تحقیقات بتن
بهار و تابستان ۹۱،
سال پنجم، شماره اوّل
ص۳۶-۱۹
تاریخ دریافت: ۹۱/۱/۲۵
تاریخ پذیرش: ۹۱/۴/۵

ارزیابی قابلیت جذب انرژی بتن خودتراکم الیافی حاوی ذرات نانوسیلیس

مرتضی حسینعلی بیگی*
استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
جواد برنجیان
استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
امید لطفی عمران
کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
ایمان محمدپورنیک بین
دانشجوی دکتری سازه و عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی رشت

چکیده

هر چند افزودن الیاف به بتن در رفتار آن قبل از رسیدن به تنش حداکثر تأثیر چندانی ندارد، اما رفتار پس از ترک‌خوردگی را به شدت تغییر می‌دهد. این روش در بهبود قابلیت‌های بتن مانند چقرمگی، انرژی شکست و مقاومت خمشی مؤثر واقع می‌شود. از سوی دیگر نانو ذرات سیلیس به دلیل دارا بودن فعالیت شدید پوزولانی و خاصیت پرکنندگی بسیار مناسب توانسته‌اند با کاربرد در مصالح پایهٔ سیمانی، ساختار آن‌ها را به شدت بهبود بخشند و باعث تقویت ناحیهٔ تماس[1] الیاف با ماتریس سیمان شوند. لذا در این تحقیق آزمایشگاهی، اثر توأم نانو سیلیس و الیاف‌های مختلف (فلزی ، پلی پرو پیلن ، شیشه) بر چقرمگی، انرژی شکست و مقاومت خمشی بتن خودتراکم بررسی شده است. بدین منظور ۴۰ طرح اختلاط شامل ۴ سری A و B و C و D که به ترتیب حاوی ۰، ۲، ۴ و ۶ درصد وزنی سیمان، نانو سیلیس که به صورت جایگزین با سیمان مورد استفاده قرار گرفتند. هر سری از این مجموعه شامل ۳ نوع الیاف (فلزی: ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۵ درصد حجمی و پلی‌پروپیلن: ۰/۱، ۰/۱۵ و ۰/۲ درصد حجمی و شیشه: ۰/۱۵ و ۰/۲ و ۰/۳ درصد حجمی) مورد آزمایش و مقایسه قرار گرفتند. بررسی نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد حضور توأم الیاف و درصد بهینه نانو سیلیس موجب بهبود قابلیت‌های چقرمگی ، انرژی شکست و مقاومت خمشی بتن scc می‌شود.

واژه‌های کلیدی: **بتن خودتراکم، الیاف، نانو سیلیس، جذب انرژی، چقرمگی.**

* نویسنده مسئول: m.beygi@nit.ac.ir

[1] Transition layer

Archive of SID
www.SID.ir

۱. مقدمه

بتن خودتراکم اولین بار برای دستیابی به ساختار بتن پایدار در سال ۱۹۸۸ مطرح گردید و مطالعات اولیه پیرامون کارایی آن را ozawa (۱۹۸۹) و okamura (۱۹۹۳) در دانشگاه توکیو انجام دادند [۱، ۲، ۳]. طبق نظریه‌ای، بتن خودتراکم بتنی است که دارای سیالیتی باشد که تراکم، بدون نیاز به انرژی خارجی انجام شود و علاوه بر آن در حین و پس از تمام بتن‌ریزی به‌صورت یکپارچه باقی بماند و به راحتی در خلال آرماتورهای متراکم حرکت کند [۴الی۷]. اجرای سریع‌تر ساختمان‌ها، کاهش نیروی انسانی به دلیل خودتراکمی بودن SCC، بهبود دوام به دلیل کاهش نفوذپذیری، آزادی عمل بیشتر در طراحی مقاطع، کارائی و مقاومت بالاتر نسبت به بتن معمولی از مزایای استفاده از بتن SCC است [۸]. از طرفی بتن به عنوان ماده‌ای که ساختار اصلی بیشتر سازه‌ها از قبیل: پل، سد، روسازی فرودگاه و اسکلت سازه‌ها و ... را تشکیل می‌دهد، از نظر خواص دارای معایبی نیز هست که نظر محققان و مهندسان را به خود جلب کرده است. از مهم‌ترین معایب آن مقاومت کششی کم آن است، به همین دلیل دارای شکل‌پذیری کم و تردی زیاد است. برای رفع این عیب از تسلیح بتن با میلگردهای فولادی استفاده می‌کنند. این میلگردها به صورت متمرکز در بتن قرار می‌گیرند و تا حد خیلی زیاد ضعف مقاومت کششی بتن را جبران می‌کنند. استفاده از میلگرد در همه جا امکان‌پذیر نیست یا باعث هزینه‌های زیادی می‌شود مانند: پوستهٔ کانال‌های آب، روسازی، فرودگاه‌ها و ... . از این‌رو، برای رفع این مشکل در چند دههٔ اخیر از رشته‌های الیاف به صورت یکنواخت در حجم بتن پراکنده استفاده می‌شود که ایدهٔ آن به قرن‌ها قبل مانند استفاده از کاه یا موی دم اسب در خشت‌های گلی برمی‌گردد[۹و۱۰].

بتن به علت ویژگی‌های خاص، از جمله مشخصات مکانیکی مطلوب، سهولت تهیه و صرفهٔ اقتصادی،علاوه بر استفاده‌های معمول، رایج‌ترین کامپوزیت برای ساخت پانل‌های مقاوم حجیم است. زمانی که یک برتابه به هدف بتنی برخورد می‌کند مانع بتنی در اثر فشار، سوراخ شده و پرتابه داخل آن نفوذ می‌کند. موج تنش به‌وجود آمده، بعد از طی کردن ضخامت بتن و با رسیدن به سمت عقبی مانع، به‌صورت موج کششی برگشت می‌یابد که به‌علت ضعف بتن در میدان کششی آسیب فراوانی ایجاد می‌شود. به‌طور خلاصه عمق نفوذ یک پرتابه داخل هدف به سرعت و زاویه برخورد ، وزن و شکل پرتابه، همچنین به مشخصات مکانیکی هدف بستگی دارد. در مورد هدف‌های بتنی این عمق به مقاومت فشاری، نرخ کرنش مربوط به فشار و سطح مقاومت باقی‌مانده و قطر سوراخ ایجاد شده به مقاومت کششی، انرژی شکست و نرخ کرنش مربوط به کشش بستگی دارد. تا کنون پیشرفت‌های بسیار مهمی در زمینهٔ افزایش مقاومت فشاری بتن حاصل شده است و کار بر روی رفع معایب رفتار بتن تحت کشش ادامه دارد. افزایش تردی باعث شکست‌های ناگهانی و فاجعه‌باری در سازه‌های در معرض زلزله، انفجار یا بارهای ناگهانی می‌شود. به همین علت و در بسیاری از موارد، طراحان مایل‌اند این رفتار به صورت شکست نرم‌تر اصلاح شود. یکی از روش‌های مؤثر برای این کار استفاده از الیاف باریک و غیر ممد است که به صورت تصادفی در زمینه پخش می‌شوند. این الیاف می‌توانند از جنس فولاد، الیاف شیشه‌ای و پلیمری و ... باشند.

انهدام و زوال بتن به شدت به تشکیل ترک‌ها و ریزترک‌ها در اثر بارگذاری و یا تأثیرات محیطی وابسته است. تغییرات گرمایی و رطوبتی در خمیر سیمان باعث ایجاد ریز ترک‌ها می‌شوند و چنین ریزترک‌هایی در سطح دانه‌های درشت متمرکز می‌شوند. با تأثیر بیشتر بارگذاری و نیز سایر مسائل محیطی، ریزترک‌ها در جسم بتن منتشر می‌شود [۱۱]. استفاده از الیاف مختلف در بتن و ساخت بتن الیافی (FRC) به عنوان یک گام مؤثر در جلوگیری از انتشار ریزترک‌ها و ترک‌ها و جبران ضعف مقاومت کششی بتن محسوب می‌شود [۱۲]. مهم‌ترین مشخصهٔ بتن الیافی خاصیت جذب انرژی، انعطاف‌پذیری و مقاومت در برابر ضربه است؛ به همین دلیل امروزه این بتن نقش بسیار جدی در پیشرفت تکنولوژی بتن ایفا کرده و به عنوان یک ماده جدید و اقتصادی در مسائل ساختمانی محسوب شده است [۱۳الی۱۹]. خاصیت جذب انرژی و طاقت بتن می‌تواند به نحو مطلوبی خطر شکست سازه‌های بتنی به خصوص در مناطقی که تحت بارهای مکرر و لرزه‌ای قرار می‌گیرند را کاهش دهد. برای روشن شدن شکل‌پذیری بتن الیافی توجه شود که کرنش شکست یک ماتریس ترد (نظیر سیمان پرتلند) به مراتب از کرنش شکست یک فایبر محکم (نظیر فولاد، شیشه، پلی‌پروپیلن) کمتر است (کمتراز ۱/۵۰). نتیجتاً وقتی که سیمان مسلح به الیاف تحت بار

Archive of SID
www.SID.ir

قرار گیرد ماتریس بسیار زودتر از شکست الیاف، ترک خواهد خورد با ترک‌خوردگی ماتریس، یکی از سه نوع شکست زیر ممکن است برای جسم کامپوزیت اتفاق بیفتد:

الف) ممکن است جسم کامپوزیت بلافاصله پس از ترک‌خوردگی ماتریس بشکند، نظیر حالتی که از فایبرها پلیمری با درصد حجم کم استفاده شده باشد.

ب) ممکن است جسم کامپوزیت تحت بارهای کمتر به تحمل بار و تغییر شکل ادامه دهد، نظیر حالتی که از فایبرهای فولادی با حجم کم تا متوسط استفاده شده باشد. در این حالت مقاومت پس از ترک‌خوردگی ابتدا با بیرون کشیده شدن فایبرها از سطح ترک تأمین شده و سپس با تغییر شکل آن‌ها ادامه می‌یابد.

ج) ممکن است پس از ترک‌خوردگی ماتریس، جسم کامپوزیت تنش‌های کششی و تغییر شکل‌های بیشتری را تحمل کند، نظیر حالتی که از فایبرهای کربن به مقدار متوسط تا زیاد استفاده شده باشد. دقت شود که این حالت فقط در صورتی اتفاق می‌افتد که مقاومت چسبندگی (مقاومت بیرون کشیدگی[1]) فایبر در لحظهٔ اولین ترک بیش از بار موجود در لحظه اولین ترک باشد، زیرا در لحظه ترک‌خوردگی تمام بار به ناگهان به فایبر منتقل می‌شود. حال با افزایش بار روی جسم کامپوزیت، فایبر تنش اضافی را از طریق چسبندگی به ناحیهٔ تماس، به ماتریس بتن منتقل می‌کند. واضح است که از بین حالت فوق‌الذکر، بتن الیافی در وضعیت (الف) فاقد شکل‌پذیری بوده و بیشترین شکل‌پذیری برای بتن الیافی در شرایط (ج) حاصل می‌شود. حال برای رسیدن به حالت شکل‌پذیر بتن الیافی (حالت ج) نیاز است که به تقویت ناحیهٔ تماس الیاف و ماتریس بتن بپردازیم.

ناحیهٔ تماس که به اسامی مختلفی مانند لایهٔ مرزی یا منطقه انتقالی نامیده می‌شود، ناحیهٔ مرزی بین خمیر سیمان و سطح سنگ‌دانه یا الیاف و یا میلگرد پدید می‌آید که نقش مهمی در نفوذپذیری، دوام و مقاومت بتن دارد. ناحیهٔ تماس دارای میکرو ساختاری متفاوت با خمیر سیمان بوده و دارای تخلخل و ریزترک‌های بیشتری است. ضخامت ناحیه تماس، تابع نوع الیاف، نوع سیمان، نوع پوزولان مصرفی، نسبت آب به سیمان و سن بتن است. در این بررسی آزمایشگاهی برای تقویت ناحیهٔ تماس از نانوسیلیس به عنوان پوزولان مصنوعی بسیار فعال که از محصولات فناوری نانو است استفاده شده است. در سال‌های اخیر، با ورود فناوری نانو دیدگاه‌های جدید در زمینه فناوری بتن ایجاد شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به بهبود دانش و درک فیزیکی و شیمیایی واکنش و ریز ساختار بتن و نیز بهبود کیفیت بتن‌های موجود و روش‌های اجرایی مرتبط با آن با استفاده از مواد جدید در مقیاس نانو یا همان نانو ذرات اشاره کرد. طبق تعریف، نانو ذره به ذره‌ای اطلاق می‌شود که حداقل یکی از ابعاد آن کمتر از ۱۰۰ نانومتر باشد. با توجه به ریز ساختار سیمان هیدراته شده و وجود حفراتی در ابعاد نانو در آن، استفاده از نانو ذرات می‌تواند در پر کردن تخلخل‌های بسیار ریز خمیر سیمان و افزایش مقاومت و به خصوص دوام بتن مؤثر باشد. نتایج تحقیقات انجام شده این مسأله را تأیید می‌کند[۲۰الی۳۳]. بنابراین وجود نانوسیلیس می‌تواند استحکام فشاری خمیر سخت شده سیمان و استحکام پیوندی سنگ‌دانه با خمیر و همچنین الیاف با خمیر سیمان را افزایش داده و ساختار ناحیهٔ انتقال را به طور مؤثری بهبود ببخشد.

۲. تأثیر الیاف در مکانیزم شکست بتن

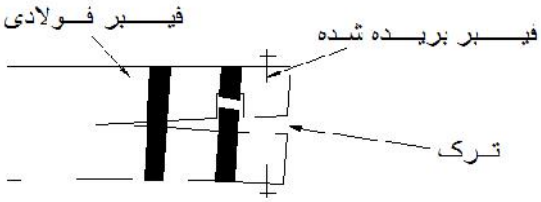
بتن و سایر مواد نیمه‌شکننده حتی در موقعیت بدون تنش دارای منافذ (Microspores) و ترک‌های ریز (Micro cracks) هستند. تحت تنش‌های کششی اعمالی نه تنها این ترک‌ها باز و گسترده می‌شوند بلکه ترک‌های بیشتری در مناطق مشترک اجزای سازنده ایجاد می‌شود. با رسیدن تنش به حداکثر مقاومت کششی خمیرسیمانی تعداد زیادی ترک مویی در زمینه ایجاد می‌شود (Micro craking). طول و ضخامت این ترک‌ها با افزایش نیرو بیشتر شده و با پیوستن آن‌ها به همدیگر ترک‌های جدیدی شکل می‌گیرند (Macrocracking). تجمع این ترک‌ها (localization) در یک ناحیه باعث شکست بتن می‌شود. نقش الیاف افزوده شده جلوگیری از طویل شدن ترک‌ها و اتصال آن‌ها به همدیگر است. وجود فیبر مناسب در مسیر باعث دوخته‌شدن انتهای ترک می‌شود (شکل۱). در این شرایط به جای ترک‌های ریز ممتد، تعداد زیادی ترک منقطع دیده می‌شود (Multiple cracking). این اثر تا زمان جدا شدن الیاف از زمینه یا بریده شدن آن‌ها، تشکیل ترک‌های بزرگ و تجمع آن‌ها را به

[1] Pull out strength

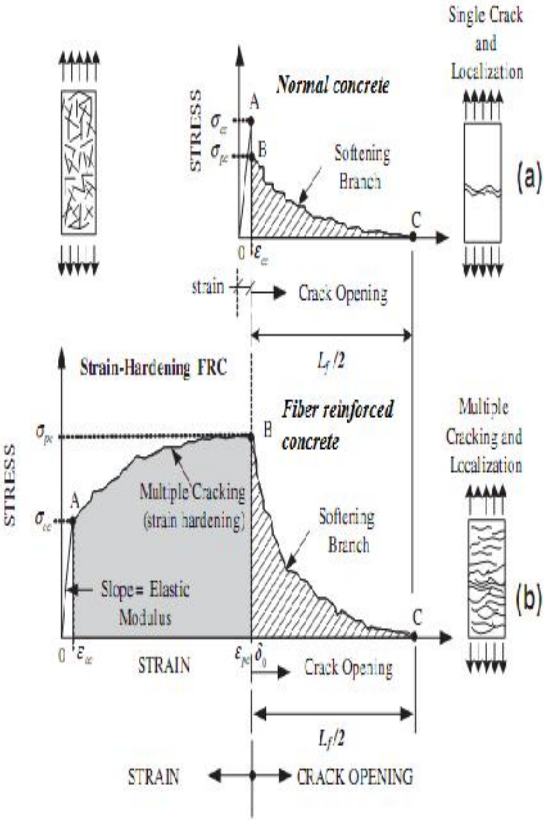
Archive of SID

www.SID.ir

تـأخیر مـی‌انـدازد. شـکل (۲) تـأثیر الیـاف بـر رفتـار بـتن را نشـان می‌دهد.



شکل۱- نحوهٔ عمل الیاف در دوختن ترک‌ها



شکل۲- تأثیر افزودن الیاف در مکانیزم شکست بتن[۱۲]

به‌طور کلی نقش اصلی الیاف افزوده شده به بتن ایجاد اتصال بین ترک‌هایی است که به هر علت به وجود می‌آیند. اگر الیـاف بـه حد کافی محکم باشند و به‌طور کامل به ماتریس سیمان بچسبد و مقدارشان در واحد حجم کافی باشد می‌توانند عرض تـرک‌هـا را پایین نگهدارند و باعث شوند که بتن الیافی تنش‌های بـزرگ‌تـری را بعد از رسیدن بتن بـه حـداکثر تـنش و در مرحلـه بعـد از تـرک خوردگی تحمل کند. بدین ترتیب الیاف‌ها بعد از ترک‌خوردگی بتن، نـوعی شـکل‌پـذیری بـه بـتن مـی‌دهنـد کـه اغلـب بـا مفهـوم چقرمگی بیان می‌شود.

۳. چقرمگی و انرژی شکست

وجـود الیـاف در بـتن نـه تنهـا باعـث بهبـودی برخـی از خـواص مکانیکی آن نظیر مقاومت در برابر ایجاد و رشد تـرک، مقاومـت برشـی و مقاومـت ضـربه‌ای مـی‌شـود؛ بلکـه باعـث افـزایش شکل‌پذیری و انرژی لازم برای شکست بتن نیز می‌گردد[۳۴]. بـه عنوان مثال در پدیدهٔ ضربه، یکی از اصلی‌ترین خواص مـورد نیـاز برای مقاومت هدف، داشتن چقرمگی بالا است. یک المان با بتنی با مقاومت نسبتاً بالا بـدون اسـتفاده از الیـاف در صـورت برخـورد پرتابه‌ای با سرعت مشـخص تحـت مقـدار معینـی انـرژی شکسـت خرد می‌شود و شکست آن بسیار آنی و ترد خواهد بود، به‌طـوری که یکپارچگی المان از بین مـی‌رود. امـا همـین المـان در صـورت داشتن الیاف، با مقدار انـرژی بیشـتری دچـار شکسـت مـی‌شـود و رفتار شکست آن نرم بـوده، بعـد از شکسـت یکپـارچگی خـود را حفـظ مـی‌کنـد چـون چقرمگـی بـالایی دارد. چقرمگـی از آنـالیز منحنی بار ـ جابه‌جایی به‌دست می‌آید.

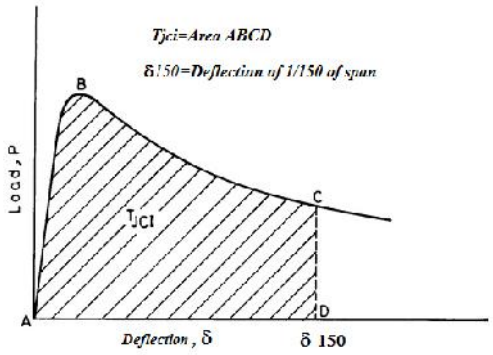
بیشتر گزارش‌ها اندازه‌گیـری چقرمگـی، انـدیس‌هـای بـدون بعـد انـرژی پایـه هسـتند، بـه ویـژه کاربردهـای آزمایشـگاهی چنـین اندیس‌هایی با معرفی اندیس چقرمگی ACI [۳۵] بر پایه کارهای هنگار[۳۶] شروع شد. ACI544 اندیس چقرمگی را نسبت انرژی لازم برای تغییر شکل ۱/۹ میلی‌متر تیر مسـلح بـه الیـاف بـه انـرژی لازم برای ایجاد اولین ترک بیان می‌کنـد. یکـی از مشـکلات ایـن روش تعیین مقدار قابل اعتماد محل اولـین تـرک اسـت، همچنـین ۱/۹ یک مقدار دلخواه است. در واقع حـدود تغییرشـکل بایـد بـر اسـاس نیازهـای سـطح سـرویس تعریـف شـوند. البتـه ACI در ویرایش‌های جدید خود از اندیس چقرمگی It استفاده کرده است که نسبت انرژی جذب شده بتن الیافی به انرژی جـذب شـده بـتن معمولی تعریف می‌شود .

مؤسسهٔ بتن ژاپن JCI [۳۷] اندیس چقرمگی را برای تیر بـا انـدازهٔ استاندارد، مساحت زیر نمودار(بار ـ تغییرشکل) تـا حـد (L/150) تعریف می‌کند(شکل۳). استانداردهای بلژیک [۳۸]، آلمـان [۳۹]، RILEM [۴۰] و اسـپانیا [۴۱] نیـز آزمـایش و رونـد مشـابهی را پیشنهاد می‌کنند. ظرفیت جذب انرژی، مقدار انرژی جـذب شـده

Archive

www.SID.ir

در واحد سطح مقطع نمونه در هر حد تغییرشکل معین تعریف می‌شود. از آنجایی که در بتن الیافی به‌دست آوردن انرژی اولین ترک به‌طور دقیق قابل شناسایی نیست و در ASTM C 1018 به طور دقیق ارزیابی نشده است برای یک مقایسهٔ منطقی‌تر، سطح زیرمنحنی (بار- تغییرمکان) تا تغییر شکل نهایی به عنوان چقرمگی بتن در نظر گرفته شده است.



شکل۳- تعریف اندیس چقرمگی JCI [۳۷]

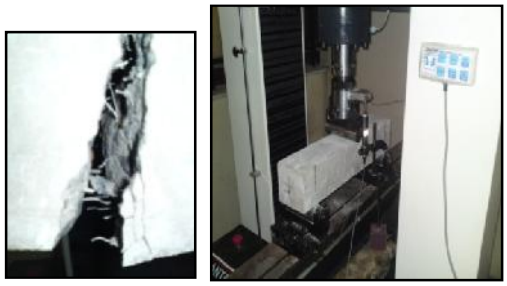
یکی از پارامترهای بسیار مهم در بررسی رفتار بتن به خصوص پس از رسیدن به بار اوج، انرژی لازم برای ایجاد سطح واحد ترک است که به آن انرژی شکست بتن (G_F) می‌گویند[۴۲]. روش مستقیم برای تعیین انرژی شکست انجام آزمایش کشش مستقیم است[۴۳]. اگرچه برخی از محققین از این روش برای تعیین G_F استفاده می‌کنند؛ اما انجام چنین آزمایشی برای بتن مشکلات زیادی به همراه دارد[۴۴و۴۵]. برای تعیین انرژی شکست راه‌های دیگری نیز پیشنهاد شده است که نیاز به آزمایش‌های ساده‌تری دارند. از جملهٔ آن‌ها، روش دو پارامتری شاه[۴۶]، روش اثر اندازه بازانت-کاظمی[۴۷] و روش کار هیلربرگ[۴۸]اند. در روش اخیر، که به‌طور عمده در این مقاله از آن برای تعیین انرژی شکست استفاده شده است؛ از نمودار نیرو- جابه‌جایی تیرهای بتنی در آزمایش خمش سه نقطه‌ای با کنترل جابه‌جایی تا شکست کامل نمونه استفاده می‌شود. لازم به‌ذکر است این روش را با اصلاحاتی RILEM − TC50 [۴۸] توصیه کرده است.

۴. آزمایش مقاومت خمشی و چقرمگی

در این آزمایش، هدف تعیین مدول گسیختگی و طاقت خمشی (چقرمگی) بر اساس استانداردهای ASTMC 78 و ASTMC 1018 – 94b، بر روی نمونه‌های منشوری ۱۰×۱۰×۵۰ سانتی‌متر برای تعیین مقاومت خمشی با دستگاه (Universal) که مکانیزم آن (Strain Control) بوده، با سرعت $0/5\ mm/min$ انجام شد و فاصله بین دو تکیه گاه مطابق شکل(۴) ۴۰ سانتی‌متر و نتایج آن در جدول(۴) ارائه شده است.

۵. تعیین انرژی شکست

برای تعیین انرژی شکست از طریق منحنی نیرو ـ جابه‌جایی از روش کار شکست هیلربرگ (Hillerborg) پذیرفته شده توسط



شکل ۴- الف) دستگاه یونیورسال، ب)محل شکست

RILEM TC-50 [۴۸] استفاده شد. در این روش کل انرژی لازم برای شکست نمونه منشوری به ابعاد ۱۰×۱۰×۸۴ سانتی‌متر با عمق شکاف ۵ سانتی‌متر در وسط دهانه توسط دستگاه (Universal) از لحظه شروع بارگذاری تا لحظه شکست نمونه محاسبه می‌شود و به سطح مقطع اولیه بتن، که شکاف اولیه در آن نفوذ نکرده است تقسیم می‌شود تا انرژی شکست بتن G_F به‌دست آید. با توجه به عدم دسترسی به قسمت انتهایی منحنی نیرو ـ جابه‌جایی، به علت شکست نمونه تحت اثر وزن خودش، مقدار سطح زیر منحنی نیرو ـ جابه‌جایی به‌دست آمده از آزمایش (W_0) مقداری کمتر از انرژی لازم برای شکست نمونه است و باید اصلاح شود. انرژی لازم برای شکست نمونه (W_F) به صورت زیر اصلاح گردید[۴۳و۴۸]:

$$W_F = W_0 + 2P_0U_0 \qquad (۱)$$

در رابطه (۱)، P_0 معادل مقدار نیرویی در وسط تیر است که لنگری برابر لنگر وزن (M_0) در وسط تیر ایجاد می‌کند و u_0 بیشینهٔ جابه‌جایی مشاهده شده در آزمایش است. برای تیر با دهانهٔ S می‌توان نوشت:

Archive of SID

www.SID.ir

$$P_0=\frac{4M_0}{S} \quad (۲)$$

و انرژی شکست به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$G_F=\frac{W_F}{A} \quad (۳)$$

در آن A سطح مقطع اولیه تیر منشوری، که شکاف اولیه در آن نفوذ نکرده، است.

۶. مصالح مصرفی

نانو سیلیس مصرفی در این تحقیق نانو سیلیس آمورف کلوئیدی محلول در آب با غلظت ۵۰ درصد است. نانو سیلیس مذکور دارای بیش از ۹۹ درصد سیلیس آمورف است.در جدول۱ خصوصیات فیزیکی این نانو سیلیس آمده است که با ۲، ۴، ۶ درصد وزن سیمان در سری‌های مختلف به کار گرفته شد. در این تحقیق از فوق روان کننده (SP) نسل سوم بر پایه کربوکسیلیک اتر با نام تجاری GLENIUM_110P ، استفاده شده است. این ماده، کدر و ابری رنگ، و در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد، وزن مخصوص آن ۱/۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. الیاف‌های مصرفی شامل سه نوع پلی پروپیلن، فولادی و شیشه است که مشخصات آن‌ها را می‌توان در جدول۲ مشاهده کرد.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی نانوسیلیس

Diameter (nm)	Surface– volume ratio (m^2/g)	Density (g/cm^3)	Purity (%)
۱۵ ± ۵	۱۶۰ ± ۲۰	<۰/۱۵	> ۹۹/۹

جدول۲- مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف های مصرفی

الیاف	شکل	مقاومت کششی (kg/cm^2)	طول (mm)	قطر (mm)	نسبت منظر
P.P		۴۵۰۰	۱۲	۰/۱	۱۲۰
ST		۲۱۰۰۰	۳۶	۰/۷	۵۰
Glass		۱۴۰۰۰	۱۲	۰/۰۲	۶۰۰

شن مصرفی با حداکثر ابعاد ۱۲/۵ میلی‌متر و منحنی دانه‌بندی آن در محدودهٔ استاندارد ASTM بوده و ماسه مصرف شده زیر الک ۴/۷۵ میلی‌متر انتخاب شد که دارای هم ارز ماسه‌ای به میزان ۷۶ درصد بوده است و از سیمان پرتلند تیپ ۲ و پودر سنگ با وزن مخصوص۲/۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب استفاده شده است.

۷. برنامهٔ آزمایشگاهی

در این تحقیق، ۴۰ طرح اختلاط شامل ۴ سری A ,B ,C ,D به ترتیب با ۶، ۴، ۲، ۰ درصد وزنی سیمان، نانو سیلیس که به‌صورت جایگزین با سیمان استفاده شده است و هر سری شامل ۳ نوع الیاف (فلزی: ۰/۲، ۰/۳، ۰/۵ درصد حجمی، پلی پروپیلن: ۰/۱، ۰/۱۵ ، ۰/۲ درصد حجمی و شیشه: ۰/۱۵، ۰/۲ ، ۰/۳ درصد حجمی) مورد بررسی و آزمایش قرار گرفتند. در تمام ۴۰ طرح اختلاط که در جدول(۳) آمده است به غیر از نوع ومقدار الیاف و میزان نانو سیلیس، تمامی اجزای تشکیل دهنده بتن ثابت در نظر گرفته شدند. نسبت آب به مصالح سیمانی(W/B) برابر است با ۰/۳۹ و طرح شماره A1 که فاقد الیاف و نانو سیلیس است به عنوان طرح شاهد در نظر گرفته شد.درصد Vfی موجود در جدول۳ همان درصد حجمی الیاف یعنی نسبت حجم الیاف به حجم بتن است و به علت اینکه درجهٔ خلوص محلول نانو سیلیس ۵۰٪ است، مقادیر وزنی محلول نانو سیلیس موجود در جدول ۳ به صورت خالص نیست، در واقع ۵۰٪ وزنی آن آب و ۵۰٪ آن نانو سیلیس است).

۸. بررسی خواص فیزیکی (رئولوژی) بتن خودتراکم تازه

در این تحقیق از طرح اختلاطی استفاده شد که با وجود استفاده از الیاف و نانو سیلیس در بتن، بتن خواص خودتراکمی scc را داشته باشد، لذا برای سنجش کارایی بتن خودتراکم الیافی حاوی ذرات نانو سیلیس از پارامترهای سنجش بتن خودتراکم استفاده نمودیم. جهت بررسی خواص متفاوتی از قبیل قابلیت عبور و پایداری بتن خودتراکم در برابر جداشدگی از آزمایشL-BOX و جهت ارزیابی تغییرشکل پذیری یا روانی بتن خودتراکم از آزمایش اسلامپ استفاده گردید که در این آزمایش پس از جاری شدن بتن بر روی میز اسلامپ دو قطر عمود برهم اندازه‌گیری می‌شوند و میانگین آن‌ها بیانگر روانی بتن مذکور است. همچنین زمان رسیدن به قطر۵۰۰ میلی‌متر (بر حسب ثانیه) با توجه به علامت گذاری در داخل صفحه آزمایش اسلامپ ثبت می‌شود که بیانگر نرخ تغییر شکل با تعریف یک

Archive of SID

www.SID.ir

فاصله روانی است. با آزمایش L-BOX ارتفاع SCC تازه را و جریان در یک مسیر در نظر گرفته شده، اندازه‌گیری می‌گردد. پس از عبور از میان فواصل مشخص شده بین آرماتورهای فلزی

جدول۳- طرح اختلاط بتن(بر حسب kg/m^3)

شمارهٔ اختلاط	سریال	نانوسلیس(%)	فیبر Vf (%)		شن	ماسه	پودر سنگ آهک	سیمان	نانوسلیس	آب	SP
۱	A	۰	-		۷۲۲	۸۲۶	۲۸۸/۹	۴۱۳/۱	۰	۱۶۲	۷
۲			St	۰/۲	۷۲۲	۸۲۶	۲۸۸/۹	۴۱۳/۱	۰	۱۶۲	۷
۳				۰/۳	۷۲۲	۸۲۶	۲۸۸/۹	۴۱۳/۱	۰	۱۶۲	۷
۴				۰/۵	۷۲۲	۸۲۶	۲۸۸/۹	۴۱۳/۱	۰	۱۶۲	۷
۵			P.P	۰/۱	۷۲۲	۸۲۶	۲۸۸/۹	۴۱۳/۱	۰	۱۶۲	۷
۶				۰/۱۵	۷۲۲	۸۲۶	۲۸۸/۹	۴۱۳/۱	۰	۱۶۲	۷
۷				۰/۲	۷۲۲	۸۲۶	۲۸۸/۹	۴۱۳/۱	۰	۱۶۲	۷
۸			Glass	۰/۱۵	۷۲۲	۸۲۶	۲۸۸/۹	۴۱۳/۱	۰	۱۶۲	۷
۹				۰/۲	۷۲۲	۸۲۶	۲۸۸/۹	۴۱۳/۱	۰	۱۶۲	۷
۱۰				۰/۳	۷۲۲	۸۲۶	۲۸۸/۹	۴۱۳/۱	۰	۱۶۲	۷
۱	B	۲	-		۷۲۲	۸۲۶	۲۸۸/۹	۳۹۶/۶	۱۶/۵	۱۵۳/۷	۷
۲			St	۰/۲	۷۲۲	۸۲۶	۲۸۸/۹	۳۹۶/۶	۱۶/۵	۱۵۳/۷	۷
۳				۰/۳	۷۲۲	۸۲۶	۲۸۸/۹	۳۹۶/۶	۱۶/۵	۱۵۳/۷	۷
۴				۰/۵	۷۲۲	۸۲۶	۲۸۸/۹	۳۹۶/۶	۱۶/۵	۱۵۳/۷	۷
۵			P.P	۰/۱	۷۲۲	۸۲۶	۲۸۸/۹	۳۹۶/۶	۱۶/۵	۱۵۳/۷	۷
۶				۰/۱۵	۷۲۲	۸۲۶	۲۸۸/۹	۳۹۶/۶	۱۶/۵	۱۵۳/۷	۷
۷				۰/۲	۷۲۲	۸۲۶	۲۸۸/۹	۳۹۶/۶	۱۶/۵	۱۵۳/۷	۷
۸			Glass	۰/۱۵	۷۲۲	۸۲۶	۲۸۸/۹	۳۹۶/۶	۱۶/۵	۱۵۳/۷	۷
۹				۰/۲	۷۲۲	۸۲۶	۲۸۸/۹	۳۹۶/۶	۱۶/۵	۱۵۳/۷	۷
۱۰				۰/۳	۷۲۲	۸۲۶	۲۸۸/۹	۳۹۶/۶	۱۶/۵	۱۵۳/۷	۷
۱	C	۴	-		۷۲۲	۸۲۶	۲۸۸/۹	۳۸۰	۳۳	۱۴۵/۵	۷
۲			St	۰/۲	۷۲۲	۸۲۶	۲۸۸/۹	۳۸۰	۳۳	۱۴۵/۵	۷
۳				۰/۳	۷۲۲	۸۲۶	۲۸۸/۹	۳۸۰	۳۳	۱۴۵/۵	۷
۴				۰/۵	۷۲۲	۸۲۶	۲۸۸/۹	۳۸۰	۳۳	۱۴۵/۵	۷
۵			P.P	۰/۱	۷۲۲	۸۲۶	۲۸۸/۹	۳۸۰	۳۳	۱۴۵/۵	۷
۶				۰/۱۵	۷۲۲	۸۲۶	۲۸۸/۹	۳۸۰	۳۳	۱۴۵/۵	۷
۷				۰/۲	۷۲۲	۸۲۶	۲۸۸/۹	۳۸۰	۳۳	۱۴۵/۵	۷
۸			Glass	۰/۱۵	۷۲۲	۸۲۶	۲۸۸/۹	۳۸۰	۳۳	۱۴۵/۵	۷
۹				۰/۲	۷۲۲	۸۲۶	۲۸۸/۹	۳۸۰	۳۳	۱۴۵/۵	۷
۱۰				۰/۳	۷۲۲	۸۲۶	۲۸۸/۹	۳۸۰	۳۳	۱۴۵/۵	۷
۱	D	۶	-		۷۲۲	۸۲۶	۲۸۸/۹	۳۶۳/۵	۴۹/۶	۱۴۵/۵	۷
۲			St	۰/۲	۷۲۲	۸۲۶	۲۸۸/۹	۳۶۳/۵	۴۹/۶	۱۳۷/۲	۷
۳				۰/۳	۷۲۲	۸۲۶	۲۸۸/۹	۳۶۳/۵	۴۹/۶	۱۳۷/۲	۷
۴				۰/۵	۷۲۲	۸۲۶	۲۸۸/۹	۳۶۳/۵	۴۹/۶	۱۳۷/۲	۷
۵			P.P	۰/۱	۷۲۲	۸۲۶	۲۸۸/۹	۳۶۳/۵	۴۹/۶	۱۳۷/۲	۷
۶				۰/۱۵	۷۲۲	۸۲۶	۲۸۸/۹	۳۶۳/۵	۴۹/۶	۱۳۷/۲	۷
۷				۰/۲	۷۲۲	۸۲۶	۲۸۸/۹	۳۶۳/۵	۴۹/۶	۱۳۷/۲	۷
۸			Glass	۰/۱۵	۷۲۲	۸۲۶	۲۸۸/۹	۳۶۳/۵	۴۹/۶	۱۳۷/۲	۷
۹				۰/۲	۷۲۲	۸۲۶	۲۸۸/۹	۳۶۳/۵	۴۹/۶	۱۳۷/۲	۷
۱۰				۰/۳	۷۲۲	۸۲۶	۲۸۸/۹	۳۶۳/۵	۴۹/۶	۱۳۷/۲	۷

Archive of SID

www.SID.ir

و با این مقدار که حداقل ۰/۸است، قدرت عبور و انسداد آن تخمین زده می‌شود. نتایج حاصل از این آزمایشات در شکل۵ الی۷ ارائه شده است. مطابق آیین نامه اروپا[۴۹] جریان اسلامپ بتن خودتراکم باید در محدوده ۶۰-۷۵ سانتی‌متر و زمان T_{50} باید حداقل ۳ و حداکثر ۶ ثانیه باشد.

۹. بررسی نتایج حاصل ازآزمایش خمش دستگاه یونیورسال

قبل از اینکه نتایج حاصل از تست خمش یونیورسال بررسی شود ابتداً اثر نانوسیلیس در مقاومت خمیر سیمان بیان شده است. مقاومت فشاری نمونه‌ها همان‌طور که در جدول ۴ ارائه شده است با افزایش درصد نانوسیلیس تا ۴ درصد، مقاومت فشاری روند افزایشی داشته و بعد از آن تقریباً کاهش می‌یابد، که می‌توان این افزایش مقاومت را به علت واکنش شدید پوزولانی و خاصیت پر کنندگی نانوسیلیس دانست و کاهش مقاومت به ازای حضور بیشتر از ۴ درصد این ذرات به علت سطح ویژه بسیار بالای نانوذرات است که وقتی مقدارشان از حد معینی (مقدار بهینه) بیشتر شود می تواند با یک واکنش فیزیکی به هم چسبیده و کلوخه‌های ناپایدار را ایجاد کند که می‌توان در این بررسی آزمایشگاهی ۴ درصد نانوسیلیس را درصد بهینه دانست. نتایج آزمایش مقاومت خمشی که از منحنی‌های نیرو-تغییر مکان حاصل از تست خمش یونیورسال (شکل۸ الی ۱۰) به‌دست آمده در جدول ۴ و شکل ۱۱ ارائه شده است و همچنین حداکثر بار قابل تحمل در آزمایش خمش سه نقطه‌ای و تغییر مکان مربوط به این حداکثر بار در جدول ۴ نیز آمده است. همان‌طور که در شکل مذکور مشاهده می‌شود نرخ تغییر مقاومت خمشی با افزایش درصد حجمی هر ۳ نوع الیاف فلزی، پلی پروپیلن و شیشه، صعودی است و میزان ماکزیمم این افزایش برای الیاف فلزی به ازای ۰/۵ درصد حجمی برابر ۷/۰۸ Mpa و برای الیاف پلی پروپیلن به ازای ۰/۲ درصد حجمی برابر۶/۶ Mpa و برای الیاف شیشه به ازای ۰/۲ درصد حجمی برابر ۸/۱ Mpa است که میزان حداکثر درصد افزایش مقاومت خمشی این ۳ نوع الیاف (فلزی – پلی‌پروپلین و شیشه) نسبت به بتن شاهد فاقد الیاف(A1) به ترتیب برابر است با: ۳۷ و ۲۸ و ۵۶ درصد می‌باشد. با بررسی منحنی‌های نیرو-تغییر مکان حاصل از تست خمش یونیورسال (شکل۸ الی ۱۰)، با افزایش درصد الیاف‌ها، به خصوص الیاف فولادی در بتن خودتراکم، شاهد افزایش چشمگیر حداکثر بار قابل تحمل توسط تیرهای منشوری و به دنبال آن افزایش جابه‌جایی وسط دهانهٔ مربوط به این حداکثر بار هستیم، که شکل‌پذیری بیشتری را قبل از شکست نمونه‌ها به دنبال دارد. همچنین با بررسی منحنی‌های ارائه شده در شکل۱۱ از یک طرف با افزایش درصد نانو سیلیس ۲ تا ۶ درصد، مقاومت خمشی نمونه‌های فاقد الیاف افزایش یافته به‌طوری که این افزایش تا درصد بهینه (۴ درصد) روند صعودی داشته و پس از آن تقریباً ثابت باقی می‌ماند که این روند نشان می‌دهد میزان ۴ درصد نانو سیلیس در مقاومت خمشی نیز بهینه است.

از طرف دیگر، با بررسی این منحنی‌ها می‌توان دریافت که افزایش درصد نانوسیلیس، روند افزایشی مقاومت خمشی کسب شده ناشی از افزایش درصد الیاف‌های مختلف را تقویت کرده و روند افزایشی آن را تشدید می‌کند، به عنوان نمونه با افزایش ۴ درصد نانوسیلیس در طرح‌های حاوی ماکزیمم الیاف فلزی (۰/۵درصد)، پلی‌پروپیلن (۰/۲ درصد) و شیشه (۰/۲ درصد) مقاومت خمشی به ترتیب ۷۶ و ۵۳ و ۷۵ درصد نسبت به نمونهٔ شاهد افزایش می‌یابد. مقایسهٔ نتایج آزمایش مقاومت خمشی نیز نشان داد که نانوسیلیس با اثر فیلری و پوزولانی خود موجب بهبود خواص ناحیه تماس خمیر سیمان با الیاف و سنگ‌دانه‌ها می‌شود و چسبندگی ناحیه‌های تماس را افزایش می‌دهد.

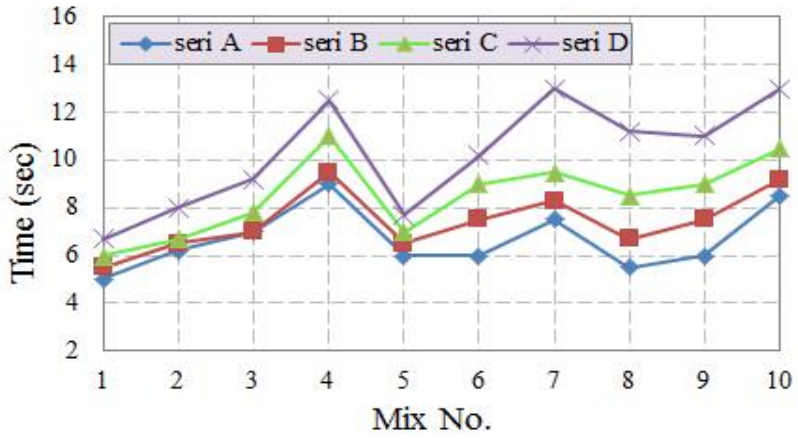
با بررسی منحنی‌های بار-تغییر مکان مربوط به نمونه‌های منشوری شکافدار(منحنی‌های ۱۲ الی ۱۴) که برای تعیین انرژی شکست ارائه شده، شاخهٔ نزولی منحنی نمونه شاهد با افزایش درصد الیاف، کرنش نرم شدگی[1] قابل توجهی پیدا کرده که این رفتار در نمونه‌های حاوی الیاف به خصوص الیاف فلزی به‌طور چشمگیری به صورت شکست نرم‌تر اصلاح شده و سطح زیر منحنی بار-تغییر مکان بیشتری به وجود آورده که عمدتاً بعد از بار حداکثر[2] بوده و در نتیجه قابلیت جذب انرژی بتن شاهد را افزایش می‌دهد.

[1] softening strain
[2] post peak

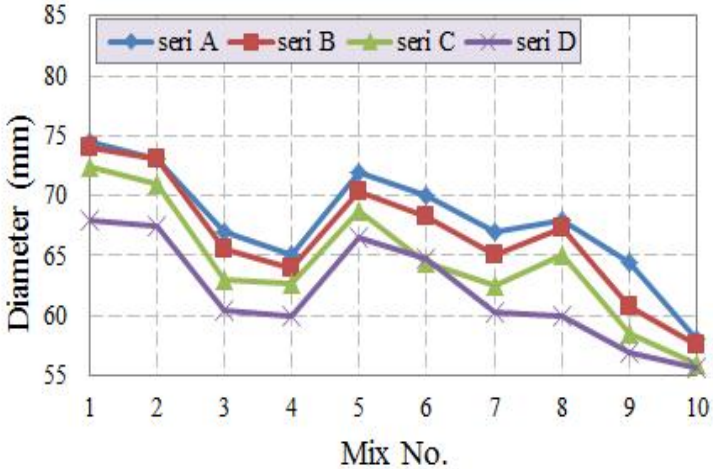
Archive of SID

www.SID.ir

نتایج مربوط به انرژی شکست و چقرمگی طرح‌های مختلف در جدول ۴ و شکل‌های۱۵ و ۱۶ ارائه شده است. با بررسی نمودارهای مذکور می‌توان نتیجه گرفت با افزایش درصد الیاف‌ها، چقرمگی و انرژی شکست بتن خودتراکم به‌طور چشمگیری افزایش یافته است که در این میان الیاف‌های فلزی، چقرمگی بتن‌های خودتراکم را ۲۰ تا ۳۰ برابر و الیاف‌های پلی پروپیلن حدوداً ۵ برابر و الیاف شیشه نیز حدوداً ۳ برابر می‌کند. این نشان از عملکرد بهتر الیاف فلزی در جذب انرژی و چقرمگی بتن خودتراکم دارد. همچنین با افزایش ۲ درصد نانوسیلیس، افزایش چقرمگی و انرژی شکست بتن در اثر افزایش درصد الیاف‌ها تشدید شده و با افزایش بیشتر از ۲ درصد (در سری‌های C و D) شاهد کاهش چقرمگی هستیم. و این کاهش می‌تواند به این علت باشد که الیاف‌ها در ماتریس‌های با مقاومت بالاتر به علت باند قوی بین ماتریس سیمان و الیاف، مقاومت بیرون‌کشیدگی (Pull out Strength) بالایی پیدا کرده، و در نتیجه یک رفتار ترد در شکست را ازخود نشان می‌دهد به‌طوری‌که بدون اینکه از ماتریس بیرون کشیده شوند، بریده می‌شوند. ولی در طرح‌های سری B شامل ۲ درصد نانوسیلیس، مقاومت بیرون‌کشیدگی بین الیاف و ماتریس در حدی است که مکانیزم بیرون‌کشیدگی را به تأخیر انداخته و باعث جذب انرژی بیشتر بتن الیافی می‌شود. در نتیجه می‌توان مقدار ۲ درصد نانوسیلیس را برای چقرمگی و انرژی شکست طرح‌ها مقدار بهینه دانست. همچنین می‌توان تأثیر حضور الیاف و نانوسیلیس را در درصد افزایش انرژی شکست (G_F) نسبت به بتن شاهد که در جدول ۴ آمده است در شکل ۱۷ مشاهده نمود.

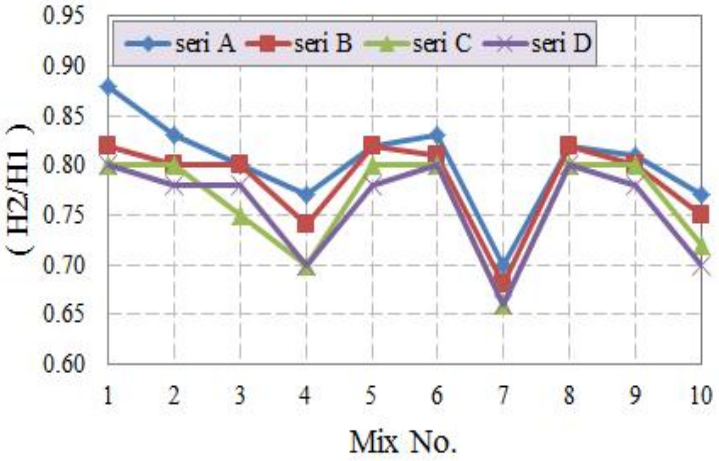


شکل۵- آزمایش جریان اسلامپ (T_{50})

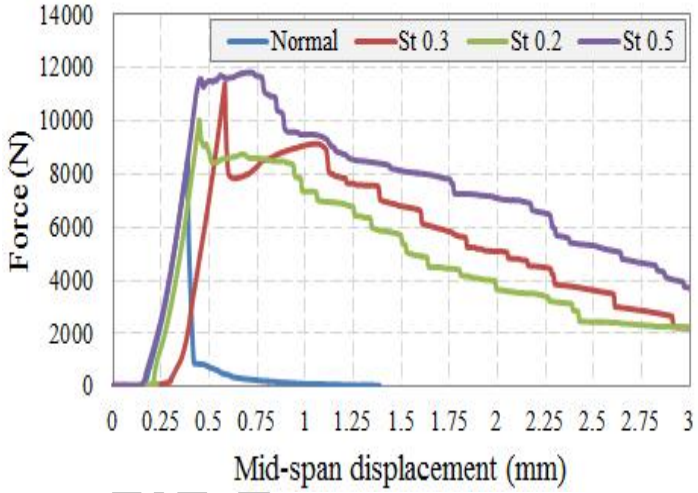


شکل۶- آزمایش جریان اسلامپ

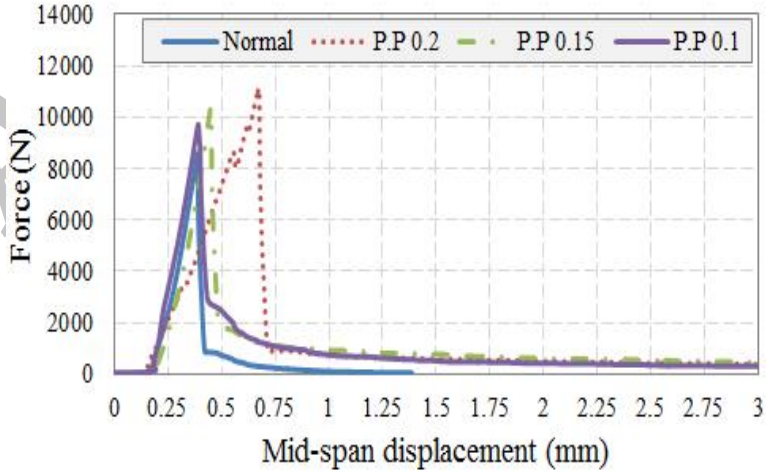
www.SID.ir



شکل۷- آزمایش L-BOX

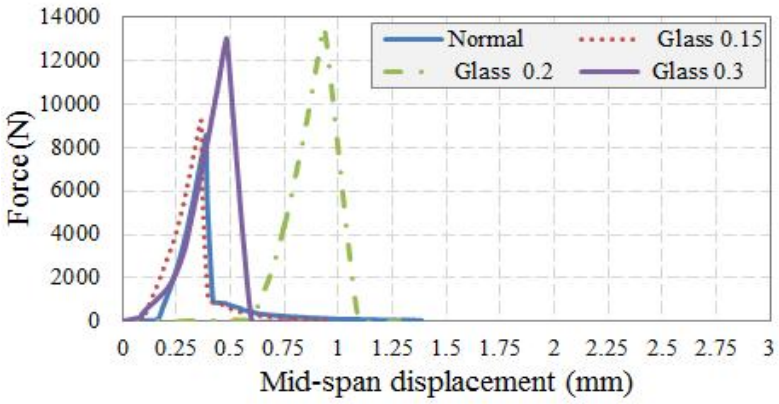


شکل۸- منحنی نیرو-تغییرمکان، نمونه‌های حاوی درصدهای مختلف الیاف فلزی

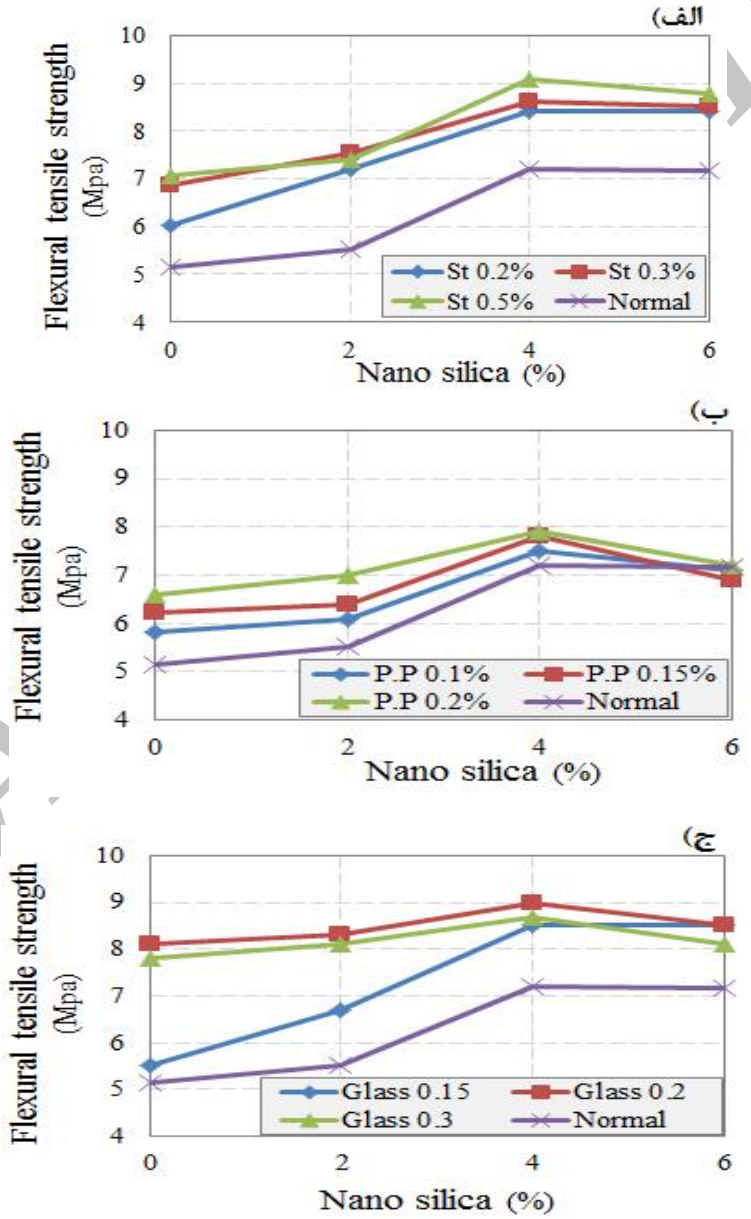


شکل۹- منحنی نیرو-تغییرمکان، نمونه‌های حاوی درصدهای مختلف الیاف پلی پروپیلن

www.SID.ir



شکل۱۰- منحنی نیرو-تغییرمکان، نمونه‌های حاوی درصدهای مختلف الیاف شیشه



شکل۱۱- مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی الف)الیاف ST، ب)الیاف P.P، ج) الیاف Glass

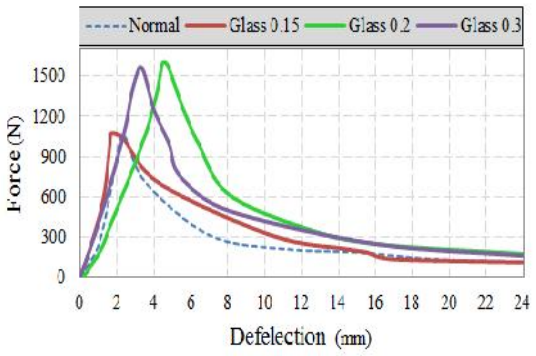
www.SID.ir

جدول ۴- نتایج به‌دست آمده از نمودار نیرو- تغییر مکان در دستگاه Universal

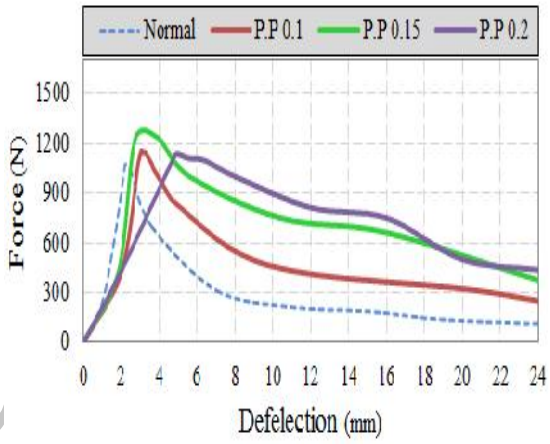
شمارهٔ اختلاط	سریال	نانوسلیس (%)	فیبر Vf (%)		P_{MAX} (KN)	$\Phi_{P_{MAX}}$ (mm)	مقاومت کششی ناشی از خمش (Mpa)	چقرمگی (N.m)	انرژی شکست G_F (J/m^2)	درصد افزایش G_F	مقاومت فشاری (Mpa)
۱	A	۰	-		۸/۶	۰/۳۹	۷/۱۲	۱/۱۹۰	۱۴۳/۵	–	۷۳
۲			St	۰/۲	۱۰/۰۴	۰/۴۵	۸/۳	۲۰/۶۵۱	۲۶۵۳	۱۷/۴۸	۷۴/۳
۳				۰/۳	۱۱/۴	۰/۵۸	۹/۰۸	۲۲/۶۹۵	۲۸۹۳/۵	۱۹/۱۶	۸۱/۵
۴				۰/۵	۱۱/۸	۰/۷۱	۹/۷	۳۱/۱۶۹	۳۸۹۰/۴	۲۶/۱۱	۷۸
۵			P.P	۰/۱	۹/۷	۰/۴	۸/۰۳	۳/۸۴۳	۵۲۹/۷	۲/۷	۷۱/۷
۶				۰/۱۵	۱۰/۴	۰/۴۵	۸/۶۱	۵/۰۱۲	۶۶۷/۳	۳/۶	۶۹/۳
۷				۰/۲	۱۱	۰/۶	۹/۱	۵/۴۳۳	۷۱۶/۸	۳/۹	۶۶/۶
۸			Glass	۰/۱۵	۹/۲	۰/۳۶	۷/۶	۲/۳۱۴	۲۸۵/۲	۰/۹۸	۸۲
۹				۰/۲	۱۳/۵	۰/۹	۱۱/۷	۳/۰۰۱	۳۶۶	۱/۵	۷۸/۵
۱۰				۰/۳	۱۳	۰/۴۵	۱۰/۷	۲/۵۷۰	۳۱۵/۳	۱/۲	۷۶/۸
۱	B	۲	–		۹/۲	۰/۳۸	۷/۶	–	–	–	۷۵/۲
۲			St	۰/۲	۱۲	۰/۴۹	۹/۹	۲۳/۷۴۸	۳۰۱۷/۴	۲۰	۷۷/۵
۳				۰/۳	۱۲/۵۵	۰/۶	۱۰/۴	۲۷/۵۵۳	۳۴۶۵	۲۳/۲	۸۲/۷
۴				۰/۵	۱۲/۳	۰/۷۳	۱۰/۲	۳۶/۴۶۸	۴۵۱۳/۸	۳۰/۵	۷۹/۲
۵			P.P	۰/۱	۱۰/۱۶	۰/۴۳	۸/۴	۴/۳۴۳	۵۸۸/۶	۳/۱	۷۳/۶
۶				۰/۱۵	۱۰/۶۵	۰/۵	۸/۸	۵/۳۵۷	۷۰۷/۸	۴	۷۰/۸
۷				۰/۲	۱۱/۶	۰/۶۷	۹/۶	۶/۰۰۷	۷۸۴/۳	۴/۵	۶۸
۸			Glass	۰/۱۵	۱۱/۱۶	۰/۳۸	۹/۲	۲/۵۰۳	۳۰۷/۴	۱/۲	۸۲/۶
۹				۰/۲	۱۳/۸	۰/۹۶	۱۱/۴	۳/۱۷۷	۳۸۶/۷	۱/۷	۸۰/۵
۱۰				۰/۳	۱۳/۵	۰/۵۲	۱۱/۱۷	۲/۲۶۹	۳۲۹/۸	۱/۳	۷۸/۷
۱	C	۴	–		۱۲	۰/۴	۹/۹	–	–	–	۸۶/۱
۲			St	۰/۲	۱۴	۰/۴۵	۱۱/۶	۲۲/۵۰۵	۲۸۷۱/۱	۱۹	۸۵/۷
۳				۰/۳	۱۴/۳	۰/۶۲	۱۱/۸۶	۲۶/۷۸۵	۳۳۷۴/۷	۲۲/۵	۸۸
۴				۰/۵	۱۵/۱۶	۰/۷	۱۲/۵	۳۵/۱۰۵	۴۳۵۳/۵	۲۹/۳	۸۷/۲
۵			P.P	۰/۱	۱۲/۵	۰/۴۲	۱۰/۳۵	۳/۹۸۰	۴۵۴/۸	۲/۸	۸۲/۶
۶				۰/۱۵	۱۳	۰/۵	۱۰/۷	۵/۳۰۹	۷۰۲/۲	۳/۹	۷۸/۷
۷				۰/۲	۱۳/۲	۰/۶۵	۱۰/۹	۵/۹۱۱	۷۷۳	۴/۴	۷۶/۵
۸			Glass	۰/۱۵	۱۴/۲	۰/۳۸	۱۱/۷	۲/۴۷۰	۳۰۳/۵	۱/۱	۸۸/۷
۹				۰/۲	۱۵	۰/۹	۱۲/۴	۳/۱۰۲	۳۷۷/۸	۱/۶	۸۴
۱۰				۰/۳	۱۴۷/۵	۰/۵	۱۲	۲/۵۱۵	۳۰۸/۸	۱/۱	۸۳/۶
۱	D	۶	–		۱۱/۹۵	۰/۳۸	۹/۸۶	–	–	–	۸۵/۴
۲			St	۰/۲	۱۴	۰/۴۵	۱۱/۶	۲۱/۰۷۸	۲۷۰۳/۳	۱۷/۸	۸۵/۲
۳				۰/۳	۱۴/۱۶	۰/۶	۱۱/۷۴	۲۱/۹۷۰	۲۸۰۸/۲	۱۸/۶	۸۶/۷
۴				۰/۵	۱۴/۶	۰/۷	۱۲/۱	۳۰/۵۵۶	۳۸۱۸/۵	۲۵/۶	۸۶/۱
۵			P.P	۰/۱	۱۱/۸	۰/۴۱	۹/۸	۳/۸۵۰	۵۳۰/۶	۲/۶	۷۹/۶
۶				۰/۱۵	۱۱/۵	۰/۵	۹/۵	۵/۱۱۲	۶۷۹	۳/۷	۷۷
۷				۰/۲	۱۲	۰/۶۱	۹/۹۵	۵/۴۳۰	۷۱۶/۵	۳/۹	۷۲/۳
۸			Glass	۰/۱۵	۱۴/۱	۰/۳۶	۱۱/۷	۲/۲۷۰	۲۸۰	۰/۹۵	۸۶/۳
۹				۰/۲	۱۴	۰/۹۲	۱۱/۵۷	۲/۸۷۶	۳۵۱/۳	۱/۴	۸۳
۱۰				۰/۳	۱۳/۶	۰/۵	۱۱/۲	۲/۴۸۲	۳۰۴/۹	۱/۱	۸۲/۷

Archive of SID

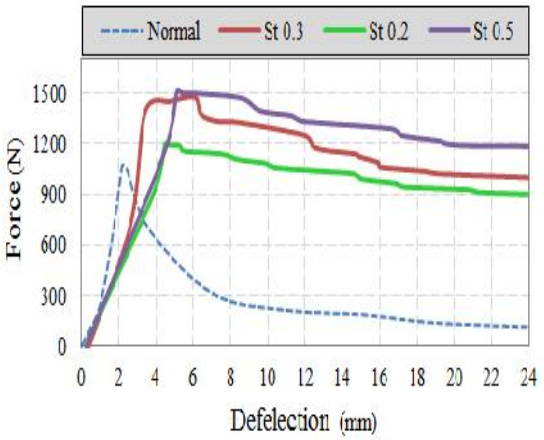
www.SID.ir



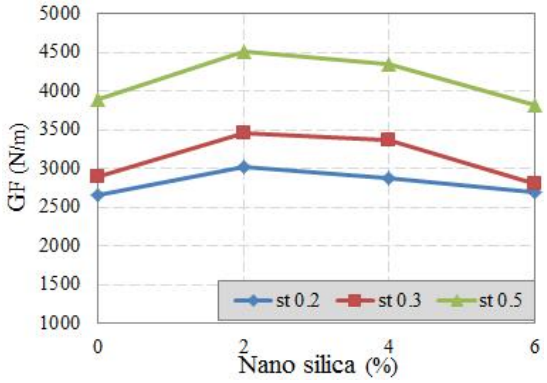
شکل۱۲- منحنی نیرو-تغییرمکان، نمونه‌های شکافدار حاوی درصدهای مختلف الیاف فلزی



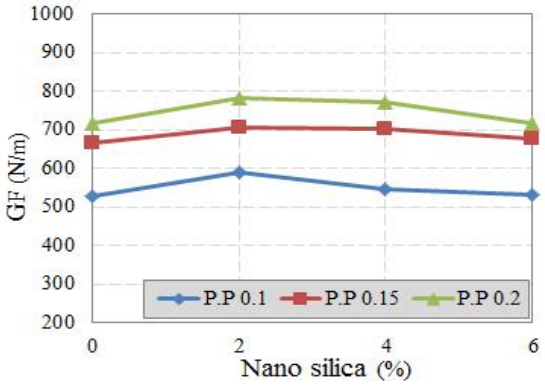
شکل۱۳- منحنی نیرو-تغییرمکان، نمونه‌های شکافدار حاوی درصدهای مختلف الیاف پلی پروپیلن



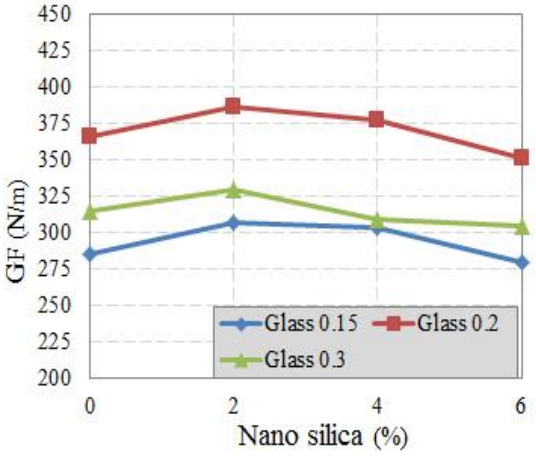
شکل۱۴- منحنی نیرو-تغییرمکان، نمونه‌های شکافدار حاوی درصدهای مختلف الیاف شیشه



(الف)



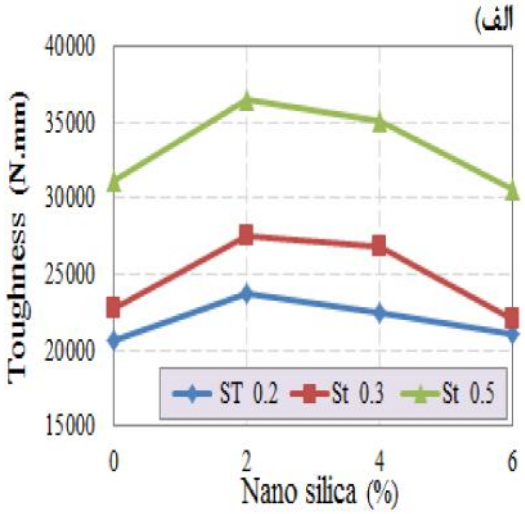
(ب)

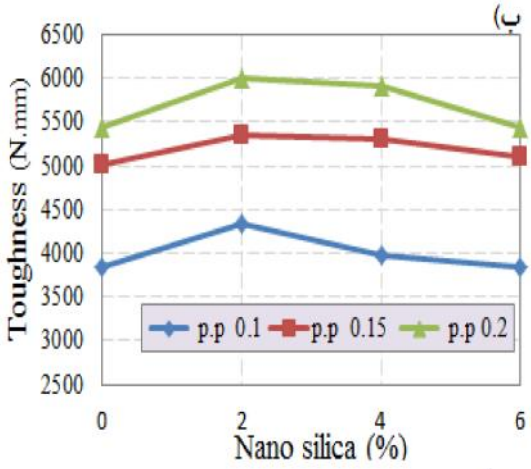


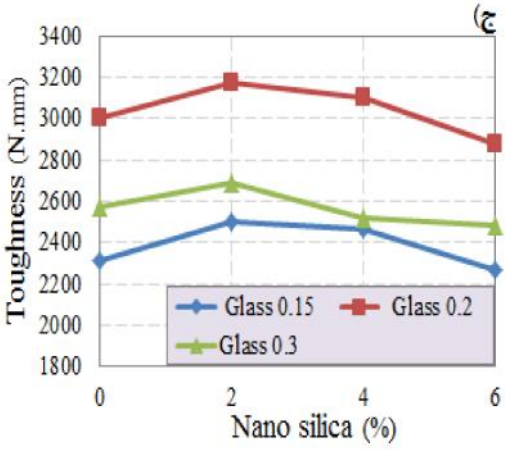
(ج)

شکل۱۵- انرژی شکست نمونه‌های حاوی درصدهای مختلف الف)الیاف **ST**، ب)الیاف **P.P**، ج) الیاف **Glass**

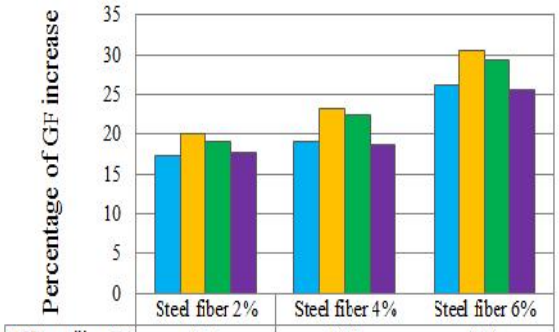
www.SID.ir





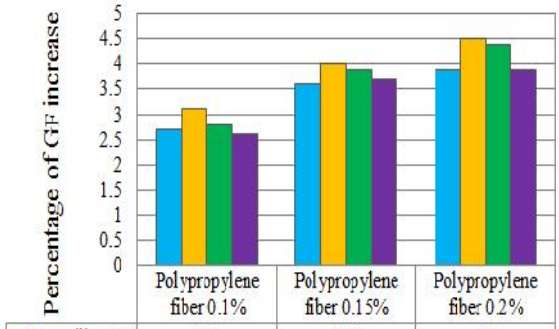


شکل۱۶- چقرمگی نمونه‌های حاوی الف)الیاف ST، ب)الیاف P.P، ج) الیاف Glass



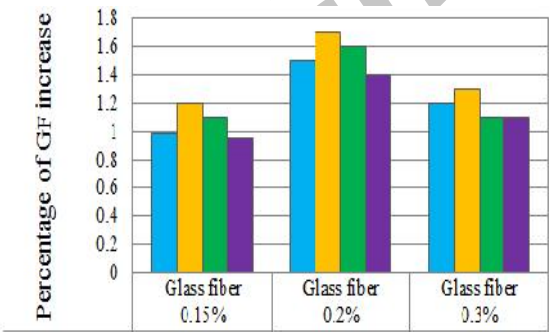
	Steel fiber 2%	Steel fiber 4%	Steel fiber 6%
Nano silica 0%	17.4	19.1	26.1
Nano silica 2%	20	23.2	30.5
Nano silica 4%	19	22.5	29.3
Nano silica 6%	17.8	18.6	25.6

(الف)



	Polypropylene fiber 0.1%	Polypropylene fiber 0.15%	Polypropylene fiber 0.2%
Nano silica 0%	2.7	3.6	3.9
Nano silica 2%	3.1	4	4.5
Nano silica 4%	2.8	3.9	4.4
Nano silica 6%	2.6	3.7	3.9

(ب)



	Glass fiber 0.15%	Glass fiber 0.2%	Glass fiber 0.3%
Nano silica 0%	0.98	1.5	1.2
Nano silica 2%	1.2	1.7	1.3
Nano silica 4%	1.1	1.6	1.1
Nano silica 6%	0.95	1.4	1.1

(ج)

شکل ۱۷- درصد افزایش انرژی شکست (G_F) نسبت به نمونه شاهد، نمونه‌های حاوی الیاف الف)St ب)P.P ج)Glass

www.SID.ir

۱۰. نتیجه گیری

- با توجه به نتایج آزمایش‌های کارایی بتن خودتراکم، مشاهده گردید که استفاده از انواع الیاف، اثرات منفی بر خواص رئولوژی بتن خودتراکم تازه دارند و همچنین استفاده از نانو سیلیس، به علت دارا بودن واکنش پذیری بالا سبب کاهش کارایی و افزایش قوام و لزجت بتن خودتراکم می گردد.

- خصوصیات مکانیکی اعم از مقاومت‌های فشاری، خمشی و کششی بتن‌های ساخته شده با افزایش درصد نانو سیلیس تا ۴ درصد، افزایش وبعد از آن تقریباً کاهش می‌یابند و آن نیز به علت سطح ویژه بسیار بالای نانو ذرات است که وقتی مقدارشان از حد معینی (مقدار بهینه) بیشتر شود می‌تواند با یک واکنش فیزیکی به هم چسبیده و کلوخه‌های ناپایدار را ایجاد کند. می‌توان در این بررسی آزمایشگاهی ۴ درصد نانو سیلیس را درصد بهینه دانست.

- در این بررسی آزمایشگاهی بتن‌های حاوی الیاف‌های مختلف خصوصیات مکانیکی متفاوتی نشان می‌دهند. به‌طوری که برای بتن‌های حاوی الیاف فلزی با افزایش درصد الیاف تا ۰.۳ درصد حجمی مقاومت فشاری افزایش سپس کاهش می‌یابد، در حالی که با افزایش درصد الیاف فلزی، مقاومت خمشی و کششی روند صعودی دارند. ولی در بتن حاوی الیاف پلی‌پروپیلن با افزایش درصد الیاف، شاهد کاهش مقاومت فشاری و افزایش مقاومت کششی و خمشی هستیم. در بتن‌های حاوی الیاف شیشه، در کل مقاومت فشاری آن از بتن شاهد بالاتر است ولی با افزایش درصد الیاف شیشه شاهد روند نزولی در مقاومت فشاری هستیم.

- با بررسی نتایج حاصل از تست خمش، در طرح اختلاط‌های موجود، با افزایش درصد الیاف‌ها، بخصوص الیاف فولادی در بتن خودتراکم، شاهد افزایش چشم‌گیر مقاومت‌های خمشی و به‌دنبال آن افزایش شکل‌پذیری هستیم و همچنین با افزایش درصد نانو سیلیس تا ۴ درصد وزن سیمان در این طرح‌ها، این افزایش، تقویت شده که می‌توان به اثر فیلری و پوزولانی نانو سیلیس در تقویت ناحیهٔ انتقال الیاف و ماتریس سیمان پی برد.

- با بهره‌گیری از نانوتکنولوژی در این تحقیق نشان داده شده که می‌تواند راهکاری مناسب جهت بهبود هرچه بیشتر خواص مصالح سیمانی باشد، به‌طوری که با افزایش تراکم مخلوط، سطح تماس بیشتری بین الیاف و خمیر سیمان فراهم شده لذا اصطکاک افزایش یافته و عملکرد الیاف بهبود می‌یابد. از طرف دیگر پوزولان‌ها با جلوگیری از آب روی در لایه تماس بین الیاف و خمیر سیمان از طریق پرکنندگی و کاهش میزان کریستال‌های هیدروکسید کلسیم در سطح تماس از ضخامت ناحیهٔ انتقال (Transition Layer) می کاهد.

- مهم‌ترین اثر الیاف در بتن، افزایش انرژی شکست و شکل‌پذیری آن است. به‌طوری که در این تحقیق نمونه‌های بتن خودتراکم با حضور ۲ درصد نانوسیلیس، با افزودن ۰/۲ و ۰/۳ و ۰/۵ درصد الیاف فلزی، انرژی شکست را نسبت به بتن شاهد به ترتیب حدود ۲۰، ۲۳، ۳۱ درصد افزایش داده و با افزودن ۰/۱ و ۰/۱۵ و ۰/۲ درصد الیاف پلی پروپیلن به ترتیب حدود ۳، ۴ ، ۴/۵ درصد انرژی شکست را نسبت به بتن شاهد افزایش داده و الیاف شیشه نیز به ازای افزودن ۰/۱۵ و ۰/۲ و ۰/۳ درصد حجمی، انرژی شکست را به‌طور میانگین ۱/۵ درصد افزایش دادند.

- همان‌طور که ملاحظه می‌شود رفتار بتن SCC فاقد الیاف (شاهد) تحت خمش، بعد از نقطهٔ حداکثر تنش و در شاخه نزولی بدون نرم شدگی و تقریباً عمودی است و به عبارتی نوعی شکست انفجاری اتفاق می‌افتد که این افزایش تردی باعث شکست‌های ناگهانی و فاجعه باری در معرض زلزله می شود که این رفتار با استفاده از الیاف به خصوص الیاف فلزی به‌طور قابل ملاحظه ای به صورت شکست نرم‌تر اصلاح شده و قابلیت جذب انرژی آن‌ها را بالاتر می برد.

- با افزودن الیاف، مکانیزم شکست از حالت ترد و ناگهانی به حالت شکل‌پذیر تغییر می‌یابد. دوزندگی الیاف که پس از بار حداکثر شروع می شود باعث شکل پذیری زیاد در نمونه‌های بتن الیافی شده و حداکثر جابه‌جایی قابل تحمل تیرهای منشوری با افزایش درصد الیاف بیشتر می‌شود.

- نتایج مربوط به چقرمگی طرح‌های مختلف در این تحقیق نشان داد با افزایش درصد الیاف‌ها، چقرمگی بتن به‌طور چشمگیری افزایش یافته است که در این میان الیاف‌های فلزی، چقرمگی بتن‌های خودتراکم را ۲۰ تا ۳۰ برابر و الیاف‌های پلی پروپیلن حدوداً ۵ برابر و الیاف شیشه نیز حدوداً ۳ برابر می‌کند. این نشان از عملکرد بهتر الیاف فلزی در جذب انرژی وچقرمگی بتن خودتراکم دارد.

- با افزایش ۲ درصد نانوسیلیس، افزایش چقرمگی و انرژی شکست بتن خودتراکم در اثر افزایش درصد الیاف‌ها تشدید شده و با افزایش بیشتر از۲ درصد

Archive of SID

www.SID.ir

نانوسیلیس، شاهد کاهش چقرمگی و انرژی شکست هستیم. و این کاهش می‌تواند به این علت باشد که الیاف‌ها در ماتریس‌های با مقاومت بالاتر به علت پیوستگی قوی بین ماتریس سیمان و الیاف، مقاومت بیرون کشیدگی(Pull out Strength) بالایی پیدا کرده و یک رفتار ترد در شکست را ازخود نشان می‌دهد به‌طوری‌که بدون این‌که از ماتریس بیرون کشیده شوند، بریده می‌شوند.

۱۱. مراجع

[1]. Ozawa K, Maekawa K, Okamura H. "Self-Compacting high performance concrete," Collected Papers (University of Tokyo: Department of Civil Engineering), 34, pp135-149, 1996.

[2]. Okamura H. "Self Compacting High-Performance Concrete," Concrete International, PP 50-54,1997.

[3]. Okamura H, Ozawa K. "Self-Compactable high performance concrete in japan," International Workshop on High Performance Concrete, SP 169, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp 31-44,1994.

[4]. Ouchi M, Hibino M, Okamura H. "Effect of super plasticizer on self-compact ability of fresh concrete", TRR 1574, pp 37-40, 1996.

[5]. Nehdi M, El-Chabib H, El-Naggar H. "Cost-effective SCC for deep foundations." Concr Int, 25(3):95–103, 2003.

[6]. Khayat KH. "Workability, testing, and performance of self-consolidating Concrete," ACI Mater J, 96(3):346–5,1999.

[7]. Md. Safiuddin, J.S. West, K.A. Soudki. "Flowing ability of the mortars formulated from self-compacting concretes incorporating rice husk ash," Construction and Building Materials, 25 ,973–978, 2011.

[8]. V. Corinaldesi, G. Moriconi, "The role of industrial by-products in self-compacting concrete," Construction and Building Materials, 25, 3181–3186, 2011.

[9]. Romualdi JP, Batson GB. "Mechanics of crack arrest in concrete," Proc ASCE, 89(EM 3):147–68, 1963.

[10]. Romualdi JP, Mandel JA. "Tensile strength of concrete affected by uniformlydistributed closely spaced short lengths of wire reinforcement," ACI J Proc, 61(6):657–71,1964.

[11]. soroushian p. "Secondary reinforcemmt adding cellulose fibers," ACI, Concrete International, pp 28-38, 1986.

[12]. Seung Hun Park, Dong Joo Kim, Gum Sung Ryu, Kyung Taek Koh. "Tensile behavior of Ultra High Performance Hybrid Fiber Reinforced Concrete," Cement & Concrete Composites, 34, 172–184, 2012

[13]. Lin,Wei-ling. "Toughness ehavior of fiber reinforced concrete," Fiber Reinforced Cement and Concrete, Proceedings of the Fourth RILEM International symposium, Sheffield, UK, pp299-315, 1992.

[14]. Su-Tae Kang, Yun Lee, Yon-Dong Park c, Jin-Keun Kim. "Tensile fracture properties of an Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) with steel fiber." Composite Structures, 9261–71, 2010.

[15]. R.S. Olivito, F.A. Zuccarello. "An experimental study on the tensile strength of steel fiber reinforced concrete," Composites: Part B 41 246–255, 2010.

[16]. Mohammed Seddik Meddah, Mohamed Bencheikh. "Properties of concrete reinforced with different kinds of industrial waste fibre materials," Construction and Building Materials, 23, 3196–3205, 2009.

[17].Y. Mohammadi, S.P. Singh b, S.K. "Kaushik. Properties of steel fibrous concrete containing mixed fibres in fresh and hardened state. Construction and Building Materials," 22 956–965, 2008.

[18]. Y. Mohammadi, R. Carkon-Azad, S.P. Singh, S.K. Kaushik. "Impact resistance of steel fibrous concrete containing fibres of mixed aspect ratio," Construction and Building Materials, 23, 183–189, 2009.

[19].F. Bencardino, L. Rizzuti, G. Spadea, R.N. Swamy, "Experimental evaluation of fiber reinforced concrete fracture properties," Composites: Part B 41 17–24, 2010.

[20]. Qing Y, Zenan Z, Deyu K, Rongshen k. "Influence of nano-SiO2 addition on properties of hardened cement paste as compared with silicafume," Construction and Building Materials, 21, 539-545, 2007.

[21]. Collepardi M, Ogoumah Olagot J, Troli R, Simonelli F, Collepardi S. "Combination of silica fume, Fly Ash and Amorphous Nano-Silicain Superplasticized High-PerformanceConcretes," Enco, Engineering Concrete, PonzanoVeneto, Italy, 2007.

[22]. Li G. "Properties of high-volume fly ash concreteincorporating nano-SiO2," Cement and

ConcreteResearch, 34, 1043-1049, 2004.

[23]. Mounir Ltifi, Achraf Guefrech, Pierre Mounanga, Abdelhafid Khelidj. "Experimental study of the effect of addition of nano-silica on the behaviour of cement mortars," Procedia Engineering 10, 900–905, 2011.

Archive of SID

www.SID.ir

[36]. Henegar, C.H., , “Toughness Index of Fiber Concrete,” Testing and Test Methods of Fiber Cement Composites. Construction Press Ltd, Lancaster, UK, pp. 79-86, 1978.

[37]. JCI, “Method of Tests for Flexural Strength and Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete,” JCI Standard SF-4, Japan Concrete Institute Standards for Test Method of Fiber Reinforced Concrete, pp.45-51,1984.

[38]. IBN, “Test of Reinforced Concrete .Bending Test on Prismatic Specimens,” institute Belge de Normalisation, 1040 Brussels, Belgium, 9 pp, 1992.

[39]. DBV, “Basis for Dimensioning SFRC in Tunnel Construction,” Deutschen Beton-Vereins, pp. 19-43, 1992.

[40]. RILEM 49TFR, “Testing Methods for Fiber Reinforced Cemet-Based Composites,” RILEM Draft Recommeddations, Materials and Structures, 17. Pp.441-56,1984.

[41]. AENOR, “Detemination of the Toughness Index and First Crack Strength,” Asociation Espanola de Normalisacion y Certification, 28010, 4. Pp. ,1989.

[42]. Guo, X. H., Tin –Loi, F., and Li, H., “Determination of Quasi-Brittle Fracture Law for Cohesive Crack Models,” Cement and Concrete Research, Vol. 29, pp. 1055-1059, 1999.

[43]. Bazant, Z. P., Planas, J., “Fracture and Size Effect in Concrete and other Quasibrittle Materials,” CRC Press, Florida, USA, 1997.

[44]. Navalurkar, R. K., Hsu, C. T. T., Kim, S. K., and Wecharanta, M., “True Fracture Energy of Concrete,” ACI Materials Journal, Vol. 96, No. 2, pp. 213-224, March-April 1999.

[45]. Elices, M., Guinea, G. V., Gomez, J., and Planas, J., “The Cohesive Zone Model: Advantages, Limitations And Challenges,” Engineering Fracture Mechanics, Vol. 69, pp. 137-163, 2002.

[46]. Y. S., Jenq, and S. P., Shah, “Two Parameter Fracture Model for Concrete,” Journal of Engineering Mechanics, Vol. 111, No. 10, pp. 1227-1241, 1985.

[47]. Bazant, Z. P., Kazemi, M. T., “Size Effect in Fracture of Ceramics and its Use to Determine Fracture Energy and Effective Process Zone Length,” J. Am. Ceram. Soc., Vol. 73, No. 7, pp. 1841-1853, 1990.

[48]. RILEM TC-50 FMC, Fracture Mechanics of Concrete, “Determination of the Fracture Energy of Mortars and Concrete by Means of 3PB Tests on Notched Beams,” RILEM Recommendation, Materials and Structures, Vol. 18, No. 106, pp. 285-290, 1988.

[49]. The European Guideline for self compacting concrete specification , production and use . May 2005.

[24]. M. Aly, M.S.J. Hashmi, A.G. Olabi, M. Messeiry, E.F. Abadir, A.I. Hussain. “Effect of colloidal nano-silica on the mechanical and physical behavior of waste-glass cement mortar,” Materials and Design 33, 127–135, 2012.

[25]. Alireza Naji Givi, Suraya Abdul Rashid, Farah Nora A. Aziz, Mohamad Amran Mohd Salleh. “The effects of lime solution on the properties of SiO2 nanoparticles binary blended concrete,” Composites: Part B, 42, 562–569, 2011.

[26]. Ali Nazari, Shadi Riahi. “The effects of SiO2 nanoparticles on physical and mechanical properties of high strength compacting concrete,” Composites: Part B, 42, 570–578, 2011.

[27]. A. H. Shekari, M.S. Razzaghi. “Influence of nano particles on durability and mechanical properties of high performance concrete,” Procedia Engineering 14, 3036–3041, 2011.

[28]. Qing Y, Zenan Z, Deyu K, Rongshen C. “Influence of nano-SiO2 addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume,” Construct Build Mater, 21(3):539–45, 2007.

[29]. Lin KL, Chang WC, Lin DF, Luo HL, Tsai MC. “Effects of nano-SiO2 and different ash particle sizes on sludge ash–cement mortar,” J Environ Manage 2008;88(4):708–14.

[30].Lin DF, Lin KL, Chang WC, Luo HL, Cai MQ. "Improvements of nano-SiO2 on sludge/fly ash mortar". Waste Manage, 28(6):1081–7, 2008;.

[31]. Sobolev K, Flores I, Torres-Martinez LM, Valdez PL, Zarazua E, Cuellar EL. “Engineering of SiO2 nanoparticles for optimal performance in nano cement based materials,” In: Bittnar Z, Bartos PJM, Nemecek J, Smilauer V, Zeman J, editors. Nanotechnology in construction: proceedings of the NICOM3 (3rd international symposium on nanotechnology in construction). Prague, Czech Republic, p. 139–48, 2009

[32]. Qing Y, Zenan Z, Li S, Rongshen C. “A comparative study on the pozzolanic activity between nano-SiO2 and silica fume,” J Wuhan Univ Technol – Mater Sci Ed, 21(3):153–7, 2008.

[33]. Sobolev K, Ferrada-Gutiérrez M. “How nanotechnology can change the concrete worl”: part 2. Am Ceram Soc Bull, 84(11):16–9, 2005.

[34]. Shah, S. P., Swartz, S. E., and Ouyang, C., “Fracture Mechanics of Concrete,” John Wiley and Sons, New York, USA, 1995.

[35]. ACI 544, “Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete,” American Concrete Institute, 85(6), 583-93, 1988.

Archive of SID

www.SID.ir

Evaluation of energy absorption capability in fiber reinforced self-compacting concrete containing nano-silica particles

M.H. Beygi*
Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology
J. Berenjian
Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology
O. Lotfi Omran
M.Sc. in Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology
I.M. Nikbin
PhD student in Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology
(Received: 2012/4/13, Accepted: 2011/6/25)

Abstract

Studies show that addition of different fibers does not fundamentally change the behavior of the concrete prior to its maximum stress while it greatly improves the concrete post-cracking behavior. This method positively influences other properties of the concrete including toughness, fracture energy and flexural strength. On the other hand, Using Nano-silica particles as a product of pozolanic reaction, can strongly improve the permeability of concrete by increasing transition layer of fiber and cement matrix. Thus concrete having the properties of both self compacting concrete and fiber reinforced concrete with strengthened micro matrices can improve the fabrication of durable structures with high performance level. In this research, the combined effect of nano-silica particles and fibers type (steel, polypropylene and glass) on toughness, fracture energy and flexural strength, rheological behavior (L-box, slump flow and T_{50}) of Self-Compacting concrete were evaluated.For this purpose, forty mixtures in A, B, C and D series representing 0, 2, 4 and 6 percent of Nano-silica particles replacing cement content were cast. Each series involved three different fiber type and content. 0.2, 0.3 and 0.5% volume for steel fiber, 0.1, 0.15 and 0.2% of volume for polypropylene fiber and finally 0.15, 0.2 and 0.3% of volume for glass fiber. The results show that the combined usage of optimum percent of fiber and Nano-silica particles will improve the toughness, fracture energy and flexural strength of self-compacting concrete.

Keywords: self-compacting concrete, fibers, nano-silica, fracture energy, toughness.

* Corresponding author: m.beygi@nit.ac.ir

Archive of SID

www.SID.ir