Journal of Structural and Construction Engineering, 10(4), 2023, pp. 212-232

Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir

Laboratory study to investigate the mechanical behavior and characteristics of reinforced concrete with recycled fibers in the glass industry

Mohammad Mehdi Rashidi[1], Seyed Hamidreza Kargar[1]*,Saeed Roshani[2]

1- Department of Civil Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah,Iran
2- Department of Electronical Engineering ، Kermanshah Branch ، Islamic Azad University ، Kermanshah ، Iran

ABSTRACT

In this article, the effect of recycled glass fibers on the behavior and mechanical properties of concrete was investigated. The article was done by laboratory study method and cubic and cylindrical samples were made. In all the mixing plans, the water-to-cement ratio was 0.35 and the sand-to-cement ratio was 1. First, a reference sample without fibers was prepared and subjected to various tests. By examining the samples after the test, it was observed that the failure occurred in brittle samples without recycled fibers and glass waste; But in samples reinforced with recycled fibers and glass waste, it is gradual. In these conditions, in the samples made by spray method, the modulus of rupture and displacement of the samples until the moment of failure had much higher values than the samples made by the premix method, for example, the highest modulus of rupture at the age of 28 Fasting for samples made by the premix method corresponding to a sample with 1.5%Glass fibers and 10% metakaolin was reported as 10.70 MPa, while this value is 26.49 MPa for a sample in the spray method with 4% glass fibers and 10% metakaolin. According to the obtained results, it can be seen that with the passage of time from 7 to 28 days, the amount of compressive strength has increased. The highest amount of compressive strength at 28 days is 63.7 MPa and corresponds to a sample with 2.5% glass fibers and 15% metakaolin and The lowest is40.37 MPa and corresponds to a sample with 2.5% glass fibers and 1.5% nanosilica.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

ARTICLE INFO

Receive Date: 07 June 2022
Revise Date: 31 August 2022
Accept Date: 11 September 2022

Keywords:
Concrete
recycled fibers
glass waste
compressive strength
flexural strength

doi: https://doi.org/10.22065/jsce.2022.337882.2780

*Corresponding author: seyedhamidreza kargar.
Email address: SHR.Kargar@iau.ac.ir

نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی – پژوهشی)
www.jsce.ir

Journal of Structural and Construction Engineering
JSCE
نشریه علمی-پژوهشی مهندسی سازه و ساخت

مطالعه آزمایشگاهی بررسی رفتار مکانیکی و مشخصات بتن مسلح شده با الیاف بازیافتی صنعت شیشه

محمدمهدی رشیدی[۱]، سیدحمیدرضا کارگر[۲]*، سعید روشنی [۳]

۱ - دانشجوی دکتری مهندسی سازه، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران

۲- استادیارگروه مهندسی عمران، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران

۳-دانشیارگروه مهندسی برق ، واحدکرمانشاه ، دانشگاه آزاد اسلامی ، کرمانشاه ، ایران

چکیده

در این مقاله، تاثیر الیاف بازیافتی شیشه بر رفتار و خصوصیات مکانیکی بتن بررسی شد. مقاله با روش مطالعه آزمایشگاهی انجام و نمونه های مکعبی و استوانه ای ساخته شد. در همه طرح های اختلاط نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ و نسبت ماسه به سیمان ۱ در نظر گفته شد. ابتدا یک نمونه مرجع بدون الیاف تهیه و تحت آزمایش های مختلف قرار گرفت. با بررسی نمونه ها پس از انجام آزمایش، مشاهده شد که شکست در نمونه های فاقد الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه به صورت ترد رخ داده است؛ اما در نمونه های تقویت شده با الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه به صورت تدریجی است. در این شرایط در نمونه های ساخته شده به روش اسپری، مدول گسیختگی و جابجایی نمونه‌ها تا لحظه‌ی شکست، مقادیر بسیار بیشتری نسبت به نمونه های ساخته شده در روش پیش مخلوط داشته است،به عنوان مثال بیشترین مدول گسیختگی در سن ۲۸ روزه برای نمونه های ساخته شده به روش پیش مخلوط مربوط به نمونه ای با ۱/۵٪ الیاف شیشه و۱۰٪متاکائولین و به مقدار۱۰/۷۰مگاپاسکال گزارش شد،درحالیکه این مقدار برای نمونه ای در روش اسپری با ۴٪الیاف شیشه و۱۰٪متاکائولین به میزان ۲۶/۴۹مگاپاسکال است. با توجه به نتایج بدست آمده ملاحظه می شود که با گذشت زمان از ۷ به ۲۸ روز، مقدارمقاومت فشاری افزایش یافته است.بیشترین مقدارمقاومت فشاری ۲۸ روزه،۶۳/۷مگاپاسکال و مربوط به نمونه ای با ۲/۵٪الیاف شیشه و۱۵٪متاکائولین و کمترین آن ،۴۰/۳۸مگاپاسکال و مربوط به نمونه ای با ۲/۵٪الیاف شیشه و ۱/۵٪نانوسیلیس است.

کلمات کلیدی: بتن ، الیاف بازیافتی، ضایعات شیشه، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی

سابقه مقاله:					شناسه دیجیتال:	
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.337882.2780	doi:
۱۴۰۱/۰۳/۱۷	۱۴۰۱/۰۶/۰۹	۱۴۰۱/۰۶/۲۰	۱۴۰۱/۰۶/۲۰	۱۴۰۲/۰۴/۳۱	10.22065/jsce.2022.337882.2780	

*نویسنده مسئول: سید حمیدرضا کارگر

پست الکترونیکی: SHR.Kargar@iau.ac.ir

۱- مقدمه

از بین مصالح ساختمانی می‌توان بتن را پر مصرف‌ترین ماده جهان در عرصه ساخت و ساز نامید. در طی سالیان متمادی تحقیقات وسیعی بر روی این ماده پر مصرف صورت گرفته تا خواص فیزیکی و مکانیکی آن بهبود یابد در طول دو دهه گذشته، تلاش های عملی وتحقیقاتی مختلفی برای کاهش میزان مواد زائد صورت گرفته است. به واسطه فضای محدود برای دفن زباله و افزایش هزینه آن، توجه به روش های جدید بازیافت مواد زائد حائز اهمیت شده است. در تکنولوژی ساخت و ساز پایدار، استفاده از مقادیر مشخصی از مواد زائد قابل بازیافت مانند فولاد، پلیمر و پلاستیک در مخلوط های بتنی به دلیل صرفه اقتصادی مطلوب و مزایای زیست محیطی مورد توجه است. یکی از مشکلات اصلی بتن های رایج در ساخت و ساز کمبود مقاومت خمشی و کششی آن است. افزودن الیاف و مواد بازیافتی الیاف یک روش موثر برای افزایش مقاومت بتن در برابر بارهای مختلف دینامیکی و استاتیکی و ضربه ای برای بهبود خواص مکانیکی بتن ساده و سایر انواع بتن پرمصرف در ساخت و ساز می باشد. به طور کلی اثر اصلی الیاف بازیافتی بر بتن کاهش ایجاد ترکهای گسترده ناشی از گرما و فشار است.تحقیقات اخیر محققان تاثیر مثبت افزودن مواد بازیافتی بر بهبود رفتار بتن را تایید کرده است. یک خلا مهم در این زمینه بومی نبودن مواد و افزودنی های بازیافتی به بتن است. در کشور های مختلف بدلیل ساختار صنعتی تولید زباله و مواد دور ریختنی و همچنین تکنولوژی های ساخت مواد، افزودنی هایی که برای بتن مورد استفاده قرار می گیرند متفاوت است. نبود مواد بازیافتی مورداستفاده کشورهای توسعه یافته در کشورهای کمتر توسعه یافته امکان استفاده از برخی مواد بازیافتی را به دلیل مقرون به صرفه نبودن و محدودیت دسترسی و همچنین تولید کم با چالش مواجه می سازد. به همین دلیل، در مقاله پیش رو تمرکز بر مواد بازیافتی بومی و قابل دسترس در کشور ایران به ویژه بومی شهر کرمانشاه می باشد، تا علاوه بر هزینه پایین و صرفه اقتصادی مطلوب بتوان رفتار بتن را تا حد قابل قبولی بهبود بخشید.سالیانه میلیونها تن انواع محصولات شیشه ای تولید می شود.شیشه ماده ای است که در طبیعت تجزیه نمی شود و انباشت ضایعات آن مسئله ای مهم می باشد. در این مقاله برای بررسی میزان تأثیر الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه بر روی مقاومت های خمشی و فشاری و همچنین شکل پذیری بتن مسلح به الیاف شیشه، از الیاف شیشه به طول ۲۵ میلی متر در طرح های اختلاط استفاده شده است. طرح اختلاط بتن با توجه به تحقیقات گذشته در این زمینه و همچنین با توجه به مصالح مصرفی و مشاهدات آزمایشگاهی تعیین شده است. درصد های ۱/۵ تا ۶ ٪ الیاف شیشه در بتن مورد استفاده قرار گرفت و آزمایشهای مقاومت فشاری و خمشی انجام شد.به منظور آشنایی هرچه بیشتر با موضوع ،در ادامه به بررسی تحقیقات انجام شده در زمینه استفاده از الیاف مختلف در بتن خواهیم پرداخت.

خالو و همکاران (۲۰۰۸)به بررسی مشخصات مکانیکی بتن حاوی قطعه لاستیک تایر پرداختند.این قطعه ها جایگزین ۱۲/۵٪ ، ۲۵٪، ۳۷/۵٪ و ۵۰٪ حجمی دانه های معدنی شدند. بتن حاوی قطعه های لاستیک وزن مخصوص کمتر، کارایی قابل قبول تری نسبت به بتن اصلی را داشتند. با افزودن لاستیک مقاومت فشاری و رفتار شکننده بتن به صورت قابل توجهی کاهش یافت.بتن حاوی ۲۵٪ لاستیک بیشترین شاخص نرمی را دارا بود. برخلاف بتن اصلی حالت شکستن بتن حاوی لاستیک به آرامی و یکنواخت بود. تحلیل های التراسونیک کاهش زیاد مدول التراسونیک و جذب بالای صدا برای بتن های حاوی لاستیک را نشان داد[۱]. مظاهری پور و همکاران(۲۰۱۱) بر روی تاثیر الیاف پلی پروپیلن بر روی مشخصات تازه و سخت شده بتن سبک خود متراکم مطالعاتی را انجام دادند. آنها طی آزمایشات دریافتند که زمانی که بتن به اندازه ۷۵٪ وزن خودش سبک می شود مشخصات بتن تازه فوق العاده تحت تاثیر قرار می گیرد. الیاف پلی پروپیلن تاثیر زیادی بر روی مقاومت فشاری ندارد و نیز با استفاده از ۰/۳٪ حجمی الیاف پلی پروپیلن ضمن افزایش ۱۴/۴٪ مقاومت کششی بتن منجر به کاهش ۴۰٪ اسلامپ بتن می شود[۲].خالو و همکاران (۲۰۱۴) برخی خواص جدید بتن تازه و بتن تقویت شده با الیاف فولادی را بررسی کردند. چهار حجم مختلف فیبر فولاد با مقادیر (۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲٪) در آزمایشات آنها مورد استفاده قرار گرفت. خصوصیات رئولوژیکی ترکیبات مخلوط را اندازه گیری کردند. نتایج آنها نشان داد که اضافه کردن فیبر فولادی ویژگی های رئولوژیک را کاهش می دهد. مشخص شد که اضافه کردن فیبرفولاد باعث افزایش مقاومت کششی، قدرت خمشی و سختی خمشی شده و مقاومت فشاری را کاهش می دهد[۳]. کیزیکانت و همکاران (۲۰۱۵) نتیجه گیری کردند که استفاده از زباله های شیشه ای با انواع مواد افزودنی و رنگ ها، سطوح مختلف مقاومت شیشه ای و ترکیب با پلیمر های مختلف تضعیف می کند. چنین تنوع در ترکیب، بازدارندگی را مختل خواهد کرد. تکنیک های بسیاری برای استفاده از شیشه های بازیافتی وجود دارد که یکی از آنها شامل ملات سیمان است که به عنوان پوزولان اعمال

می شود[۴]. وانگ و همکاران (۲۰۱۶) رفتار بتن بازیافتی در معرض یون کربنات را مورد بررسی آزمایشگاهی قرار دادند. آنها نتیجه گیری کردند که بسیاری از ترک هایی که در نمونه های با و بدون مواد بازیافتی ایجاد شده و طی بارگذاری ادامه می یابد در سراسرنمونه بصورت ماتریسی توزیع میشود. سپس با مدل عددی نمونه ها را مدلسازی نمودند که مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی آنها نشان داد که مدل پیشنهاد شده به درستی شبیه سازی منحنی بار جابجایی و مکانیسم شکست، را تایید کرد که خواص بتن بازیافتی در معرض کربنات بستگی به عمق استفاده از کربن، توزیع ملات قدیمی و شکل اولیه توزیع مواد بازیافتی جامد در نمونه می شود [۵]. ماستالی و همکاران (۲۰۱۷) در مقاله ای به بررسی خواص تازه و عمل آوری شده بتن های خود متراکم تقویت شده با ترکیب بازیافت شده فیبر فولادی پلی پروپیلن پرداخته و نتایج آزمایشگاهی را در مورد بتن خودمتراکم با الیاف ارائه دادند. آنها بتن خود متراکم را با ترکیب پلی پروپیلن و فولاد بازیافتی در قطعات مختلف افزودنی بصورت حجمی بررسی کردند. آنها از فولاد داخل تایرهای بازیافتی استفاده کردند. افزودنی ترکیبی فولاد و الیاف پلی پروپیلن را بامقادیر (۰/۳۵، ۰/۷ و ۱/۰۵٪) و مقدار الیاف ۳۵ درصد و ۷ درصد به نمونه ها اضافه کردند. نتایج نشان داد که اضافه کردن فیبر فولاد پلی اتیلن بازیافتی ترکیبی باعث بهبود مقاومت میشود و خواص مکانیکی بتن خود متراکم را افزایش می دهد. اضافه کردن فیبر فولاد بازیافت باعث بهبود بیشتر در مقاومت فشاری نسبت به فیبر پلی پروپلن میشود. افزایش محتوای فیبر پلی اتیلن باعث کاهش اثر فیبر فولاد بازیافت شده در بهبود مقاومت خمشی می شود[۶]. فتحی و همکاران(۲۰۱۷) در مقاله ای به بررسی اثرات همزمان فیبر و شیشه بر خواص مکانیکی از بتن خود تراکم پرداخته و رفتار مکانیکی بتن را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که جایگزینی شیشه به عنوان سنگدانه می تواند مقاومت فشاری و استحکام بتن را کاهش دهد. علاوه بر این، الیاف باعث افزایش مقاومت کششی و مقاومت فشاری بتن می شوند. برای اندازه گیری مقاومت خمشی بتن های حاوی شیشه و پلی پروپیلن، برای اندازه گیری مقاومت فشاری شش تیر بتن (۱۰ * ۱۰ * ۴۰ سانتی متر)و هشتاد نمونه مکعبی (۱۵ سانتیمتر) ساخته شدند. نتایج نشان داد که اضافه کردن ۰/۵-۱٪ از فیبر ها به بتن حاوی شیشه می تواند مقاومت فشاری بتن بدون شیشه را افزایش دهد[۷]. مازوکو و همکاران (۲۰۱۸) مطالعه ای آزمایشگاهی برای بتن های با سنگدانه های عادی و سنگدانه های پیشنهادی از مواد بازیافتی انجام دادند. آنها نمونه های مختلف را در سه فاز سنگ طبیعی، ملات قدیمی و ملات جدید آزمایش و ارزیابی کردند. بدون در نظر گرفتن تاثیرات مواد افزودنی و با در نظر گرفتن مواد افزودنی آزمایشها را انجام دادند. آنها نتیجه گیری کردند که مدل آنها توصیفی از تاثیر محلی محوطه جانبی موجود در ستون های بتنی محدود و رفتار غیر الاستیک بتن را ارائه می دهد[۸]. پاچسو و همکاران (۲۰۱۹) در مقاله ای به بررسی آزمایشگاهی تجربی تغییرپذیری خصوصیات مکانیکی خواص بتن تولید شده با بتن ترکیبی بازیافتی پرداختند. نتایج مقاله آنها نشان داد که ترکیب کلی بتن بازیافت شده، تغییرات هر کدام از خواص مورد آزمایش را افزایش نمی دهد. خواص تمام ترکیبات به طور مناسب با توزیع نرمال مدل سازی شد[۹].

لی و کائو (۲۰۱۹) در مقاله ای به بررسی رفتارهای رئولوژیکی و مدل بتن تازه تحت ارتعاش پرداخته و با توجه به اینکه رفتار رئولوژیکی بتن تازه تحت ارتعاش بسیار متفاوت از حالت استاتیک است آنها تغییرات فاصله از ویبراتور و ضخامت بتن را بررسی کردند. نتایج آزمایش آنها نشان داد که رفتار حاصل از تنش برشی - رابطه میزان فشار برشی بطور کامل با معادلات نظری مطابقت دارد [۱۰]. ایربی و همکاران (۲۰۱۹) در مقاله ای به بررسی تاثیر افزودن آلومینیوم بر مقاومت بتن در برابر حمله سولفاته پرداختند.. نتایج نشان داد که پتاسیم باعث افزایش PH می شود. به طور مستقیم افزودن آلومینیوم در طی حمله سولفات به بتن باعث تشکیل اترینگیت بالاتر از PH اشباع پورتلاندیت شده است. افزایش میزان غلظت سولفات خارجی از ۳ تا ۳۰ گرم در لیتر SO4 باعث افزایش مقدار اترینگیت توسط مقدار اندکی شد. شکل گیری اترینگیت از آلومینیوم در معرض راه حل Na2SO4 با در دسترس بودن کلسیم کنترل می شود[۱۱].

وانگ و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی خواص مکانیکی بتن با کارایی بالا تقویت شده با الیاف بازالت و الیاف پلی پروپیلن پرداختند. نتایج آزمایشات آنها نشان می‌دهد که مقاومت بتن تقویت‌شده با الیاف بازالت یا الیاف پلی پروپیلن با افزایش کسر حجمی الیاف افزایش می‌یابد. مقاومت فشاری کمی افزایش می‌یابد، در حالی که مقاومت خمشی و مقاومت کششی شکاف به طور قابل‌توجهی بهبود می‌یابد. برای طرح اگر مقدار الیاف بازالت ۰/۱۵ ٪ و مقدار الیاف پلی پروپیلن ۰/۰۳۳ ٪ باشد، اثر هم افزایی مخلوط کردن الیاف بهترین است [۱۲].

علی و قریشی (۲۰۱۹) تأثیر الیاف شیشه بر عملکرد مکانیکی و دوام بتن با سنگدانه های بازیافتی را بررسی کردند. نتایج آزمایش نشان می‌دهد که بتن با سنگدانه بازیافتی ۵۰ درصد در عملکرد کلی مکانیکی (مقاومت فشاری، کششی و خمشی) از بتن سنگ دانه‌های درشت معمولی در ۵۰ درصد بهتر عمل می‌کند. تمامی خواص دوام مبتنی بر نفوذپذیری به طور منفی تحت‌تاثیر افزایش محتوای RCA و GFقرار می‌گیرند [۱۳].

قلهکی و پاچیده(۲۰۱۹)در مقاله ای تاثیر مواد پوزولانی بر خواص مکانیکی و جذب آب بتن ACC را مورد بررسی قراردادند.بتن هوادهی شده اتوکلاو شده به مقاومت ناکافی و جذب آب بالا مشهور است که در این مقاله برای حل این مشکل از دوده سیلیسی،زئولیت و سرباره کوره آهن گدازی استفاده شده است.آزمایشهای مقاومت فشاری،کششی و جذب آب برروی نمونه های استوانه ای ۱۰۰*۲۰۰میلی متری و مکعبی ۱۰۰*۱۰۰*۱۰۰مکعبی انجام شد.براساس نتایج افزودن مواد پوزولانی به طور موثر خواص مکانیکی را افزایش و جذب آب را کاهش می دهد.دوده سیلیسی ،زئولیت و سرباره کوره آهن گدازی منجر به افزایش مقاومت به میزان ۱۸۴،۲۰۰ و۱۷۲٪شدند. علاوه براین گنجاندن مواد پوزولانی به میزان ۲۱٪وزنی سیمان،می تواند مقاومت کششی را تا ۲۵٪بهبود بخشد.مهمتر از همه جذب آب نمونه های حاوی سیلیس ،زئولیت و سرباره کوره آهن گدازی به ترتیب ۵۰،۴۵و۳۵٪کاهش یافت[۱۴].

قلهکی و همکاران(۲۰۱۹)در مقاله ای به مطالعه عملکرد پس از گرمایش ملات سیمان حاوی سیلیس و سرباره کوره آهن گدازی پرداختند.برای این منظور آزمونهای مقاومت فشاری،کششی و خمشی برروی ملات سیمانی با درصدهای ۷،۱۴و۲۱٪مواد پوزولانی به عنوان جایگزین سیمان انجام شد.برای فرایند گرمایش نمونه ها در معرض دماهای ۷۰۰،۵۰۰،۲۵۰،۱۰۰،۲۵و۹۰۰درجه سانتی گراد قرار گرفتند.بر اساس نتایج در دماهای کم و زیاد(تا ۲۵۰و۵۰۰وبزرگتر) ،SF،GBFSو به طور موثر می توانند عملکرد ملات را بهبود بخشند.از نظر کمی مقاومت فشاری،کششی و خمشی در معرض دماهای پایین و بالا به ترتیب ۱۸۰،۷۳و۴۵ و۱۰۶،۱۰۰و۱۱۲٪افزایش یافت[۱۵].

عقابی و خوش وطن(۲۰۲۰) به بررسی آزمایشگاهی اثر مقدار و طول الیاف پلاستیکی بر مقاومت فشاری و کششی بتنی خود متراکم پرداختند. ۱۳ طرح اختلاط بتن را با نسبت آب به سیمان ۰/۴ مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایشگاهی آنها نشان داد که افزایش مقدار و طول الیاف منجر به کاهش جریان پذیری و قابلیت عبور و افزایش قابل توجه مقاومت جداشدگی در نمونه مورد آزمایش می شود. با افزودن الیاف پلاستیکی، مقاومت فشاری به میزان ۸/۴ درصد و مقاومت کششی ۲۲/۴ درصد افزایش یافت. افزایش مقاومت فشاری و کششی بتن وابسته به مقدار الیاف است و طول الیاف تاثیر زیادی بر روی مقاومت فشاری و کششی ندارد[۱۶].

قلهکی و همکاران(۲۰۲۰)در مقاله ای تاثیر ضایعات پوزولانی بر خواص مکانیکی و دوام ملات سیمان را بررسی کردند.در این مقاله جذب آب،مقاومت کششی وفشاری و تستSEM برروی مشخصات ملات سیمان که سنگدانه های آن(ذرات ۶۰-۵۰میکرومتر) با چهارماده بازیافتی آهن،لاستیک،شیشه و پوسته تخم مرغ با درصدهای ۷،۱۴،۲۱و۲۸٪جایگزین شدند،بررسی شد.برطبق نتایج استفاده از پوزولانها به میزان۱۴٪، باعث می شود مقاومت فشاری نسبت به نمونه مبنا به میزان ۲۸٪افزایش یابد.استفاده از ۷٪موادپوزولانی می تواند مقاومت کششی را بهبود بخشد[۱۷].

قلهکی و پاچیده(۲۰۲۱)در مقاله ای به بررسی آزمایشگاهی تاثیرات افزایش دما بر مشخصات مکانیکی بتن حاوی فنر فلزی بازیافتی پرداختند.اثراصلی الیاف بازیافتی بر بتن،کاهش ایجاد ترکهای گسترده ناشی از گرما و فشار است.در این مقاله تاثیر دماهای بالا بر خواص مکانیکی بتن حاوی فولاد و الیاف پلی پروپیلن و همچنین فنرهای فلزی با قطرهای ۸،۱۲،۱۶و۲۰میلی متر مورد مطالعه قرارگرفته است.نتایج نشان می دهد که استفاده از فنرهای فلزی مقاومت بتن را تا ۸۰ درصد افزایش می دهد.در میان انواع مختلف الیاف،فنر با قطر سوراخ ۱۲ میلی متر و الیاف فولادی می تواند به طور موثری باعث بهبود مقاومت فشاری و کششی شود[۱۸].

احمد و لیم (۲۰۲۱) تولید بتن بازیافتی تقویت شده با الیاف پایدار و ساختاری با خواص شکست بهبود یافته را بررسی کردند. به طور جامع تأثیر این الیاف را بر روی جریان پذیری، استحکام فشاری، مقاومت خمشی، مقاومت کششی شکافی و سایر جنبه های دوام FRAC بررسی می کند. همچنین رابطه بین بخش های حجمی فیبر، درصد جایگزینی RCA و افزایش مقاومت در RAC را ارائه می دهد که ممکن است به شناسایی دز بهینه هر فیبر برای بهبود استحکام در FRAC کمک کند. استفاده موثر از این الیاف امکان استفاده کامل از

RCA را در ساخت بتن پایدار و سازه ای فراهم می کند و به بخش ساخت و ساز در اجرای مفهوم مدل اقتصاد دایره ای کمک می کند [۱۹].

توفیق و پاچیده(۲۰۲۲)در مقاله ای ملاتهای سیمانی حاوی پوزولانها در دماهای بالا را مورد مطالعه قراردادند.با هدف ارزیابی ،اثر جایگزینی درصدهای وزنی مختلف با دوده سیلیسی،سرباره کوره آهن گدازی،زئولیت و خاکستربادی تحت دماهای بالا انجام شد.۳۰۶نمونه تهیه شد و آزمایشها برروی نمونه ها پس از قرارگرفتن در معرض دماهای بالا بین ۲۵تا۹۰۰درجه سانتی گراد انجام شد.نتایج نشان داد که میانگین مقاومت فشاری نمونه مبدا و نمونه های حاوی SF،GBFS،Zeoliteو FAبه ترتیب ۱۷/۳۸و۲۹/۳۴،۶۷/۳۲،۸۷/۲۳،۲/۱۷ مگاپاسکال است.این مقادیر برای تست های کشش و خمش به ترتیب ۰/۰،۶۱/۱،۹۸/۱،۰۲/۰،۱/۷۷ و ۰/۰،۸۷/۱،۹۳/۱،۲۹/۰،۲۳/۷۷ مگاپاسکال است.بنابراین نمونه های حاوی زئولیت و سرباره کوره آهن گدازی عملکرد بهتری در برابر گرما داشتند. [۲۰].

در این مقاله ابتدا یک نمونه مرجع بدون افزودنی تهیه شد و مشخصات آن ثبت و تحت تست آزمایشگاهی قرار گرفت. برای ساخت نمونه های تقویت شده با ۱/۵ درصد الیاف شیشه، دو طرح اختلاط با جایگزینی ۱۰ و ۱۵ ٪ میکروسیلیس، دو طرح با جایگزینی ۱۰ و ۱۵ ٪ متاکائولین و همچنین دو طرح با جایگزینی ۰/۷۵و ۱/۵ ٪ نانوسیلیس ساخته شد. در این روش به منظور تهیه نمونه های حاوی ۲/۵ ٪ الیاف شیشه، تمامی طرح های مذکور به همراه ۲/۵ ٪ از الیاف بازیافتی و ضایعاتی شیشه ساخته شدند. در روش پیش مخلوط از الیاف بازیافتی و ضایعاتی شیشه به میزان ۱/۵ و ۲/۵ ٪ وزنی بتن یعنی به ترتیب ۳۳ و ۵۵ کیلوگرم در آزمایشگاه بررسی شد.

به دلیل هزینه های بالا در تولید بتن استفاده از مصالح با هزینه کم که منجر به بهبود رفتار بتن شود در پروژه های بزرگ باعث کاهش هزینه تمام شده می شود. از مزایای الیاف شیشه می‌توان به قیمت مناسب آن در مقایسه با الیاف کربن و آرامید اشاره کرد. الیاف شیشه وزن بسیار اندکی دارند و و تحت تاثیر مواد شیمیایی، باران اسیدی و نمک‌ها قرار نمی‌گیرند. استفاده از الیاف شیشه بازیافتی به دلیل مقرون به صرفه بودن و استفاده فراوان در مقاوم سازی و بهسازی سازه‌ها رونق فراوان دارد. حمل و نقل و اجرای کامپوزیت‌های GFRP به دلیل وزن کم بسیار آسان است.نوآوری مقاله حاضر درکنار تاکید بر بازیافت مواد به منظور حفاظت محیط زیست ،استفاده از الیاف بازیافتی شیشه در بهبود رفتار بتن بوده که کمتر مورد توجه سایر محققان بوده است.

۲-روش تحقیق

در این بخش پس از بررسی مشخصات فیزیکی و شیمیایی مصالح مورد استفاده در بتن مسلح به الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه از قبیل سیمان، ماسه، میکروسیلیس، متاکائولین، نانوسیلیس، آب، فوق روان کننده و الیاف، طرح اختلاط به منظور تعیین مقادیر نسبی مواد تشکیل دهنده ی بتن، مورد مطالعه و بررسی لازم قرار و نتایج مربوطه گزارش می شوند.

۲-۱-الیاف بازیافتی

بر اساس روش های ساخت بتن مسلح به الیاف بازیافتی و ضایعاتی، این الیاف اغلب به دو صورت در بتن مورد استفاده قرار می گیرد. در روش پیش مخلوط از الیاف بازیافتی و ضایعاتی به صورت رشته های بریده شده استفاده و ملات ساخته شده و الیاف به طور همزمان داخل مخلوط کن باهم ترکیب می شوند. در روش اسپری الیاف بازیافتی و ضایعاتی به صورت رشته های بریده نشده به داخل تفنگ دستگاه منتقل شده و سپس توسط تیغه ی داخل تفنگ بریده میشود. شکل ۱ الیاف شیشه ی مورد استفاده در این مقاله را نشان میدهد.

شکل ۱: الیاف شیشه ی مورد استفاده در این مقاله

برای بررسی میزان تأثیر الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه بر روی مقاومت‌های خمشی و فشاری و همچنین شکل‌پذیری بتن مسلح به الیاف شیشه، از الیاف شیشه‌ی مقاوم در محیط قلیایی به طول ۲۵ میلی‌متر در طرح‌های اختلاط استفاده شده است. به الیاف شیشه‌ای که دارای حداقل ۱۶٪ زیرکونیوم در ترکیب خود باشد، الیاف شیشه‌ی مقاوم در محیط قلیایی گفته می‌شود. برای ساخت بتن به دو روش پیش مخلوط و اسپری، از دو نوع الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه استفاده شده است. مشخصات الیاف شیشه‌ی استفاده شده در این مقاله به شرح جداول ۱ و ۲ می‌باشد. این مقادیر بر اساس مشخصات الیاف شیشه بازیافتی تولیدی در صنعت شیشه انتخاب شده است.

جدول ۱- مشخصات الیاف شیشه‌ی استفاده شده در روش پیش مخلوط

مشخصه‌ی مورد نظر	مقدار
نوع الیاف	AR-GLASS
درصد زیر	بیشتر از ۱۶٪
وزن مخصوص (gr/cm^3)	۲/۸
مقاومت کششی (N/m^2)	۱/۵
کرنش گسیختگی	٪۲
مدول الاستیسیته (GN/m^2)	۷۵

جدول ۲- مشخصات الیاف شیشه‌ی استفاده شده در روش اسپری

مشخصات	الیاف شیشه
نوع الیاف	AR-GLASS
قطر رشته‌ها (μm)	۱۶
کرنش در نقطه شکست	٪۲/۴
چگالی دسته‌ی الیاف (TEX)	۲۳۸۷
مقاومت نهایی (N/Tex)	۰/۵۱
مدول الاستیسیته (N/Tex)	۸۰/۴
وزن مخصوص (gr/cm^3)	۲/۷
درصد زیرکونیوم	۱۶/۷
درصد رطوبت	۰/۰۷۲

۲-۲-طرح اختلاط و عمل آوری نمونه ها

در این مقاله به بررسی میزان تأثیر استفاده از درصدهای مختلف الیاف بازیافتی و ضایعاتی صنعت شیشه در نمونه‌های حاوی میکروسیلیس، متاکائولین و نانوسیلیس پرداخته شده است. همچنین میزان تأثیر روش‌های پیش مخلوط و اسپری در ساخت بتن مسلح به الیاف بازیافتی و ضایعاتی صنعت شیشه بر خواص مکانیکی این بتن مورد بررسی قرار گرفته است. بنابراین نمونه‌های مکعبی در ابعاد ۱۰۰*۱۰۰*۱۰۰ میلی‌متر به منظور بررسی مقاومت فشاری و نمونه‌های استوانه ای با ابعاد ارتفاع ۳۰۰ و ۱۵۰ میلی‌متر [۲۱] برای بررسی مقاومت خمشی و میزان طاقت نمونه‌ها ساخته شد. بتن مسلح به الیاف بازیافتی و ضایعاتی، بتن پر سیمان با نسبت آب به مواد سیمانی نسبتا پایین می‌باشد. نسبت آب به سیمان در حدود ۰/۳۵ و نسبت ماسه به سیمان در حدود ۱می‌باشد.

در جدول ۳ مقادیر مصالح مصرفی در طرح‌های اختلاط بتن پیش مخلوط و در جدول ۴ مقادیرمصالح مصرفی در طرح های اختلاط بتن اسپری شده آورده شده است. مقادیر الیاف، فوق روان کننده، نانوسیلیس، متاکائولین، میکروسیلیس بر حسب درصد وزنی سیمان می باشد. مقادیر سیمان و ماسه بر حسب کیلوگرم و مقدار آب بر حسب لیتر می باشد. در جدول مدل مرجع PC نامگذاری شده، GF مخفف الیاف شیشه بوده و عدد بعد از آن درصد مورد استفاده را نشان می دهد.MKمتاکائولین،NSنانوسیلیس وSFمیکروسیلیس است.

جدول۳: مقادیر مصالح مصرفی در طرح‌های اختلاط بتن پیش مخلوط

علامت اختصاری	الیاف	میکروسیلیس	متاکائولین	نانوسیلیس	فوق روان کننده	سیمان (کیلوگرم)	ماسه (کیلوگرم)	آب (لیتر)
PC	۰	۰	۰	۰	۱	۹۳۹/۰۵	۹۳۹/۰۵	۳۲۸/۶۸
GF1.5	۱/۵	۰	۰	۰	۱	۹۲۷/۶۳	۹۲۷/۶۳	۳۲۴/۶۷
GF2.5	۲/۵	۰	۰	۰	۱	۹۲۰/۰۱	۹۲۰/۰۱	۳۲۲
GF1.5-SF10	۱/۵	۱۰	۰	۰	۱	۸۳۴/۱۲	۹۱۷/۵۳	۳۲۱/۱۳
GF1.5-SF15	۱/۵	۱۵	۰	۰	۱	۷۹۴/۰۹	۹۱۳/۲	۳۱۹/۶۲
GF1.5-MK10	۱/۵	۰	۱۰	۰	۱	۸۳۲/۴۳	۹۱۵/۶۷	۳۲۰/۴۸
GF1.5-MK15	۱/۵	۰	۱۵	۰	۱	۷۸۹/۷	۹۰۸/۱۸	۳۱۷/۸۶
GF1.5-NS0.75	۱/۵	۰	۰	۰/۷۵	۱	۹۱۹/۹	۹۲۶/۸	۳۲۴/۳۸
GF1.5-NS1.5	۱/۵	۰	۰	۱/۵	۱	۹۱۲/۲۹	۹۲۵/۹۷	۳۲۴/۰۹
GF2.5-SF10	۲/۵	۱۰	۰	۰	۱	۸۲۷/۲۷	۹۱۰	۳۱۸/۵
GF2.5-SF15	۲/۵	۱۵	۰	۰	۱	۷۸۷/۵۷	۹۰۵/۷۱	۳۱۷
GF2.5-MK10	۲/۵	۰	۱۰	۰	۱	۸۲۵/۶	۹۰۸/۱۶	۳۱۷/۸۵
GF2.5-MK15	۲/۵	۰	۱۵	۰	۱	۷۸۳/۲۳	۹۰۰/۷۲	۳۱۵/۲۵
GF2.5-NS0.75	۲/۵	۰	۰	۰/۷۵	۱	۹۱۲/۳۴	۹۱۹/۱۸۵	۳۲۱/۷۱
GF2.5-NS1.5	۲/۵	۰	۰	۱/۵	۱	۹۰۴/۷۹	۹۱۸/۳۷	۳۲۱/۴۳

جدول ۴- مقادیر مصالح مصرفی در طرح‌های اختلاط بتن اسپری شده

علامت اختصاری	الیاف	میکروسیلیس	متاکائولین	نانوسیلیس	فوق روان کننده	سیمان (کیلوگرم)	ماسه (کیلوگرم)	آب (لیتر)
GF4	۴/۰۴	۰	۰	۰	۱	۹۰۸/۶۰	۹۰۸/۵۹	۳۱۸
GF6	۵/۷۲	۰	۰	۰	۱	۸۹۳/۳۵	۸۹۳/۳۵	۳۱۲/۶۷
GF4-SF10	۴/۷	۱۰	۰	۰	۱	۸۱۷	۸۹۸/۷	۳۱۴/۵۴
GF4-SF15	۴/۱۲	۱۵	۰	۰	۱	۷۷۷/۸	۸۹۴/۴۶	۳۱۳/۰۶
GF4-MK10	۴/۲۹	۰	۱۰	۰	۱	۸۱۵/۳۵	۸۹۶/۹	۳۱۳/۹۱
GF4-MK15	۴/۵	۰	۱۵	۰	۱	۷۷۳/۵۱	۸۸۹/۵۳	۳۱۱/۳۴
GF4-NS0.75	۴/۶	۰	۰	۰/۷۵	۱	۹۰۱/۰۱	۹۰۷/۷۷	۳۱۷/۷۲
GF4-NS1.5	۴/۷	۰	۰	۱/۵	۱	۸۹۳/۵۶	۹۰۶/۹۷	۳۱۷/۴۴
GF6-SF10	۵/۸	۱۰	۰	۰	۱	۸۰۳/۳	۸۸۳/۶۳	۳۰۹/۲۷
GF6-SF15	۵/۶	۱۵	۰	۰	۱	۷۶۴/۷۵	۸۷۹/۴۶	۳۰۷/۸۱
GF6-MK10	۵/۹	۰	۱۰	۰	۱	۸۰۱/۶۸	۸۸۱/۸	۳۰۸/۶۴
GF6-MK15	۶	۰	۱۵	۰	۱	۷۶۰/۵۴	۸۷۴/۶۲	۳۰۶/۱۲
GF6-NS0.75	۶	۰	۰	۰/۷۵	۱	۸۸۵/۹	۸۹۲/۵۵	۳۱۲/۴
GF6-NS1.5	۶/۱	۰	۰	۱/۵	۱	۸۷۸/۵۸	۸۹۱/۷۶	۳۱۲/۱۱

به منظور عمل آوری نمونه ها پس از ساخت آنها، قالب‌ها درون فضایی مرطوب به مدت ۲۴ ساعت قرار داده می‌شوند. سپس نمونه‌ها از قالب خارج شده و درون حوضچه‌ی مخصوص عمل‌آوری قرار داده می شوند. به منظور بررسی رفتار خمشی ۹۰ روزه‌ی بتن مسلح به الیاف شیشه، نمونه‌ها پس از گذشت ۲۸ روز از حوضچه‌ی عمل آوری خارج شدند.

۳- نتایج آزمایشگاهی

هدف اصلی این مقاله بررسی تأثیر استفاده از درصدهای مختلف الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه و مواد پوزولانی بر روی خواص مکانیکی بتن مسلح به الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه است. نتایج رفتار نمونه های مختلف با مقاومت فشاری و مقاومت خمشی در این بخش ارائه شده است.

۳-۱- نتایج مقاومت فشاری

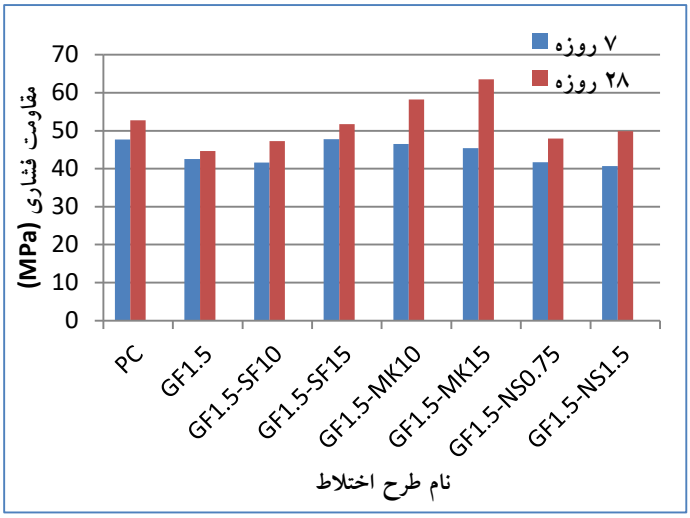
در این تحقیق به منظور بررسی مقاومت فشاری، نمونه‌های ساخته شده در روش پیش مخلوط پس از ۷و ۲۸ روز مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. مقاومت فشاری ۷و ۲۸ روزه مربوط به هر طرح اختلاط در جدول ۵ ارائه شده است. آزمایش مقاومت فشاری طبق استاندارد ASTM انجام شده است [25].

جدول۵- نتایج مربوط به مقاومت فشاری نمونه‌ها

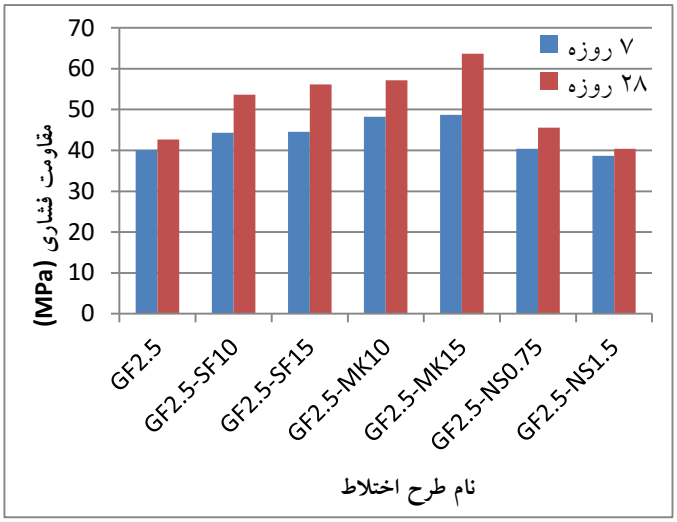
نام طرح	وزن مخصوص خشک (کیلوگرم بر متر مکعب)	مقاومت ۷ روزه (MPa)	مقاومت ۲۸ روزه (MPa)
PC	۲۱۴۵/۵۲	۴۷/۷۲	۵۲/۷۸
GF1.5	۲۱۶۴/۰۵	۴۲/۵۴	۴۴/۶۲
GF1.5-SF10	۲۱۱۵/۲۵	۴۱/۶۱	۴۷/۲۹
GF1.5-SF15	۲۰۳۶/۶۵	۴۷/۸۱	۵۱/۷۳
GF1.5-MK10	۲۱۷۲/۹۴	۴۶/۵۴	۵۸/۲۵
GF1.5-MK15	۲۱۹۸/۴۶	۴۵/۴۴	۶۳/۵۴
GF1.5-NS0.75	۲۱۹۸/۰۳	۴۱/۷۴	۴۷/۹۶
GF1.5-NS1.5	۲۰۷۶/۵۶	۴۰/۷	۴۹/۸۵
GF2.5	۲۱۲۱/۲	۴۰/۱۱	۴۲/۶۷
GF2.5-SF10	۲۱۲۸/۲۴	۴۴/۲۸	۵۳/۶۷
GF2.5-SF15	۲۰۸۶/۹۷	۴۴/۵۶	۵۶/۱۶
GF2.5-MK10	۲۲۰۰/۹	۴۸/۲۷	۵۷/۱۸
GF2.5-MK15	۲۱۷۲/۹۴	۴۸/۶۷	۶۳/۷
GF2.5-NS0.75	۲۱۲۵/۴۶	۴۰/۴	۴۵/۶
GF2.5-NS1.5	۲۱۰۶/۲۲	۳۸/۷	۴۰/۳۸

۳-۱-۱-تأثیر استفاده از مواد پوزولانی بر روی مقاومت فشاری

در نمودارهای شکل ۲و۳ به ترتیب تأثیر نوع و میزان مواد پوزولانی مورد استفاده بر روی مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه‌ی نمونه‌های تقویت شده با ۱/۵٪ و ۲/۵٪ الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه بازیافتی آورده شده است.



شکل۲: تأثیر نوع و میزان مواد پوزولانی بر روی مقاومت فشاری بتن مسلح شده با۱/۵٪ الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه بازیافتی

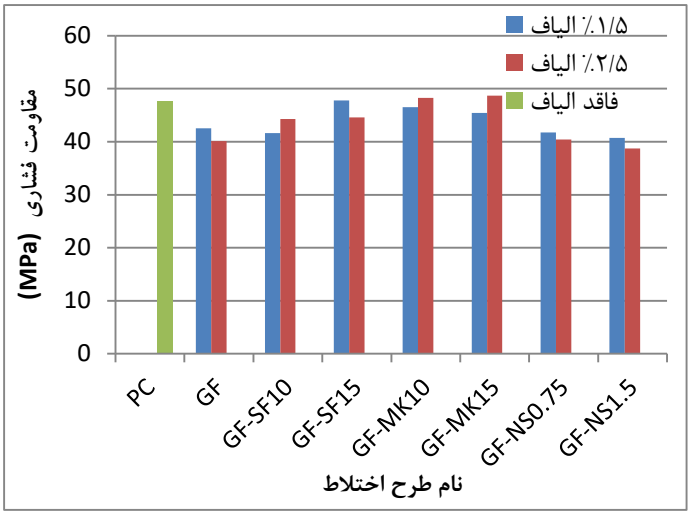


شکل۳: تأثیر نوع و میزان مواد پوزولانی بر روی مقاومت فشاری بتن مسلح شده با۲/۵٪ الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه بازیافتی

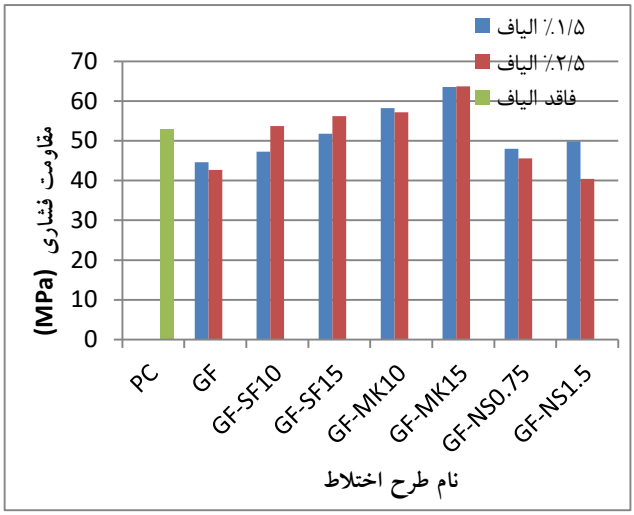
با بررسی نتایج بدست آمده ملاحظه می‌شود که مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی نمونه‌های تقویت شده با ۱/۵٪ الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه در مقایسه با نمونه‌ی شاهد (نمونه‌های فاقد الیاف شیشه)، کاهش یافته است؛ این در حالی است که استفاده از مواد پوزولانی باعث بهبود مقاومت ۲۸ روزه‌ی بتن مسلح به الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه می‌شود. با توجه به این نتایج، استفاده از متاکائولین بیشترین مقاومت فشاری را برای بتن مسلح به ۱/۵٪ الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه به همراه دارد. به طور مثال، با جایگزینی ۱۰٪ متاکائولین در نمونه‌های حاوی ۱/۵٪ الیاف شیشه، مقاومت فشاری ۲۸ روزه به میزان ۳۰/۵۴٪ نسبت به نمونه‌های تقویت شده با ۱/۵٪ الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه و فاقد مواد پوزولانی، افزایش یافته است. با افزایش مقدار متاکائولین از ۱۰٪ به ۱۵٪، مقاومت فشاری ۲۸ روزه به میزان ۴۲/۴٪ افزایش یافته است. تأثیر استفاده از نانوسیلیس بر مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۱/۵٪ الیاف شیشه، افزاینده ولی بسیار کم بوده است؛ به طوری‌که با جایگزینی ۰/۷۵٪ نانوسیلیس، مقاومت فشاری ۲۸ روزه به میزان ۷/۴۸٪ نسبت به نمونه‌های تقویت شده با ۱/۵٪ الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه و فاقد مواد پوزولانی افزایش یافته است. در نمونه‌های مسلح به ۲/۵٪ الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه نیز، بیشترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه‌های حاوی ۱۵٪ متاکائولین بوده است. بتن حاوی ۲/۵٪ الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه و ۱۵٪ متاکائولین نسبت به نمونه‌های تقویت شده با ۲/۵٪ الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه و فاقد مواد پوزولانی در سن ۲۸ روز، به میزان ۴۹/۲۸٪ افزایش مقاومت نشان داده است. بهبود مقاومت فشاری با افزایش مقدار نانوسیلیس از ۰ به ۰/۷۵ درصد روند افزایشی و از ۰/۷۵ به ۱/۵ درصد روند کاهشی داشته است. استفاده از ۰/۷۵٪ نانوسیلیس باعث افزایش مقاومت ۲۸ روزه‌ی بتن مسلح به ۲/۵٪ الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه به میزان ۶/۸۶٪ نسبت به نمونه‌های تقویت شده با ۲/۵٪ الیاف و فاقد مواد پوزولانی شده است؛ اما با افزایش مقدار نانوسیلیس از ۰/۷۵٪ به ۱/۵٪، مقاومت فشاری ۲۸ روزه به میزان ۵/۳۶٪ کاهش یافته است.

۳-۱-۲- تأثیر استفاده از الیاف بازیافتی شیشه بر مقاومت فشاری

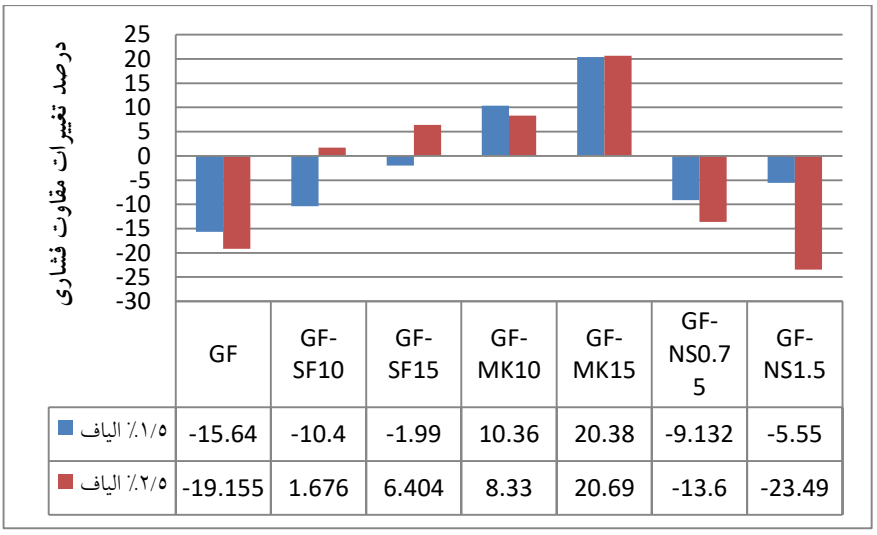
جهت بررسی تأثیر استفاده از الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه بر روی مقاومت فشاری بتن مسلح به الیاف شیشه، نمودار تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های تقویت شده با ۱/۵٪ و ۲/۵٪ الیاف، پس از گذشت ۷ و ۲۸ روز به ترتیب در شکل‌های۴و۵ ترسیم شده است. سپس در شکل ۶، درصد افزایش و یا کاهش مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی بتن مسلح به الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه با نمونه فاقد الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه مقایسه شده است.



شکل۴: تأثیر میزان الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه بر روی مقاومت فشاری ۷ روزه‌ی بتن مسلح شده به الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه بازیافتی



شکل ۵: تأثیر میزان الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه بر روی مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی بتن مسلح شده به الیاف شیشه



	GF	GF-SF10	GF-SF15	GF-MK10	GF-MK15	GF-NS0.75	GF-NS1.5
٪۱/۵ الیاف	-15.64	-10.4	-1.99	10.36	20.38	-9.132	-5.55
٪۲/۵ الیاف	-19.155	1.676	6.404	8.33	20.69	-13.6	-23.49

شکل۶: درصد افزایش و یا کاهش مقاومت فشاری ۲۸ روزه در نمونه‌های حاوی الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه نسبت به نمونه‌های فاقد الیاف

با توجه به شکل۴، مقاومت فشاری ۷ روزه‌ی تمامی طرح‌های اختلاط، تا حدود زیادی به هم نزدیک می‌باشند.با جایگزینی ۱۰٪ متاکائولین در نمونه‌های تقویت شده با ۱/۵٪ الیاف شیشه، مقاومت فشاری ۷ روزه، به میزان ۲/۴۷٪ نسبت به نمونه‌های شاهدکاهش پیدا کرده است؛ این در حالی است که با افزایش مقدار الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه از ۱/۵٪ به ۲/۵٪، مقاومت فشاری ۷ روزه‌ی نمونه‌های حاوی ۱۰٪ متاکائولین، به میزان ۱/۱۵٪ نسبت به نمونه‌های شاهد افزایش یافته است. با دقت در شکل های ۵ و۶ مشاهده می‌شود که در حضور الیاف شیشه، مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی نمونه‌های تقویت شده با الیاف، نسبت به نمونه‌های شاهد (نمونه‌های فاقد الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه و مواد پوزولانی) کاهش قابل توجهی داشته است. با توجه به این نتایج، بیشترین مقاومت فشاری ۲۸ روزه، مربوط به نمونه‌های تقویت شده با ۲/۵ درصد الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه و ۱۵٪ متاکائولین و کمترین مقاومت فشاری ۲۸ روزه، مربوط به نمونه‌های تقویت شده با ۲/۵ درصد الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه و ۱/۵٪ نانوسیلیس بوده است.

۳-۲-آزمایش مقاومت خمشی

آزمایش خمش بر اساس استانداردهای BS-EN1170-5 [۲۲] و ASTM C78 [۲۳] به‌وسیله‌ی دستگاه خمش چهار نقطه‌ای انجام می شود. همان‌طور که در شکل ۷ مشخص است، برای انجام آزمایش خمش در این مقاله، از دستگاهی به ظرفیت kN ۵۰ استفاده شده است. در این روش نمونه‌ها بر روی دو تکیه‌گاه استوانه‌ای شکل قرار می‌گیرند. در این شرایط فاصله‌ی انتهای نمونه تا تکیه‌گاه مجاورش ۲۵ میلی‌متر می‌باشد. با توجه به پیشنهاد استاندارد ASTM C1018 [۲۴]، سرعت بارگذاری ۰/۱ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شده است.

شکل ۱: دستگاه تست خمش

۳-۲-۱-نتایج آزمایش خمشی

در این مقاله به منظور بررسی مقاومت خمشی، نمونه‌های ساخته شده به دو روش پیش مخلوط و اسپری پس از ۷، ۲۸ و ۹۰ روز مورد آزمایش قرار گرفته‌اند.پس از انجام آزمایش و گسیختگی نمونه ها ، مدول گسیختگی (MOR[1]) وتنش در لحظه اولین ترک (LOP[2])محاسبه می شود.در محاسبه‌ی مقاومت خمشی بتن مسلح به الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه باید به این نکته توجه داشت که به دلیل کارایی پایین این بتن، ضخامت نمونه‌های ساخته شده دارای مقادیر یکسان نمی‌باشد.جدول۶ نتایج آزمایش مقاومت خمشی برای نمونه های ساخته شده به روش پیش مخلوط را نشان می دهد.بیشترین مدول گسیختگی برای نمونه ای با ۱/۵٪ الیاف شیشه و ۱۵٪متاکائولین در سن ۷ روزه ثبت شده است.

[1] Modulus of Rupture
[2] Limit of proportion

جدول۶: نتایج آزمایش مقاومت خمشی برای نمونه‌های ساخته شده به روش پیش مخلوط

نام طرح	نمونه‌های ۷ روزه		نمونه‌های ۲۸ روزه		نمونه‌های ۹۰ روزه	
	LOP (MPa)	MOR (MPa)	LOP (MPa)	MOR (MPa)	LOP (MPa)	MOR (MPa)
PC	۵/۴۶	۵/۴۶	۶/۳	۶/۹۰	۵/۶۰	۵/۹۵
GF1.5	۱۰/۳۹	۱۰/۷۱	۱۰/۲۰	۱۰/۲۰	۸/۸۶	۸/۸۶
GF1.5-SF10	۹/۳	۱۰/۶۷	۸/۵۲	۱۰/۲۹	۹	۹/۵۵
GF1.5-SF15	۱۰/۷۴	۱۰/۷۴	۹/۱	۹/۸۶	۸/۸	۹/۱۵
GF1.5-MK10	۹/۷۶	۱۱/۶۵	۸/۴۲	۱۰/۷۰	۱۰/۵	۱۰/۸۲
GF1.5-MK15	۱۰/۱	۱۱/۸۳	۹/۰۶	۱۰/۶۶	۷/۴۲	۱۰/۱۰
GF1.5-NS0.75	۸/۵۰	۹/۱۰	۸/۴	۸/۷۵	۸/۶۰	۸/۶۰
GF1.5-NS1.5	۸/۷	۹/۰۵	۸/۳۵	۸/۷۵	۸/۰۷۶	۸/۴۱
GF2.5	۸/۷۲	۱۰/۱۳	۸/۷۳	۹/۰۵	۸/۱۵	۸/۷۰
GF2.5-SF10	۱۰/۱	۱۰/۷۰	۹/۳۷	۱۰/۵۴	۹/۹۹	۹/۲۲
GF2.5-SF15	۸/۵۳	۱۰/۶۷	۹/۷۰	۹/۹۷	۹/۶	۱۰/۵
GF2.5-MK10	۹/۷۰	۱۰/۸۰	۹/۱۳۶	۱۰/۴۰	۸/۹۰	۱۰/۵۳
GF2.5-MK15	۸/۰۲	۱۰/۳۵	۸/۳۱	۹/۹۱	۸/۸۴	۱۰/۲
GF2.5-NS0.75	۷/۳۰	۸/۹۸	۸/۳۴	۹/۳۵	۸/۷	۹/۱۰
GF2.5-NS1.5	۷/۵۲	۸/۶	۷/۳۷	۸/۱۳۱	۷/۸۷	۸/۲۰

همان‌طور که در جداول۷ الی ۹ ملاحظه می‌شود، مقدار الیاف شیشه‌ی بکار رفته در طرح‌های ساخته شده به روش اسپری با یکدیگر متفاوت می‌باشند. در نمونه‌های ساخته شده به روش اسپری پس از تنظیم میزان الیاف خروجی از دستگاه، ممکن است در طول اجرای بتن، در تنظیمات دستگاه درصدی خطا به وجود آید. بیشترین مقدار مدول گسیختگی برای نمونه ای با ۴٪الیاف شیشه و ۱۵٪متاکائولین در سن ۷ روزه ثبت شده است.

جدول ۷: نتایج آزمایش مقاومت خمشی ۷ روزه برای نمونه‌های ساخته شده به روش اسپری

MOR (MPa)	Δ_{MOR} (mm)	PMOR (N)	LOP (MPa)	Δ_{LOP} (mm)	PLOP (N)	نام طرح
۲۴/۳۶	۴۹/۱۵	۷۰۰	۱۶/۳۶	۵/۹۵	۴۷۰	GF4
۲۸/۴	۵۲/۲	۱۱۶۰	۱۴/۷	۱/۹	۶۰۰	GF4-SF10
۲۷/۴	۶۱/۱	۱۱۷۰	۱۱/۷	۴/۵	۵۰۰	GF4-SF15
۲۸/۴	۶۷/۹	۱۱۶۰	۱۰/۲۸	۲/۱۵	۴۲۰	GF4-MK10
۳۱/۲	۵۵/۶۵	۱۱۷۰	۱۴/۴	۴/۷۵	۵۴۰	GF4-MK15
۱۹/۸	۳۷/۹۵	۸۳۰	۱۱/۴۵	۴/۹	۴۸۰	GF4-NS0.75
۲۰/۵	۷۴/۸	۹۱۰	۱۰/۵۹	۳/۰۵	۴۷۰	GF4-NS1.5
۲۶/۶۷	۴۶/۶۳	۱۰۰۰	۱۴/۱۳	۲/۲۸	۵۳۰	GF6
۲۶/۶۵	۲۹/۲	۱۱۶۰	۱۵/۱۶	۱/۵۵	۶۶۰	GF6-SF10
۲۸/۹۶	۵۸/۱۵	۱۱۶۰	۱۲/۹۸	۳/۸	۵۲۰	GF6-SF15
۲۴/۸۹	۴۴/۲	۷۹۰	۱۳/۸۶	۷/۷	۴۴۰	GF6-MK10
۲۵/۳۹	۴۸/۱۵	۸۹۰	۱۱/۷	۲/۲	۴۱۰	GF6-MK15
۱۹/۹۶	۱۸/۱۵	۱۰۰۰	۱۰/۵۸	۱/۷۵	۵۳۰	GF6-NS0.75
۱۹/۲	۵۳/۳۵	۸۹۰	۱۲/۳	۷	۵۷۰	GF6-NS1.5

جدول۸- نتایج آزمایش مقاومت خمشی ۲۸ روزه برای نمونه‌های ساخته شده به روش اسپری

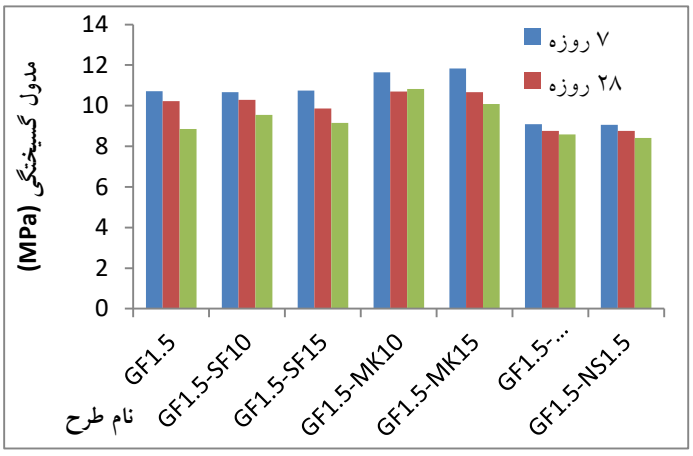
MOR (MPa)	Δ_{MOR} (mm)	P_{MOR} (N)	LOP (MPa)	Δ_{LOP} (mm)	P_{LOP} (N)	نام طرح
۱۹/۸۱	۱۶/۵۵	۶۱۰	۱۲/۶	۶/۱	۴۲۰	GF4
۲۵/۰۴	۴۲/۶۵	۱۰۹۰	۱۱/۹۴	۱/۲۵	۵۲۰	GF4-SF10
۲۱/۳۳	۲۳/۸۵	۸۰۰	۱۱/۷۳	۴/۸	۴۴۰	GF4-SF15
۲۶/۴۹	۴۹/۵	۱۲۵۰	۱۲/۵	۳/۴۵	۵۹۰	GF4-MK10
۲۶/۱۳	۴۸/۱	۹۸۰	۱۵/۲	۱۳/۰۵	۵۷۰	GF4-MK15
۱۸/۹۳	۴۳	۷۱۰	۱۳/۸۵	۴/۹	۵۳۰	GF4-NS0.75
۱۸/۳	۲۴/۴۵	۷۰۰	۱۵/۱۶	۵/۴	۵۸۰	GF4-NS1.5
۲۲/۶۶	۲۴/۴۵	۸۵۰	۱۴/۶۷	۴	۵۵۰	GF6
۲۴/۱۴	۲۴/۰۵	۱۳۳۰	۱۴/۹۰	۳/۶۵	۸۲۰	GF6-SF10
۲۵/۲۴	۵۲/۸۵	۱۱۲۰	۱۴/۲	۸/۲۵	۶۳۰	GF6-SF15
۲۳/۷۴	۳۴/۷	۷۶۰	۱۴/۹۹	۶	۴۸۰	GF6-MK10
۲۴/۳۵	۴۲/۱	۸۳۰	۱۱/۴۴	۵/۹	۳۹۰	GF6-MK15
۱۷/۶۴	۶/۹۵	۸۵۰	۹/۵۷	۱/۵	۴۷۰	GF6-NS0.75
۱۸/۱۳۴	۶۵/۳۸	۶۸۰	۱۳/۶	۷/۴	۵۱۰	GF6-NS1.5

جدول ۹- نتایج آزمایش مقاومت خمشی ۹۰ روزه برای نمونه‌های ساخته شده به روش اسپری

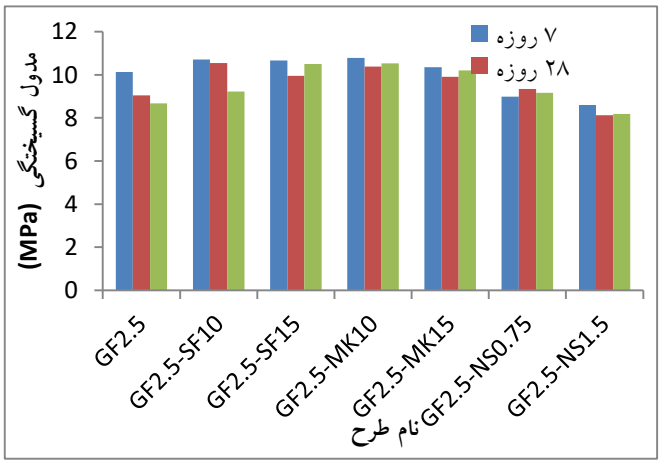
نام طرح	P_{LOP} (N)	Δ_{LOP} (mm)	LOP (MPa)	P_{MOR} (N)	Δ_{MOR} (mm)	MOR (MPa)
GF4	۴۸۰	۶/۰۵	۱۲/۴۲	۷۵۰	۲۹/۰۵	۱۹/۴
GF4-SF10	۵۴۰	۴/۴	۱۳/۳	۸۲۰	۵۱/۶	۲۰/۱۹۵
GF4-SF15	۵۱۰	۳	۱۴	۷۴۰	۳۱/۳	۲۰/۳
GF4-MK10	۵۶۰	۸	۱۱/۳۹	۱۰۶۰	۳۹/۳	۲۱/۵۷
GF4-MK15	۵۳۰	۵/۴	۱۲/۱۷۸	۹۰۰	۲۲/۳۸	۲۰/۶۸
GF4-NS0.75	۴۷۰	۴/۹	۱۳/۰۲	۶۸۰	۲۸/۸	۱۸/۸
GF4-NS1.5	۴۶۰	۴/۶	۱۲/۱۹	۶۵۰	۱۴/۶	۱۷/۲۲
GF6	۴۱۰	۵/۷	۱۲/۰۳	۷۰۰	۳۱/۷۵	۲۰/۵۴
GF6-SF10	۴۸۰	۲/۶	۱۴/۲۸	۸۳۰	۴۵/۴۲	۲۴/۷
GF6-SF15	۵۷۰	۵/۶۵	۱۳/۶۸	۹۸۰	۵۲/۷۵	۲۳/۵
GF6-MK10	۳۴۰	۵/۵	۱۰/۴	۷۷۰	۳۹/۸	۲۳/۵۷
GF6-MK15	۴۸۰	۶	۱۳/۱۷	۸۴۰	۳۲/۳	۲۳/۰۵
GF6-NS0.75	۵۴۰	۱/۸	۱۳/۰۹	۷۸۰	۳۵	۱۸/۹۱
GF6-NS1.5	۲۸۰	۳/۲	۷/۰۷	۵۷۰	۳۹/۷۵	۱۴/۴۰۸

۳-۳-بررسی تأثیر استفاده از مواد پوزولانی بر روی مدول گسیختگی بتن مسلح به الیاف شیشه

به منظور مقایسه‌ی بهتر، تأثیر نوع و میزان مواد پوزولانی بر روی مدول گسیختگی بتن مسلح به الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه در شکل های ۸ تا ۱۱ نشان داده شده است.

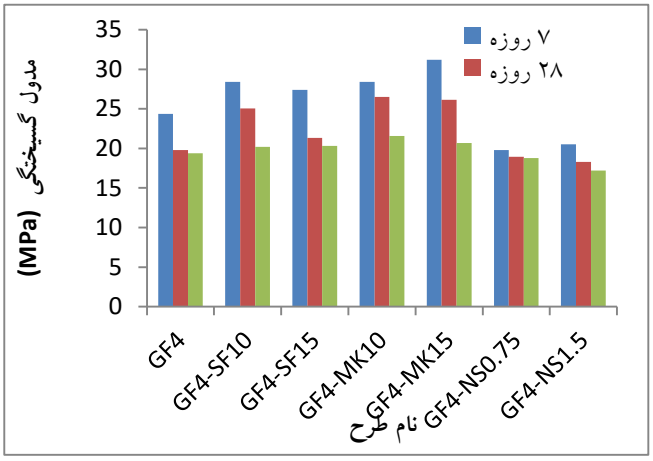


شکل ۸: تأثیر نوع و میزان مواد پوزولانی بر روی مدول گسیختگی بتن مسلح شده با ۱/۵٪ الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه در روش پیش مخلوط

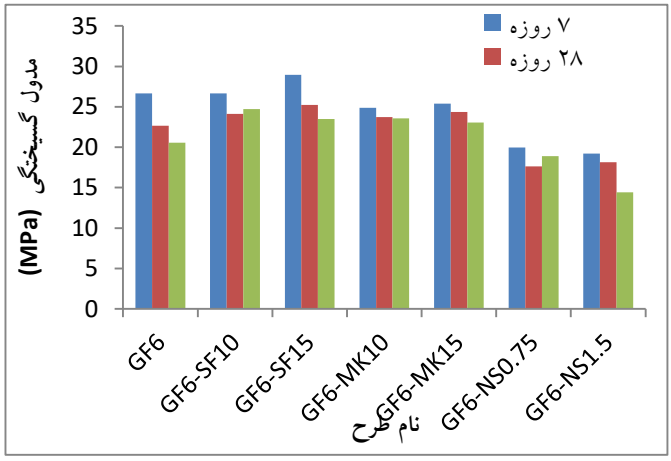


شکل۹: تأثیر نوع و میزان مواد پوزولانی بر روی مدول گسیختگی بتن مسلح شده با ۲/۵٪ الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه درروش پیش مخلوط

با توجه به شکل‌های۸ تا ۱۱ مشاهده می‌شود که در نمونه‌های تقویت شده با الیاف شیشه، با گذشت زمان از ۷ روز به ۲۸ روز و همچنین از ۲۸ به ۹۰ روز، مدول گسیختگی کاهش می‌یابد. با مقایسه‌ی مدول گسیختگی نمونه‌های تقویت شده با الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه و حاوی میکروسیلیس و متاکائولین با نمونه‌های تقویت شده به الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه و فاقد مواد پوزولانی مشاهده می‌شود که کاهش مدول گسیختگی در طول زمان در نمونه‌های حاوی مواد پوزولانی، کمتر از نمونه‌های فاقد مواد پوزولانی می باشد. به طور مثال میزان افت مدول گسیختگی در بتن مسلح به ۱/۵٪ الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه پس از گذشت ۹۰ روز به میزان ۱۷/۲۷٪ می‌باشد؛ این در حالی است که افت مدول گسیختگی در نمونه‌های تقویت شده با ۱/۵٪ الیاف و حاوی ۱۰٪ متاکائولین و ۱۰٪ میکروسیلیس، به ترتیب ۷/۱۲٪ و ۱۱/۷۲٪ می‌باشد. با توجه به این نتایج، استفاده از متاکائولین بیشترین مدول گسیختگی را برای نمونه های مسلح به الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه به همراه دارد.



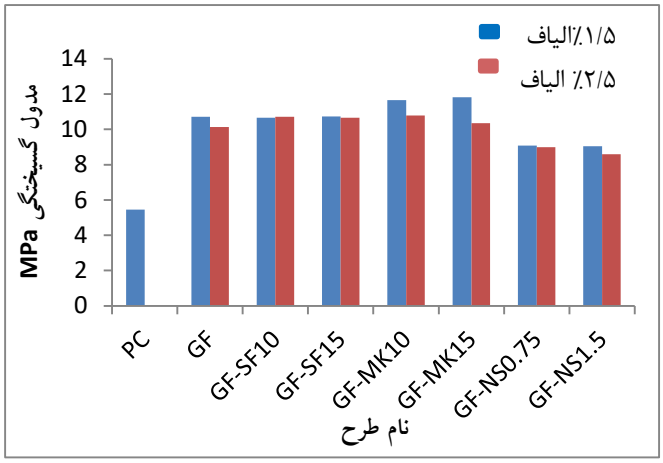
شکل ۱۰: تأثیر نوع و میزان مواد پوزولانی بر روی مدول گسیختگی بتن مسلح شده با ۴٪ الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه در روش اسپری



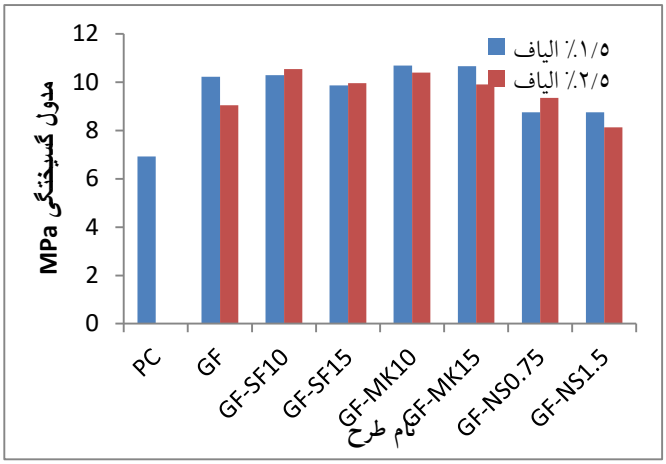
شکل۱۱: تأثیر نوع و میزان مواد پوزولانی بر روی مدول گسیختگی بتن مسلح شده با ۶٪ الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه در روش اسپری

۳-۴-بررسی تأثیر الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه بر مدول گسیختگی

جهت بررسی تأثیر استفاده از الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه بر مقاومت خمشی بتن مسلح به الیاف شیشه، نمودار تغییرات مدول گسیختگی نمونه‌های تقویت شده با الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه در روش‌های پیش مخلوط و اسپری، در شکل‌های ۱۲ الی ۱۷ ترسیم شده است.

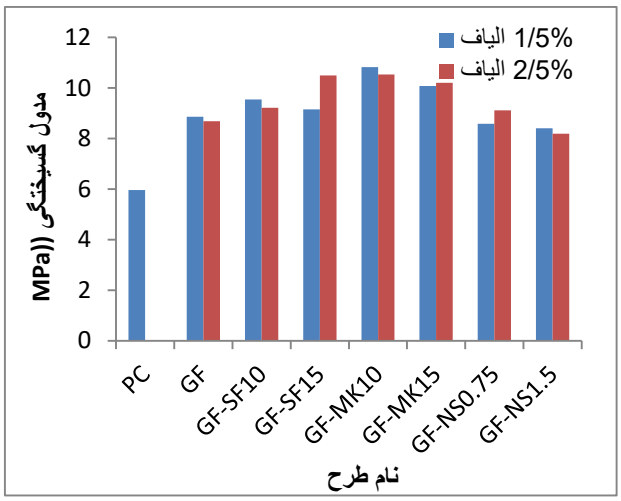


شکل ۱۲: تأثیر میزان الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه بر روی مدول گسیختگی ۷ روزه‌ی بتن مسلح شده به الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه در روش پیش مخلوط

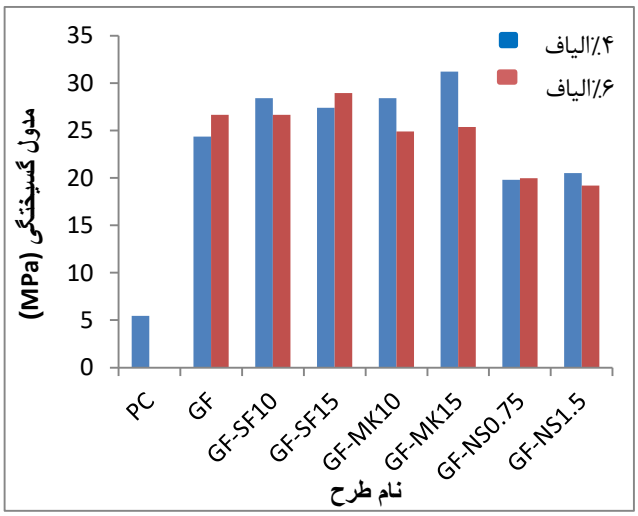


شکل ۱۳: تأثیر میزان الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه بر روی مدول گسیختگی ۲۸ روزه‌ی بتن مسلح شده به الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه روش پیش مخلوط

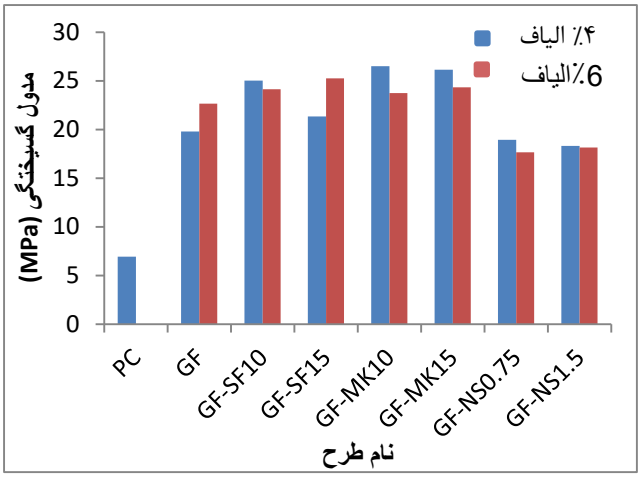
با توجه به شکل‌های ۱۲ الی۱۴ مشاهده می‌شود که مسلح کردن بتن با الیاف شیشه، باعث افزایش قابل توجه مدول گسیختگی می شود. این افزایش مقاومت ناشی از انتقال مناسب تنش کششی از بتن به الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه می‌باشد. با دقت در این نتایج ملاحظه می‌شود که در بیشتر نمونه‌های ساخته شده به روش پیش مخلوط، با افزایش درصد الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه از ۱/۵٪ به ۲/۵٪، مدول گسیختگی کاهش یافته است. با توجه به نتایج به‌دست آمده در این مقاله، مقدار بهینه‌ی استفاده از الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه در روش پیش مخلوط، به میزان ۱/۵٪ وزنی بتن یعنی در حدود ۳۳ کیلوگرم در متر مکعب و مطلوب‌ترین میزان برای استفاده از متاکائولین در حدود ۱۰٪ وزنی سیمان و برای میکروسیلیس به میزان ۱۵٪ وزنی سیمان بوده است.



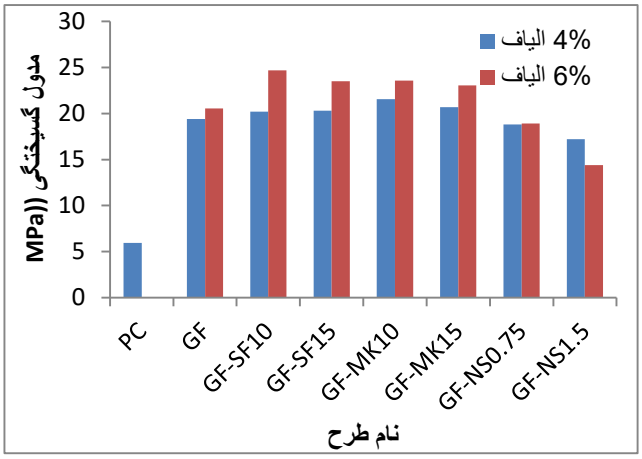
شکل۱۴: تأثیر میزان الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه بر روی مدول گسیختگی ۹۰ روزه‌ی بتن مسلح شده به الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه در روش پیش مخلوط



شکل ۱۵: تأثیر میزان الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه بر روی مدول گسیختگی ۷ روزه‌ی بتن مسلح شده به الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه در روش اسپری



شکل ۱۶: تأثیر میزان الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه بر روی مدول گسیختگی ۲۸ روزه‌ی بتن مسلح شده به الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه در روش اسپری



شکل ۱۷: تأثیر میزان الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه بر روی مدول گسیختگی ۹۰ روزه ی بتن مسلح شده به الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه در روش اسپری

در شکل‌های ۱۵ تا ۱۷ نیز مشاهده می‌شود که در تمامی نمونه‌های ساخته شده به روش اسپری، استفاده از الیاف شیشه، مدول گسیختگی بتن را نسبت به نمونه‌ی شاهد (نمونه‌ی فاقد الیاف) به شدت افزایش می‌دهد. با توجه به این نتایج، مدول گسیختگی نمونه‌های اسپری شده نسبت به نمونه‌های ساخته شده به روش پیش مخلوط، افزایش یافته است. با بررسی این نتایج ملاحظه می‌شود که در روش اسپری، بهبود مدول گسیختگی نسبت به نمونه‌های شاهد با افزایش مقدار الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه از ۴٪ تا ۵/۶٪ روند افزایشی و برای مقادیر بیشتر از ۵/۶٪ روند کاهشی داشته است. به طور مثال در نمونه‌های حاوی ۱۵٪ میکروسیلیس، با افزایش میزان الیاف از ۴/۱۲٪ به ۵/۶٪، مدول گسیختگی ۲۸ روزه‌ی این طرح از ۲۱/۳۳ MPa به ۲۵/۲۴ MPa افزایش یافته است؛ در این شرایط، بیشترین مدول گسیختگی مربوط به نمونه‌های تقویت شده با ۴/۵٪ الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه و حاوی ۱۵٪ متاکائولین است.

با دقت در نمودارهای فوق مشاهده می شود که از بین طرح‌های اختلاط، بیشترین مدول گسیختگی پس از گذشت ۷ روز مربوط به نمونه‌های حاوی ۱۵٪ متاکائولین و پس از گذشت ۹۰ روز، مربوط به نمونه‌های حاوی ۱۰٪ متاکائولین می‌باشد. با یک نگاه کلی مشاهده می‌شود که مدول گسیختگی به ترتیب از طرح‌های دارای متاکائولین به طرح‌های دارای میکروسیلیس و سپس به طرح‌های فاقد مواد پوزولانی و در نهایت به طرح‌های دارای نانوسیلیس کاهش می‌یابد. همچنین در تمامی طرح‌های مورد آزمایش در روش‌های پیش مخلوط و اسپری، با افزایش میزان الیاف مورد استفاده، مدول گسیختگی کاهش می‌یابد.

۴- نتیجه‌گیری

هدف از انجام این مقاله، بررسی و مقایسه‌ی تأثیر درصدهای مختلف الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه بازیافتی بر مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و شاخص‌های طاقت بتن مسلح به الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه بازیافتی است. خلاصه نتایج عبارتند از:

۱.استفاده از الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه در این تحقیق باعث کاهش کارایی بتن شده است. با توجه به این نتایج، در صورت استفاده از الیاف شیشه، مقاومت فشاری نمونه‌ها کاهش می یابد. مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی نمونه‌های تقویت شده با ۱/۵٪ الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه در مقایسه با نمونه‌ی شاهد (نمونه‌های فاقد الیاف شیشه)، ۱۵/۴ ٪ کاهش یافته است.

۲.به نظر می رسد وجود مواد پوزولانی در بتن باعث چگال‌تر شدن بتن شده و در نتیجه باعث افزایش مقاومت فشاری می‌گردد.

۳.استفاده از نانوسیلیس به همراه الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه در بتن، باعث کاهش کارایی بتن می‌شود. در این شرایط کمترین میزان مقاومت فشاری در نمونه‌های تقویت شده با الیاف شیشه، مربوط به نمونه‌های مسلح شده با ۲/۵٪ الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه و ۱/۵٪ نانوسیلیس است.

۴.مسلح کردن نمونه‌ها به الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه در هر دو روش پیش مخلوط و اسپری، باعث افزایش قابل توجه مدول گسیختگی می‌شود.میزان افت مدول گسیختگی در بتن مسلح به ۱/۵٪ الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه پس از گذشت ۹۰ روز به میزان ۱۷/۲۷٪ می‌باشد؛ این در حالی است که افت مدول گسیختگی در نمونه‌های تقویت شده با ۱/۵٪ الیاف و حاوی ۱۰٪ متاکائولین و ۱۰٪ میکروسیلیس، به ترتیب ۷/۱۲٪ و ۱۱/۷۲٪ می‌باشد. با توجه به این نتایج، استفاده از متاکائولین بیشترین مدول گسیختگی را برای نمونه های مسلح به الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه به همراه دارد.

۵.با توجه به نتایج بدست آمده مشخص است که با گذشت زمان از ۷ روز به ۹۰ روز، مدول گسیختگی در نمونه‌های تقویت شده با الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه در هر دو روش پیش مخلوط و اسپری، به دلیل آسیب‌های وارده به الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه در محیط بتن، کاهش یافته است. این مطالب نشان می‌دهد که مدول گسیختگی بتن مسلح به الیاف شیشه، تا حدود زیادی به شرایط الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه موجود در بتن بستگی دارد.

۶. استفاده از متاکائولین بیشترین مقاومت فشاری را برای بتن مسلح به ۱/۵٪ الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه به همراه دارد. به طور مثال، با جایگزینی ۱۰٪ متاکائولین در نمونه‌های حاوی ۱/۵٪ الیاف شیشه، مقاومت فشاری ۲۸ روزه به میزان ۳۰/۵۴٪ نسبت به نمونه‌های تقویت شده با ۱/۵٪ الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه و فاقد مواد پوزولانی، افزایش یافته است. با افزایش مقدار متاکائولین از ۱۰٪ به ۱۵٪، مقاومت فشاری ۲۸ روزه به میزان ۴۲/۴٪ افزایش یافته است. تأثیر استفاده از نانوسیلیس بر مقاومت فشاری نمونه های حاوی ۱/۵٪ الیاف شیشه، افزاینده ولی بسیار کم بوده است؛ به طوری‌که با جایگزینی ۰/۷۵٪ نانوسیلیس، مقاومت فشاری ۲۸ روزه به میزان ۷/۴۸٪ نسبت به نمونه‌های تقویت شده با ۱/۵٪ الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه و فاقد مواد پوزولانی افزایش یافته است. در نمونه‌های مسلح به ۲/۵٪ الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه نیز، بیشترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه‌های حاوی ۱۵٪ متاکائولین بوده است. بتن حاوی ۲/۵٪ الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه و ۱۵٪ متاکائولین نسبت به نمونه‌های تقویت شده با ۲/۵٪ الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه و فاقد مواد پوزولانی در سن ۲۸ روز، به میزان ۴۹/۲۸٪ افزایش مقاومت نشان داده است.

۷.مدول گسیختگی نمونه‌های اسپری شده نسبت به نمونه‌های ساخته شده به روش پیش مخلوط، دارای مقادیر بیشتری است. با توجه به اینکه در روش اسپری بتن ریزی به کمک فشار هوا و به صورت افشانی انجام می‌شود، الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه به صورت یکنواخت در سطح بتن پراکنده شده و بتن با کیفیت بالاتری تولید می‌شود. در این شرایط استفاده از الیاف بازیافتی و ضایعات شیشه با درصدهای بالاتری نسبت به روش پیش مخلوط امکان‌پذیر است. به عنوان مثال بیشترین مدول گسیختگی در سن ۲۸ روزه برای نمونه های ساخته شده به روش پیش مخلوط مربوط به نمونه ای با ۱/۵٪ الیاف شیشه و ۱۰٪متاکائولین و به مقدار ۱۰/۷۰مگاپاسکال گزارش شد،درحالیکه این مقدار برای نمونه ای در روش اسپری با ۴٪الیاف شیشه و ۱۰٪متاکائولین به میزان ۲۶/۴۹مگاپاسکال است.

۸.استفاده از مواد پوزولانی نظیر میکروسیلیس و متاکائولین، باعث افزایش مقاومت فشاری شده است. بر این اساس با افزایش میزان استفاده از این مواد از ۱۰٪ به ۱۵٪، مقاومت فشاری و مدول گسیختگی نمونه‌ها افزایش یافته است؛ اما در صورت استفاده از نانوسیلیس، با افزایش میزان استفاده از این ماده، مقاومت فشاری و مدول گسیختگی نمونه ها کاهش یافته است.

مراجع

[1] Khaloo, A. R., Dehestani, M., & Rahmatabadi, P. (2008). Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire–rubber particles. *Waste management*, *28*(12), 2472-2482.

[2] Nahhas, T. M. (2013). Flexural behavior and ductility of reinforced lightweight concrete beams with polypropylene fiber. *journal of construction engineering and management*, *1*(1), 4-10.
[3] Khaloo, A., Raisi, E. M., Hosseini, P., & Tahsiri, H. (2014). Mechanical performance of self-compacting concrete reinforced with steel fibers. *Construction and building materials*, *51*, 179-186.
[4] Kizilkanat, A. B., Kabay, N., Akyüncü, V., Chowdhury, S., & Akça, A. H. (2015). Mechanical properties and fracture behavior of basalt and glass fiber reinforced concrete: An experimental study. *Construction and Building Materials*, *100*,218-224
[5] Wang, C., Xiao, J., Zhang, G., & Li, L. (2016). Interfacial properties of modeled recycled aggregate concrete modified by carbonation. *Construction and Building Materials*, *105*, 307-320.
[6] Mastali, M., & Dalvand, A. (2017). Fresh and hardened properties of self-compacting concrete reinforced with hybrid recycled steel–polypropylene fiber. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *29*(6), 04017012.
[7] Fathi, H., Lameie, T., Maleki, M., & Yazdani, R. (2017). Simultaneous effects of fiber and glass on the mechanical properties of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, *133*, 443-449.
[8] Mazzucco, G., Xotta, G., Pomaro, B., Salomoni, V. A., & Faleschini, F. (2018). Elastoplastic-damaged meso-scale modelling of concrete with recycled aggregates. *Composites Part B: Engineering*, *140*, 145-156.
[9] Pacheco, J., De Brito, J., Chastre, C., & Evangelista, L. (2019). Experimental investigation on the variability of the main mechanical properties of concrete produced with coarse recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, *201*, 110-120.
[10] Li, Z., & Cao, G. (2019). Rheological behaviors and model of fresh concrete in vibrated state. *Cement and Concrete Research*, *120*, 217-226.
[11] Irbe, L., Beddoe, R. E., & Heinz, D. (2019). The role of aluminium in CASH during sulfate attack on concrete. *Cement and Concrete Research*, *116*, 71-80.
[12] Wang, D., Ju, Y., Shen, H., & Xu, L. (2019). Mechanical properties of high performance concrete reinforced with basalt fiber and polypropylene fiber. *Construction and Building Materials*, *197*, 464-473.
[13] Ali, B., & Qureshi, L. A. (2019). Influence of glass fibers on mechanical and durability performance of concrete with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, *228*, 116783.
[14] Pachideh, G., & Gholhaki, M. (2019). Effect of pozzolanic materials on mechanical properties and water absorption of autoclaved aerated concrete. *Journal of Building Engineering*, 26, 100856.
[15] Pachideh, G., Gholhaki, M., & Moshtagh, A. (2019). On the post-heat performance of cement mortar containing silica fume or Granulated Blast-Furnace Slag. *Journal of Building Engineering*, *24*, 100757.
[16] Oghabi, M., & Khoshvatan, M. (2020). The Laboratory Experiment of the Effect of Quantity and length of plastic fiber on compressive strength and tensile Resistance of Self-Compacting Concrete. *KSCE Journal of Civil Engineering*, *24*(8), 2477-2484.
[17] Pachideh, G., Gholhaki, M., & Ketabdari, H. (2020). Effect of pozzolanic wastes on mechanical properties, durability and microstructure of the cementitious mortars. *Journal of Building Engineering*, *29*, 101178.
[18] Pachideh, G., & Gholhaki, M. (2021). An experimental investigation into effect of temperature rise on mechanical and visual characteristics of concrete containing recycled metal spring. *Structural Concrete*, *22*(1), 550-565.
[19] Ahmed, W., & Lim, C. W. (2021). Production of sustainable and structural fiber reinforced recycled aggregate concrete with improved fracture properties: A review. *Journal of Cleaner Production*, *279*, 123832.
[20] Toufigh, V., & Pachideh, G. (2022). Cementitious mortars containing pozzolans under elevated temperatures. *Structural Concrete*.
[21] NEG ARG FIBRE ، "High Zirconia Alkali-Resistant Glass Fiber" ، Nippon Electric Glass ، http://www.arg.neg.co.jp/.
[22] British Standard ، "Measuring Bending Strength ، Complete Bending Test" ، BS-EN1170-5 ، 1998.
[23] ASTM C78-10 ، "Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Third-Point Loading)" ، ASTM International ، USA ، 2010.
[24] ASTM C 1018 -97 ، "Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete" ، ASTM International ، U.S.A. ، 1998
[25] ASTM A. C39/C39M-21. Standard Test. Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA. 2021.