

## خواص مهندسی تیر بتن آرمه ژئوپلیمری تولید شده از شن بازیافتی

محمد رضا حاجتی مدارایی \*

دانشجوی دکتری عمران، گرایش سازه، دانشکده فنی، پردیس دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

جواد رزاقی لنگرودی

استادیار، هیئت علمی گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان.

ملک محمد رنجبر تکلیمی

دانشیار، هیئت علمی گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان.

### چکیده

کاربرد مصالح بازیافت شده در صنعت بتن امروزه به یکی از الزامات مهم زیست محیطی تبدیل شده و هر روز ارزیابی های فنی اقتصادی بهتری در این زمینه صورت می گیرد. به تدریج راه در عرصه تولید بتن های بازیافتی هموار گشته و کیفیت این بتن ها با بهره گیری از فناوری های نوین، روز به روز بهبود می یابد. استفاده از مصالح بازیافتی در بتن های ژئوپلیمر، موضوع نسبتاً جدیدی است که پژوهش های اندکی بر روی آن صورت گرفته است. در این پژوهش تأثیر مصالح بازیافتی بر رفتار برشی بتن های ژئوپلیمر در کنار مقایسه با بتن های بازیافتی معمولی و اثر سنگ دانه های بازیافتی بر هر دو گروه بتن مدنظر قرار گرفت. بدین منظور، ۱۰ طرح اختلاط شامل درصد های جایگزینی ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ سنگ دانه های بازیافتی با سنگ دانه های طبیعی در دو گروه بتن معمولی و بتن ژئوپلیمر ساخته شد و آزمون های مکانیکی، شامل مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و آزمایش Pull-off بر روی نمونه ها انجام شد. همچنین برای هر طرح اختلاط، یک تیر مسلح بدون المان برشی ساخته شد، تا اثر این نوع سنگ دانه، بر رفتار برشی تیر بررسی شود. نتایج نشان دادند که افت مشخصات مکانیکی در طرح ها و کاهش ظرفیت باربری تیرها با افزایش درصد سنگ دانه های بازیافتی رخ می دهد، به شکلی که بتن ژئوپلیمر نسبت به بتن معمولی، ظرفیت جایگزینی بیشتری را نشان داده است. همچنین استفاده از سنگ دانه های بازیافتی، منجر به بهبود انرژی شکست در ۲۵٪ جایگزینی بتن ژئوپلیمر و ۵۰٪ جایگزینی بتن معمولی گردید.

واژه های کلیدی: بتن ژئوپلیمر، سنگ دانه های بازیافتی، تیر بتنی، ظرفیت برشی، آزمایش Pull-off، انرژی شکست.

\* نویسنده مسئول: m\_modaraei@phd.guilan.ac.ir

## ۱- مقدمه

سیمان از نظر زیست محیطی، آلودگی کمتری تولید می‌کند و استفاده از آن‌ها به دلیل دوام بالاتر و امکان کاربرد در محیط‌های با خوردگی بالا، قابلیت توجیه اقتصادی دارد [۸]. قیمت اولیه بالا نسبت به بتن سیمانی یکی از نقاط ضعف و چالش‌های اصلی این بتن است که کاربرد مصالح با قیمت پایین‌تر و قابل بازیافت را به یکی از گزینه‌های اصلی جهت پژوهش‌ها تبدیل کرده است [۹]. تفاوت‌های رفتاری بتن ژئوپلیمر از منظر مشخصات مکانیکی و دوام، نیاز به پژوهش بر روی ویژگی‌های این بتن را به خوبی آشکار می‌نماید. توجه به رفتار سازه‌ای در کنار مشخصات مکانیکی و دوام نمونه‌های ساخته شده، موضوع مهمی است که برای کاربرد این بتن در مقیاس سازه‌ای دارای اهمیت است [۱۰]. یکی از مهم‌ترین موضوعاتی که در ارتباط با سنگ‌دانه‌های بازیافتی مطرح می‌شود، جذب آب بالاتر آن نسبت به سنگ‌دانه‌های معمولی است که این موضوع در بتن ژئوپلیمر از حساسیت بیشتری برخوردار است و تأثیر قابل توجهی بر مشخصات بتن ساخته شده می‌گذارد [۱۱]. همچنین مطالعات متعددی در ارتباط با اثر افزودنی‌های پوزولانی مختلف در انواع رایج بتن‌های ژئوپلیمر بر اساس پایه معدنی سرباره آهن یا خاکستر بادی صورت گرفته که در راستای بهبود کیفیت این نوع بتن نتایج مطلوبی نیز حاصل شده است. هرچند استفاده از خاکستر بادی رواج بسیاری در ساخت بتن‌های ژئوپلیمر دارد، اما به دلیل کاهش روزافزون تعداد نیروگاه‌های زغال‌سنگ و به دنبال آن کاهش تولید خاکستر بادی در مقیاس جهانی، حرکت به سمت منابع پایدار پوزولان همچون سرباره، اجتناب‌ناپذیر است [۱۲] و [۱۳]. استفاده از متاکائولن به دلیل فراوانی در طبیعت و قیمت مناسب آن، یکی از گزینه‌های پوزولانی اقتصادی جهت بهبود کیفیت بتن‌های ژئوپلیمر به شمار می‌رود. نتایج به دست آمده از مطالعات نشان می‌دهند که، استفاده از متاکائولن منجر به بهبود مشخصات بتن ژئوپلیمر شده است [۱۴]. پتانسیل بالای بتن ژئوپلیمر در استفاده از سنگ‌دانه‌های بازیافتی و افت نسبتاً کمتر ظرفیت خمشی و برشی تیرهای ساخته شده با این بتن در مقایسه با بتن معمولی در پژوهش‌های جدید قابل مشاهده است [۱۵]. همچنین پژوهش‌های زیادی در خصوص نقش پوزولان‌ها در بهبود کیفیت بتن ساخته شده با سنگ‌دانه‌های بازیافتی انجام شده است [۱۶]. انجام آزمون‌های تخصصی همچون آزمایش Pull-off، علاوه بر تعیین سطح کیفیت بتن‌های ویژه

سازه‌های بتنی بسیاری در سراسر دنیا به ویژه کشورهای صنعتی، به پایان عمر مفید خود نزدیک می‌شوند و امروزه تخریب این سازه‌ها یکی از بخش‌های بزرگ صنعت ساخت و ساز به شمار می‌رود. در کشور ایران نیز با توجه به در حال توسعه بودن و کیفیت اجرای نسبتاً نامطلوب سازه‌های بتنی، این مسأله لازم است بیشتر مورد توجه قرار گیرد. پسماند ناشی از تخریب بتن سازه‌ای، یکی از آلاینده‌ترین و باثبات‌ترین پسماندهای صنعتی به شمار می‌رود؛ لذا لزوم استفاده از بتن‌های تخریب شده به خوبی آشکار است [۱]. با خرد شدن بتن‌های به دست آمده از تخریب سازه‌ها، سنگ‌دانه‌هایی به دست می‌آیند که تا حد زیادی از نظر مقاومت و کیفیت نزدیک به سنگ‌دانه‌های طبیعی بوده و بنابراین قابل بازیافت هستند. سنگ‌دانه‌های درشت با کیفیت بالاتر و درصد بیشتر سنگ‌دانه‌های طبیعی، از استحکام بالاتری برخوردار بوده و کاربرد بیشتری در تولید بتن بازیافتی دارند [۲] و [۳]. بتن بازیافتی در شرایط مشابه در مقایسه با بتن معمولی، از منظر مشخصات مکانیکی دارای دوام پایین‌تر بوده و نیاز به اصلاحاتی در طرح اختلاط و استفاده از افزودنی‌های معدنی و شیمیایی جهت جبران این افت کیفیت دارد [۴]. سنگ‌دانه‌های بازیافتی عمدتاً مقاومت کمتری نسبت به سنگ‌دانه‌های طبیعی دارند چراکه مقاومت ملات چسبیده به سنگ‌دانه‌های بازیافتی از مقاومت سنگ‌دانه‌ها و همچنین از مقاومت ملات جدید کمتر است. عکس‌های میکروسکوپ الکترونی این مسأله را تأیید می‌کند [۵]. به دلیل استفاده از سنگ‌دانه‌های با کیفیت پایین‌تر، لازم است که بتن‌های بازیافتی از منظر مشخصات مکانیکی و دوام در سنین کوتاه مدت و بلندمدت تحت آزمایش‌های مختلفی قرار گیرند. توسعه آزمون‌ها و بررسی رفتار بتن‌های ساخته شده از سنگ‌دانه‌های بازیافتی تحت اثر افزودنی‌های مختلف همچنان در دست پژوهش است [۶].

بتن‌های ژئوپلیمر، یا بتن فعال شده قلیایی با عملکرد بالا و دوستدار محیط زیست با قابلیت جایگزینی بتن‌های سیمانی مطرح شده‌اند. مصالح غیر آلی آلومینوسیلیکاتی به کاررفته در این نوع بتن می‌توانند در یک فرایند شیمیایی گسترده وسیعی از پسماندهای صنعتی مانند سرباره کوره آهن‌گدازی و خاکستر بادی و هر منبعی که دارای آلومینوسیلیکات آمورف باشد را به تولیدات ساختمانی تبدیل کند [۷]. این نوع بتن به دلیل کاهش یا حذف کامل مصرف

شده است. آب شیشه مورد استفاده تولید ایران با نسبت (Ratio) برابر ۲,۸ (SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O) از شرکت مانافراگام استوار به صورت مایع خریداری و جهت ساخت بتن ژئوپلیمر مورد استفاده قرار گرفت. نسبت Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH (آب شیشه به هیدروکسید سدیم) برابر ۱ در نظر گرفته شد. سنگ‌دانه‌های بازیافتی به عنوان درشت‌دانه‌های جایگزین شن طبیعی، از خردایش و دانه‌بندی بتن‌های سازه‌ای با رده مقاومت نامشخص به دست آمد و سنگ‌دانه‌های رودخانه‌ای در دو نوع درشت‌دانه و ریزدانه مطابق مشخصات جدول ۲ مورد استفاده قرار گرفتند.

جدول ۲- مشخصات فیزیکی سنگ‌دانه‌های مورد استفاده

سنگ‌دانه	مشخصات فیزیکی	میزان
درشت دانه بازیافتی	وزن مخصوص (kgf/m <sup>3</sup> )	۲۵۴۰
	جذب آب (wt.%)	۴,۲
	حداکثر اندازه (mm)	۱۹
درشت دانه طبیعی	وزن مخصوص (kgf/m <sup>3</sup> )	۲۶۵۰
	جذب آب (wt.%)	۱,۲
	حداکثر اندازه (mm)	۱۹
ریزدانه طبیعی	وزن مخصوص (kgf/m <sup>3</sup> )	۲۶۱۵
	ارزش ماسه	۸۸
	جذب آب (wt.%)	۲,۱
	مدول نرمی	۲,۸۷

## ۲-۲- طرح اختلاط‌های بتن

در ساخت طرح‌های اختلاط درصد‌های ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درشت‌دانه بازیافتی جایگزین درشت‌دانه طبیعی در بتن شد و نسبت‌های مواد به کاررفته مطابق جدول ۳، جهت ساخت نمونه‌های بتنی، در نظر گرفته شد.

## ۲-۳- ساخت نمونه‌های بتنی

برای این تحقیق از هر طرح اختلاط ۱۳ نمونه مکعبی، یک نمونه استوانه‌ای و یک تیر ساخته شد. تیرهای بتنی جهت آزمایش رفتار برشی به ابعاد ۱۲\*۲۰\*۱۴۴ سانتی‌متر طراحی شد. آرایش میلگردها مطابق شکل ۱ است. تراکم بتن با کمک میز وایبره صورت گرفته و پس از ۲۴ ساعت نمونه‌ها از قالب خارج شدند و تحت شرایط عمل‌آوری تا سن ۲۸ روز قرار گرفتند. عمل‌آوری نمونه‌های بتن

همچون بتن ژئوپلیمر، می‌تواند در پیش‌بینی بهتر رفتار مکانیکی آن در کاربردهای مختلف نیز مؤثر باشد [۱۷] و [۱۸].

هدف از پژوهش حاضر، مقایسه‌ای دقیق و چندجانبه بین بتن معمولی و بتن ژئوپلیمر و اثر استفاده از سنگ‌دانه‌های بازیافتی بر ظرفیت برشی و انرژی شکست تیرهای ساخته شده با این دو نوع بتن حاوی درصد‌های مختلف سنگ‌دانه‌های بازیافتی است. در این پژوهش دستیابی به درصد بهینه استفاده از سنگ‌دانه‌های بازیافتی با توجه به مقاومت برشی تیر بتنی، دنبال شد و روابطی بین مشخصات مکانیکی بتن‌های ساخته شده برقرار گردید تا صرف‌نظر از نوع بتن، اثر جامع استفاده از سنگ‌دانه‌های بازیافتی مورد تحلیل قرار گیرد.

## ۲- طراحی و ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی

### ۲-۱- مشخصات مصالح

در این پژوهش با توجه به استاندارد ASTM C150 [۱۹]، از سیمان تیپ ۲ هگمتان، برای ساخت نمونه‌های بتنی حاوی سنگ‌دانه‌های بازیافتی استفاده شد. سرپاره استفاده شده از ضایعات کوره ذوب آهن اصفهان تهیه شد و پس از آسیاب، از الک ۲۰۰ عبور داده شد. ترکیبات شیمیایی سیمان، سرپاره و متاکائولن در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- ترکیبات شیمیایی سیمان و پوزولان‌های مصرفی

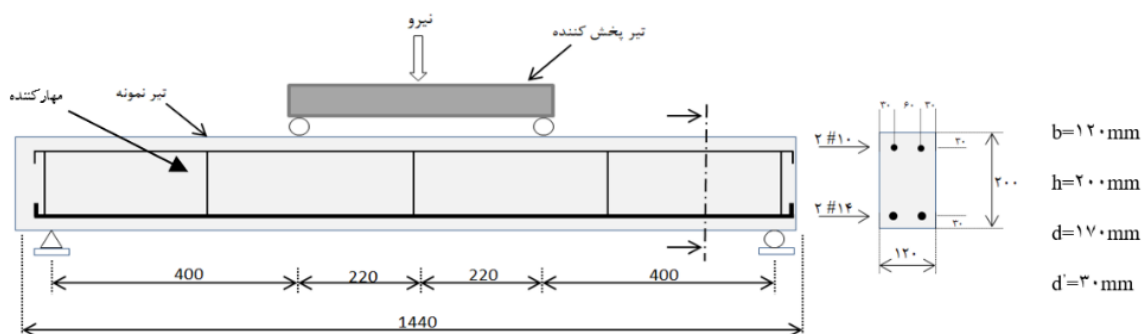
ترکیبات	متاکائولن	سرپاره	سیمان
CaO	۱,۶	۳۶	۶۴,۳۲
SiO <sub>2</sub>	۷۹,۱	۳۵	۲۱,۰۸
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱۳,۸	۱۰	۵,۳۶
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰,۲۲	-	۳,۶۴
MgO	۱,۱	۷	۱,۷
K <sub>2</sub> O	۰,۹۸	-	۱
Na <sub>2</sub> O	۱,۱۳	۰,۵	۰,۳
SO <sub>3</sub>	-	۱,۵	۱,۶
FeO	-	۱	-
P <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰,۱۴	-	-
TiO <sub>2</sub>	-	۴	-
L.O.I	۱,۹۳	۵	۱

سود سوزآور (NaOH) مورد استفاده در این پژوهش تولید ایران بوده و از شرکت هانا شیمی تهیه گردیده و با مولاریته ۶ استفاده

ژئوپلیمر در ۲۴ ساعت نخست در دمای ۸۰ درجه سانتیگراد و مورد نظر صورت گرفت و نمونه‌های بتن معمولی تحت شرایط رطوبت نسبی ۹۵٪ و پس از آن در هوای آزاد تا سن آزمایش استاندارد تا سنین آزمایش مورد نظر عمل آوری شدند.

جدول ۳- طرح‌های اختلاط بتن معمولی و ژئوپلیمر (کیلوگرم نیرو بر متر مکعب)

شماره طرح	آب	سرباره	متاکائولن	سود پرک	سیلیکات سدیم	سیمان	ریزدانه	درشت دانه طبیعی	درشت دانه بازیافتی
GR000	۹۴	۲۷۳	۱۱۷	۲۳	۱۱۷	۰	۸۰۳	۹۸۱	۰
GR025	۹۴	۲۷۳	۱۱۷	۲۳	۱۱۷	۰	۸۰۳	۷۳۵	۲۳۶
GR050	۹۴	۲۷۳	۱۱۷	۲۳	۱۱۷	۰	۸۰۳	۴۹۰	۴۷۰
GR075	۹۴	۲۷۳	۱۱۷	۲۳	۱۱۷	۰	۸۰۳	۲۴۴	۷۰۶
GR100	۹۴	۲۷۳	۱۱۷	۲۳	۱۱۷	۰	۸۰۳	۰	۹۴۰
CR000	۲۰	۰	۰	۰	۰	۴۰۰	۸۰۳	۹۸۱	۰
CR025	۲۰	۰	۰	۰	۰	۴۰۰	۸۰۳	۷۳۵	۲۳۶
CR050	۲۰	۰	۰	۰	۰	۴۰۰	۸۰۳	۴۹۰	۴۷۰
CR075	۲۰	۰	۰	۰	۰	۴۰۰	۸۰۳	۲۴۴	۷۰۶
CR100	۲۰	۰	۰	۰	۰	۴۰۰	۸۰۳	۰	۹۴۰



شکل ۱- نمای تیر مورد آزمایش و مقطع بدون خاموت

سانتی متر در سن ۲۸ روز انجام شد (شکل ۲).



شکل ۲- آزمایش Pull-off

تیرهای ساخته شده بتنی در سن ۲۸ روز با دستگاه یونیورسال ۵۰

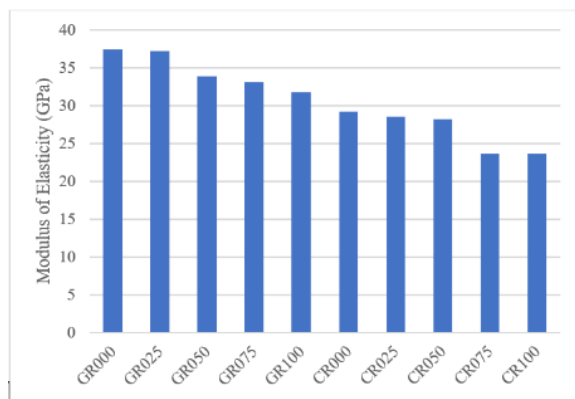
#### ۴-۲- روش آزمایش

آزمایش مقاومت فشاری بر اساس استاندارد BS-EN-12390 (۲۰۰۹) [۲۰] بر روی نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۵۰ میلی متر انجام شد و از هر طرح اختلاط ۱۲ نمونه تهیه و در سنین ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز مورد آزمایش قرار گرفتند. آزمایش اندازه‌گیری مدول الاستیسیته بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۵ سانتی متر و ارتفاع ۳۰ سانتی متر در سن ۲۸ روز و بر اساس استاندارد ASTM C469 [۲۱] انجام شد. همچنین آزمایش Pull-off مطابق استاندارد ASTM C1583 [۲۲]، به وسیله دیسک فولادی با قطر ۵ سانتی متر و بدون مغزه‌گیری بر روی مکعب‌های بتنی به ابعاد ۱۵

بتن ژئوپلیمر و اثر مواد قلیایی آن در بهبود ساختار سنگ‌دانه‌های بازیافتی نسبت داد.

### ۲-۳- مدول الاستیسته

روند کاهش مدول الاستیسته در هر دو نوع بتن (شکل ۵) قابل مشاهده است اما جهشی در این نرخ کاهش دیده می‌شود که برای بتن‌های ژئوپلیمر در طرح GR050 با ۸,۹٪ کاهش و برای بتن‌های معمولی در طرح CR075 با ۱۶,۰٪ کاهش نسبت به طرح قبلی خود رخ داده است. این کاهش محسوس را می‌توان به عدم قابلیت جبران سختی بتن توسط ماتریس سیمانی یا ژئوپلیمری به واسطه افزایش تخلخل سنگ‌دانه‌ها نسبت داد. از این منظر، بتن‌های ژئوپلیمری حساسیت بیشتری از خود نشان می‌دهند.



شکل ۵- مدول الاستیسته طرح‌های مختلف در سن ۲۸ روز

### ۳-۳- آزمایش Pull-off

از این نظر دارای اهمیت است که بدون نیاز به مغزه‌گیری، می‌تواند نشان‌دهنده میزان پیوستگی ماتریس چسباننده سیمانی یا ژئوپلیمری با درشت‌دانه‌ها باشد. با افزایش میزان درشت‌دانه‌های بازیافتی می‌توان کاهش مقاومت کششی به‌دست آمده از این آزمایش را در شکل ۶ مشاهده نمود. در گروه بتن‌های ژئوپلیمر افت قابل توجه در اولین طرح حاوی درشت‌دانه بازیافتی GR025 با ۹,۹٪ کاهش دیده می‌شود و طرح GR075 نیز نسبت به طرح قبلی خود کاهش ۱۰,۴٪ را تجربه نموده است. در حالی که در گروه بتن‌های معمولی، اولین افت چشمگیر در طرح CR050 با ۱۶,۵٪ کاهش نسبت به طرح قبلی خود قابل مشاهده است. این تغییرات به خوبی می‌تواند حساسیت هر نوع بتن را نسبت به افزایش سنگ‌دانه‌های بازیافتی نشان دهند و این آزمایش می‌تواند معیاری کم‌هزینه‌تر نسبت به

تن مطابق شکل ۳ مورد آزمایش چهار نقطه‌ای قرار گرفتند.

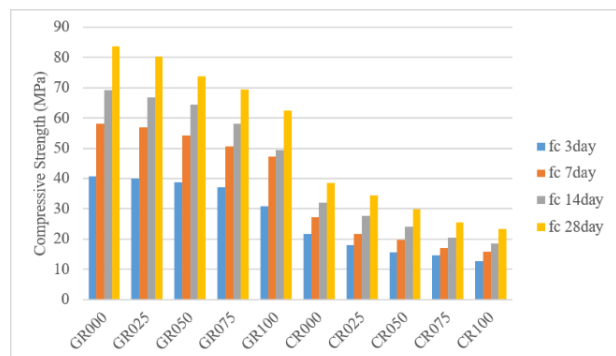


شکل ۳- شرایط بارگذاری و تجهیزات

### ۳- نتیجه‌های آزمایش

#### ۱-۳- مقاومت فشاری

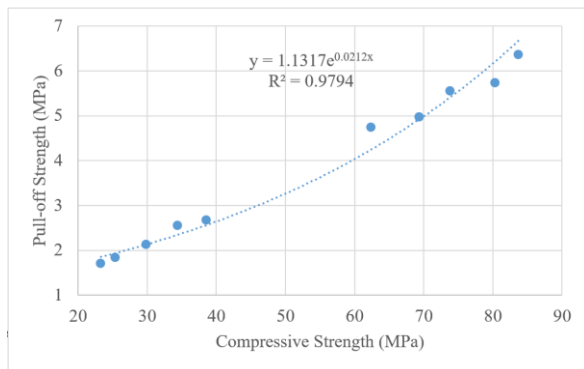
نتایج مقاومت فشاری در شکل ۴ نشان داده شده است. مقاومت بالاتر گروه بتن‌های ژئوپلیمر نسبت به بتن‌های معمولی به وضوح قابل مشاهده است. در هر دو گروه افزایش درصد سنگ‌دانه‌های بازیافتی منجر به افت مقاومت فشاری شده است. این کاهش در سن ۲۸ روز نمود بیشتری پیدا می‌کند به گونه‌ای که در بتن‌های ژئوپلیمر تا ۲۵,۴٪ و در بتن‌های معمولی تا ۳۹,۶٪ افت مقاومت دیده می‌شود. تأثیر سنگ‌دانه‌های بازیافتی بر بتن‌های معمولی به مراتب بیشتر از بتن‌های ژئوپلیمر است.



شکل ۴- مقاومت فشاری طرح‌های مختلف در سنین ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز

همچنین افزایش مقاومت فشاری قابل توجهی بین سنین ۳ و ۷ روز در بتن‌های ژئوپلیمر قابل مشاهده است که این رشد از ۷۰,۲٪ در طرح GR000 تا ۵۳,۱٪ در طرح GR100 کاهش می‌یابد. مشخصاً اثرپذیری کمتر بتن‌های ژئوپلیمر در اثر مصرف سنگ‌دانه‌های بازیافتی را می‌توان مشاهده نمود که یک دلیل آن را می‌توان به مقاومت بالاتر و دلیل دیگر را می‌توان به ساختار شیمیایی

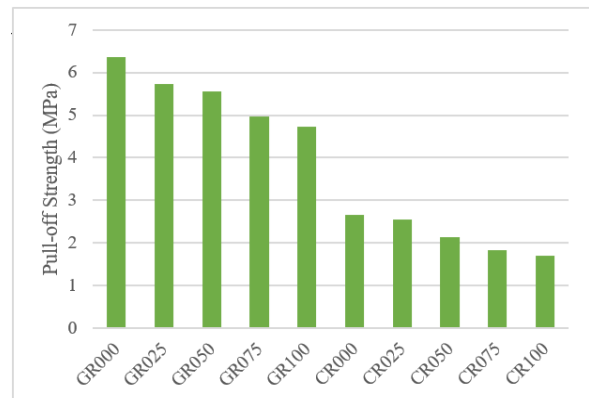
آزمایش‌های مخرب و پرهزینه جهت ارزیابی کیفیت بتن به شمار رود.



شکل ۸- همبستگی نتایج آزمایش مقاومت فشاری و آزمایش Pull-off

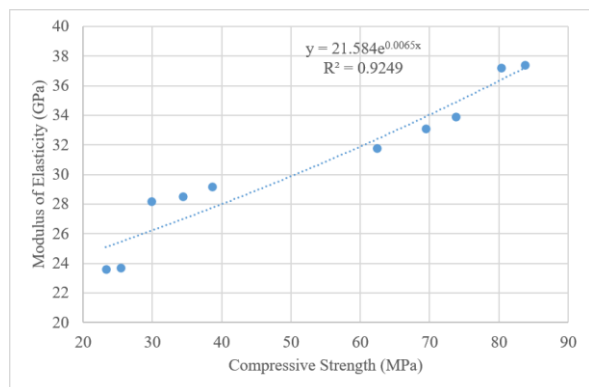
در سن ۲۸ روز نمودارهای نیرو - جابجایی شکل ۹-الف که رفتار برشی تیرهای ساخته شده با بتن‌های ژئوپلیمر را به نمایش گذاشته‌اند، کاهش رفتار ترد تیرهای بتنی را با افزایش درصد سنگ‌دانه‌های بازیافتی نشان می‌دهند. با افزایش درشت‌دانه‌های بازیافتی به تدریج ناحیه الاستیک تیر تا نقطه کرنش نخستین ترک گسیختگی (ناحیه تسلیم تیر) هموار شده و توسعه ترک به واسطه تخلخل ناشی از وجود این درشت‌دانه‌ها در محتوای بتن، هموار می‌گردد. کاهش شدید خیز ناشی از تسلیم تیر در ناحیه گسیختگی از طرح GR050 به خوبی قابل تشخیص است که این اختلاف محسوس در نتایج مدول الاستیسیته نیز قبلاً آشکار شده بود. رفتار برشی تیرهای ساخته شده با بتن معمولی از پیچیدگی بیشتری برخوردار است و همان گونه که در نمودارهای شکل ۹-ب می‌توان مشاهده نمود، با اضافه شدن ۲۵٪ درشت‌دانه جایگزین بازیافتی، رفتار تیر در گسیختگی نرم‌تر شده و کرنش نرم شونده پساترک را در محدوده ۵ میلیمتری خیز می‌توان مشاهده نمود. این کرنش نرم شونده تا درصد ۵۰٪ سنگ‌دانه‌های بازیافتی (طرح CR050) روند افزایشی داشته و پس از آن رو به کاهش می‌گذارد. همچنین کاهش شدید مقاومت برشی از طرح CR050 به بعد قابل توجه است.

سطح زیر نمودار نیرو جابجایی نشان‌دهنده انرژی شکست با واحد Kgf.mm است. با توجه به شکل ۱۰، انرژی شکست بسیار بالاتری را در طرح‌های GR000 و GR025 می‌توان مشاهده نمود که با نگاهی به الگوی ترک‌های این دو نمونه در شکل ۱۱، توجیهی منطقی دارند.



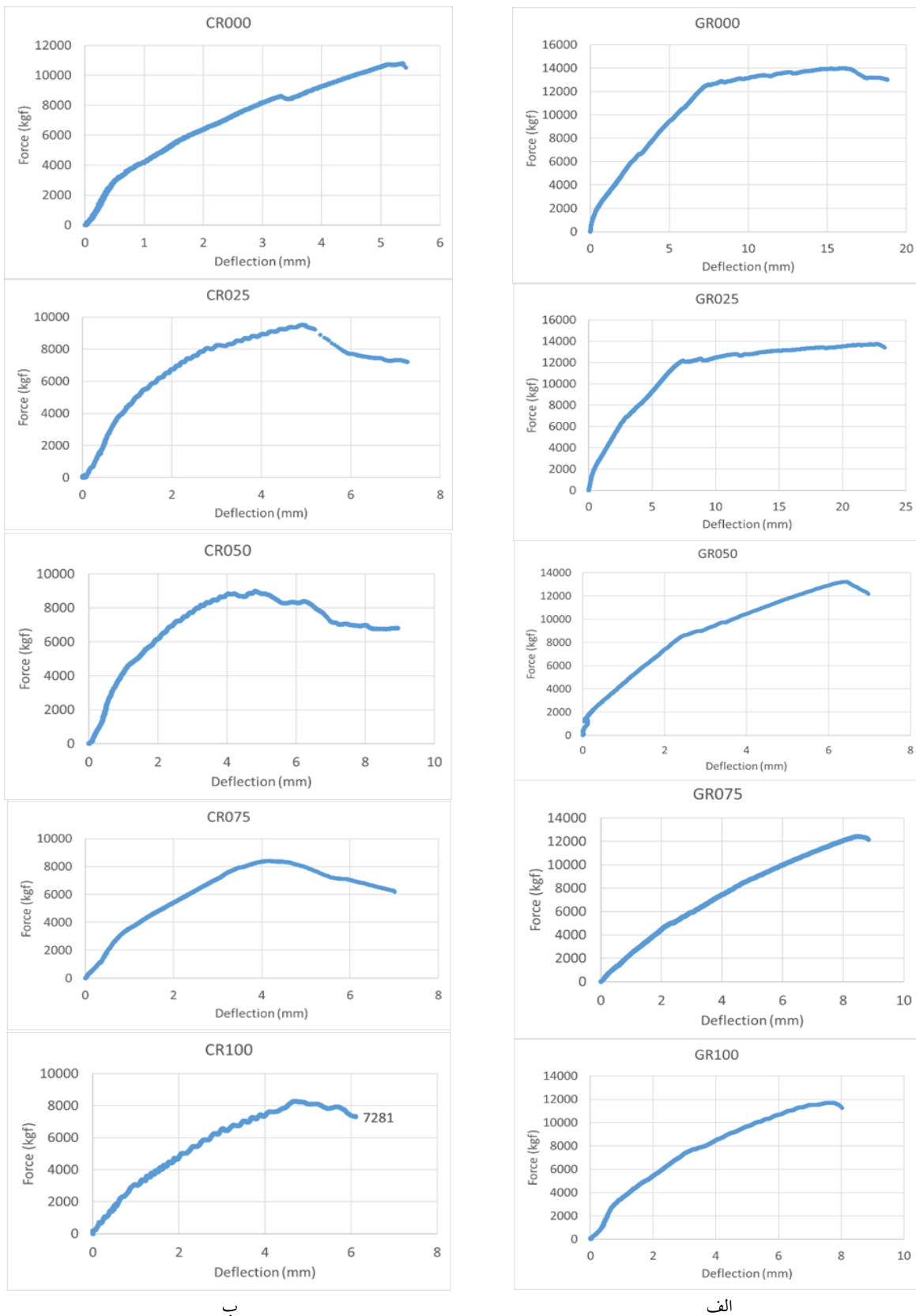
شکل ۶- مقاومت کششی طرح‌های مختلف بر اساس آزمایش Pull-off در سن ۲۸ روز

همان گونه که در شکل ۷ دیده می‌شود، رابطه‌نمایی خوبی بین نتایج مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته برقرار شده است. پراکندگی نتایج در گروه بتن‌های معمولی (ابتدای نمودار) بیشتر بوده و بتن‌های ژئوپلیمری رابطه بهتری را بین این دو مشخصه نشان می‌دهند. با وجود اختلاف قابل توجه نتایج مقاومت فشاری بین دو گروه، رابطه به‌دست آمده بیانگر ارتباط قوی این دو مشخصه بوده و حساسیت بسیار کم آن را به درصد سنگ‌دانه‌های بازیافتی نشان می‌دهد.



شکل ۷- همبستگی نتایج آزمایش مقاومت فشاری و آزمایش مدول الاستیسیته در سن ۲۸ روز

نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری و آزمایش Pull-off (شکل ۸) همبستگی‌نمایی قوی‌تری را نسبت به رابطه مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری نشان داده و انحراف نتایج از رابطه به‌دست آمده کمتر است. هرچند انحراف نتایج در گروه بتن ژئوپلیمر بیشتر به



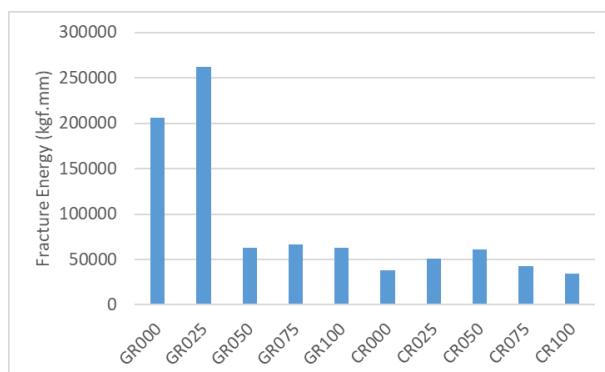
شکل ۹- نمودارهای نیرو - جابجایی تیرهای تحت خمش چهار نقطه‌ای برای طرح‌های مختلف

توسعه ترک قابل توجه و تعدد ترک‌ها نیازمند صرف انرژی بیشتری نسبت به ترک‌های برشی هستند. اما نیازمند صرف انرژی بیشتری نسبت به ترک‌های وسط دهانه که از نوع خمشی هستند، دلیل بالاتر بودن انرژی شکست طرح GR025 نسبت به



شکل ۱۱- توسعه خطوط گسیختگی برشی در تیرهای ساخته شده با طرح‌های مختلف

GR000 را می‌توان به تردشکنی طرح اول نسبت داد که با توجه به نمودارهای شکل ۹، خیز کمتری را نیز نسبت به طرح حاوی ۲۵٪ درشت‌دانه‌های بازیافتی تحمل نموده است.



شکل ۱۰- انرژی شکست تیرهای ساخته شده با طرح‌های مختلف

در شکل ۱۱، طرح توسعه ترک در تیرهای بارگذاری شده به‌نمایش درآمده است. توسعه گسترده و شبکه‌ای ترک در طرح GR000 و همچنین گسیختگی ناحیه فشاری در وسط دهانه تیر، رفتار منسجم و ترد آن را نشان می‌دهد. با افزایش محتوای درشت‌دانه بازیافتی، ترک‌ها از حالت به‌هم پیوسته و شبکه‌ای خارج شده و تعداد آنها در یک سوم میانی دهانه کاهش می‌یابد. تمرکز ترک‌های برشی و میزان گسیختگی آنها در یک سوم انتهایی بیشتر شده و گسیختگی در یک طرف تیر نسبت به طرف دیگر غالب می‌گردد. در بتن‌های بازیافتی، الگوی توسعه ترک متفاوت است و به دلیل مقاومت فشاری پایین‌تر در این گروه، ترک‌ها از تعداد کمتری برخوردار هستند. همچنین ترک‌های نیمه عمیق در وسط دهانه در برخی طرح‌ها دیده می‌شود که بیشترین مقدار این نوع ترک‌ها در طرح CR100 قابل مشاهده است. طرح CR025 الگوی نسبتاً متفاوتی را دارد و انشعابات بیشتری در امتداد ترک‌های برشی قابل مشاهده هستند.

- روند کاهش مدول الاستیسیته با افزایش درصد سنگ‌دانه‌های بازیافتی در هر دو نوع بتن مشاهده شد.

- پراکندگی در همبستگی نتایج مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته در گروه بتن‌های معمولی بیشتر بوده و بتن‌های ژئوپلیمری رابطه همبستگی بهتری را نشان دادند.

- نتایج آزمایش مقاومت فشاری و آزمایش Pull-off همبستگی‌نمایی بهتری را نسبت به رابطه مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری نشان دادند.

- با افزایش درشت‌دانه بازیافتی در بتن‌های ژئوپلیمر، به تدریج ناحیه الاستیک نمودار نیرو - جابجایی تیر تا نقطه کرنش نخستین ترک گسیختگی (ناحیه تسلیم تیر) هموار شد.

- در بتن معمولی با اضافه شدن ۲۵٪ درشت‌دانه جایگزین بازیافتی، رفتار تیر در گسیختگی نرم‌تر شده و کرنش نرم شونده پساترک در محدوده ۵ میلیمتری خیز مشاهده گردید.

#### ۴- نتایج

با توجه به اطلاعات به‌دست آمده و تحلیل‌های صورت گرفته در ارتباط با تأثیر درشت‌دانه بازیافتی بر رفتار مکانیکی انواع بتن و ظرفیت برشی تیرهای ساخته شده با آنها می‌توان موارد زیر را به‌صورت خلاصه جمع‌بندی نمود:

- تأثیر منفی سنگ‌دانه‌های بازیافتی بر مقاومت فشاری بتن‌های معمولی به مراتب بیشتر از بتن‌های ژئوپلیمر بود.



environment—A review of mechanical properties and microstructure. *Journal of cleaner production*, 2019. 223: p. 704-728.

[12] Nuaklong, P., et al., Influence of rice husk ash on mechanical properties and fire resistance of recycled aggregate high-calcium fly ash geopolymer concrete. *Journal of Cleaner Production*, 2020. 252: p. 119797.

[13] Xie, J., et al., Effects of combined usage of GGBS and fly ash on workability and mechanical properties of alkali activated geopolymer concrete with recycled aggregate. *Composites Part B: Engineering*, 2019. 164: p. 179-190.

[14] Nuaklong, P., V. Sata, and P. Chindaprasirt, Properties of metakaolin-high calcium fly ash geopolymer concrete containing recycled aggregate from crushed concrete specimens. *Construction and Building Materials*, 2018. 161: p. 365-373.

[15] Aldemir, A., et al., Shear behaviour of reinforced construction and demolition waste-based geopolymer concrete beams. *Journal of Building Engineering*, 2022. 47: p. 103861.

[16] Pawluczuk, E., et al., Geopolymer concrete with treated recycled aggregates: Macro and microstructural behavior. *Journal of Building Engineering*, 2021. 44: p. 103317.

[17] Sharkawi, A., et al. Efficiency of geopolymer vs. high-strength grout as repairing material for reinforced cementitious elements. in *Structures*. 2020. Elsevier.

[18] Albidah, A., et al., Bond strength between concrete substrate and metakaolin geopolymer repair mortars at ambient and elevated temperatures. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020. 9(5): p. 10732-10745.

[19] Standard, A., C150-07. *Standard Specification for Portland Cement*. 2007, ASTM International, West Conshohocken, PA.

[20] EN, B.S., *Testing hardened concrete—Part 3: Compressive strength of test specimens*. British Standard Institution, London, UK, 2009.

[21] Standard, A., *Standard test method for static modulus of elasticity and poisson's ratio of concrete in compression*. ASTM Stand. C, 2010. 469.

[22] Standard, A., C1583 (2013) "Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials by Direct Tension (Pull-Off Method)". ASTM International, West Conshohocken, PA.

– با افزایش محتوای درشت‌دانه بازیافتی در بتن‌های ژئوپلیمر، الگوی توسعه ترک‌ها از حالت به هم پیوسته و شبکه‌ای خارج شده و تعداد آنها در یک سوم میانی دهانه کاهش یافت.

– در تیرهای بتنی معمولی حاوی سنگ‌دانه‌های بازیافتی، ترک‌ها از تعداد کمتری برخوردار بوده و در برخی طرح‌ها، ترک‌های نیمه عمیق در یک سوم میانی دهانه دیده شد.

## ۵- مراجع

[1] Akhtar, A. and A.K. Sarmah, Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. *Journal of Cleaner Production*, 2018. 186: p. 262-281.

[2] Xiao, J., *Recycled aggregate concrete, in Recycled aggregate concrete structures*. 2018, Springer. p. 65-98.

[3] Wang, B., et al., A comprehensive review on recycled aggregate and recycled aggregate concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021. 171: p. 105565.

[4] Bai, G., et al., An evaluation of the recycled aggregate characteristics and the recycled aggregate concrete mechanical properties. *Construction and building materials*, 2020. 240: p. 117978.

[۵] ممتازی، ص. و همکاران، ارزیابی خصوصیات بتن الیافی حاوی سنگ‌دانه‌های بازیافتی بتنی با استفاده از روش‌های غیرمخرب. *تحقیقات بتن*, ۲۰۱۳. ۶(۱): p. 73-86.

[6] Guo, H., et al., Durability of recycled aggregate concrete—A review. *Cement and concrete composites*, 2018. 89: p. 251-259.

[۷] رامشت، م. حسن، و همکاران، تاثیر غلظت مولارته محلول هیدروکسید سدیم و نسبت مقدار سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم بر مقاومت فشاری و جذب آب حجمی بتن فعال شده قلیایی بر پایه سرباره. *تحقیقات بتن*, ۲۰۱۸. ۱۱(۲): p. 95-103.

[8] Amran, Y.M., et al., Clean production and properties of geopolymer concrete; A review. *Journal of Cleaner Production* 251. 2020 p. 119679.

[9] Thomas, B.S., et al., Geopolymer concrete incorporating recycled aggregates: A comprehensive review. *Cleaner Materials*, 2022: p. 100056.

[10] Ma, C.-K., A.Z. Awang, and W. Omar, Structural and material performance of geopolymer concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 2018. 186: p. 90-102.

[11] Hassan, A., M. Arif, and M. Shariq, Use of geopolymer concrete for a cleaner and sustainable

## Engineering properties of reinforced geopolymer concrete beams produced from recycled aggregate

Mohammadreza Hajati Modarai\*

PhD student of civil engineering, International Campus, University of Guilan, Rasht, Iran.

Javad Razzaghi Langroudi

Faculty member of Guilan University.

Malek Mohammad Ranjbar Taklimi

Faculty member of Guilan University.

### Abstract

The utilization of recycled materials in the concrete industry has become one of the most essential environmental needs today, and more technical and economic studies are being performed every day in this subject. The effect of recycled materials on the shear behavior of geopolymer concretes was investigated in this work, along with a comparison to conventional recycled concretes and the effect of recycled aggregates on both concrete groups. For this purpose, ten mixing designs with recycled aggregate replacement percentages of 0, 25, 50, 75 and 100 were made in two groups of ordinary concrete and geopolymer concrete, as well as mechanical tests such as compressive strength, modulus of elasticity, and pull-off test. A reinforced beam without shear element was also created for each mixing design to study the effect of this type of aggregate on the shear behavior of the beam. The findings revealed that increasing the percentage of recycled aggregates causes a loss in mechanical characteristics in the designs and a reduction in beam bearing capacity, indicating that geopolymer concrete has a higher replacement capacity than regular concrete

**Keywords:** geopolymer concrete, recycled aggregate, concrete beam, shear capacity, pull-off test, fracture energy.

---

\* Corresponding Author: m\_modarai@phd.guilan.ac.ir