

Influence of Various fibers on rheology Behavior of self-compacting concrete

Mohammadhossein Zolfagharzadeh
Faculty of Civil Engineering, Islamic Azad University, Qazvin, Iran

Reza Farokhzad^{2*}
Department of Civil Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran.
R.farokhzad@qiau.ac.ir

Abstract

One of the most important issues that is of great importance in self-compacting concrete is the rheological properties of self-compacting concrete, however mechanical properties and durability also require significant considerations. The objective is to determine the maximum amount of fiber, where the workability of concrete is maintained. In this research 10 mix designs have been studied, in which one mix is considered as control and the rest contain 0.1, 0.15, 0.2 fiber percentages of steel, glass and polypropylene. The results on rheology behavior shows, when the percentage of fibers increase, the concrete efficiency decreases, and the yield stresses dynamic and static, plastic viscosity and Thixotropy increases, and as a result it will reduce the rheological properties. In mixes with 0.2% polypropylene and glass fibers the minimum standard values for self-compacting concrete is reached whereas for more of fiber peruntage the self-compacting state is violated.

Keywords: Sself-Compacting Concerete, Fiber, Rheological Properties, Rheometer

بررسی تاثیر انواع الیاف در خواص رئولوژیکی بتن خودتراکم

دریافت مقاله: ۱۳۹۷-۰۸-۱۹

پذیرش مقاله: ۱۳۹۸-۱۲-۲۱

محمدحسین ذوالفقارزاده

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

رضا فرخ زاد*

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

R.farokhzad@qiau.ac.ir

چکیده

یکی از مهم ترین مباحثی که در بتن خودتراکم اهمیت زیادی دارد خواص رئولوژی بتن خودتراکم است اگر چه خواص مکانیکی و دوام نیز حائز اهمیت می باشد. به همین منظور، در این پژوهش به بررسی تاثیر انواع الیاف بر خواص رئولوژیکی بتن خودتراکم با استفاده از دستگاه رئومتر و مقایسه آن با آزمایش های سنتی (جریان اسلامپ، حلقه J، قیف V، جعبه L، جعبه U) پرداخته شده است. استفاده از الیاف در بتن خودتراکم باید به مقداری باشد که خواص رئولوژی بتن خودتراکم را از محدوده استاندارد خارج نکند. این بررسی بر روی ۱۰ طرح مخلوط انجام شده است، به این صورت که یک طرح شاهد و ۹ طرح جداگانه داری الیاف های پلی پروپیلن، فولادی و شیشه در سه درصد ۰/۱، ۰/۱۵ و ۰/۲ حجم کل بتن است. نتایج این بررسی نشان می دهد با افزایش حجم الیاف در بتن خودتراکم باعث افزایش تنش های تسلیم دینامیکی و استاتیکی، گرانیوی خمیری و تغلیظ می شود و در نتیجه باعث کاهش خواص رئولوژیکی خواهد شد. در طرح های ۰/۲ درصد الیاف پلی پروپیلن و شیشه حداقل حدود EFNARC در آزمایش های کارایی می باشد و استفاده بیشتر از این نوع الیاف، بتن را از حالت خودتراکمی خارج می کند.

کلمات کلیدی: بتن خودتراکم، الیاف، خواص رئولوژی، دستگاه رئومتر.

در سال های اخیر استفاده از بتن خودتراکم بسیار گسترش پیدا کرده است و به عنوان بتنی با کارایی بالا شناخته می شود که بدون نیاز به ویبره زدن، تحت اثر وزن خود در قالب جای گرفته و از فضا های کوچک بین میلگردها نیز به راحتی عبور می کند. برای ساختن بتن خودتراکم به منظور نیل به روانی مورد نظر، از ریزدانه و افزودنی روان ساز بیشتر و از سنگدانه با اندازه های بزرگ کمتر استفاده می شود [۱]، [۲]. از جمله ضعف بتن، مقاومت کششی بسیار ناچیز آن می باشد که این رفتار ترد و شکننده موجب شکست ناگهانی و فروریختن سازه های بتنی در هنگام زلزله می گردد [۳]، [۴]. از این رو، از بتن های دارای الیاف استفاده می کنند و از طرفی در مکان هایی که حجم آرماتور زیاد است بتن معمولی قادر به پر کردن تمام قالب نمی باشد که در این موارد از بتن خودتراکم استفاده می کنند. استفاده هم زمان از این دو مزیت یعنی بتن خودتراکم الیافی می تواند بسیاری از مشکلات اجرایی و ضعف های بتن (مقاومت کششی و برشی کم، ترک خوردگی) را بر طرف کند.

رئولوژی علمی است که با تغییر شکل و جاری شدن مواد سیال ارتباط دارد. مخلوط بتن خودتراکم تازه را می توان به عنوان ذرات معلق سنگدانه ها در خمیر سیمان و رفتار آن را به عنوان سیال غیرنیوتونی در نظر گرفت. رفتار جریان این بتن را با مدل بینگام نشان می دهند. اصلی ترین پارامترهای حاکم بر رفتار بتن تازه گرانیروی خمیری، تنش تسلیم و تغلیظ می باشد که در این پژوهش با استفاده از دستگاه رئومتر این پارامترها اندازه گیری شده و با آزمایش های سنتی ارزیابی بتن خودتراکم مقایسه شده است. این بررسی ها برای پی بردن به تاثیر انواع الیاف ها بر روی رفتار رئولوژیکی بتن خودتراکم می باشد، هر چند خواص مکانیکی و دوامی نمونه های ساخته شده مورد ارزیابی قرار گرفت ولی هدف این مقاله صرفا بررسی کامل رفتار رئولوژیکی بتن خودتراکم الیافی است. به همین منظور تحقیقات و پژوهش هایی در این زمینه صورت گرفته است که برخی از آن ها به صورت زیر است:

در اوایل دهه ۸۰ میلادی دوام سازه های بتنی از موضوعات مورد علاقه محققین به ویژه محققین ژاپنی قرار گرفت. برای ساخت یک سازه بتنی با دوام، بتن در فاز خمیری باید به خوبی متراکم و نگهداری گردد. وجود مشکلات اجرایی و هزینه بالای نیروی کار در ژاپن باعث تقویت ایده ساخت بتن خودتراکم توسط Okamura در سال ۱۹۸۶ گردید و اولین مدل بتن خودتراکم در سال ۱۹۸۸ تکمیل و ساخته شد. این بتن با ویژگی های خاص خود، امکانات جدیدی را در اختیار قرار داده که با استفاده از آن می توان بر مشکلاتی که ناشی از عدم تراکم مناسب در سازه های بتنی می باشد از جمله کاهش عمر و دوام سازه ها فائق آمد. [۵]

در سال ۲۰۱۴ AlirezaKhaloo و همکاران [۱] خواص رئولوژی و مکانیکی بتن خودتراکم حاوی الیاف فولادی را مورد بررسی قرار دادند و نتایج نشان داد که الیاف موجب کاهش کارایی بتن می شود و استفاده از درصد های بالای الیاف به خصوص ۲٪ موجب می شود کارایی بتن از حداقل مقدار تعیین شده در آیین نامه ها کمتر شود. همچنین با افزایش درصد الیاف مقاومت فشاری بتن کاهش می یابد که می تواند به دلیل تراکم کمتر نمونه ها باشد ولی مقاومت کششی و انرژی جذب شده تیرها با افزایش درصد الیاف افزایش می یابد.

در سال ۲۰۱۴ Helia Sojoudiasli و همکاران [۶] خواص رئولوژیکی، مکانیکی و مورفولوژیکی مخلوط های پلی پروپیلن الیاف کتان با طول ۱ میلی متر و اثر ترکیب اسید اکریلیک پلی پروپیلن یا یک آنیدرید پلی پروپیلن متصل به این الیاف نیز مورد بررسی قرار گرفته است. که در این مقاله از سه سازگار کننده استفاده شده: ۱- اسید آنیدرید پیوند با پلی پروپیلن (PPMA)، ۲- PPMA با شاخص جریان ذوب ۴/۵، ۳- اکریلیک اسید پیوند شده با پلی پروپیلن (PPAA) با توجه به مشاهدات میکروسکوپ الکترونی و آزمایش کششی، افزودن یک سازگاری کننده، چسبندگی بین فضای الیاف های کتان و ماتریکس پلیمر را بهبود بخشیده است. مدول کششی مخلوط حاوی ۳۰٪ الیاف کتان با ۲۰٪ بهبودی و مقاومت کششی ۶۰٪ بهبودی در مقایسه با پلی پروپیلن شده است. PPMA با بالاترین میزان مواد مورد نیاز برای بهبود رابط بین ماتریس PP و الیاف های کتان، کارآمدتر است.

در سال ۲۰۱۵ Małgorzata PAJAŁ و همکارش [۷] به بررسی آزمایشگاهی تأثیر الیاف های پلی پروپیلن بر ویژگی های مکانیکی بتن سخت شده پرداختند. تحقیقات آزمایشگاهی ارائه شده در این مقاله بر تاثیر الیاف های پلی پروپیلن بر مقاومت فشاری و خمشی بتن SCC تمرکز دارد. این مقاله با دو نسبت حجم ۰/۳٪ و ۰/۹٪ از الیاف PP، ۱۹ میلیمتر و ۳۸ میلیمتری می باشد. مقاومت فشاری PFR-SCC (تقویت شده با الیاف پلی پروپیلن) کمی با حضور الیاف PP کاهش می یابد. در مورد الیاف PP با طول ۱۹ میلی متر، مقاومت کششی، خمشی، تغییر شکل و مقاومت در برابر اولین ترک خوردگی نسبت به حجم الیاف افزایش می یابد. کارایی SCC با الیاف پلی پروپیلن طولی ۱۹ میلی متری افزایش یافت.

در سال ۲۰۱۷ V.R.Sivakumar و همکاران [۸] یک مطالعه تجربی بر اثرات ترکیبی الیاف شیشه و متاکائولین بر خواص رئولوژیکی، مکانیکی و دوام بتن خودتراکم داشتند که از نتایج آزمایش مشاهده شد، کاهش قابلیت کارایی با افزایش محتوای الیاف وجود داشت. مشخص شد که الیاف های شیشه ای تاثیر مثبتی بر مقاومت فشاری بتن ندارند. استحکام کششی و انعطاف پذیری الیاف شیشه ای SCC با افزایش مقدار مصرف الیاف افزایش می یابد. مطالعات دوام نشان می دهد که افزایش الیاف شیشه ای به طور جزئی باعث کاهش مقاومت در برابر یون کلرید و جذب آب بتن می شود. حضور متاکائولین و الیاف شیشه در مقادیر بهینه ۰/۸٪، می تواند خواص مکانیکی و دوام بتن خودتراکم را بهبود بخشد.

در سال ۲۰۱۸ Subhan Ahmad و همکارش [۹] به مطالعه اثر الیاف شیشه و پلی وینیل الکل (PVA) بر خواص بتن خودتراکم تازه و سخت شده پرداختند. آزمایش ها نشان داد که پس از اضافه کردن ویژگی های کارایی بتن خودتراکم الیافی (به عنوان مثال توانایی جریان، توانایی عبور و مقاومت در برابر جدایی) کمی کاهش می یابد. خواص بتن سخت بعد از افزودن الیاف بهبود یافته و این بهبود در ترکیبات SCC با الیاف شیشه بیشتر شده است و تاثیر بسیار کمی بر سرعت پالس اولتراسونیک دارد. حداکثر مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته برای مقدار مصرف الیاف های شیشه و PVA، ۰/۲٪ ثبت شد. مقاومت کششی و مقاومت خمشی برای مخلوط SCC تقویت شده با الیاف شیشه و PVA تا مقدار ۰/۳٪ الیاف افزایش یافته است. بیشترین ویژگی مکانیکی بهبود یافته پس از افزودن الیاف، مقاومت خمشی است و به دنبال آن مقاومت کششی و مقاومت فشاری می باشد.

در سال ۲۰۱۹ Erhan Güneyisi و همکاران [۱۰] به بررسی خواص تازه و رئولوژیکی بتن خودتراکم تقویت شده با الیاف شیشه، نانوسیلیس و خاکستر بادی پرداختند که در تحقیقاتشان از ۱۵ طرح مخلوط مختلف با مقادیر متفاوت از نانوسیلیس که جایگزین سیمان شده و درصد های حجمی مختلف الیاف شیشه استفاده کردند. مقادیر جایگزینی نانوسیلیس به جای سیمان ۰٪، ۲٪ و ۴٪ می باشد. مقدار الیاف شیشه استفاده شده هم ۰٪، ۰/۳۵٪، ۰/۷٪، ۱٪، ۱/۵٪ حجم کل بتن ساخته شده، است. آزمایش های جریان اسلامپ، زمان رسیدن به قطر ۵۰ (T50)، جعبه L و قیف V برای خواص تازه بتن انجام دادند. نتایج بدست آمده نشان می دهد که با افزایش درصد حجم الیاف شیشه قطر جریان اسلامپ کاهش پیدا می کند که با افزودن نانوسیلیس به الیاف شیشه این کاهش بیشتر می شود. همچنین این رویه باعث افزایش زمان برای قیف V و T50 شده است و نسبت ارتفاع جعبه L با افزایش مقدار نانوسیلیس و الیاف شیشه کاهش پیدا کرده است.

در سال ۱۳۹۴ علی صدر ممتازی و همکاران [۱۱] به بررسی اثر توأم نانوسیلیس و الیاف های مختلف (فلزی، پلی پروپیلن، شیشه) بر خواص مکانیکی و رئولوژی و دوام بتن خودتراکم پرداخته میشود، و نیز از آزمایش طیف سنجی تفرق اشعه ایکس استفاده کردند. بررسی نتایج حاصل از این تحقیق نشان می دهد که حضور توأم درصد بهینه الیافی (فلزی ۰/۳، پلی پروپیلن ۰/۲ و شیشه ۰/۲ درصد حجمی) و نانو سیلیس (۴ درصد وزنی سیمان) موجب بهبودی خصوصیات مکانیکی و دوام بتن خود تراکم می گردد.

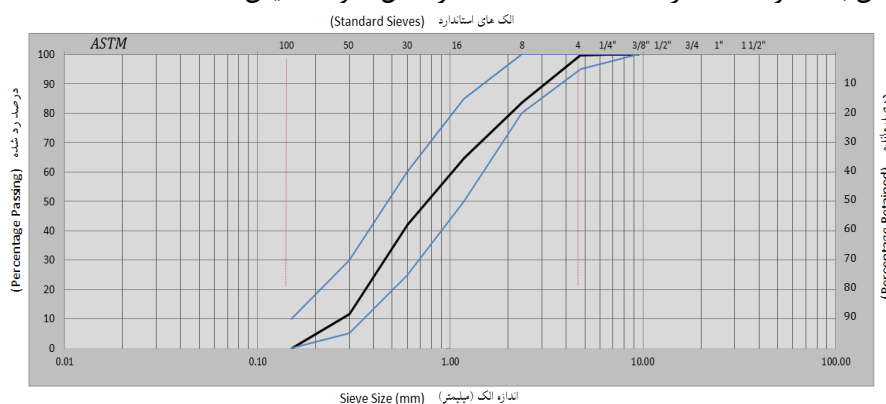
در سال ۱۳۹۵ قدوسی و همکارانش [۱۲] با استفاده از دستگاه رئومتر تنش تسلیم و گرانیروی خمیری بتن خودتراکم را بررسی کردند که نتیجه گرفتند تنش تسلیم (استاتیکی و دینامیکی) با گذشت زمان تغییر می‌یابد در حالی که این موضوع بر ویسکوزیته پلاستیک تاثیر چندانی نداشته و مستقل از زمان تغییر می‌کند و نرخ افزایش در تنش تسلیم استاتیکی بیشتر از تنش تسلیم دینامیکی است.

در این تحقیق به بررسی خواص رئولوژیکی بتن خودتراکم الیافی پرداخته شده است. که رفتار رئولوژی با استفاده از دستگاه رئومتر و تمام آزمایش های EFNARC که عبارت است از: اسلامپ جریان، حلقه ل، جعبه U، جعبه L، قیف V صورت گرفته است که در ادامه به بررسی و تفسیر نتایج بدست آمده و مقایسه بین نتایج بدست آمده، پرداخته می‌شود.

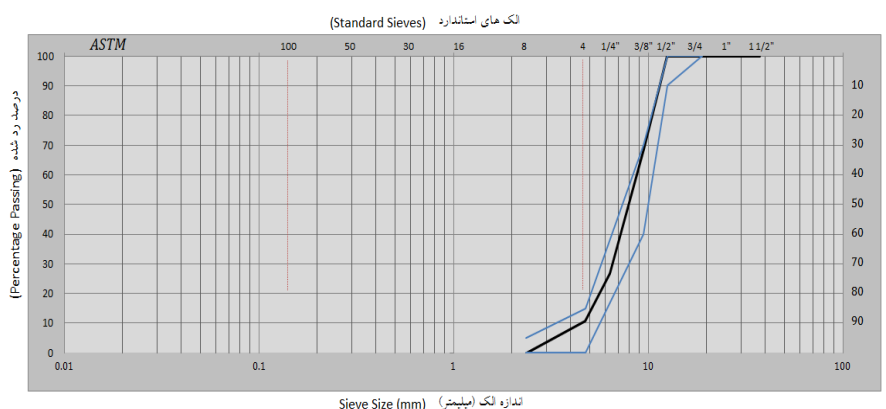
۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مواد و مصالح مصرفی

ماسه مصرفی از نوع رودخانه ای و دوبار شور با وزن مخصوص اشباع با سطح خشک (S.S.D) ۲۵۸۴ کیلوگرم بر مترمکعب با اندازه دانه بین ۴/۷۵ تا ۰/۰۷۵ میلیمتر می‌باشد. شن مصرفی از نوع شکسته نخودی با وزن مخصوص اشباع با سطح خشک (S.S.D) ۲۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب با اندازه دانه بین ۹/۵ تا ۳/۳۶ میلیمتر می‌باشد. منحنی دانه بندی ماسه و شن با محدوده استاندارد ASTM C33 [۱۳] در شکل ۱ و ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۱: نمودار دانه بندی ماسه مصرفی



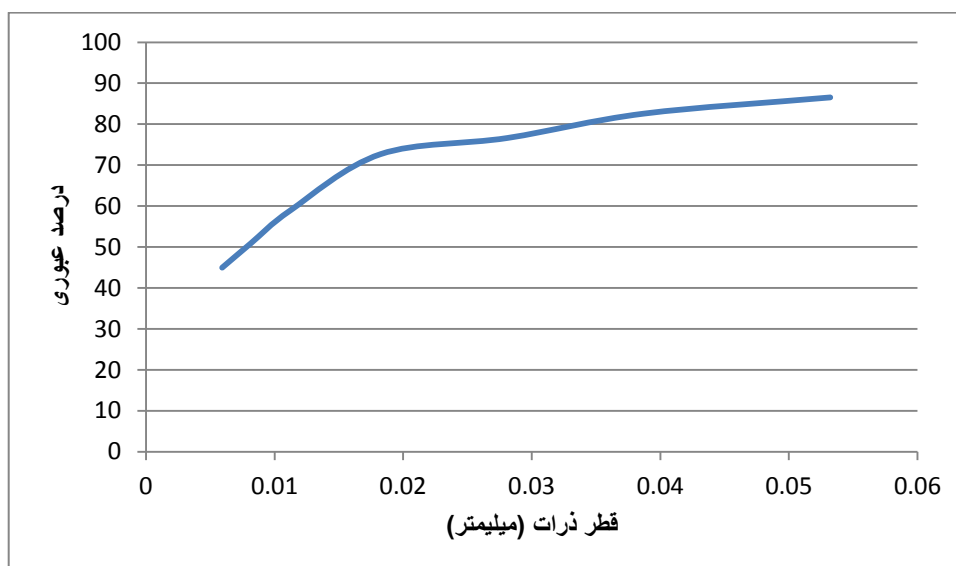
شکل ۲: نمودار دانه بندی شن مصرفی

سیمان استفاده شده در این مقاله سیمان پرتلند نوع دو می باشد که مشخصات آن در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: مشخصات سیمان

MPa ۳۱/۲۵	مقاومت فشاری ۲۸ روزه	خواص مکانیکی
MPa ۲/۶	مقاومت کششی ۲۸ روزه	
% ۲۰/۷۹	SiO ₂	ترکیبات شیمیایی
% ۴/۷۶	Al ₂ O ₃	
% ۳/۹۴	Fe ₂ O ₃	
% ۶۲/۲۸	CaO	
% ۳/۲۲	MgO	
% ۱/۹	SO ₃	
% ۰/۳۷	Na ₂ O	
% ۰/۸۴	K ₂ O	
% ۰/۸۲	CaO.f	

فیلر استفاده شده در این مقاله از نوع پودر سنگ ردا شده از الک ۲۰۰ می باشد که با استفاده از هیدرومتر دانه بندی شده و نمودار آن به صورت شکل ۳ می باشد.



شکل ۳ نمودار دانه بندی فیلر مصرفی

الیاف فولادی استفاده شده از نوع دوسر قلاب (3D) است. الیاف پلی پروپیلن مصرفی به طول ۱۲ میلی متر می باشد و الیاف شیشه مصرفی به طول ۱۲ میلی متر است. شکل ظاهری الیافها در شکل ۴ می باشد و دارای خواص مکانیکی و فیزیکی جدول ۲ است.



پ) الیاف شیشه



ب) الیاف پلی پروپیلن مصرفی
شکل ۴ الیاف‌ها



الف) الیاف فولادی مصرفی

جدول ۳: خواص مکانیکی و فیزیکی الیاف های استفاده شده

نوع الیاف	طول (سانتیمتر)	ضخامت (میلیمتر)	مقاومت کششی (مگاپاسگال)	چگالی (گرم/سانتی مترمکعب)	نقطه ذوب (°C)	مدول الاستیک (GPa)	رنگ	واکنش با قلیا
فولادی	۳/۵	۰/۸	۱۱۰۰	۷/۸	۱۵۱۶	-	طوسی	ندارد
پلی پروپیلن	۱/۲	-	۱۷۰	۰,۹۱	۱۶۰	۲/۷	سفید	-
شیشه	۱/۲	-	۱۶۰۰	۲,۷	-	۷۷	سفید	>۰/۸

ماده افزودنی استفاده شده، ابر روان کننده بر پایه پلی کربکسیلات است که نام تجاری آن DEGASET AX 5909 بوده و از شرکت آرابتن تهیه شده و مشخصات آن در جدول ۴ نمایش داده شده است.

جدول ۴: مشخصات ابر روان کننده

نوع، رنگ	مایع، کهربایی
مقدار کلر	ندارد
PH	7±1
وزن مخصوص	1.1 g/cm ²

۲-۲- طرح های مخلوط

به منظور بررسی تاثیر الیاف‌های مختلف بر روی خواص رئولوژی و مکانیکی بتن خودتراکم از ۱۰ طرح مخلوط استفاده شده است که یک طرح به عنوان شاهد و ۹ طرح دیگر دارای سه نوع الیاف در سه درصد مختلف به صورت جداگانه استفاده شده است. الیاف‌ها با توجه به حجم کل بتن در طرح‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. طرح مخلوط این بتن‌ها در جدول ۵ ارائه شده است. روش اختلاط طرح‌ها با توجه به استاندارد ASTM C192 انجام شده است [۱۴] بدین صورت که ابتدا سنگدانه‌ها (شن و ماسه) را داخل مخلوط‌کن به مدت ۳۰ ثانیه با هم مخلوط کرده و سپس سیمان و فیلر به مخلوط اضافه شده به مدت ۱ دقیقه با هم مخلوط می‌شوند. در ادامه دو سوم آب به آرامی داخل مخلوط‌کن اضافه می‌شود و یک سوم آب باقی مانده را با ابرروان کننده مخلوط کرده و به آرامی به مخلوط اضافه خواهد شد، مدت مخلوط شدن مصالح ۲ دقیقه است و در پایان الیاف‌ها را از هم جدا کرده و آرام آرام به بتن اضافه می‌شود تا الیاف به طور یکنواخت در تمام بتن پراکنده شود مدت مخلوط شدن در این مرحله ۲ دقیقه است.

جدول ۵- طرح اختلاط بتن‌های خودتراکم

طرح	سیمان*	w/c	آب	فیلر	ماسه	شن	الیاف فولادی**	الیاف شیشه	الیاف پلی پروپیلن	ابروان کننده
SH (شاهد)	۴۵۰	۰/۴۵	۲۰۲/۵	۲۰۶	۱۰۲۹/۵	۴۸۰/۵	۰	۰	۰	۹
0.1ST	۴۵۰	۰/۴۵	۲۰۲/۵	۲۰۶	۱۰۲۹/۵	۴۸۰/۵	٪۰/۱ (۷/۸۵)	۰	۰	۹
0.15ST	۴۵۰	۰/۴۵	۲۰۲/۵	۲۰۶	۱۰۲۹/۵	۴۸۰/۵	٪۰/۱۵ (۱۱/۷۷۵)	۰	۰	۹
0.2ST	۴۵۰	۰/۴۵	۲۰۲/۵	۲۰۶	۱۰۲۹/۵	۴۸۰/۵	٪۰/۲ (۱۵/۷)	۰	۰	۹
0.1GL	۴۵۰	۰/۴۵	۲۰۲/۵	۲۰۶	۱۰۲۹/۵	۴۸۰/۵	۰	٪۰/۱ (۲/۶)	۰	۹
0.15GL	۴۵۰	۰/۴۵	۲۰۲/۵	۲۰۶	۱۰۲۹/۵	۴۸۰/۵	۰	٪۰/۱۵ (۳/۹)	۰	۹
0.2GL	۴۵۰	۰/۴۵	۲۰۲/۵	۲۰۶	۱۰۲۹/۵	۴۸۰/۵	۰	٪۰/۲ (۵/۲)	۰	۹
0.1PP	۴۵۰	۰/۴۵	۲۰۲/۵	۲۰۶	۱۰۲۹/۵	۴۸۰/۵	۰	۰	٪۰/۱ (۰/۹۱)	۹
0.15PP	۴۵۰	۰/۴۵	۲۰۲/۵	۲۰۶	۱۰۲۹/۵	۴۸۰/۵	۰	۰	٪۰/۱۵ (۱/۳۶۵)	۹
0.2PP	۴۵۰	۰/۴۵	۲۰۲/۵	۲۰۶	۱۰۲۹/۵	۴۸۰/۵	۰	۰	٪۰/۲ (۱/۸۲)	۹

*واحد ها بر اساس کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد.

**درصد الیاف بر اساس درصد حجم کل بتن می‌باشد، مقادیر داخل پرانتز بر اساس کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد.

همان طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود تمام مصالح بتن ثابت در نظر گرفته شده است و فقط مقادیر الیاف تغییر می‌کند. طرح‌های مخلوط بر اساس رئولوژی بتن خودتراکم که مهم‌ترین پارامتر در این نوع بتن‌ها است انجام گرفته است، به این صورت که سعی شد خواص رئولوژی بتن در تمام طرح مخلوط‌ها در محدوده EFNARC قرار گیرد.

۳- آزمایش‌های بتن خودتراکم تازه

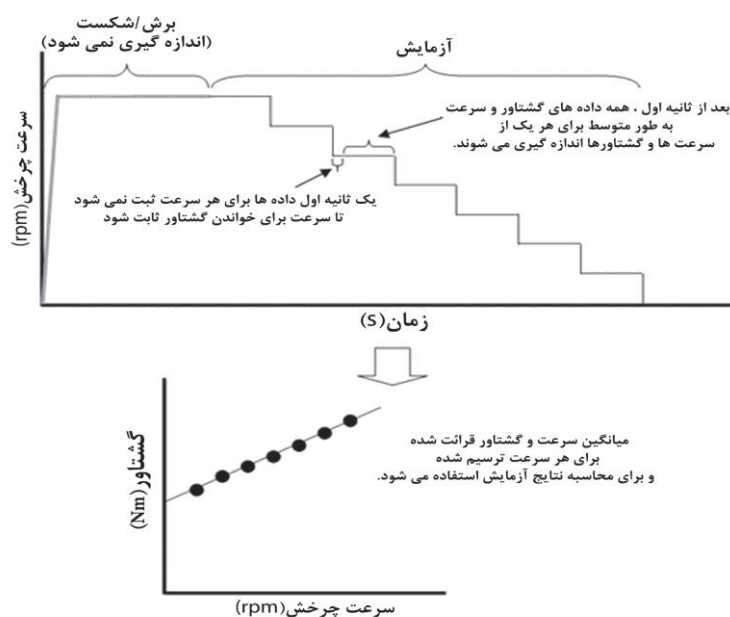
مهم‌ترین ویژگی بتن خودتراکم در خواص رئولوژی آن است که استفاده از هر نوع الیاف باعث می‌شود بتن از حالت خودتراکمی خارج شده و کارایی خود را از دست بدهد. به همین منظور از تمام آزمایش‌های بتن خودتراکم تازه در این مقاله استفاده شده است تا از تمام لحاظ (قابلیت پرمکندگی، قابلیت پایداری و قابلیت جریان) بررسی گردد. آزمایش‌های انجام شده شامل جریان اسلامپ، آزمایش حلقه L، آزمایش جعبه U، آزمایش جعبه L و آزمایش قیف V است که مطابق با دستورالعمل EFNARC ارزیابی شده است [۱۶، ۱۵]. روان کننده‌ی استفاده شده دارای دیرگیرکننده بوده و زمان کافی برای انجام تمام آزمایش‌ها با حفظ کارایی بتن خودتراکم، وجود داشته است.

برای انجام آزمایش تنش تسلیم استاتیکی و دینامیکی، ویسکوزیته پلاستیک و تغلیظ، دستگاه رئومتر مورد استفاده قرار گرفته است شکل ۵. رئومتر در واقع گشتاور پیچشی پره داخل بتن را در سرعت‌های مختلف چرخش گزارش می‌کند و با استفاده از

روابط بینگهام که در نرم افزار رئومتر قرار دارد، تنش تسلیم یا تنش جاری شدن استاتیکی بتن (حداقل تنش مورد نیاز برای شروع جریان از حالت استراحت بتن)، ویسکوزیته پلاستیک یا گرانروی خمیری (مقاومت بتن به جاری شدن تحت افزایش نرخ برشی)، تنش تسلیم یا تنش جاری شدن دینامیکی بتن (حداقل تنش مورد نیاز برای حفظ جریان بتن) و تغلیظ (شکل پذیری ساختار در حالت استراحت بتن و شکست ساختار در هنگام جریان بتن) به دست می آید. برای محاسبه تنش تسلیم استاتیکی، پره رئومتر با سرعت کم و ثابت $1/5$ دور بر دقیقه یا 0.25 دور بر ثانیه می چرخد. افزایش گشتاور بر اساس تابعی از زمان اندازه گیری می شود. بیشترین گشتاور اندازه گیری شده در طول آزمایش به عنوان تنش تسلیم استاتیکی ثبت می شود. برای رسم منحنی جریان با شکست دوره ای به وسیله چرخش پره از کمترین تا بیشترین سرعت به یکباره شروع می شود. این عمل به علت شکست هر گونه ساختار تغلیظ که ممکن است در تاریخچه بتن موجود باشد، انجام می گیرد. سپس سرعت پره در تعداد گام های خاصی که به وسیله کاربر مشخص می شود، کاهش می یابد (حداقل شش گام توصیه شده است). در طی هر گام، سرعت ثابت نگه داشته شده و گشتاور و سرعت چرخش ثبت می شود شکل ۶ [۱۷]. مقادیری که به دستگاه داده شده در جدول ۶ آمده است، تمام مقادیر داده شده به دستگاه در بازه ICAR می باشد [۱۸]. این آزمایش برای تعیین تنش تسلیم دینامیکی و ویسکوزیته پلاستیک و تغلیظ هر یک از مخلوط ها به کار می رود [۱۹].



شکل ۵ دستگاه رئومتر استفاده شده در آزمایشگاه



شکل ۶: نمودار شماتیک سرعت دستگاه رئومتر و تبدیل آن به نمودار گشتاور-سرعت [۱۸]

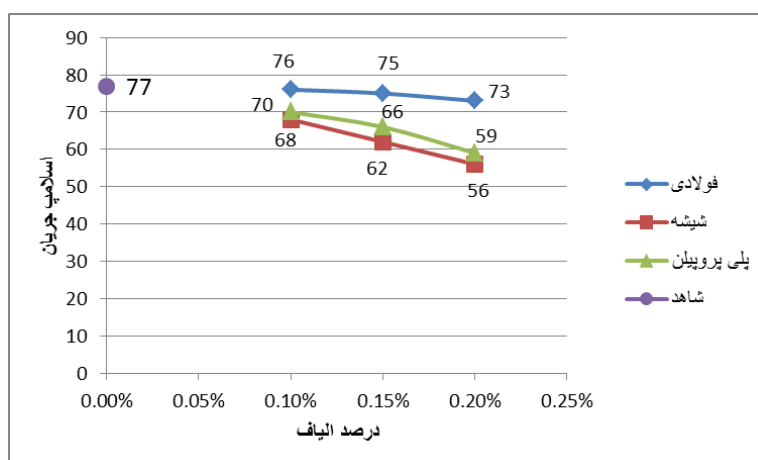
جدول ۶: مقادیر داده شده به دستگاه رنومتر برای انجام آزمایش های دینامیکی

کمترین سرعت چرخش پره (rpm)	بیشترین سرعت چرخش پره (rpm)	مدت زمان آزمایش در هر گام (s)	تعداد گام	سرعت همگن کردن بتن (rpm)	مدت زمان همگن کردن بتن (s)
۳	۳۶	۵	۷	۳۶	۲۰

۴- تفسیر و نتایج

۴-۱- جریان اسلامپ

استفاده از الیاف در بتن خودتراکم باعث کاهش کارایی این نوع بتن ها می شود. شکل ۷ تاثیر انواع الیاف های استفاده شده در حجم های مختلف را بر روی جریان اسلامپ نشان می دهد که دو الیاف پلی پروپیلن و شیشه با بیشتر شدن حجم الیاف، کاهش چشم گیری پیدا کرده است ولی در الیاف فولادی با افزایش حجم الیاف این کاهش بسیار کم می باشد. که در کل اضافه شدن الیاف قابلیت جریان و پرکنندگی بتن خودتراکم کاهش پیدا می کند. شکل ۸ الف طرح شاهد و شکل ۸ ب طرح ۰/۲٪ الیاف پلی پروپیلن می باشد که مشاهده می شود بتن خودتراکم بدون جداسدگی و آب انداختگی است. حدود قطر بازسدگی این آزمایش طبق EFNARC بین ۵۵ تا ۸۵ سانتی متر است.



شکل ۷ آزمایش جریان اسلامپ



ب) آزمایش جریان اسلامپ طرح ۰/۲٪ پلی پروپیلن

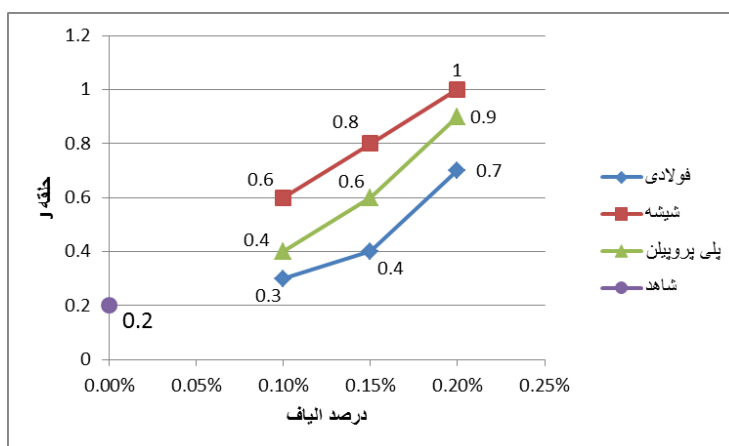


الف) آزمایش جریان اسلامپ طرح شاهد

شکل ۸ آزمایش جریان اسلامپ

۴-۲- حلقه J

شکل ۹ نتایج آزمایش حلقه J را نشان می‌دهد که با اضافه شدن حجم الیاف و بالا رفتن چسبندگی، انسداد بتن در بین میلگردهای حلقه J بیشتر شده و اختلاف ارتفاع سطح بتن خودتراکم در بیرون و داخل حلقه J بیشتر می‌شود. این موضوع در شکل ۱۰ به وضوح مشخص است که در طرح دارای ۰/۲٪ پلی‌پروپیلن (شکل ۱۰ ب) قابلیت عبور بتن خودتراکم کمتر از طرح شاهد (شکل ۱۰ الف) می‌باشد. در بین الیاف‌ها، الیاف فولادی کمترین تاثیر و الیاف شیشه بیشتر تاثیر را در این آزمایش گذاشته است. اختلاف ارتفاع بتن داخل و بیرون حلقه J طبق EFNARC نباید بیشتر از یک سانتی متر باشد.



شکل ۹ آزمایش حلقه J



آزمایش J-Ring طرح ۰/۲٪ پلی پروپیلن

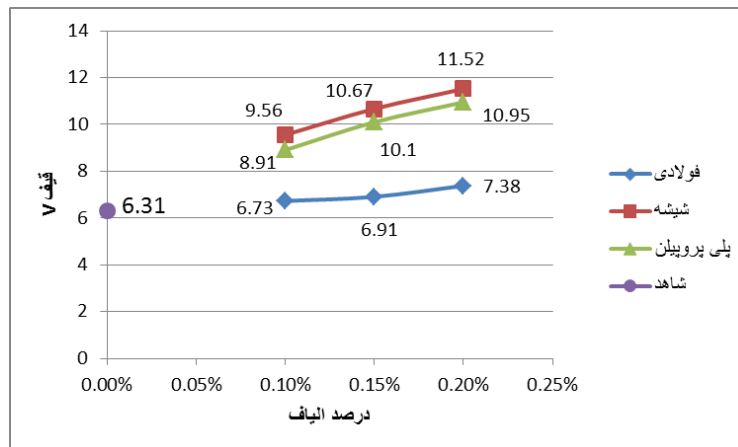


آزمایش J-Ring طرح شاهد

شکل ۱۰ آزمایش حلقه J

۴-۳- قیف V

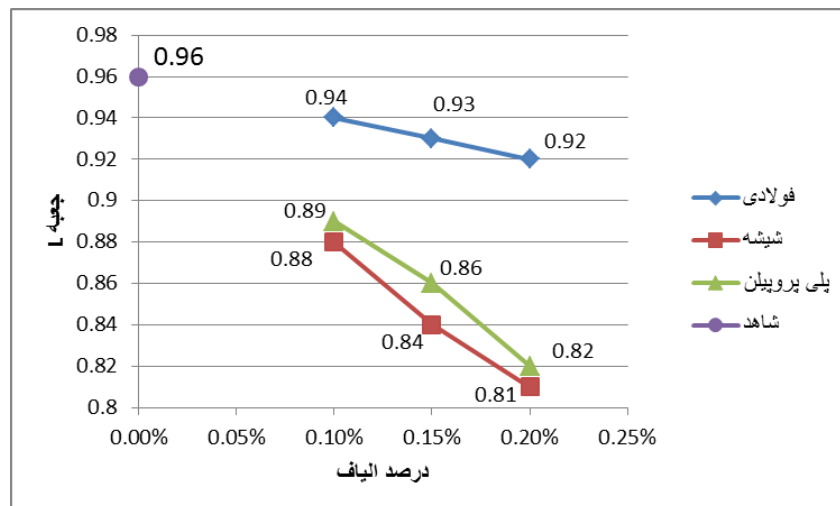
نتایج آزمایش قیف V نشان می‌دهد که با اضافه کردن الیاف به طرح بتن خودتراکم شاهد، زمان خروج بتن از قیف افزایش پیدا می‌کند که در نتیجه قابلیت پرکنندگی بتن کاهش می‌یابد. الیاف پلی‌پروپیلن و شیشه رفتاری شبیه به هم داشتند ولی الیاف شیشه زمان بیشتری طول کشید تا بتن از قیف V خارج شود و در الیاف فولادی با اضافه شدن الیاف تاثیر زیادی در زمان خروج بتن از قیف نداشت در شکل ۱۱ می‌توان این نتایج را مشاهده کرد. در حین انجام این آزمایش به خروج بتن از دهانه قیف V هم دقت شد که در تمام طرح‌ها بتن به صورت یکنواخت و بدون جداشدگی خارج شد و با افزایش حجم الیاف چسبندگی بتن افزایش یافت. سرعت خروج بتن از قیف V در EFNARC بین ۶ تا ۱۲ ثانیه است.



شکل ۱۱ آزمایش قیف V

۴-۴- جعبه L

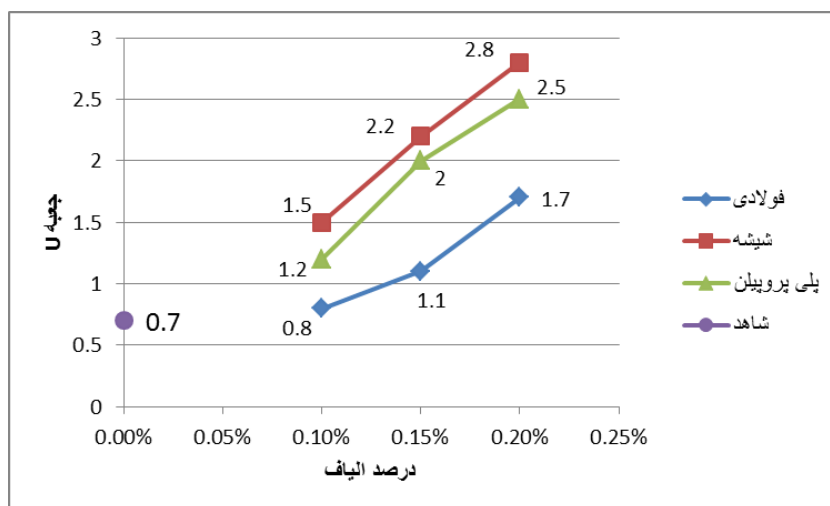
در آزمایش جعبه L این نتیجه را می توان گرفت که با اضافه شدن الیاف به بتن خودتراکم پدیده انسداد بین میلگردها بسیار بالا می رود مخصوصا برای الیاف ها پلی پروپیلن و شیشه که تاثیر زیادی در کارایی بتن خودتراکم دارند. شیب کاهش نسبت انسداد، با افزایش حجم الیاف در الیاف فولادی کم بوده که نشان از تاثیر کم این نوع الیاف در پدیده انسداد بتن های خودتراکم می باشد. این نتایج را در شکل ۱۲ می توان مشاهده کرد. نسبت ارتفاع انتهای بخش افقی و ابتدای بخش عمودی طبق EFNARC باید بین ۰/۸ تا ۱ باشد.



شکل ۱۲ آزمایش جعبه L

۴-۵- جعبه U

سخت گیرانه ترین آزمایش بتن خودتراکم تازه، آزمایش جعبه U است که مانند نتایج آزمایش های قبلی بتن خودتراکم تازه با افزایش حجم الیاف در بتن، کارایی کاهش پیدا می کند. در شکل ۱۳ می توان دید که با افزایش حجم الیاف، چسبندگی ذرات بتن خودتراکم به همدیگر بیشتر شده و بتن نمی تواند تحت اثر وزن خود در مجرای دیگر بالا بیاید و منجر به این می شود که اختلاف ارتفاع بین دو مجرا زیاد شود. این مسئله برای بتن های خودتراکم دارای الیاف شیشه بیشتر از بقیه الیاف ها است.



شکل ۱۳ آزمایش جعبه U

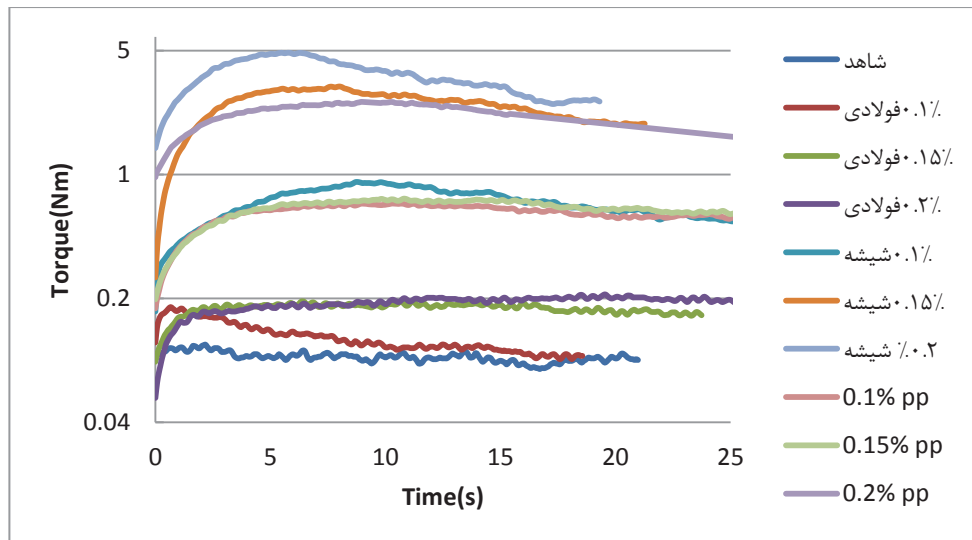
در کل آزمایش‌های بتن خودتراکم تازه نشان می‌دهد، با افزایش حجم الیاف به دلیل تراکم بیشتر الیاف در بتن باعث افزایش چسبندگی شده و کارایی بتن (قابلیت پرکنندگی و قابلیت جریان) را کاهش می‌دهد. تمامی طرح‌های اختلاط ساخته شده از نظر رئولوژی داخل محدوده‌ی EFNARC بوده و می‌توان گفت تمام طرح‌ها بتن از نوع خودتراکم است. در بین الیاف‌ها، الیاف فولادی از کارایی بهتری نسبت به الیاف پلی پروپیلن و شیشه دارد که به دلیل جنس فولاد، مواد داخل بتن خودتراکم در تماس با الیاف فولادی به راحتی روی هم سر می‌خورند. در بین بتن‌های خودتراکم ساخته شده بدیهی است که طرح مخلوط شاهد به دلیل نبود الیاف، عملکرد بهتری دارد. مشاهده می‌شود که هم در طرح الیافی و هم در طرح شاهد شکل ۸، بتن خودتراکم ساخته شده بدون جداسازی و آب انداختگی می‌باشد. در بین الیاف‌ها، بتن خودتراکم با ۰/۱٪ الیاف فولادی بهترین عملکرد و ۰/۲٪ الیاف شیشه ضعیف‌ترین عملکرد را از خود نشان دادند.

۴-۶- دستگاه رئومتر (تنش تسلیم، ویسکوزیته پلاستیک و تغلیظ)

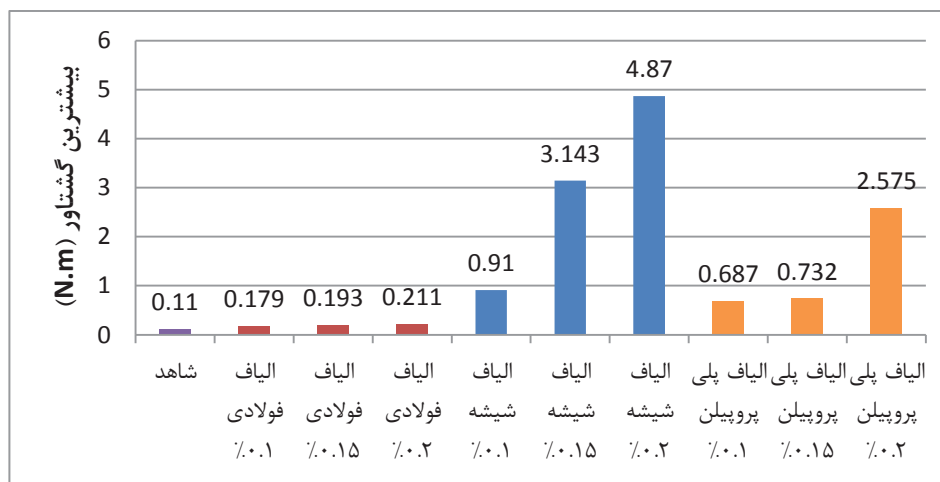
نتایج آزمایش رئومتر به دو بخش استاتیکی و دینامیکی تقسیم می‌شود:

۴-۶-۱- استاتیکی

در شکل ۱۴ مقادیر گشتاور برای هر یک از الیاف‌ها با درصد‌های مختلف در طول مدت آزمایش نشان داده شده است. در ابتدای هر آزمایش منحنی صعودی است تا موقعی که بتن خودتراکم بریده شود و بعد از آن منحنی نزولی می‌شود، آزمایش تا زمانی که مطمئن شویم نمودار در حال افت است و یا در حالتی که گشتاور روی یک خط ادامه دارد و بیشترین مقدار گشتاور خود را ثبت کرده است ادامه می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که هر چه درصد الیاف بیشتر باشد مقدار بیشترین گشتاور هم بیشتر می‌شود، این امر به دلیل افزایش یافتن لزجت بتن خودتراکم الیافی می‌باشد. در بین الیاف‌ها مشخص است که رفتار الیاف فولادی نزدیک به نمونه شاهد است و الیاف پلی پروپیلن و شیشه گشتاور بیشتری نسبت به الیاف فولادی دارند که نشان می‌دهد الیاف فولادی تاثیر آنچنانی روی گشتاور استاتیکی نداشته است شکل ۱۵.



شکل ۱۴ مقایسه مقادیر استاتیکی گشتاور- زمان بتن خودتراکم شاهد و الیاف های استفاده شده

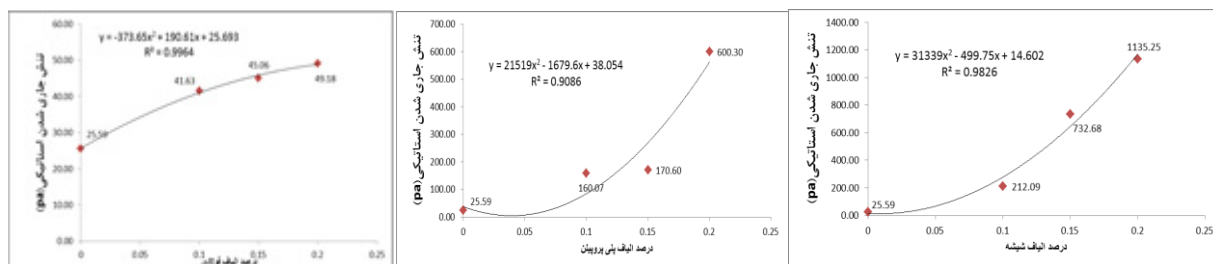


شکل ۱۵ بیشترین مقدار گشتاور در هر طرح اختلاط بتن خودتراکم

برای بدست آوردن تنش جاری شدن استاتیکی از رابطه (۲) استفاده می کنیم به صورتی که بیشترین مقدار گشتاور که دستگاه محاسبه کرده است را داخل رابطه قرار می دهیم. تنش جاری محاسبه شده برای هر طرح در شکل ۱۶ آمده است.

$$\tau_o = \frac{2T}{\pi D^3 \left(\frac{H}{D} + \frac{1}{3} \right)} \quad (2)$$

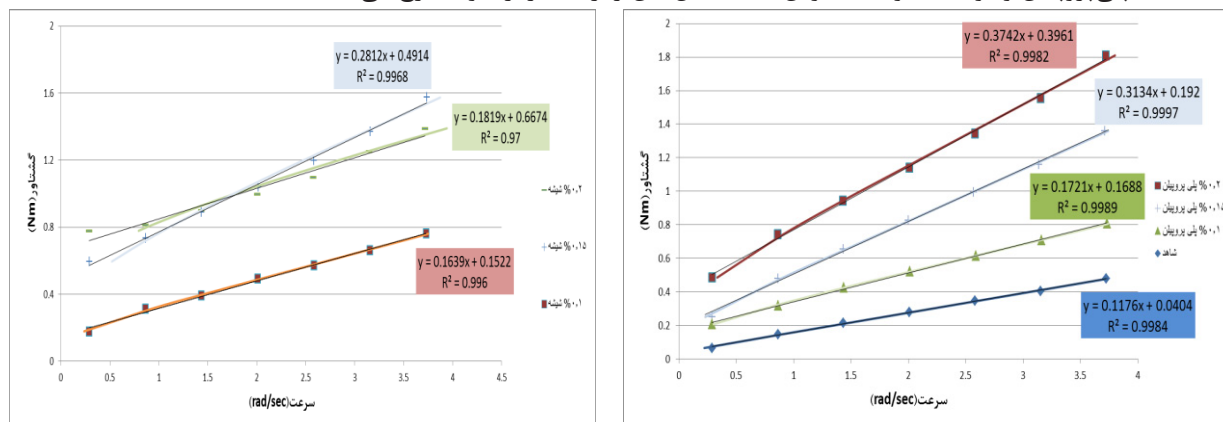
که در آن T بیشترین گشتاور، D قطر پره، H ارتفاع پره است. تنش جاری شدن استاتیکی با بیشترین مقدار گشتاور رابطه ی مستقیم دارد بنابراین هر چه مقدار ماکزیمم گشتاور بیشتر باشد تنش جاری شدن استاتیکی هم بیشتر می شود. به عبارت دیگر تنش جاری شدن استاتیکی مقدار نیرویی است که باید به بتن اعمال شود تا بتن از حالت سکون به حرکت بیوفتد، که در این بین بیشترین مقدار برای الیاف ۰/۲٪ شیشه و کمترین مقدار برای طرح شاهد است. در شکل ۱۶ شیب منحنی خط برآزش در الیاف فولادی بسیار کمتر از الیاف های پلی پروپیلن و شیشه است که نشان می دهد رفتار رئولوژی بتن خودتراکم دارای الیاف فولادی بسیار نزدیک به نمونه شاهد است.



شکل ۱۶ تنش جاری شدن استاتیکی هر طرح مخلوط

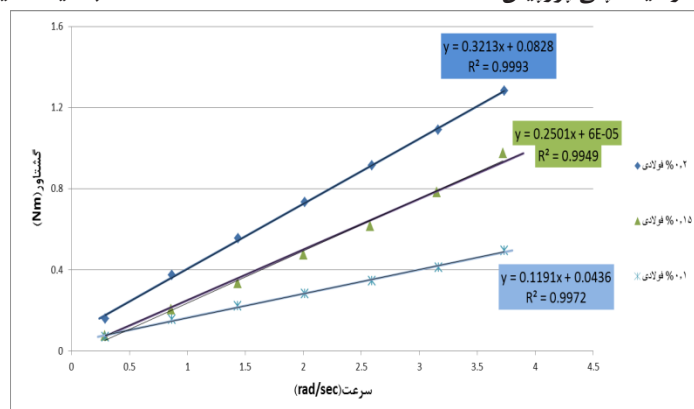
۴-۶-۲-دینامیکی

رابطه ی بین مقاومت در برابر جریان و ویسکوزیته نسبی طرح های مخلوط با درصد های مختلف الیاف ها، در شکل ۱۷ آورده شده است. ملاحظه می شود که در الیاف های پلی پروپیلن و فولادی با افزایش الیاف، مقاومت در برابر جریان و ویسکوزیته نسبی افزایش پیدا می کند. در الیاف شیشه، مقدار ۰/۱۵٪ نسبت به ۰/۲٪ الیاف، مقاومت در برابر جریان افزایش پیدا کرده ولی ویسکوزیته کاهش پیدا کرده است که دلیل آن می تواند هوای ایجاد شده از ابر روان کننده باشد که به دلیل حجم بالای الیاف از بتن خارج نشده و ویسکوزیته نسبی را کاهش داده است این نتیجه با آزمایش کیونگ کو که در سال ۲۰۱۵ انجام داده است، مطابقت دارد [۲۰]. در مورد الیاف های دیگر چنین اتفاقی مشاهده نشده است، می توان این طور گفت که الیاف شیشه باعث نگه داشتن هوا در داخل بتن می شود ولی الیاف های پلی پروپیلن و فولادی هوای محبوس شده داخل بتن را راحت تر از خود خارج می کند.



ب) الیاف شیشه

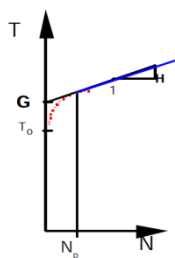
الف) نمونه شاهد و الیاف پلی پروپیلن



ب) الیاف فولادی

شکل ۱۷ نمودارهای گشتاور- سرعت چرخش طرح های ساخته شده

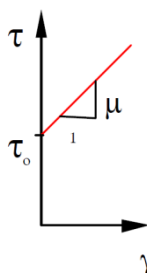
در شکل ۱۷ معادله خط برآیند به این صورت است: [۱۴]



$$T = G + HN \quad (2)$$

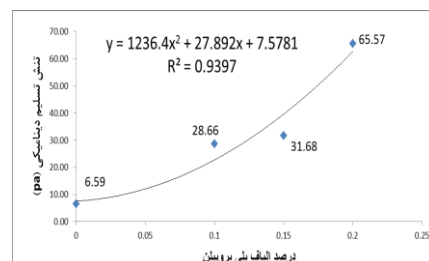
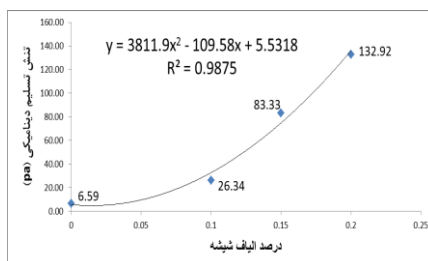
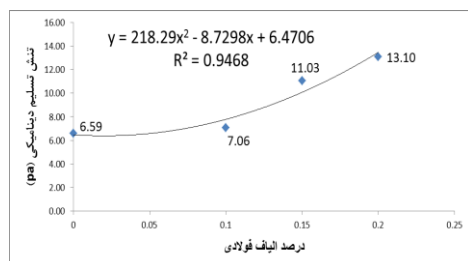
که در آن T گشتاور (Nm)، G مقاومت در برابر جریان (Nm)، H ویسکوزیته نسبی (Nms)، N سرعت دورانی ($rounds/s$) می باشد.

همه ی مقادیر تنش جاری شدن دینامیکی، ویسکوزیته پلاستیک و تغلیظ شکل های ۱۸، ۱۹، ۲۰ با افزایش مقدار درصد الیاف، افزایش پیدا کرده است، که نشان می دهد اضافه کردن الیاف کارایی بتن را کاهش می دهد. این مقادیر از تبدیل نمودار گشتاور-سرعت به تنش برشی-نرخ برش بدست می آید. معادله خط برآیند نمودار بدست آمده به صورت زیر است: [۱۴ و ۱۹]



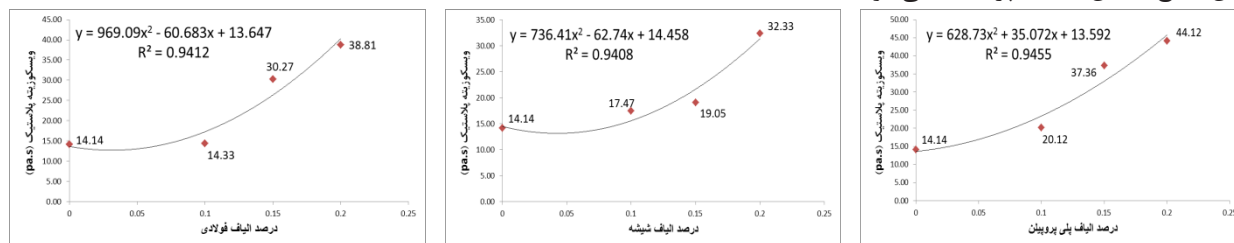
$$\tau = \tau_0 + \gamma\mu \quad (3)$$

که در آن τ تنش برشی (Pa)، γ نرخ برش ($1/S$)، τ_0 تنش تسلیم (Pa)، μ ویسکوزیته پلاستیک ($Pa.s$) می باشد. افزایش تنش جاری شدن دینامیکی در الیاف فولادی بسیار کمتر از دو الیاف دیگر می باشد یعنی شیب منحنی خط برازش کمتر از دو الیاف دیگر است، که این امر به دلیل تاثیر کم الیاف فولادی بر روی تنش جاری شدن دینامیکی می باشد. این بدان معناست که برای حفظ جریان بتن خودتراکم با الیاف فولادی نیروی خیلی کمتری نیاز است و این باعث می شود بتن خودتراکم مسیر بیشتری را با استفاده از نیروی وزن خود طی کند.



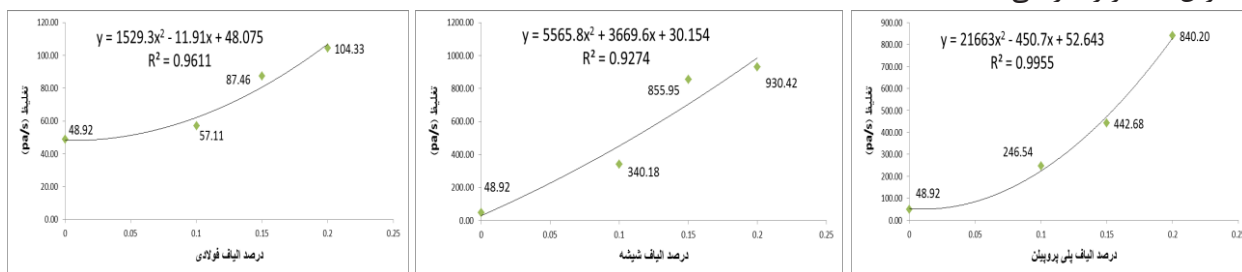
شکل ۱۸ تنش تسلیم دینامیکی

همانطور که در شکل ۱۹ مشاهده می شود ویسکوزیته پلاستیک در الیاف شیشه کمتر از دو الیاف دیگر است که به دلیل هوای داخل بتن می باشد که قبلا به آن اشاره شده بود بدین صورت که هوای داخل بتن خودتراکم، لزجت بتن را کاهش می دهد و این نتیجه منافاتی با نتیجه تنش جاری شدن دینامیکی که مقدارش برای الیاف شیشه بیشتر از دو الیاف دیگر بود ندارد چون این دو پارامتر طبق بررسی های ICAR [۱۸] هیچ رابطه ای با هم ندارند. در مقایسه بین نتایج به این مسئله پرداخته می شود.



شکل ۱۹ ویسکوزیته پلاستیک

با افزایش مقدار الیاف، تغلیظ هم افزایش پیدا کرده است، بدین معناست که انرژی مورد نیاز برای شکستن ساختار مواد بیشتر می شود و در نتیجه جداسازی ذرات بتن کاهش پیدا می کند که این نتیجه برای بتن های خودتراکم بسیار مهم است. در بین الیاف ها، الیاف شیشه بیشترین تاثیر را روی این پارامتر گذاشته است و الیاف فولادی کمترین مقادیر را دارا می باشد.

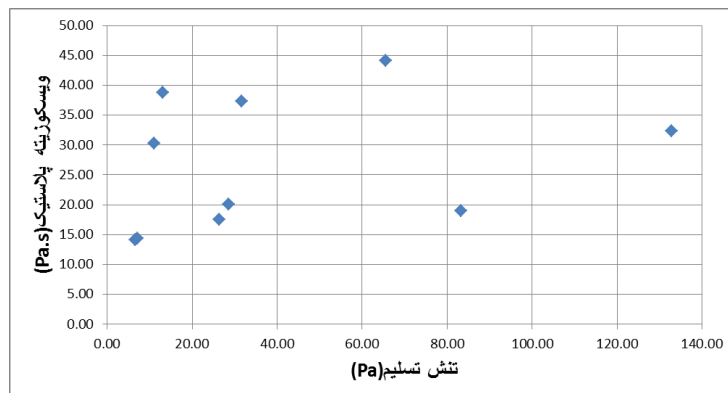


شکل ۲۰ تغلیظ

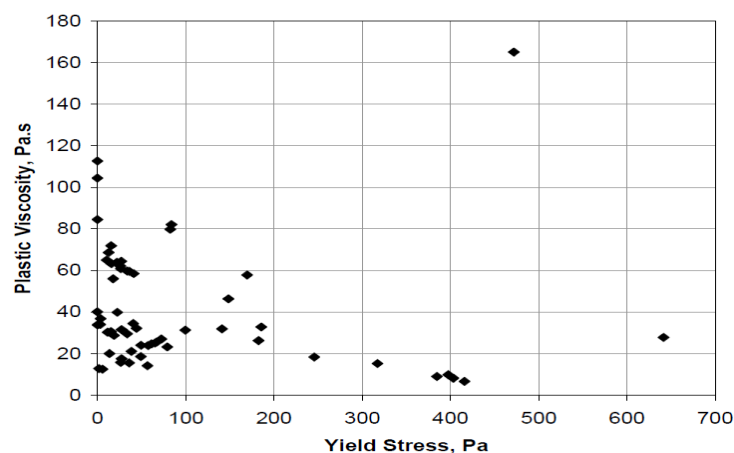
۵- مقایسه بین نتایج

۵-۱- بررسی رابطه بین تنش تسلیم-ویسکوزیته پلاستیک

شکل ۲۱ نشان دهنده آن است که رابطه ای بین این دو پارامتر وجود ندارد که توسط دستگاه رنومتر اندازه گیری شود و باید هر کدام به طور مستقل مورد بررسی قرار گیرد. این مقایسه در ICAR [۱۸] هم انجام گرفته است و همین نتیجه را گرفته اند، در شکل ۲۲ مقایسه ICAR را نشان می دهد.



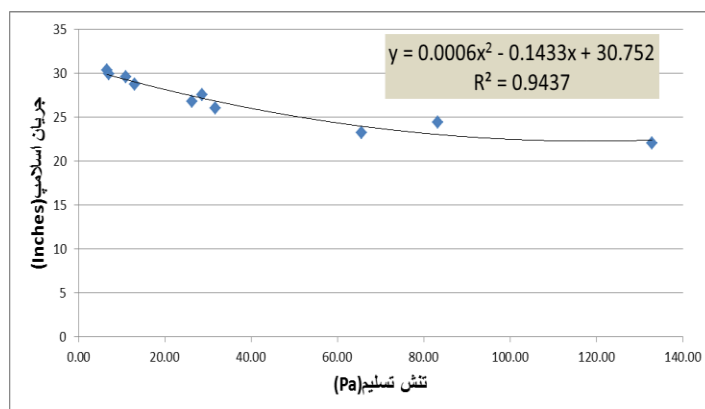
شکل ۲۱ ارتباط بین تنش تسلیم و ویسکوزیته پلاستیک



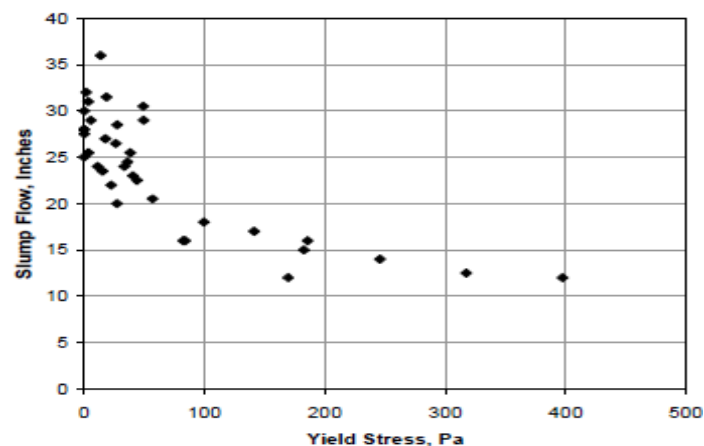
شکل ۲۲ ارتباط بین تنش تسلیم و ویسکوزیته پلاستیک در آزمایش های ICAR

۵-۲- مقایسه تنش تسلیم دینامیکی با آزمایش جریان اسلامپ

مشاهده می شود که با افزایش آزمایش جریان اسلامپ، تنش تسلیم دینامیکی کاهش پیدا کرده است. که نشان می دهد این دو پارامتر با هم رابطه نزدیک دارند که این رابطه معکوس می باشد. یعنی هر چه بتن خودتراکم روان تر باشد نیروی کمتری هم برای جاری شدن هم برای حفظ جریان نیاز دارد که در نتیجه قابلیت پرمکنندگی بهتری دارد. شکل ۲۳ نشان دهنده ی این ارتباط است. در شکل ۲۴ نتایج آزمایش ICAR [۲۷] را نشان می دهد که نزدیک به آزمایش های انجام شده می باشد.



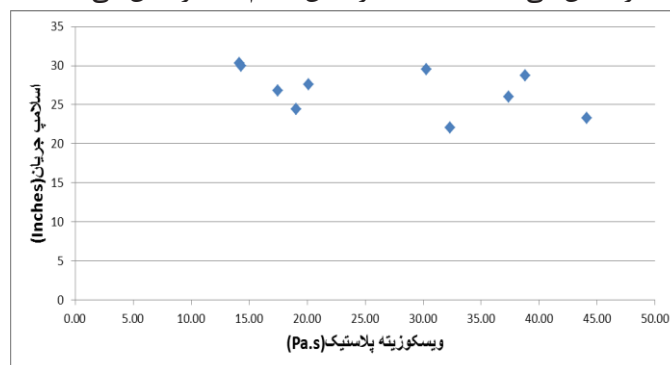
شکل ۲۳ ارتباط بین تنش تسلیم دینامیکی و جریان اسلامپ



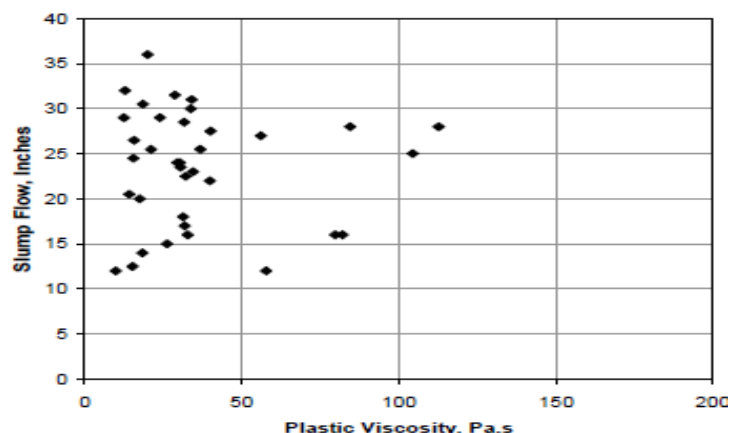
شکل ۲۴ ارتباط بین تنش تسلیم دینامیکی با جریان اسلامپ در ICAR

۳-۵- مقایسه ویسکوزیته پلاستیک با آزمایش جریان اسلامپ

در رابطه با ارتباط بین ویسکوزیته پلاستیک و جریان اسلامپ مشاهده می‌شود که هیچ همبستگی بین نتایج وجود ندارد. این نتایج با نتایج گزارش ICAR تطابق دارد. شکل ۲۵ این نتیجه را نشان می‌دهد. در شکل ۲۶ نتیجه‌ی همین مقایسه در ICAR را نشان می‌دهد که صحت آزمایش انجام شده را بیان می‌کند.



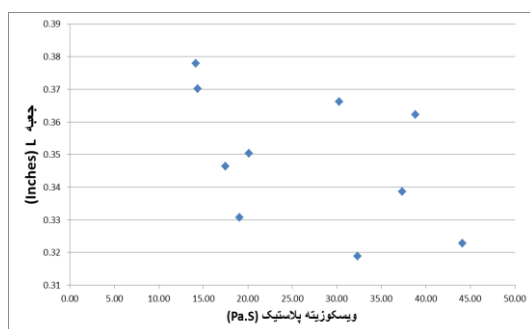
شکل ۲۵ ارتباط بین ویسکوزیته پلاستیک و جریان اسلامپ



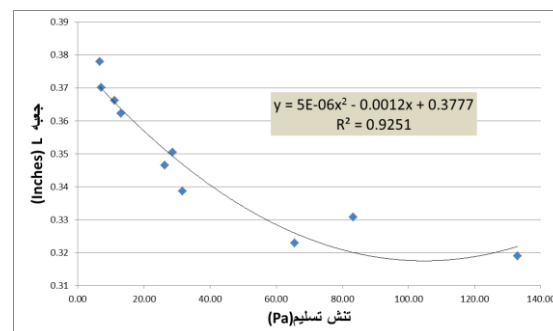
شکل ۲۶ ارتباط بین ویسکوزیته پلاستیک و ویسکوزیته نسبی با جریان اسلامپ در ICAR

۴-۵- مقایسه تنش تسلیم و ویسکوزیته پلاستیک با آزمایش جعبه L

همانطور که در شکل ۲۷ دیده می‌شود با کاهش نسبت ارتفاع آزمایش جعبه L، تنش تسلیم افزایش پیدا می‌کند، که نشان می‌دهد این دو پارامتر با هم رابطه عکس دارند. اما آزمایش جعبه L در مقایسه با ویسکوزیته پلاستیک هیچ ارتباط و همبستگی را نشان نمی‌دهد که شکل ۲۸ گویای این نتیجه است.



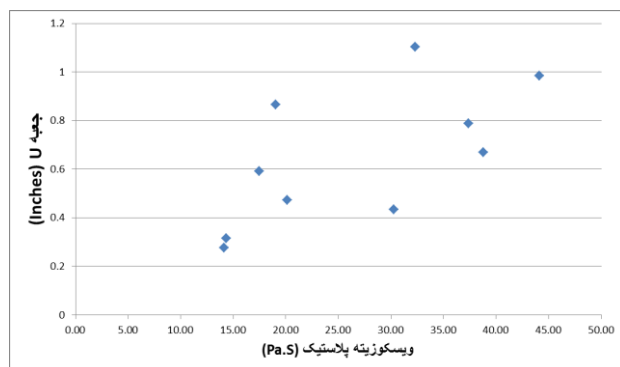
شکل ۲۸ ارتباط بین ویسکوزیته پلاستیک و جعبه L



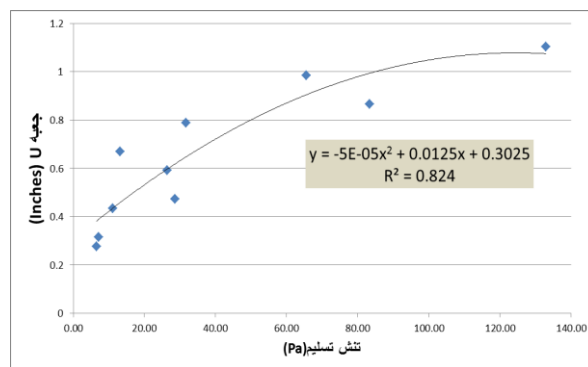
شکل ۲۷ ارتباط بین تنش تسلیم دینامیکی و جعبه L

۵-۵- مقایسه تنش تسلیم و ویسکوزیته پلاستیک با آزمایش جعبه U

ارتباط بین آزمایش جعبه U و تنش تسلیم مستقیم است یعنی با افزایش مقدار آزمایش جعبه U تنش تسلیم هم افزایش پیدا می‌کند که در شکل ۲۹ می‌توان دید ولی همانطور که در شکل ۳۰ مشاهده می‌شود آزمایش جعبه U با مقادیر ویسکوزیته پلاستیک هیچگونه ارتباطی با هم ندارند.



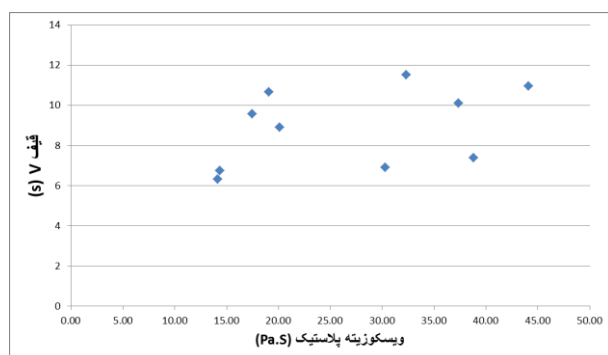
شکل ۳۰ ارتباط بین ویسکوزیته پلاستیک و جعبه U



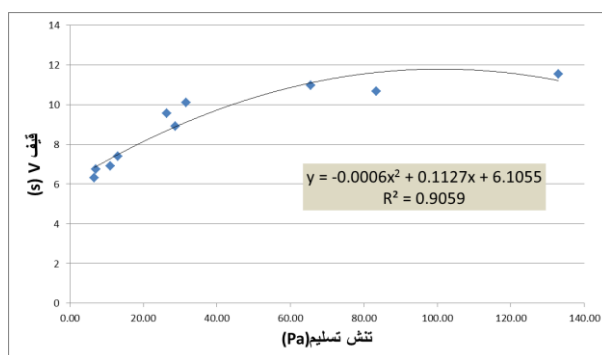
شکل ۲۹ ارتباط بین تنش تسلیم دینامیکی و جعبه U

۵-۶- مقایسه تنش تسلیم و ویسکوزیته پلاستیک با آزمایش قیف V

با افزایش زمان قیف V، مقدار تنش تسلیم هم افزایش پیدا می‌کند بدین معنا که هر چه زمان خروج بتن خودتراکم از قیف V بیشتر باشد، مقدار تنش تسلیم هم بیشتر می‌شود و با هم رابطه مستقیم دارند و مانند نتایج قبلی ویسکوزیته پلاستیک با قیف V همبستگی ندارد.



شکل ۳۲ ارتباط بین ویسکوزیته پلاستیک و قیف V



شکل ۳۱ ارتباط بین تنش تسلیم دینامیکی و قیف V

۶- نتیجه‌گیری

مهم‌ترین نتایج این پژوهش به صورت زیر بیان می‌شود:

- ۱- در کل هر چه درصد الیاف بیشتر شود تنش جاری شدن دینامیکی و استاتیکی، ویسکوزیته پلاستیک و تغلیظ بتن خودتراکم افزایش پیدا کرده و در نتیجه کارایی آن نیز کم می‌شود.
- ۲- در بین الیاف‌ها، الیاف فولادی کمترین تاثیر را روی خواص رئولوژی داشته است به طوری که آزمایش‌های طرح ۰/۱٪ الیاف فولادی بسیار نزدیک به نمونه‌ی شاهد بود و به ترتیب بعد از آن الیاف پلی‌پروپیلن و الیاف شیشه بیشترین تاثیر را روی کارایی بتن خودتراکم داشتند.

۳- در طرح ۰/۲٪ الیاف شیشه در برخی آزمایش‌ها، حداقل حدود مطلوب را جواب می‌دهد که استفاده بیشتر از این نوع الیاف، بتن را از حالت خودتراکمی خارج می‌کند.

۴- استفاده از هر نوع الیافی در بتن خودتراکم باید به اندازه‌ای باشد که بتن از حالت خودتراکمی خود خارج نشود.

۵- طبق آزمایش رئومتر ارتباطی بین تنش تسلیم دینامیکی و ویسکوزیته پلاستیک وجود ندارد و این دو پارامتر مستقل از هم رفتار می‌کنند.

۶- تنش تسلیم دینامیکی با تمام مقادیر آزمایش‌های سنتی (جریان اسلامپ، حلقه J، قیف V، جعبه L، جعبه U) همبستگی دارد که این رابطه در برخی مقایسه‌ها مستقیم و برخی غیر مستقیم بود ولی در رابطه با ارتباط بین ویسکوزیته پلاستیک با آزمایش‌های سنتی هیچگونه همبستگی و ارتباطی دیده نشد.

۷- در این مقاله حداکثر میزان استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن و شیشه را در بتن‌های خودتراکم، ۰/۲٪ حجم کل بتن پیشنهاد می‌کند و برای الیاف فولادی با توجه به آزمایش‌های انجام شده می‌توان درصدهای بالاتر هم استفاده کرد.

۷- تشکر و قدردانی

تمامی آزمایش‌های این مقاله در آزمایشگاه مرکز تحقیقات بتن دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین (CCRC) انجام شده است. بدین وسیله از رئیس مرکز تحقیقات بتن جناب آقای دکتر علی دلنواز و همچنین مسئولین محترم دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین بابت فراهم نمودن تجهیزات و امکان استفاده از آن، کمال تشکر و قدردانی می‌گردد.

۸- مراجع

[1] Khaloo A, Raisi EM, Hosseini P, Tahsiri H. Mechanical performance of self-compacting concrete reinforced with steel fibers. *Construction and Building Materials*. 2014 Jan 31; 51:179-86 .

[2] ACI Committee 237. *Self-consolidating concrete*, ACI 237R-07. Farmington Hills: American Concrete Institute; 2007

[3] Moehle J., *Seismic Design of Reinforced Concrete Buildings*, McGraw-Hill Education, (2015)

[4] A. Kheyroddin, M. Dehghan, M. K. Sharbatdar, *Structural Improvement of Shear Wall Coupled RC Beam Replaced with HPFRCC*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(3) 2018 471-484. [5] Okamura, H., "Self-Compacting High-performance Concrete". *Concret International*, Vol.19, No.7, July 1997.

[6] Sojoudiasli H, Heuzey MC, Carreau PJ. Rheological, morphological and mechanical properties of flax fiber polypropylene composites: influence of compatibilizers. *Cellulose*. 2014 Oct 1; 21(5):3797-812.

[7] Pająk M, Ponikiewski T. The laboratory investigation on the influence of the polypropylene fibers on selected mechanical properties of hardened self-compacting concrete. *Architecture Civil Engineering Environment*. 2015; 3:69-78.

[8] Sivakumar VR, Kavitha OR, Arulraj GP, Srisanthi VG. An experimental study on combined effects of glass fiber and Metakaolin on the rheological, mechanical, and durability properties of self-compacting concrete. *Applied Clay Science*. 2017 Oct 1; 147:123-7.

[9] Ahmad S, Umar A. Rheological and mechanical properties of self-compacting concrete with glass and polyvinyl alcohol fibres. *Journal of Building Engineering*. 2018 May 1; 17:65-74.

[10] Güneş E, Atewi YR, Hasan MF. Fresh and rheological properties of glass fiber reinforced self-compacting concrete with nanosilica and fly ash blended. *Construction And Building Materials*. 2019 Jun 30; 211:349-62.

- [11] Sadr Momtazi, A., Kohani Khoshkbijari, R., Lotfi Omran, O. *Self compacting concrete*. *Concrete Research*, 2016; 8(2): 19-34. (In Persian)
- [12] Ghoddousi, P., Shirzadi-Javid, A. A., and Lotfi, M. "The Effect of Amount and Type of Mineral Admixtures Admixtures on the yield stress and plastic viscosity of self consolidating concretes". *Amirkabir journal of civil and environmental engineering*, 2016 48(3), pp. 249-259.
- [13] ASTM C33/C33M, *Standard Specification for Concrete Aggregates*.
- [14] ASTM C192, *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory*.
- [15] EFNARC, "specification and Guidelines for self compacting concrete" ,[http://www. Efnarc. Org](http://www.Efnarc.Org), February 2002.
- [16] EFNARC, "the European Guidelines for self-compacting concrete, specification, production and use ", [http://www. Efnarc. Org](http://www.Efnarc.Org), May 2005.
- [17] Wallevik, O. H. and Wallevik, J.E.; "Rheology as a Tool in Concrete Science: The Use of Rheographs and Workability Boxes," *Cement and Concrete Research* Vol. 41, p.1279, 2011.
- [18] Koehler, E. P, Fowler D. W. "Development of a Portable Rheometer for Fresh Portland Cement Concrete." *RESEARCH REPORT ICAR –105-3F*, 2004.
- [19] Banfill, P, de Larrard, F, Sedran, T, Wallevik, O." *Comparison of concrete rheometers: International tests at LCPC.*" U.S. Department of Commerce, 2001.
- [20] Yun KK, Choi SY, Yeon JH. *Effects of admixtures on the rheological properties of high-performance wet-mix shotcrete mixtures*. *Construction and Building Materials*. 2015 Mar 1; 78:194-202.
- [21] Farokhzad R, Mahdikhani M, Bagheri A, Baghdadi J. *Representing a logical grading zone for self-consolidating concrete*. *Construction and Building Materials*. 2016 Jul 15; 115:735-45.
- [22] Jelokhani Niaraki R, Farokhzad R. *Prediction of mechanical and fresh properties of self-consolidating concrete (SCC) using multi-objective genetic algorithm (MOGA)*. *Journal of Structural Engineering and Geo-Techniques*. 2017 Nov 30; 7(2):1-3.
- [23] Daneshjoo V, Farokhzad R. *Effect of Nano Calcium Carbonate on Mechanical Strength and Permeability of Roller-Compacted Concrete*. *Journal of Engineering Geology*. 2019;13(1):45-68.