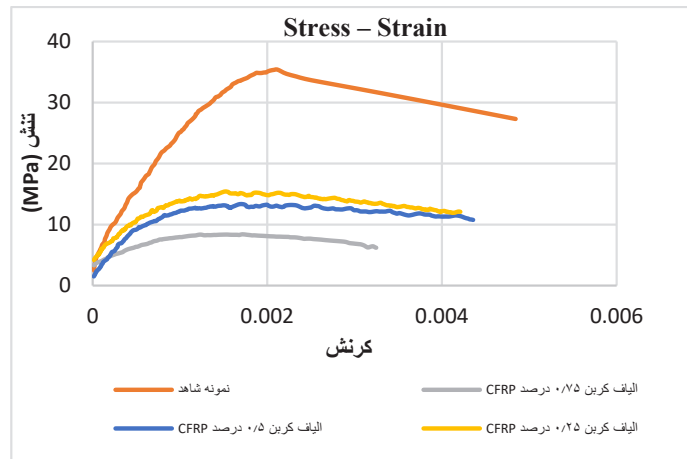


شکل ۲۹. منحنی مدول الاستیسیته طرح های دارای الیاف CFRP

Fig. 29. Elastic modulus curve with CFRP fibers

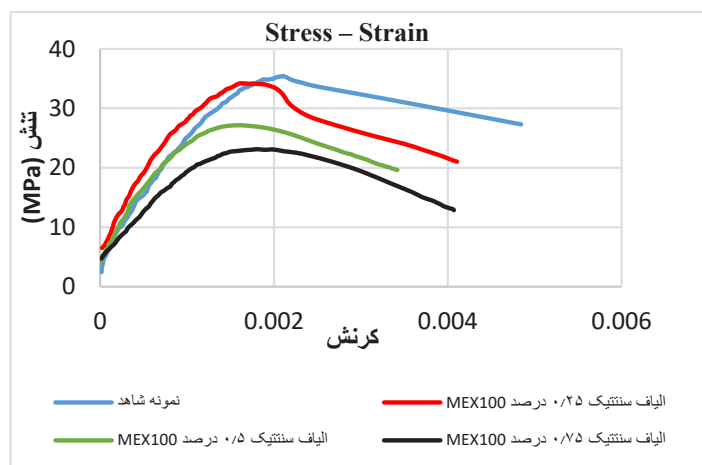
در الیاف فولادی مقاومت فشاری در طرح های حاوی ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد الیاف نسبت به نمونه شاهد به ترتیب با نرخ های حدودی ۴/۴ و ۱/۴ درصد افزایش پیدا کرده است و در طرح ۰/۷۵ درصد از این الیاف مقاومت فشاری حدود ۴/۶ درصد نسبت به نمونه شاهد کاهش پیدا کرده است. در الیاف ماکروسنتتیک نیز در طرح حاوی ۰/۲۵ درصد الیاف، مقاومت فشاری حدود ۳/۶ درصد افزایش پیدا کرده و در طرح های حاوی ۰/۵ و ۰/۷۵ درصد الیاف به ترتیب با نرخ های حدودی ۷/۵ و ۱۶/۷ درصد نسبت به نمونه شاهد با کاهش روبرو شده اند. در الیاف کربن CFRP مقاومت فشاری در تمامی مقادیر ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ از این الیاف با نرخ های حدودی ۲۸/۳، ۳۵/۹ و

۴۵/۲ نسبت به نمونه شاهد کاهش پیدا کرده اند. بطور کلی براساس مقادیر بدست آمده از طرح های مورد آزمایش با افزایش درصد الیاف ها مقاومت فشاری روندی نزولی پیدا کرده که می توان علت آن را جمع شدگی، برهم خوردن همگنی و توزیع نامناسب الیاف در بتن دانست. همچنین می توان فهمید که بکار بردن مقادیر پایین الیاف های فولادی و ماکروسنتتیک سبب افزایش مقاومت فشاری می گردد که با نتایج آزمایش طباطبائیان و همکاران و نژادی و همکاران [۱۱، ۲۷، ۲۸] مطابقت دارد و می توان علت آن را کاهش طول ترک ها و ریزترک ها در بتن دانست.



شکل ۳۰. منحنی تنش - کرنش طرح های دارای الیاف ماکروسنتتیک

Fig. 30. Stress-strain curve of designs with macrosynthetic fibers



شکل ۳۱. منحنی تنش - کرنش طرح های دارای الیاف CFRP

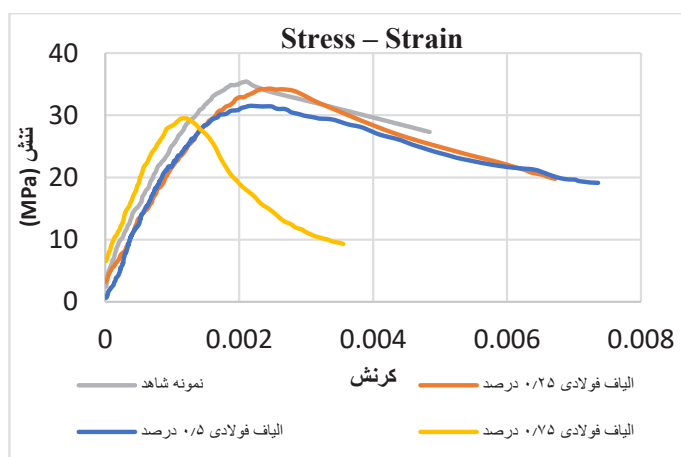
Fig. 31. Stress-strain curve of designs with CFRP fibers

می توان فهمید که افزایش مقادیر الیاف سبب کاهش تنش در نمودار های تنش - کرنش و همچنین کاهش مدول الاستیسیته و افزایش شکل پذیری در بتن های خود تراکم می گردد.

در میان الیاف های مورد استفاده بیشترین تغییرات نمودار ها در مقایسه با نمونه شاهد، مربوط به طرح های حاوی الیاف کربن پلیمری تقویت شده (CFRP) می باشد که در جایگاهی پایین تر از نمونه شاهد قرار گرفته و مقادیر مدول الاستیسیته آن نیز در طرح حاوی ۰,۷۵ درصد الیاف حدود ۴۳

۳-۸- آزمایش مدول الاستیسیته و تنش کرنش

نتایج بدست آمده از آزمایش تنش - کرنش برای طرح های ذکر شده در اشکال ۳۰ تا ۳۲ آورده شده است و همچنین نتایج بدست آمده از آزمایش مدول الاستیسیته ابتدا مطابق با روابطی که در بخش روند انجام آزمایشات گفته شد تخمین زده شدند که در جدول ۶ قابل مشاهده است و سپس مقادیر حقیقی آن در دو حالت تری و سکانتی بررسی گردید که منحنی های آن در شکل های ۳۰ تا ۳۲ آورده شده است. براساس نتایج حاصل شده



شکل ۳۲. منحنی تنش - کرنش طرح های دارای الیاف فولادی

Fig. 32. Elastic modulus curve with CFRP fibers

و مقایسه قرار گرفته نشده بود به عنوان دستاوردی جدید در این تحقیق مورد آزمایش قرار گرفت. در ادامه به بررسی نتایج اصلی حاصل از این تحقیق پرداخته می شود. در این پژوهش با توجه به آزمایشات انجام شده نتایج زیر حاصل گردید:

۱- در آزمایشات جریان اسلامپ و حلقه L که از آزمایشات تازه بتن خودتراکم می باشد افزودن الیاف به بتن سبب کاهش مقادیر اسلامپ می گردد. که در میان الیاف های مورد استفاده بیشترین کاهش مربوط به طرح ۰/۷۵ درصد الیاف کربن پلیمری تقویت شده (CFRP) و کمترین کاهش نسبت به نمونه شاهد مربوط به طرح ۰/۲۵ الیاف فولادی می شود.

۲- افزایش مقادیر الیاف سبب افزایش زمان آزمایش قیف V شکل گردید. که در میان طرح ها بیشترین زمان تخلیه بتن مربوط به طرح های دارای الیاف کربن پلیمری تقویت شده (CFRP) و کمترین آن مربوط به نمونه شاهد می باشد. علت این افزایش در الیاف CFRP لزجت و چسبندگی بالای بین الیاف و ملات بتن می باشد.

۳- در آزمایشات جعبه L و U نتایج بدست آمده نشان دهنده آن است که استفاده از مقادیر بالای هر یک از الیاف ها سبب کاهش قابلیت عبور و پرکنندگی در بتن های خودتراکم می گردد.

۴- در آزمایشات صورت گرفته توسط دستگاه رنومتر که در دو بخش آزمایشات رشد تنش و منحنی جریان انجام گردید. نتایج آزمایشات در بخش رشد تنش نشان دهنده آن است که مقادیر تنش جاری استاتیکی با حداکثر

درصد نسبت به نمونه شاهد کاهش پیدا کرده است که نشان دهنده شکل پذیری بالا و کاهش کارایی بتن خود تراکم حاوی این نوع الیاف می باشد. الیاف ماکروسنتتیک نیز در درصد های بالا در مقایسه با نمونه شاهد دارای سطح زیر منحنی تنش - کرنش کمتری بوده و همچنین مقادیر مدول الاستیسیته آن در طرح حاوی ۰/۷۵ درصد الیاف حدوداً ۱۵ درصد نسبت به نمونه شاهد کاهش پیدا کرده است. اما در طرح های دارای الیاف فولادی در درصد های پایین ۰/۲۵ و ۰/۵ منحنی های تنش - کرنش آن بسیار نزدیک به نمونه شاهد بوده و مقادیر مدول الاستیسیته آنها به ترتیب حدوداً ۱،۵ و ۰،۵ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش پیدا کرده است که نشان دهنده تحمل تنش بیشتر در طرح های حاوی این الیاف می باشد.

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی تاثیر انواع الیاف های نوین که شامل الیاف های فولادی، ماکروسنتتیک (MEX 100) و کربن پلیمری تقویت شده (CFRP) می شود بر رفتار رئولوژی بتن تازه خودتراکم به کمک آزمایش نوین رنومتر و آزمایش های متداول تعیین خواص خودتراکمی بتن تازه پرداخته شد و همچنین مدل رفتاری بتن خودتراکم سخت شده براساس آزمایش های تعیین خواص مکانیکی (مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته) بررسی گردید. با توجه به این که تاثیر استفاده از الیاف های MEX 100 و CFRP بر بتن های خودتراکم تا کنون در تحقیقات گذشته مورد بررسی

حاوی الیاف کربن پلیمری تقویت شده (CFRP) می باشد که در جایگاهی پایین تر از نمونه شاهد قرار گرفته و مقادیر مدول الاستیسیته آن نیز در طرح حاوی ۰/۷۵ درصد الیاف حدود ۴۳ درصد نسبت به نمونه شاهد کاهش پیدا کرده است که نشان دهنده شکل پذیری بالا و کاهش کارایی بتن خود تراکم حاوی این نوع الیاف می باشد.

منابع

- [1] H. Okamura, M. Ouchi, Self-compacting concrete, *Journal of advanced concrete technology*, 1(1) (2003) 5-15.
- [2] A. Committee, State-of-the-Art report on fiber reinforced concrete-ACI 544.1 R-96 (Reapproved 2002), *ACI Manual of Concrete Practice, Part, 6* (2008) 2008.
- [3] M. Nataraja, N. Dhang, A. Gupta, Stress-strain curves for steel-fiber reinforced concrete under compression, *Cement and concrete composites*, 21(5-6) (1999) 383-390.
- [4] T. Ponkiewski, The Rheological Properties of Fresh Steel Fibre Reinforced Self-Compacting Concrete, in: *Brittle Matrix Composites 8*, Elsevier, 2006, pp. 451-458.
- [5] T.S. Babu, M.S. Rao, D.R. Seshu, Mechanical properties and stress-strain behavior of self-compacting concrete with and without glass fibers, *Asian journal of civil Engineering (Building and Housing)*, 9(5) (2008) 457-472.
- [6] P. Wang, Z. Huang, J. Jiang, Y. Wu, Performance of hybrid fiber reinforced concrete with steel fibers and polypropylene fibers, in: *Civil Engineering and Urban Planning 2012*, 2012, pp. 458-461.
- [7] A. Khaloo, E.M. Raisi, P. Hosseini, H. Tahsiri, Mechanical performance of self-compacting concrete reinforced with steel fibers, *Construction and building materials*, 51 (2014) 179-186.
- [8] W.J. Long, H.X. Lin, Z.R. Chen, K.L. Zhang, W.L. Wang, Mechanical properties of fiber reinforced self-compacting concrete, in: *Applied Mechanics and*

گشتاور رابطه مستقیمی دارد بطوریکه هرچه مقادیر حداکثر گشتاور افزایش پیدا کند تنش جاری استاتیکی نیز با افزایش روبرو می شود. نتایج آزمایشات مربوط به بخش منحنی جریان که شامل تنش جاری دینامیکی، منحنی گشتاور-سرعت، ویسکوزیته پلاستیک و تغلیظ پذیری می شود نشان دهنده آن است که در منحنی های گشتاور-سرعت طرح دارای الیاف CFRP دارای بیشترین تغییر نسبت به نمونه شاهد می باشد. به اینصورت که با افزایش پیدا کردن مقادیر ویسکوزیته نسبی و مقاومت در برابر جریان و به همراه آن گشتاور افزایش پیدا کرده و منحنی خطی بدست آمده از این طرح به علت داشتن گشتاور بیشتر در مقایسه با نمونه شاهد شیب بیشتری داشته و در جایگاهی بالاتر قرار گرفته است. در مورد مقادیر تنش جاری دینامیکی، ویسکوزیته پلاستیک و تغلیظ پذیری بر اساس نتایج بدست آمده افزودن درصد های بهینه الیاف به بتن خود تراکم سبب افزایش این مقادیر می گردد.

۵- بطور کلی با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایشات بتن تازه خودتراکم حاوی الیاف می توان فهمید که افزودن مقادیر بالای الیاف می تواند خواص رئولوژی بتن را کاهش داده و کارایی بتن خودتراکم را کم کند. در میان الیاف های مورد استفاده در این تحقیق الیاف فولادی رفتاری نزدیک به بتن خودتراکم داشته و به ترتیب الیاف های ماکروستنتیک و کربن پلیمری تغییرات بیشتری را در بتن خودتراکم بوجود آورده اند.

۶- براساس نتایج بدست آمده از آزمایشات مقاومت فشاری بتن خودتراکم سخت شده می توان فهمید که بیشترین مقادیر مقاومت فشاری مربوط به طرح های دارای الیاف فولادی و کمترین آن مربوط به طرح های دارای الیاف CFRP می باشد. بطور کلی براساس مقادیر بدست آمده از طرح های مورد آزمایش با افزایش درصد الیاف ها مقاومت فشاری روندی نزولی پیدا کرده اند که می توان علت آن را جمع شدگی، برهم خوردن همگنی و توزیع نامناسب الیاف در بتن دانست. همچنین می توان فهمید که بکار بردن مقادیر پایین الیاف های فولادی و ماکروستنتیک سبب افزایش مقاومت فشاری می گردد که می توان علت آن را کاهش طول ترک ها و ریزترک ها در بتن دانست.

۷- براساس نتایج حاصل شده از آزمایشات مدول الاستیسیته و تنش- کرنش می توان فهمید که افزایش مقادیر الیاف سبب کاهش تنش در نمودار های تنش-کرنش و همچنین کاهش مدول الاستیسیته و افزایش شکل پذیری در بتن های خود تراکم می گردد. در میان الیاف های مورد استفاده بیشترین تغییرات نمودار ها در مقایسه با نمونه شاهد، مربوط به طرح های

- [18] ASTM C494, Standard specification for chemical admixtures for concrete, American Society For Testing And Materials, (1999).
- [19] INSO2930-2, Iranian National Standardization Organization., (In persian).
- [20] EFNARC, Specifications and guide lines for SCC, (2002-2005).
- [21] ASTM C192, Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory.
- [22] R. Farokhzad, S. Yaseri, M.H. Entezarian, A. Yavari, Investigating Effects of Sulfates on Compressive Strength of Different Types of Pozzolan Concrete and Measuring Penetration Rate by Ultrasound Tests at Different Ages, *Concrete Research*, 9(1) (2016) 113-130.
- [23] R. Farokhzad, H. Divandari, The effect of nano-caco₃ and nano-SiO₂ on properties of self-compacting concrete, *Journal of Structural and Construction Engineering*, 7(4) (2021) 187-201.
- [24] ASTM C469, Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression.
- [25] ACI 318, Building Code Requirements for Structural Concrete.
- [26] S. Yehia, S. Farrag, O. Abdelghaney, Performance of Fiber-Reinforced Lightweight Self-Consolidating Concrete Exposed to Wetting-and-Drying Cycles in Salt Water, *ACI Materials Journal*, 116(6) (2019).
- [27] F. Aslani, S. Nejadi, Mechanical characteristics of self-compacting concrete with and without fibres, *Magazine of Concrete Research*, 65(10) (2013) 608-622.
- [28] F. Aslani, S. Nejadi, Self-compacting concrete incorporating steel and polypropylene fibers: Compressive and tensile strengths, moduli of elasticity and rupture, compressive stress-strain curve, and energy dissipated under compression, *Composites Part B: Engineering*, 53 (2013) 121-133.
- [9] S. Yehia, A. Douba, O. Abdullahi, S. Farrag, Mechanical and durability evaluation of fiber-reinforced self-compacting concrete, *Construction and Building Materials*, 121 (2016) 120-133.
- [10] A.T. G. Golpasand Investigation of stress-strain curve and the effect of steel fibers on the mechanical properties of concrete, *GTCCAU 2017* (in Persian).
- [11] M. Tabatabaieian, A. Khaloo, A. Joshaghani, E. Hajibandeh, Experimental investigation on effects of hybrid fibers on rheological, mechanical, and durability properties of high-strength SCC, *Construction and Building Materials*, 147 (2017) 497-509.
- [12] E. Güneysi, Y.R. Atewi, M.F. Hasan, Fresh and rheological properties of glass fiber reinforced self-compacting concrete with nanosilica and fly ash blended, *Construction and Building Materials*, 211 (2019) 349-362.
- [13] M. Mastali, Z. Abdollahnejad, A. Dalvand, A. Sattarifard, M. Ilkainen, Comparative effects of using recycled CFRP and GFRP fibers on fresh-and hardened-state properties of self-compacting concretes: a review, *New Materials in Civil Engineering*, (2020) 643-655.
- [14] R.N. Arini, M. Permatasari, P.H. Simatupang, Comparative of the use of carbon and steel fiber to the mechanical properties of self compacting concrete, in: *Solid State Phenomena*, Trans Tech Publ, 2020, pp. 75-80.
- [15] R. Farokhzad, B. Karimi, Investigation on The effect of macro synthetic and steel fibers on stress strain and mechanical properties and durability of fiber reinforced concrete, *Concrete Research*, 14(2) (2021) 69-82.
- [16] M. Zolfaghazadeh, R. Farokhzad, Influence of various fibers on rheology behavior of self-compacting concrete, *Journal of Concrete Structures and Materials*, 5(1) (2020) 70-91.
- [17] ASTM C33, , Standard Specification for Concrete Aggregates.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Dehvedar, S. M. M. Hosseini, The effect of cementing additives on the rheological properties, thickening time, and compressive strength in drilling operation, Amirkabir J. Civil Eng., 55(6) (2023) 1237-1262.

DOI: 10.22060/ceej.2023.20644.7488

