

## ارزیابی تاثیر خاکستر بادی ، پودر زئولیت و الیاف شیشه بر رفتار خمشی تیرهای سبک سازه‌ای حاوی سنگدانه اسکوریا

ابوالفضل رضایی<sup>۱</sup>، یوسف زندی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد ، دانشگاه علوم تحقیقات آذربایجان شرقی

۲- استادیار گروه عمران دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز

### چکیده

در این کار پژوهشی برای ساختن بتن سبک از سنگدانه اسکوریا استفاده شده و برای افزایش مقاومت خمشی تیرهای مورد آزمایش از الیاف شیشه ، همچنین جهت کاهش استفاده از سیمان، کاهش آلاینده‌های زیستی در ایران و همچنین افزایش کارایی بتن از پودر زئولیت و خاکستر بادی استفاده شده است و مشخصات مکانیکی این بتن‌های سبک به ویژه رفتار خمشی تیرهای سبک سازه‌ای در محیط آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصله گویای این است که در تیر بتنی سبک ساخته شده و نمونه‌های فشاری، در کرنش‌های زیاد، به علت وجود شبکه‌ای از الیاف تا ۳ درصد وزنی سیمان و انعطاف پذیری حاصله، از تردی و شکست آن جلوگیری می‌کند و باعث افزایش تا ۲۰ درصد مقاومت فشاری و ۱۰ درصد مقاومت خمشی نسبت به نمونه شاهد می‌گردد. همچنین افزودن پودر زئولیت در کنار خاکستر بادی تا ۱۵ درصد وزنی سیمان، خاصیت چسبندگی همانند سیمان به بتن سبک داده و باعث افزایش مقاومت خمشی تا ۱۵ درصد گردیده است.

کلمات کلیدی: بتن سبک سازه‌ای ، اسکوریا ، الیاف شیشه ، خاکستر بادی ، پودر زئولیت . مقاومت خمشی

\* نویسنده مسئول: یوسف زندی

پست الکترونیکی: zandi@iaut.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۰۰۰۰/۰۰/۰۰ ، تاریخ پذیرش مقاله: ۰۰۰۰/۰۰/۰۰

## ۱- مقدمه

اساساً بتن سبک یک ماده جدید نیست و از روزگار امپراتوری رم تاکنون شناخته شده است بکارگیری سبکدانه بیشتر بر اساس مواد خام در دسترس بوده است [1]. برخی محققین [۱،۲]، در تحقیقاتشان روی بتن‌های سبکدانه حاوی سبکدانه‌های طبیعی چون توف و پرلیت یا سبکدانه‌های مصنوعی چون رس منبسط شده یا شل مطالعه کرده اند. آن‌ها به این نتیجه رسیده‌اند که افزودنی‌هایی مانند خاکستر-بادی، میکروسیلیس و پوزولان‌های طبیعی در بتن سبک، سبب بهبود مشخصات مختلفی در بتن می‌شود؛ چرا که واکنش‌های پوزولانی منجر به بهبود مشخصات مکانیکی می‌شود [۳]. مقاومت فشاری در بتن سبک سازه‌ای، ۲۱ تا ۲۸ مگا پاسکال است [۴] در ایران هم به دلیل زلزله خیز بودن منطقه و گرایش به بلند مرتبه سازی لزوم استفاده از مصالح سبک وزن سازه‌ای همراه با تکنولوژی روز دنیا جهت بالا بردن خصوصیات مکانیکی محصول حاصل احساس میشود. در آلمان و نروژ تنوع وسیعی از سبکدانه‌ها بر اساس رس منبسط شده (liapor and lica) تولید شده است. در هند از سویی دیگر تکنولوژی تولید سبک دانه بر اساس fly ash توسعه یافته است. در ایسلند کاربرد سنگ سخت یک روش معمولی است که تکنولوژی توسعه یافته بر اساس پامیس میباشد. از سوی دیگر به علت نیاز روزافزون به استفاده از مواد ترکیبی برای دستیابی به خواص و عملکردهای مطلوب استفاده از مصالح کامپوزیت به طور قابل توجهی در صنعت ساختمان رو به رشد بوده و با سرعت فوق‌العاده در حال توسعه می‌باشد. اولین تحقیقات انجام شده در این زمینه از اوایل دهه ۱۹۸۰ آغاز شد [۵،۶،۷] Criag و همکاران در سال ۱۹۸۴ تیرهایی با ۲ درصد حجمی الیاف را مورد آزمایش قرار دادند آنها نتیجه گرفتند که با افزودن الیاف به بتن، افزایش قابل توجهی در شکل پذیری و مقاومت خمشی تیرها حاصل شده بود. [۸] Mansour & Traina در سال ۱۹۹۱ به بررسی تاثیر الیاف بر پیک تنش- کرنش تحت بارگذاری تک محوری و دو محوری پرداختند، آنها نتیجه گرفتند در فشار تک محوره بر روی نمونه‌های دارای الیاف، مقاومت نهایی نسبت به بتن بدون الیاف افزایش چشمگیری دارد. ماکزیمم افزایش مقاومت فشاری که آنها مشاهده کردند برای ۵/۱ درصد حجمی الیاف بود که باعث شد ۲۲ درصد افزایش مقاومت رخ دهد و در قسمت دوم محوری ۱/۵ درصد الیاف باعث افزایش ۸۵ درصد در مقاومت فشاری شد. [۹] Ahmed el و همکاران در سال ۲۰۱۵ عملکرد سازه‌ای تیرهای بتن سبک با ترکیب الیاف شیشه‌ای را مورد بررسی قرار داده‌اند نتایج تجربی نشان دهنده‌ی کفایت مدل‌های مورد استفاده در پیش بینی ظرفیت حمل بار، انحراف، عرض ترک و تغییر شکل از تیرهای بتن سبک سازه‌ای میباشد. [۱۰]. ضعیف ترین جزء بتن سبک، ماتریس سیمان یا منطقه تماسی نیست، بلکه سبک دانه است. به همین دلیل مشخصات مکانیکی بتن سبک تنها با کیفیت ماتریس سیمان آن سنجیده نمی‌شود و مشخصات سبک دانه، حجم سبک دانه‌ها در بتن موثرند [۱۱،۲].

Naman در سال ۱۹۸۵ نمونه‌های استوانه‌ای بتن را تحت فشار قرار دادند تا منحنی تنش - کرنش مخلوط دارای الیاف را بدست آورند، آنها نتیجه گرفتند که الیاف اضافه شده باعث افزایش قابل توجه در نقطه پیک منحنی تنش-کرنش و همچنین باعث افزایش شکل پذیری و مقاومت خمشی مشخصی در ناحیه قبل از نقطه پیک منحنی تنش-کرنش شده است. [۱۲] Pawel و همکاران در سال ۲۰۱۵ به جایگزینی خرده شیشه با شن و ماسه همچنین استفاده از خاکستر بادی در بتن سبک پرداخته‌اند و نتایج بدست آمده حاکی از این است که این جایگزینی باعث افزایش مقاومت فشاری بتن سبک سازه‌ای در حدود ۱۶٪ و مقاومت خمشی در حدود ۱۴٪ گردیده است. [۱۳] Payam در سال ۲۰۱۳ خواص مهندسی بتن سبک پوسته بادام حاوی خاکستر بادی را مورد مطالعه قرار داد و اثر جایگزینی سیمان با خاکستر بادی در ۰٪، ۱۰٪، ۳۰٪، ۵۰٪ برای خواصی مانند کارایی، چگالی، مقاومت فشاری و کششی، استحکام خمشی، جذب آب مورد بررسی قرار داد نتایج آزمایشات نشان داد که با تعویض تا ۵۰٪ از سیمان با خاکستر بادی میتوان به بتن سازه‌ای با مقاومت بالا دست یافت بنابراین از خواص استحکام خمشی و کششی این بتن می‌توان در ساخت تیرهای سبک سازه‌ای بهره جست. [۱۴] Chao Zou & Yingli Gao در سال ۲۰۱۵ با اضافه کردن خاکستر بادی به بتن دانه سبک نتیجه می‌گیرند که درجه تفکیک بتن کاهش می‌یابد و باعث افزایش اسلامپ بتن و در نتیجه کاهش نسبت آب به سیمان می‌گردد و همچنین آزمون خواص مکانیکی نشان می‌دهد که مقاومت فشاری افزایش و شکنندگی بتن کاهش می‌یابد [۱۵].

هدف این مقاله بررسی خواص مکانیکی تیرهای بتن سبک سازه‌ای با استفاده از دانه‌های سبک از جنس اسکوریا همراه با خاکستر-بادی، پودرزئولیت و الیاف شیشه میباشد این بتن نرم با قابلیت خمش عمدتاً از همان اجزای بتن معمولی منهای ذرات درشت ساخته می‌شود.

شود. از نظر ظاهری نیز این ماده همانند بتن معمولی است ولی در کرنش های زیاد، به علت وجود شبکه ای از الیاف، خاکستربادی و پودر زئولیت انعطاف پذیری حاصله، از تردی و شکست آن جلوگیری می کند.

Krishna Lekha & Lathi Karthi در سال ۲۰۱۷ یک بررسی تجربی برای ارزیابی خواص مکانیکی بتن با زئولیت به عنوان جایگزینی جزئی سیمان انجام دادند. علاوه بر این، سازگاری مخلوط سیمان و پودرزئولیت مورد بررسی قرار گرفت. تجزیه و تحلیل بر روی بتن سبک M30 انجام شد. نتایج نشان داد که افزودن زئولیت بر روی بتن توان مقاومت فشاری را نسبت به بتن معمولی کاهش می دهد. این ممکن است به علت افزایش تخلخل بتن توسط افزودن زئولیت همراه با واکنش طولانی مدت پوزولانیک زئولیت باشد. زئولیت دارای واکنش پوزولانیک کندتر نسبت به واکنش هیدراتاسیون سیمان پرتلند است. اما مقاومت کششی بتن با جایگزینی سیمان با زئولیت تا سطح ۱۵ درصد جایگزین در مقایسه با نمونه شاهد، افزایش یافته است [۲۳].

Nikola tosic و همکاران در سال ۲۰۱۸ در تحقیقی ۶ نمونه تیر بتنی حاوی خاکستر بادی و سنگدانه های بازیافتی و معمولی ساختند نمونه ها را در سن ۷ و ۲۸ روزه تحت بارگذاری قرار دادند. برای تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی بتن ویژگی شکست، ترک، کشش، خزش و انقباض نمونه ها را مورد اندازه گیری و ارزیابی قرار دادند. نتایج بدست آمده با موارد پیش بینی شده مورد مقایسه قرار گرفت و حاکی از افزایش یکسان در همه ویژگی های ارزیابی شده نسبت به تیر شاهد بود [۲۴].

## ۲- مواد

### ۲-۱- مصالح به کار رفته

#### ۲-۱-۱- مشخصات سنگدانه سبک

سنگدانه اسکوریا (SA) یا سنگ پا از معدن طبیعی در نزدیکی سلماس (آذربایجان غربی - ایران) تهیه شده است. بزرگترین سنگدانه سبک که در تهیه بتن استفاده شد ۱۹ mm است. این سنگ بیشتر در دهانه کوه های آتشفشانی و از گدازه های مذابی که سیلیس کمی دارند (بازالت) ایجاد میشود. رنگ آن تیره است و میتواند به رنگ های قهوه ای مایل به قرمز، قرمز، خاکستری، و یا سیاه باشد. بیشتر این سنگ ها وزن مخصوص بیشتر از یک دارند. برای نمونه برداری و دانه بندی به ترتیب طبق استاندارد [۱۶] ASTM D75 و [۱۷] ASTM C136 عمل شد. برای مقایسه سنگدانه های مصرف شده با حدود استاندارد، محدوده استاندارد دانه بندی توصیه شده [۱۸] ASTM C330 ملاک عمل قرار داده شد.

جدول (۱) مشخصات فیزیکی اسکوریا

	چگالی توده ای (kg/m <sup>3</sup> )		چگالی		جذب آب (%)	
	متراکم	غیر متراکم	خشک (OD)	اشباع با سطح خشک (SSD)	۲۴ ساعت	۳۰ دقیقه
اسکوریا (SA)	995	895	1.60	1.84	14.84	11.63

#### ۲-۱-۲- سیمان

سیمان استفاده شده در تهیه کلیه نمونه ها منطبق بر استاندارد [۱۹] ASTM C150، سیمان پرتلند نوع II (PC) کارخانه سیمان صوفیان با چگالی ۳/۱۵ بود. مقاومت ۲۸ روزه ملات مکعبی ساخته شده با PC، ۳۹/۳ MPa و زمان گیرش اولیه ۷۰ دقیقه و نهایی ۴/۰۵ ساعت تعیین شده اند.

جدول (۲) مشخصات شیمیایی سیمان تپ ۲ صوفیان

نوع اکسید	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	MgO	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	L.O.I
سیمان پرتلند (II) (PC)	21.45	4.88	3.58	64.33	0.41	1.75	0.91	1.94	0.62

### ۳-۱-۲ فوق روان کننده و آب مصرفی

در این تحقیق از فوق روان ساز پلی کربکسیلات پایه نفتالین مطابق با آیین نامه ASTM C494 [۲۰] به میزان ۱ درصد وزن سیمان استفاده شده است. آب استفاده شده در تهیه بتن و آب عمل آوری نمونه‌ها از آب شرب آزمایشگاه تکنولوژی بتن دانشگاه آزاد تبریز تامین شد.

### ۳-روش شناسی

نسبت های اختلاط بتن در ابتدا بر اساس شیوه پیشنهاد شده در ACI 211.1 [۲۱] منظور شد و با طرح اختلاطهای متفاوت و انجام آزمایش فشاری تک محوری روی نمونه‌های بتن، طرح‌های مناسب برای اجرای تحقیق انتخاب شد. ۸ مخلوط LWAC برای تعیین مقاومت فشاری و مقاومت خمشی در نظر گرفته شد که برای هر طرح اختلاط ۲ نمونه برای ۷ روزه و ۲ نمونه برای ۲۸ روزه مورد آزمایش قرار گرفت. دانه بندی وزنی (درصد رد شده) سبک دانه اسکوریا در محدوده استاندارد ASTM C 330 [۱۸] میزان سیمان بتن از ۴۵۰ کیلوگرم در مترمکعب انتخاب گردید و از خاکستر بادی و پودر زئولیت هریک به میزان ۱۵٪ وزن سیمان به صورت جداگانه و باهم جایگزین سیمان استفاده شد. نسبت w/c با توجه به آزمایشهای اولیه با مقدار ۰٫۳، ۰٫۴، ۰٫۵، و مقایسه مقاومت فشاری بدست آمده ۰٫۴۵، انتخاب شد که در آن w مقدار آب آزاد و فوق روان کننده و c میزان مواد سیمانی (سیمان، خاکستر بادی، پودر زئولیت) می‌باشد.

برای تمامی مخلوط‌ها بزرگترین اندازه سنگدانه ۱۹ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. جهت جلوگیری از افت سریع اسلامپ، سنگدانه های سبک از قبل به مدت ۳۰ دقیقه در آب اشباع و بعد از بیرون آوردن از آب در یک ظرف مشبک نظیر سرنده ریخته شدند تا آب اضافی از سطح سنگدانه‌ها جدا شود. سپس سنگدانه‌های ریز به مصالح سبک پیش خیس شده اضافه شده و به مدت ۵ دقیقه کاملاً مخلوط شدند. آنگاه سیمان، خاکستر بادی و پودر زئولیت را به آنها افزوده و مجدداً تمام اجزای تشکیل دهنده بتن با هم مخلوط شدند. در انتها آب لازم و فوق روان کننده به مصالح اضافه گردیده و به مدت ۵ دقیقه کل مصالح به هم زده شدند تا بتن همگن ایجاد شود. اما زمانی که در طرح‌های اختلاط از الیاف شیشه‌ای استفاده میشد برای جلوگیری از گلوله گلوله شدن الیاف ابتدا الیاف شیشه‌ای را با آب و سیمان مخلوط کرده و سپس سنگدانه‌ها را اضافه می‌کردیم این روش باعث همگن پخش شدن الیاف داخل مخلوط بتنی میشد اسلامپ نمونه‌ها در محدوده صفر تا ۵۰ میلی متر و بعضاً ریزشی بودندوبه دلیل اینکه مقاومت بتن ساخته شده مد نظر بود و در مقابل از افزودنی‌هایی مانند خاکستر بادی و پودر زئولیت که هر کدام جاذب زیاد آب میباشد و به کاربردن الیاف شیشه که به تنهایی باعث کاهش کارایی بتن میشود از افزایش آب برای بدست آوردن اسلامپ مناسب استفاده نشد. مخلوط‌های بتن برای بدست آوردن مقاومت فشاری در قالب‌های پلاستیکی با ابعاد ۱۵\*۱۵\*۱۵ و ۱۰\*۱۰\*۱۰ و برای بدست آوردن مقاومت خمشی تیرها در قالب فلزی با ابعاد ۱۰\*۱۰\*۵۰ سانتی متر ریخته شده و با یک میز لرزان متراکم شدند. بعد از ۲۴ ساعت، قالب‌ها باز گردیده و نمونه‌ها تا زمان آزمایش در آب ۲۳±۲ °C نگهداری و عمل آوری شدند.

### ۳-۱-۳ سرنده و شستشوی سنگدانه

به دلیل تهیه سنگدانه های اسکوریا از محل معدن و به صورت فله‌ای، مجبور بودیم تمام سنگدانه ها را سرنده کنیم تا به اندازه دانه مورد نظر برسیم در همین راستا برای بدست آوردن سنگدانه های ریز از الک نمره ۴ ASTM (۳/۱۶in<sup>3</sup> یا ۴٫۷۵mm) استفاده کردیم و همچنین برای بدست آوردن سبکدانه‌های درشت از الک ۳/۴in<sup>3</sup> یا ۲۰ میلی متر ASTM استفاده کردیم تا با رعایت نکات آئین نامه در طرح اختلاط بتن با مشکل روبه رو نباشیم. ناخالصی هایی که در فرایند هیدراتاسیون سیمان دخالت میکنند، قشرهای پوششی که از پیوستگی کامل بین سنگدانه‌ها و خمیر سیمان جلوگیری می کنند و بعضی از دانه‌های خاصی که خود ضعیف و ناسالم هستند مقاومت بتن را کاهش میدهند. [۵]

۱- Superplasticizer

به همین دلیل برای رسیدن به مقاومت فشاری و خمشی بالا سنگدانه‌ها را شسته و از تمام ذرات ریز شامل خاک رس، لای و ... پاک کرده تا به نتیجه مطلوب دست پیدا کنیم.

### ۳-۲ اختلاط الیاف شیشه‌ای در بتن

در این تحقیق با انجام آزمایش‌های متداول به این نتیجه رسیدیم که قبل از افزودن الیاف شیشه به مخلوط بتن باید رشته‌های الیاف از هم جداسازی شده و سپس به مخلوط افزوده شود تا الیاف فرصت گلوله شدن در مخلوط را پیدا نکند روش اول مخلوط کردن الیاف شیشه با آب و روش دوم مخلوط کردن الیاف شیشه با خمیر سیمان میباشد. البته روش دوم مزیت دیگری نیز در این تحقیق داشته به این دلیل که آب مورد نیاز فقط صرف واکنش هیدراتاسیون سیمان میشود و از جذب آب توسط سنگدانه‌های سبک که خود جاذب بسیار آب میباشند جلوگیری به عمل می آید و این باعث کاهش آب مصرفی در بتن میشود. بعد از مخلوط کردن الیاف شیشه با سیمان، مخلوط حاصل با سرعت پایین و کم کم به سنگدانه‌های در حین چرخش میکسر اضافه میشود باید یادآوری کرد که بعد از اختلاط الیاف به مخلوط بتنی نباید بیش از ۵ دقیقه زمان اختلاط طول بکشد چون باز هم باعث گلوله گلوله شدن الیاف خواهد شد.

### ۴- نتایج آزمایشگاهی

#### ۴-۱ مقاومت فشاری LWAC

در ابتدا آزمایشگاهی (جدول ۳) جهت بدست آوردن مقدار بهینه‌ی سنگدانه، الیاف و همچنین مقدار آب به سیمان انجام دادیم اضافه کردن ماسه طبیعی به مخلوط بتنی باعث افزایش وزن مخصوص بتن و همچنین افزایش مقاومت نهایی آن میشود و با توجه به استفاده از الیاف شیشه به مقدار ۵ و ۱۰ درصد وزنی سیمان، مشاهده شد که با افزایش درصد الیاف، مقاومت فشاری کاهش می‌یابد تا جایی که مقدار الیاف را به ۱،۵، ۲، ۳ درصد رساندیم و طرح‌های اختلاط اصلی را با این درصد‌ها آزمایش کردیم و همچنین مقدار آب به سیمان را با درصد‌های ۰،۳، ۰،۴، ۰،۵، ۰،۵ آزمایش کردیم که با توجه به نتایج بدست آمده مقدار آب به سیمان را برابر ۰،۴۵ در نظر گرفتیم و مقدار سنگدانه‌ها را با توجه به مقاومت‌های بدست آمده از آزمایش انتخاب نمودیم. اسامی برای هر طرح با توجه به حرف اول اسم لاتین مواد و مصالح سبکدانه تشکیل دهنده مخلوط بتن انتخاب شده است.

جدول (۳) آزمایش‌های انجام شده جهت بدست آوردن مقدار سنگدانه و الیاف و مقدار آب به سیمان بهینه

شماره طرح	سیمان (kg/m <sup>3</sup> )	خاکستر بادی (kg/m <sup>3</sup> )	پودر زئولیت (kg/m <sup>3</sup> )	الیاف شیشه (kg/m <sup>3</sup> )	اسکوریا (ریزدانه) (kg/m <sup>3</sup> )	اسکوریا (درشتدانه) (kg/m <sup>3</sup> )	ماسه (kg/m <sup>3</sup> )	$\frac{W}{C}$	فوق روان کننده	مقاومت ۷ روزه (Mpa)	وزن مخصوص خشک (kg/m <sup>3</sup> )
۱	۴۵۰	۶۷،۵	۶۷،۵	۲۲،۵	۷۷۰	۴۴۴،۵	-	۰،۵	۰،۰۱	۱۹،۶	۱۶۲۰
۲	۴۵۰	۶۷،۵	۶۷،۵	۴۵	۷۷۰	۴۴۴،۵	-	۰،۵	۰،۰۱	۱۷،۳	۱۶۷۱
۳	۴۵۰	-	-	-	۲۹۶	۴۹۶	۵۹۳	۰،۳	۰،۰۱	۲۶،۲	۱۷۲۵
۴	۴۵۰	-	-	۱۳،۵	۲۹۶	۶۷۴	۵۹۳	۰،۴	۰،۰۱	۳۰	۱۷۴۱
۵	۳۸۲،۵	۶۷،۵	-	-	۲۹۶	۵۹۲،۶	۵۹۳	۰،۳	۰،۰۱	۱۷،۵	۱۷۷۶
۶	۳۸۲،۵	-	۶۷،۵	-	۲۹۶	۵۹۲،۶	۵۹۳	۰،۳	۰،۰۱	۱۹،۲	۱۷۳۳

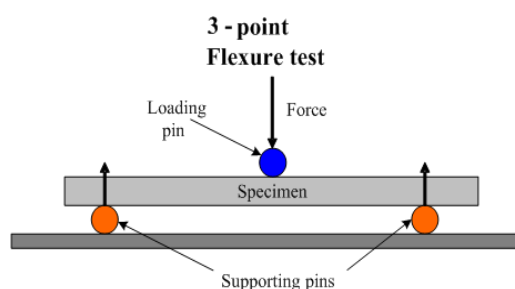
جدول ( ۴ ) طرح‌های اختلاط نهایی

ردیف	نام طرح	سیمان (kg/m <sup>3</sup> )	درشت دانه اسکوریا (kg/m <sup>3</sup> )	ریزدانه اسکوریا (kg/m <sup>3</sup> )	ماسه (kg/m <sup>3</sup> )	الیاف شیشه (kg/m <sup>3</sup> )	خاکستر بادی (kg/m <sup>3</sup> )	پودر زئولیت (kg/m <sup>3</sup> )	w/c	f <sub>c</sub> (Mpa) ۷روزه	f <sub>c</sub> (Mpa) ۲۸روزه	وزن مخصوص (یک روزه) (kg/m <sup>3</sup> )
1	S	450	515.3	554	257.6	-	-	-	0.45	۳۰,۷	36.4	۱۸۶۸
2	G1S	450	515.3	554	257.6	13.5	-	-	0.45	۳۰	۴۲,۷	۱۹۰۵
3	G2S	450	515.3	554	257.6	9	-	-	0.45	۳۲	۳۹,۴	۱۸۷۵
4	G3S	450	515.3	554	257.6	6.75	-	-	0.45	۳۰,۱	۳۵,۳	۱۸۷۴
5	G4S	450	530	568.5	228.5	6.75	-	-	0.48	۲۷	۳۱,۳	۱۸۷۳
6	FS	382.5	515.3	554	257.6	-	67.5	-	0.45	۲۴,۱	۲۷,۳	۱۹۳۴
7	ZS	382.5	515.3	554	257.6	-	-	67.5	0.45	۲۳,۸	۳۲,۶	۱۸۹۶
8	FZS	315	515.3	554	257.6	-	67.5	67.5	0.45	۲۰,۲	26	۱۸۸۰

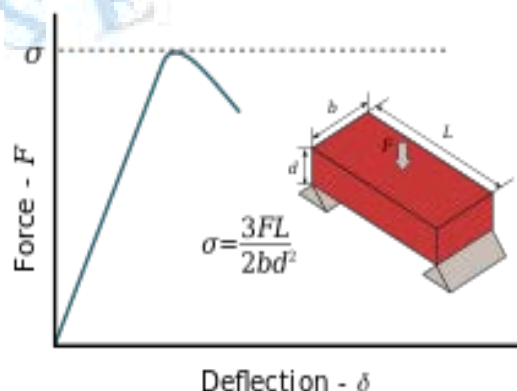
طرح اختلاط S مربوط به نمونه ای است که در آن هیچ مواد افزودنی استفاده نشده است و از آن به عنوان نمونه شاهد نام برده شده و طرح اختلاطهای G1S, G2S, و G3S مربوط به نمونه‌های دارای الیاف شیشه با درصد‌های متفاوت می‌باشد. طرح G4S از نمونه‌های الیافدار با نسبت آب به سیمان متفاوت می‌باشد و طرح‌های FS و ZS به ترتیب دارای خاکستر بادی و پودر زئولیت و همچنین طرح FZS حاوی خاکستر بادی و پودر زئولیت به صورت توأم می‌باشد. در حالت کلی آنچه می‌توان از جدول ( ۴ ) نتیجه گرفت این است که افزودن الیاف شیشه تا مقدار ۳ درصد وزنی سیمان، عامل اصلی در میزان مقاومت فشاری LWAC است. در طرح G4S با افزودن نسبت آب به سیمان به میزان ۰,۳ درصد شاهد کاهش محسوس در مقاومت فشاری هستیم.

## ۲-۴ مقاومت خمشی:

برای بررسی مقاومت خمشی تیر سبک سازه‌ای با افزودنی‌هایی مانند الیاف شیشه، پودر زئولیت و خاکستر بادی، نمونه‌هایی به اندازه ۱۰cm\*۱۰cm\*50cm از هر طرح اختلاط بتنی ساخته شد و بعد از عمل‌آوری همانند نمونه‌های فشاری، توسط دستگاه خمش طبق معیارها و شرایط ASTM C 293 [۲۲] (شکل (۱) و شکل (۲)) شکسته شدند و داده‌های مورد نیاز اعم از بیشترین نیرو خمشی و حداکثر خیز تحمل شده تیرها بدست آمد.



شکل (۲) آزمایش خمش سه نقطه ای



شکل (۱) منحنی تنش - کرنش بتن

ما برای مقایسه تیرها از مدول گسیختگی (رابطه ۱) که معیاری از ظرفیت نهایی تیر می‌باشد استفاده کردیم. مدول گسیختگی برابر با نسبت لنگر خمشی در نقطه گسیختگی به مدول مقطع تیر می‌باشد. مدول گسیختگی در واقع همان مقاومت کششی در خمش می‌باشد.

$$R = 3 PL / 2bd^2 \quad (1)$$

R=مدول گسیختگی ( $kg/cm^2$ ) P=بیشترین نیروی وارده (kg) L=طول نمونه (cm) b=عرض متوسط نمونه (cm) d=عمق متوسط نمونه (cm)



شکل (۳) شکستن تیر توسط دستگاه خمش

جدول شماره (۵) شامل مشخصات تیرهای ساخته شده از ۸ طرح اختلاط متفاوت همراه با تمام مصالح بکار رفته و نسبت آب به سیمان و نتایج بدست آمده از آزمایش خمشی تیرها میباشد. نتیجه میگیریم که مدول گسیختگی تیرها با افزودن الیاف شیشه ای تا مقدار مشخص، افزایش می یابد اما افزودن پودرزئولیت و خاکستر بادی در مواردی باعث افزایش و در مواردی باعث کاهش مدول گسیختگی شده است و دلیل آن هم بیشتر بستگی به واکنش های شیمیایی صورت گرفته مابین سیمان، پودرزئولیت و خاکستر بادی در مخلوط بتن میباشد.

جدول (۵) مدول گسیختگی نمونه تیرهای سبک سازه ای

ردیف	نام طرح	سیمان ( $Kg/m^3$ )	درشت دانه اسکوریا ( $Kg/m^3$ )	ریز دانه اسکوریا ( $Kg/m^3$ )	ماسه ( $Kg/m^3$ )	الیاف ( $Kg/m^3$ )	خاکستر بادی ( $Kg/m^3$ )	پودر زئولیت ( $Kg/m^3$ )	W/C	مدول گسیختگی ۲۸ روزه ( $Kg/Cm^2$ )	وزن مخصوص یک روزه ( $Kg/m^3$ )
۱	BS	450	515.3	554	257.6	-	-	-	0.45	45.61	۱۸۶۸
۲	BG1S	450	515.3	554	257.6	13.5	-	-	0.45	45.7	۱۹۰۵
۳	BG2S	450	515.3	554	257.6	9	-	-	0.45	36.45	۱۸۷۵
۴	BG3S	450	515.3	554	257.6	6.75	-	-	0.45	21.69	۱۸۷۴
۵	BG4S	450	530	568.5	228.5	6.75	-	-	0.48	37.19	۱۸۷۳
۶	BFS	450	515.3	554	257.6	-	67.5	-	0.45	35.41	۱۹۳۴
۷	BZS	450	515.3	554	257.6	-	-	67.5	0.45	39.95	۱۸۹۶
۸	BFZS	450	515.3	554	257.6	-	67.5	67.5	0.45	49.5	۱۸۸۰

#### ۴-۳ شاخص مقاومت خمشی:

در این تحقیق نمونه های مورد آزمایش دارای جرم حجمی متفاوتی هستند و این باعث شده وزن تیرهای مورد آزمایش متفاوت باشند به همین دلیل ما برای مقایسه تیرها با یکدیگر مجبور به دخالت وزن تیرها هستیم به همین منظور از شاخص مقاومت خمشی با نسبت مدول گسیختگی به وزن مخصوص استفاده کردیم و تیری که بیشترین شاخص مقاومت خمشی را داشته باشد بهترین تیر شناخته میشود.

$$S = \frac{\text{مدول گسیختگی } (kg/cm^2)}{\text{وزن مخصوص } (kg/m^3)} = \text{شاخص مقاومت خمشی}$$

جدول ( ۶ ) شاخص مقاومت خمشی

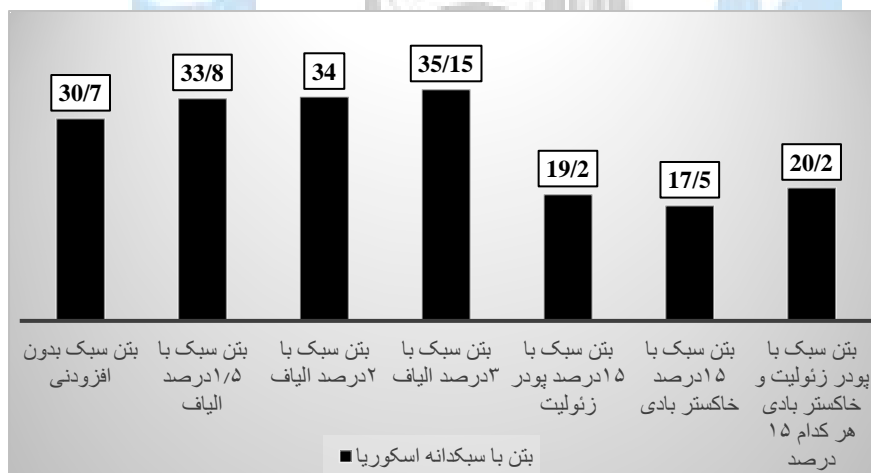
ردیف	نام طرح	$f_c$ (Mpa) ۲۸ روزه	مقاومت خمشی ۲۸ روزه kg/cm2	وزن مخصوص (یک روزه) (Kg/m <sup>3</sup> )	وزن مخصوص خشک (Kg/m <sup>3</sup> )	شاخص مقاومت خمشی S
۱	BS	36.4	45.61	۱۸۶۸	۱۸۳۴	0.0245
۲	BG1S	۴۲.۷	45.7	۱۹۰۵	۱۸۳۴	0.0240
۳	BG2S	۳۹.۴	36.45	۱۸۷۵	۱۸۰۱	0.0195
۴	BG3S	۳۵.۳	21.69	۱۸۷۴	۱۷۹۴	0.0116
۵	BG4S	۳۱.۳	37.19	۱۸۷۳	۱۷۶۰	0.0198
۶	BFS	۲۷.۳	35.41	۱۹۳۴	۱۷۳۰	0.0183
۷	BZS	۳۲.۶	39.95	۱۸۹۶	۱۷۴۰	0.0211
۸	BFZS	26	49.5	۱۸۸۰	۱۷۵۵	0.0263

با توجه به جدول بالا در حالت کلی تیرهایی که دارای وزن سبکتر هستند شاخص مقاومت خمشی بیشتری از خود نشان میدهند

## ۵- ارزیابی نتایج داده‌های آزمایش

### ۵-۱ مقدمه

با توجه به فعالیت های عملی و آزمایشهای انجام شده برای این تحقیق، در این فصل سعی شده تمام یافته‌های بدست آمده به طور مفصل تجزیه و تحلیل گردد این یافته‌ها شامل مقاومت فشاری ۷ روزه و ۲۸ روزه برای ۸ طرح اختلاط بتن سبک، روند رشد مقاومت فشاری برای بتن سبک با سنگدانه های مختلف و با افزودنی های متفاوت، مقدار جذب آب، مقاومت خمشی تیرهای ساخته شده برای تمام طرح‌های اختلاط و در نهایت مقایسه تمام نتایج بدست آمده ارائه میگردد.



شکل ( ۴ ) مقایسه مقاومت فشاری ۷ روزه (mpa)

نکته قابل توجه این است که بر اساس نتایج آزمایشات انجام شده رسیدن به یک عدد خاص در آزمایش اسلامپ رسیدن به هدف که بدست آوردن مقاومت بالاتر است را تضمین نمی‌کند و آن طور که مشاهده شد برخی نمونه‌ها با وجود عدم داشتن اسلامپ مطلوب در حین ویبره از شیره سیمان کافی برخوردار بودند و شاهد مقاومت های بالاتر در مقایسه با نمونه‌هایی با اسلامپ مطلوب بودیم. از سوی دیگر در آب به سیمان های پایین تر به دلیل عدم پوشش سنگدانه با شیره سیمان به اندازه کافی بتن با اسلامپ ریزشی و با مقاومت پایین حاصل شد. در نتیجه تعیین آب به سیمان بهینه در بتن های حاوی اسکوریای درشت دانه حائز اهمیت است که این نیز تاییدی بر استفاده از فوق روان کننده در بتن‌های فوق‌الذکر می‌باشد.

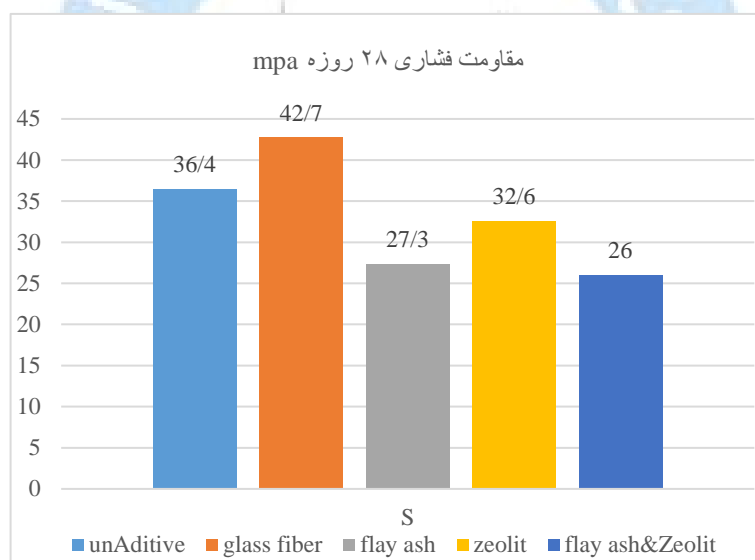


با توجه به نمودار فوق به این نتیجه میرسیم که افزودن الیاف شیشه‌ای با درصد های متفاوت ۱،۵، ۲ و ۳ باعث افزایش مقاومت فشاری بتن شده است البته با درصدهای ۵ و ۱۰ نیز آزمایش انجام شد که نتایج حاصله، کمتر از بتن با الیاف شیشه‌ای ۳ درصد بود علت این امر به عدم درگیری سنگدانه‌ها موقع افزودن بیش از حد الیاف در بتن میباشد. جایگزینی پودر زئولیت و خاکستر بادی، هر کدام به جای ۱۵ درصد وزنی سیمان باعث کاهش تا  $\frac{1}{3}$  مقاومت فشاری در بتن های حاوی سنگدانه اسکوریا گردید همچنین در طرح‌هایی که خاکستر بادی و پودر زئولیت به طور هم زمان و هر کدام به میزان ۱۵ درصد وزنی سیمان اضافه شدند شاهد کاهش مقاومت فشاری در طرح‌ها بودیم بررسی‌ها نشان میدهد واکنش شیمیایی ایجاد شده بین خمیر بتن که حاصل اختلاط آب، سیمان، پودر زئولیت و خاکستر بادی می باشد تاثیر بسزایی بر مقاومت فشاری بتن دارد افزودن الیاف شیشه به مخلوط بتن تا یک مقدار معین، باعث درگیری بیشتر سنگدانه ها گردیده و افزایش مقاومت نهایی را در پی دارد.

## ۲-۵ مقایسه نتایج بدست آمده از مقاومت فشاری ۲۸ روزه طرح‌های اختلاط

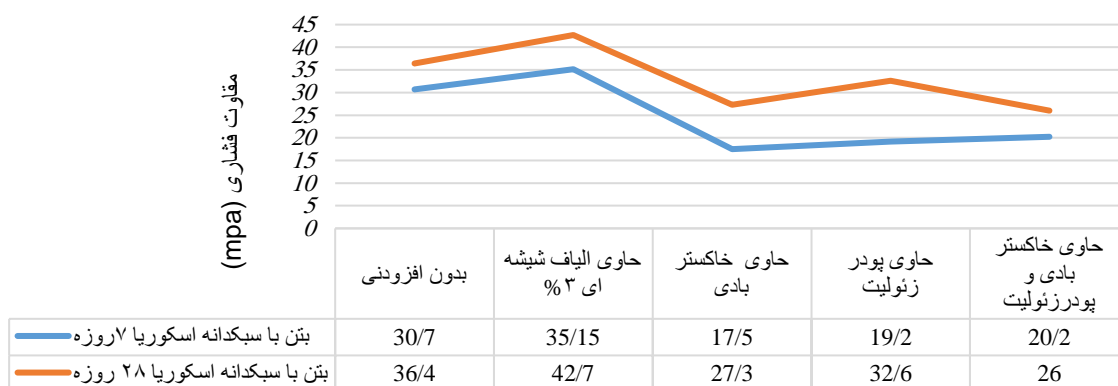
با توجه به شکل (۵) و نتایج بدست آمده از نمونه‌های فشاری ۲۸ روزه می توان دریافت همه نمونه‌ها دارای افزایش مقاومت فشاری هستند و این یک امر بدیهی است اما افزایش مقاومت در نمونه‌ی حاوی زئولیت چشمگیر تر از بقیه نمونه‌ها میباشد و میتوان نتیجه گرفت که مخلوط سیمان در حضور پودر زئولیت و با گذشت زمان مقاومت بیشتری نسبت به خاکستر بادی از خود نشان میدهد.

شکل ( ۵ ) مقایسه مقاومت فشاری ۲۸ روزه



## ۳-۵ مقایسه روند رشد مقاومت فشاری

روند رشد مقاومت فشاری برای همه طرح‌های اختلاط بتن سبک بررسی شده و نتایج حاصل در شکل‌های زیر آورده شده است با توجه به موازی بودن تقریبی خطوط موجود در نمودارها میتوان به این نتیجه رسید که هر کدام از بتن‌های ساخته شده با سه سنگدانه اسکوریا، پومیس و لیکا دارای روند رشد با درصد مشابهی میباشند و علت این امر بیشتر بستگی به نحوه ی عمل‌آوری بتن میباشد از آنجا که همه نمونه ها در محیطی با شرایط یکسان عمل‌آوری شده اند دارای روند رشد نزدیک به هم میباشند.



شکل (۶) مقایسه روند رشد مقاومت فشاری برای بتن های ساخته شده با اسکوریا

#### ۴-۵ جذب آب و مقاومت فشاری

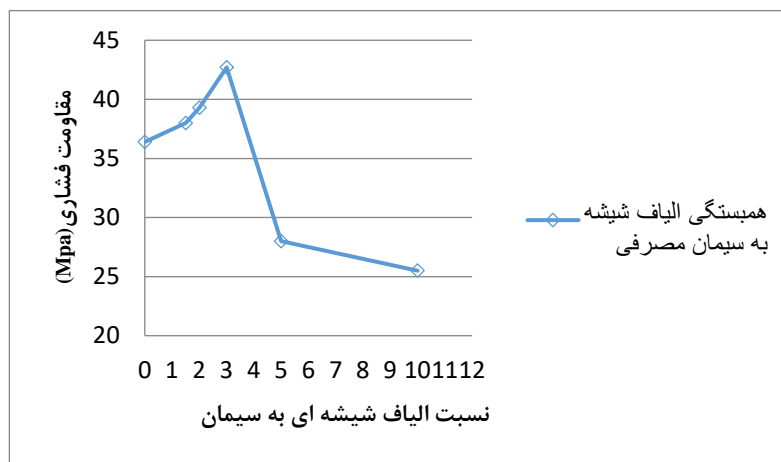
با مشاهده شکل (۷) پی خواهیم برد که میزان جذب آب نمونه‌ها به طور غیرمستقیم به مقاومت فشاری آن‌ها بستگی دارد. به طوری که در هر یک از نمونه‌ها، افزایش مقاومت فشاری با کاهش جذب آب آن‌ها همراه بوده و بالعکس. با بررسی نتایج بدست آمده و ساختار ساختمانی نمونه‌های حاصل می‌توان گفت هر چه سنگدانه‌ها به هم پیوسته‌تر و مخلوط بتنی دارای الیاف باشد میزان تخلخل کمتر و مقدار جذب آب نیز خواهد بود.



شکل (۷) جذب آب و مقاومت فشاری نمونه‌ها

## ۵-۵ الیاف شیشه و مقاومت فشاری

یکی از اهداف اصلی این تحقیق یافتن تاثیر الیاف شیشه بر روی رفتار خمشی تیرهای سبک سازه‌ای است اما به اقتضای نیاز، آزمایش‌هایی با ۱،۵، ۲، ۳، ۵ و ۱۰ درصد الیاف شیشه‌ای، برای دست‌یابی به تاثیر این الیاف بر روی مقاومت فشاری نمونه‌های سبک بتنی نیز انجام پذیرفت با توجه به شکل (۸) که حاصل نتایج بدست آمده از آزمایشها میباشد به این نتیجه میرسیم که با افزودن الیاف شیشه‌ای تا مقدار ۳ درصد وزنی سیمان، به طرح‌های اختلاط بتنی سبک، شاهد افزایش مقاومت فشاری هستیم اما موقعی که مقدار الیاف را از ۳ درصد بیشتر میکنیم شاهد کاهش مقاومت فشاری هستیم این نشان میدهد که افزودن الیاف شیشه‌ای برای بتن یک مقدار بهینه دارد و استفاده الیاف بیش از این مقدار باعث نتیجه بالعکس و کاهش مقاومت فشاری میگردد. چون الیاف زیاد باعث عدم درگیری بین سنگدانه‌های بتن میشود و موقع فشار به گسیختگی بین سنگدانه‌ها کمک میکند.

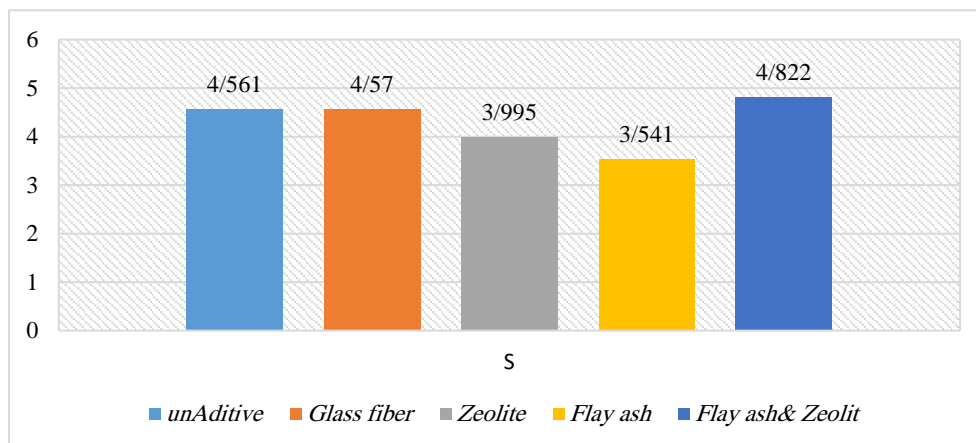


شکل (۸) همبستگی الیاف شیشه به سیمان مصرفی

## ۵-۶ ظرفیت نهایی تیرهای سبک سازه‌ای

برای بدست آوردن ظرفیت نهایی تیرها از مدول گسیختگی تیر که برابر است با نسبت لنگر خمشی در نقطه گسیختگی، به مدول مقطع تیر، استفاده کردیم. بیشترین مدول گسیختگی در نمونه‌ها مربوط به طرح اختلاطی است که در آن از الیاف شیشه‌ای به میزان ۳ درصد وزنی سیمان استفاده شده است در واقع می‌توان گفت افزودن الیاف شیشه به بتن سبک نتیجه‌ای مثبت در افزایش مقدار باربری تیر خواهد داشت و با شکل پذیر کردن تیر ظرفیت آن را افزایش می‌دهد.

افزودن پودر زئولیت و خاکستر بادی به تنهایی باعث کاهش، ولی افزودن آنها به صورت یکجا، باعث افزایش مدول گسیختگی در بتن سبک حاوی سنگدانه اسکوریا شده است با این توصیف می‌توان گفت پودر زئولیت و خاکستر بادی در حضور یکدیگر خاصیت چسبندگی همانند سیمان بدست آورده و باعث بهبود ظرفیت نهایی تیر می‌شوند.

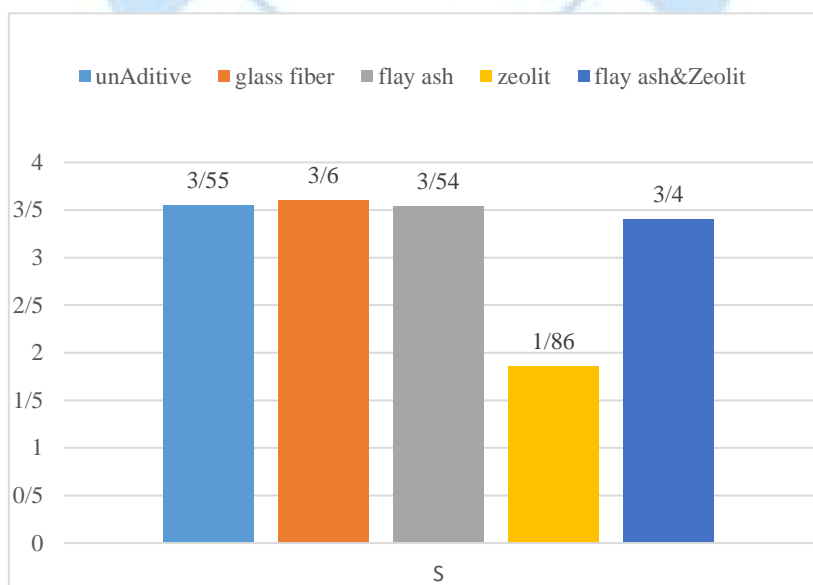


شکل (۹) مدول گسیختگی تیرهای مورد آزمایش ( $\frac{N}{CM^2}$ )

در حالت کلی میتوان به این نتیجه رسید که از الیاف شیشه‌ای جهت بالا بردن مقاومت خمشی میتوان استفاده نمود اما کاربرد پودرزئولیت و خاکسترآبادی در حضور همدیگر باعث دسترسی به این امر مهم میشود.

#### ۷-۵ خیز نهایی در تیر

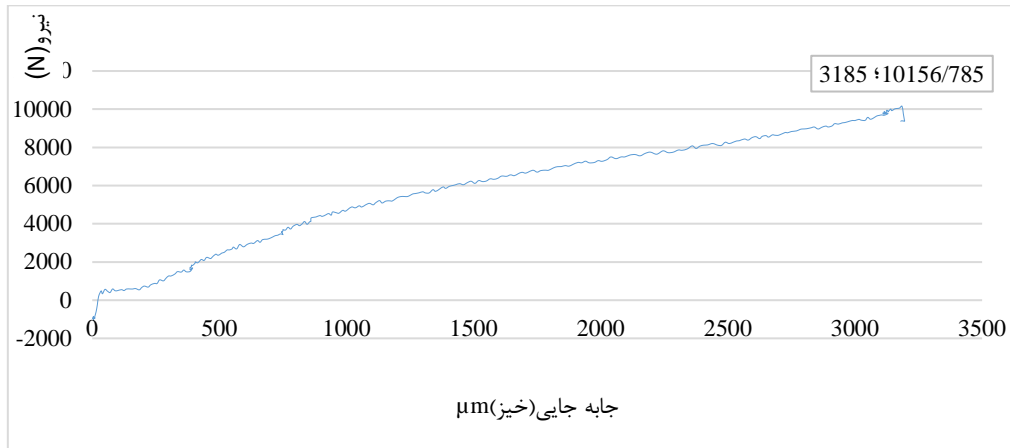
در این تحقیق یکی از هدف‌های مورد نظر محاسبه خیز تیرهای مورد آزمایش و مقایسه آنها با هم بود در همین راستا خیز تیرها توسط دستگاه خمش مورد اندازه‌گیری قرار گرفت و درنگاه کلی می توان گفت خیز تیر رابطه مستقیمی با مقدار مقاومت فشاری بتن مورد استفاده دارد به طوری که مقاومت فشاری قسمت فوقانی تار خنثی نقش اصلی را در کسب بیشترین خیز نهایی را در تیر دارد. در نگاه جزئی افزودن الیاف شیشه به تیرها باعث شده خیز برابر و درمواردی بیشتر بدست آید و این حاکی از این است که استفاده از الیاف شیشه در تیر های سبک سازه ای خیلی مفید می باشد. افزودن پودر زئولیت تغییر چندانی در خیز تیر ایجاد نمیکند اما خاکسترآبادی همان طور که باعث کاهش مقاومت فشاری میگردد باعث کاهش خیز در تیر ها نیز شده است.



شکل (۱۰) خیز نهایی در تیرهای مورد آزمایش (mm)

۵-۸ نمودار نیرو و خیز

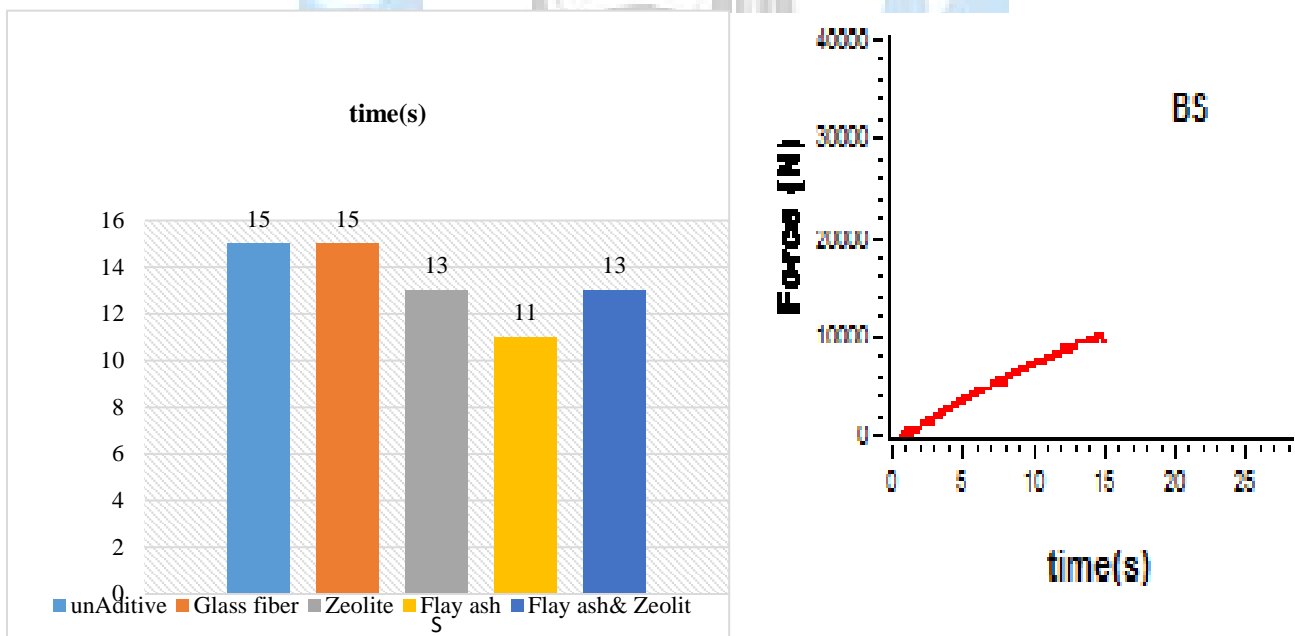
در زیر نمودار مربوط به یک نمونه تیر حاوی سنگدانه اسکوریا با ۳ درصد الیاف شیشه‌ای را نشان می‌دهد با توجه به این نمودار مشخص می‌شود نحوه اعمال نیرو و جابه جایی یا خیز به صورت خطی می‌باشد.



شکل (۱۱) نمودار نیرو و خیز تیر G1S

۵-۹ زمان شکست نمونه تیرهای مورد آزمایش

قبل از انجام آزمایش شکست بر روی تیرهای خمشی انتظار می‌رفت تیرهایی که در آنها از الیاف شیشه‌ای استفاده شده است زمان طولانی تری تا مرحله شکست از خود نشان دهند و این فرضیه بعد از انجام آزمایش و بررسی داده‌ها به خوبی محقق شد.



شکل (۱۲) زمان شکست نمونه تیرهای مورد آزمایش

۶- نتیجه گیری

با توجه به بررسی‌های آزمایشگاهی و تجزیه و تحلیل‌های انجام شده می‌توان نتیجه‌گیری‌های نهایی زیر را مطرح نمود:

۱. با استفاده از مواد سیمانی با عیار  $450 \text{ Kg/m}^3$  و نسبت آب به سیمان ۰,۴۵، جایگزینی خاکستر بادی و پودر زئولیت به مقدار ۱۵ درصد وزنی سیمان، افزودن الیاف شیشه به میزان ۳ درصد وزنی سیمان، اسکوریا با بیشینه اندازه ۱۹ میلی متر، ماسه معمولی، سیمان پرتلند نوع ۲، فوق روان کننده به میزان ۱ درصد وزن مواد سیمانی، بیشترین مقاومت فشاری ۲۸ روزه بین نمونه‌ها، مربوط به مخلوط GIS بوده که برابر  $42,7 \text{ mpa}$  است. کمترین مقاومت فشاری ۲۸ روزه مربوط به مخلوط FZS است که برای نمونه مکعبی برابر  $26 \text{ mpa}$  است.
۲. جذب آب در مخلوط دارای ۳ درصد الیاف شیشه، کمترین مقدار و در مخلوط حاوی پودر زئولیت و خاکستر بادی، بیشترین مقدار است و این جذب بودن پودر زئولیت و خاکستر بادی حتی در حضور سیمان را نشان می‌دهد با هیدراته شدن خمیر سیمان در سنین بالا درصد جذب آب بتن کاهش می‌یابد. نتایج جذب آب آزمونه‌ها عملاً با مقاومت فشاری نمونه‌ها رابطه معکوس دارد.
۳. افزودن الیاف شیشه تا ۳ درصد وزنی سیمان به مخلوط بتن سبک باعث افزایش مقاومت فشاری اما در ۵ و ۱۰ درصد شاهد کاهش مقاومت فشاری بودیم.
۴. بیشترین ظرفیت نهایی (مقاومت خمشی) تیر سبک سازه‌ای مربوط به مخلوط BFZS که دارای پودر زئولیت و خاکستر بادی به میزان ۱۵ درصد وزنی سیمان به صورت یکجا و برابر با  $49,5 \text{ kg/cm}^2$  است و کمترین آن مخلوط BFS، با ۱۵ درصد خاکستر بادی برابر با  $35,41 \text{ kg/cm}^2$  می‌باشد در نتیجه پودر زئولیت و خاکستر بادی در حضور یکدیگر خاصیت چسبندگی همانند سیمان بدست آورده و در مقایسه نمونه بدون افزودنی باعث بهبود ظرفیت نهایی تیر شده است.
۵. بیشترین خیز نهایی تیر مربوط به طرح BGIS با ۳ درصد الیاف شیشه، برابر با  $3,6$  میلی متر است در تیر بتنی سبک ساخته شده و نمونه‌های فشاری، در کرنش‌های زیاد، به علت وجود شبکه‌ای از الیاف تا ۳ درصد وزنی سیمان و انعطاف پذیری حاصله، از تردی و شکست آن جلوگیری می‌کند و باعث افزایش تا ۲۰ درصد مقاومت فشاری و ۱۰ درصد مقاومت خمشی می‌گردد.
۶. وجود الیاف شیشه، پودر زئولیت و خاکستر بادی باعث انعطاف‌پذیری بتن و جلوگیری از ترک‌خوردن آن موقع آزمایش خمشی و فشاری شد و ترک‌های ایجاد شده به صورت مویی و با تعداد زیاد مشاهده گردید.

## منابع

- [1]. تدین، محسن، " (۱۳۸۱) ، بررسی و ارزیابی مقاومت کششی، مدول ارتجاعی، ضریب پواسون و شدت خوردگی بتن سبک پر مقاومت با مصالح موجود در ایران"، پایان نامه دکتری، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.
- [۲]. Ke Y., Beacour A.L., Ortola S., Dumontets H., Cabrillac R (2009)., "Influence of volume fraction and characteristics of lightweight aggregates on the mechanical properties of concrete", 23(8):2821-2828 .
- [۳]. Demirboga R., Orung I., Gul R., "Effects of expanded perlite aggregate and mineral admixtures on the compressive strength of lowdensity concretes". 31(11) (2001) 1627-1632 .
- [۴]. Chen H.J., Yen T., Lia T.P., Huang Y.L. (1999), "Determination of dividing strength and it's relation to the concrete strength in lightweight aggregate concrete", *Cement and Concrete Composition* , Vol. 21, 29-37.
- [۵]. Nanni. A. , and gold. W. (1998), "strength assessment of external frp reinforcement", , Vol. 20, No. 6, PP. 39- 42.
- [۶]. Nanni, a. , Focacci, And Codd.c.a. (1988) , "Proposed Procedure for the Design of RC Flexural Members Strengthened with FRP Sheets", *proceeding ICCI, Tucson, Ariz.* , Vol. PP. 187- 201.
- [۷]. Jackson, J.A., J. Mehl, and K. Neuendorf (2005) Glossary of Geology , *American Geological Institute*, Alexandria, Virginia. 800 pp.

- [۸]. Craig, R. McConnell, J. Germann, H. Dib, N. and Kashani, F., (1984), "Behavior of reinforced fibrous concrete columns," *ACI Special publication*, SP 81, pp 69-105.
- [۹]. Traina, L.A. and Mansour, S.A., (1991), "Biaxial strength deformational behavior of plain steel fiber concrete," *ACI Journal*, 88 (4), pp 354-362.
- [۱۰]. Ahmed El Refaia, Farid Abedb, Abdullah Al-Rahmanib (2015), Structural performance and serviceability of concrete beams reinforced with hybrid (GFRP and steel) bars , , Pages 518-529
- [۱۱]. European Union-Brite Euram III, (1998), "Definitions and international consensus report, BE96-3942/R1".
- [۱۲]. Fanella, D.A. and Naaman, A.E., (1985), "Stress - strain properties of fiber reinforced mortar in compression," *ACI Journal*, 82 (4), pp 475-483.
- [۱۳]. Paweł Walczaka, Jan Małolepszyb, Manuela Rebenb, Karol Rzepab (۲۰۱۵). Mechanical properties of concrete mortar based on mixture of CRT glass cullet and fluidized fly ash, *Procedia Engineering*, pages 453 - 458.
- [۱۴]. Payam Shafigh, U. Johnson Alengaram, Hilmi Bin Mahmud, Mohd Zamin Jumaa, (August 2013) , Engineering properties of oil palm shell lightweight concrete containing fly ash, *Materials and Design* , Pages 613-621.
- [۱۵]. Tommy Yiu Lo, Hongzhi Cui, Shazim Ali Memon, , Takafumi Noguchi (2016) , Manufacturing of sintered lightweight aggregate using high-carbon fly ash and its effect on the mechanical properties and microstructure of concrete. *Journal of Cleaner Production* , Pages 753-762., Part 1,
- [۱۶]. ASTM D75 / D75, Standard Practice for Sampling Aggregates, ASTM International.
- [۱۷]. ASTM C136 / C136, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, ASTM International.
- [۱۸]. ASTM C۳۳۰-۹۹, "Standard specification for lightweight aggregates for structural concrete", American Society for Testing And Materials, March 1999 .
- [۱۹]. ASTM C150-99a, "Standard specification for portland cement", American Society For Testing And Materials, November 1999.
- [۲۰]. ASTM C 494/C, "Standard specification for chemical admixtures for concrete", American Society For Testing And Materials, December 1999.
- [۲۱]. ACI 211.2-98, "Standard practice for selecting proportions for structural lightweight concrete", American Concrete Institute, 1998.
- [۲۲]. ASTM C293 / C293, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading), ASTM International.
- [۲۳]. Lathi Karthi, Alester Joseph Vanreyk & Krishna Lekha (2017) Effect of zeolite powder on mechanical properties of concrete, *International Journal of Development Research*, Volume: 7 Article ID: 9172 -4 pages.
- [۲۴]. Nikola Tosic, Snezana Marinkovic, Nenad Pecic (2018) Long-term behaviour of reinforced beams made with natural or recycled aggregate concrete and high-volume fly ash concrete, *Construction and Building Materials*, Pages 344-358.