Effect of adding Combined Cementitious Zeolite and Silica Fume on Compressive and Flexural Strengths of Structural Light Weight Concrete Containing Expanded Polystyrene

Ali Yari
M.sc, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

Mohammad Kazem Sharbatdar*
Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran. (Corresponding Author)
msharbatdar@semnan.ac.ir

Ali Kheyroddin
Distingushed Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

Abstract:
The high weight is one of the most important deficiency of any building that has a direct role in damages caused during an earthquake, so the application of new lightweight material is one of the attractive research issues. The effectiveness of replacing Polystyrene spherical particles instead of regular aggregates on its density and adding silica fume and zeolite as part of Portland cement replacing material effectiveness on concrete strength were investigated in this paper. Three mix designs consisting of zeolite, silica fume, and polystyrene on cubic, cylinder compressive specimens, and flexural beam specimens were cast and tested. The test results indicated that the mix design with 20% zeolite and 5% silica fume resulted in concrete with a special density equal to 1756 kilogram per cubic meter and cylinder compressive strength equal to27 MPa, indicating one special structural high-strenght lightweight concrete .

Keywords*: Structural Light Weight Concrete, Zeolite, Silica Fume, Polystyrene, Compressive Strength*

تاثیر افزودن ترکیب مواد سیمانی زئولیت و میکروسیلیس در مقاومت فشاری و خمشی بتن سبک سازه‌ای حاوی پلی استایرن منبسط شونده

دریافت مقاله:۰۲-۱۲-۱۳۹۹
پذیرش مقاله:۱۲-۰۲-۱۴۰۰

علی یاری
کارشناس ارشد سازه، دانشگاه سمنان

محمدکاظم شربتدار*
استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان
msharbatdar@semnan.ac.ir

علی خیرالدین
استاد ممتاز، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

چکیده

یکی از معایب مهم ساختمان‌های بتنی وزن بسیار زیاد ساختمان می‌باشد که با میزان تخریب ساختمان در اثر زلزله نسبت مستقیم دارد، لذا به‌کارگیری مصالح نوین سبک با رویکرد مقاومتی از زمینه‌های تحقیقاتی می‌باشد. در این مقاله، تأثیر جایگزینی دانه های پلی استایرن به‌جای سنگ‌دانه ها در وزن مخصوص بتن و همچنین افزودن میکروسیلیس و زئولیت بعنوان بخشی از سیمان پرتلند و تأثیر آن در مقاومت بتن بررسی می‌گردد. سه طرح اختلاط شامل زئولیت به عنوان بخشی از سیمان پرتلند، میکروسیلیس و پلی استایرن به‌صورت نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای جهت آزمایش مقاومت فشاری و نمونه‌های تیرهای منشوری جهت آزمایش مقاومت خمشی و تعیین مدول خمشی ساخته شدند. پس از انجام آزمایش ها و تجزیه و تحلیل نتایج در ترکیب ۲۰ درصد زئولیت و ۵ درصد میکروسیلیس، بتنی با وزن مخصوص حدود ۱۷۵۶کیلوگرم بر مترمکعب (جمع مولفه ها) و مقاومت فشاری ۲۸ روزه با نمونه استوانه ای برابر ۲۷ مگاپاسکال بدست آمد که نوعی بتن سبک سازه‌ای مطابق آئین نامه های معتبر است..

کلمات کلیدی: بتن سبک سازه ای، زئولیت، میکروسیلیس، پلی استایرن، مقاومت فشاری

۱-مقدمه

بتن بعنوان مهم‌ترین مصالح بکار رفته در صنعت ساختمان است که دارای مقاومت فشاری بالا، سازگاری مناسب با فولاد در سازه‌های بتن‌آرمه، مقاومت در برابر آتش‌سوزی، هزینه کمتر برای اجرا می‌باشد ولی تخریب محیط زیست، و وزن مخصوص بالای بتن از مهم‌ترین معایب آن است و از آنجائی‌که که نیروی زلزله ارتباط مستقیم با وزن سازه دارد باید از مصالح مرغوب دیگری مانند بتن سبک دانه پرمقاومت برای دال سقف ساختمان‌های بلند مرتبه، عرشه پل ها و دیگر کاربردهای خاص استفاده نمود[۲-۱] . تولید بتن سبک در ایران تا سال‌های اخیر به صورت سنتی با استفاده از دانه های سبکی چون رس شکفته، سنگ پا، پوکه معدنی و یا بتن‌های گازی تولید می گردید که هرکدام دارای معایبی بودند ولی استفاده از پلی استایرن که دارای مقاومت بسیار خوب در مقابل نفوذ رطوبت و بخار آب، جذب آب بسیار کم، وزن کم و نسبت استحکام به وزن بسیار عالی، و قابل بازیافت می‌باشد در کاربردهای مسکونی و صنعتی بکار می‌رود [۳]. بتن‌های سبک می‌توانند بصورت غیرسازه‌ای، با مقاومت متوسط، سازه ای تقسیم بندی و ساخته شوند که بتن‌های سبک غیرسازه‌ای به دو گروه اسفنجی و سنگ دانه سبک تقسیم‌بندی شده و جرم مخصوصی کمتر از ۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و مقاومت فشاری کمتر از ۷ مگاپاسکال دارند و جرم مخصوص بتن‌های سبک با مقاومت متوسط بین ۸۰۰ تا ۱۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب است و فشرده تر هستند مقاومتی تا ۱۷ مگاپاسکال دارند و بتن‌های سبک سازه‌ای علی رغم دارا بودن چگالی کمتر از ۲۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، مقاومت فشاری بیش از ۱۷ مگاپاسکال دارند[۴].

انتظاری و اسماعیلی خصوصیات بتن سبک (LWAC) سازه ای ساخته شده با مصالح سبک منطقه آذربایجان ایران را بررسی کردند و نتایج تحقیقات نشان داد که در شرایط مقاومت یکسان، مقاومت سنگدانه به عنوان عامل اصلی تعیین کننده مقاومت بتن سبک می باشد و برای مقاومت فشاری یکسان ، مدول الاستیسیته بتن سبک کمتر از بتن معمولی بود و مقاومت کششی و مدول گسیختگی بتن سبک نیز کمتر از بتن معمولی تعیین شد[۵]. همچنین صدر ممتازی و نصرتی کاربرد بتن سبک سازه ای در تیرهای بتن مسلح با بتن خودمتراکم بررسی کردند و نتیجه گرفتند که نتایج به دست آمده نشان می دهدکه استفاده از روابط آیین نامه ACI 318M11 درمورد به کارگیری بتن خودتراکم سبک سازه ای حاوی سبکدانه رس منبسط شده کاملا در جهت اطمینان است[۶].

اولین استاندارد ملی برای استفاده از میکروسیلیس در بتن توسط اشتو در سال ۱۹۹۰ تعیین و میکروسیلیس در بتن تا ۱۵ درصد وزن سیمان مورد استفاده قرار گرفت و در سال های اخیر از دوده سیلیسی تولید داخل و خارج کشور در پروژه های مختلف عمرانی جهت افزایش مقاومت فشاری و دوام بکار رفته است [۷]. اثر همزمان لیکا، میکروسیلیس، ماسه بادی، و سبکدانه‌های پومیس بر وزن مخصوص، مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و مقاومت کششی بتن و اثرات مثبت آن بر کاهش خسارت زلزله در کارهای محققین بررسی شده است[۸،۳]. بصیرت و همکاران تاثیر افزودن میکروسیلیس بر روی مقاومت فشاری و جذب آب بتن سبک سازه ای را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که افزودن ۸٪ بعنوان مقدار بهینه برای مقاومت فشاری بتن سبک سازه ای بود[۹]. زئولیت یک ماده‌ی آلومینوسیلیکاتی و دارای ساختار سه بعدی است که حفراتی با اندازه‌های منظم در ابعاد مولکولی را تشکیل داده و به بلورهای رشته‌ای، ستونی و مختلط و یا رسوبی و آتشفشانی تقسیم بندی شده که نسبت سیلیسیم به آلومینیم در رسوبی بیش از آتشفشانی است و زئولیت‌های موجود در ایران بیشتر از نوع رسوبی هستند در حالی که اکثر گونه‌های طبیعی زئولیت‌های موجود در جهان از نوع آتشفشانی هستند[۱۰]. در زئولیت مصنوعی، نسبت سیلیکا به آلومینا برابر با یک است ولی در زئولیت طبیعی این نسبت برابر ۵ است و زئولیت‌های طبیعی نیز دارای سیلیس با ساختار مقاوم هستند که باعث پایداری آن ها در محیط‌های اسیدی می‌شود[۱۱].

ییلماز و همکارانش در مطالعات خود توف‌های زئولیتی را موادی دانسته‌اند که شامل آلومین و سیلیس بوده و با داشتن خواص پوزولانی، به‌عنوان مواد آمیخته در سیمان مورد استفاده قرار می‌گیرند و خواص شیمیایی (دارا بودن SiO_2 و Al_2O_2 فعال)، خواص فیزیکی (سطح مخصوص بالا، ظرفیت تبادل کاتیونی و تخلخل)، خواص زیست محیطی

و مزیت‌های اقتصادی (ذخایر بالا و هزینه‌ی پایین برای تولید) زئولیت‌ها، باعث شده است که بعنوان ماده‌ای جالب توجه در صنعت ساخت و ساز مورد استفاده قرار گیرند[۱۲] . زئولیت‌ها مواد آلومینوسیلیکاتی کریستالی از فلزات قلیایی و قلیایی خاکی هستند که دارای خلل و فرج بسیار ریز بوده و تا ۴۰ درصد وزن خود، آب جذب می‌نماید[۱۳-۱۴]. مشاهده می‌شود که قسمت اعظم ذرات دارای اندازه‌ای بین ۱ تا ۴۵ میکرومتر بوده و حدود ۲۸ درصد ذرات دارای اندازه‌ای بیشتر از ۴۵ میکرومتر می‌باشند[۱۵]. انواع مختلف زئولیت دارای مقادیر زیاد SiO_2 (بین ۶۰ تا ۷۰ درصد) و جرم مخصوص کمتر از سیمان پرتلند معمولی و سطح مخصوص آن معمولاً از سیمان بیشتر و از میکروسیلیس کمتر است[۱۶].

با آزمایش XRF ، مشخص شده است که درصد Na در زئولیت نوع (Gordes Zeolite) (GZ) بیشتر از زئولیت نوع (Bigadic Zeolite) (BZ) و درصد Ca در نوع BZ بیشتر از نوع GZ بود که این دو عنصر، بر خصوصیات مختلف بتن مثلاً واکنش پوزولانی، تأثیرگذار خواهند بود همچنین‌تصویر SEM برای تشخیص دو نوع زئولیت GZ و BZ بکار رفته است[۱۷]. اساساً مواد پوزولانی مانند میکروسیلیس و خاکستر بادی، ترکیبات واکنش پذیرشان دارای ساختار آمورف (بی‌شکل) و شیشه‌ای (غیر متبلور) هستند ولی زئولیت با وجود داشتن ساختار کریستالین، می‌تواند به‌عنوان یک ماده‌ی پوزولانی عمل کند[۱۸]. محصولات واکنش پوزولانی باعث پر شدن فضاهای موئینه در بتن می‌شوند و در نتیجه باعث بهبود مقاومت و نفوذناپذیری نسبت به واکنش هیدراسیون می‌شوند[۱۹]. هرگاه زئولیت به مخلوط سیمان و آب اضافه شود ترکیبات هیدراته‌ی سیلیکات کلسیم و آلومینات کلسیم را به وجود می‌آورند و این ترکیبات، تمایل به افزایش مقاومت بتن را دارند[۲۰].

پراکی، کاکالی و کونتولئون در تحقیق خود به بررسی اثر زئولیت بر هیدراسیون سیمان پرداختند و بیشترین واکنش-پذیری پوزولانی، در نمونه‌هایی مشاهده شد که دارای ۱۰٪ جایگزینی (از لحاظ وزنی) زئولیت به‌جای سیمان بودند[۲۱-۲۰]. احمدی و شکرچی زاده نیز در تحقیق خود به این نتیجه رسیدند که فعالیت پوزولانی زئولیت طبیعی (NZ) به‌اندازه‌ی میکروسیلیس (SF) نبوده ولی دارای واکنش پوزولانی بالایی می‌باشد و هرچه میزان جایگزینی زئولیت طبیعی به‌جای سیمان بیشتر شود، به مقدار فوق روان کننده‌ی بیشتری برای حفظ اسلامپ بتن نیاز است[۱۸]. در تحقیقی که توسط پون و همکارانش صورت گرفته است درجه واکنش پوزولانی زئولیت طبیعی (NZ) با خاکستر بادی (FA) و دوده سیلیسی (SF) مقایسه شده است و نتیجه گردید که وقتی زئولیت با خاکستر بادی مقایسه شد و مشاهده کرد که اولاً، جایگزینی سیمان توسط زئولیت طبیعی، باعث می‌شود در سنین اولیه، مقاومت فشاری، کمتر کاهش یابد. ثانیاً، در سنین بالاتر، زئولیت طبیعی، مقاومت فشاری را کمتر بهبود می‌دهد [۲۲]. کاپوتو، لیگوری و کوللا واکنش پوزولانی زئولیت‌ها را با استفاده از آزمایش فراتینی اندازه‌گیری کردند و نتیجه گرفتند که زئولیت دارای واکنش پوزولانی مطلوب می‌باشد به طوریکه می‌توان اظهار کرد واکنش پوزولانی زئولیت بیشتر از خاکستر بادی و کمتر از میکروسیلیس می‌باشد[۲۳].

سالانه بیش از ۲۰۰ میلیون تن سیمان در چین تولید می‌شود و به دلیل اینکه زئولیت طبیعی در چین به مقدار فراوان یافت می‌شود، سالانه حدود ۳۰ میلیون تن زئولیت طبیعی جهت ساخت سیمان آمیخته در چین مصرف می‌شود[۲۲]. تأثیر زئولیت، خاکستر بادی آسیاب شده و دوده سیلیسی بر مقاومت فشاری دو دسته از نمونه‌ها و مقایسه آن‌ها با نمونه‌های شاهد ساخته شده از سیمان پرتلند معمولی توسط سامی و ژیهانگ مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که در تمام حالت‌های جایگزینی زئولیت، خاکستر بادی آسیاب شده و دوده سیلیسی باعث افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه می‌شوند[۲۴]. آیکوتون و ایکولو در تحقیق خود تأثیر زئولیت و خاکستر بادی را روی مقاومت کششی نمونه‌های بتنی به روش دو نیم شدن در سنین ۲۸، ۹۰ و ۱۸۰ روزه مورد بررسی قرار دادند و نتایج آنان نشان داد که مقاومت کششی تمام طرح‌ها به جز طرح شاهد و طرح‌های حاوی ۱٪ زئولیت، افزایش پیدا کرد[۲۵]. همچنین، در تحقیقی که توسط کوانلین و نایکیان انجام شد تأثیر زئولیت اصلاح شده روی انبساط ناشی از واکنش قلیایی-سیلیسی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج حاصله با پوزولان‌های دیگر مانند خاکستر بادی و سرباره

نسبت به طرح‌های شاهد (KB) مقایسه شد و نتایج نشان داد که تأثیر ۵٪ زئولیت اصلاح شده بیشتر از تأثیر ۳۰٪ سرباره و کمتر از تأثیر ۳۰٪ خاکستر بادی و ۵۰٪ سرباره بود[۲۶]. قورچیان و همکاران [۲۷] عملکرد لیکا و سنگ‌دانه‌های زئولیتی طبیعی را به‌عنوان موادی برای عمل آوری درونی بتن مورد بررسی قرار دادند. پروویس و همکاران[۲۸] به جنبه‌های ژئوپلیمری زئولیت و شوای بن[۲۹] نیز به مدل‌سازی کامپیوتری زئولیت‌ها پرداخته و جذب سطحی، انتشار و لایه لایه شدن زئولیت‌ها را مورد بررسی قرار دادند . در آزمایشی که توسط رمضانیان پور و همکاران انجام شد نقش پوزولان زئولیت در دوام بتن بررسی گردید[۳۰] که در تمام سنین و تمام نسبت‌های آب به سیمان، افزودن زئولیت سبب بهبود مقاومت کششی نمونه‌های بتنی نسبت به نمونه‌ی شاهد شده است.

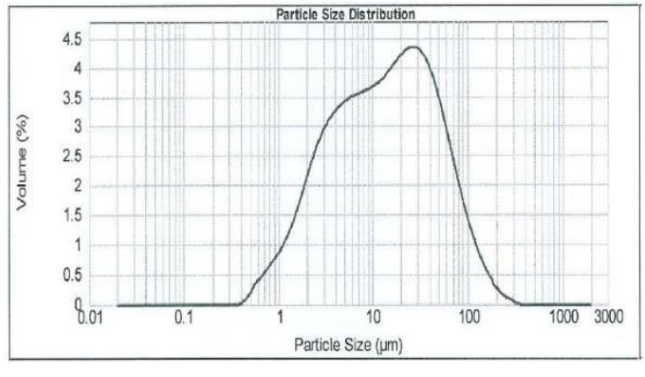
در این تحقیق سعی شده است تا با مطالعه آزمایشگاهی انواع بتن‌های سبک، ترکیبی با بتن سبک خاص بدست آید که علاوه بر سبک بودن، دارای مقاومت سازه‌ای مناسب بوده و از نظر اقتصادی نیز مقرون به‌صرفه باشد.

۲-طرح آزمایشگاهی

جهت ساخت بتن سبک سازه‌ای، علاوه بر طرح اختلاط بتن شاهد با پلی استایرن مناسب، ۳ طرح اختلاط دیگر با ترکیب میکروسیلیس و زئولیت در نظر گرفته شدند و از هر طرح اختلاط نیز ۸ نمونه مکعبی، ۶ نمونه استوانه‌ای و یک نمونه تیر مسلح برای آزمایش‌ها ۷ و ۲۸ روزه ساخته شدند و در تحت آزمایش‌ها مختلف مقاومت فشاری، خمشی قرار داده شدند و نتایج آن ها با هم مقایسه و اثرات آن ها را بر روی وزن و مقاومت بتن سبک بررسی شدند.

۲. ۱. مصالح مصرفی

سیمان استفاده شده برای ساخت کلیه مخلوط‌های بتنی این تحقیق، سیمان پرتلند تیپ ۴۲۵-۱ تولیدی کارخانه سیمان تهران و دارای مرغوبیت و کیفیت بالا بود و برای شناسایی ترکیبات شیمیایی و خواص فیزیکی، آنالیز XRF در آزمایشگاه مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران انجام و نتایج مطابق جدول ۱ تعیین شدند و نتایج با محدودیت‌های استاندارد ۳۸۹ ایران مقایسه شدند. زئولیت مصرفی در این تحقیق، نوعی زئولیت طبیعی به نام کلینوپتیلولایت بود که از معادن زئولیت سمنان تهیه و آنالیز شیمیایی XRF برای تعیین ترکیب شیمیایی کلینوپتیلولایت آن انجام گردید که نتایج در جدول ۲ داده شده اند. نتایج آنالیز شیمیایی نشان داد که در این نوع زئولیت، مجموع درصد وزنی SiO_2 و Al_2O_3 و Fe_2O_3 برابر با ۸۰/۲۵ درصد بود که طبق استاندارد ASTM C 618 بعنوان نوعی زئولیت طبیعی و در گروه N از پوزولان‌های طبیعی قرار گرفت. در شکل ۱ و جدول ۳ توزیع اندازه ذرات زئولیت مصرفی در این مطالعه، نشان داده شده اند که این نتایج با استفاده از آزمایش جذب سطحی متغیر با فشار (PSA) به دست آمده و همانطور که ملاحظه می‌شود اندازه دانه‌ها در محدوده مشخص شده از ۰/۴۱۷ تا ۳۶۳/۰۷۸ میکرومتر متغیر بوده و بیش از ۹۰٪ ذرات دارای اندازه‌ای بین ۱ تا ۱۰۰ میکرون بودند. بنابراین، فضای خالی بین ذرات سیمان توانست توسط ذرات زئولیت پر شود اما نزدیک بودن بیشتر ذرات زئولیت (۱۰۰ - ۱ میکرون) به یکدیگر، موجب فضای خالی شد. این فضاهای خالی توسط ذرات میکروسیلیس که از ذرات زئولیت ریزتر هستند پر گردید. نتایج آزمایش پراش اشعه ایکس (XRD) بر روی زئولیت طبیعی در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱- توزیع اندازه ذرات زئولیت

جدول ۱- مشخصات سیمان مصرفی

اجزا و ترکیبات شیمیایی	درصد وزنی
CaO	۶۲/۱۱
SiO_2	۲۰/۱
Al_2O_3	۴/۱۲
Fe_2O_3	۳/۲۳
K_2O	۰/۹۲
MgO	۳/۰۹
MnO	۰/۲
P_2O_5	۰/۰۷
SrO	۰/۱۹
SO_3	۲/۴۶

درصد وزنی ترکیب شیمیایی	سیمان تیپ ۱-۴۲۵ تهران	محدودیت‌های استاندارد ۳۸۹ ایران
MgO	3.09	<5
SO_3	2.46	<3
قلیایی‌ها	0.598	
L.O.I (Loss on Ignition)	3.5	<3

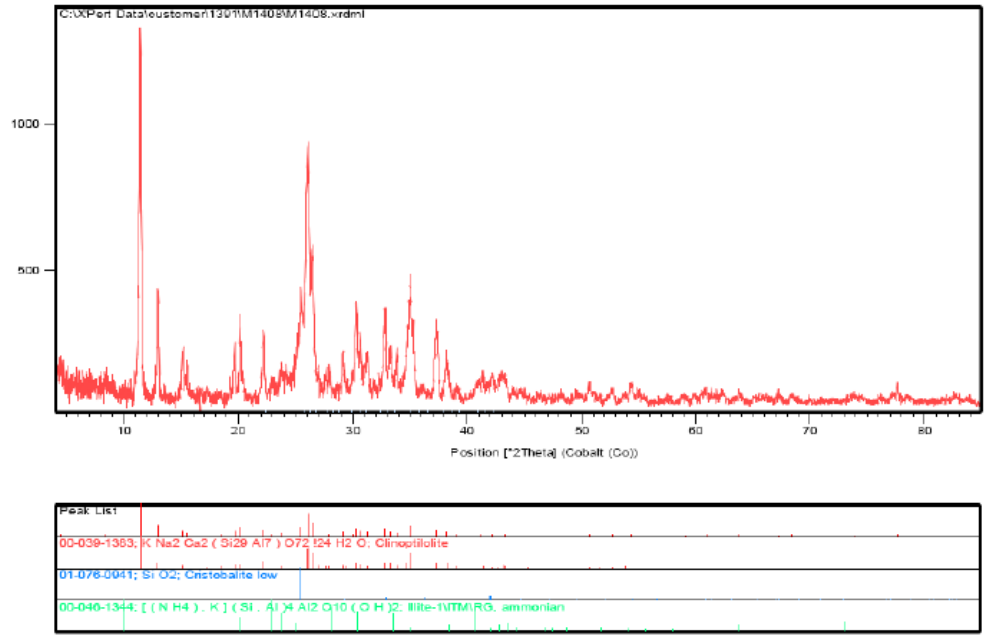
جدول ۲- ترکیب شیمیایی زئولیت کلینوپتیلولایت

اجزا و ترکیبات شیمیایی	درصد وزنی
CaO	۱/۵۳
SiO_2	۶۸/۳۳
Al_2O_3	۱۰/۹۸
Fe_2O_3	۰/۹۴
K_2O	۱/۶
MgO	۱/۱۵
Na_2O	37/2
SrO	۰/۱۵
SO_3	۰/۱۸

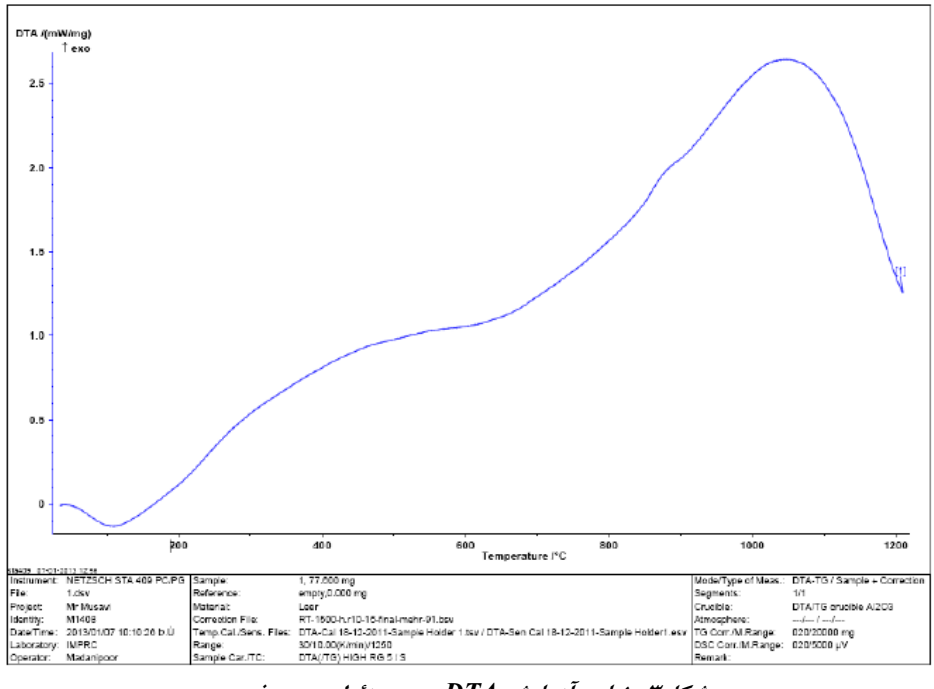
جدول ۳- توزیع اندازه ذرات زئولیت

اندازه (میکرون)	درصد حجمی(٪)	اندازه (میکرون)	درصد حجمی(٪)
۳۱۶	۰/۰۱	۲۰	۳/۸۳
۲۰۸	۰/۱۶	۱۵	۳/۶۲
۱۵۹	۰/۴۲	۱۰	۳/۳۴
۱۲۰	۰/۸	۷/۵	۳/۲۴
۹۱	۱،۳۶	۵	۳/۱۱
۶۰	۲/۵	۲/۱۸	۲/۲۴
۴۵	۳/۲۱	۱	۰/۸
۳۰	۳/۸۱	۰/۴۸	۰/۲

منحنی آزمایش آنالیز حرارتی افتراقی (DTA) در شکل۳ که بر روی زئولیت مصرفی انجام شده است نشان می دهد که تغییر ساختار بلور در زئولیت مورد آزمایش دیده نشد زیرا منحنی DTA فاقد هرگونه پیک تیز بود و اولین تغییر در دمای ۱۱۰ سانتیگراد صورت گرفت که آن هم تدریجی و ناشی از دست دادن آب جذبی بوده است و دومین تغییر نیز در دمای حدود ۱۰۰۰ سانتیگراد بود که ناشی از خروج آب مولکولی از درون شبکه‌ی زئولیت بوده است.



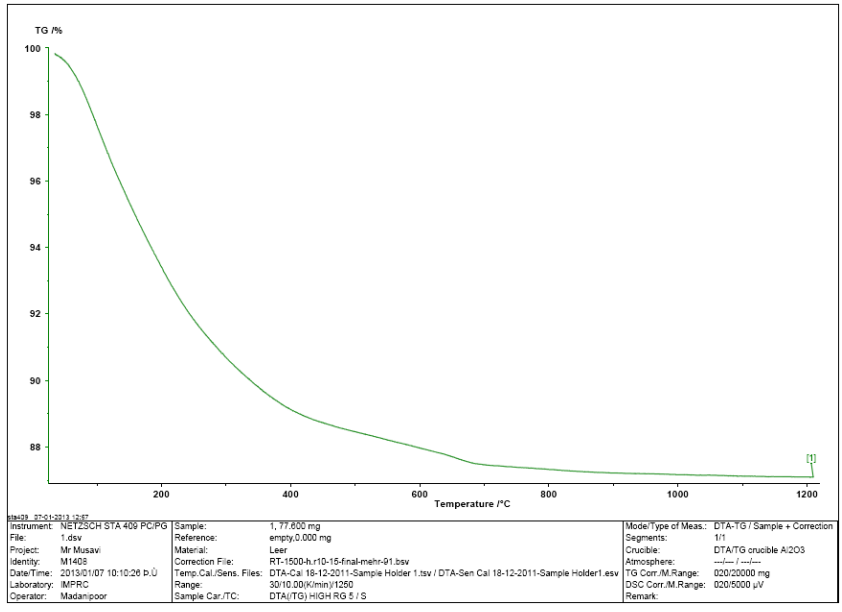
شکل ۲ – نتایج حاصل از آزمایش XRD بر روی زئولیت طبیعی



شکل۳ - نتایج آزمایش DTA بر روی زئولیت مصرفی

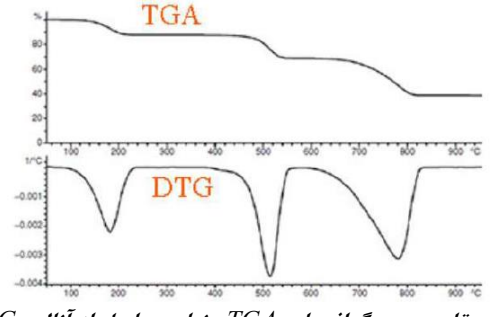
در شکل۴ نیز نتایج حاصل از آنالیز توزین حرارتی (TGA) بر روی زئولیت مصرفی نشان داده شده است که ساده‌ترین روش آنالیز حرارتی است که اساس آن بر اندازه‌گیری وزن نمونه در هنگام گرمایش استوار است. از منحنی توزین حرارتی می‌توان به دو صورت استفاده کرد، یکی تعیین دمای آغاز و پایان رویدادهای حرارتی که برای هر مرحله از تغییر وزن به صورت دمای ابتدایی و دمای پایانی نشان داده می‌شود و دیگری مقدار کاهش وزن برای هر مرحله از تغییر وزن که به صورت درصد نوشته خواهد شد. محور افقی، همواره دما را با مقیاس درجه سانتی‌گراد و محور عمودی درصد تغییر وزن را نشان می‌دهد. آنالیز توزین حرارتی تکنیکی است برای اندازه‌گیری

تغییرات جرمی مواد که در مقابلی تغییرات حرارتی منظم (نه ناگهانی) صورت می‌گیرد. تغییرات جرمی می‌تواند بر اثر فرآیندهای گوناگونی مانند هوازدگی، تغییر ترکیب شیمیایی، تصعید، تبخیر، جذب، دفع، اکسیداسیون و احیا صورت گیرد. در میان این‌ها بیشترین توجه به تعیین ترکیب شیمیایی و پایداری حرارتی مواد و همچنین ارزیابی سینتیک حرارتی و پیش‌بینی عمر مفید ماده و در نهایت واکنش‌پذیری مواد با گازها صورت گرفته است. طبق شکل۴ بیشترین افت وزنی حرارتی در دمای کمتر از ۳۰۰ سانتیگراد اتفاق افتاده است که ناشی از تبخیر آب جذب سطحی و تبدیل یک سری مولکول‌ها به فاز بخار یا گاز می‌باشد بنابراین در دماهای بالاتر مقدار قابل توجهی افت وزنی حرارتی در زئولیت مشاهده نشده است که حاکی از درجه‌ی خلوص بالای این ماده‌ی پوزولانی انتخاب شده می‌باشد. لذا زئولیت حرارت داده شده خواص فیزیکی و شیمیایی خود را حفظ کرده است و به ماده‌ی دیگری تبدیلی نشده است که در مجموع نشانه از پایداری بالای این پوزولان است.



شکل۴- نتایج آزمایش TGA بر روی زئولیت مصرفی

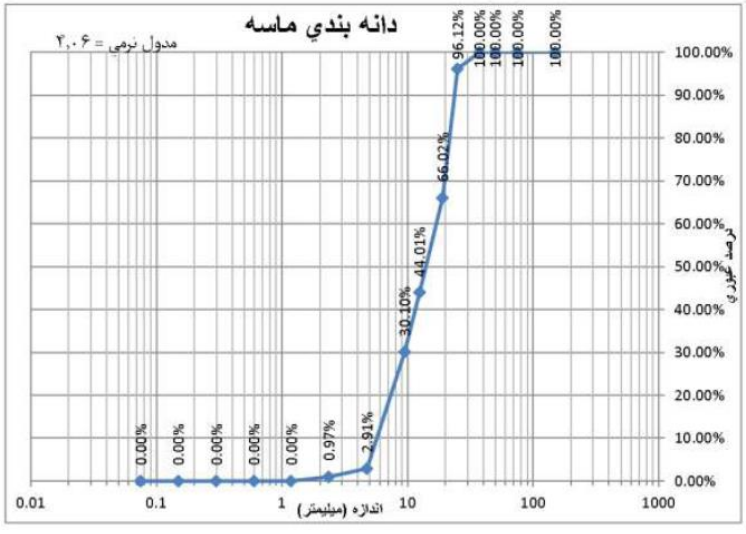
در آزمایش توزین حرارتی TGA ، در صورتی که دمای دو رویداد حرارتی، نزدیک به هم باشد، جدا کردن آن‌ها در منحنی تغییر وزن بر حسب دما مشکل خواهد بود. از طرفی در منحنی‌های توزین حرارتی نمی‌توان دمای آغاز و پایان یک رویداد حرارتی را به‌آسانی مشخص کرد. این دو مشکل باعث شده‌اند که با اضافه کردن یک قسمت الکترونیکی به دستگاه توزین حرارتی، بتوان مشتق منحنی وزن بر حسب دما را رسم کرد. این حالت را مشتق توزین حرارتیDTG می‌نامند. نمونه‌ای از منحنی مشتق توزین حرارتی با منحنی توزین حرارتی در شکل ۵ مقایسه شده است.



شکل۵- مقایسه بین گراف‌های TGA و نتایج حاصل از آنالیز DTG

میکروسیلیس با وزن مخصوص ۲/۱۲ نیز در این تحقیق بعنوان پوزولان پرکاربرد و با درصدهای مختلف جایگزین سیمان شده و به همراه با زئولیت در بتن استفاده گردید تا خواص بتن را بهبود بدهد. سنگدانه‌های مصرفی در این تحقیق شامل شن و ماسه طبیعی تهیه شده از معادن شهریار بود و از شن با حداکثر اندازه ۲۰ میلیمتر و درصد جذب آب ۲٪ و ماسه با مدول نرمی ۴ و درصد جذب ۳/۷ درصد با نمودار دانه‌بندی مطابق شکل ۶ استفاده شد. آب مصرفی نیز آب شرب شهری دارای کیفیت مطلوب بود.

از دانه های پلی استایرن سفید رنگ بعنوان سنگدانه سبک استفاده شد. دانه‌های پلی استایرن فشرده با اندازه تا ۵ میلیمتر یک نوع سبک دانه مصنوعی با چگالی پایین حدود ۳۰ کیلوگرم در مترمکعب و جذب آب ۱٪ است و نوعی اسفنج پایدار متشکل از فضاهای خالی هوای گسسته در یک ماتریس پلیمری است که برای ساخت بتن سبک در این تحقیق استفاده شده است.



شکل ۶- دانه بندی ماسه مصرفی

۲. ۲. طرح‌های اختلاط بتن و روش ساخت

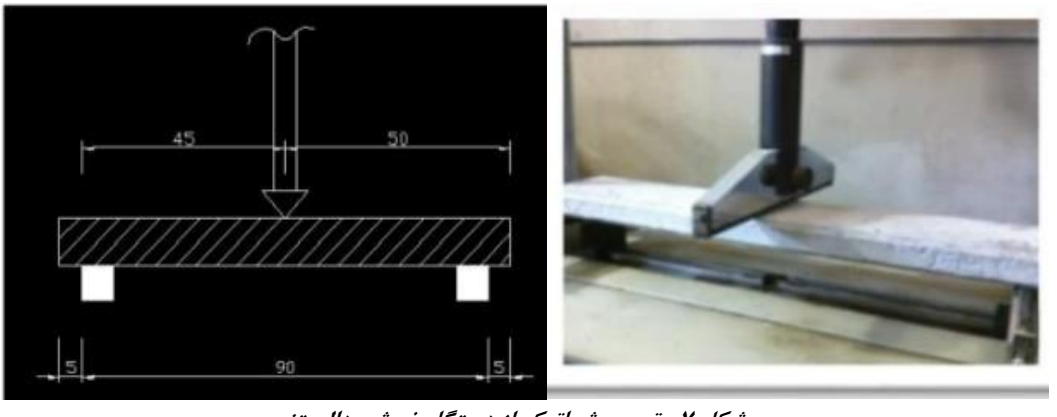
در این تحقیق ۴ طرح اختلاط مطابق جدول ۴ مورد آزمایش قرار گرفت و نسبت آب به مصالح سیمانی (مجموع وزن سیمان، زئولیت و میکروسیلیس استفاده شده در هر طرح) در تمامی طرح‌های اختلاط برابر ۰/۴۸۵ با عیار سیمان اولیه ۳۵۰ کیلوگرم بود، درصد جایگزینی زئولیت برابر ۲۰ درصد و جایگزینی میکروسیلیس برابر ۵ و ۱۰ درصد وزن سیمان بود. میزان مصرف دانه‌های پلی استایرن نیز حدود ۲۰ درصد حجم کل بتن درنظر گرفته شده که تقریبا ۶ کیلوگرم در هر متر مکعب بتن خواهد شد و جایگزین سنگدانه ها در بتن معمولی خواهد شد. وزن مخصوص همه بتن ها حدود ۱۷۵۶کیلوگرم بر مترمکعب بود که در زمره بتن های سبک است. مقدار آب براساس سنگدانه SSD است ولی قبل از ساخت، رطوبت واقعی سنگدانه ها محاسبه گردید و به تناسب کمتر بودن از حالت اسباع با سطح خشک، به همان میزان آب اضافه شد. برای ساخت مخلوط بتن معمولی، ابتدا شن را درون دستگاه مخلوط کن که روشن بوده ریخته و مقداری از آب طرح اختلاط را به آن اضافه میشود سپس به ترتیب، ماسه و سیمان را درون دستگاه ریخته و در هر مرحله مقداری از آب را اضافه کرده و پس از گذشت ۳ دقیقه در حالی که دستگاه مخلوط کن درحال چرخش است، مخلوط را به طور کامل درون ظرف مخصوص خالی کرده و برای پرکرن قالب‌ها استفاده می‌شود. برای مخلوط‌هایی که در آن‌ها از پوزولان استفاده می‌شود، باید پوزولان مورد نظر را به صورت دوغاب درآورد و در هر مرحله مقداری از آن را به شن، ماسه و سیمان اضافه کرد و مقدار پلی استایرن نیز در ابتدا با شن و ماسه ترکیب شده و پس از هم زدن اولیه، مصالح دیگر به ترتیب بالا اضافه می‌شوند.

جدول ۴- طرح اختلاط یک متر مکعب بتن سبک سازه ای (kg/m3)

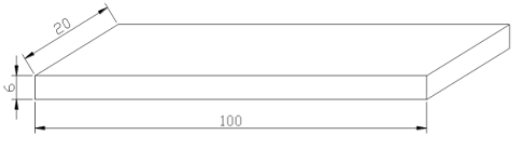
مواد اختلاط		طرح شاهد	طرح ۱	طرح ۲	طرح ۳
میکروسیلیس	۵ درصد	۰		۱۷/۵	-
	۱۰ درصد		۰	-	۳۵
زئولیت	۲۰ درصد	۰	۷۰	۷۰	۷۰
شن		۷۳۰	۷۳۰	۷۳۰	۷۳۰
ماسه		۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰
سیمان		۳۵۰	۲۸۰	۲۶۲/۵	۲۴۵
آب		۱۷۰	۱۷۰	۱۷۰	۱۷۰
پلی استایرن (۲۰٪ حجم کل)		۶	۶	۶	۶
مجموع		۱۷۵۶	۱۷۵۶	۱۷۵۶	۱۷۵۶

۲. ۳. نمونه ها و روش‌های آزمایش

جهت بررسی تأثیر زئولیت و میکروسیلیس روی خصوصیات مکانیکی بتن های سبک حاوی پلی استایرن، نمونه‌های مختلفی ساخته شد که روی آن‌ها آزمایش‌های مقاومت فشاری و مقاومت خمشی برای سنین ۷ و ۲۸ روزه انجام شد. برای انجام آزمایش مقاومت فشاری از استاندارد ASTM C39 و از نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۵۰ و ارتفاع ۳۰۰ میلیمتر و همچنین نمونه های مکعبی به ابعاد ۱۵۰ میلیمتر استفاده شد[۳۱] و برای هر طرح، سه نمونه مورد آزمایش و بارگذاری مستقیم قرار داده و میانگین آن ها بدست آمد. در آزمایش مقاومت خمشی از نمونه‌های منشوری به شکل تیر با عرض و ارتفاع ۶۰ و ۲۰۰ میلیمتر و طول ۱۰۰۰ میلیمتر مطابق شکل ۷ و ابعاد تیر و شبکه آرماتور به شرح شکل ۸ استفاده شد بطوری که ۳ عدد میلگرد طولی به قطر ۶ میلیمتر و ۶ عدد میلگرد عرضی به قطر ۶ میلیمتر استفاده شد. تیر مورد آزمایش روی دو تکیه‌گاه به فاصله ۵۰ میلیمتر از لبه‌های تیر و با طول محاسباتی ۹۰۰ میلیمتر قرار داده شد و یک بار نقطه‌ای در وسط تیر اعمال شد تا بار گسیختگی تیر بدست آید که با قرار دادن آن در رابطه‌ی $M = \frac{PL}{4}$، مقاومت خمشی تیر به دست می‌آید.



شکل ۷- تصویر شماتیک از دستگاه خمشی دال بتنی



شکل ۸- ابعاد نمونه تیر (ابعاد بر حسب سانتیمتر)

۳-تجزیه و تحلیل نتایج

۳-۱- مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری مهم‌ترین آزمایش روی نمونه‌های بتنی می‌باشد که می‌تواند نشان‌دهنده کیفیت بتن از نظر خصوصیات مکانیکی باشد. مقدار بدست آمده برای مقاومت فشاری یک نمونه بتنی که حاوی ماده پوزولانی است، بستگی به عوامل مختلفی از جمله شرایط سنی و درصد جایگزینی پوزولان دارد. در سنین پایین معمولاً اثر پراکندگی یک پوزولان می‌تواند باعث افزایش مقاومت فشاری و اثر رقیق کنندگی می‌تواند باعث کاهش مقاومت بتن شود. در سنین بالا نیز افزایش مقاومت می‌تواند به دلیل پیشرفت هیدراتاسیون و افزایش ژل سیلیسی ناشی از واکنش پوزولانی و کاهش مقاومت نیز می‌تواند ناشی از عملکرد پایین پوزولان مورد نظر در بتن باشد. مقاومت فشاری نمونه های مکعبی و استوانه‌ای بتن سبک شاهد و بتن طرح اختلاط یک (شامل تنها ۲۰ درصد جایگزینی زئولیت به‌جای سیمان) و متوسط مقاومت نمونه ها و نسبت مقاومت نمونه های استوانه ای به مکعبی (نمونه‌ها در حالت اشباع با سطح خشک) در جدول ۵ داده شده اند و نحوه شکست نمونه‌ها نیز در شکل ۹ نشان داده شده است.

شکل ۹ – نمونه‌های شکسته شده از طرح اختلاط شماره یک

جدول ۵ – مقاومت فشاری نمونه‌های طرح های اختلاط شاهد و اول (MPa)

مقاومت فشاری	طرح شاهد		طرح اول	
	۷ روزه	۲۸ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه
نمونه مکعبی اول	۱۴/۱	۲۱/۱	۱۳/۴	۲۲/۵
نمونه مکعبی دوم	۱۳/۶	۲۱/۴	۱۳/۲	۲۲
نمونه مکعبی سوم	۱۴/۶	۲۰/۹	۱۳/۱	۲۲/۲
متوسط نمونه مکعبی	۱۴/۱	۲۱	۱۳/۲	۲۲/۳
نمونه استوانه‌ای اول	۱۱/۱	۱۶/۸	۱۰/۵	۱۸/۱
نمونه استوانه‌ای دوم	۱۱/۵	۱۶/۹	۱۰/۶	۱۷/۴
متوسط نمونه استوانه‌ای	۱۱/۳	۱۶/۹۵	۱۰/۵۵	۱۷/۷
نسبت متوسط نمونه استوانه‌ای به مکعبی	۰/۸	۰/۸۱	۰/۸	۰/۷۹

نتایج حاصله در جدول ۵ نشان می‌دهد که بتن طرح شاهد که دارای تنها مواد پلی استایرن است و مقاومت فشاری نزدیک به ۱۷ مگاپاسکال بعد از ۲۸ روز را بدست آورد مطابق آئین نامه مقررات ملی مبحث ۹ می‌تواند در زمره بتن سبک با مقاومت متوسط باشد[۴] ضمن اینکه پراکندگی زیادی بین نتایج نمونه های آزمایشی برای محاسبه متوسط مشاهده نشد. نتایج مقاومت فشاری طرح اختلاط شماره یک بیانگر آن است که در سن ۷ روز مقاومت نمونه‌های حاوی زئولیت بطور جزئی و حدود ۸ درصد کمتر از نمونه کنترل شاهد بوده که به دلیل کاهش مقدار

سیمان در این نمونه‌ها و واکنش پذیری کم پوزولآن‌ها در این سن نسبت بود ولی با افزایش سن نمونه‌ها تا ۲۸ روز به دلیل تکمیل شدن واکنش‌های پوزولانی و بهبود ساختار حفرات نمونه‌های بتنی، مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی زئولیت رشد حدود ۷ درصدی نسبت به نمونه‌های شاهد داشته‌اند که با جایگزینی ۲۰ درصد زئولیت و کاهش مصرف سیمان، نه تنها مقاومت فشاری کاهش نیافت بلکه رشد جزئی هم داشت.

نسبت مقاومت‌های نمونه‌های استوانه‌ای به مکعبی برای نمونه‌های ۷ روزه و ۲۸ روزه به ترتیب برابر ۰/۷۹ و ۰/۷۹۴ می‌باشد که به عدد ۰/۸ موجود در آیین نامه بتن ایران برای بتن‌های معمولی بسیار نزدیک است[۴]. نتایج طرح اختلاط شماره دو و سه حاوی ۲۰ درصد جایگزینی زئولیت و به ترتیب دارای ۵ و ۱۰درصد جایگزینی میکروسیلیس در جدول ۶ نشان داده شده است. با مقایسه نتایج جداول ۵ و ۶ نشان می‌دهد که مقاومت‌های ۷ روزه طرح های ۲ و۳ تقریبا با طرح شاهد یکسان است که اثر منفی کاهش مقدار سیمان و واکنش پذیری کم پوزولآن‌ها در نمونه شاهد و طرح یک با افزودن میکروسیلیس جبران شده است. به دلیل افزایش پوزولان‌ها مشاهده می شود که با افزایش سن نمونه‌ها تا ۲۸ روز به دلیل تکمیل شدن واکنش‌های پوزولانی و بهبود ساختار حفرات نمونه‌های بتنی مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی زئولیت طرح اختلاط دو با ۵٪ میکروسیلیس، رشد ۵۰ تا ۶۰ درصدی (به ترتیب نمونه های مکعبی و استوانه ای) نسبت به نمونه‌های شاهد و رشد ۴۰ تا ۵۲ درصدی (به ترتیب نمونه های مکعبی و استوانه ای) نسبت به نمونه‌های طرح اختلاط یک داشته‌اند.

نکته قابل توجه آن است که با افزایش میکروسیلیس از ۵ درصد به ۱۰ درصد ، میزان مقاومت فشاری طرح اختلاط سه نسبت به طرح اختلاط دو، حدود۱۰ تا ۱۸ درصد در نمونه های مکعبی و استوانه ای کاهش یافته است. نسبت مقاومت نمونه‌های استوانه‌ای به مکعبی برای نمونه‌های ۷ روزه و ۲۸ روزه طرح اختلاط دو با مقاومت فشاری بالاتر به ترتیب برابر ۰/۸۲ و ۰/۸۵۶ می‌باشد در حالیکه این مقادیر برای طرح اختلاط سه برابر ۰/۸۱ و ۰/۷۸۵ بود. برای نمونه‌های ۲۸ روزه این عدد در مقایسه با عدد ۰/۸ موجود در آیین نامه بتن ایران برای بتن‌های معمولی، اختلاف ۴ تا ۹ درصدی دارند لذا نسبت آئین نامه برای نمونه های بتن سبک حاوی زئولیت و دوده سیلیسی قابل کاربرد است. بنابراین بتن طرح اختلاط یک با مقاومت بیش و نزدیک به ۱۷ مگاپاسکال که حاوی تنها زئولیت بهمراه پلی استایرن است در زمره بتن سبک سازه ای متوسط است ولی بتن های طرح های اختلاط ۲ و ۳ دارای مقاومت فشاری قابل توجه بیش از ۱۷ مگاپاسکال بعد از ۲۸ روز هستند در زمره بتن سبک سازه ای با مقاومت بالا هستند[۴]. در جدول ۷ نتایج برازش شده نمونه‌های بتنی ساخته شده با سه طرح اختلاط مذکور آورده شده است. همانطور که انتظار می رفت در تمامی طرح‌ها با افزایش سن، مقاومت فشاری افزایش پیدا کرده است که این افزایش ناشی از پیشرفت هیدراتاسیون، پیشرفت واکنش پوزولانی و بهبود خواص مکانیکی بتن می‌باشد. در سن ۷ روزه، هنوز پوزولآن‌ها نتوانسته‌اند عملکرد خود را برای انجام واکنش پوزولانی و افزایش مقاومت نشان دهند. مقاومت ۲۸ روزه تمام طرح‌ها از نمونه شاهد بالاتر است که نشان‌دهنده وارد شدن پوزولآن‌های زئولیت و میکروسیلیس در واکنش‌های بتن می‌باشد. البته برای طرح اختلاط شماره سه که میزان پوزولآن‌ها در آن زیاد است میزان مقاومت فشاری نسبت به طرح شماره دو میزان کمتری است که می‌تواند ناشی از اثر رقیق کنندگی باشد. به طور کلی بهترین طرح اختلاط، طرح اختلاط شماره دو با جایگزینی ۲۰ درصد زئولیت و ۵ درصد میکروسیلیس با مقاومت فشاری ۲۸ روزه حدود ۲۷ مگاپاسکال در نمونه های استوانه ای می‌باشد. نتایج طرح اختلاط شماره یک با نمونه شاهد برای بررسی تأثیر زئولیت بر روی مقاومت فشاری بتن و نتایج طرح اختلاط شماره یک، دو و سه برای بررسی تأثیر میکروسیلیس و میزان آن بر روی مقاومت فشاری بتن مقایسه گردیدند. مشخص است در سن ۷ روز مقاومت فشاری نمونه شاهد بالاتر از مقاومت فشاری نمونه طرح اختلاط شماره یک است ولی با افزایش سن نمونه‌ها تا ۲۸ روز به دلیل تکمیل شدن واکنش‌های پوزولانی و بهبود ساختار حفرات نمونه‌های بتنی مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی زئولیت رشد قابل توجه نسبت به نمونه‌های شاهد داشته‌اند.

جدول ۶- مقاومت فشاری مربوط به طرح اختلاط شماره دو و سه (MPa)

مقاومت فشاری	طرح ۲		طرح ۳	
	۷ روزه	۲۸ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه
نمونه مکعبی اول	۱۴	۳۰/۴	۱۴	۲۸/۱
نمونه مکعبی دوم	۱۳/۹۵	۳۱/۲	۱۳/۲	۲۸/۳
نمونه مکعبی سوم	۱۳/۶	۳۲/۱	۱۳/۱	۲۸
متوسط نمونه مکعبی	۱۴/۳	۳۱/۲	۱۴/۱	۲۸/۱
نمونه استوانه‌ای اول	۱۱/۴	۲۶/۵	۱۰/۸	۲۲/۴
نمونه استوانه‌ای دوم	۱۱/۲	۲۷/۳	۱۰/۹	۲۱/۹
متوسط نمونه استوانه‌ای	۱۱/۷	۲۶/۹۵	۱۱/۵	۲۲/۱۵
نسبت متوسط نمونه استوانه‌ای به مکعبی	۰/۸۱	۰/۸۶	۰/۸۱	۰/۷۹

مقاومت فشاری نمونه‌های طرح اختلاط شماره دو از مقاومت فشاری طرح اختلاط شماره یک بیشتر است، دلیل آن را می‌توان استفاده از ۵ درصد میکروسیلیس در بتن نمونه طرح اختلاط شماره دو دانست. از طرفی در طرح شماره سه با افزودن میکروسیلیس به ۱۰ درصد به دلیل اثر رقیق کنندگی و در دسترس نبودن هیدروکسید کلسیم برای انجام واکنش پوزولانی، مقاومت فشاری بتن آن نسبت به طرح اختلاط شماره دو کاهش پیدا کرده است.

جدول ۷ – مقایسه نتایج مقاومت فشاری متوسط نمونه ها در سه طرح اختلاط (MPa)

مقاومت نمونه مکعبی					
طرح اختلاط	۷ روزه	درصد افزایش یا کاهش نسبت به نمونه شاهد(٪)	۲۸روزه	درصد افزایش نسبت به نمونه شاهد(٪)	۷ به ۲۸روزه
شاهد	۱۴/۱	-	۲۱	-	۰/۶۷
اول	۱۳/۲	-۶/۴	۲۲/۳	۵/۹	۰/۵۹
دوم	۱۳/۹	-۲/۵	۳۱/۲	۴۹	۰/۴۵
سوم	۱۳/۴	-۴/۲	۲۸/۱	۳۴	۰/۴۸
مقاومت نمونه استوانه ای					
شاهد	۱۱/۳	-	۱۶/۹۵	-	۰/۶۶
اول	۱۰/۵۵	-۶/۶	۱۷/۷	۴	۰/۶
دوم	۱۱/۳	۰	۲۶/۹۵	۵۹	۰/۴۲
سوم	۱۰/۸۵	-۴/۱	۲۲/۱۵	۳۱	۰/۴۹

اثر زمان در رشد مقاومت فشاری نمونه ها حاوی انواع پوزولان در جدول ۷ نشان داده شده است بطوری‌که سرعت افزایش مقاومت فشاری ۷ به ۲۸ روز در طرح شماره دو بیشتر از سه طرح دیگر بود. نسبت مقاومت ۷ روزه به مقاومت ۲۸ روزه در نمونه شاهد ۰.۶۶ ولی در نمونه طرح اختلاط شماره یک، دو و سه به ترتیب برابر ۰/۵۹ ، ۰/۴۴ و ۰/۴۸ است که این بیانگر آن است که سرعت افزایش مقاومت نمونه طرح شماره دو بیش از بقیه نمونه ها بود.

۲-۳- آزمایش مقاومت خمشی بر روی تیرهای دال بتنی

در تحقیق حاضر، مقاومت خمشی (یا آزمایش مدول گسیختگی)، روی نمونه‌های منشوری با ابعاد $1000 \times 200 \times 60\ mm$ در سنین ۲۸ روزه صورت گرفت و نیروی ماکزیمم متمرکز بدست آمده از هریک از طرح‌های اختلاط و مقادیر ظرفیت خمشی (مدول گسیختگی)، در جدول ۸ داده شده است. طبق انتظار و همانند نتایج بدست آمده برای مقاومت فشاری، مقادیر ظرفیت خمشی نیز با افزایش سن افزایش پیدا می‌کند که نشان‌دهنده پیشرفت واکنش هیدراتاسیون بین سیمان و آب و همچنین عملکرد پوزولانی زئولیت و میکروسیلیس در بتن می‌باشد. نتایج برای سن ۲۸ روزه نشان می‌دهد برای مقاومت خمشی طرح‌های اختلاط بتن سبک ۱ و ۲ و ۳ به ترتیب ۱۳، ۴۴، و ۳۰ درصد بیشتر از نمونه شاهد بدون زئولیت و دوده سیلیسی است. بهترین نتیجه برای طرح اختلاط شماره دو بدست آمده که دلیل آن باید در عملکرد مطلوب زئولیت و میکروسیلیس به‌عنوان پوزولان‌های جایگزین دانست. مقاومت خمشی (مدول گسیختگی)، برای طرح اختلاط شماره سه نسبت به طرح اختلاط شماره دو افت پیدا کرده است که احتمالاً می‌تواند به دلیل اثر رقیق کنندگی ناشی از افزودن بیش از حد میکروسیلیس در بتن باشد. در شکل ۱۰ نحوه شکست و الگوی ترک برای سه طرح اختلاط مذکور نشان داده شده است.

شکل ۱۰- نحوه شکست و الگوی ترک نمونه‌های تیر بتنی ساخته شده با سه طرح اختلاط

فرمول مدول گسیختگی بتن معمولی مطابق مبحث ۹ مقررات ملی ساختمان برابر $f_r = 0.62\sqrt{f_c'}$ است لذا برای بدست آوردن ضریب جذر مقاومت فشاری نمونه استوانه ای برای بتن سبک مورد نظر، مقادیر مربوطه در جدول ۸ محاسبه شده است که این مقادیر نشان می‌دهد که گرچه مقاومت فشاری بتن سبک نسبتا عدد بالایی بدست آمده است ولی به همان نسبت افزایشی در مدول گسیختگی مانند بتن معمولی مشاهده نگردیده است.

جدول ۸ – نتایج آزمایشگاهی مقاومت خمشی (مدول گسیختگی) ۲۸ روزه

طرح ختلاط	مقاومت خمشی(مدول گسیختگی) (kN.m)	درصد افزایش نسبت به نمونه شاهد(٪)	مقاومت فشاری استوانه f_c' (MPa)	نسبت مدول گسیختگی به جذر مقاومت
شاهد	۰/۶۷۵	-	۱۶/۹۵	۰/۱۶۴
اول	۰/۷۶۵	۱۳	۱۷/۷	۰/۱۸۱
دوم	۰/۹۶۸	۴۴	۲۶/۹۵	۰/۱۸۶
سوم	۰/۸۷۸	۳۰	۲۲/۱۵	۰/۱۸۶

ظرفیت خمشی اسمی تئوری نمونه تیر مسلح ساخته شده بر اساس رابطه $a=\frac{A_s f_y}{0.85 f_c' b}$ و $M_n = A_s f_y (d-\frac{a}{2})$ و آئین نامه طراحی بدست می آید که عرض b و ارتفاع موثر d و مقاومت جاری شدن میلگردها f_y و مساحت میلگردها A_s برای همه نمونه ها برابر و معادل به ترتیب ۲۰۰،۳۵ میلیمتر و ۳۰۰ مگاپاسکال و ۸۵ میلیمتر مربع (۳ عدد میلگرد قطر ۶ میلیمتر) بودند و مقاومت فشاری f_c' متناسب با طرح اختلاط شاهد و ۱و ۲و ۳ برابر ۱۷، ۱۷/۷، ۲۷، و ۲۲/۲ مگاپاسکال بودند و لذا مقدار a محاسبه شده برای نمونه های طرح اختلاط های شاهد و ۱و۲و۳ به ترتیب برابر ۸/۸ و ۸/۵ و ۵/۶ و ۶/۸ میلیمتر بود. لذا ظرفیت خمشی تئوری محاسبه شده تیرها برای هر یک از طرح‌های اختلاط در جدول ۹ داده شده و با مقادیر ظرفیت خمشی آزمایشگاهی ۲۸ روزه مقایسه شده است بطوریکه مقاومت خمشی نمونه‌های ۲۸ روزه آزمایشگاهی نمونه های شاهد و طرح ۱ بدون میکروسیلیس از ۱۸ تا ۸ درصد کاهش نسبت مقاومت خمشی تئوری نشان داد ولی مقادیر آزمایشگاهی نمونه های طرح ۲ و ۳ دارای میکروسیلیس دارای افزایش تا ۱۹ درصدی نسبت به مقاومت های تئوری بودند ضمن اینکه تغییر زیادی بین مقادیر تئوری چهار نمونه با وجود تغییر در مقاومت فشاری آنها وجود ندارد.

۴-نتیجه گیری

- بر اساس نتایج بدست آمده از آزمایش‌های مقاومت فشاری و خمشی نمونه ها و تیرهای مسلح بتنی ساخته شده با سه نوع بتن سبک سازه ای با طرح اختلاط های حاوی دانه های پلی استایرن، زئولیت و دوده سیلیسی و آنالیز عددی و اقتصادی ، می‌توان به نتایج زیر رسید:
- به علت نقش زئولیت در بتن، افزودن آن به بتن باعث افزایش مقاومت ۲۸ روزه بتن می‌گردد لذا طرح اختلاط حاوی دارای میکروسیلیس (۵٪ درصد وزن سیمان) و زئولیت (۲۰٪ وزن سیمان) مقاومت بالاتری نسبت به سایر طرح‌های اختلاط داشت و از طرفی به علت استفاده از مقدار کمتری میکروسیلیس، از نظر اقتصادی نیز به‌صرفه‌تر است.
- براساس آزمایش‌های بدست آمده افزایش میکروسیلیس همواره باعث افزایش مقاومت فشاری بتن نمی‌شود. در این آزمایش با افزایش میکروسیلیس از ۵ درصد به ۱۰ درصد میزان مقاومت فشاری حدود ۱۳ درصد کاهش می‌یابد.
- بتن های سبک حاوی دانه های پلی استایرن دارای مقاومت فشاری استوانه ای ۲۸ روزه کمتر از ۱۷ مگاپاسکال بودند و افزایش ۲۰درصد زئولیت باعث افزایش تا ۸ درصدی مقاومت شد و در زمره بتن سبک مقاومت متوسط شدند ولی افزایش ۵ درصد میکروسیلیس باعث افزایش ۶۰ درصدی این مقاومت شد و بعنوان بتن سبک سازه ای مقاومت بالا محسوب شدند.
- نسبت مقاومت ۷ روزه فشاری به مقاومت ۲۸ روزه در بتن سبک ساخته شده با میکروسیلیس، زئولیت و پلی استایرن برای طرح اختلاط پیشنهادی برابر ۰/۴۲ بود که این عدد با ضریب معرفی شده در آیین نامه ها اختلاف زیاد دارد. مقاومت ۷ روزه نمونه‌های حاوی زئولیت و میکروسیلیس کمتر از نمونه کنترل می‌باشد. این موضوع را می‌توان به دلیل کاهش مقدار سیمان در این نمونه‌ها و واکنش پذیری کم پوزولآن‌ها در این سن نسبت داد.
- مقاومت خمشی تیرهای بتن مسلح با طرح‌های اختلاط بتن سبک ۱ و ۲ و ۳ به ترتیب ۱۳، ۴۴، و ۳۰ درصد بیشتر از نمونه شاهد بدون زئولیت و دوده سیلیسی بودند، به‌عبارتی طرح اختلاط حاوی ۵٪ دوده سیلیسی و ۲۰٪ زئولیت عملکرد خمشی بهتری داشت.

۵. قدردانی

نویسندگان از حمایت و پشتیبانی معاونت پژوهشی دانشگاه سمنان و همچنین از همکاری و زحمات آقای مهندس بخشایی کارشناس آزمایشگاه بتن و سازه دانشکده مهدسی عمران دانشگاه سمنان تشکر و قدردانی می‌کنند.

۶. مراجع

[1] *Feng, N., 2005. "Applications of natural zeolite to construction and building materials in China", Construction and Building Materials 19:579–584.*

[2] *Manifipour, M., Rapel, M., 1391. "Experimental Investigation of silica fume effect on compressive strength of light-weight concrete", 8 th International Civil Eng Conference, Isfahan, Iran. (in Persian)*

[3] *Khodaparast, M., Ashrafian, S.M., 1391. "Silica fume application effect on making light-weight concrete", 8 th International Civil Eng Conference, Isfahan, Iran. (in Persian)*

[4] *Iranian National Building Codes Compilation Office. Iranian National Building Code, Part 9: Reinforced Concrete Buildings Design, Ministry of Road and Urban Development, 2020. (in Persian)*

[5] *Entezari, A.R., Esmahili, J., 1389. "Investigation of mechanical charachteristics of structural light-weight concrete", Civil Eng and Environment Journal, Vol 40, No 2. (in Persian)*

[6] *Sadrmomtazi, A., Nosrati, H., 1392. "Investigation of design equations of RC structural light-weight concrete beam containing light-weight clay aggregate", Iran Concrete Research, No2. (in Persian)*

[7] *P.K. Mehta, P.J.M. Monteiro, 2014. "Concrete: Microstructure, Properties, and Materials", 4th Edition ed., McGraw-Hill, USA.*

[8] *Jebel-Hameri, B., Shehrbaf, M.R., Sedaghat doust, A., 1391. "Investigation of Silica fume effect on mechanical charachteristics and durability of structural light-weight concrete", First national conference of Concret Industry. (in Persian)*

[9] *Basirat, Sh., Homrani, M., Behforouz, B., 1397. "Investigation of Silica fume effect on compressive strength water absorption of structural light-weight concrete", Strucrure and Construction Journal. No 2. (in Persian)*

[10] *Cejka, J., Van Bekkum, H. Corma, A. and Schueth, F., 2007. "Introduction to zeolite molecular SIEVES", Edition: 3, Publisher: Elsevier.*

[11] *Margeta, K., Zabukovec Logar,N., Šiljeg,N., and Farkaš,A., "Natural Zeolites in Water Treatment – How Effective is Their Use", ISBN 978-953-51-0928-0, Published: January 16, 2013.*

[12] *Bu lent, Y., Uc-arb, A., Teyakab, B., Uza, V., 2007. "Properties of zeolitic tuff (clinoptilolite) blended ortland cement", Building and Environment 42:3808–3815.*

[13] *Shuichi. H., 2003. "Zeolite photochemistry: impact of zeolites on photochemistry and feedback from photochemistry to zeolite science", Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews 4:19–49.*

[14] *Shekarchizade, M., Eftekharnezhad, J., Ahmadi, B., 1388. " Improvement of concrete properties with admixtures", Technical report, Teharn Unuversity. (in Persian)*

[15] *Najimi, M., Sobhani, J., Ahmadi. B., and Shekarchi, M., 2012. "An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan", Construction and Building Materials 35:1023–1033.*

[16] *Byung-Wan Jo, Ji-Sun Choi, Kwang-Won Yoon and Jung-Hoon Park, 2012. "Material characteristics of zeolite cement mortar", Construction and Building Materials 36:1059–1065.*

[17] *Uzal, B., and Turanlı, L., 2012. "Blended cements containing high volume of natural zeolites: Properties, hydration and paste microstructure", Cement & Concrete Composites 34:101–109.*

[18] *Ahmadi, B. and Shekarchi, M., 2010. "Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material", Cement & ConcreteComposites 32:134–141.*

[19]Karakurt, C, and Bekir Topcu, I., 2011. "Effect of blended cements produced with natural zeolite and industrial by-products on alkalisilica reaction and sulfate resistance of concrete", Construction and Building Materials 25:1789–1795.

[20] Perraki, Th, Kakali,G., and Kontoleon,F., 2003. "The effect of natural zeolites on the early hydration", Microporous and Mesoporous Materials 61:205–212.

[21] Perraki, T, Kontori, E., Tsivilis, S., and Kakali, G.,2010. "The effect of zeolite on the properties and hydration of blended cements", Cement and Concrete Composites 32:128–133.

[22] Poon, C.S, Lam, L., Kou, S.C. and. Lin, Z.S., 1999. "A study on the hydration rate of natural zeolite blended cement pastes", Construction and Building Materials 13:427-432.

[23]Caputo, D, Liguori, B., and Colella, C., 2008. "Some advances in understanding the pozzolanic activity of zeolites: The effect of zeolite structure", Cement & Concrete Composites 30:455–462.

[24] Chan, Sammy Y.N and Xihuang Ji, 1999. "Comparative study of the initial surface absorption and chloride diffusion of high performance zeolite, silica fume and PFA concretes", Cement & Concrete Composites 21:293-300.

[25] Ikotun, B.D and Ekolu, S., 2010. "Strength and durability effect of modified zeolite additive on concrete properties", Construction and Building Materials 24:749–757.

[26] Quanlina, N., and Naiqian, F., 2005. "Effect of modified zeolite on the expansion of alkaline silica reaction", Cement and Concrete Research 35:1784– 1788.

[27]Ghourchian, S., Wyrzykowski, M., Lura, P., Shekarchi, M., and Ahmadi, B., 2013. "An investigation on the use of zeolite aggregates for internal curing of concrete", Construction and Building Materials 40:135–144.

[28] Provis, J.L., Grant C. Lukey and Jannie S. J. van Deventer, 2005. "Do Geopolymers Actually Contain Nanocrystalline Zeolites? A Reexamination of Existing Results", Chem. Mater., 17:3075-3085.

[29] Ban, Sh., "Computer Simulation of Zeolites: Adsorption, Diffusion and Dealumination, Zeolite", PhD Thesis., 2005.

[30]Ramezanianpour, A.A., 1389. "Cement and Pozolane Roles on concrete durability and sustainable development", Internation conference on Concrete, Tehran, Iran. (in Persian)

[31]ASTM (American Society for Testing and Materials) C 39, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM Publication.