

## بررسی آزمایشگاهی اثر الیاف شیشه ، پلی اتیلن و پلی پروپیلن بر بتن سبک سازه ای با مقاومت بالا

### کد E

مجید جمشیدی<sup>۱</sup> ، مهدی یار توفیقی<sup>۲\*</sup> ، علی برومند زاده<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکترا ژئوتکنیک، گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، (استاد راهنما)  
۲ و ۳. دانشجوی کارشناسی مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اراک

#### چکیده

استفاده از بتن با وزن مخصوص کمتر از ۱۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب و مقاومت فشاری بیش از ۱۷ مگاپاسکال (بتن سبک سازه ای) در سازه های بتن مسلح باعث کاهش بار مرده سازه گشته . سبکی وزن کلی ساختمان باعث کم شدن ریسک خرابی ساختمان در اثر امواج زلزله می شود . در این مقاله برای رفع ضعف هایی مثل وزن زیاد ، مقاومت کششی کم، تردشکنندگی و عدم شکل پذیری از الیاف های مختلف مانند الیاف شیشه، پلی اتیلن و پلی پروپیلن با درصدهای ۱ و ۲ درصد وزن سیمان استفاده شده است . بدین ترتیب در طرح اختلاطها از ۱۰ درصد میکروسیلیس به صورت پودری ( خشک ) و ۲۰ درصد پودر سنگ و فوق روان کننده به میزان متغیر برای کنترل کارایی بتن در هر طرح استفاده شد تا بهترین طرح اختلاط با انجام آزمایش های مختلف چگالی بتن تازه و بتن سخت شده ، مقاومت فشاری ، مقاومت کششی غیر مستقیم در سن ۷ و ۲۸ روز بدست آید . طبق آزمایش های انجام شده مشخص شد با استفاده از الیاف می توان بتن سبک با مقاومت فشاری بین ۳۵ تا ۴۰ مگاپاسکال داشت. که وجود الیاف اثرات چشمگیری بر مقاومت کششی بتن حاوی لیکا و تغییر مود شکست از ترد به نرم دارد اما این تاثیرها برای همه الیاف ها یکسان نمی باشد.

واژه های کلیدی : بتن سبک سازه ای ، الیاف شیشه ، الیاف پلی اتیلن ، الیاف پلی پروپیلن ، خواص مکانیکی

## ۱- مقدمه

بتن به عنوان پرمصرف ترین ماده بعد از آب که در اغلب کشورها جز لاینفک ساخت و ساز محسوب می‌شود و همه روزه به منظور استفاده بهینه از این محصول، با ارائه تکنولوژی‌های تازه‌تر و روشهای جدید، گام‌های موثرتری برداشته می‌شود، به همین منظور سبک سازی و اجرای درست سازه‌های بتنی که یکی از راهکارهای مقاوم سازی در برابر زلزله می‌باشد در این برهه زمانی مورد توجه قرار گرفته است و در راستای سبک سازی سازه‌ها، مهندسان با روش‌های گوناگون از جمله استفاده از سنگدانه های سبک توانستند بتن سبک را تولید کنند.

ساخت این گونه بتن ها در کشورمان از چند دهه گذشته شروع شد که از پوکه سنگ های طبیعی نظیر پرلیت و برخی توف ها در ساخت بتن های سبک استفاده شد. با توجه به خواص خوب عایق حرارتی، سبکی، نیاز به ساخت این نوع بتن بیشتر احساس می‌شد. خوشبختانه در سال های اخیر ساخت انواع بتن های سبک توسعه قابل ملاحظه ای یافت و می‌تواند در آینده نه چندان دور در نقاط مختلف کشورمان فراگیر شود [۱]. بتن سبک با توجه به ویژگیهای خاصی که دارد دارای کاربردهای مختلف میباشد. از جمله کاربردهای این نوع بتن استفاده از آن در ساخت و سازه‌های بلند مرتبه، پلها با دهانه های بزرگ، سازه های دریایی، مصالح زیرساز برای روسازی راه، ونیز به عنوان جاذب انرژی در سازه های نظامی مدفون را میتوان نام برد [۲].

از آنجایی که بتن سبک مانند بتن معمولی ترد و شکننده است برای رفع این مشکل می‌توان از الیاف های مختلفی در این نوع بتن استفاده کرد، تا با ایجاد شرایط یکنواختی، بر خاصیت شکل پذیری بتن بیافزاید و خصوصیات مکانیکی آن را تا حدی بهبود بخشد [۳].

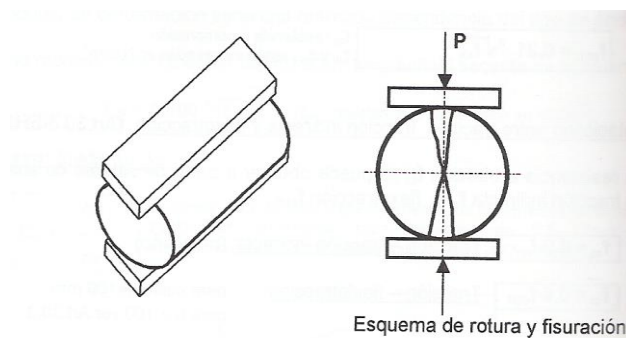
امروزه از الیاف فولادی، شیشه ای، پلاستیکی و ... به عنوان مواد مسلح کننده برای ایجاد بتن با دوام و پایایی بالا در تونل ها و سازه های زیر زمینی استفاده می‌شود. قابلیت انعطاف بتن الیافی باعث می‌شود که بتن گسیختگی ناگهانی نداشته باشد. هدف از کاربرد الیاف در بتن افزایش مقاومت کششی، کنترل گسترش ترک ها و افزایش طاقت بتن است تا قطعه بتنی بتواند در مقابل بارهای وارده در یک مقطع ترک خورده تغییر شکل های زیادی را پس از نقطه حداکثر تنش تحمل نماید. در کشور ما، ایران، نیز به دلیل موقعیت خطرناک از نظر لرزه خیزی و البته وجود منابع فراوان پوکه های معدنی و صنعتی تحقیقات بسیاری درباره بتن حاوی سبکدانه ها صورت گرفته است. مستوفی نژاد و فرحبد در تحقیقی در سال ۸۲ خواص مکانیکی بتن سبک حاوی لیکا و پومیس و میکروسیلیس را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که استفاده از ۱۰٪ میکروسیلیس در ساخت بتن سبک با هردو نوع سبکدانه هرچند که سبب بهبود مشخصه های مکانیکی نسبت به بتنهای سبک معمولی شده است ولی این تاثیر چندان قابل ملاحظه نیست؛ به گونه ای که مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته بین ۵ تا ۱۰٪ افزایش یافته است [۴].

مصرف بیشتر سیمان منجر به انتشار بیشتر گازهای گلخانه‌ای از جمله [۵] CO<sub>2</sub>، آلوده شدن محیطزیست، ایجاد مشکلات پایداری ابعادی در بتن [۶] و غیره میشود. یکی از راه های برطرف کردن این مشکلات استفاده از مواد پوزولانی در بتن است که در سال های اخیر مورد توجه پژوهشگران زیادی قرار گرفته است. پوزولان ها با ترکیب آهک هیدراته که حاصل از واکنشهای هیدراته شدن فازهای اصلی سیمان بوده یا به صورت آزاد در سیمان وجود دارند، موجب تشکیل سیلیکات کلسیم هیدراته میشوند که برخلاف آهک هیدراته که قابل انحلال در آب است و ممکن است موجب تخریب بتن شود، ماده های پایدار بوده و موجب بهبود خواص مکانیکی و شیمیایی خمیر سیمان میگردد [7,8]

در این پژوهش به دنبال ترکیب مناسبی از پودر سنگ، میکروسیلیس، الیاف شیشه و الیاف پلیمری با کمک روش‌های آماری داریم که خصوصیات بتن سبک پایه را بهبود ببخشد.

## • آزمایش دو نیم شدن استوانه یا آزمایش برزیلی

روش غیر مستقیمی برای اعمال کشش به شکل دو نیم کردن نمونه به وسیله فرناندوکارنیرو اهل برزیل پیشنهاد گردید. برای انجام این آزمایش یک استوانه بتنی  $300 \times 150$  میلیمتر از نوعی که برای آزمایش‌های فشاری استفاده می‌شود، روی محور افقی بین صفحات ماشین آزمایش قرار می‌گیرد، به طوریکه فشار در طول قطری از استوانه که بطور قائم قرار دارد مطابق شکل-2 وارد می‌شود.



نحوه بارگذاری نمونه استوانه‌ای در آزمایش کشش به روش برزیلی

به این ترتیب یک تنش کششی تقریباً یکنواخت در جهت عمود بر سطح بار بوجود می‌آید. بار با سرعت ثابتی اعمال می‌گردد، در حالی که تنش کششی طبق استاندارد BS 1881-83 بین 02/0 تا 04/0 مگاپاسکال در ثانیه و طبق ASTM C 496-71 بین 011/0 تا 023/0 مگاپاسکال در ثانیه قرار بگیرد. سپس مقاومت کششی دو نیم شدن با دقت 05/0 مگاپاسکال از رابطه-2 محاسبه می‌شود:

$$f_t = \frac{2P}{\pi Ld} \quad (N/mm^2)$$

که در آن  $f_t$  تنش کششی ناشی از دو نیم شدن،  $P$  ماکزیمم نیروی وارده بر حسب نیوتن،  $d$  قطر استوانه بر حسب میلیمتر و  $L$  طول استوانه بر حسب میلیمتر می‌باشد. [۱۳]

## ۲- مشخصات کامل مواد و مصالح مصرفی

در این پروژه از سیمان تیپ ۱-۵۲۵ شهرکرد با وزن مخصوص  $3/14$  گرم بر سانتی مترمکعب، که آنالیز شیمیایی آن در جدول شماره ۱ آمده، استفاده شده است. میکروسیلیس مصرفی ساخت کارخانه صنایع فروآلیاژ ازنا با برند «نامی کاران» به صورت پودری و خشک و با چگالی دانه‌ای ۲ گرم بر سانتی مترمکعب که مشخصات آن در جدول ۲ ذکر شده است استفاده شد. کلیه آزمایش‌های اولیه در آزمایشگاه تکنولوژی بتن دانشگاه آزاد اراک انجام شد.

جدول ۱- آنالیز شیمیایی سیمان مصرفی

ترکیب شیمیایی سیمان	درصد تشکیل دهنده	ترکیب شیمیایی سیمان	درصد تشکیل دهنده
SiO <sub>2</sub>	20.90	K <sub>2</sub> O	0.60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.0	Cl	0.013
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.30	LOI	0.93
CaO	65.02	C <sub>3</sub> S	60.80
SO <sub>3</sub>	1.80	C <sub>3</sub> A	6.0
MgO	1.02	C <sub>4</sub> AF	13.00
Na <sub>2</sub> O	0.32	C <sub>2</sub> S	14.10

جدول ۲- آنالیز شیمیایی میکروسلیس مصرفی (پودری)

SiO <sub>2</sub>	حداقل سطح ویژه	درصد کربن	افت سرخ شدن	شکل ظاهری
97.04%	20 m <sup>2</sup> /g	0.5%	1.44%	پودر خاکستری

برای افزایش کارایی از فوق روان کننده نسل سوم نوع Structuro-335 بر پایه دیسپرسیون پلیمری پلی کربوکسیلات که مشخصات آن در جدول شماره ۳ آورده شده، استفاده شده است.

جدول ۳- آنالیز فوق روان کننده مصرفی

میزان مواد قلیایی	میزان کلراید	جرم حجمی	PH	ظاهر
معمولاً کمتر از معادل ۱/۵ گرم Na <sub>2</sub> O در هر لیتر	کمتر از ۰/۱٪	۱/۱۰ کیلوگرم بر لیتر، در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد	۶/۵	مایع زرد رنگ روشن متمایل به قرمز

در این تحقیق، از پوکه صنعتی لیکای سازه‌ای به جای شن، ساخت شرکت لیکای ساوه استفاده شد. از آنجاییکه جذب آب سنگدانه‌ها در بتن حدوداً بعد از ۳۰ دقیقه متوقف می‌گردد، از جذب آب نیم‌ساعته در محاسبه طرح اختلاط استفاده شده است [۹]. برای درشت دانه حداکثر بعد سنگدانه ۱۹ میلی متر در نظر گرفته شد. مشخصات فیزیکی دانه‌های لیکا در جدول شماره ۴ آورده شده است.

جدول شماره ۴- مشخصات فیزیکی لیکای سازه‌ای

شماره الک	اندازه دانه ها (mm)	چگالی دانه ای (gr/cm <sup>3</sup> )	درصد جذب آب نیم ساعته	درصد جذب آب ۲۴ ساعته
1/2	12.5-19	0.63	10.67	13.59
3/8	9.5-12.5	0.74		
4	4.75-9.5	0.75		
8	2.38-4.75	0.97		

برای یافتن دانه بندی مناسب لیکا از طرحهای اختلاط در مرجع [۱۰,12] که براساس منحنی فولر- تامسون استوار است استفاده شد و البته با ساخت نمونه های متعدد و ایجاد تغییراتی در آنها نهایتاً بهترین ترکیب برای درشت دانه ها حاصل شد که در تمام طرح ها ثابت نگه داشته شد. همچنین از پودر سنگ آهک قم برای کاهش تخلخل و افزایش مقاومت فشاری که مشخصات آن در جدول ۵ آورده شده است، استفاده شد .

جدول ۵- آنالیز شیمیایی پودر سنگ مصرفی

افت سرخ شدن	Cl	MgO	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
%43.13	%2.0	%0.0	%55.4	%50	%50

سنگدانه های ریز مصرفی از نوع طبیعی شامل ماسه رودخانه ای شسته شده بوده است. مشخصات فیزیکی ماسه در جدول ۶ و همچنین دانه بندی آن در جدول شماره ۷ نشان داده شده است.

جدول ۶- مشخصات فیزیکی ماسه

قطر حداکثر	4.75mm
ارزش ماسه ای	77
وزن مخصوص	2.704 gr/cm <sup>3</sup>
درصد رطوبت	6.17%

جدول ۷- دانه بندی ماسه

شماره الک	درصد عبور کرده
4	100
8	82.8
16	55.37
30	36.24
50	21.1
100	6.91

دانه بندی مطابق با ASTM C136-84a و به نحوی که شرایط تعیین شده در ASTM C 33-84 ارضاء شود برای سنگدانه های مصرفی انجام گرفت. چگالی مطابق با ASTM C127-88 بدست آمد. جذب آب سنگدانه ها نیز طبق ASTM C 127-88 تعیین شد.

جدول ۸- مشخصات الیاف

نام	الیاف شیشه	الیاف پلی اتیلن	الیاف پلی پروپیلن
شکل	صاف	پیچ دار	صاف
طول (mm)	۱۸	۵۵	۱۲
قطر ( $\mu\text{m}$ )	۱۵-۳۰	۵۰-۸۰	۲۰-۳۰
چگالی ( $\text{gr/cm}^3$ )	۲/۶	۰/۹۵۰	۰/۹

### ۳- روش ساخت و نگهداری نمونه‌ها

به منظور یکسان نمودن شرایط ساخت و افزایش دقت نتایج آزمایش‌ها، روش اختلاط ثابتی برای ساخت طرح‌های اختلاط به کار گرفته شد. برای ساخت بتن سبک بعد از وزن کشی دقیق مصالح، ابتدا سیمان و میکروسیلیس خشک و پودر سنگ به خوبی باهم مخلوط شدند. این مخلوط همگن به دانه‌های لیکا و ماسه و الیاف (شیشه، پلی اتیلن، پلی پروپیلن) که به صورت خشک به مدت ۳۰ ثانیه در داخل میکسر مخلوط شده بودند، اضافه گردید و به مدت ۳۰ ثانیه دیگر عمل اختلاط ادامه یافت. در ادامه ۷۰٪ آب و سپس فوق روان کننده به ترتیب به مخلوط بتن اضافه گردید و اختلاط ۲ دقیقه دیگر ادامه یافت. در پایان باقی مانده آب اضافه می‌گردد و عمل اختلاط ۲ دقیقه دیگر هم ادامه می‌یابد تا بدین ترتیب از پخش کامل و اثرگذاری فوق‌روان کننده و پخش کامل الیاف در بتن اطمینان حاصل شود.

به منظور عمل آوری نمونه‌های بتنی پس از ساخت، به مدت ۲۴ ساعت در قالب و زیر پوشش نایلونی جهت حفظ رطوبت و سپس داخل حوضچه آب با دمای ۲۳-۱۹ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. پس از رسیدن نمونه‌ها به سن ۶ روز، از حوضچه آب خارج شدند و پس از خشک شدن در محیط آزمایشگاه در کوره حرارتی که نرخ حرارت‌دهی ۳ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه تنظیم شده بود قرار گرفتند تا نمونه‌ها به دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد رسانده شدند سپس به مدت ۲۴ ساعت در این دما نگهداری شدند و جهت سرد شدن با همان نرخ به دمای محیط برده شدند تا از خشک بودن آنها اطمینان حاصل شود، سپس در محیط آزاد قرار گرفتند.

### ۴- روش تعیین نسبت‌های اختلاط

روش تعیین طرح‌های اختلاط روش حجمی مطابق با ACI 213R-03 می‌باشد. در این روش حجم بتن تازه تهیه شده با جمع حجم‌های مطلق مواد سیمانی، سنگدانه‌ها، آب موثر، هوای محبوس و سایر مواد افزودنی مساوی در نظر گرفته می‌شود. تعیین نسبت‌های اختلاط با استفاده از این روش نیازمند تعیین میزان جذب آب و چگالی دانه‌های سنگدانه‌ها با اندازه‌ای متفاوت است [۱۰]. برای داشتن طرح اختلاط بهینه ابتدا مهم‌ترین متغیرهای موثر بر مقاومت فشاری بتن سبک در نظر گرفته می‌شوند که عبارتند از: ۱- درصد میکروسیلیس نسبت به سیمان، ۲- درصد پودر سنگ به عیار سیمان، ۳- نسبت آب به مواد سیمانی و ۴- درصد الیاف به عیار سیمان.

ما در این مقاله از یک طرح اختلاط با درصد‌های مختلف الیاف (۱ و ۲ درصد) استفاده شد. بدین ترتیب در طرح اختلاط‌ها از ۱۰ درصد میکروسیلیس و ۲۰ درصد پودر سنگ و فوق‌روان کننده به صورت متغییر استفاده شده است که در جدول ۹ آمده است. از تمامی طرح‌های پیشنهادی ۳ نمونه مکعبی  $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}$  ساخته شده و در سن ۷ روزگی مقاومت فشاری آنها اندازه‌گیری شد.

جدول ۹- جزییات مقادیر طرح های اختلاط ( $kg/m^3$ )

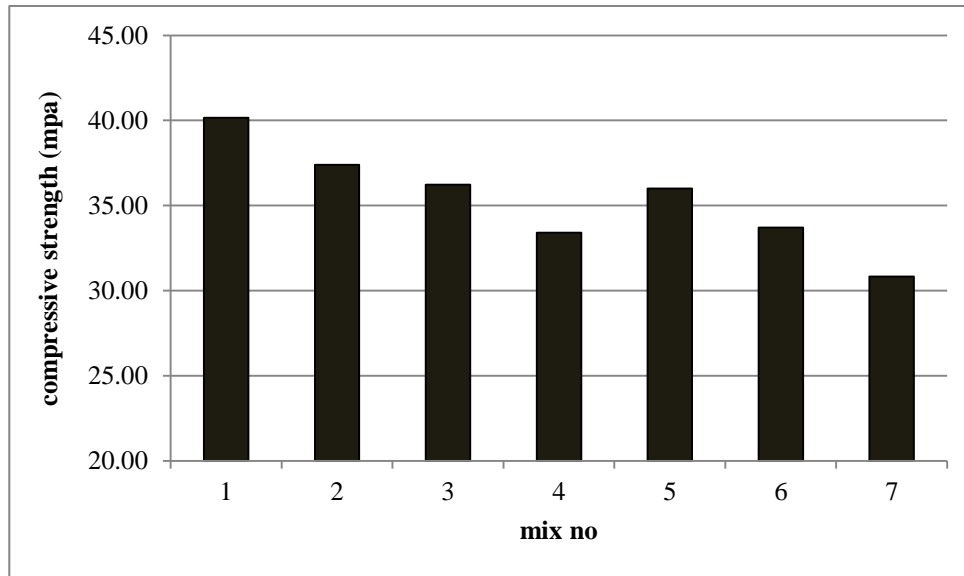
شماره طرح	سیمان	میکروسیلیس	پودر سنگ	فوق روان کننده	آب	لیکا ۳/۸	لیکا ۴	لیکا ۸	ماسه	الیاف شیشه	الیاف پلی اتیلن	الیاف پلی پروپیلن
۱	۳۲۴	۳۶	۷۲	۷/۲	۱۳۰	۷۰	۱۹۰	۱۴۰	۷۲۵	۰	۰	۰
۲	۳۲۴	۳۶	۷۲	۷/۲	۱۳۰	۷۰	۱۹۰	۱۴۰	۷۲۵	۰	۳/۶	۰
۳	۳۲۴	۳۶	۷۲	۱۰/۸	۱۳۰	۷۰	۱۹۰	۱۴۰	۷۲۵	۳/۶	۰	۰
۴	۳۲۴	۳۶	۷۲	۱۰/۸	۱۳۰	۷۰	۱۹۰	۱۴۰	۷۲۵	۰	۰	۳/۶
۵	۳۲۴	۳۶	۷۲	۱۴/۴	۱۳۰	۷۰	۱۹۰	۱۴۰	۷۲۵	۷/۲	۰	۰
۶	۳۲۴	۳۶	۷۲	۱۰/۸	۱۳۰	۷۰	۱۹۰	۱۴۰	۷۲۵	۰	۷/۲	۰
۷	۳۲۴	۳۶	۷۲	۱۴/۴	۱۳۰	۷۰	۱۹۰	۱۴۰	۷۲۵	۰	۰	۷/۲

#### ۵- تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از آزمایش ها

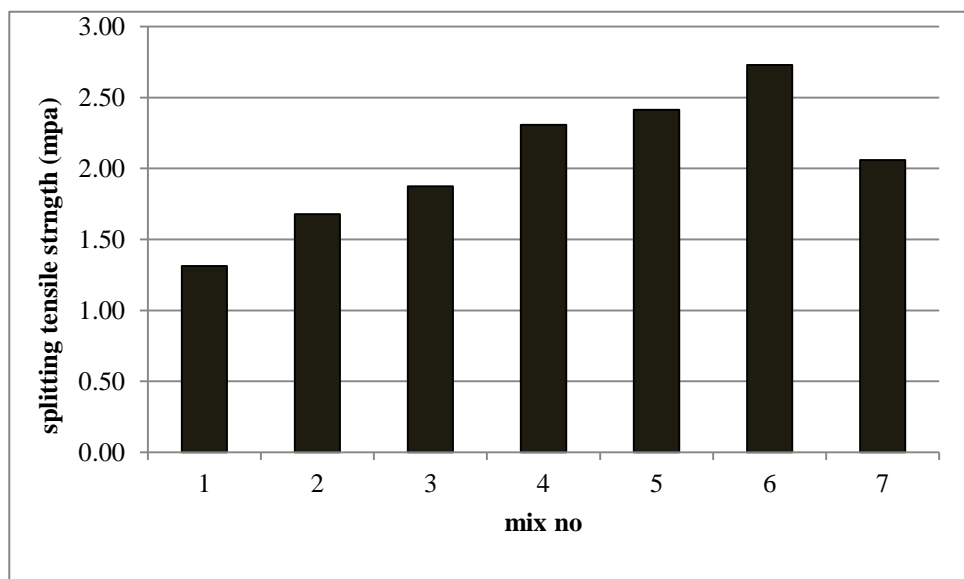
طبق آزمایشات انجام شده که عبارتند از مقاومت فشاری و مقاومت کششی غیر مستقیم نتایج بدست آمده در شکل ۱ و ۲ برای طرح های ۷ گانه ارائه شده است و نشان می دهد که افزودن الیاف های مورد استفاده در این مقاله سبب کاهش مقاومت فشاری نسبت به طرح پایه شده است. بر این اساس درکل، الیاف پلی اتیلن با ۱٪ وزنی سیمان است که با افزایش آن به ۲٪ شاهد ۱۶٪ کاهش مقاومت نسبت به طرح شاهد هستیم. در مورد سایر الیاف ها نیز روندی مشابه مشاهده می شود الیاف

پلی پروپیلن به میزان ۲٪ وزنی سیمان با ۲۳٪ کاهش مقاومت بیشترین درصد افت مقاومت فشاری را نشان می دهد. الیاف شیشه ۲ درصدی بهترین طرح حاوی ۲٪ الیاف است که کمترین اثر منفی را بر روی مقاومت فشاری دارد.

اما در آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم نتایج حالتی عکس داشت و افزایش الیاف سبب افزایش مقاومت کششی گشت و با زیاد کردن مقدار الیاف مقاومت کششی نیز افزوده گشت. که خود به علت پل زدن الیاف هاست. شکل ۳ تصویر پل زدن الیاف پلی اتیلن و شکست نمونه استوانه ای را نشان می دهد.



شکل ۱- نتایج آزمایش مقاومت فشاری



شکل ۲- نتایج آزمایش مقاومت کششی

در نتایج آزمایش مقاومت کششی که به روش برزلی انجام شد بیشترین افزایش مقاومت در طرح ۶ حاوی ۲٪ الیاف پلی اتیلن دیده می شود پس از آن طرح های ۵ و ۴ قرار میگیرند که به ترتیب حاوی ۲٪ الیاف شیشه و ۱٪ پلی پروپیلن هستند. افزودن ۱٪ الیاف پلی پروپیلن ۷۶٪ افزایش مقاومت کششی را در پی دارد و افزودن ۱٪ دیگر و رساندن آن به ۲٪ سبب افزایش مجدد مقاومت نمی گردد و این در حالیست که دو الیاف دیگر تاثیر متفاوت و مثبتی در افزودن مقاومت کششی از خود نشان می دهند.





شکل ۳- تصویر پل زدن الیاف پلی اتیلن و شکست نمونه استوانه‌ای

#### ۶- نتیجه گیری

به طور کلی در این تحقیق سعی شده در ضمن مقایسه سه نوع الیاف شیشه، پلی پروپیلن و پلی اتیلن باهم و تاثیر درصد های مختلف آن، بتن معمولی را با بتن مسلح با الیاف مقایسه کند. به این ترتیب به این نتیجه رسیدیم که یکی از مهم ترین مزایای بتن مسلح الیافی نسبت به بتن تازه این است که یکی از ضعف های بتن نسبت به فولاد در سازه ها که ترد و شکنندگی آن است را با نوع و درصد مناسب در طرح اختلاط پوشش می دهد و رفتار بتن را تا حدودی نزدیک به فولاد می کند.

۱- افزودن الیاف های مورد استفاده در این مقاله سبب کاهش مقاومت فشاری نسبت به طرح پایه ( طرح بدون الیاف ) شده است.

۲- اضافه کردن الیاف با درصد های ۱ و ۲ باعث بالارفتن مقاومت کششی شد و اثر قابل توجهی در جلوگیری از، از هم گسیختگی یکباره و رفتار ترد نمونه دارد.

۳- بیشترین تاثیر را الیاف پلی اتیلن در بین الیاف استفاده شده دیگر در ساخت نمونه ها دارد.

#### ۷- تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می دانند از زحمات جناب آقای دکتر هزاهه ریاست محترم دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اراک و جناب آقای مهندس عباس زاده ریاست محترم و پرسنل زحمت کش آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک اراک تشکر و سپاس گذاری نمایند.

#### ۸- مراجع

- [۱] رضانیانپور، ع.ا. "بتن سبک از تحقیق تا کاربرد"، اولین کنفرانس ملی بتن سبک، دانشگاه تهران، ۱۳۹۰.
- [2] ACI Committee 544, 'Measurement of properties of fiber reinforced concrete', Journal, American Concrete Institute, Proceedings, Vol 75, No 7, July 1978, pp 283-90.

[۳] منصوری، ع. و حسینعلی بیگی، م. و محمدپور نیک بین، ا. و رضوانی، س. م. ، "خصوصیات بتن تازه وسخت شده سبک خودمتراکم حاوی الیاف پلی پروپیلن و فولادی"، اولین کنفرانس بین المللی تکنولوژی بتن، مرکز ملی مقاوم سازی شاخه شمال غرب، تبریز، ایران، ۱۶-۱۵ آبان، ۱۳۸۸.

[۴] مستوفی نژاد د.، فرحبد ف.، "بررسی خواص مکانیکی بتن سبک سازه ای با استفاده از مصالح موجود در ایران و میکرو سیلیس"، ششمین کنفرانس بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۵-۱۷ اردیبهشت ۱۳۸۲.

[5] Huntzinger, D.N; T.D. Eatmon, "A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies" , Journal of Cleaner Production, 17(7): p. 668-675,2009.

[6] Mehta, P.K, Concrete: Structure, properties and materials. 1986.

[7] Holland, T.C, et al, Guide for the Use of Silica Fume in Concrete, ACI Committee, 1996.

[8] Dotto, J., et al., "Influence of silica fume addition on concretes physical properties and on corrosion behaviour of reinforcement bars" , cement and concrete composites, 26(1): p. 31-39,2004

[۹] طالب زاده م.، ادیبی م. و عید ا. "نقش منحنی دانه بندی و ترکیب سنگدانه ها بر مقاومت فشاری بتن سبکدانه سازه ای لیکا"، اصفهان: نهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۹۱.

[۱۰] میرزایی مقدم، ا.، " بررسی آزمایشگاهی بتن های سبک سازه ای حاوی الیاف و نانوسیلیس"، پایان نامه کارشناسی ارشد، اراک: دانشگاه آزاد اسلامی اراک، دانشکده فنی و مهندسی، ۱۳۹۱

[11]. ACI 213R, Guide for Structural Lightweight Aggrigate Concrete, ACI 213R, 1998

[۱۲] توفیقی م.، حمیدی ه.، سنایی راد پ.، میرزایی مقدم ا.، "بررسی خواص مکانیکی بتن سبک سازه ای با استفاده از پودر سنگ و الیاف شیشه"، هفتمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران، تهران، ۱۵ مهر ۱۳۹۴.

[13] حسینی، ا.، " بررسی خواص فیزیکی بتن خود تراکم"، پایان نامه کارشناسی ارشد، اراک: دانشگاه اراک، دانشکده فنی و مهندسی، ۱۳۹۱