

بررسی تأثیر ترکیب میکروسیلیس و زئولیت بر مقاومت خمشی و کششی بتن سبک

عباس جدیدی^۱، شمس بصیرت^۲، بابک بهروز^۳

- ۱- عباس جدیدی، دانشجوی کارشناسی ارشد عمران سازه، گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی نجف آباد، ایران
- ۲- شمس بصیرت، عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی، گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی نجف آباد، ایران
- ۳- بابک بهروز، عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی، گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی دهاقان، ایران

آدرس پست الکترونیکی نویسنده رابط (basirat.sh@pci.iaun.ac.ir)

چکیده

زلزله خیز بودن کشور ایران و متناسب بودن نیروی جانبی زلزله با جرم سازه باعث شده، یکی از نیازهای اصلی در ساخت سازه‌های مهندسی کاهش وزن مرده ساختمان، ناشی از وزن المان‌های سازه باشد. از روش‌های سبک‌سازی ایده استفاده از بتن سبک به عنوان جایگزین بتن معمولی برای کاهش بار مرده سازه است. با توجه به مصرف زیاد بتن به دلیل تقاضای آن و آسیب‌های زیست محیطی ناشی از تولید فرآورده سیمان در ساخت بتن در این تحقیق تأثیر جایگزینی بخشی از سیمان با پوزولان‌های میکروسیلیس و زئولیت بررسی شده است. بر این اساس خصوصیات مقاومت خمشی و کششی بتن سبک در سن ۲۸ روزه بر روی نمونه‌های استاندارد بررسی گردید. برای این هدف ۱۶ طرح اختلاط در چهار گروه در نظر گرفته شده است با ساخت یک نمونه شاهد و نمونه‌های با ۴-۸-۱۲ درصد میکروسیلیس و نمونه‌هایی با جایگزینی ۵-۱۰-۱۵ درصد زئولیت، به صورت ترکیبی از زئولیت و میکروسیلیس به عنوان جایگزین بخشی از سیمان، خصوصیات فوق بررسی شدند. نتایج نشان داد که ترکیب ۴ درصد میکروسیلیس و ۱۵ درصد زئولیت مقاومت کششی را حدود ۱۱/۱۱ درصد و ترکیب ۸ درصد میکروسیلیس و ۱۰ درصد زئولیت مقاومت خمشی را نسبت به طرح شاهد ۶/۵۱ درصد افزایش می‌دهد.

کلمات کلیدی: مقاومت کششی، مقاومت خمشی، زئولیت، میکروسیلیس، بتن سبک سه جزئی

۱. مقدمه

اسفاده از بتن سبک در سازه‌ها از زمان‌های گذشته مورد توجه مهندسين بوده است. آیین‌نامه‌های مختلف هر کدام تعاریف مختلفی از بتن سبک سازه‌ای دارند از منظر آیین‌نامه ACI-213R-03 بتن با دانسیته ۱۹۲۰-۱۴۴۰ کیلوگرم بر متر مکعب و حداقل مقاومت سازه‌ای ۱۷۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب بتن سبک سازه‌ای می‌باشد [۱]. برای ساخت این بتن می‌توان از سنگ‌دانه‌های سبک طبیعی و یا مصنوعی یا ترکیبی از سنگ‌دانه‌های سبک و ریزدانه استفاده نمود. سنگ‌دانه‌های مصرفی سبک وزن در این بتن باید دارای دانسیته بین ۱۲۰۰ تا ۲۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب باشند [۲]. با توجه به مقاومت فشاری خوب بتن روز به روز بر استفاده از آن افزوده می‌شود، ولی در مقابل مزیت فشاری آن، مقاومت خمشی و کششی آن دارای ضعف می‌باشد. با توجه به وجود پوزولان‌های طبیعی و صنعتی ناشی از تولیدهای کارخانجات، برای کاهش اثرات زیست محیطی ناشی از این مواد، می‌توان با استفاده از آنها ویژگی‌های مقاومتی بتن سبک را بهبود بخشید.

Wilson و Malhotra با بررسی تأثیر جایگزینی میکروسیلیس و خاکستر بر روی مقاومت کششی و خمشی بتن سبک مقاومت بالا پرداختند. نتایج ایشان نشان داد ۵ درصد میکروسیلیس و ۱۵ درصد خاکستر بادی مقاومت کششی و خمشی افزایش می‌یابد و بیشترین دانسیته وقتی که از میکروسیلیس و خاکستر بادی استفاده نمی‌شود به وجود می‌آید [۳]. Iqbal و

همکاران با استفاده از ژئولیت در بتن در سنین اولیه باعث کاهش مقاومت بتن شده ولی در دراز مدت به دلیل کامل شدن واکنش آن مقاومت فشاری نسبت به طرح شاهد افزایش می‌یابد. بررسی تأثیر جایگزینی مقادیرهای مختلف جایگزینی سیمان با خاکستر بادی و استفاده از ماسه و شن نتیجه گرفتند افزایش خاکستر بر مقاومت خمشی نتایج نشان می‌دهد تا مصرف ۲۱ درصد خاکستر، مقاومت خمشی افزایش، و با مصرف بیشتر مقاومت خمشی کاهش پیدا کرده و ۲۱ درصد خاکستر مقدار مناسب برای بیشترین تأثیر بر مقاومت خمشی می‌باشد. [۴]. Mirza و همکاران تأثیر الیاف شیشه بر مقاومت خمشی نشان از تأثیر مثبت رفتار مقاومت خمشی با مصرف ۲/۵ درصد را داشته است [۵]. Kilic و همکاران نشان دادند مصرف سیمان کمتر به همراه خاکستر و میکروسیلیس تأثیر بیشتری از مصرف سیمان زیاد و میکروسیلیس تنها بر مقاومت خمشی و کششی دارد و با ۱۰ درصد میکروسیلیس و ۲۰ درصد ژئولیت به بیشترین مقاومت کششی دست یافتند [۶]. Yasar و همکاران در تحقیقی به بررسی تأثیر سنگ‌دانه سنگ پا و جایگزینی بخشی از سیمان با میکروسیلیس دریافتند در سن ۲۸ روزه در صورتی که مقدار درشت‌دانه و سیمان افزایش یابند، مقاومت خمشی نسبت به مصرف سیمان کمتر و ترکیب خاکستر افزایش یافته، ولی در سنین بالاتر ۱۰ درصد خاکستر به همراه سیمان کمتر، مقاومت خمشی را بهبود می‌دهد [۷].

L0 و همکاران با جایگزینی بخشی از سیمان با میکروسیلیس و پیش خیس کردن سنگ‌دانه سبک و مصرف سیمان کمتر مشاهده کردند، هرچه مقدار مصرف پوزولان جایگزین سیمان بیشتر شود کاهش مقاومت خمشی کمتر می‌گردد [۸]. Mo و همکاران با استفاده از سنگ‌دانه پوسته بادام و الیاف فولادی با مقادیرهای ۰/۵، ۰/۷۵ درصد وزن سیمان و ثابت بودن وزن کلیه مصالح تغییر مقاومت کششی بتن را بررسی کردند. نتایج ایشان نشان داده است، الیاف باعث افزایش دانسیته شده و هرچه مصرف الیاف فولادی زیاد شود، مقاومت فشاری کاهش یافته و در بازه ۰-۱۰ درصد مقاومت کششی روند رو به رشدی دارد [۹]. Sajedi و همکاران به بررسی تأثیر جایگزینی بخشی از سیمان با میکروسیلیس و سنگ‌دانه لیکا بر مقاومت کششی و خمشی پرداختند نتایج ایشان نشان می‌دهد مصرف ۱۰ درصد میکروسیلیس بیشترین تأثیر را در بهبود مقاومت کششی و خمشی داشته است. [۱۰]. Alton و همکاران در بررسی تأثیر الیاف فولادی بر روی تیر بتن مسلح نتایج نشان دادند، با افزایش مصرف الیاف فولادی و سیمان، مقاومت خمشی بهبود پیدا کرده است که ۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب الیاف و ۴۵۰ کیلوگرم سیمان، مقاومت را از ۰/۳۸ به ۲/۵۴ مگا پاسکال رسانده است [۱۱]. Choi و همکاران در تحقیق خود با استفاده از سنگ‌دانه مصنوعی ریز و درشت با الیاف پلی‌اتیلن، فولادی و وینیلون و سنگ‌دانه طبیعی مقاومت کششی و خمشی را مورد بررسی قرار دادند بر اساس نتایج وقتی از سنگ‌دانه‌های مصنوعی استفاده می‌شود بیشترین تأثیر را بر مقاومت کششی، الیاف وینیلون با مصرف ۱۰ درصد و بعد از آن الیاف پلی‌اتیلن و فولادی هر کدام به ترتیب با مصرف ۵ درصد و ۱۲ درصد داشته است. [۱۲]. Youm و همکاران در بررسی سه سنگ‌دانه طبیعی، استالیت و آرجکس، ۷ درصد میکروسیلیس با سنگ‌دانه‌های استالیت و طبیعی و ۳/۵ درصد میکروسیلیس در سن ۹۱ و ۲۸ روز بیشترین مقاومت کششی به دست آمده است [۱۳]. با توجه به این که گزارش تحقیقات استفاده از انواع پوزولان‌ها موجود می‌باشد.

در این تحقیق تأثیر ترکیب میکروسیلیس و ژئولیت بر مقاومت کششی و خمشی بتن سبک بررسی شده است. برای این منظور با استفاده از ترکیب‌های مختلف درصد وزنی افزودنی به جای سیمان مصرفی در طرح مخلوط نمونه‌های لازم ساخته شده و در سن ۲۸ روز مقاومت کششی و خمشی نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. پس از انجام آزمایش‌ها بهترین طرح مخلوط که مقدار مقاومت کششی و خمشی یا هر کدام به تنهایی بیشترین افزایش را داشتند به عنوان بهترین طرح پیشنهادی معرفی شده‌اند.

۲. مشخصات مصالح

در این مطالعه، از سیمان پرتلند نوع ۲ اردستان و میکروسیلیس کارخانه فروسیلیس ایران استفاده شده است. فوق روان-کننده POWER FLOW SD 3000 بر پایه پلی کربوکسیلات در ترکیب بتن به کار رفته، این ماده با قدرت کاهندگی شدید آب بتن و ایجاد روانی ایده آل، جهت ساخت بتن‌های توانمند مورد استفاده قرار می‌گیرد. پودر سنگ کارخانه‌های سنگ بری و زئولیت شهر سمنان استفاده شده است. لیکای مورد استفاده از شرکت ساوه با مشخصات مطابق جدول (۱) و ماسه استفاده شده از معدن قدس نجف آباد اصفهان دارای که مشخصات آن در جدول (۲) استفاده شده است. میزان رطوبت سطحی ماسه‌ی استفاده شده در این تحقیق طبق آزمایش انجام شده برابر ۵/۵۹ درصد بوده است. آب مصرفی در این تحقیق، از آب شرب شهر نجف آباد استفاده گردید.

جدول (۱) دانه‌بندی لیکای موجود

محدوده مجاز درصد عبوری تجمعی طبق ASTM C330	درصد عبوری از الک	درصد تجمعی روی الک	درصد مانده روی الک	اندازه‌ی الک (میلی‌متر)
۱۰۰	۱۰۰	۰	۰	۱۲/۵۰
۸۰-۱۰۰	۸۰	۲۰	۲۰	۹/۵۰
۵-۴۰	۵	۹۵	۷۵	۴/۷۵
۰-۲۰	۰	۱۰۰	۵	۲/۳۶

جدول ۲- دانه‌بندی ماسه موجود

محدوده مجاز درصد عبوری تجمعی طبق ASTM C33	درصد عبوری تجمعی	درصد تجمعی روی الک	درصد مانده روی الک	اندازه‌ی الک	
				اندازه (mm)	شماره
۹۷-۱۰۰	۱۰۰	۰	۰	۴/۷۶	۴
۸۵-۱۰۰	۹۹/۶۴۶	۰/۳۵۴	۰/۳۵۴	۲/۳۶	۸
۵۳-۸۷	۸۰/۲۷	۱۹/۷۲	۱۹/۳۶۶	۱/۱۸	۱۶
۲۸-۶۵	۴۲/۶۶۶	۵۷/۲۳۴	۳۷/۶۱۴	۰/۶	۳۰
۱۰-۳۴	۱۰/۷۰۶	۸۹/۲۴	۳۱/۹۰۶	۰/۳	۵۰
۳-۱۷	۵/۵۴۸	۹۴/۴۵۲	۵/۲۱۲	۰/۱۵	۱۰۰
۰-۳	۰	۱۰۰	۵/۵۴۸	۰/۰۷۵	۲۰۰

۳. روش تعیین نسبت‌های مخلوط

در ۹ طرح مخلوط در نظر گرفته شده، وزن تمامی مصالح به استثنای سیمان ثابت در نظر گرفته شده و بخشی از وزن سیمان با میکروسیلیس و زئولیت به صورت ترکیبی جایگزین که طرح مخلوط استفاده شده برای یک متر مکعب در جدول (۱) آورده شده است.

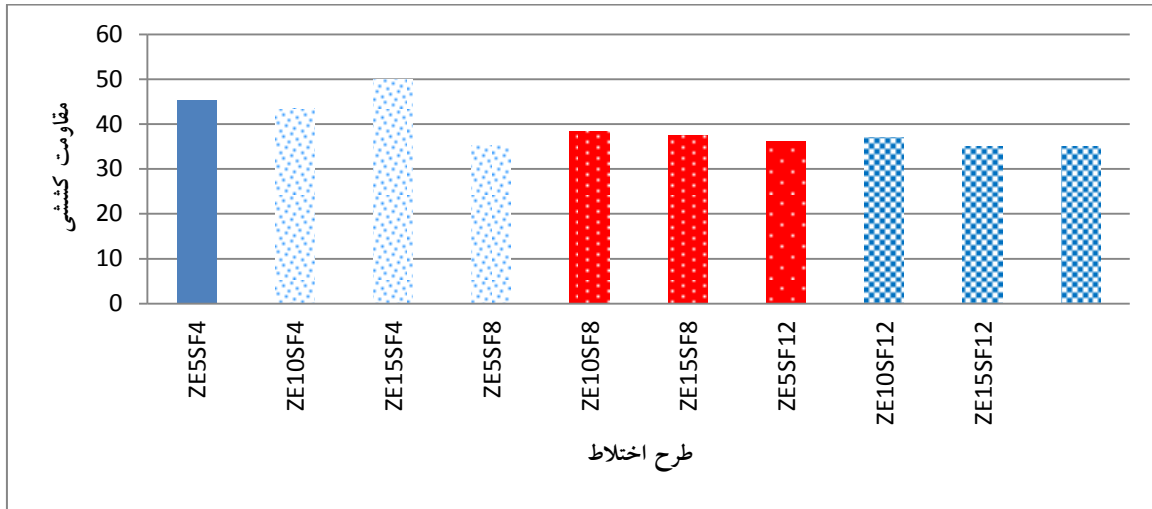
جدول ۳- مقادیر مصالح مورد استفاده بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب

آب	ابر روان‌کننده	پودر سنگ	لیکا	ماسه	زئولیت	میکروسیلیس	سیمان	W/C	نوع مخلوط	علامت اختصاری
۲۰.۸	۳/۵	۱۶۵	۲۳۴	۵۵۴	۲۴/۷۵	۱۹/۸	۴۵۰/۴۵	۰/۴۵	۴٪ میکروسیلیس +۵٪ زئولیت	SF4ZE5
۲۰.۸	۳/۵	۱۶۵	۲۳۴	۵۵۴	۴۹/۵	۱۹/۸	۴۲۵/۷	۰/۴۵	۴٪ میکروسیلیس +۱۰٪ زئولیت	SF4ZE10
۲۰.۸	۳/۵	۱۶۵	۲۳۴	۵۵۴	۷۴/۲۵	۱۹/۸	۴۰۰/۹۵	۰/۴۵	۴٪ میکروسیلیس +۱۵٪ زئولیت	SF4ZE15
۲۰.۸	۳/۵	۱۶۵	۲۳۴	۵۵۴	۲۴/۷۵	۳۹/۶	۴۳۰/۶۵	۰/۴۵	۸٪ میکروسیلیس +۵٪ زئولیت	CF8EZ5
۲۰.۸	۳/۵	۱۶۵	۲۳۴	۵۵۴	۴۹/۵	۳۹/۶	۴۰۵/۹	۰/۴۵	۸٪ میکروسیلیس +۱۰٪ زئولیت	SF8ZE10
۲۰.۸	۳/۵	۱۶۵	۲۳۴	۵۵۴	۷۴/۲۵	۳۹/۶	۳۸۱/۱۵	۰/۴۵	۸٪ میکروسیلیس +۱۵٪ زئولیت	SF8ZE15
۲۰.۸	۳/۵	۱۶۵	۲۳۴	۵۵۴	۲۴/۷۵	۵۹/۴	۴۱۰/۸۵	۰/۴۵	۱۲٪ میکروسیلیس +۵٪ زئولیت	SF12ZE5
۲۰.۸	۳/۵	۱۶۵	۲۳۴	۵۵۴	۴۹/۵	۵۹/۴	۳۸۶/۱	۰/۴۵	۱۲٪ میکروسیلیس +۱۰٪ زئولیت	SF12ZE10
۲۰.۸	۳/۵	۱۶۵	۲۳۴	۵۵۴	۷۴/۲۵	۵۹/۴	۳۶۱/۳۵	۰/۴۵	۱۲٪ میکروسیلیس +۱۵٪ زئولیت	SF12ZE15

برای تعیین مقاومت خمشی از قالب $500 \times 100 \times 100$ mm و برای مقاومت کششی قالب استوانه‌ای 200×100 mm استفاده شده است. برای تعیین مقاومت نمونه‌های کششی در هر طرح مخلوط دو نمونه و برای نمونه خمشی یک نمونه بتنی در سن ۲۸ روزه ساخته شده است. نمونه‌های بتنی پس از ۲۴ ساعت، از قالب بیرون آورده شده و در شرایط آزمایشگاه در محیط آب تحت دمای ۲۴ درجه سانتی‌گراد نگه داری می‌شوند.

۴. تحلیل نتایج آزمایش

در شکل (۱) مقاومت‌های کششی کلیه طرح اختلاط‌ها برای مقایسه آورده شده است.



شکل ۱- نمودار مقاومت کششی طرح‌های اختلاط در سن ۲۸ روز

با توجه به شکل (۱) بیشترین تاثیر استفاده هم‌زمان از دو پوزولان وقتی که ۴ درصد میکروسیلیس و ۱۰ درصد ژئولیت استفاده شده است می‌باشد، که باعث افزایش مقاومت کششی ۱۰/۵ درصد نسبت به طرح شاهد شده است. در طرح اختلاط-هایی که میزان میکروسیلیس رو به افزایش باشد با افزایش مقدار مصرف ژئولیت مقاومت کششی نسبت به نمونه شاهد کاهش بیشتری می‌یابد. با مصرف ۱۲ درصد میکروسیلیس و افزایش ژئولیت، ۲۰ درصد مقدار کاهش مقاومت کششی بیشتری با مصرف میکروسیلیس ۸ درصد و افزایش ژئولیت تا ۱۵ درصد را نشان می‌دهد. بنابراین مصرف زیاد هم‌زمان میکروسیلیس و ژئولیت نه تنها کمکی به مقاومت کششی نخواهد کرد بلکه باعث کاهش مقاومت کششی نیز می‌گردد.

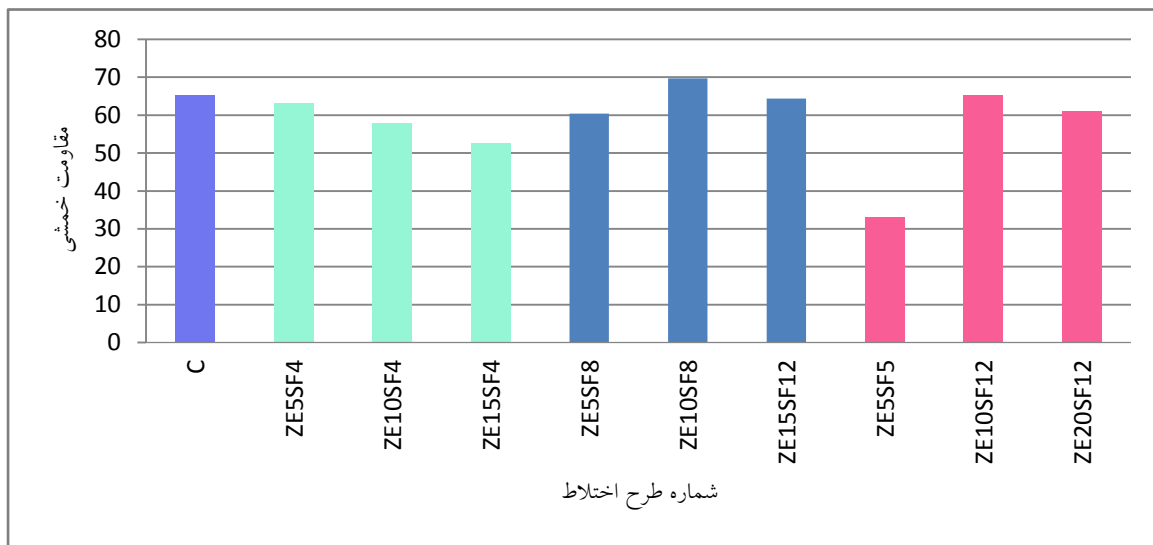
۴-۱ تغییرات مقاومت کششی هر طرح نسبت به طرح شاهد و نسبت به هم‌گروهی قبل از خود در کلیه طرح‌ها همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، در ترکیب میکروسیلیس و ژئولیت در صورت مصرف ۵ درصد ژئولیت و ۴ درصد میکروسیلیس در سن ۲۸ روز این ترکیب باعث کاهش مقاومت کششی گردیده و با افزایش مصرف ژئولیت به میزان ۱۰ درصد و مصرف ثابت میکروسیلیس به مقدار ۴ درصد باعث رشد مقاومت کششی ۱۰/۵ درصد شده است و با افزایش مصرف ژئولیت تا ۱۵ درصد، ۲۲/۱ درصد مقاومت کششی را کاهش می‌دهد در این ترکیب مصرف ۴ درصد میکروسیلیس و ۱۰ درصد ژئولیت ترکیب مناسب می‌باشد.



شکل ۲- درصد افزایش یا کاهش مقاومت کششی نمونه‌های ترکیبی ژئولیت و میکروسیلیس در سن ۲۸ روز

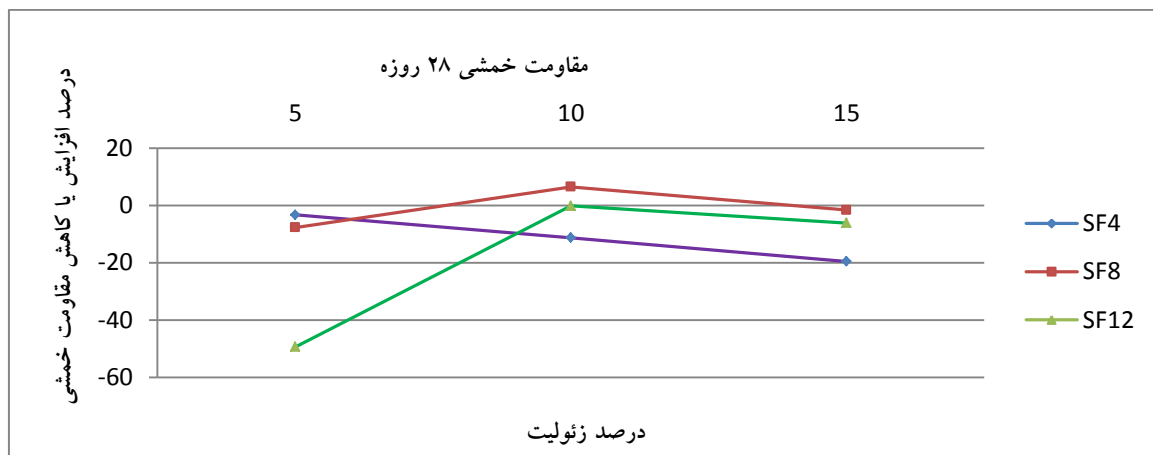
۲،۴ نتایج مقاومت خمشی تمام طرح‌ها:

در شکل (۳) تغییرات مقاومت خمشی هر طرح مخلوط در سن ۲۸ روزه با نمونه شاهد مقایسه شده است. در کلیه طرح مخلوط‌ها با افزایش مصرف این دو ماده مقاومت خمشی نسبت به نمونه قبل از خود در حال کاهش بوده و مصرف این دو ماده به صورت مجزا و ترکیب، در صورت افزایش مصرف هم زمان یا ثابت بودن یک پوزولان و افزایش و افزایش دیگری، مقاومت کاهش می‌یابد.



شکل ۳- مقاومت خمشی نمونه‌های ۲۸ روزه کلیه طرح اختلاط‌ها

با توجه به شکل (۳) در طرح‌هایی که به صورت ترکیبی از میکروسیلیس و زئولیت با نسبت‌های مختلف به جای سیمان استفاده شده است، زمانی که درصد میکروسیلیس کمترین مقدار خود یعنی ۴ درصد را داشته و زئولیت افزایش یافته است تأثیر آن بر مقاومت خمشی در سه طرح مربوطه کاملاً کاهشی بوده و هر چه مصرف زئولیت بیشتر شده باشد کاهش مقاومت خمشی نسبت به نمونه شاهد بیشتر شده که این کاهش ۱۹/۵۴ درصد می‌باشد.



شکل ۴- درصد کاهش یا افزایش مقاومت خمشی نمونه‌های ترکیبی میکروسیلیس و زئولیت در سن ۲۸ روزه

با توجه به شکل (۴) در طرح مخلوط‌های حاوی ۸ درصد میکروسیلیس و درصد‌های ژئولیت متفاوت بیشترین اثر مثبت هم‌زمانی بر روی مقاومت خمشی با مصرف ۸ درصد میکروسیلیس و ۱۰ درصد ژئولیت می‌باشد که افزایش ۶/۵۱ درصدی بر مقاومت نسبت به طرح شاهد و بیشترین تأثیر را نسبت به نمونه هم‌گروه قبل از خود به میزان ۱۵/۴ را دارا بوده است. در گروه سوم با مصرف میکروسیلیس ۱۲ درصد ۵ درصد ژئولیت بیشترین تأثیر منفی بر مقاومت خمشی به وجود آمده است و با افزایش مصرف ژئولیت به میزان ۱۰ درصد این تأثیر کمتر شده و مجدد با افزایش ژئولیت دوباره روند کاهش مقاومت خمشی شدت گرفته است. بنابراین با افزایش مصرف میکروسیلیس در هر ترکیب ژئولیت، ترکیب مناسبی برای بهبود مقاومت خمشی نمی‌باشد. بنابراین به عنوان یک نتیجه کلی زمانی که از ترکیب ژئولیت و میکروسیلیس استفاده می‌شود بهترین ترکیب برای بهبود مقاومت خمشی، مصرف ۸ درصد میکروسیلیس و ۱۰ درصد ژئولیت می‌باشد.

۵. نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج آزمایش‌ها، ترکیب ۴ درصد میکروسیلیس و ۱۰ درصد ژئولیت باعث افزایش مقاومت کششی به میزان ۱۰/۵ درصد شده و در مابقی ترکیبات اثر کاهش بر مقاومت کششی خواهد داشت. در بررسی تأثیر استفاده هم‌زمان میکروسیلیس و ژئولیت بر مقاومت خمشی عمدتاً کاهش مقاومت بوده و در دو طرح بیشترین تأثیر را در افزایش مقاومت خمشی داشته‌اند و ترکیب ۸ درصد میکروسیلیس و ۱۰ درصد ژئولیت مناسب‌ترین طرح برای بهبود مقاومت خمشی خواهد بود که این تأثیر ۶/۵۱ درصد بوده که چندان قابل توجه نمی‌باشد.

۶. قدردانی

از پرسنل محترم آزمایشگاه بتن دانشکده عمران دانشگاه آزاد اسلامی نجف‌آباد که در طی انجام آزمایش‌های این تحقیق همکاری لازم را به عمل آوردند، صمیمانه تشکر می‌شود.

۷. مراجع

- [۱] شکرچی زاده، م، لیبر، ن و جلیلی، م. (۱۳۹۰) "راهنمای کاربردی بتن سبک‌دانه سازه‌ای"، انستیتو مصالح ساختمانی دانشکده فنی دانشگاه تهران.
- [2] ACI Committee 213. (2014). "Guide for Structural Lightweight-aggregate Concrete". American Concrete Institute, 2014.
- [3] Malhotra V.M., Wilson H.S. (1988). "Development of high strength lightweight concrete for structural applications". The international journal of cement Composites and lightweight concrete ,Vol 10, pp. 79-90.
- [4] Iqbal, Shahid, et al. (2017). "Effect of Fly Ash on Properties of Self-Compacting High Strength Lightweight Concrete". Periodica Polytechnica. Civil Engineering, Vol. 61.
- [5] Mirza F.A., Soroushian P. (2002). "Effects of alkali-resistant glass fiber reinforcement on crack and temperature resistance of lightweight concrete". Cement and Concrete Composites. Vol, 24, pp. 223-227.
- [6] Kilic A., Atis C.D., Ozcan F. (2003). "High -strength lightweight concrete made with scoria aggregate containing mineral admixture". cement concrete Reserch., Vol. 33, pp . 1595-1599.

- [7] Yasar E. Atis C.D. Kilic A. Gulsen H. (2003). "Strength Properties of lightweight concrete made with basaltic Pumice and flyash". Materials Letters. Vol. 57, pp. 2267-2270, 2003.
- [8] .Lo T.Y., Cui H.Z., Li Z.G. (2009). "Influence of aggregate pre- and fly ash on mechanical Properties of lightweight concrete". waste Management., Vol. 24, pp. 33-338.
- [9] Mo K.H., Goh S.H., Alengram U.J., Visidin P., Jumaat M.Z. (2017). "Mecanical, toughness, bond and durability-related properties of lightweight concrete reinforced with steel fibers". Materials and structures, Vol. 50, p. 46.
- [10] Sajedi F., Shafigh P. (2012). "High-strength lightweight concrete using, silica fume, and limestone". Reserch Article – civil Engineering, vol. 37. pp 1885-1893.
- [11] Alton F., Aktas B. (2013). "Investigation of reinforced concrete beams behavior of steel fiber added lightweight concrete". Construction and Building Materials, Vol. 38, pp.575-581.
- [12] Choi J., Zi G., Hino S., Yamaguchi K., Kim S. (2014). "Influence of fiber reinforcement on strength and toughness of all-lightweight concrete". Construction and Building Materials, Vol. 69, pp.381-389.
- [13] Youm K.S., Moon J., Cho J.Y., kim J.J. (2016). "Experimental study on strength and durability of lightweight aggregate concrete containing silica fume". Construction and Building Materials, Vol. 114. pp. 517-527.