



بررسی آزمایشگاهی و تحلیل آماری مقاومت‌های طراحی سازه‌های و ضربه‌ای ملات‌های ژئوپلیمری الیافی

محمدحسین دالوند^۱، محمدکاظم شربت‌دار^{۱*}، احمد دالوند^۲

۱- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
۲- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۰۵
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۳/۲۱
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۲۸
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۵/۲۸

کلمات کلیدی:

بتن ژئوپلیمری
خصوصیات مکانیکی
مقاومت ضربه‌ای
خصوصیات آماری
میکروالیاف فولادی

خلاصه: با توجه به میزان مصرف بالای ملات و بتن به ویژه در سازه‌ها و نیاز روز افزون به تولید سیمان، توجه به اثرات مخرب زیست محیطی این ماده ضروری به نظر می‌رسد. یکی از راه کارها، تولید مصالح سازگار با محیط زیست و با کاهش اثرات مخرب مرتبط با تولید سیمان پرتلند، همچون ملات و بتن‌های ژئوپلیمری سرباره‌ای می‌باشد. هدف این مقاله بررسی آزمایشگاهی با رویکرد آماری خصوصیات مکانیکی و مقاومتی ملات‌های سیمانی و ژئوپلیمری الیافی است چهار طرح اختلاط شامل سه طرح اختلاط ژئوپلیمری به ترتیب با ۰/۵ و ۱ درصد میکروالیاف فولادی و یک طرح اختلاط معمولی به منظور مقایسه با ملات ژئوپلیمری در نظر گرفته شد. مجموعاً ۳۲۰ نمونه ساخته شد که از هر طرح اختلاط ۲۰ نمونه مکعبی، ۲۰ نمونه استوانه‌ای، ۲۰ نمونه تیر کوچک، ۲۰ نمونه دیسک کوچک ساخته شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد با افزایش درصد میکروالیاف فولادی تا ۱ درصد در نمونه‌های ژئوپلیمری، مقاومت فشاری، کششی و مدول گسیختگی ترتیب تا ۶۳/۳۹، ۶۰/۸۶ و ۶۳/۴۰٪ افزایش یافت همچنین تعداد ضربات مقاومت انهدام حدود ۲۵ برابر بیشتر شد. در تمامی آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی، خمشی و ضربه‌ای نمونه‌های ژئوپلیمری بدون الیاف، مقاومت بهتری نسبت به نمونه‌های ملات معمولی سیمانی داشتند. در تمامی نمونه‌های ژئوپلیمری با افزایش درصد الیاف، انحراف از معیار ضریب تغییرات و در نتیجه پراکندگی داده‌ها افزایش یافت.

۱- مقدمه

آلومینیم و فولاد بیش‌ترین انرژی مصرفی، یعنی معادل ۵ درصد کل انرژی مصرف شده در جهان است [۱]. از مهم‌ترین مشکلات فنی در فرآیند تولید سیمان پرتلند، نیاز به تقریباً یک و نیم تن مواد اولیه جهت تولید یک تن سیمان پرتلند است که در این حالت ۰/۹۴ تن دی اکسید کربن نیز وارد محیط زیست می‌گردد [۲ و ۳]. جایگزینی بخشی از سیمان مصرفی در بتن با مواد پوزولانی مانند متاکائولین و خاکستر بادی، یا مواد شبه سیمانی مانند سرباره‌ی کوره بلند از جمله راه کارهای تولید بتنی سازگار با محیط زیست، کاهش مصرف سیمان و اثرات منفی مرتبط با تولید آن است. مواد ژئوپلیمری از طریق فعال سازی مواد آلومینا سیلیکاتی با محلول‌های سیلیکات قلیایی و هیدروکسید قلیایی و عمل آوری در گستره دمایی محیط تا

بتن به دلیل فراوانی و در دسترس بودن مواد و مصالح آن و امتیازات فنی ارزنده‌ای چون شکل پذیری، مقاوم در مقابل آتش سوزی، پایداری در مقابل عوامل جوی، تولید راحت و در نهایت ارزان بودن آن باعث شده یکی از بهترین و مناسب‌ترین فرآورده‌ها در صنعت ساختمان به حساب آید. با توجه به میزان مصرف بالای بتن و نیاز روز افزون به تولید سیمان، توجه به اثرات مخرب زیست محیطی این ماده، ضروری به نظر می‌رسد. تولید سیمان مستلزم مصرف منابع طبیعی و رها سازی حجم قابل توجهی دی اکسید کربن به محیط است و انرژی مصرف شده برای تولید هر تن سیمان پس از صنعت

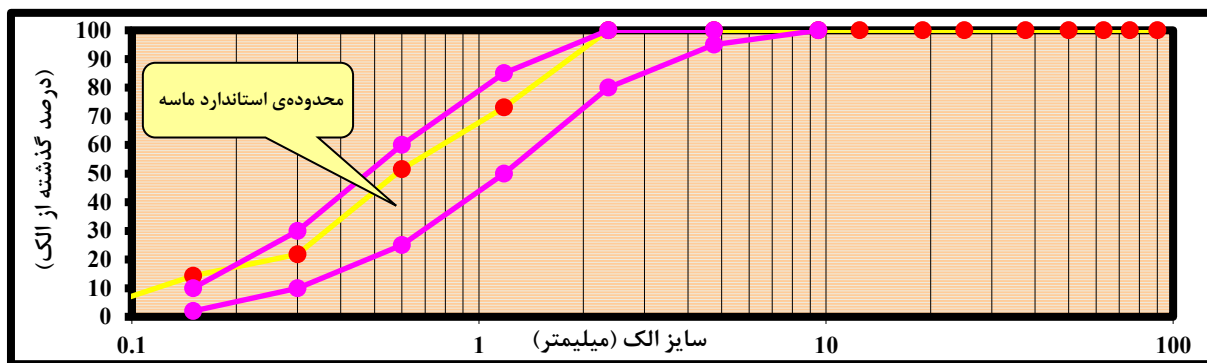
* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: msharbatdar@semnan.ac.ir

عملکردی کامپوزیت‌های ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی را بررسی کرد. در این پژوهش از درصدهای مختلف میکروالیاف شیشه‌ای با نسبت‌های ۰٪، ۱٪، ۲٪ و ۳٪ استفاده شد. همچنین پارامترهایی مانند مقاومت و مدول خمشی و مقاومت ضربه‌ای مورد بررسی قرار گرفت و منحنی تنش کرنش نمونه‌های با درصدهای مختلف الیاف ترسیم گردید. نتایج نشان داد که افزودن یک نسبت مناسب از میکروالیاف شیشه‌ای خصوصیات عملکردی کامپوزیت‌های ژئوپلیمری را بهبود می‌دهد همچنین مقاومت و مدول خمشی و مقاومت ضربه‌ای در نمونه‌های با ۲٪ الیاف بیشترین مقدار را دارند و این مقدار استفاده بهینه می‌باشد [۱۰]. بتن ژئوپلیمری نیز مانند بتن معمولی علی‌رغم تمام محاسن ذکر شده دارای معایبی نیز می‌باشد. پایین بودن مقاومت کششیر (مانند بتن معمولی)، انقباض بالا، سخت بودن ساخت و بتن ریزی درجا از نقاط ضعف این بتن محسوب می‌شود [۱۱-۱۳] ولی به دلیل ویژگی‌های مثبت مانند مصرف انرژی کمتر برای تولید، دوام بالا در برابر محیط‌های مهاجم، پایین بودن خزش، کاهش تخریب محیط زیست، کاهش مصرف انرژی و منابع طبیعی، می‌توان با راهکارهای مناسب نقاط ضعف این بتن را کاهش داد و از این بتن به عنوان جایگزینی برای بتن معمولی استفاده کرد [۱۴-۱۶]. در این مقاله هدف بررسی آزمایشگاهی با یک رویکرد آماري خصوصیات مکانیکی همچون مقاومت فشاری، کششی، خمشی و ضربه‌ای بتن ژئوپلیمری می‌باشد.

۲- ضرورت تحقیق

در کشور ایران کارخانه‌هایی نظیر فولاد مبارکه اصفهان، ذوب آهن اصفهان و فولاد خوزستان سالیانه صدها هزار تن سرباره بدون استفاده در اطراف کارخانه‌جات دپو می‌کنند که یک تهدید زیست محیطی برای عموم مردم است در حالی که استفاده از این مواد ارزش افزوده بالا و قابلیت‌های کاربردی فراوانی را به وجود خواهد آورد. استفاده نامناسب از سیمان‌های موجود در موارد کاربرد خاص تاکنون خسارات هنگفتی برای بشر به دنبال داشته است و به همین دلیل تلاش و کوشش برای دستیابی به سیمان‌هایی با خواص ویژه بسیار مورد توجه و ضروری می‌باشد. از طرفی تولید چسباننده معدنی پلیمری به دلیل خواص مکانیکی نسبتاً خوب و دوام طولانی مدت در مقایسه با سیمان پرتلند و نیز با داشتن خواصی مانند مقاومت مکانیکی اولیه خوب، گیرش مناسب و قابل کنترل، مقاومت در برابر محلول‌های اسیدی و

حداکثر ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد، ساخته می‌شود. تولید ژئوپلیمرها به عنوان مواد چسبنده در بتن منجر به تولید بتن ژئوپلیمری شده که به عنوان یک راهکار علمی و عملی می‌تواند جایگزینی مناسب برای بتن با سیمان‌های پرتلند معمولی باشد که علاوه بر دارا بودن محاسن بتن ساخته شده با سیمان پرتلند، شامل مزیت‌های مضاعفی مانند انرژی تولید پایین، دوام بالا در برابر محیط‌های مهاجم، پایین بودن خزش و بعضاً کاهش انقباض نسبت به بتن‌های معمولی است که خود منجر به کاهش تخریب محیط زیست، کاهش مصرف انرژی و منابع طبیعی می‌شود و همگی در راستای توسعه پایدار و حفظ شرایط مطلوب طبیعی برای نسل‌های آینده است [۴-۶]. ژنگ و همکاران در سال ۲۰۰۹ از الیاف پلی پروپیلن در سه درصد ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ در بتن ژئوپلیمری استفاده نمودند و نشان دادند که افزودن الیاف تا ۰/۵ درصد باعث افزایش مقاومت فشاری و بیش از آن مقاومت فشاری را کاهش می‌دهد. همچنین آن‌ها گزارش کردند که الیاف در داخل بتن به سه شکل عمل می‌کنند: ۱- از رشد ترک‌ها جلوگیری می‌کنند. ۲- با پراکنده شدن در داخل بتن باعث اصلاح ساختار بتن می‌شوند. ۳- الیاف باعث تغییر مسیر ترک‌ها می‌شوند [۷]. در سال ۲۰۱۳ آیدین و بارادان تأثیر طول و حجم الیاف فولادی را بر ویژگی‌های بتن ژئوپلیمری بررسی کردند. در این تحقیق از محلول هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم برای فعال سازی ترکیب سرباره و سیلیکافوم به عنوان منبع آلومینوسیلیکاتی استفاده شد. آن‌ها از الیاف‌های فولادی در طول ۶ و ۱۳ میلی‌متری و به میزان ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲٪ استفاده کردند. نتایج چنین نشان داد که افزودن الیاف باعث افزایش مقاومت فشاری می‌شود [۸]. ژیانو چن و همکاران در سال ۲۰۱۶ تأثیر رزین پلی اکریلیک را بر خصوصیات مکانیکی ژئوپلیمرهای با سرباره کوره بلند را بررسی کردند. نمونه‌ها از ترکیب فعال کننده‌های قلیایی و سرباره کوره بلند با نسبت‌های ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱، ۳، ۵ درصد رزین ساخته شده بودند. در این پژوهش پارامترهایی نظیر مقاومت فشاری، خمشی و طاقت خمشی مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که مقاومت فشاری و خمشی در نمونه‌های با ۱٪ الیاف دارای بیشترین مقدار بودند همچنین نسبت مقاومت خمشی به فشاری و طاقت خمشی در عمل آوری ۲۸ روزه به ترتیب ۳۶/۳٪ و ۱۰۴/۶٪ در مقایسه با نمونه کنترل افزایش داشت [۹]. صامر العمیری در سال ۲۰۱۷ تأثیر افزودن میکروالیاف‌های شیشه‌ای را بر خصوصیات



شکل ۱. منحنی دانه بندی ماسه مورد استفاده
Fig. 1. Grading curve of used sand

جدول ۱. نتیجه آنالیز شیمیایی XRF سرباره کوره بلند کارخانه ذوب آهن اصفهان

Table 1. Result of XRF chemical analysis of blast furnace slag of Isfahan Steel Company

Cl	K ₂ O	Na ₂ O	So ₃	MgO	Al ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	ترکیبات
۰/۰۰۶	۰/۶۴	۰/۶۸	۲/۰۸	۸/۶۰	۹/۶۷	۴۱/۳۵	۳۷/۶۰	درصد

در عین حال سادگی فرایند تولید، دارای پتانسیلی قوی برای کاربردهای مختلف می باشند [۱۸ و ۱۷]. در بیشتر کارهای آزمایشگاهی برای انجام تست ویژگی‌های مکانیکی، مانند مقاومت فشاری، کششی و خمشی نمونه‌ها، از سه نمونه استفاده می‌شود [۱۹]. این در حالی است که مطابق با نتایج به دست آمده از پژوهش‌های آماری که روی تاثیر، کاربرد الیاف‌های مختلف بر ویژگی‌های مکانیکی بتن‌های الیافی صورت گرفته است، کاربرد سه عدد نمونه برای هر طرح اختلاط و میانگین گیری از نتایج آن برای برخی از انواع بتن‌ها و به خصوص بتن‌های الیافی کافی نیست. نتایج برخی از پژوهش‌ها نشان می‌دهد که، به منظور حصول نتایج در سطح اطمینان بالاتر از ۹۵ درصد به عنوان نمونه برای برخی از مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی (تا ۲۰ نمونه مقاومت فشاری) از هر طرح اختلاط ساخته و مورد آزمایش قرار گرفته است [۲۰ و ۲۱]. به نظر می‌رسد تولید بتن‌های ژئوپلیمری و اصلاح خواص این بتن‌ها با افزودن الیاف‌های مناسب به منظور به دست آوردن دامنه اعتماد به این نوع بتن‌های جدید از دلایل لازم برای تحقیقات بیشتر می‌باشد.

(۸#) با حداکثر اندازه ۲/۳۶ میلی‌متر قرار دارد. منحنی دانه بندی در شکل ۱ نشان داده شده است. برای ساخت نمونه‌های ملات معمولی از سیمان تیپ II کارخانه سیمان دورود استفاده شد. سرباره مورد استفاده در ملات ژئوپلیمری، سرباره کوره بلند کارخانه ذوب آهن اصفهان (به شکل گرانوله) بود که به صورت آسیاب شده از کارخانه سیمان سپاهان اصفهان تهیه شد. نتیجه آنالیز شیمیایی XRF سرباره مورد استفاده در جدول ۱ ذکر گردیده است. از فعال کننده‌های قلیایی هیدروکسید سدیم با غلظت ۱۲ مولار و سیلیکات سدیم مایع با نسبت ۲/۳ محصول شرکت صنایع سیلیکات ایران استفاده گردید. الیاف مصرف شده در این کار آزمایشگاهی میکروالیاف فولادی است که مشخصات آن در جدول ۲ قابل مشاهده است. در این پژوهش چهار طرح اختلاط شامل سه طرح اختلاط ژئوپلیمری به ترتیب با ۰، ۰/۵ و ۱ درصد الیاف و یک طرح اختلاط ملات سیمانی معمولی بدون الیاف به منظور مقایسه با ملات ژئوپلیمری در نظر گرفته شد. برخلاف بتن معمولی هیچ طرح اختلاط بهینه و استاندارد برای طراحی دقیق و هدفمند بتن ژئوپلیمری تاکنون تدوین نشده است. در انجام این تحقیق طرح اختلاط‌های متنوعی از مراجع مختلف مورد مطالعه قرار گرفت [۲۲-۲۵] و حدود نسبت مورد استفاده از هر ماده برای

۳- مصالح مورد استفاده و طرح اختلاط‌ها

ماسه استفاده شده در این پژوهش در محدوده زیر الک نمرة ۸

جدول ۲. مشخصات میکروالیاف فولادی مورد استفاده
Table 2. Specifications of used micro steel fiber

۳۰۰ میکرون	ضخامت
به طور رندم بین ۳ الی ۳۵ میلی‌متر	طول
UTS > 2400MPa	تحمل فشار بار
E (%) < ۲	درصد ازدید طول (کرنش)

جدول ۳. مشخصات طرح‌های اختلاط (kg/m³)
Table 3. Mix proportions (kg/m³)

درصد حجمی الیاف (%)	آب	فعال کننده قلیایی		سیمان	سرباره	ماسه	نماد اختصاری	طرح اختلاط
		محلول سیلیکات سدیم	محلول سدیم هیدروکسید (۱۲ مولار)					
۰	۱۱۵/۱۰	۱۷۲/۶۰	۸۶/۳۰	۰	۵۷۵/۳۴	۱۱۵۰/۶۸	A1	GPC-S0
۰/۵	۱۱۵/۱۰	۱۷۲/۶۰	۸۶/۳۰	۰	۵۷۵/۳۴	۱۱۵۰/۶۸	A2	GPC-S0.5
۱	۱۱۵/۱۰	۱۷۲/۶۰	۸۶/۳۰	۰	۵۷۵/۳۴	۱۱۵۰/۶۸	A3	GPC-S1
۰	۲۴۹/۷۲	۰	۰	۶۹۹/۶۱	۰	۱۱۵۰/۶۸	B1	OPC

اختلاط مصالح جهت انجام واکنش‌ها مورد بررسی قرار گرفته است [۲۶ و ۲۷]. برای ساخت ملات ژئوپلیمری ابتدا مواد خشک شامل ماسه و سرباره کوره بلند در کاسه میکسر ریخته شد سپس مواد خشک با استفاده از میکسر به مدت ۳ دقیقه ترکیب شدند تا به صورت یکنواخت دربیایند. بعد از اختلاط خشک، محلول هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم مایع و آب به آرامی به مخلوط اضافه گردید و به مدت ۳ دقیقه اختلاط انجام شد تا ملات ژئوپلیمری آماده ریختن در قالب شود. برای ساخت نمونه‌های الیافی همزمان با افزودن آب و فعال کننده‌های قلیایی، میکروالیاف‌های فولادی بر اساس درصد حجمی طرح اختلاط‌ها به مخلوط اضافه گردید و هم زدن مخلوط تا حصول اطمینان از پخش شدن کامل الیاف درون ملات ادامه یافت. عمل آوری حرارتی در ملات ژئوپلیمری به واکنش در حال انجام در خمیر حاصله کمک می‌کند. زمان و دمای عمل آوری نقش بسزایی در مقاومت ملات ژئوپلیمری بازی می‌کند. با توجه به گزارش هاردجیتو و همکاران [۲۸] در مورد خواص بتن ژئوپلیمری مدت عمل آوری

ساخت ملات ژئوپلیمری به دست آمد. با سعی و خطا و ساخت طرح اختلاط‌های مختلف، بهترین طرح اختلاط نسبی به لحاظ مقاومت فشاری طرح و انتخاب گردید. برای مقایسه خصوصیات مکانیکی و مقاومتی ملات ژئوپلیمری بدون الیاف با ملات معمولی ساخته شده با سیمان نیز یک طرح اختلاط نظر گرفته شد. به منظور مقایسه درست، وزن سیمان برابر وزن سرباره به علاوه مقدار مواد جامد استفاده شده در فعال کننده‌های قلیایی (محلول ۱۲ مولار هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم مایع) و مقدار ماسه و آب مورد استفاده در طرح اختلاط‌های ملات ژئوپلیمری و ملات معمولی برابر در نظر گرفته شد. جدول ۳ طرح اختلاط‌ها را نشان می‌دهد.

۴- چگونگی ساخت، قالب گیری و عمل آوری نمونه‌ها

یکی از مراحل اختلاط مصالح، انجام واکنش‌های پلیمریزاسیون است. ترتیب اختلاط مصالح (افزودن مصالح به مخلوط) و مدت زمان اختلاط روی واکنش‌ها تأثیرگذار است. لذا تعیین روش و مدت زمان

جدول ۴. داده‌های مقاومت فشاری
Table 4. Compressive strength data

مقاومت فشاری (MPa)				شماره نمونه
A3	A2	A1	B1	
۹۳/۷	۹۰/۸	۸۴/۵	۴۶/۴	۱
۹۲/۴	۸۵/۸	۸۶/۸	۴۴	۲
۹۲/۹	۸۳	۸۲/۸	۴۸/۴	۳
۸۳/۵	۸۸/۹	۸۶	۵۱/۶	۴
۹۵/۴	۹۶/۳	۸۷/۳	۴۲/۸	۵
۹۳/۶	۹۱/۹	۷۹/۶	۴۸/۴	۶
۹۸/۴	۸۸/۸	۹۰/۵	۵۴/۴	۷
۸۶/۲	۸۱/۵	۸۵/۱	۴۳/۶	۸
۱۰۱/۵	۸۵	۸۶/۷	۳۸	۹
۹۵/۸	۸۶	۹۰/۹	۴۷/۲	۱۰
۹۲/۷	۹۳/۸	۸۹/۱	۴۲/۱	۱۱
۸۹/۴	۸۷	۸۳/۹	۵۰/۸	۱۲
۹۳/۲	۸۷/۵	۸۷/۲	۴۲/۱	۱۳
۸۸/۷	۹۲/۶	۹۴/۴	۴۶/۸	۱۴
۹۵/۱	۸۳/۹	۸۶/۶	۴۶/۶	۱۵
۹۲/۲	۹۳/۱	۸۳/۲	۴۳/۵	۱۶
۸۸/۹	۸۸/۹	۸۹/۴	۴۲	۱۷
۹۱/۴	۹۰/۱	۸۸/۷	۴۹/۷	۱۸
۹۸/۳	۸۸/۶	۸۵/۵	۴۵/۱	۱۹
۸۶/۳	۸۲/۵	۹۰/۲	۴۴/۴	۲۰

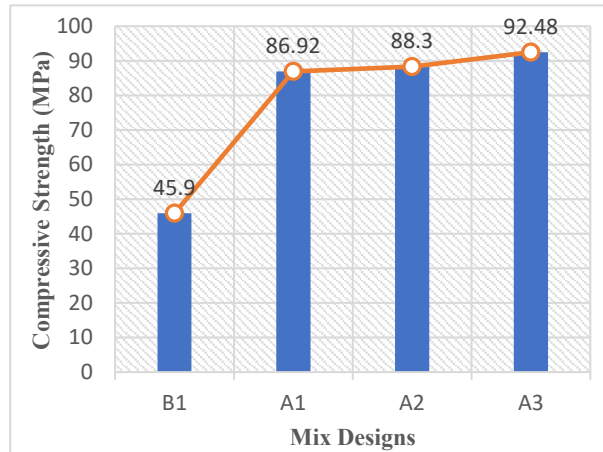
گرفت و پس از ۲۸ روز از زمان ساخت، نمونه‌ها آزمایش شدند.

۵- نتایج و بحث

۵-۱- مقاومت فشاری

آزمایش تعیین مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی بتنی طبق ASTM C109 [۳۰] با استفاده از یک ماشین تست دیجیتال به ظرفیت ۲۰۰۰ kN روی ۸۰ نمونه مکعبی (چهار طرح اختلاط هر کدام ۲۰ نمونه) به ابعاد (۵۰×۵۰×۵۰) میلی‌مترمکعب انجام شد. نتایج آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی در جدول ۴ نشان داده شده است. میانگین مقاومت فشاری ۲۸ روزه طرح اختلاط‌های A3، A2، A1، B1 به ترتیب ۴۵/۹۰، ۸۶/۹۲، ۸۸/۳۰ و ۹۲/۴۸ مگاپاسکال می‌باشد. نمودار مقایسه مقاومت‌های فشاری شکل ۲ نشان می‌دهد با افزایش درصد الیاف، افزایش نسبتاً کمی در مقاومت‌های

لازم نیست بیش از ۲۴ ساعت باشد همچنین افزایش درجه حرارت بیش از ۶۰°C مقاومت فشاری را خیلی زیاد نمی‌کند بنابراین درجه حرارت عمل آوری حدود ۶۰°C پیشنهاد می‌شود. ویارنل و همکاران [۲۹] اثر دما روی فرآیند ژئوپلیمریزاسیون را بررسی کردند و درجه حرارت عمل آوری بهینه را برابر ۶۰°C به دست آوردند. در این کار آزمایشگاهی نمونه‌های ژئوپلیمری بلافاصله بعد از ریختن ملات در قالب و وایبره زدن و صاف کردن سطوح روی قالب‌ها، به وسیله پوشش‌های نایلونی مطابق پوشانده شدند و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۶۰°C مطابق در دستگاه آون قرار داده شدند و پس از خارج کردن قالب‌ها از آون و باز کردن قالب‌ها، نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز در دمای محیط نگهداری شدند و سپس مورد آزمایش قرار گرفتند. در مورد نمونه‌های ساخته شده با ملات معمولی که از سیمان استفاده شده بود با استفاده از گونی خیس به مدت ۷ روز عمل آوری صورت



شکل ۲. نمودار مقایسه مقاومت‌های فشاری

Fig. 2. Comparative diagrams of compressive strengths

جدول ۵. خلاصه محاسبات آماری مقاومت فشاری

Table 5. Summary of statistical calculations of compressive strength

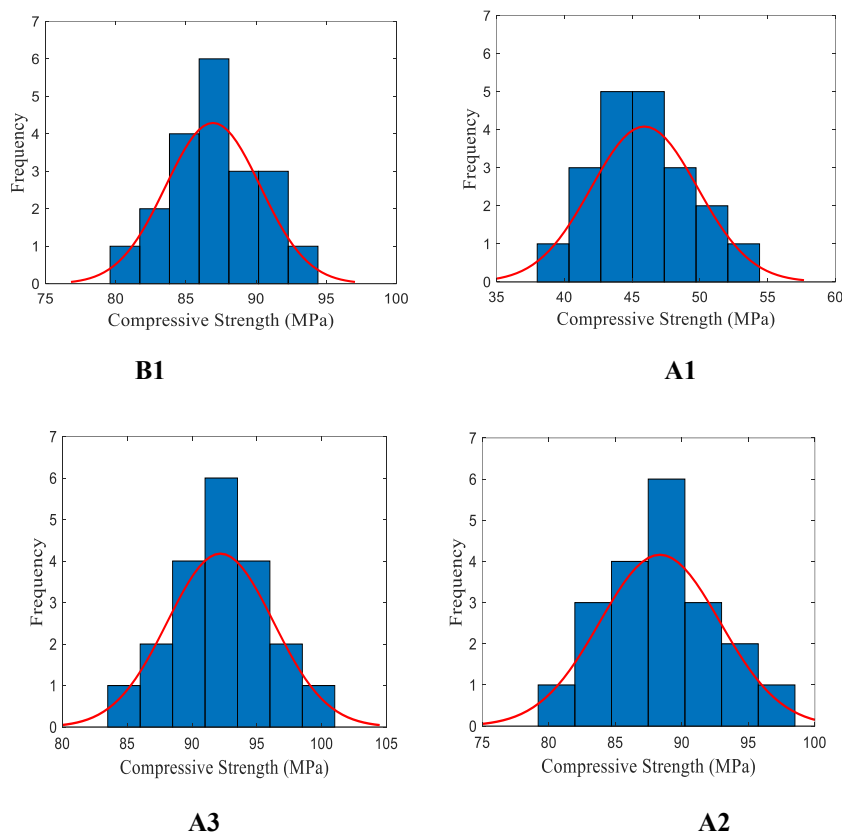
مقاومت فشاری (MPa)				متغیر
A3	A2	A1	B1	
۹۲/۴۸	۸۸/۳۰	۸۶/۹۲	۴۵/۹۰	میانگین (MPa)
۴/۴۵	۴/۰۴	۳/۳۷	۳/۹۲	انحراف از معیار (MPa)
۴/۸۱	۴/۵۸	۳/۸۷	۸/۵۴	ضریب تغییرات (%)

فشاری نمونه‌های ژئوپلیمری حاصل شده است. نمونه‌های ژئوپلیمری سری A3 که دارای ۱٪ میکروالیاف می‌باشند، در بین گروه‌های دیگر دارای میانگین مقاومت فشاری بالاتری می‌باشند. میانگین مقاومت فشاری برای A3 به ترتیب ۶/۳۹ و ۴/۷۳٪ بیشتر از A1 و A2 می‌باشد همچنین میانگین مقاومت فشاری A2، ۱/۵۸٪ بیشتر از A1 می‌باشد همچنین میانگین مقاومت فشاری نمونه‌های ژئوپلیمری بدون الیاف A1، ۸۹/۳۶٪ بیشتر از نمونه‌های ملات معمولی سیمانی B1 می‌باشد. انحراف از معیار برای سه گروه ملات ژئوپلیمری A1، A2 و A3 به ترتیب ۳/۹۲، ۳/۳۷ و ۴/۰۴ می‌باشد. مقدار انحراف از معیار گروه A3 به ترتیب ۳۲/۰۴ و ۱۰/۱۴٪ بیشتر از گروه‌های A1 و A2 می‌باشد. مقدار انحراف از معیار برای گروه B1، ۱۶/۳۲٪ بیشتر از A1 می‌باشد. همچنین ضریب تغییرات برای سه گروه ملات ژئوپلیمری A1 و A2 و A3 به ترتیب ۳/۸۷ و ۴/۵۸ و ۴/۸۱٪ همچنین ملات معمولی B1، ۸/۵۴٪ می‌باشد. مقدار ضریب تغییرات گروه A3 به ترتیب ۲۴/۲۸ و ۵/۰۲٪ بیشتر از گروه‌های A1 و A2 می‌باشد. مقدار ضریب

میانگین (MPa)

انحراف از معیار (MPa)

ضریب تغییرات (%)



شکل ۳. هیستوگرام مربوط به داده‌های مقاومت فشاری
 Fig. 3. Histogram diagram for compressive strength data

خالی، تمرکز و داده پرت را می‌توان به سرعت استنتاج کرد همچنین منحنی توزیع نرمال بر روی هیستوگرام قابل ترسیم است و می‌توان برآوردی از وضعیت توزیع متغیرها به دست آورد به همین دلیل از این نمودار در این پژوهش استفاده گردید. نمودار هیستوگرام شکل ۳ نشان می‌دهد که هر چهار سری ملات تقریباً دارای توزیع یکنواخت می‌باشند و به خوبی بر منحنی توزیع نرمال منطبق می‌باشند.

۵-۲- مقاومت کششی (دو نیم شدن)

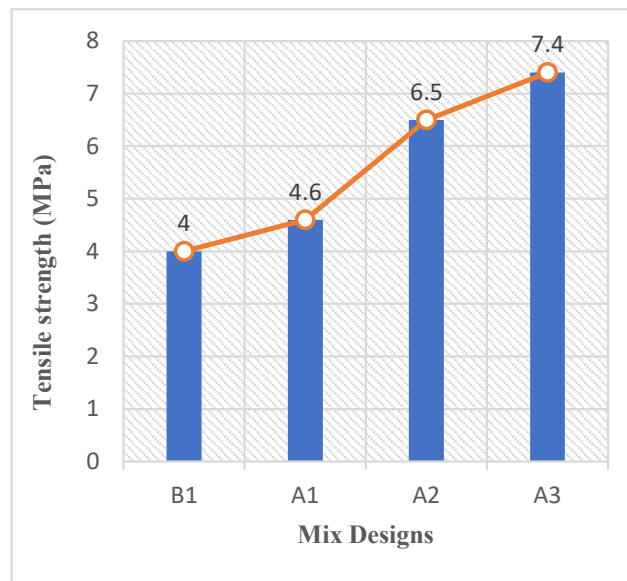
آزمایش تعیین مقاومت کششی به روش دو نیم شدن مطابق ASTM C496 [۳۳] با استفاده از یک ماشین تست دیجیتال به ظرفیت ۲۰۰۰ kN بر روی نمونه‌های استوانه‌ای (۵۰×۱۰۰) میلی‌متر مربع انجام گردید. مطابق با این استاندارد مقاومت کششی دو نیم شدن (T) از رابطه (۱) محاسبه می‌گردد:

$$T = \frac{2P}{\pi Ld} \quad (1)$$

تغییرات برای گروه B1، ۶۷/۱۲۰٪ بیشتر از A1 می‌باشد. با افزایش درصد الیاف در نمونه‌های ژئوپلیمری، انحراف از معیار، ضریب تغییرات و پراکندگی داده‌ها افزایش یافت. همچنین انحراف از معیار و ضریب تغییرات ملات ژئوپلیمری از ملات معمولی کمتر می‌باشد. خلاصه محاسبات آماری مقاومت فشاری در جدول ۵ قابل مشاهده است. مقادیر پایین ضریب تغییرات گواه خوب بودن کیفیت بتن و کنترل کیفیت خوب نمونه‌ها می‌باشد. مقادیر ضریب تغییرات به دست آمده برای چهار سری نمونه از حداکثر مقدار ۱۵٪ که به وسیله اسوامی و استاوریدوس [۳۱] پیشنهاد شده کمتر می‌باشد. علاوه بر آن دی [۳۲] پیشنهاد می‌دهد که یک ضریب تغییرات کوچک‌تر از ۱۰٪ نشان دهنده یک کنترل کیفیت مناسب می‌باشد. نمودار هیستوگرام در واقع یک نگاه کلی به فراوانی داده‌ها به صورت گروه بندی شده است. تغییر پذیری داده‌ها به کمک گستردگی افقی بلوک‌ها نشان داده می‌شود و داده‌های رایج در بلوک‌هایی که مساحت بزرگتری دارند دیده می‌شود. با نگاه به نمودار هیستوگرام ۴ فاکتور نقطه اوج، فاصله

جدول ۶. داده‌های مقاومت کششی
Table 6. Tensile strength data

مقاومت کششی (MPa)				متغیر
A3	A2	A1	B1	
۷/۴۰	۶/۵۰	۴/۶۰	۴/۰۰	میانگین (MPa)
۰/۷۳	۰/۵۶	۰/۳۹	۰/۳۳	انحراف از معیار (MPa)
۹/۹۸	۸/۶۹	۸/۴۴	۸/۵۲	ضریب تغییرات (%)



شکل ۴. نمودار مقایسه مقاومت‌های کششی
Fig. 4. Comparative diagrams of Tensile strengths

دلیل کاهش ایجاد ریزترک‌های حاصله از بارگذاری خارجی افزایش می‌یابد همچنین نمونه‌های ژئوپلیمری بدون الیاف A1، ۱۵٪ عملکرد مقاومتی بهتری نسبت به نمونه‌های ملات معمولی سیمانی B1 داشتند. در آمار انحراف از معیار یکی از شاخص‌های پراکندگی است که نشان می‌دهد به طور میانگین داده‌ها چه مقدار از مقدار متوسط فاصله دارند اگر انحراف از معیار مجموعه‌ای از داده‌ها نزدیک به صفر باشد، نشانه آن است که داده‌ها نزدیک به میانگین هستند و پراکندگی اندکی دارند؛ در حالی که انحراف از معیار بزرگ بیانگر پراکندگی قابل توجه داده‌ها می‌باشد. انحراف از معیار برای سه گروه ملات ژئوپلیمری A1 و A2 و A3 به ترتیب ۰/۳۹، ۰/۵۶ و ۰/۷۳ همچنین برای ملات معمولی B1، ۰/۳۳ می‌باشد. واحد انحراف از معیار با واحد داده مورد سنجش یکسان است. مقدار انحراف از معیار گروه A3 به ترتیب

که در رابطه فوق P، حداکثر بار نشان داده شده توسط دستگاه تست برحسب نیوتن می‌باشد. L و d به ترتیب طول و قطر نمونه استوانه‌ای برحسب میلی‌متر می‌باشند. نتایج آزمایش مقاومت کششی بر روی نمونه‌ها در جدول ۶ نشان داده شده است. میانگین مقاومت کششی ۲۸ روزه طرح اختلاط‌های B1 تا A3 به ترتیب ۴، ۴/۶، ۶/۵ و ۷/۴ مگاپاسکال به دست آمد. نمودار مقایسه مقاومت‌های کششی در شکل ۴ قابل ملاحظه است. نمونه‌های ژئوپلیمری سری A3 با ۱٪ میکرو الیاف، در بین گروه‌های دیگر میانگین مقاومت کششی بالاتری داشتند و رفتار نرم‌تری از خود بروز دادند. میانگین مقاومت کششی برای A3 به ترتیب ۶۰/۸۶ و ۱۳/۸۴٪ بیشتر از A1 و A2، همچنین میانگین مقاومت کششی A2، ۴۱/۳۰٪ بیشتر از A1 به دست آمد. به عبارتی با افزایش درصد الیاف مقاومت کششی ملات ژئوپلیمری به

جدول ۸. داده‌های مدول گسیختگی
Table 8. Modulus of rupture data

مدول گسیختگی (MPa)				شماره
A3	A2	A1	B1	نمونه
۸/۴	۷/۴	۴/۹	۴/۱	۱
۷/۶	۶/۷	۴/۵	۴/۳	۲
۸/۷	۶/۶	۵/۱	۴/۶	۳
۷/۲	۷/۴	۴/۹	۴/۶	۴
۸/۱	۷/۷	۵/۶	۴/۳	۵
۸/۰	۷/۶	۴/۸	۴/۷	۶
۹/۵	۶/۲	۵/۰	۴/۵	۷
۸/۹	۷/۰	۵/۳	۵/۲	۸
۶/۸	۷/۴	۴/۹	۵/۰	۹
۸/۱	۷/۲	۴/۷	۵/۳	۱۰
۷/۸	۸/۰	۴/۷	۴/۶	۱۱
۷/۴	۷/۹	۵/۲	۴/۵	۱۲
۸/۴	۸/۵	۵/۳	۵/۰	۱۳
۸/۳	۷/۰	۴/۹	۴/۱	۱۴
۸/۹	۶/۷	۴/۸	۳/۸	۱۵
۹/۲	۶/۵	۴/۶	۴/۸	۱۶
۸/۲	۷/۱	۵/۴	۴/۷	۱۷
۷/۹	۷/۴	۵/۰	۵/۰	۱۸
۸/۵	۷/۳	۵/۲	۴/۳	۱۹
۷/۵	۷/۰	۴/۲	۴/۸	۲۰

جدول ۷. خلاصه محاسبات آماری مقاومت کششی
Table 7. Summary of statistical calculations of Tensile strength

مقاومت کششی (MPa)				شماره
A3	A2	A1	B1	نمونه
۶/۴	۵/۵	۴/۴	۳/۷	۱
۷/۲	۷/۰	۴/۹	۳/۶	۲
۹/۰	۶/۱	۴/۱	۳/۸	۳
۶/۶	۶/۹	۴/۶	۴/۷	۴
۶/۷	۶/۹	۴/۲	۴/۳	۵
۸/۳	۶/۶	۳/۸	۳/۸	۶
۸/۰	۶/۵	۴/۳	۴/۲	۷
۷/۲	۵/۵	۴/۶	۳/۹	۸
۶/۷	۶/۹	۴/۶	۳/۶	۹
۷/۴	۶/۶	۴/۸	۴/۳	۱۰
۷/۴	۶/۰	۵/۱	۴/۵	۱۱
۶/۱	۷/۶	۴/۹	۳/۷	۱۲
۷/۱	۷/۳	۴/۵	۳/۷	۱۳
۸/۴	۷/۱	۵/۵	۳/۶	۱۴
۷/۱	۵/۹	۴/۹	۴/۲	۱۵
۸/۰	۶/۴	۴/۶	۳/۸	۱۶
۷/۵	۶/۲	۴/۵	۴/۳	۱۷
۷/۸	۶/۱	۴/۷	۴/۲	۱۸
۶/۸	۶/۶	۴/۶	۳/۹	۱۹
۷/۵	۶/۶	۵/۲	۳/۷	۲۰

محور عمودی تعداد نمونه‌ها در آن محدوده مقاومت است.

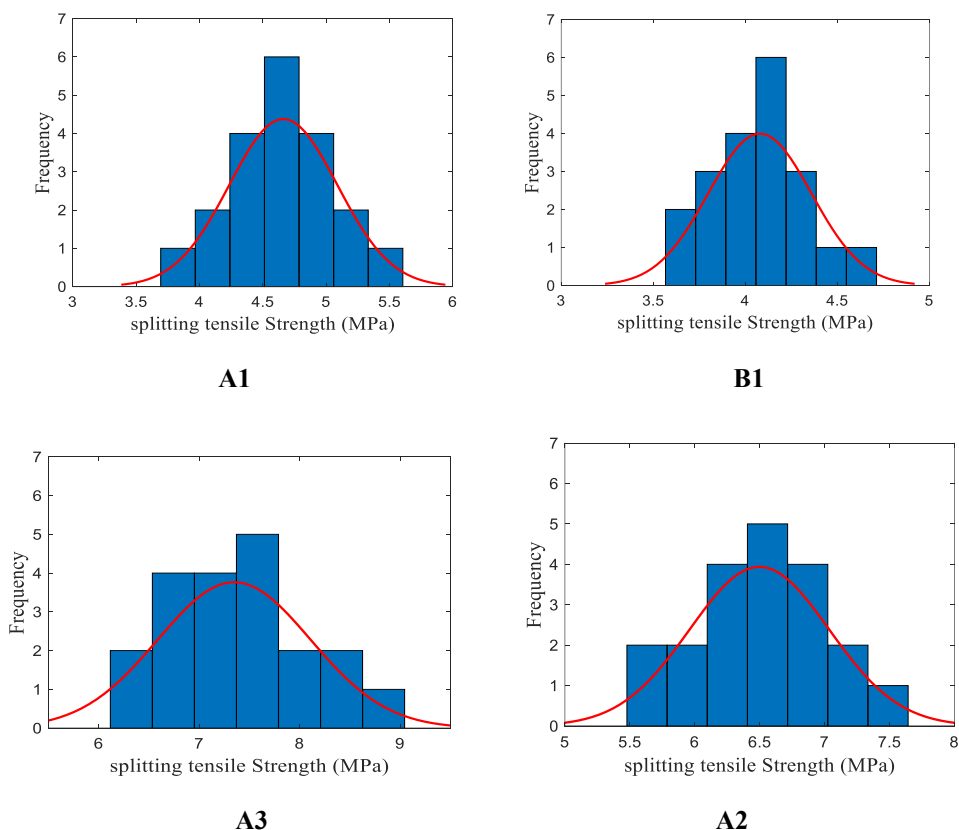
۵-۳- مدول گسیختگی

مدول گسیختگی از طریق آزمایش خمش سه نقطه‌ای روی تیر به ابعاد (۴۰×۴۰×۱۶۰) میلی‌مترمکعب انجام گردید. مطابق ASTM C78 [۳۴] مدول گسیختگی نمونه‌های بتنی با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌گردد:

$$R = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (2)$$

نتایج آزمایش مدول گسیختگی بر روی نمونه‌ها در جدول ۸ نشان داده شده است. میانگین مدول گسیختگی ۲۸ روزه طرح اختلاط‌های

۸۷/۱۷ و ۳۰/۳۵٪ بیشتر از گروه‌های A1 و A2 می‌باشد. مقدار انحراف از معیار برای گروه B1، ۱۸/۱۸٪ کمتر از A1 می‌باشد. ضریب تغییرات برای سه گروه ملات ژئوپلیمری A1 و A2 و A3 به ترتیب ۸/۴۴ و ۸/۶۹ و ۹/۹۸٪ همچنین برای ملات معمولی B1، ۸/۵۲٪ می‌باشد. خلاصه محاسبات آماری مقاومت کششی در جدول ۷ قابل مشاهده است. نمونه‌های ژئوپلیمری با درصد الیاف بیشتر، انحراف از معیار و ضریب تغییرات بالاتر و به دنبال آن داده‌های پراکنده‌تری داشتند. با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش مقاومت کششی بر روی ۸۰ نمونه استوانه‌ای مربوط به چهار طرح اختلاط، نمودار هیستوگرام شکل ۵ نشان می‌دهد که هر چهار سری ملات تقریباً دارای توزیع یکنواختی می‌باشند و به خوبی بر منحنی توزیع نرمال منطبق می‌باشند. در نمودار هیستوگرام محور افقی مقاومت کششی و



شکل ۵. هیستوگرام مربوط به داده‌های مقاومت کششی
Fig. 5. Histogram diagram for Tensile strength data

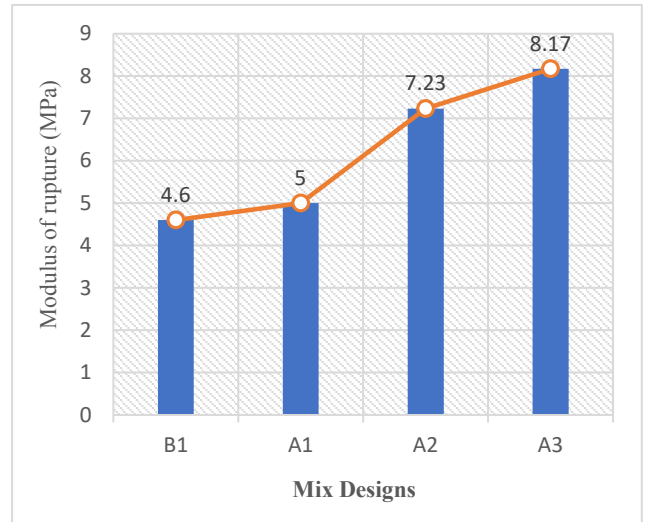
معمولی B1، ۰/۳۸ می‌باشد. ضریب تغییرات، میزان پراکندگی به ازای یک واحد از میانگین را بیان می‌کند. این مقدار بی‌بعد است به همین دلیل مناسب برای مقایسه داده‌های آماری است که واحدهای مختلفی دارند. ضریب تغییرات برای سه گروه ملات ژئوپلیمری A1 و A2 و A3 به ترتیب ۶/۷۰ و ۷/۶۸ و ۸/۳۴٪ همچنین برای ملات معمولی B1، ۸/۴۱ می‌باشد. مقدار ضریب تغییرات گروه A3 به ترتیب ۲۴/۴۷ و ۸/۵۹٪ بیشتر از گروه‌های A1 و A2 می‌باشد. مقدار ضریب تغییرات برای گروه B1، ۲۵/۵۲٪ بیشتر از A1 می‌باشد. خلاصه محاسبات آماری مدول گسیختگی در جدول ۹ قابل مشاهده است. با افزایش درصد الیاف در نمونه‌های ژئوپلیمری، انحراف از معیار، ضریب تغییرات و مدول گسیختگی افزایش یافت که باعث کاهش ضریب اطمینان نمونه تست شده می‌شود. همچنین ضریب تغییرات ملات ژئوپلیمری از ملات معمولی کمتر می‌باشد. با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش مدول گسیختگی بر روی ۸۰ نمونه تیر کوچک منشوری مربوط به چهار طرح اختلاط، نمودار هیستوگرام شکل ۷

B1 تا A3 به ترتیب ۶/۴، ۵، ۷/۲۳ و ۸/۱۷ مگاپاسکال می‌باشد. نمودار مقایسه مدول‌های گسیختگی در شکل ۶ قابل ملاحظه است. نمونه‌های ژئوپلیمری سری A3 که دارای ۱٪ میکروالیاف می‌باشند، در بین گروه‌های دیگر دارای میانگین مدول گسیختگی بالاتری می‌باشند. میانگین مدول گسیختگی برای A3 به ترتیب ۶۳/۴۰ و ۱۳/۰۱٪ بیشتر از A1 و A2 می‌باشد همچنین میانگین مدول گسیختگی A2، ۴۴/۶۰٪ بیشتر از A1 می‌باشد به عبارتی با افزایش درصد الیاف، مدول گسیختگی ملات ژئوپلیمری به دلیل درگیر شدن میکروالیاف فولادی و جلوگیری از گسترش ترک و انسجام بهتر نمونه‌ها افزایش یافت. میانگین مدول گسیختگی نمونه‌های ژئوپلیمری بدون الیاف A1، ۸/۶۹٪ بیشتر از نمونه‌های ملات معمولی سیمانی B1 می‌باشد که نشان می‌دهد برخلاف مقاومت فشاری در پارامتر مدول گسیختگی ملات ژئوپلیمری بدون الیاف نسبت به ملات سیمانی معمولی مزیت آنچنانی ندارد. انحراف از معیار برای سه گروه ملات ژئوپلیمری A1 و A2 و A3 به ترتیب ۰/۳۳، ۰/۵۵ و ۰/۶۸٪ همچنین برای ملات

(۱۵۰×۳۰۰) میلی‌متر ساخته شد و هر نمونه استوانه‌ای به وسیله تیغه‌های الماس به صورت چهار دیسک به طول ۶۴ میلی‌متر تقسیم گردید. دیسک‌های بریده شده از نمونه استوانه‌ای درون دستگاه قرار داده شدند و یک چکش به وزن ۴/۴۵ Kg به طور مکرر از ارتفاع ۴۵۷ میلی‌متر بر روی یک توپ فولادی به قطر ۶۳۵ میلی‌متر رها می‌شد. تعداد ضرباتی که موجب رخ دادن اولین ترک قابل روئیت و انهدام نهایی دیسک می‌شد، ثبت گردید. در هر آزمایش تعداد ضرباتی که موجب رخ دادن اولین ترک قابل روئیت می‌شد، به عنوان مقاومت اولین ترک و تعداد ضرباتی که موجب رخ دادن انهدام نهایی نمونه می‌شد به عنوان مقاومت انهدام در نظر گرفته شد. در جدول ۱۰ داده‌های مربوط به تعداد ضربات لازم برای اولین ترک و تعداد ترک نهایی که نشان دهنده مقاومت اولیه و مقاومت انهدام می‌باشد قابل مشاهده است.

۵-۴-۱- مقاومت اولین ترک

مطابق داده‌های به دست آمده در جدول ۱۰ متوسط مقاومت اولین ترک در گروه A3 بیش از سایر گروه‌ها می‌باشد. با افزایش درصد الیاف مقاومت اولین ترک در نمونه‌های ژئوپلیمری افزایش یافت همچنین متوسط مقاومت اولین ترک در نمونه‌های ژئوپلیمری بدون الیاف بیشتر از ملات معمولی ساخته شده با سیمان به دست آمد. مصرف الیاف فولادی حتی به مقدار کم تأثیر قابل توجهی در افزایش مقاومت ضربه‌ای دارد. متوسط مقاومت اولین ترک در گروه A3، ۷/۲۹ برابر گروه A1 و ۳/۰۶ برابر A2 می‌باشد. همچنین متوسط مقاومت اولین ترک A1، ۲۰/۶۵٪ بیشتر از B1 می‌باشد. نمودار مقایسه مقاومت اولین ترک در شکل ۹ نشان می‌دهد حضور میکروالیاف فولادی در ملات سازه‌ای سبب به تأخیر انداختن تعداد ضربات لازم جهت بروز اولین ترک شده است. این امر بدین علت است که حضور میکروالیاف فولادی باعث مسلح شدن بتن در سه جهت می‌گردد، که به دیسک در جذب انرژی ضربه‌ای کمک می‌کند و نهایتاً پیدایش اولین ترک را به تعویق می‌اندازد و باعث بهبود معنا داری در مقاومت اولین ترک گردیده است. ضریب تغییرات برای سه گروه ملات ژئوپلیمری A1 و A2 و A3 به ترتیب ۲۲/۲۴ و ۲۳/۶۵ و ۳۴/۹۷٪. همچنین برای ملات معمولی B1، ۴۷/۵۵٪ می‌باشد. مشاهده می‌گردد با افزایش درصد الیاف ضریب تغییرات و در نتیجه



شکل ۶. نمودار مقایسه مدول‌های گسیختگی

Fig. 6. Comparative diagrams of modulus of ruptures

جدول ۹. خلاصه محاسبات آماری مدول گسیختگی

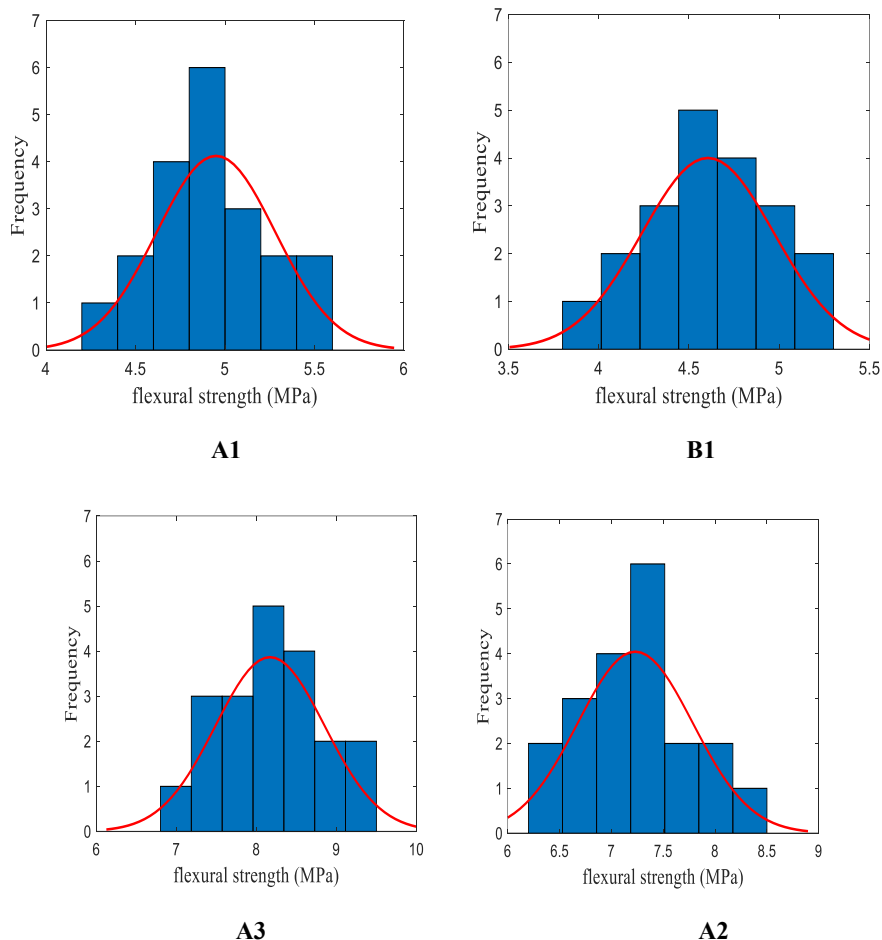
Table 9. Summary of statistical calculations of modulus of rupture

مدول گسیختگی (MPa)				
A3	A2	A1	B1	متغیر
۸/۱۷	۷/۲۳	۵/۰	۴/۶	میانگین (MPa)
۰/۶۸	۰/۵۵	۰/۳۳	۰/۳۸	انحراف از معیار (MPa)
۸/۳۴	۷/۶۸	۶/۷۰	۸/۴۱	ضریب تغییرات (%)

نشان می‌دهد که هر چهار سری ملات تقریباً دارای توزیع یکنواختی می‌باشند و داده‌ها میل به جمع شدن در اطراف مقدار میانگین دارند و به سمت چپ یا راست تمایل زیادی ندارند و به خوبی بر منحنی توزیع نرمال منطبق می‌باشند.

۵-۴- مقاومت ضربه‌ای

آزمایش تعیین مقاومت ضربه بر روی ۸۰ دیسک در چهار گروه ۲۰ تایی که هر گروه مربوط به یک طرح اختلاط است انجام شد. آزمایش ضربه با استفاده از روش وزنه افتان که به وسیله آیین‌نامه ACI ۵۴۴ [۳۵] پیشنهاد شده انجام گرفت (شکل ۸). به این منظور برای هر طرح اختلاط ملات، ۵ نمونه استوانه‌ای استاندارد به ابعاد



شکل ۷. هیستوگرام مربوط به داده‌های مدول گسیختگی
Fig. 7. Histogram diagram for modulus of rupture data

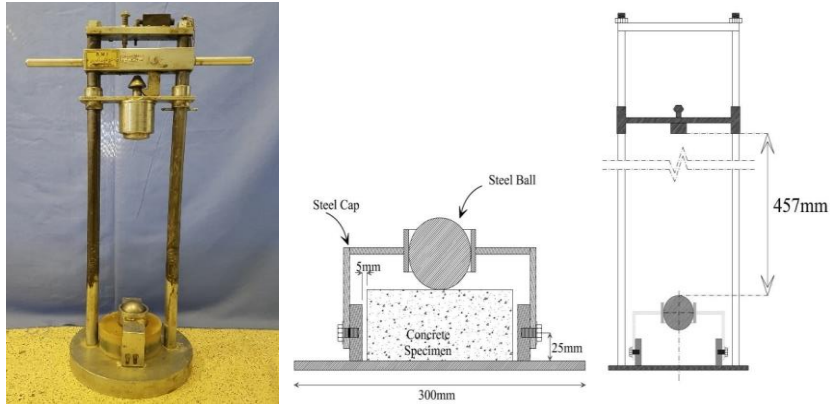
انهدام در گروه A3 بیش از سایر گروه‌ها می‌باشد. با افزایش درصد الیاف هر چند مقاومت فشاری در نمونه‌های ژئوپلیمری افزایش قابل ملاحظه‌ای پیدا نکرد اما مقاومت ضربه‌ای آن‌ها بسیار بهبود پیدا می‌کند. متوسط مقاومت انهدام در نمونه‌های ژئوپلیمری بدون الیاف بیشتر از ملات معمولی ساخته شده با سیمان به دست آمد. متوسط مقاومت انهدام در گروه A3، ۲۵/۳۳ برابر گروه A1 و ۴/۴۴ برابر A2 می‌باشد همچنین متوسط مقاومت انهدام A1، ۲۸/۴۴٪ بیشتر از B1 می‌باشد. نمودار مقایسه مقاومت انهدام در شکل ۱۱ نشان می‌دهد حضور میکروالیاف فولادی باعث انسجام و مسلح شدن بتن در سه جهت می‌گردد، که به دیسک در جذب انرژی ضربه‌ای کمک زیادی می‌کند و نهایتاً شکست و انهدام نمونه را به تعویق می‌اندازد و باعث بهبود قابل توجه مقاومت انهدام گردیده است.

انحراف از معیار برای سه گروه ملات ژئوپلیمری A1 و A2 و

پراکندگی داده‌های نمونه‌های ژئوپلیمری به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. مهم‌ترین علل یاد شده برای پراکندگی زیاد نتایج مقاومت ضربه‌ای در آزمایش وزنه افتان عبارتند از: ماهیت بارگذاری ضربه‌ای، ناهمگنی‌های موجود در ملات و بتن، وجود معیارهای چشمی برای تعیین گسیختگی و بارگذاری نقطه‌ای آزمایش [۳۶ و ۳۵]. نمودار هیستوگرام مقاومت اولین ترک برای هر چهار سری ملات شکل ۱۰ نشان می‌دهد که برای هر چهار گروه مقادیر ضربات برای اولین ترک به سختی بر منحنی توزیع نرمال منطبق می‌باشد و نمودار دارای فواصل خالی و دامنه تغییرات زیاد و تمرکز کمتر داده‌ها در مقایسه با آزمایش مقاومت فشاری، کششی و مدول گسیختگی است.

۵-۴-۲- مقاومت انهدام

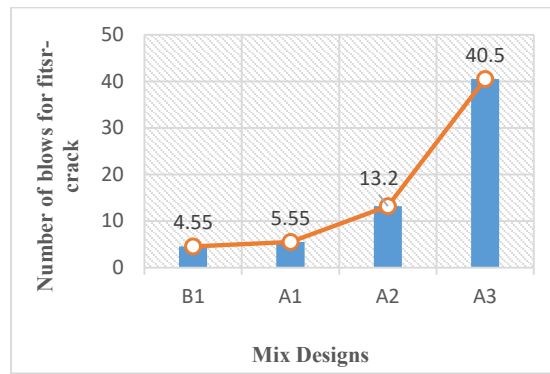
مطابق داده‌های به دست آمده در جدول ۱۰ متوسط مقاومت



شکل ۸. دستگاه آزمایش ضربه و جزئیات آن
Fig. 8. Impact testing machine and its details

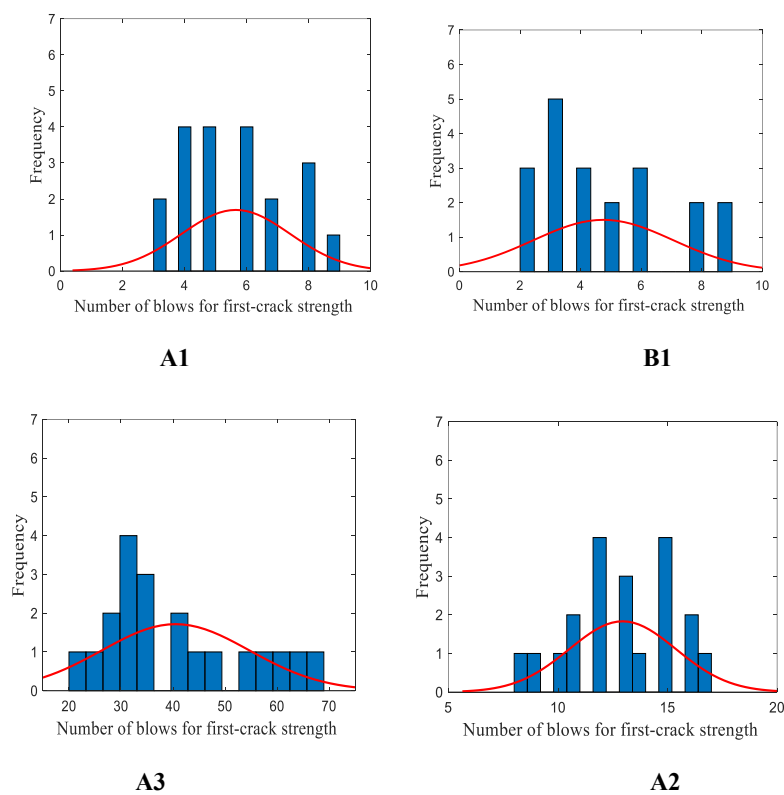
جدول ۱۰. نتایج آزمایش مقاومت ضربه‌ای (برحسب تعداد)
Table 10. Impact strength test results (Number)

شماره نمونه	B1		A1		A2		A3	
	اولین ترک	انهدام	اولین ترک	انهدام	اولین ترک	انهدام	اولین ترک	انهدام
۱	۸	۸	۵	۷	۸	۵۲	۴۳	۲۳۳
۲	۶	۷	۷	۱۰	۱۶	۳۵	۲۵	۱۴۹
۳	۵	۶	۵	۵	۹	۳۰	۵۹	۲۳۷
۴	۵	۶	۳	۷	۱۱	۵۰	۳۴	۱۴۲
۵	۴	۵	۵	۶	۱۲	۳۱	۲۷	۱۵۴
۶	۳	۳	۸	۹	۱۵	۴۵	۴۹	۱۴۹
۷	۹	۱۰	۷	۸	۱۸	۵۱	۴۰	۱۶۰
۸	۳	۳	۵	۶	۱۵	۳۷	۳۵	۱۴۴
۹	۲	۵	۷	۷	۱۶	۵۳	۵۵	۱۳۹
۱۰	۵	۶	۶	۸	۱۲	۳۰	۲۰	۱۴۱
۱۱	۳	۴	۵	۷	۸	۲۹	۳۱	۱۵۰
۱۲	۲	۳	۵	۸	۱۵	۳۸	۲۹	۱۵۵
۱۳	۴	۶	۶	۷	۱۲	۳۷	۶۳	۲۴۷
۱۴	۳	۴	۶	۹	۱۴	۴۶	۳۵	۱۳۹
۱۵	۲	۳	۴	۵	۱۵	۳۱	۶۹	۲۵۱
۱۶	۶	۷	۷	۷	۱۶	۴۹	۳۲	۲۱۱
۱۷	۳	۴	۵	۷	۱۰	۳۳	۶۱	۲۲۵
۱۸	۴	۴	۵	۶	۱۰	۴۷	۳۰	۱۶۳
۱۹	۵	۶	۴	۵	۱۸	۴۵	۴۲	۲۲۳
۲۰	۹	۱۰	۶	۶	۱۴	۲۹	۳۱	۱۳۵
میانگین (ضربه)	۴/۵۵	۵/۷۰	۵/۵۵	۷/۰۰	۱۳/۲۰	۳۹/۹۰	۴۰/۵۰	۱۷۷/۳۵
انحراف از (ضربه) معیار	۲/۱۶	۲/۰۸	۱/۲۳	۱/۳۸	۳/۱۲	۸/۷۴	۱۴/۱۷	۴۲/۷۶
ضریب تغییرات (%)	۴۷/۵۵	۳۶/۴۹	۲۲/۲۴	۱۹/۶۶	۲۳/۶۵	۲۱/۸۹	۳۴/۹۷	۲۴/۱۱



شکل ۹. نمودار مقایسه مقاومت اولین ترک

Fig. 9. Comparative diagrams of first crack strength



شکل ۱۰. هیستوگرام مربوط به داده‌های مقاومت اولین ترک

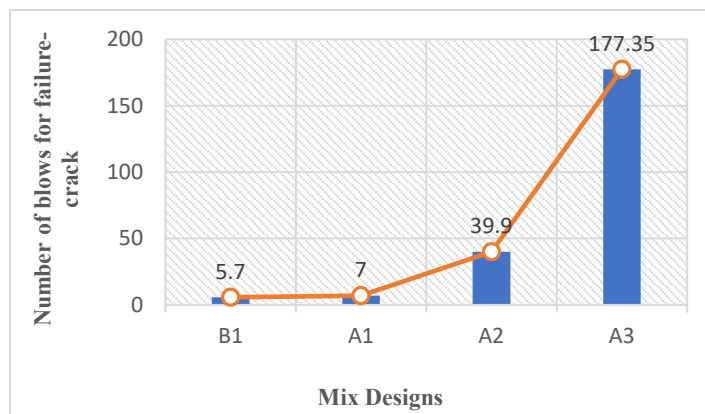
Fig. 10. Histogram diagram for first crack strength data

دهنده دامنه تغییرات زیاد، وجود فواصل خالی و تمرکز کمتر داده‌ها در مقایسه با آزمایش مقاومت فشاری، کششی و مدول گسیختگی است. برای هر چهار گروه مقادیر ضربات برای انهدام به سختی بر منحنی توزیع نرمال منطبق می‌باشد.

۵-۵- بررسی رابطه بین مقاومت‌ها

بر اساس آیین نامه ASTM C496 [۳۳] و ASTM C78

A3 به ترتیب ۱/۳۷ و ۸/۷۳ و ۴۲/۷۶ همچنین برای ملات معمولی B1، ۲/۱۳ می‌باشد. همچنین ضریب تغییرات برای سه گروه ملات ژئوپلیمری A1 و A2 و A3 به ترتیب ۱۹/۶۶ و ۲۱/۸۹ و ۲۴/۱۱٪ همچنین برای ملات معمولی B1، ۳۹/۲۵٪ می‌باشد. نتایج آزمایش وزنه افتان نشان می‌دهد که اختلاف بین تعداد ضربات مقاومت ضربه‌ای اولین ترک و انهدام نمونه ملات‌های بدون الیاف کم می‌باشد. نمودار هیستوگرام مقاومت انهدام هر چهار سری ملات شکل ۱۲ نشان



شکل ۱۱. نمودار مقایسه مقاومت‌های انهدام

Fig. 11. Comparative diagrams of failure strength

جدول ۱۱. ضریب پیشنهادی رابطه بین مقاومت فشاری با مقاومت کششی و مدول گسیختگی

Table 11. Proposed coefficient of the relationship between compressive strength with tensile strength and modulus of rupture

$\alpha = \frac{f_{r40}}{\sqrt{f_{cu50}}}$	f_{r40} (MPa)	$\alpha = \frac{f_{t50}}{\sqrt{f_{cu50}}}$	f_{t50} (MPa)	$\sqrt{f_{cu50}}$ (MPa)	f_{cu50} (MPa)	متغیر
۰/۶۸	۴/۶۰	۰/۵۹	۴/۰۰	۶/۷۷	۴۵/۹۰	B1
۰/۵۳	۵/۰۰	۰/۴۹	۴/۶۰	۹/۳۲	۸۶/۹۲	A1
۰/۷۷	۷/۲۳	۰/۶۹	۶/۵۰	۹/۳۹	۸۸/۳۰	A2
۰/۸۵	۸/۱۷	۰/۷۷	۷/۴۰	۹/۶۱	۹۲/۴۸	A3

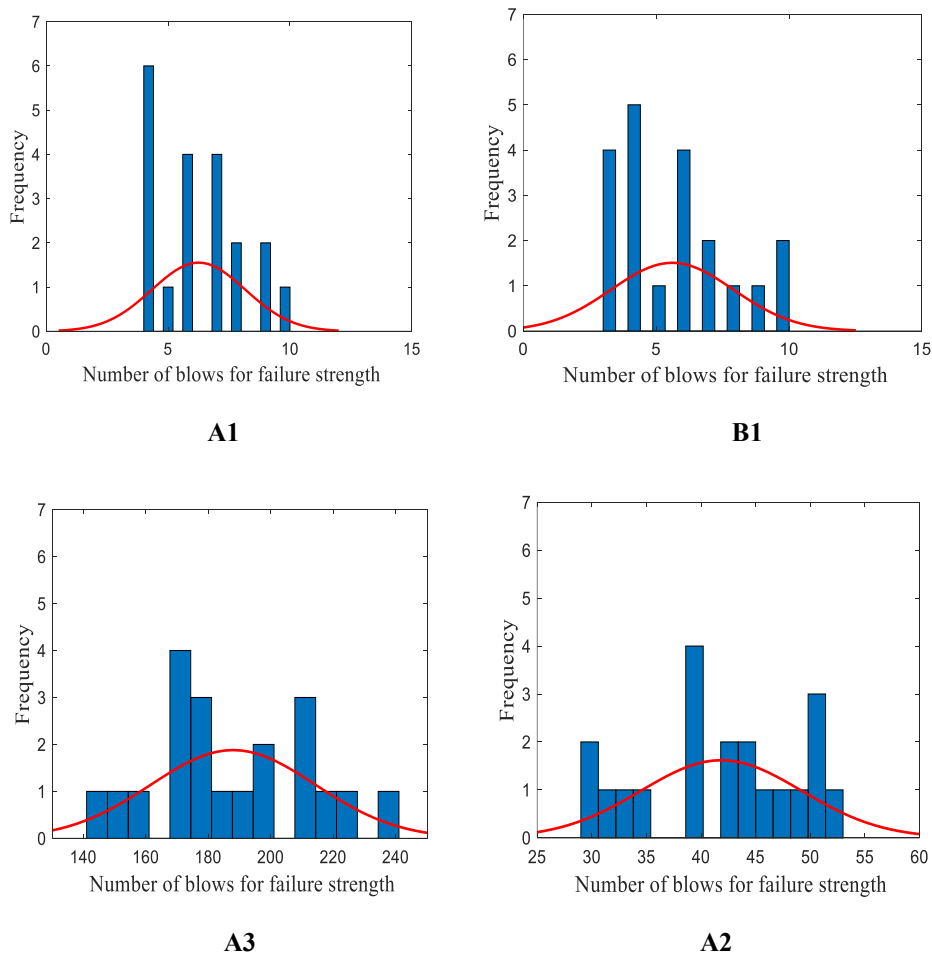
(f_{r40}) استفاده شد. بر اساس میانگین مقاومت داده‌های مقاومت فشاری، کششی و مدول گسیختگی جداول ۸ و ۶ و ۴، برای بررسی رابطه بین مقاومت‌های نمونه ملات‌های سیمانی و ژئوپلیمری ساخته شده در این کار آزمایشگاهی، جدول ۱۱ ارائه شد. ملاحظه می‌گردد با افزایش درصد الیاف در نمونه‌های ژئوپلیمری ضریب α افزایش یافت همچنین در نمونه ملات‌های سیمانی ضریب α بیشتر از ملات‌های ژئوپلیمری بدون الیاف به دست آمد.

نتایج رابطه بین مقاومت فشاری با مقاومت کششی و مدول گسیختگی در جدول ۱۱ نشان داد که ملات ژئوپلیمری بدون الیاف گرچه دارای مقاومت فشاری حدود ۲ برابر ملات سیمانی معمولی بود ولی به همان نسبت دارای افزایش مقاومت کششی و مدول گسیختگی نبود و همین باعث کوچک‌تر شدن حدود ۱۷ و ۲۱ درصدی ضریب α به ترتیب در مقاومت کششی و مدول گسیختگی در این ملات شد ولی افزودن الیاف حتی به میزان نیم درصد و بالاخص در الیاف

[۳۴] رابطه (۳) نشان دهنده رابطه کلی پیشنهادی بین مقاومت فشاری و سایر مقاومت‌ها است.

$$f_r = \alpha \sqrt{f_c'} \quad (3)$$

مطابق این رابطه f_c' مقاومت فشاری نمونه استوانه‌ای استاندارد (۱۵۰×۳۰۰) میلی‌متر برحسب (MPa)، f_r مقاومت کششی نمونه استوانه‌ای استاندارد (۱۵۰×۳۰۰) میلی‌متر برحسب (MPa) یا مدول گسیختگی نمونه منشوری استاندارد (۱۰۰×۱۰۰×۵۰۰) میلی‌متر برحسب (MPa) و α ضریب پیشنهادی می‌باشد. نمونه‌های به کار رفته برای ساخت ملات ژئوپلیمری همانند بسیاری از کارهای تحقیقاتی انجام شده در این زمینه دارای ابعاد کوچکتری هستند. در این تحقیق از نمونه‌های مکعب ۵۰ میلی‌متری برای آزمایش مقاومت فشاری (f_{cu50})، استوانه ۵۰ در ۱۰۰ میلی‌متر برای مقاومت کششی (f_{t50}) و منشور ۴۰ در ۴۰ در ۱۶۰ میلی‌متر برای مدول گسیختگی



شکل ۱۲. هیستوگرام مربوط به داده‌های مقاومت انهدام

Fig. 12. Histogram diagram for failure strength data

جدول ۱۲. ضریب پیشنهادی رابطه بین مقاومت فشاری و جذب انرژی در حالت مقاومت انهدام

Table 12. Proposed coefficient of the relationship between compressive strength and energy absorption in the state of failure strength

$\alpha = \frac{E}{\sqrt{f_{cu50}}}$	E (kN.mm)	$\sqrt{f_{cu50}}$ (MPa)	f_{cu50} (MPa)	متغیر
۱۷/۱۰	۱۱۵/۸۲	۶/۷۷	۴۵/۹۰	B1
۱۵/۲۶	۱۴۲/۲۴	۹/۳۲	۸۶/۹۲	A1
۸۶/۳۴	۸۱۰/۷۷	۹/۳۹	۸۸/۳۰	A2
۳۷۵	۳۶۰۳/۷۵	۹/۶۱	۹۲/۴۸	A3

داده‌های مقاومت فشاری به دست آمده در جدول ۴ و داده‌های مقاومت انهدام در جدول ۱۰، ضریب پیشنهادی رابطه بین مقاومت فشاری و جذب انرژی در حالت انهدام مطابق جدول ۱۲ بر اساس متوسط مقاومت‌ها ارائه شد.

نتایج رابطه بین انرژی ضربه در حالت انهدام نهایی و مقاومت

۱ درصد باعث افزایش تا ۵۷٪ در مقاومت کششی و ۶۰٪ در مدول گسیختگی ضریب α نسبت به ملات ژئوپلیمری بدون الیاف شد.

مقدار انرژی کل در آزمایش ضربه، برابر حاصل ضرب وزن چکش رها شده برابر ۴۳/۷ نیوتن در ارتفاع سقوط ۴۵۷ میلی‌متری ضرب در تعداد دفعاتی که منجر به انهدام نهایی شد می‌باشد که مطابق

دارای مقادیر انحراف از معیار و ضریب تغییرات بزرگتری نسبت به سایر نمونه‌ها (نمونه‌های فشاری، کششی، خمشی) بودند.

۷- رابطه بین انواع مقاومت‌ها نشان داد که با وجود افزایش ۲ برابری مقاومت فشاری ملات ژئوپلیمری بدون الیاف نسبت به ملات سیمانی، بقیه مقاومت‌ها به همان نسبت افزایش نیافت ولی با افزودن تا یک درصد الیاف، ضریب نسبت مقاومت کششی و مدول گسیختگی و انرژی ضربه نهایی به جذر مقاومت فشاری تا ۵۷ و ۶۰ درصد و ۲۵ برابر نسبت به ملات ژئوپلیمری بدون الیاف افزایش یافتند.

مراجع

- [1] M. Taylor, C. Tam, D. Gielen, Energy efficiency and CO₂ emissions from the global cement industry, Korea, 50(2.2) (2006) 61-7.
- [2] A.M. Rashad, S.R. Zeedan, The effect of activator concentration on the residual strength of alkali-activated fly ash pastes subjected to thermal load, Construction and Building Materials, 25(7) (2011) 3098-3107.
- [3] E. Gartner, Industrially interesting approaches to low CO₂ cements, Cement and Concrete research, 34(9) (2004) 1489-1498.
- [4] M. Weil, K. Dombrowski, A. Buchawald, Life-cycle analysis of Geopolymers, Geopolymers, Structure, Processing, Properties and Applications, Cambridge: Woodhead Publishing Limited Abington Hall, (2009) 194-210.
- [5] Z. Li, Z. Ding, Y. Zhang, Development of sustainable cementitious Materials, In Proceedings of international workshop on sustainable development and concrete technology, Beijing, China, (2004) 55-76
- [6] S. Yaseri, G. Hajiaghaei, F. Mohammadi, M. Mahdikhani, R. Farokhzad, The role of synthesis parameters on the workability, setting and strength properties of binary binder based geopolymer paste, Construction and Building Materials, Vol. 157, (2017) 534-545.
- [7] Z.H. Zhang, X. Yao, H.J. Zhu, S.D. Hua, Y. Chen, Preparation and mechanical properties of polypropylene fiber reinforced calcined kaolin-fly ash based geopolymer, Journal of Central South University of Technology, (2009) 49-52.
- [8] S. Aydın, B. Baradan, The effect of fiber properties on high

فشاری در جدول ۱۲ نشان داد که ملات ژئوپلیمری بدون الیاف با وجود مقاومت فشاری حدود ۲ برابر ملات سیمانی معمولی، در انرژی ضربه حالت انهدام حدود ۱۱ درصد ضریب α کمتری نسبت به ملات سیمانی دارد و افزودن الیاف باعث افزایش قابل توجه افزایش در انرژی ضربه شد به طوری که افزودن یک درصد میکروالیاف فولادی باعث افزایش ۲۵ برابری انرژی ضربه و ضریب α مربوطه نسبت به ملات ژئوپلیمری بدون الیاف شد.

۶- نتیجه گیری

۱- عملکرد مناسب ملات‌های ژئوپلیمری با پیش ماده سرباره کوره بلند، در زمینه خواص مکانیکی و مقاومتی، ظرفیت و پتانسیل بالای سرباره کوره بلند برای جایگزینی به جای سیمان را نشان می‌دهد و با توجه به کارخانه متعدد فولاد در جهان و وفور سرباره و نیز ارزان بودن این ماده در مقایسه با سیمان، می‌توان ملات‌های با کیفیت و ارزان تولید نمود.

۲- نتایج آزمایش‌ها نشان داد با افزایش درصد میکروالیاف فولادی تا ۱ درصد در نمونه‌های ژئوپلیمری، مقاومت فشاری، کششی و مدول گسیختگی به ترتیب تا ۶/۳۹، ۶۰/۸۶ و ۶۳/۴۰٪ افزایش یافت همچنین تعداد ضربات مقاومت انهدام حدود ۲۵ برابر بیشتر شد.

۳- داده‌های آماری به دست آمده برای مقاومت فشاری، کششی و مدول گسیختگی دارای توزیع تقریباً نرمالی بودند و در مقاومت ضربه‌ای به سختی بر توزیع نرمال منطبق گردید.

۴- در بررسی پارامترهای فشار، کشش، خمش و ضربه در تمامی نمونه‌های ژئوپلیمری با افزایش درصد الیاف، انحراف معیار و ضریب تغییرات و در نتیجه پراکندگی داده‌ها افزایش یافت.

۵- در تمامی آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی، مدول گسیختگی و مقاومت ضربه‌ای نمونه‌های ژئوپلیمری بدون الیاف A1، عملکرد مکانیکی بهتری نسبت به نمونه‌های ملات معمولی ساخته شده با سیمان B1 داشتند و در مقاومت فشاری، کششی و مدول گسیختگی به ترتیب ۸۹/۳۶، ۱۵ و ۸/۶۹٪ مقاومت بیشتر است همچنین در مقاومت ضربه‌ای متوسط مقاومت انهدام ۲۸/۴۴٪ بیشتر است. ضریب تغییرات گروه B1 در تمام پارامترهای آزمایش شده بیشتر از A1 به دست آمد.

۶- مقاومت‌های ضربه‌ای به دست آمده از آزمایش وزنه افتان

- properties of polypropylene fiber reinforced self-compacting concrete, *Journal of Computers and Concrete*. 18(1) (2016).
- [20] M. Mastali, A. Dalvand, A.R. satarifar, The impact resistance and mechanical properties of reinforced self-compacting concrete with recycled glass fiber reinforced polymers, *Journal of Cleaner Production*, Volume 124, 15 (2016), Pages 312–324.
- [21] M.Mastali, A. Dalvand, The impact resistance and mechanical properties of self-compacting concrete reinforced with recycled CFRP pieces, *Journal of Composites Part B: Engineering*, Volume 92 (2016) Pages 360–376.
- [22] M. Albitar, M.S. Mohamed Ali, P. Visintin, M. Drechsler, Durability evaluation of geopolymer and conventional concretes, *Construction and Building Materials* 136 (2017) 374–385.
- [23] I.Azizul, U. Johnson, M.Jumaat, N.Ghazali, Y.Sumiani, I.Ibnul Bashar, Influence of steel fibers on the mechanical properties and impact resistance of lightweight geopolymer concrete, *Construction and Building Materials* 152 (2017) 964–977.
- [24] P. Visintin, M.S. Mohamed Ali, M. Albitar, W. Lucas, Shear behaviour of geopolymer concrete beams without stirrups, *Construction and Building Materials* 148 (2017) 10–21.
- [25] S.Hamdy K, E.Ahmed S, W.Ahmed M, Mechanical properties of fly ash based geopolymer concrete with full and partial cement replacement, *Construction and Building Materials* 126 (2016) 560–565.
- [26] D.Bondar, C. J.Lynsdale, N. B.Milestone, N.Hassani, A. A. Ramezani pour, Effect of heat treatment on reactivity-strength of alkali-activated natural pozzolans, *Construction and Building Materials*, 25(10), pp, (2011) 4065-4071.
- [27] D.Bondar, C. J.Lynsdale, N. B.Milestone, N.Hassani, A. A. Ramezani pour, Effect of type, form, and dosage of activators on strength of alkali-activated natural pozzolans, *Cement and Concrete Composites*, 33(2), pp, (2011) 251-260.
- performance alkali-activated slag/silica fume mortars, *Composites Part B: Engineering*, 45(1) (2013) 63-69.
- [9] X. Chena, G.R. Zhua, J. Wang, Q. Chenb, Effect of polyacrylic resin on mechanical properties of granulated blast furnace slag based geopolymer, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2016.
- [10] T. Alomayri, Effect of glass microfiber addition on the mechanical performances of fly ash-based geopolymer composites, *Journal of Asian Ceramic Societies* 5, (2017) 334–340.
- [11] K. Neupane, D. Chalmers, P. Kidd, High-Strength Geopolymer Concrete Properties (Advantages and Challenges), *Advances in Materials*. Vol. 7, pp, (2018), Pages 15-25.
- [12] J.G.S.Jaarsveld, J.S.J.Deventer, L.Lorenzen, The potential use of geopolymeric materials to immobilise toxic metals: Part I. Theory and applications, *Miner Eng*, 10, PP, (1997), 659–669.
- [13] N.Lloyd and V. Rangan,, Geopolymer Concrete; Sustainable Cement less Concrete, *Proceedings of the 10th ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology and Sustainability Issues*, Seville, (2009).
- [14] E. Gartner, Industrially Interesting Approaches to “Low-CO₂” Cements, *Cement and Concrete Research*, 34, (2004), 1489-1498.
- [15] D.Khale, R.Chaudhary, Mechanism of Geopolymerization and Factors Influencing Its Development: A Review, *Journal of Materials Science*, 42 (2007) 729-746.
- [16] T. Tho-in, V. Sata, P. Chindaprasirt, C. Jaturapitakkul, Previous high-calcium fly ash geopolymer concrete, *Constr. Build. Mater*, 30 (325) (2012) 366–371.
- [17] J. Davidovits, Inorganic Polymeric New materials, *Journal of Thermal Analysis* Vol. 37, (1991) 1633-1656.
- [18] C.K. Yip, G.C. Lukey, J.S.J. Van Deventer, The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation, *Cement & Concrete Research*, Vol. 35, pp, (2005) 1688-1697.
- [19] M. Mastali, A. Dalvand, M. Fakharifar, Statistical variations in the Impact resistance and mechanical

- [32] K.W. Day, Concrete Mix Design, Quality Control and Specification, 2nd Edition, London: E&FN Spon, 1999.
- [33] ASTM C496/C496M-11, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, (2004).
- [34] ASTM C78/C78M-16, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading), ASTM International, West Conshohocken, PA, (2016).
- [35] ACI Committee 544, Measurement of properties of fiber reinforced concrete, ACI Mater. J, 85 (6) (1988) 583– 593.
- [36] A. Badr, A.F. Ashour, A.K. Platten, Statistical variations in impact resistance of polypropylene fibre-reinforced concrete, International Journal of impact engineering, Vol.32, pp, (2006) 1907-1920.
- [28] D. Hardjito, B.V. Rangan, On the Development of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete, ACI MATERIALS JOURNAL, (2004)101-M52.
- [29] M.S. Villarreal, A. Manzano-Ramírez, S. Sampieri-Bulbarela, J. Ramón, J.L.Reyes-Araiza, J.C. Rubio, J.J. Pérez-Bueno, L.M. Apatiga, A. Zaldivar, V. Amigó-Borrás, The effect of temperature on the geopolymerization process of a metakaolin-based geopolymer, Materials Letters, 65, PP, (2011) 995–998.
- [30] ASTM C109/C109-12, Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens), ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, (2013).
- [31] R.N. Swamy, H.Stavrides, Some Statistical Considerations of Steel Fibre Reinforced Composites, Cement and Concrete Research, 6(2) (1976) 201-216.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. H. Dalvand, M. K. Sharbatdar, A. Dalvand, *Experimental investigation and statistical analysis on structural design and impact strengths of fiber geopolymer mortar*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(10) (2022) 4305-4324.

DOI: [10.22060/ceej.2020.18317.6831](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.18317.6831)



