مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۴۰۱)
دوره‌ی ۲ - ۳۸، شماره‌ی ۳/۲، ص. ۴۳-۵۳، (پژوهشی)

Original Article

بررسی اثر پیش‌بارگذاری در مشخصات مکانیکی بتن ژئوپلیمری حاوی الیاف

علی صدر ممتازی (استاد)

کامیاب قلی‌پور* (دانشجوی کارشناسی ارشد)

گروه فنی و مهندسی، دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه گیلان

رضا کهنی خشکبیجاری (استادیار)

گروه فنی و مهندسی، دانشکده‌ی مهندسی عمران، مؤسسه‌ی آموزش عالی کوشیار

در پژوهش حاضر به اثر پیش‌بارگذاری در مقاومت‌های فشاری و خمشی و همچنین جذب انرژی در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه برای بتن ژئوپلیمری حاوی الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن پرداخته شده است. بتن ژئوپلیمر بتنی است که در آن از مصالح آلومینا ـ سیلیکاتی غنی از سیلیسیوم و آلومینیوم و محلول قلیایی به‌عنوان چسباننده استفاده می‌شود. نمونه‌ها در سنین ۱، ۳ و ۷ روزه معادل ۳۰ و ۷۰ درصد مقاومت فشاری خود در همان سن و پس از عمل‌آوری در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه تحت بارگذاری قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهند که الیاف در کاهش آثار مخرب پیش‌بارگذاری در مقاومت‌های فشاری و خمشی اثر مثبت دارند. مثلاً در بارگذاری ۳۰٪ نمونه‌های حاوی الیاف پیش بارگذاری‌شده در سن ۱ روزه در مقایسه با طرح شاهد، به‌طور متوسط ۲۸/۸٪ مقاومت فشاری بالاتری نسبت به نمونه‌های ۲۸ روزه نتیجه داده‌اند.

واژگان کلیدی: بتن ژئوپلیمری، پیش‌بارگذاری، جذب انرژی، الیاف فولادی، الیاف پلی‌پروپیلن.

sadrmomtazi@Guilan.ac.ir
kamyabgholipour@gmail.com
r.kohani.k@gmail.com

۱. مقدمه

بتن به علت داشتن ویژگی‌های خاص، مانند: شکل‌پذیری در دسترس بودن مصالح اولیه و ارزان بودن از پر مصرف‌ترین مصالح در صنعت ساخت و ساز بعد از آب است. پیش‌بینی می‌شود که نیاز به مصرف بتن در آینده بیشتر شود و این افزایش تقاضا به معنی افزایش تقاضا برای تولید سیمان پرتلند، به عنوان ماده‌ی اصلی سازنده‌ی بتن است.[۱] بتن به‌عنوان پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی مزایای بسیاری دارد؛ اما در کنار آن‌ها، معایبی نیز دارد، که از جمله می‌توان به شکل‌پذیری کم، رفتار تُرد و شکننده‌ی آن به‌خصوص در برابر تنش‌های کششی و بارهای دینامیکی همچون بار زلزله اشاره کرد. در نتیجه، به‌منظور رفع مشکل اخیر، یکی از راهکارهای پیشنهادی توسط دانشمندان و پژوهشگران حوزه‌ی تکنولوژی بتن، استفاده از انواع الیاف در ساختار بتن است. ساخت قالب‌های دائمی یا قابل مصرف مجدد و محافظت و تقویت پوسته‌ی اعضاء بتنی از دیگر مصارف سیمان الیاف‌دار است.[۲و۳]

از دیگر مزایای استفاده از مواد شکل‌پذیری مذکور در اعضاء لرزه‌بر، افزایش میزان تغییرشکل‌های غیرکشسان، عدم افت مقاومت و حفظ یکپارچگی در تغییرشکل‌های اخیر است، که منجر به دستیابی به رفتار آسیب‌مدار می‌شود.[۴]

از نتایج آزمایش‌ها مشاهده می‌شود که با استفاده از مقادیر مناسب الیاف، جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن در سنین اولیه و به تبع آن ترک‌ها، به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابند.[۵و۶] یکی از انواع بتن، که پژوهشگران در سال‌های اخیر بسیار به آن توجه کرده‌اند، بتن ژئوپلیمری است. ژئوپلیمر برای اولین بار توسط داویدویتس[۱] (۱۹۷۸)، شیمیدان برجسته‌ی فرانسوی معرفی شد.[۷] اصطلاح ژئوپلیمر به گروهی از چسباننده‌های معدنی اطلاق می‌شود که مانند زئولیت‌ها دارای ساختار پلیمری Al-O-Si هستند.[۸] از نقطه‌نظر خواص مهندسی موردنیاز در مهندسی عمران، بتن‌های ژئوپلیمری، ویژگی‌های مکانیکی و شیمیایی بهتری نسبت به بتن‌های معمولی دارند که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به مقاومت‌های مکانیکی بیشتر و سخت شدن سریع، مقاومت در برابر آتش‌سوزی و حرارت بالا، دوام بیشتر، نفوذپذیری کمتر و مقاومت در برابر حمله‌ی نمک‌ها و اسیدها و خزش کمتر اشاره کرد.[۹-۱۱] بتن ژئوپلیمر، بتنی است که در آن از مصالح آلومیناسیلیکاتی غنی از سیلیسیوم (Si) و آلومینیوم (Al) و محلول قلیایی به‌عنوان چسباننده استفاده می‌شود. محلول فعال‌کننده‌ی قلیایی نیز به‌عنوان یکی از دو بخش اصلی ژئوپلیمرها، نقش مهمی را در تجزیه و تشکیل ساختار کریستالی ایفا می‌کند و معمولاً بر مبنای سدیم یا پتاسیم که از فلزات قلیایی حلال هستند، انتخاب می‌شود. رایج‌ترین محلول فعال‌کننده‌ی قلیایی استفاده شده در ژئوپلیمرها، ترکیبی از محلول هیدروکسیدسدیم با محلول سیلیکات‌سدیم یا پتاسیم است.[۱۲]

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۱/۱۴، اصلاحیه ۱۴۰۱/۵/۲۳، پذیرش ۱۴۰۱/۵/۳۰.
DOI:10/24200/J30.2018.2226.2139

ژئوپلیمریزاسیون، شامل: انحلال فازهای سیلیکات و آلومینات و تراکم پلیمری است.[۱۳]

یکی از مسائل پیشروی پژوهشگران در سال‌های اخیر، آسیب‌های زیست‌محیطی ناشی از فرایند تولید سیمان است. تولید سیمان باعث صرف مقدار زیادی انرژی می‌شود که این موضوع سبب آزاد شدن حجم زیادی از گازهای گلخانه‌یی در محیط می‌شود. در واقع، برای تولید یک تن سیمان پرتلند، یک تن دی‌اکسیدکربن تولید و وارد محیط‌زیست می‌شود.[۱۴و۱۵] علت اصلی پدیده‌ی گرمایش جهانی، انتشار گازهای گلخانه‌یی است و در میان گازهای گلخانه‌یی، دی‌اکسیدکربن با میزان انتشار ۶۵٪، بیشترین نقش را در پدیده‌ی گرمایش جهانی دارد.[۱۶] کارشناسان تولید سیمان پرتلند را عامل انتشار ۷ تا ۱۰ درصد از انتشار جهانی دی‌اکسیدکربن می‌دانند.[۱۷] توجه به آثار مخرب زیست‌محیطی سیمان پرتلند، از جمله سهم حدود ۷٪ انتشار گاز CO_2 در جو و مصرف قابل ملاحظه‌ی انرژی از قبیل برق و سوخت فسیلی، امری اجتناب‌ناپذیر است و ارائه‌ی محصولات جایگزین جهت حرکت در مسیر توسعه‌ی پایدار و کاهش آثار مذکور، اصلی ضروری به‌شمار می‌آید.[۱۸] بتن ژئوپلیمری یکی از انواع بتن است که در ساختار آن از سیمان استفاده نمی‌شود و در حقیقت با جایگزینی سیمان با یک ماده‌ی آلومیناسیلیکاتی، در ساختار بتن ژئوپلیمری برای دستیابی به خمیر چسباننده از سیمان استفاده نمی‌شود.

یکی از معایب بتن، مقاومت کششی محدود آن است که باعث شکل‌گیری ترک در آن می‌شود؛ در نتیجه، به منظور تحمل بارهای کششی و کنترل ترک از آرماتورهای فولادی استفاده می‌شود. با این حال، شکل‌گیری ترک در بتن، امری اجتناب‌ناپذیر است. بارگذاری یک سازه، عموماً مشکل‌ترین مرحله از عمر یک سازه است. جابه‌جا کردن قطعات بتنی پیش‌ساخته، تلمبار کردن مصالح و ضربه‌زدن و بارهای زنده‌یی که در سنین ابتدایی بر بتن وارد می‌شود، ممکن است سبب ایجاد ترک‌خوردگی و سایر صدمات به بتن شود. حتی اگر سازه در حین ساخت و ساز فرو نریزد، ممکن است به آن صدماتی وارد شود و مقاومت آن کاهش یابد.[۱۹] ترک‌های ریز در بتن‌های شکسته، این قابلیت را دارند که بتوانند در شرایط مرطوب بازیابی شوند.[۲۰] خودترمیمی به توانایی یک ترک برای کاهش خود به خودی عرض آن در طول زمان اشاره می‌کند. پدیده‌ی خودترمیمی در بتن، سال‌هاست که شناخته شده است. در سال ۱۸۳۶، توانایی ترک‌های کوچک بتن برای ترمیم خودشان در حضور رطوبت توسط آکادمی علوم فرانسه مشاهده،[۲۱] و اولین بار توسط آبرامز (۱۹۱۳) شناسایی شده است.[۲۲] مطالعات و پژوهش‌های آزمایشگاهی نشان داده‌اند که ترمیم ترک‌ها در مواد سیمانی منجر به کاهش تدریجی نفوذپذیری تحت گرادیان هیدرولیکی در طول زمان می‌شود و در بعضی موارد، نیز ترک‌ها کاملاً بسته می‌شوند[۲۳] لوله‌های بتنی مسلح،که در آن‌ها ترک‌هایی تا عرض ۱/۵ میلی‌متر به دلیل افت به‌وجود آمده بود، بعد از ۵ سال بهره‌برداری مشاهده شد که ترک‌ها در اثر خودترمیمی کاملاً بسته شده‌اند.[۲۴] دو عامل اساسی وجود دارد که از واکنش ترمیمی حفاظت می‌کنند: هیدراته شدن کلینکر هیدراته نشده‌ی موجود در لابه‌لای اجزاء بتن سخت شده و یا نفوذپذیری کلسیم کربنات. مورد اول، فقط به حضور آب نیاز دارد و مورد دوم، به حضور اضافی CO_2 حل‌نشده.[۲۵]

مدندوست و همکاران (۲۰۱۱)،[۲۶] به بررسی مقاومت فشاری بتن پس از بارگذاری اولیه در شرایط مختلف عمل‌آوری پرداخته و پس از ساختن نمونه‌ها و قالب‌برداری، آن‌ها را به دو روش مرطوب و خشک نگهداری کرده‌اند. سپس در سنین ۱، ۳ و ۷ روزه، نمونه‌ها را تحت ۸۰، ۹۰ و ۹۵ درصد مقاومت فشاری نهایی‌شان و سپس در شرایط نگهداری موردنظر تا سن ۲۸ روزه، عمل‌آوری و سپس تا مقاومت نهایی بارگذاری کردند. نتایج نشان داد که آب، ترک و میزان سیمان هیدراته نشده در بتن، تأثیرگذارترین عوامل در فرایند خودترمیمی نمونه‌های بتنی هستند.

در پژوهش حاضر، به بررسی اثر پیش‌بارگذاری در مقاومت فشاری در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه برای بتن ژئوپلیمری حاوی الیاف پرداخته شده است.

۲. مشخصات مصالح مصرفی

سرباره‌ی کوره‌ی آهن‌گدازی به‌عنوان ماده‌ی پایه‌ی مصرفی جهت ساخت بتن ژئوپلیمری استفاده شده است. روباره‌ی استفاده شده در مطالعه‌ی حاضر، از کارخانه‌ی ذوب آهن اصفهان تهیه شده و دارای وزن مخصوص ۱۴۵۰ کیلوگرم فورس بر مترمکعب بوده است. مواد متشکله‌ی اصلی روباره عبارت است از SiO_2، Al_2O_3، MgO و CaO که جمعا ۹۰٪ روباره را تشکیل می‌دهند.[۲۷] ترکیب‌های شیمیایی به کار رفته در آن در جدول ۱ ارائه شده‌اند.[۲۸] مقدار سرباره‌ی مصرفی برای تمامی نمونه‌ها، مقداری ثابت و برابر ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب بوده است.

ماسه‌ی استفاده شده جهت ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی، رودخانه‌یی و گردگوشه بوده و با عنوان ماسه‌ی ۶-۰ از کارخانه‌ی لوله‌سازی شمال رشت تهیه شده است. توده‌ی ویژه‌ی ماسه‌ی مصرفی در حالت اشباع با سطح خشک برابر ۲۶۱۱ کیلوگرم بر مترمکعب و جذب آب آن ۲/۴٪ بوده است. دانه‌بندی ماسه‌ی مصرفی مطابق استاندارد ASTM C۳۳ (۲۰۰۸) بوده است. مطابقت دانه‌بندی ماسه با محدوده‌ی موردپذیرش استاندارد، در شکل ۱ مشاهده می‌شود.

شن مصرفی، مخلوط رودخانه‌یی بوده و از کارخانه‌ی لوله‌سازی شمال رشت، که اغلب از رودخانه‌ی سفیدرود تأمین می‌شود، تهیه شده است. وزن مخصوص ظاهری ۱۰۸۶ کیلوگرم بر مترمکعب و اندازه‌ی بیشینه‌ی دانه‌های آن ۱۲/۵ میلی‌متر و جذب آب ۱/۱٪ بوده است. دانه‌بندی براساس استاندارد ASTM C۳۳ انجام شده است که نمودار آن در شکل ۲ مشاهده می‌شود. مقدار شن و ماسه‌ی مصرفی برای تمامی نمونه‌ها مقداری ثابت و برابر ۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب برای هر یک بوده است.

آب استفاده شده در پژوهش حاضر جهت ساخت و همچنین عمل‌آوری نمونه‌ها، آب شرب شهر رشت بوده است که معیارهای توصیه شده در دستورالعمل

جدول ۱. مشخصات شیمیایی روباره‌ی کوره‌ی آهن‌گدازی.

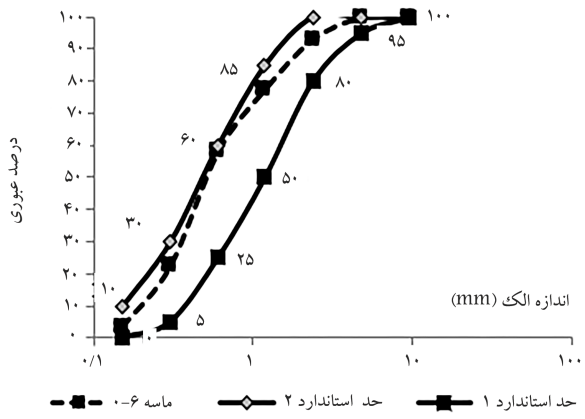
نام	ترکیب شیمیایی	روباره‌ی کوره‌ی بلند آهن‌گدازی (٪)
سیلیس	SiO_2	۳۴-۴۰
آهک کلسیم	CaO	۳۴-۴۰
اکسیدآلومینیوم	Al۱۲O۳	۷-۱۱
منیزیم	MgO	۶-۹
منگنز	MnO	۰/۵ – ۲/۵
اکسیدآهن	FeO	۰/۳ – ۱/۳
دی‌اکسیدتیتانیم	TiO_2	۱/۵ – ۴/۵
اکسید وانادیوم	V_2O_5	۰/۰۵ – ۰/۳۵
اکسید سدیم	NaO_2	۰/۲۵ – ۰/۷۵
پتاسیم سوپراکسید	K۲O	۰/۳ – ۱/۳
گوگرد	S	۰/۹ – ۱/۵
ترکیب آهن و سیلیس	CaO/SiO_2	۰/۸۰ – ۱/۱۱
آب	H_2O	۱-۷

جدول ۲. مشخصات مکانیکی و فیزیکی الیاف فولادی.

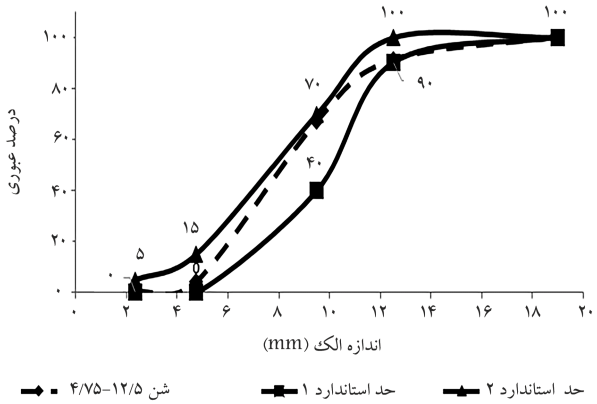
طول (mm)	قطر (mm)	L/D	مقاومت کششی (MPa)	چگالی (Kg/m^3)
۳۶	۰/۸	۴۵	۱۲۰۰	۷۸۵۰

جدول ۳. مشخصات مکانیکی و فیزیکی الیاف پلی‌پروپیلن.

مقطع	طول (mm)	قطر (mm)	قطر /طول	مقاومت کششی (MPa)	مدول کشسانی (GPa)
دایره	۳۶	بسیار ناچیز	-	۴۰۰	۳/۹ – ۳/۵



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی ماسه‌ی مصرفی.



شکل ۲. نمودار دانه‌بندی شن براساس استاندارد.

ASTM C۱۶۰۱ (۲۰۰۶) را رعایت می‌کند. مقدار آب اضافی ۱۴/۲۹ کیلوگرم بر مترمکعب بوده است. در مطالعه‌ی حاضر با هدف فعال‌سازی قلیایی ماده‌ی پایه از ترکیب هیدروکسیدسدیم و سیلیکات‌سدیم به عنوان محلول فعال‌کننده‌ی قلیایی استفاده شده است. محلول‌های هیدروکسیدسدیم، هیدروکسید پتاسیم، سیلیکات‌سدیم، وکربنات‌سدیم از مهم‌ترین محلول‌های فعال‌ساز در پژوهش‌ها به‌شمار می‌روند.[۲۹] در پژوهش‌های آغازین در مورد ژئوپلیمرها توسط داویدویتس از محلول هیدروکسیدسدیم یا هیدروکسیدپتاسیم به عنوان محلول فعال‌کننده‌ی قلیایی استفاده شده است.[۳۰] اضافه کردن یک محلول سیلیکاتی، مانند سیلیکات‌سدیم یا سیلیکات‌پتاسیم به محلول هیدروکسیدسدیم یا هیدروکسیدپتاسیم، می‌تواند به بالا رفتن نرخ واکنش، کمک و نتایج بهتری را به‌همراه داشته باشد.[۳۱] سود سوزآور به صورت پودر با آب مخلوط و با غلظت‌های مولاریته‌ی ۱۰ در ساخت بتن ژئوپلیمری استفاده شده است. مقدار هیدروکسیدسدیم و سیلیکات‌سدیم ثابت و به ترتیب برابر ۵۷/۱۴۳ و ۱۲۸/۵۷۱۸ کیلوگرم بر مترمکعب بوده است. در پژوهش حاضر به منظور رسیدن به روانی مطلوب و کمک به توزیع بهتر ذرات در مخلوط ملات از فوق روان‌کننده بر پایه‌ی پلی کربوکسیلات اتر با نام تجاری FARCO PLAST P۱۰ محصول شرکت شیمی ساختمان استفاده شده است.

امروزه از انواع الیاف‌ها با مدول کشسانی و قابلیت انبساط طولی متفاوت برای بهبود خواص بتن معمولی و ژئوپلیمری استفاده می‌شود.[۳۲] در پژوهش حاضر از دو نوع الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن در ساخت بتن ژئوپلیمری استفاده شده است. الیاف فولادی با درصدهای حجمی ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ و الیاف پلی‌پروپیلن با درصدهای حجمی ۰/۲۵، ۰/۵، و ۰/۷۵ استفاده شده‌اند. طرح شاهد، فاقد الیاف بوده است. الیاف‌های فولادی و پلی‌پروپیلن به صورت ترکیبی در مخلوط بتن ژئوپلیمری با درصدهای ترکیب مختلف استفاده و در مجموع علاوه بر طرح شاهد، ۱۲ طرح از بتن ژئوپلیمری حاوی ترکیب الیاف فولادی و پلی پروپیلن ساخته شده است. الیاف فولادی مصرفی تهیه‌شده از شرکت ب. آ .اس. اف (BASF) ایران دارای انتهای قلاب‌دار است. خواص فیزیکی و مکانیکی الیاف فولادی مصرفی در جدول ۲ ارائه شده است. مقاومت کششی بسیار زیاد الیاف پلی‌پروپیلن در سنین اولیه، باعث عدم ترک‌خوردگی بتن می‌شود.[۳۳] مشخصات الیاف پلی پروپیلن مصرفی در جدول ۳ ارائه شده است.

۳. طرح اختلاط نمونه‌های آزمایشگاهی

برای دستیابی به اهداف پژوهش حاضر، ۱۳ طرح مختلف از بتن ژئوپلیمری ساخته و آزمایش شده‌اند. طرح شاهد، فاقد الیاف بوده و در ۱۲ طرح دیگر، الیاف‌های فولادی و پلی‌پروپیلن با درصدهای حجمی مختلف به صورت ترکیب استفاده شده‌اند، تا درصد بهینه‌ی الیاف مشخص شود. جزئیات طرح‌های اختلاط در جدول ۴ ارائه شده است. در نام‌گذاری طرح‌های اختلاط در جدول ۴، حرف S معرف حضور الیاف فولادی و حرف P، نشان‌دهنده‌ی حضور الیاف پلی‌پروپیلن در طرح اختلاط بتن ژئوپلیمری و اعداد پس از آن‌ها، نشان‌دهنده‌ی درصد حجمی دو الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن در مخلوط بتنی است.

۴. آزمایش‌های انجام شده

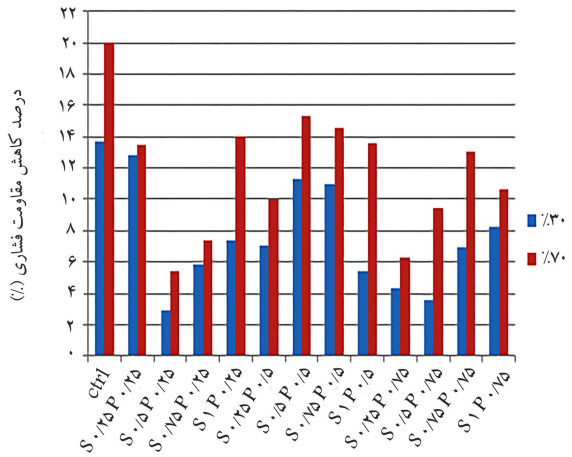
نمونه‌ها در سنین ۱، ۳ و ۷ روزه معادل ۳۰ و ۷۰ درصد مقاومت فشاری خود در همان سن بارگذاری شده‌اند. سپس نمونه‌ها دوباره در محیط مرطوب عمل‌آوری شده و در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه تحت بارگذاری فشاری قرار گرفته‌اند. استفاده از دماهای بالا برای عمل‌آوری بتن ژئوپلیمری به دلیل ایجاد ترک، تأثیر منفی در خواص بتن دارد.[۳۴] موضوع مورد بررسی دیگر در پژوهش حاضر، بررسی اثر پیش بارگذاری در مقاومت خمشی و همچنین جذب انرژی بتن ژئوپلیمری حاوی

جدول ۴. جزئیات طرح اختلاط نمونه‌های آزمایشگاهی.

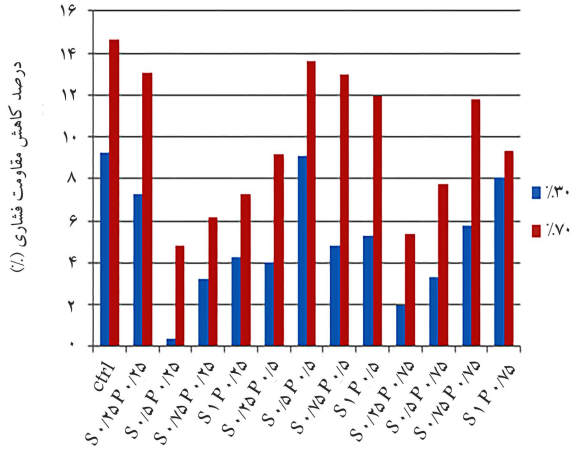
شماره‌ی نمونه	نام	الیاف (٪)	
		فولادی	پلی‌پروپیلن
۱	کنترل	۰	۰
۲	S۰/۲۵P۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵
۳	S۰/۵P۰/۲۵	۰/۵	۰/۲۵
۴	S۰/۷۵P۰/۲۵	۰/۷۵	۰/۲۵
۵	S۱P۰/۲۵	۱	۰/۲۵
۶	S۰/۲۵P۰/۵	۰/۲۵	۰/۵
۷	S۰/۵P۰/۵	۰/۵	۰/۵
۸	S۰/۷۵P۰/۵	۰/۷۵	۰/۵
۹	S۱P۰/۵	۱	۰/۵
۱۰	S۰/۲۵P۰/۷۵	۰/۲۵	۰/۷۵
۱۱	S۰/۵P۰/۷۵	۰/۵	۰/۷۵
۱۲	S۰/۷۵P۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۵
۱۳	S۱P۰/۷۵	۱	۰/۷۵

الیاف بوده است. به‌منظور اندازه‌گیری مقاومت فشاری از نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۰۰ × ۱۰۰ میلی‌متر استفاده شده است. این آزمایش براساس استاندارد ۳۹ ASTM C انجام شده است. برای انجام آزمایش اخیر، نمونه‌های مکعبی در سن موردنظر از حوضچه‌ی عمل‌آوری خارج شدند و مدتی در هوای آزاد قرار گرفتند تا آب اضافی از سطح آن‌ها خارج شود. در پایان، هر نمونه داخل دستگاه پرس هیدرولیکی و تحت بارگذاری یکنواخت قرارگرفته است. به محض شکستن قسمتی از نمونه، بارگذاری دستگاه متوقف و بیشینه‌ی نیروی وارده بر سطح تماس نمونه بر روی نمایشگر دستگاه نشان داده می‌شد (P)، سپس تنش فشاری مکعبی حاصل با تقسیم نیروی P بر سطح مقطع نمونه به‌دست می‌آمد. برای هر طرح، ۱۷ نمونه‌ی مکعبی ساخته شده است، که ۵ عدد در ۱ روز، ۵ عدد در ۳ روز، ۵ عدد در ۷ روز و ۱ عدد در روزهای ۲۸ و ۹۰ بارگذاری می‌شدند. از ۵ نمونه، ۲ عدد مربوط به بارگذاری ۳۰٪، ۲ عدد برای بارگذاری ۷۰٪ و ۱ عدد برای شکست کامل بوده است، تا مقاومت نهایی در آن سن مشخص شود. در واقع، ابتدا نمونه در هر سن تحت بارگذاری تا شکست کامل قرار می‌گرفت تا بدین صورت مقاومت نهایی در آن سن به‌دست آید. سپس بارگذاری ۳۰ و ۷۰ درصد مقاومت نهایی در آن سن انجام شده است.

آزمایش دیگری که در پژوهش حاضر استفاده شده است، آزمایش مقاومت خمشی بوده است، که از نتایج آن برای محاسبه‌ی انرژی شکست بتن ژئوپلیمری الیافی استفاده شده است. انرژی شکست از سطح زیر نمودار بار ـ تغییرشکل در آزمایش خمش یا فشار به دست آمده است. آزمایش مقاومت خمشی قابلیت تیر یا دال بتنی غیرمسلح را به لحاظ مقاومت در برابر شکست ناشی از خمش ارزیابی می‌کند. در پژوهش حاضر، آزمایش مقاومت خمشی به روش بار مرکزی و براساس استاندارد ASTM C۲۹۳ انجام شده است. برای انجام آزمایش مذکور از نمونه‌ی منشوری (تیر) به ابعاد ۲۸۰ × ۷۰ × ۷۰ میلی‌متر استفاده شده است. برای هر طرح، ۶ نمونه‌ی منشوری ساخته شده است که ۱ عدد در سن ۳ روزه، ۳ عدد در سن ۷ روزه و ۱ عدد در روزهای ۲۸ و ۹۰ بارگذاری



شکل ۳. نمودار: میزان کاهش مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی نمونه‌های پیش بارگذاری‌شده در سن ۱ روزه نسبت به نمونه‌های مشابه پیش‌بارگذاری نشده.



شکل ۴. نمودار میزان کاهش مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی نمونه‌های پیش بارگذاری شده در سن ۳ روزه نسبت به نمونه‌های مشابه پیش‌بارگذاری نشده.

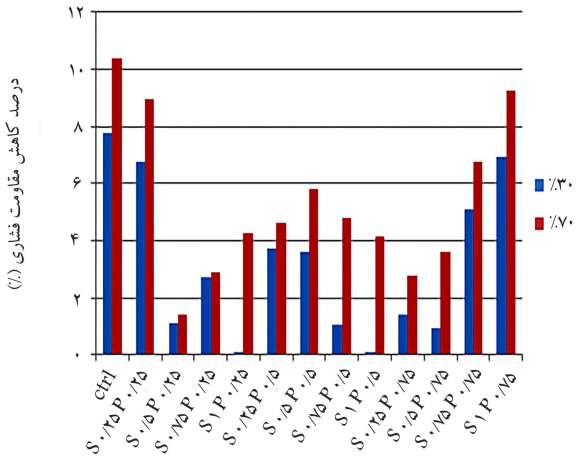
شده‌اند. به‌طور کلی، ۲۲۱ نمونه‌ی مکعبی و ۷۸ نمونه‌ی منشوری ساخته شده است.

۵. بررسی و تحلیل نتایج آزمایش‌ها

۱.۵. مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی نمونه‌های پیش بارگذاری شده

در شکل‌های ۳ الی ۵، نمودارهای اثر مقدار پیش‌بارگذاری در سنین مختلف و درصدهای مختلف بارگذاری در مقاومت فشاری ۲۸ روزه مشاهده می‌شود. برای این منظور درصد کاهش مقاومت فشاری ۲۸ روزه برای درصدهای مختلف بارگذاری نسبت به حالت پیش‌بارگذاری‌نشده برای هر نمونه به‌دست آمده است. در شکل‌های اخیر، مقاومت مبنا جهت مقایسه، مقاومت فشاری ۲۸ روزه هر طرح بوده است؛ در حقیقت، میزان افت مقاومت هر نمونه نسبت به نمونه‌ی مشابه خود و در حالت پیش‌بارگذاری نشده به‌دست آمده است.

در میان طرح‌های حاوی الیاف و پیش‌بارگذاری شده در سن ۱ روزه، بهترین عملکرد در هر دو حال بارگذاری ۳۰ و ۷۰ درصد مربوط به طرح حاوی ۰/۵٪ الیاف فولادی و ۰/۲۵٪ پلی‌پروپیلن بوده است، به طوری که نسبت به نمونه‌ی مشابه



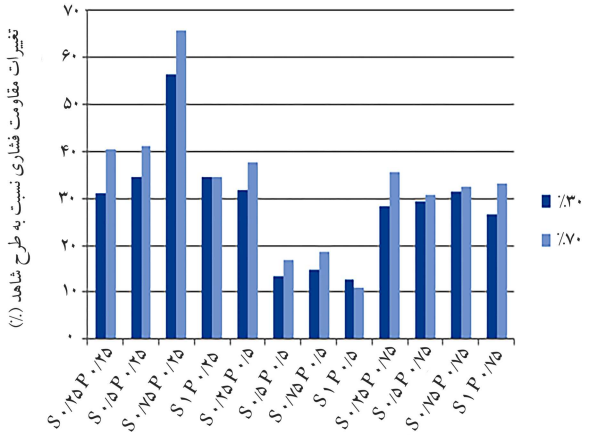
شکل ۵. نمودار میزان کاهش مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی نمونه‌های پیش‌بارگذاری شده در سن ۷ روزه نسبت به نمونه‌های مشابه پیش‌بارگذاری نشده.

خود به ترتیب در درصدهای بارگذاری ۳۰ و ۷۰ درصد، ۳ و ۵/۵ درصد کاهش مقاومت نتیجه داده است (شکل ۳).

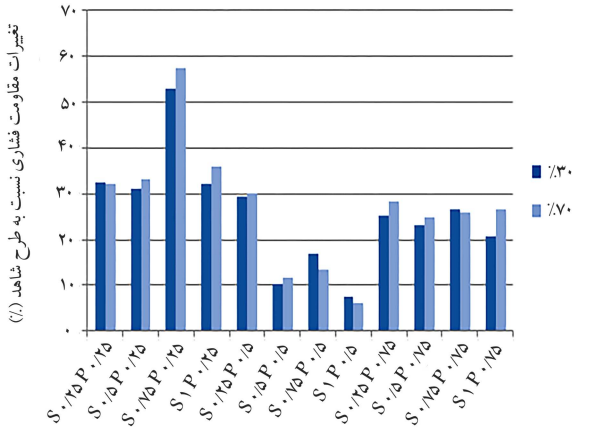
با توجه به شکل ۴ مشاهده می‌شود که همچنان بیشترین میزان افت مقاومت در اثر پیش‌بارگذاری ۳۰ و ۷۰ درصد در سن ۳ روزه، مربوط به طرح شاهد بوده و به ترتیب برابر ۹/۳ و ۱۴/۶ درصد برای بارگذاری‌های ۳۰ و ۷۰ درصد به‌دست آمده است. مقایسه‌ی نتایج با نمونه‌های مشابه بارگذاری شده در سن ۱ روزه نشان می‌دهد که میزان افت مقاومت در اثر پیش‌بارگذاری در سن ۳ روزه کاهش یافته است؛ به عبارت دیگر، میزان آسیب در اثر پیش‌بارگذاری در سن ۳ روزه در مقایسه با سن ۱ روزه کمتر بوده است؛ این موضوع به دلیل کامل‌تر شدن فرایند پلیمریزاسیون در سن ۳ روزه در مقایسه با سن ۱ روزه بوده و ادامه‌ی فرایند گیرش در اثر عمل‌آوری تا سن ۲۸ روزه باعث شده است تا آسیب‌های ناشی از پیش‌بارگذاری تا حدی جبران شود، که این موضوع در بتن‌های پیش‌بارگذاری شده‌ی ۳ روزه در مقایسه با نمونه‌های پیش‌بارگذاری شده‌ی ۱ روزه با شدت بیشتری همراه بوده است.

با توجه به شکل ۵، همچنان اثر تکمیل فرایند پلیمریزاسیون در نتایج مشهود است، به‌طوری که درصد افت مقاومت در مقایسه با حالت‌های پیش بارگذاری ۱ و ۳ روزه برای تمامی نمونه‌ها کاهش یافته است. یکی از اهداف مورد توجه در پژوهش حاضر، بررسی اثر حضور الیاف‌های فولادی و پلی‌پروپیلن در کاهش آثار مخرب پیش‌بارگذاری بوده است. برای این منظور، نمودارهای مقاومت فشاری نمونه‌های پیش‌بارگذاری شده در سنین مختلف و برای درصدهای مختلف بارگذاری، با نتایج حاصل از طرح فاقد الیاف (شاهد) مقایسه و میزان تغییرات بر حسب درصد در شکل‌های ۶ الی ۸ ارائه شده است.

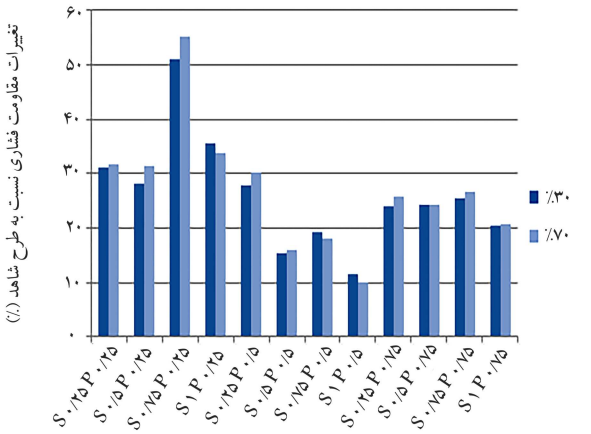
با بررسی نتایج ارائه شده در شکل ۶ مشخص شد که حضور الیاف باعث شده است در هر دو حالت پیش‌بارگذاری ۳۰ و ۷۰ درصد، مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی بالاتری نسبت به طرح شاهد به‌دست آید و این موضوع نشان‌دهنده‌ی اثر مثبت الیاف درکاهش آثار مخرب پیش بارگذاری است. بهترین نتایج مربوط به طرح‌های حاوی ۰/۲۵٪ الیاف پلی‌پروپیلن بوده است، به طوری که بهترین عملکرد در میان نمونه‌های پیش‌بارگذاری شده در سن ۱ روزه مربوط به طرح حاوی ۰/۷۵٪ الیاف فولادی و ۰/۲۵٪ الیاف پلی‌پروپیلن بوده است. طرح مذکور نسبت به طرح شاهد پیش‌بارگذاری شده در درصدهای بارگذاری ۳۰ و ۷۰ درصد به ترتیب ۵۶/۴ و ۶۵/۸ درصد، مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی بالاتری کسب کرده است.



شکل ۶. نمودار درصد تغییرات مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی نمونه‌های پیش بارگذاری‌شده در سن ۱ روزه نسبت به طرح شاهد.

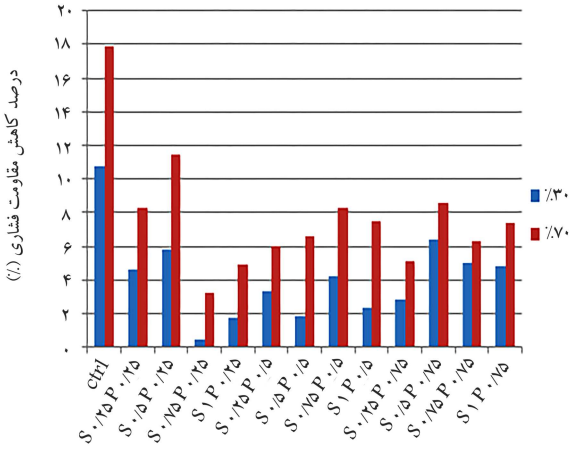


شکل ۷. نمودار درصد تغییرات مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی نمونه‌های پیش‌بارگذاری شده در سن ۳ روزه نسبت به طرح شاهد.

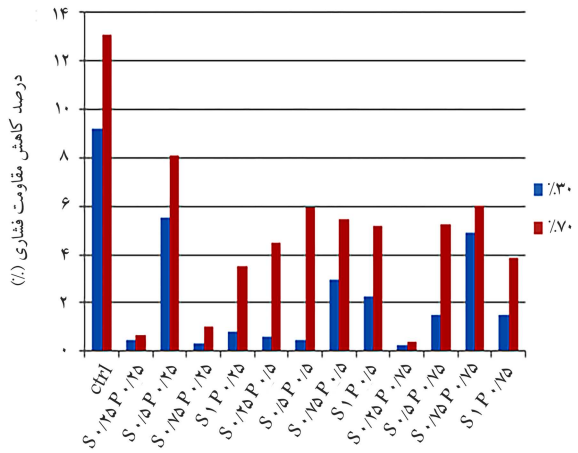


شکل ۸. نمودار درصد تغییرات مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی نمونه‌های پیش‌بارگذاری شده در سن ۷ روزه نسبت به طرح شاهد.

مورد قابل توجه دیگر، اثرگذاری بیشتر الیاف درکاهش آثار مخرب پیش‌بارگذاری ۱ روزه در درصد بارگذاری بالاتر (۷۰٪ پیش‌بارگذاری) بوده است؛ به‌طوری که در بارگذاری ۳۰٪ نمونه‌های حاوی الیاف پیش‌بارگذاری شده در سن ۱ روزه در مقایسه با طرح شاهد، به‌طور متوسط ۲۸/۸٪ مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی بالاتری نتیجه



شکل ۹. نمودار میزان کاهش مقاومت فشاری ۹۰ روزه‌ی نمونه‌های پیش‌بارگذاری شده در سن ۱ روزه.



شکل ۱۰. نمودار میزان کاهش مقاومت فشاری ۹۰ روزه‌ی نمونه‌های پیش‌بارگذاری شده در سن ۳ روزه.

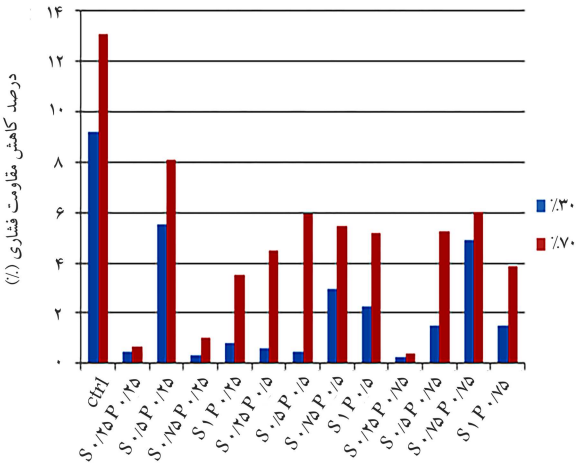
داده‌اند، در حالی که مقدار اخیر برای پیش‌بارگذاری ۷۰٪ برابر ۳۳/۲٪ بوده است. این موضوع نشان می‌دهد هر چند حضور الیاف در نمونه‌های پیش‌بارگذاری شده‌ی ۳ روزه باعث بهبود عملکرد در مقایسه با طرح شاهد در فرایند پیش بارگذاری می‌شود، اما در مقایسه با نمونه‌های پیش‌بارگذاری‌شده‌ی ۱ روزه، میزان رشد مقاومت نسبت به طرح شاهد کمتر بوده است. این موضوع به دلیل بهبود مقاومت نمونه‌ی شاهد با افزایش سن نمونه و کمتر شدن اثر حضور الیاف در کاهش آثار مخرب پیش‌بارگذاری در مقایسه با حالت ۱ روزه بوده است (شکل ۷).

همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، استفاده از الیاف‌های پلی‌پروپیلن و فولادی در مخلوط بتن ژئوپلیمری باعث شده است تا آثار مخرب ناشی از پیش‌بارگذاری در سن ۷ روزه کاهش یابد و مقاومت فشاری کسب‌شده توسط آن‌ها پس از عمل‌آوری تا سن ۲۸ روزه به طور متوسط نسبت به طرح شاهد (فاقد الیاف) در حالت پیش‌بارگذاری ۳۰ و ۷۰ درصد به ترتیب ۲۶/۲ و ۲۷ درصد بیشتر باشد. همچنین بهترین عملکرد مربوط به طرح‌های حاوی ۲۵٪ الیاف پلی‌پروپیلن بوده است، به طوری که آن‌ها به طور متوسط ۳۶/۵٪ مقاومت فشاری بالاتری نسبت به نمونه‌ی شاهد نتیجه داده‌اند.

۲.۵. مقاومت فشاری ۹۰ روزه‌ی نمونه‌های پیش‌بارگذاری شده

در ادامه‌ی آزمایش‌های پژوهش حاضر، نمونه‌های پیش‌بارگذاری‌شده در سنین مختلف، مجدداً تا سن ۹۰ روزه، عمل‌آوری شده و تحت بارگذاری فشاری تا شکست کامل قرار گرفته‌اند. در شکل‌های ۹ الی ۱۱، نمودارهای میزان افت مقاومت فشاری ۹۰ روزه در اثر پیش‌بارگذاری برای هر نمونه بر حسب درصد مشاهده می‌شود، که در آن‌ها مقاومت فشاری ۹۰ روزه هر طرح با مقاومت فشاری ۹۰ روزه‌ی طرح متناظر پیش‌بارگذاری شده در درصدها و سنین مختلف مقایسه و اثر پدیده‌ی پیش بارگذاری در مقاومت فشاری ۹۰ روزه بررسی شده است.

با توجه به شکل ۹، بیشترین افت مقاومت فشاری ۹۰ روزه در اثر پیش‌بارگذاری در سن ۱ روزه مربوط به طرح شاهد بوده است، به طوری که در ۳۰٪ پیش‌بارگذاری، ۱۵/۴ و در ۷۰٪ پیش‌بارگذاری، ۲۱/۹٪ افت مقاومت داشته است. با توجه به نتایج ارائه شده (شکل‌های ۱۰ و ۱۱) مشاهده می‌شود که افزایش سن پیش‌بارگذاری اثر مطلوبی در کاهش میزان افت مقاومت در اثر پیش‌بارگذاری دارد. این موضوع به خصوص در مورد نمونه‌های پیش‌بارگذاری شده در سن ۷ روزه مشهود است. به

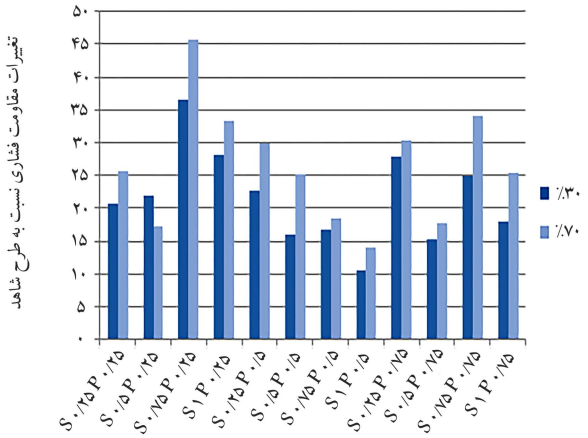


شکل ۱۱. نمودار میزان کاهش مقاومت فشاری ۹۰ روزه‌ی نمونه‌های پیش‌بارگذاری شده در سن ۷ روزه.

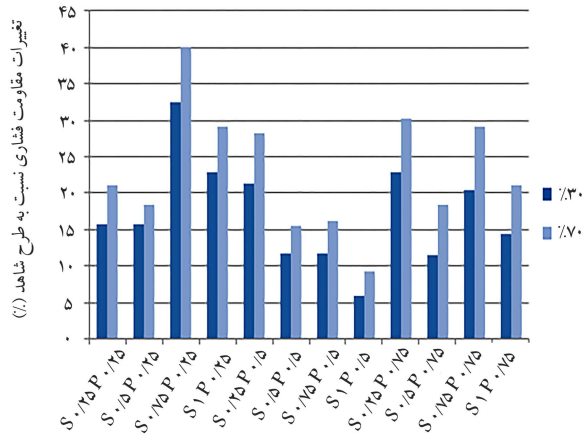
عنوان نمونه، طرح شاهد در حالت پیش‌بارگذاری ۷۰٪ در سن ۱ روزه حدود ۲۲٪ افت مقاومت داشته است؛ در حالی که در پیش‌بارگذاری ۷ روزه، ۱۳/۱٪ افت مقاومت نتیجه داده است.

با هدف بررسی اثر ترکیب الیاف‌های پلی‌پروپیلن و فولاد با درصدهای حجمی مختلف در نتایج آزمایش مقاومت فشاری ۹۰ روزه‌ی نمونه‌های پیش‌بارگذاری شده در سن ۱ روزه شکل ۱۲ رسم شده است. نتایج نشان می‌دهد حضور الیاف باعث بهبود عملکرد فشاری نسبت به طرح شاهد پیش‌بارگذاری شده‌ی ۱ روزه شده است، به‌طوری که تمامی نمونه‌های حاوی الیاف، مقاومت فشاری ۹۰ روزه‌ی بالاتری نسبت به طرح شاهد کسب کرده‌اند. بهترین عملکرد مربوط به طرح حاوی ۰/۲۵٪ الیاف پلی‌پروپیلن و ۰/۷۵٪ الیاف فولادی بوده است، به طوری که نسبت به نمونه‌ی شاهد در پیش‌بارگذاری ۷۰ و ۳۰ درصد، به ترتیب ۴۵/۶٪ و ۳۶/۵٪ افزایش مقاومت داشته است.

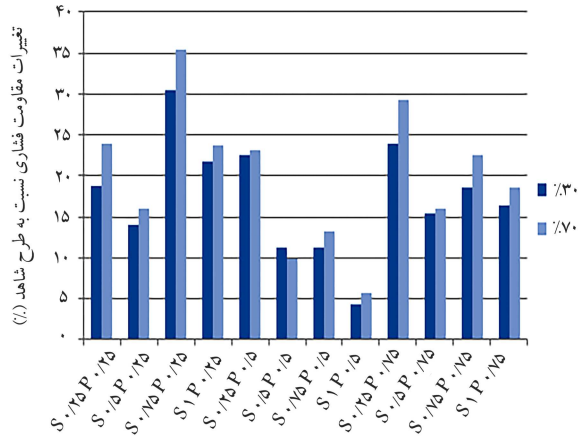
در حالت پیش‌بارگذاری شده در سن ۳ و ۷ روزه (شکل‌های ۱۳ و ۱۴) نیز نمونه‌های حاوی الیاف، مقاومت فشاری ۹۰ روزه‌ی بالاتری نسبت به طرح شاهد کسب کرده‌اند. بررسی نتایج نشان می‌دهد که در پیش‌بارگذاری ۷۰٪ در مقایسه با پیش‌بارگذاری ۳۰٪، میزان افزایش مقاومت فشاری ۹۰ روزه‌ی طرح‌های حاوی



شکل ۱۲. نمودار درصد تغییرات مقاومت فشاری ۹۰ روزه‌ی نمونه‌های پیش‌بارگذاری شده در سن ۱ روزه نسبت به طرح شاهد.

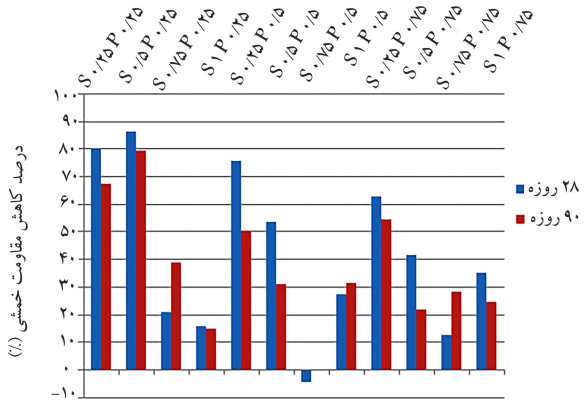


شکل ۱۳. نمودار درصد تغییرات مقاومت فشاری ۹۰ روزه‌ی نمونه‌های پیش‌بارگذاری شده در سن ۳ روزه نسبت به طرح شاهد.



شکل ۱۴. نمودار درصد تغییرات مقاومت فشاری ۹۰ روزه‌ی نمونه‌های پیش‌بارگذاری‌شده در سن ۷ روزه نسبت به طرح شاهد.

الیاف نسبت به شاهد بیشتر بوده است. این موضوع نشان می‌دهد تأثیر حضور الیاف در کاهش اثر مخرب پیش‌بارگذاری در درصدهای بالاتر پیش‌بارگذاری بیشتر است. در پیش‌بارگذاری ۱ روزه و پیش‌بارگذاری ۳۰٪، نمونه‌های حاوی الیاف به طور متوسط ۲۱/۷٪ مقاومت فشاری ۹۰ روزه‌ی بالاتری نسبت به نمونه‌ی شاهد نتیجه



شکل ۱۵. نمودار درصد تغییرات مقاومت خمشی نمونه‌ها در حالت پیش‌بارگذاری شده نسبت به حالت پیش‌بارگذاری نشده.

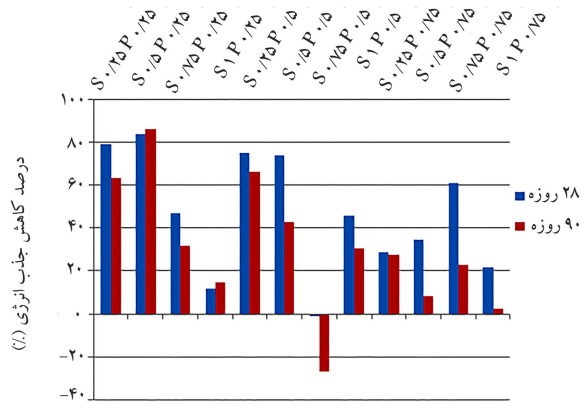
داده‌اند؛ در حالی که این مقدار در حالت پیش‌بارگذاری ۷۰٪، برابر ۲۶/۵٪ بوده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت با افزایش درصد پیش‌بارگذاری، حضور الیاف تأثیر بیشتری در کاهش آثار مخرب پیش بارگذاری خواهد داشت. دلیل این موضوع را می‌توان این‌گونه بیان کرد که با افزایش درصد پیش‌بارگذاری، عرض ترک‌های ایجاد شده به گونه‌یی است که بتن به تنهایی توان ترمیم ترک‌های به‌وجودآمده را ندارد و حضور الیاف باعث می‌شود میزان ترک‌های تحت بارگذاری در بتن کاهش یابد و همچنین از گسیختگی کامل نمونه جلوگیری شود.

همچنین بررسی نتایج نشان می‌دهد افزایش سن پیش‌بارگذاری باعث شده است تا تأثیر الیاف در کاهش اثر مخرب پیش‌بارگذاری در درصدهای بالا (پیش‌بارگذاری ۷۰٪) تا حدی کاهش یابد. برای مثال، در نمونه‌های پیش‌بارگذاری‌شده در سن ۷ روزه و ۷۰٪ پیش‌بارگذاری حضور الیاف به‌طور متوسط باعث شده است که مقاومت فشاری ۹۰ روزه نسبت به نمونه‌ی شاهد، ۱۹/۸٪ افزایش یابد که مقدار مذکور برای سنین ۱ و ۳ روزه به ترتیب ۲۶/۵٪ و ۲۱/۶٪ بوده است.

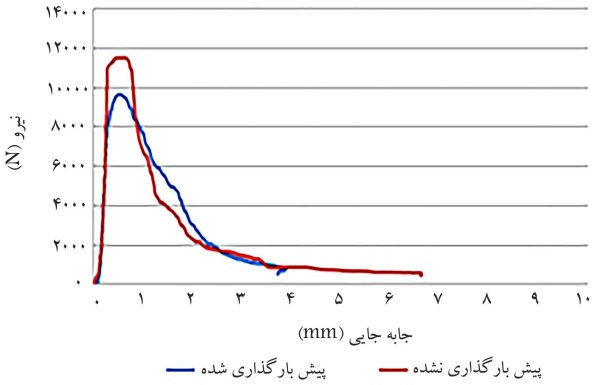
۳.۵. اثر پیش‌بارگذاری در مقاومت خمشی و انرژی شکست

نمونه‌های آزمایشگاهی در سن ۷ روزه تحت اثر پیش‌بارگذاری خمشی تا لحظه‌ی ایجاد ترک قرارگرفته و سپس تا سنین ۲۸ و ۹۰ روزه، عمل‌آوری شده و مجدداً تحت آزمایش مقاومت خمشی قرارگرفته‌اند. در شکل ۱۵، نمودارهای مقاومت خمشی ۲۸ و ۹۰ روزه‌ی نمونه‌های پیش‌بارگذاری‌شده با نتایج مقاومت خمشی در حالت پیش‌بارگذاری نشده مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند تقریباً برای تمامی نمونه‌ها، پیش‌بارگذاری در سن ۷ روزه باعث شده است تا مقاومت خمشی نسبت به حالت پیش‌بارگذاری نشده به شدت کاهش یابد.

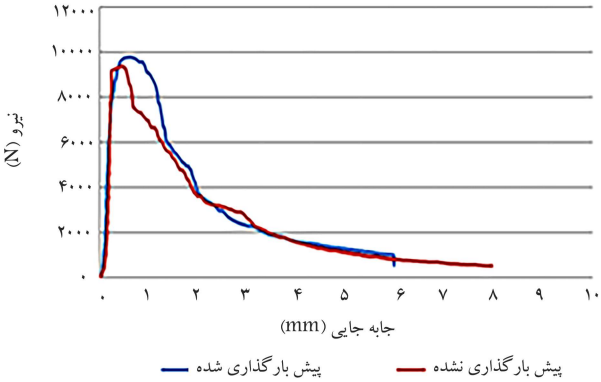
همچنین در شکل ۱۶، نمودارهای میزان تغییرات جذب انرژی نمونه‌های پیش‌بارگذاری‌شده‌ی حاوی الیاف با نتایج حالت بارگذاری نشده مقایسه شده‌اند. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که پیش‌بارگذاری در طرح‌های S۰/۲۵P۰/۲۵ و S۰/۵P۰/۲۵ بیشترین تأثیر را داشته و باعث شده است بیشترین مقدار کاهش جذب انرژی در اثر پیش‌بارگذاری برای دو طرح اخیر اتفاق بیفتد. نمونه‌ی S۱P۰/۲۵ عملکرد قابل قبولی پس از پیش‌بارگذاری برای جذب انرژی نتیجه داده است؛ به‌طوری که نمونه‌ی پیش‌بارگذاری‌شده در مقایسه با نمونه‌ی پیش‌بارگذاری‌نشده، ۱۱/۶٪ در سن ۲۸ روزه و ۱۴/۸٪ در سن ۹۰ روزه، کاهش جذب انرژی نتیجه داده است. از این رو نمودارهای منحنی نیرو ـ جابه‌جایی برای نمونه‌های S۱P۰/۲۵ و S۰/۷۵P۰/۵



شکل ۱۶. نمودار میزان تغییرات جذب انرژی نمونه‌های پیش‌بارگذاری شده‌ی حاوی الیاف نسبت به حالت پیش‌بارگذاری نشده.



شکل ۱۷. نمودار منحنی نیرو ـ جابه‌جایی برای طرح حاوی ۱٪ الیاف فولادی و ۰/۲۵٪ الیاف پلی‌پروپیلن در دو حالت پیش‌بارگذاری شده و پیش‌بارگذاری نشده (۲۸ روزه).

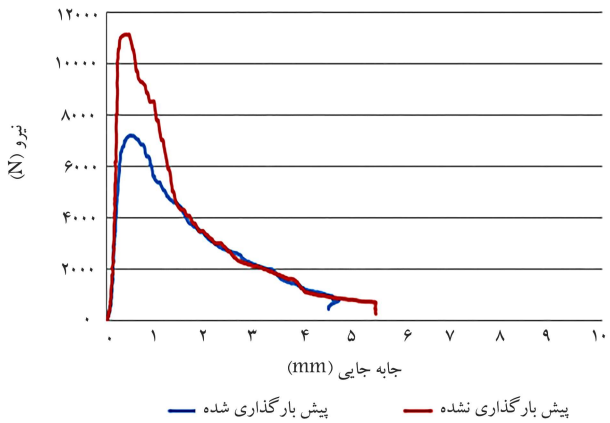


شکل ۱۸. نمودار منحنی نیرو ـ جابه‌جایی برای طرح حاوی ۰/۷۵٪ الیاف فولادی و۰/۵٪ الیاف پلی‌پروپیلن در دو حالت پیش‌بارگذاری شده و پیش‌بارگذاری نشده (۲۸ روزه).

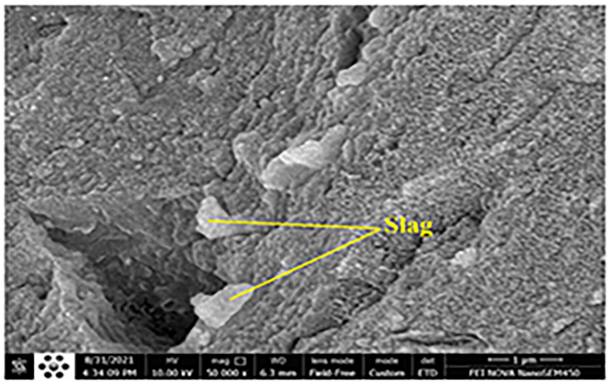
و S۱P۰/۷۵ در شکل‌های ۱۷ الی ۱۹، به عنوان طرح‌های شاخص در دو حالت پیش‌بارگذاری شده و پیش‌بارگذاری نشده مشاهده می‌شوند.

۴.۵. بررسی تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونیکی (SEM)

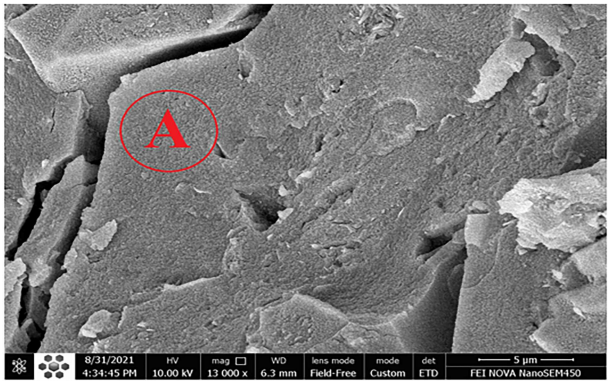
در شکل ۲۰، ریزساختار بتن ژئوپلیمری ساخته‌شده در طرح S۰/۷۵P۰/۲۵



شکل ۱۹. نمودار منحنی نیرو ـ جابه‌جایی برای طرح حاوی ۱٪ الیاف فولادی و ۰/۷۵٪ الیاف پلی‌پروپیلن در دو حالت پیش‌بارگذاری شده و پیش‌بارگذاری نشده (۲۸ روزه).

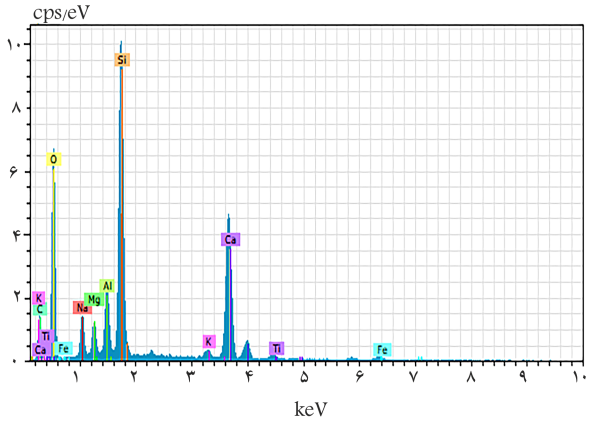


شکل ۲۰. تصویر حاصل از میکروسکوپ الکترونیکی با بزرگ‌نمایی ۵۰ هزار برابر.

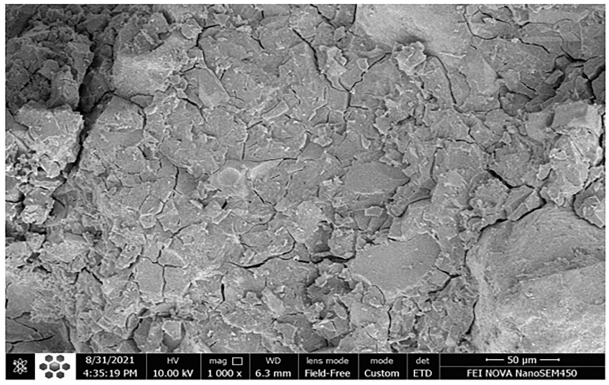


شکل ۲۱. تصویر حاصل از میکروسکوپ الکترونیکی با بزرگ‌نمایی ۱۳ هزار برابر.

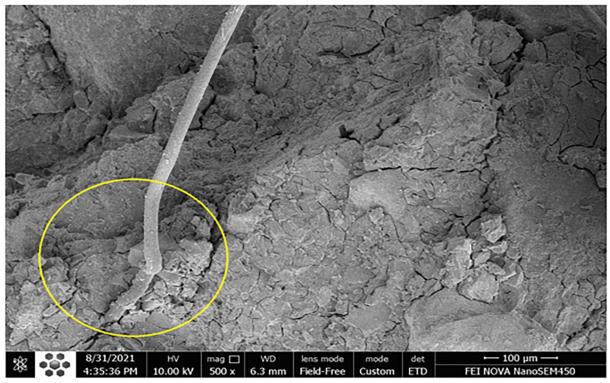
با بزرگ‌نمایی ۵۰ هزار برابری مشاهده می‌شود که مطابق آن تعداد کمی ذرات سرباره‌ی واکنش نداده یا نیمه واکنش داده وجود دارد که نشانگر واکنش مناسب ژئوپلیمریزاسیون است. همچنین خلل و فرج کمی در ریزساختار مشاهده می‌شود و ساختار متراکمی به وجود آمده است، که با نتایج نفوذپذیری و مقاومت الکتریکی همخوانی دارد. نتایج آنالیز EDSبرای نقطه‌ی A در شکل ۲۱ با بزرگ‌نمایی ۱۳ هزار برابر، در شکل ۲۲ مشاهده می‌شود. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهند که تشکیل مناسب ساختارهای Na-A-S-H و K-A-S-H و همچنین وجود بالای Ca بیانگر تشکیل ساختارهای Ca-K(Na)-S-Hدر بتن ژئوپلیمری ساخته شده است که عامل اخیر، مقاومت بالای نمونه‌ی ساخته شده را توجیه می‌کند.



شکل ۲۲. آنالیز EDS برای نقطه‌ی A.



شکل ۲۳. تصویر حاصل از میکروسکوپ الکترونیکی نمونه‌ی پیش‌بارگذاری‌شده با بزرگ‌نمایی ۱۰۰۰ برابر.



شکل ۲۴. تصویر حاصل از میکروسکوپ الکترونیکی نمونه‌ی پیش‌بارگذاری شده با بزرگ‌نمایی ۵۰۰ برابر.

در شکل ۲۳، ریزساختار نمونه‌ی S۰/۷۵P۰/۲۵ که در سن ۷ روزه به مقدار ۷۰٪ پیش‌بارگذاری شده است، با بزرگ‌نمایی ۱۰۰۰ برابری مشاهده می‌شود. با توجه به تعداد بالای ترک‌های ریز ایجاد شده که با گذشت سن نمونه نیز ترمیم نیافته‌اند، می‌توان دریافت در طرح S۰/۷۵P۰/۲۵ با وجود مقاومت قابل قبول پس از ۲۸ روز، ریزساختار به نحو مناسبی بهبود نیافته است که این عامل می‌تواند باعث افزایش نفوذپذیری و کاهش قابل توجه دوام شود. همان‌طور که در شکل ۲۴ با برزگ‌نمایی X۵۰۰ مشاهده می‌شود، الیاف پس از تسلیم کامل نمونه، همچنان در محل خود باقی مانده‌اند و تغییرشکل الیاف بیانگر انتقال مناسب نیرو در آن‌هاست.

۶. نتیجه‌گیری

۱. بیشترین کاهش مقاومت فشاری ۲۸ روزه در اثر پیش‌بارگذاری در سنین ۱ و ۳ روزه در هر دو حالت بارگذاری ۳۰ و ۷۰ درصد، مربوط به طرح شاهد بوده است. میزان آسیب در اثر پیش‌بارگذاری در سن ۷ روزه در مقایسه با سنین ۱ و ۳ روز کمتر بوده است. این موضوع به دلیل کامل‌تر شدن فرایند پلیمریزاسیون در سنین بالاتر در مقایسه با سن اولیه بوده و ادامه‌ی فرایند گیرش در اثر عمل‌آوری تا سن ۲۸ روزه باعث شده است تا آسیب‌های ناشی از پیش‌بارگذاری تا حدی جبران شود.

۲. بیشترین افت متوسط مقاومت فشاری ۲۸ روزه مربوط به نمونه‌های پیش‌بارگذاری در سن ۱ روزه بوده و برای درصدهای بارگذاری ۳۰ و ۷۰ به ترتیب ۷/۷ و ۱۱/۸٪ به دست آمده است و با افزایش سن نمونه‌ی پیش‌بارگذاری شده، میزان افت مقاومت فشاری ۲۸ روزه کاهش یافته است.

۳. افزایش درصد پیش بارگذاری از ۳۰ به ۷۰ درصد در تمام سنین پیش‌بارگذاری باعث افزایش بیشتر آسیب نمونه‌ی بتنی و در نتیجه افت بیشتر مقاومت فشاری شده است؛ اما نتایج نشان می‌دهند که میزان اثرگذاری پارامتر درصد بارگذاری در افت مقاومت نمونه‌های ژئوپلیمری بارگذاری شده در سن ۷ روزه در مقایسه با سنین ۱ و ۳ روزه کمتر بوده است.

۴. حضور الیاف باعث شده است در هر دو حالت پیش‌بارگذاری ۳۰ و ۷۰ درصد، مقاومت فشاری بالاتری نسبت به طرح شاهد به‌دست آید و این موضوع نشان‌دهنده‌ی اثر مثبت الیاف در کاهش آثار مخرب پیش‌بارگذاری است.

۵. اثرگذاری الیاف در کاهش آثار مخرب پیش‌بارگذاری ۱ روزه در درصد بارگذاری بالاتر (۷۰٪ پیش‌بارگذاری) بیشتر بوده است، به طوری که در بارگذاری ۳۰٪ نمونه‌های حاوی الیاف پیش‌بارگذاری شده در سن ۱ روزه در مقایسه با طرح شاهد به طور متوسط ۲۸/۸٪ مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی بالاتری نتیجه داده‌اند، در حالی که این مقدار برای پیش‌بارگذاری ۷۰٪ برابر ۳۳/۲٪ بوده است.

۶. بیشترین افت مقاومت فشاری ۹۰ روزه در اثر پیش‌بارگذاری در سن ۱ روزه مربوط به طرح شاهد بوده است، به طوری که در ۳۰٪ پیش‌بارگذاری ۱۵/۴ و در ۷۰٪ پیش‌بارگذاری، ۲۱/۹٪ افت مقاومت داشته است.

۷. تمامی نمونه‌های حاوی الیاف، مقاومت فشاری ۹۰ روزه‌ی بالاتری نسبت به طرح شاهد کسب کرده‌اند. بهترین عملکرد مربوط به طرح حاوی ۰/۲۵٪ الیاف پلی‌پروپیلن و ۰/۷۵٪ الیاف فولادی بوده است، به طوری که نسبت به نمونه‌ی شاهد در پیش‌بارگذاری ۷۰ و ۳۰ درصد به ترتیب ۴۵/۶٪ و ۳۶/۵٪ افزایش مقاومت نشان داده است.

۸. بررسی نتایج نشان می‌دهد در پیش‌بارگذاری ۷۰٪ در مقایسه با پیش‌بارگذاری ۳۰٪، میزان افزایش مقاومت فشاری ۹۰ روزه‌ی طرح‌های حاوی الیاف نسبت به شاهد بیشتر بوده است؛ که این موضوع نشان می‌دهد تأثیر حضور الیاف در کاهش اثر مخرب پیش‌بارگذاری در درصدهای بالاتر پیش‌بارگذاری بیشتر بوده است.

۹. نتایج نشان می‌دهد در سنین بالای عمل‌آوری (۲۸ و ۹۰ روزه)، بهترین نتیجه در آزمایش مقاومت خمشی طرح S۱P۰/۵ حاوی ۱٪ الیاف فولادی و ۰/۵٪ الیاف پلی‌پروپیلن به‌دست آمده است.

۱۰. بررسی نتایج مقاومت خمشی پس از عمل‌آوری تا سن ۲۸ روزه نشان می‌دهد بهترین نتایج در مقایسه با طرح شاهد مربوط به نمونه‌های حاوی ۰/۲۵٪ الیاف پلی‌پروپیلن بوده است، به طوری که به‌طور متوسط نسبت به نمونه‌ی شاهد، ۱۸/۶٪ مقاومت خمشی بالاتری نتیجه داده‌اند.

۱۱. حضور ترکیب الیاف‌های فولادی و پلی‌پروپیلن در مخلوط بتن ژئوپلیمری، تأثیر چشمگیری در افزایش میزان جذب انرژی داشته است، به طوری که نتایج نشان می‌دهند در مقایسه با طرح شاهد، میزان انرژی شکست نمونه‌های حاوی الیاف بسیار بالاتر بوده است.

۱۲. در هر سه گروه طرح حاوی ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ الیاف پلی‌پروپیلن، بهترین نتایج را نمونه‌های حاوی درصد بالاتر الیاف فولادی (۱,۰/۷۵) نتیجه داده‌اند. در حالت کلی بهترین نتیجه‌ی مقاومت خمشی در میان نمونه‌های پیش‌بارگذاری شده مربوط به طرح حاوی ۰/۲۵٪ الیاف پلی‌پروپیلن و ۱٪ الیاف فولادی بوده است.

پانوشت

1. Davidvoits

منابع (References)

1. Assi, L.N., Eddie Deaver, E. and Ziehl, P. "Effect of source and particle size distribution on the mechanical and microstructural properties of flyAsh-Based geopolymer concrete", *Construction and Building Materials*, **167**, pp. 372-380 (2018).
2. Barrera, G.M., Campos, C.M., Lopez, SH. "Concrete reinforced with irradiated nylon fibers", *Journal of Materials Research*, **21**(2), pp. 484-491 (2006).
3. Brown, R., Shukla, A. and Natarajan, K.R. "Fiber reinforcement of concrete structures", University of Rhode Island, URTIC PROJECT NO. 536101 (2002).
4. Fiber Reinforced Concrete, PCA Publication, 47 (1991).
5. Naaman, A.E., Wongtanakitcharoen, T. and Hauser, G. "Influence of different fibers on plastic shrinkage cracking of concrete", *ACI Materials Journal*, **102**(1), pp. 49-58 (2005).
6. Choi, J., Zi, G., Hino, S. and et al. "Influence of fiber reinforcement on strength and toughness of all-lightweight concrete", *Construction and Building Materials*, **69**, pp. 381- 389 (2014).
7. Ekinci, E., Turkmen, I. and Kantarci, F. "The improvement of mechanical, physical and durability characteristics of volcanic tuff based geopolymer concrete by using nano silica, micro silica and Styrene-Butadiene Latex additives at different ratios", *Construction and Building Materials*, **201**, pp. 257-267 (2019).
8. Karimi, M. and Gholinejad, A. "Investigation of the properties of geopolymeric mortar based on blast-furnace slag", University of Semnan (In Persian) (2018).
9. Bagheri, A. and Nazari, A. "Compressive strength of high strength class C flyash-based geopolymers with reactive granulated blast furnace slagaggregates designed by Taguchi method", *Materials & Design*, **54**, pp. 483-490 (2014).
10. Sarker, P.K., Kelly, S. and Yao, Z. "Effect of fire exposure on cracking, spalling and residual strength of fly ash geopolymer concrete", *Materials & Design*, **63**, pp. 584-592 (2014).
11. Lee, W.K.W. and van Deventer J.S.J. "The effects of inorganic salt contamination on the strength and durability of geopolymers", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **211**(2-3), pp. 115-126 (2002).
12. Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, D.M.J. and et al. "On the development of fly ash-based geopolymer concrete", *ACI Materials Journal*, **101**(6), pp. 467-472 (2004).
13. Erfanimanesh, A. and Sharbatdar, M. "Mechanical and microstructural characteristics of geopolymer paste, mortar, and concrete containing local zeolite and slag activated by sodium carbonate", *Journal of Building Engineering*, **32**, 101781, pp.1-16 (2020).
14. McLellan, B.C., Williams, R.P., Lay, J. and et al. "Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary Portland cement", *Journal of Cleaner Production*, **19**(9-10), pp. 1080-1090 (2011).
15. Malhotra, V.M. "Reducing CO2 emissions", *ACI Concrete International*, **28**, pp. 42-45 (2006).
16. McCaffrey, R. "Climate change and the cement industry", *Global Cement and Lime Magazine, Environmental Special*, **8**, pp. 15-19 (2002).
17. Chen, C., Habert, G., Bouzidi, Y. and et al. "Environmental impact of cement production: detail of the different processes and cement plant variability evaluation", *Journal of Cleaner Production*, **18**(5), pp. 478-485 (2010).
18. Li, C., Gong, X.Z., Cui, S.P. and et al. "CO2 emissions due to cement manufacture", *Materials Science Forum*, **685**, pp. 181-187 (2011).
19. Kaminetzy, D.V. and Stivaros, P.C. "Early-age concrete: Construction loads, behavior, and failures", *Concrete International*, **16**(1), pp. 58-63 (1994).
20. Santiago, S.D. and Hilsdorf, H.K. "Fracture mechanisms of concrete under compressive loads", *Cement and Concrete Research*, **3**(4), pp. 363-388 (1973).
21. Kenneth, R.L. and Floyd, O.S. "Autogenous healing of cement paste", *ACI Journal Proceedings*, **52**(6), pp. 52-63 (1956).

22. Whitlam, E. "Autogeneous healing of concrete in compression', *The Structural Engineer*, **32**, pp. 235-243 (1954).

23. Kan, L.L., Shi, H.S., Sakulic, A.R. and et al."Self-healing characterization of engineered cementitious composite materials", *ACI Materials Journal*, **107**(6), pp. 617-624 (2010).

24. Sahmaran, M., Keskin, S., Ozerkan, G. and et al. "Self-healing of Mechanically-Loaded self-consolidating concrete with high volumes of fly ash", *Cement and Concrete Composites*, **30**(10), pp. 872-879 (2008).

25. Granger, S.A., Loukili, M., Pijaudier-Cabot, G. and et al. "Experimental characterization of self-healing of cracks in an ultra high performance cementitious materials: Mechanical tests and acoustic emission analysis", *Cement and Concrete Research*, **37**, pp. 519-527 (2007).

26. Madandust, R., Ranjbar, M. and Gholampur, M. "Compressive strength of concrete after initial loading with different treatment conditions", 3rd International Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Planning, Kuala Lumpur - Malaysia, University of Science and Technolog (In Persian) (2011).

27. Siddique, R. and Kaur, D. "Properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag (GGBFS) at elevated temperatures", *Journal of Advanced Research*, **3**(1), pp. 45-51 (2012).

28. Reza Zadeh, J. and Kohani, R. "Investigation of the mechanical properties and coupling strength of geopolymeric mortars based on slag containing short metal fibers to the substrate concrete", Jahad Daneshgahi High Tech Institute, Rasht (In Persian) (2021).

29. Bondar, D., Lynsdale, C.J., Milestone, N.B. and et al. "Effect of adding mineral additives to alkali-activated natural pozzolan paste", *Construction and Building Materials*, **25**(6), pp. 2906-2910 (2011).

30. Davidovits, J. "Geopolymer chemistry and properties", *In Proceedings of the 1st International Conference on Geopolymer*, **88**, pp. 25-48 (1988).

31. Palomo, A., Blanco-Varela, M.T., Granizo, M.L. and et al. "Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin", *Cement and Concrete Research*, **29**(7), pp. 997-1004 (1999).

32. Ghadaki, V. and Sharbatdar, M. "Experimental evaluation of the effects of ingredients ratio, combination of slag and zeolite as Precursor and Emboss fiber on the strength characteristics of geopolymer mortar", *Sharif Journal of Civil Engineering*, **37.2**(2-2), pp. 73-84 (In Persian) (2021).

33. Brown, R., Shukla, A. and Natarajan, K.R. "Fiber Reinforcement of Concrete Structures", University of Rhode Island, URTIC PROJECT, No. 536101 (2002).

34. Van Jaarsveld, J.G.S., Van Deventer, J.S.J. and Lukey, G.C. "The effect of composition and micro silica and Styrene-Butadiene Latex additives at different ratios", *Construction and Building Materials*, **201**, pp. 257-267 (2019).