

## بررسی آزمایشگاهی بتن حاوی ذرات لاستیک با استفاده از روش‌های سرعت امواج اولتراسونیک

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۷

کد مقاله: ۷۲۵۴۹

رضا عزیزی<sup>۱</sup>

### چکیده

هدف از این پژوهش بررسی آزمایشگاهی بتن حاوی ذرات لاستیک با استفاده از روش‌های سرعت امواج اولتراسونیک می‌باشد. طرح اختلاط مورد استفاده در این تحقیق جهت دستیابی به بتن حاوی خودتراکم بر طبق دستورالعمل R-۲۳۷-۰۷ ACI انجام شده است. دستگاه‌های آزمایش بتن خودتراکم در حالت سخت شده شامل جک فشاری، دستگاه آزمایش اولتراسونیک می‌باشد. نتایج حاکی از آن است که استفاده از خرده لاستیک سبب کاهش خواص روانی بتن خودتراکم می‌گردد به نحوی که استفاده از ۹ درصد خرده لاستیک در مخلوط‌های با بزرگترین اندازه سنگدانه ۱۲/۵ میلی‌متر سبب کاهش جریان اسلامپ تا ۳ درصد شد. همچنین افزایش نسبت آب به سیمان نیز تاثیر قابل توجهی بر کاهش لزجت مخلوط بتن خودتراکم در پی داشت کاهش سرعت امواج اولتراسونیک نیز تحت دماهای ۳۰۰ و ۶۰۰ و ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد برای مخلوط‌های با نسبت آب به مواد پودری ۰/۳۹- نسبت به مخلوط حرارت ندیده، در مقایسه با مخلوط‌های مشابه اما با نسبت آب به مواد پودری ۰/۳۴ به ترتیب ۱/۳، ۰/۵ و ۰/۳ درصد بیشتر شد.

واژگان کلیدی: بتن خود تراکم، مقاومت فشاری، سرعت امواج اولتراسونیک، خرده لاستیک

در چند دهه اخیر برای رفع و کاهش نواقص بتن و رسیدن به بتن با دوام، از پوزولان‌هایی استفاده شده است. از طرفی یکی از بحرانی‌ترین مسائل دنیا دفع مواد ضایعاتی است. رشد جهانی صنعت اتومبیل به عنوان وسیله اصلی حمل و نقل باعث رشد چشم‌گیر تولید لاستیک (تایر) شده است و به تبع آن شاهد انباشته‌های بزرگی از لاستیک‌های مستعمل هستیم که دفع آن‌ها به عنوان یک نوع زباله جامد می‌تواند منجر به مشکلات زیست محیطی زیادی شود. لاستیک ضایعاتی یکی از مواد است که به علت تجزیه ناپذیری مورد توجه می‌باشد. بنابراین استفاده بهینه از این ضایعات به یک ضرورت در جهت کاهش آلودگی زیست محیطی تبدیل شده است. (شیرازی، ۱۴۰۰) امروزه کاربردهای فناوری نوین در صنعت ساخت و ساز با ایجاد فرصت‌های بهتر نه تنها به بهبود کیفیت مصالح و مواد ساختمانی کمک شایانی کرده است؛ بلکه از این طریق موجب عدم هدر رفت منابع طبیعی شده است. در صنعت ساخت و ساز، انواع مختلفی از مصالح ساختمانی وجود دارند. یکی از این مصالح ساختمانی، بتن است. بتن نیز بسته به شرایط استفاده و کارایی آن، انواع مختلفی دارد. مطالعاتی که در عصر اخیر در مورد بتن و انواع آن شکل گرفته است، باعث شده تا پیشرفت‌های فراوانی در این زمینه رخ داده و عملکرد و دوام این ماده ساختمانی، به طور شگفت‌آوری بهبود یابد. بتن به علت خواص و مشخصات منحصر به فرد کارکرد زیادی در اجرای پروژه‌های عمرانی دارد. همچنین در مقایسه با فولاد و پلیمرها بکارگیری بتن در صنعت ساخت و ساز مقرون و به صرفه‌تر می‌باشد. انواع مختلف بتن با توجه به خاصیت تطبیق‌پذیری و سازگاری با شرایط، محبوبیت فراوانی پیدا کرده است. (رعیت پناه، ۱۳۹۹) بتن ساده به دلیل مزایایی مانند هزینه کم و در دسترس همه بودن، به طور گسترده در ساختار اصلی بیشتر سازه‌ها استفاده می‌شود. اما در کنار این مزایا، دارای معایبی از جمله رفتار شکننده، مقاومت کششی کم و ظرفیت کرنش اندک است. بنابراین بهره‌برداری سریع از سازه‌های بتنی به دلیل نیاز به گذشت زمان برای گیرش بتن و دستیابی به مقاومت فشاری نهایی تا حدودی امکان‌پذیر نمی‌باشد از سویی دیگر، هزینه بالای قالب‌های مورد استفاده و نیروی ماهر (آرماتوربند) برای اجرای بتن مسلح نسبت به بتن معمولی از دیگر معایب استفاده بتن‌ها است که مهندسان عمران همواره با آن دست‌به‌گریبان بوده‌اند. با پیشرفت تکنولوژی و توسعه علم مهندسی سازه، تقاضا برای ساخت انواع جدیدی از بتن‌ها که باید دارای ویژگی‌های بهبود یافته‌ای باشند، افزایش یافت. (زینی پور، ۱۴۰۰) بتن خودتراکم بتنی است که بدون نیاز به لرزاننده و متراکم‌کننده، به آسانی تحت اثر وزن خود در میان فضای بین میلگردها جریان پیدا می‌کند. امروزه استفاده از بتن خود تراکم با داشتن ویژگی‌هایی مانند دوام و پایداری، در سازه‌های بتن آرمه به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. از سویی، یکی از مشکلات مهم در طراحی و اجرای ساختمان‌ها، به خصوص ساختمان‌های مرتفع، وزن و بار مرده زیاد به کار رفته در آن‌ها می‌باشد که استفاده از بتن سبک سبب کاهش وزن و بار مرده قابل توجهی در این سازه‌ها می‌گردد. لذا استفاده از بتن سبک خودتراکم ایده‌ای برای ارضای هر دو خاصیت فوق می‌باشد. در این تحقیق سعی شده است تا تأثیر افزودنی‌های الیاف پرو پر پلین و هوازا بر مقاومت فشاری بتن خودتراکم در برابر حرارت بررسی شود. برای این منظور ابتدا یک طرح اختلاط تجربی انتخاب شده و سپس آزمایش‌های مربوط به بتن تازه خودتراکم شامل اسلامپ، حلقه‌ها، جعبه U، جعبه L و قیف V بر روی آن‌ها انجام گرفته است. در نهایت با توجه به نتایج این آزمایش‌ها، تغییراتی در طرح اختلاط به وجود آمده و طرحی جدید به عنوان طرح شاهد انتخاب شد. در ادامه آزمایش‌های تکمیلی بر روی این طرح انتخاب شده صورت گرفته است و میزان دامنه‌ای برای استفاده از افزودنی‌ها جهت اقناع خواص خودتراکمی بتن انتخاب شد. پس از ساخت نمونه‌های مورد نیاز با طرح‌های اختلاط مختلف، نمونه‌ها مورد آزمایش حرارت قرار گرفته. چنان‌چه انتظار می‌رفت، استفاده از الیاف پرو پر پلین و هوازا باعث بهبود عملکرد بتن در برابر حرارت شد. همچنین این الیاف سبب بهبود رفتار مکانیکی بتن از لحاظ کششی گردید و به علت ایجاد درگیری مصالح با یکدیگر، از ترک‌خوردگی و پوسته‌ای شدن بتن در حرارت جلوگیری کرد. (بابایی، ۱۳۹۷) مشاهدات حاکی از آن است که استفاده بین ۰.۵ تا ۱ درصد از الیاف و کمتر از ۰.۵ درصد هوازا باعث بهبود عملکرد بتن در برابر حرارت شده و استفاده بیش از حد از این افزودنی‌ها و خصوصاً مواد هوازا می‌تواند از مقاومت و وزن بتن به شدت بکاهد و همین‌طور بتن را از رسیدن به خواص بتن خود تراکم باز دارد. از دیرباز بازیافت و حذف لاستیک‌ها یکی از معضلات و چالش‌های حفظ محیط زیست بوده است؛ از طرفی ترکیب بتن کلاسیک شامل مواد معمول آب، سنگدانه‌ها و سیمان می‌باشد. امروزه محققین عمران به دنبال مواد دیگری نیز برای افزایش میزان مقاومت و ایجاد برخی از ویژگی‌ها مانند بالا بردن مقاومت کششی و غیره هستند. با توجه به چالش جهانی جمع‌آوری ضایعات لاستیک‌های فرسوده، یک روش نوین آزمایشگاهی به منظور استفاده از ضایعات لاستیک در صنعت تولید بتن خودتراکم صورت گیرد. (مظاهری، ۱۳۹۶) بنابراین ضرورت انجام این تحقیق از این بُعد آشکار می‌شود که با بازیافت لاستیک فرسوده و استفاده آن در بتن به عنوان سنگ دانه گامی مؤثر در جهت حفظ محیط زیست صورت خواهد گرفت. برای تحقق این هدف یعنی حفظ محیط زیست و بهره‌برداری مؤثر از بازیافت ضایعات لاستیک فرسوده، در این پژوهش به تفصیل آزمایش‌های متنوعی بر روی ترکیب بتن خودتراکم با ذرات لاستیک فرسوده در دو حالت سخت و نرم تحت درجه حرارت‌های مختلف جهت ارزیابی خواص فیزیکی و مکانیکی بتن انجام خواهد شد. بدین منظور تحقیق حاضر به دنبال بررسی آزمایشگاهی بتن حاوی ذرات لاستیک با استفاده از روش‌های سرعت امواج اولتراسونیک بود.

## ۲- روش و طرح تحقیق

طرح اختلاط مورد استفاده در این تحقیق جهت دستیابی به بتن حاوی خود تراکم بر طبق دستورالعمل 237R-07 ACI انجام شده است. دستگاه‌های آزمایش بتن خودتراکم در حالت سخت شده شامل چک فشاری، دستگاه آزمایش اولتراسونیک می‌باشد. در این تحقیق آزمایش‌های متنوعی برای تعیین مشخصات بتن خود تراکم صورت گرفته است چون یک روش آزمایش نمی‌تواند خصوصیات بتن خود تراکم را به خوبی نشان دهد. طرح اختلاط مورد استفاده در این تحقیق جهت دستیابی به بتن حاوی خود تراکم بر طبق دستورالعمل R-07 ACI ۲۳۷ انجام خواهد شد. دستگاه‌های آزمایش بتن خودتراکم در حالت سخت شده شامل چک فشاری، دستگاه آزمایش اولتراسونیک می‌باشد. متغیرهای تحقیق شامل بتن، ذرات لاستیک، سرعت امواج اولتراسونیک می‌باشد. در این تحقیق جهت تجزیه و تحلیل آزمایش‌ها از excel استفاده شده است. مصالح مصرفی برای ساخت نمونه‌های بتنی در این تحقیق شامل سیمان، شن مصرفی، ماسه مصرفی، آب مصرفی، خرده لاستیک مصرفی می‌باشد. آزمایش‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل آزمایش اسلامپ بتن، قیف ۷ شکل، آزمایش L می‌باشد.

### ۲-۱- بتن خودتراکم

بتن خودتراکم بتنی است که با کارایی زیاد و عدم جداشدگی که می‌تواند پس از ریخته شدن در محل مورد نظر فضای قالب را پر کند و اطراف آرماتورها را بدون نیاز به تراکم مکانیکی فرا بگیرد. این بتن تحت وزن خود جاری شده و بدون نیاز به هر نوع لرزاندنی به طور کامل قالب را پر کرده و حالت همگن بودن خود را حفظ نماید. (دهمرد، ۱۳۹۹)

خواص بتن خودتراکم تازه را در ۳ چیز خلاصه کرده است:

الف - توانایی پرکنندگی: جاری شدن بتن خودتراکم در تمام فضای قالب تحت وزن خود.

ب - توانایی عبور: امکان عبور از فواصل تنگ میلگردها و قالب‌ها تحت وزن خود.

ج - مقاوم در مقابل جداشدگی: بتن خودتراکم ضمن دارا بودن خواص (الف) و (ب) باید شکل و ترکیب یکنواخت خود را در جریان حمل و بتن‌ریزی حفظ نماید.

### ۲-۱-۱- تعریف بار توس

بتن خودتراکم بتنی است که تحت وزن خود جاری شده و بدون نیاز به هر نوع لرزاندنی به طور کامل قالب را پر کرده و حالت همگن بودن خود را حفظ نماید. (حسن زاده، ۱۳۹۸)

اجزای تشکیل‌دهنده بتن خود تراکم مشابه همان بتن معمولی است؛ اما نسبت مصالح در ترکیب تغییر کرده است. مواد لازم برای بتن SCC به این شرح است که شامل سیمان، سنگدانه‌های ریز و درشت، آب، مواد افزودنی معدنی مانند میکروسلیس، سرباره و روبره، فوق کاهنده آب، مواد اصلاح‌کننده ویسکوزیته، فیلرهای مانند پودر سنگ گرانیت، مواد افزودنی شیمیایی مانند مواد فوق روان‌کننده و یا مواد قوام‌آور (بابایی، ۱۳۹۷)

- **سیمان:** در حقیقت انواع سیمان‌های پرتلند برای تولید بتن خود تراکم مناسب است. نوع و مقدار سیمان بر اساس دوام و ویژگی‌های بتن تعیین می‌شود. مقدار سیمان در بتن خود تراکم تقریباً بین  $350 - 450 \text{ kg/m}^3$  است.

- **سنگ دانه درشت و ریز:** سایز سنگ دانه‌های درشت بین ۱۶ تا ۲۰ میلی‌متر می‌باشند؛ اما در کل مقدار استفاده از درشت دانه‌ها در بتن خودتراکم کم است و فقط برای کاهش جاری شدن بتن بکار می‌رود. بهتر است از سنگدانه‌های درشت گردگوشه با حداکثر قطر ۲۰ میلی‌متر استفاده کرد زیرا به پایداری و روانی مخلوط بتنی کمک بالایی می‌کند. سنگدانه‌های شکسته با درگیری بین ذرات مقاومت بتن را افزایش می‌دهند.

- **آب:** آب مصرفی در بتن خودتراکم می‌تواند کمتر از بتن سنتی باشد ولی به طور کلی نسبت زیاد آب باعث ناپایداری و کاهش بیش از حد آن، سبب لزجت بتن می‌شود. بنابراین نسبت آب به سیمان از مهم‌ترین مواردی است که مقدار آن کیفیت بتن را تحت تاثیر قرار می‌دهد. (قاسمی، ۱۳۹۵)

- **خاکستر بادی:** افزودن خاکستر بادی باعث کاهش منافذ، کاهش نفوذ پذیری و بهبود کیفیت سازه می‌شود.

- **نانو سیلیس:** برای بهبود خواص مکانیکی سازه استفاده می‌شود.

- **ماده تاملین‌کننده گرانولی:** این ماده از پودرهایی از جنس آهک، بازلت و کوارتز تشکیل شده که در هر سایز، ریز دانه و درشت دانه قابل استفاده است. این ماده برای ایجاد ویژگی روانی و کاهش جداشدگی ذرات بتن خودتراکم کاربرد دارد.

### ۲-۱-۲- بتن لاستیکی

بتن لاستیکی یکی از این راه‌های نوین و مبتکرانه برای استفاده از پلاستیک ضایعاتی است. در بتن لاستیک از خرده‌های پلاستیکی تایرها همان طور که گفته شد با ماسه جایگزین و مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این روش تایرها که بازیافتشان بسیار

چالش برانگیز است، مجددا در صنعت ساختمان مورد استفاده قرار می‌گیرند. RCU نام دیگری است که بر بتن های لاستیکی که در آن ها از گرانول های پلاستیکی به عنوان جانشینی برای سنگ دانه های بتن استفاده می شود، نهاده اند. (شیرازی، ۱۴۰۰) ممکن است با این نام نیز برخورد داشته باشید. خصوصیات و پایداری بتن لاستیک با افزودن ذرات لاستیکی عمل آوری شده و مواد سیمانی مناسب می تواند بهبود یابد. استفاده از پلاستیک در بتن بلوک ها نشان داده که موجب سبک تر شدن و مقاومت لغزشی بیشترشان می گردد در حالی که مقاومت سایششان کمتر می شود. همچنین از آن ها در پانل های پیش ساخته نیز استفاده گردیده است. ضایعات لاستیک تایرها یا سوزانده می شوند و یا دفن می شوند. در روش های نوین تر از آن ها به عنوان کود و یا در آسفالت ها استفاده می شود. در شکل استفاده از آن در آسفالت را مشاهده می کنید. در سال های اخیر از آن برای ساخت بتن نیز استفاده می گردد. شکل های مختلفی از لاستیک تایر ها در بتن مورد استفاده قرار می گیرد که شامل پودر، خرده یا تراشه، گرانول و فیبر می باشد. این اشکال مختلف بسته به اندازه شان به جای سنگدانه های ریز و درشت و شکل پودر به جای سیمان مورد استفاده قرار می گیرد. افزودن ذرات لاستیک عموماً موجب کاهش مقاومت فشاری و افزایش جذب آب در بتن می شود. ذرات لاستیکی ضریب اصطکاک بالا تری نسبت به سنگدانه های طبیعی دارد. ذرات لاستیک افزودنی پلاستیکی بتن نیستند بلکه به عنوان جزیی از مواد اولیه بتن مورد استفاده قرار می گیرند. خواص بتن لاستیکی شامل بتن تازه لاستیکی که کارایی بتن را اسلامپ آن مشخص می کند. (کربلایی، ۱۳۹۶) برخی از محققان بر این باورند که ذرات ریز لاستیکی، موجب کاهش اسلامپ در بتن لاستیکی می شود. در حالی که نتایج آزمایشات محققان دیگر نشان داده است که ذرات لاستیک بر خلاف ماسه آب را جذب نمی کند و در نتیجه کارایی این نوع بتن افزایش پیدا می کند. پس می توان نتیجه گرفت که میزان و اندازه ذرات لاستیک مورد استفاده در بتن لاستیکی در کارایی آن تاثیر می گذارد. چگالی بتن های لاستیکی نیز با افزایش میزان ذرات لاستیکی (CR) کاهش پیدا می کند و مقاومت بتن لاستیکی که نتایج برخی تحقیقات صورت گرفته نشان داده است که افزودن ذرات پلاستیکی (CR) موجب کاهش مقاومت فشاری و پیچشی در اکثر موارد می شود. (بخشی، ۱۳۹۷) حضور ذرات پلاستیکی باعث به وجود آمدن حفرات زیادی می شود که ویژگی های مکانیکی را کاهش می دهند. تغییر شکل تحت فشار ذرات لاستیکی، واکنش های شیمیایی و حفرات هوایی گفته شده می توانند برخی از دلایل این امر باشند. البته که با تدابیری خاص می توان این موارد را تغییر یا بهبود بخشید. تحقیقات نشان داده که استفاده از CR موجب افزایش مقاومت در برابر یخ زدگی و آب شدن می باشد. همچنین جذب آب نیز با افزایش میزان ذرات لاستیکی افزایش می یابد. مقاومتی سایشی نیز همچین ارتباطی را با ذرات لاستیکی موجود در بتن دارد. بتن لاستیکی مقاومت خوبی در برابر اسیدها نیز دارد. علاوه بر این بتن لاستیکی مشخصه های مقاومت خوبی در برابر الکتریسته را نیز نشان داده است.

### ۳- یافته های تحقیق

#### ۳-۱- نتایج آزمایش های بتن خودتراکم در حالت تازه

در این قسمت تأثیر استفاده از مقادیر مختلف خرده لاستیک بر مشخصات رفتارشناسی بتن خودتراکم در حالت تازه آورده شده است. همچنین تأثیر استفاده از دو اندازه برای بزرگترین بعد سنگدانه مصرفی و دو نسبت آب به مواد پودری بر مشخصات رفتارشناسی بتن خودتراکم توسط آزمایش های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به اینکه مهم ترین معیارهای کنترل کیفی بتن خودتراکم در حالت تازه شامل روانی، لزجت و توانایی عبور می باشد لذا این معیارها به طور مشخص توسط آزمایش های مختلف مورد سنجش قرار گرفته اند به نحوی که تأثیر اعمال هر یک از تغییرات ذکر شده در بالا بر معیارهای یاد شده مورد بررسی قرار گرفته است.

#### ۳-۱-۱- روانی

به منظور بررسی تأثیر استفاده از خرده لاستیک، دو نسبت آب به مواد پودری و دو اندازه برای بزرگترین بعد سنگدانه بر روانی مخلوط بتن خودتراکم از آزمایش جریان اسلامپ استفاده شده است.



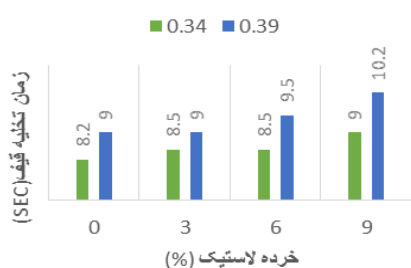
نمودار ۲- نتایج آزمایش جریان اسلامپ مخلوط های با بزرگترین اندازه سنگدانه ۱۹/۵

نمودار ۱- نتایج آزمایش جریان اسلامپ مخلوط های با بزرگترین اندازه سنگدانه ۱۲/۵

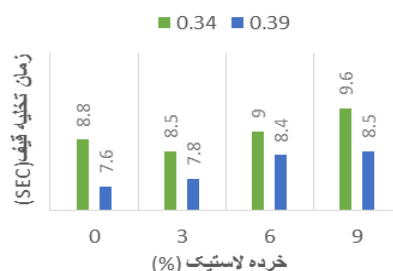
همان طور که در بالا نیز گفته شد استفاده از خرده لاستیک سبب کاهش روانی مخلوط های بتن خودتراکم شده است. با توجه به اینکه خرده لاستیک به صورت حجمی جایگزین ماسه مصرفی شده است و به لحاظ وزن مخصوص خرده لاستیک وزن مخصوص کمتری نسبت به ماسه دارد. یکی از مهم ترین فاکتورهای مورد نیاز در جریان پذیری بتن خودتراکم در آزمایش اسلامپ وزن مخصوص مصالح می باشد چرا که بر اساس تعریف نیز بتن خودتراکم تحت وزن خود جاری می شود بنابراین کاهش وزن مخصوص مصالح مصرفی مهمترین عامل در کاهش روانی در آزمایش جریان اسلامپ می باشد البته به نظر می رسد مشخصات ذاتی جنس ذرات خرده لاستیک در قیاس با مصالح سنگی و درگیری آن ها با یکدیگر نیز از دیگر عوامل تأثیرگذار در کاهش جریان اسلامپ می باشد.

### ۳-۱-۲- لزجت

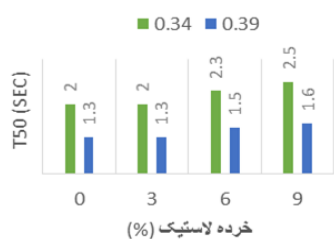
لزجت یکی از مهمترین فاکتورهای مورد نیاز به منظور دستیابی به بتن خودتراکم با مشخصات رفتارشناسی مناسب می باشد. برای تعیین تأثیر تغییرات بر لزجت مخلوط بتن خودتراکم ناشی از استفاده از خرده لاستیک و دو نسبت آب به مواد پودری و دو اندازه برای بزرگترین بعد سنگدانه از آزمایش قیف ۷ استفاده شده است. همچنین در کنار نتایج این آزمایش، نتایج آزمایش T<sub>50</sub> نیز مورد بررسی قرار گرفته است تا استنباط دقیقی تری از نتایج حاصل شود.



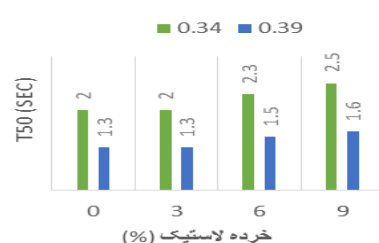
نمودار ۴- نتایج آزمایش قیف ۷ مخلوط های با بزرگترین اندازه سنگدانه ۱۹/۵



نمودار ۳- نتایج آزمایش قیف ۷ مخلوط های با بزرگترین اندازه سنگدانه ۱۲/۵



نمودار ۶- نتایج آزمایش T50 مخلوط های با بزرگترین اندازه سنگدانه ۱۹/۵

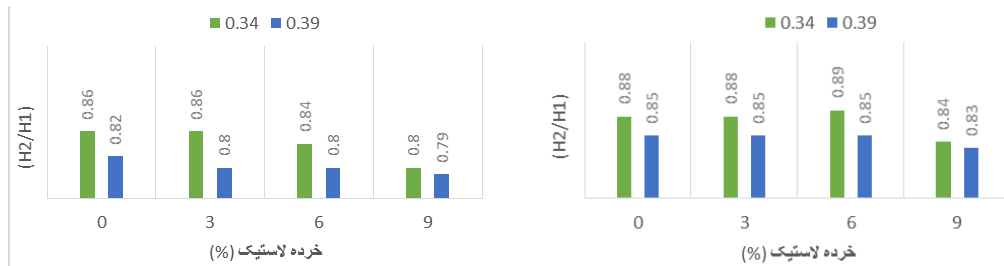


نمودار ۵- نتایج آزمایش T50 مخلوط های با بزرگترین اندازه سنگدانه ۱۲/۵

همان طور که در شکل های مزبور نشان داده شده است استفاده از مقادیر مختلف خرده لاستیک سبب افزایش زمان خروج بتن خودتراکم از قیف ۷ شکل می باشد. همان طور که در ابتدای توضیحات این قسمت گفته شده نتایج این آزمایش ارتباط مستقیم با ویسکوزیته خمیر سیمان دارد اما با توجه به اینکه تغییرات مشخصات مصالح مصرفی در این پایان نامه به جز مخلوط هایی که در آن نسبت آب به مواد پودری تغییر کرده است، تأثیری بر ویسکوزیته خمیر سیمان ندارد. بنابراین در مخلوط هایی که تغییرات نتایج مربوط به تغییرات مقادیر خرده لاستیک و تغییرات بزرگترین بعد سنگدانه می باشد عامل یا عواملی غیر از ویسکوزیته خمیر سیمان تازه مؤثر بوده است. مهم ترین عاملی که در این خصوص تأثیر داشته است همان طور که در قسمت قبل نیز گفته شد وزن مخصوص مصالح می باشد چرا که عامل وزن در خروج مصالح از قیف ۷ و سرعت پخش شدگی در جریان بتن خودتراکم در آزمایش T<sub>50</sub> تأثیرگذار می باشد. افزایش زمان خروج بتن خودتراکم از قیف ۷ در اثر استفاده از خرده لاستیک در مخلوط های ساخته شده با نسبت آب به مواد پودری ۰/۳۴ و بزرگترین بعد سنگدانه ۱۲/۵ و ۱۹/۵ میلی متر به ترتیب ۹ و ۹/۷ درصد نسبت به مخلوط فاقد خرده لاستیک می باشد و بیشترین تغییرات لزجت در مخلوط های با بزرگترین بعد سنگدانه ۵/۱۹ میلی متر و نسبت آب به مواد پودری ۰/۳۹ با افزایش ۱۳/۳ درصدی می باشد. رفتار تفسیر شده در نتایج آزمایش T<sub>50</sub> به چشم نمی رسد و در هر دو شکل (۴-۳) و (۴-۶) افزایش نسبت آب به مواد پودری سبب کاهش زمان T<sub>50</sub> مخلوط های بتن خودتراکم شده است این کاهش در بیشترین حالت خود که مربوط به مخلوط های با بزرگترین بعد سنگدانه ۱۹/۵ میلی متر می باشد، تا ۴/۱ درصد می باشد.

### ۳-۱-۳- قابلیت عبور

قابلیت عبور مخلوط بتن خودتراکم ارتباط نزدیک با لزجت مخلوط بتن خودتراکم دارد. به منظور بررسی قابلیت عبور مخلوط های بتن خودتراکم از آزمایش جعبه L شکل استفاده شده است. نتایج این آزمایش در نمودارهای ۷ و ۸ آورده شده است. براساس این نتایج افزایش نسبت آب به مواد پودری سبب کاهش نسبت  $h_2$  (ارتفاع بتن خودتراکم در انتهای قسمت افقی جعبه L شکل) به  $h_1$  (ارتفاع بتن باقی مانده در بخش قائم جعبه L شکل) به عبارتی کاهش توانایی عبورپذیری بتن خودتراکم شده است. بیشترین کاهش نسبت یاد شده مربوط به مخلوط با نسبت آب به مواد پودری ۰/۳۹، ۹ درصد خرده لاستیک و بزرگترین بعد سنگدانه ۱۹/۵ میلی متر با کاهش ۱۰/۲ درصدی  $h_2$  به  $h_1$  می باشد.

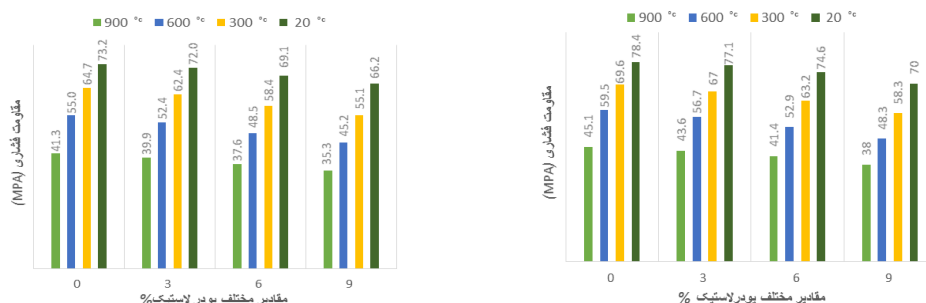


نمودار ۷- نتایج آزمایش جعبه L مخلوط های با بزرگترین اندازه سنگدانه ۱۲/۵  
 نمودار ۸- نتایج آزمایش جعبه L مخلوط های با بزرگترین اندازه سنگدانه ۱۹/۵

مقایسه نمودارهای بالا نشان می دهد افزایش بزرگترین بعد سنگدانه باعث کاهش توانایی عبورپذیری مخلوط بتن خودتراکم خصوصاً در نسبت آب به مواد پودری ۰/۳۹ شده است. براساس مشاهدات چشمی هنگام انجام آزمایش جعبه L افزایش بزرگترین بعد سنگدانه سبب رخداد مقادیری انباشتگی سنگدانه در پشت دریچه دستگاه جعبه L شده که این مورد سبب کاهش نسبت یاد شده گردیده است. همچنین افزایش استفاده از خرده لاستیک باعث کاهش توانایی عبورپذیری مخلوط بتن خودتراکم شده است که این مورد با توجه به آنچه در رابطه با وزن مخصوص مصالح و درگیری جنس مصالح در قسمت قبل گفته شد کاملاً قابل تفسیر می باشد.

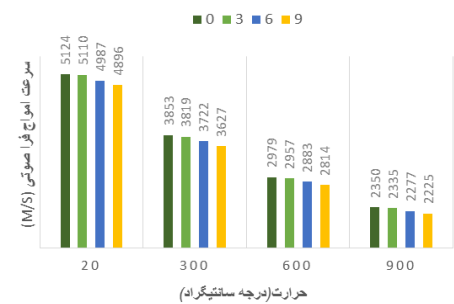
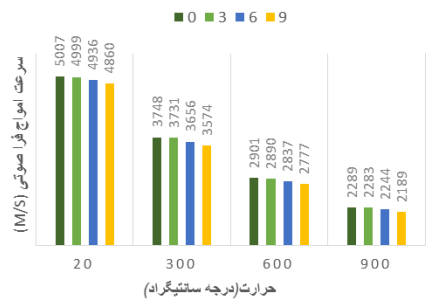
### ۴- نتایج آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری در سن ۹۰ روز بر روی نمونه های مکعبی به ابعاد  $10 \times 10 \times 10$  سانتی متر انجام شد. نتایج آزمایش مقاومت فشاری در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد در نمودارهای زیر آورده شده است. بر اساس این نتایج جایگزین کردن خرده لاستیک به جای ماسه سبب کاهش مقاومت فشاری در مخلوط های بتن خودتراکم شده است به طوری که استفاده از ۹ درصد خرده لاستیک سبب کاهش ۱۰/۷ درصدی در مقاومت فشاری مخلوط های بتن خود تراکم شده است. همچنین افزایش نسبت آب به مواد پودری از ۰/۳۴ به ۰/۳۹ سبب کاهش ۶/۶ درصدی در نتایج مقاومت فشاری شده است. بر اساس نتایج نمودارها در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد افزایش بزرگترین بعد سنگدانه از ۱۲/۵ به ۱۹/۵ میلی متر تغییر معناداری در نتایج این آزمایش حاصل نکرد و تا حدودی (۰/۳ درصد) مقاومت فشاری در مخلوط های مشابه رشد را نشان داد که به نظر می رسد این مورد به دلیل پیوستگی بهتر منحنی دانه بندی در حالتی که بزرگترین بعد سنگدانه ۱۹/۵ میلی متر است می باشد.



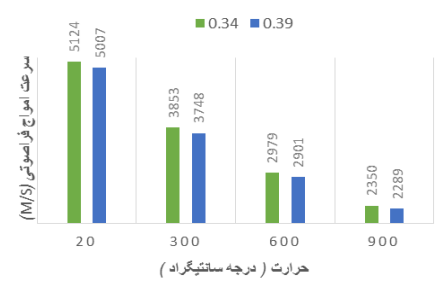
نمودار ۹- مقاومت فشاری مخلوط های با نسبت آب به سیمان ۰/۳۴ و بزرگترین بعد سنگدانه ۱۲/۵  
 نمودار ۱۰- مقاومت فشاری مخلوط های با نسبت آب به سیمان ۰/۳۹ و بزرگترین بعد سنگدانه ۱۲/۵

نتایج آزمایش اولتراسونیک در نمودارهای زیر آورده شده است.



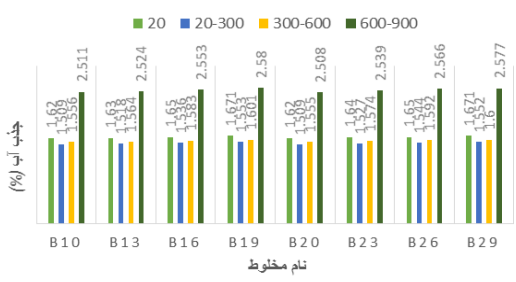
**نمودار ۱۲ - نتایج سرعت امواج اولتراسونیک مخلوط های با نسبت آب به سیمان ۰/۳۹ و بزرگترین بعد سنگدانه ۱۲/۵**

**نمودار ۱۱ - نتایج سرعت امواج اولتراسونیک مخلوط های با نسبت آب به سیمان ۰/۳۴ و بزرگترین بعد سنگدانه ۱۲/۵**

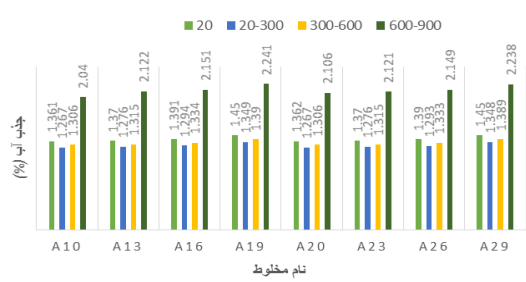


**نمودار ۱۳ - نتایج سرعت امواج اولتراسونیک مخلوط های با بزرگترین بعد سنگدانه ۱۲/۵ فاقد خرده لاستیک**

افزایش مقادیر جایگزین لاستیک سبب کاهش سرعت امواج اولتراسونیک شده است. با توجه به اینکه نتایج آزمایش سرعت امواج اولتراسونیک ارتباط مستقیم با تراکم محیط مورد آزمایش دارد و هرچه محیط چگالی تر باشد نتایج بالاتری را نشان می دهد بنابراین افت سرعت امواج اولتراسونیک در استفاده از لاستیک در مقایسه با سنگدانه واضح به نظر می رسد. همان طور که در نمودارهای در این قسمت نشان داده شده است افزایش درجه حرارت باعث کاهش سرعت امواج اولتراسونیک شده است به نحوی که در مخلوط فاقد لاستیک و نسبت آب به سیمان ۰/۳۴ با بزرگترین بعد سنگدانه ۱۲/۵ میلی متر افزایش درجه حرارت تا ۹۰۰ درجه سانتی گراد سبب افت ۵۴ درصدی سرعت امواج اولتراسونیک نسبت به مخلوط مشابه حرارت ندیده شده است. سرعت امواج اولتراسونیک به طور مستقیم با ریز ترک های ایجاد شده در داخل بتن ارتباط دارد به نحوی که با گسترش ترک ها سرعت امواج اولتراسونیک کاهش می یابد. با توجه به اینکه یکی از مهمترین دلایل وجود ریز ترک به لحاظ تشکیل حفرات موئینه در طی عملیات هیدراتاسیون می باشد استفاده از مقادیر بالاتر نسبت آب به سیمان سبب افزایش ریز ترک ها می شود. نتایج آزمایش جذب آب در نمودارهای زیر آورده شده است.



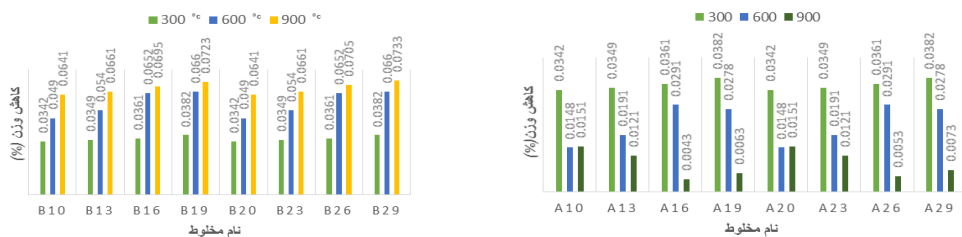
**نمودار ۱۵ - نتایج جذب آب مخلوط های با نسبت آب به سیمان ۰/۳۹**



**نمودار ۱۴ - نتایج جذب آب مخلوط های با نسبت آب به سیمان ۰/۳۴**

با توجه به نتایج بررسی شده در این قسمت همان طور که گفته شد افزایش درجه حرارت تا ۹۰۰ درجه سانتی گراد باعث توسعه ریز حفرات ناشی از عملیات هیدراتاسیون شده و با توسعه ترک ها جذب آب نمونه های بتنی افزایش پیدا کرده است ، همچنین با توجه به اتصال ضعیف لاستیک با خمیر سیمان در مقایسه با اتصال سنگدانه با خمیر سیمان و از طرف دیگر در مخلوط هایی که نسبت آب به مواد پودری افزایش یافته است به دلیل افزایش تخلخل خمیر سیمان و آنچه که در مورد توسعه ریز ترک ها گفته شد ، افزایش جذب آب امری بدیهی است.

در نمودارهای زیر نتایج مربوط به کاهش وزن نمونه های بتنی آورده شده است.



**نمودار ۱۶- نتایج کاهش وزن برای مخلوط های با نسبت آب به سیمان ۰/۳۴**      **نمودار ۱۷- نتایج آزمایش کاهش وزن برای مخلوط های با نسبت آب به سیمان ۰/۳۹**

بر اساس نتایج حاصل شده افزایش جایگزینی خرده لاستیک سبب کاهش وزن نمونه های بتنی تحت حرارت شده است با توجه به دمای ذوب لاستیک و دماهای مورد استفاده در تحقیق حاضر ذوب و تبخیر شدن برخی ترکیبات لاستیک یکی از عوامل تأثیرگذار در این خصوص می باشد. با افزایش درجه حرارت همان طور که در نمودارها نشان داده شده است کاهش وزن نمونه های بتنی تلاوم می یابد به نحوی که بخش قابل توجهی از کاهش وزن دماهای مختلف نسبت به کاهش وزن نهایی، در دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد حاصل شده است. اما مطلب قابل توجه این است که آب در دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد به جوش آمده و تبخیر می شود اما کاهش وزن در دماهای بالاتر به دیگر دلایل رخ داده است. کاهش وزن نمونه های بتنی در دماهای بالا طبیعی به نظر می رسد. مقایسه نتایج این آزمایش برای مخلوط های با نسبت آب به مواد پودری ۰/۳۴ و ۰/۳۹ نشان می دهد تفاوت معناداری بین نتایج آزمایش کاهش وزن برای این مخلوط ها وجود ندارد همچنین تغییر ابعاد بزرگترین اندازه سنگدانه نیز تفاوتی در نتایج این آزمایش در پی نداشت.

## ۵- نتیجه گیری

بتن یکی از پر مصرف ترین مصالح شناخته شده در مهندسی عمران است که روز به روز بر استفاده از آن افزوده می شود. در این میان از یک سو، با پیشرفت علم و تکنولوژی و پیدایش سیستم های پیچیده تر ساختمانی و از سوی دیگر با روند رو به گسترش ساخت و سازهای عمرانی در سطح کلان، نیاز به بکارگیری مصالح ساختمانی جدیدتر با کارایی بیشتر محسوس می باشد. از آنجائی که طراحی سازه های بتن مسلح روز به روز پیشرفته تر می گردد، شکل طراحی شده مقاطع و اعضاء سازه ای نیز پیچیده تر گردیده و دیگر تراکم آرماتورگذاری در چنین مقاطعی امری غیرعادی جلوه نمی کند. با افزایش استفاده از خرده لاستیک در هر دو نسبت آب به مواد پودری (۰/۳۴ و ۰/۳۹) جریان اسلامپ کاهش یافته و به عبارتی از روانی مخلوط کاسته شد به نحوی که استفاده از ۹ درصد خرده لاستیک در مخلوط های با بزرگترین اندازه سنگدانه ۱۲/۵ میلی متر سبب کاهش جریان اسلامپ تا ۳ درصد شد. افزایش زمان خروج بتن خودتراکم از قیف V در اثر استفاده از خرده لاستیک در مخلوط های ساخته شده با نسبت آب به مواد پودری ۰/۳۴ و بزرگترین بعد سنگدانه ۱۲/۵ و ۱۹/۵ میلی متر به ترتیب ۹ و ۹/۷ درصد نسبت به مخلوط فاقد خرده لاستیک بود. بیشترین تغییرات لزجت در مخلوط های با بزرگترین بعد سنگدانه ۱۹ میلی متر و نسبت آب به مواد پودری ۰/۳۹ با افزایش ۱۳/۳ درصدی بود. در مخلوط های با بزرگترین بعد سنگدانه ۱۲/۵ میلی متر افزایش نسبت آب به مواد پودری سبب کاهش زمان خروج بتن خودتراکم از قیف V شکل شده است و این در حالی است که در مخلوط هایی که بزرگترین بعد سنگدانه ۱۹/۵ میلی متر می باشد با افزایش نسبت آب به مواد پودری زمان خروج بتن خودتراکم از قیف V را افزایش داد. در آزمایش T50 افزایش نسبت آب به مواد پودری سبب کاهش زمان T50 مخلوط های بتن خودتراکم شده است، تا ۴/۱ درصد می باشد. در آزمایش جعبه L بیشترین کاهش نسبت مخلوط h1 به h2 مربوط به مخلوط با نسبت آب به مواد پودری ۰/۳۹، ۹ درصد خرده لاستیک و بزرگترین بعد سنگدانه ۱۹/۵ میلی متر با کاهش ۱۰/۲ درصدی h1 به h2 بود. افزایش بزرگترین بعد سنگدانه باعث کاهش توانایی عبورپذیری مخلوط بتن خودتراکم خصوصاً در نسبت آب به مواد پودری ۰/۳۹ شد. جایگزین کردن خرده لاستیک به جای ماسه سبب کاهش مقاومت فشاری در مخلوط های بتن خودتراکم شده است به طوری که کاهش مقاومت فشاری مخلوط حاوی ۹ درصد خرده لاستیک تحت دمای ۹۰۰ درجه سانتی گراد نسبت به مخلوط فاقد لاستیک در همان دما ۱۵/۷ درصد می باشد ولی کاهش مقاومت فشاری مخلوط های مشابه اما حرارت ندیده ۱۰/۷ درصد می باشد. همچنین افزایش نسبت آب به مواد پودری از ۰/۳۴ به ۰/۳۹ سبب کاهش ۶/۶ درصدی در نتایج مقاومت فشاری شد. بر اساس نتایج مقاومت فشاری در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد افزایش بزرگترین بعد سنگدانه از ۱۲/۵ به ۱۹/۵ میلی متر تغییر معناداری در نتایج این آزمایش حاصل نکرد و تا حدودی (۰/۳ درصد) مقاومت فشاری در مخلوط های مشابه رشد را نشان داد که به نظر می رسد این مورد به دلیل پیوستگی بهتر منحنی دانه بندی در حالتی که بزرگترین بعد سنگدانه ۱۹/۵ میلی متر است می باشد. در مخلوط فاقد پودر لاستیک با نسبت آب به مواد پودری ۰/۳۴ و بزرگترین بعد سنگدانه



۱۲/۵ میلی متر افزایش درجه حرارت تا ۳۰۰ درجه سانتی گراد باعث کاهش مقاومت فشاری به میزان ۱۱/۲ درصد شد. براساس نتایج استفاده از خرده لاستیک تا ۳ درصد با نسبت آب به مواد پودری ۰/۳۴ و ۰/۳۹ تغییر چندانی بر کاهش مقاومت فشاری نمونه ها نمی گذارد و می تواند جایگزین مناسبی برای مواد پودری باشد. افزایش نسبت آب به مواد پودری در مخلوط های فاقد خرده لاستیک سبب کاهش مقاومت فشاری ۶/۲ و ۷/۳ درصدی به ترتیب برای مخلوط های با بزرگترین بعد سنگدانه ۱۲/۵ و ۱۹/۵ میلی متر شد. استفاده از خرده لاستیک تا ۹ درصد باعث کاهش ۱۸/۸ درصدی مقاومت فشاری در نمونه هایی که تحت حرارت ۶۰۰ درجه سانتی گراد قرار گرفته اند در مقایسه با مخلوط های فاقد خرده لاستیک شد. افزایش درجه حرارت تا ۹۰۰ درجه سانتی گراد برای مخلوط فاقد خرده لاستیک و با نسبت آب به سیمان ۰/۳۴ و بزرگترین بعد سنگدانه ۱۲/۵ میلی متر باعث کاهش مقاومت فشاری تا ۸/۷۳ درصد نسبت به مخلوط حرارت ندیده شد. کاهش سرعت امواج اولتراسونیک تحت دماهای ۳۰۰ و ۶۰۰ و ۹۰۰ درجه سانتی گراد برای مخلوط های با نسبت آب به مواد پودری ۰/۳۹ نسبت به مخلوط حرارت ندیده، در مقایسه با مخلوط های مشابه اما با نسبت آب به مواد پودری ۰/۳۴ به ترتیب ۱/۳، ۰/۵ و ۰/۳ درصد بیشتر شد. در مخلوط محتوی ۹ درصد خرده لاستیک با نسبت آب به مواد پودری ۰/۳۴ و بزرگترین بعد سنگدانه ۱۲/۵ میلی متر جذب آب ۶/۵ درصد نسبت به مخلوط فاقد خرده لاستیک و در حالت مشابه افزایش یافت. افزایش درجه حرارت ۳۰۰، ۶۰۰ و ۹۰۰ درجه سانتی گراد سبب افزایش جذب آب ۹۳، ۱۸۹ و ۳۳۹ درصدی نسبت به مخلوط حرارت ندیده شد. براساس نتایج حاصل شده افزایش جایگزینی خرده لاستیک سبب کاهش وزن نمونه های بتنی تحت حرارت شد. مقایسه نتایج آزمایش کاهش وزن برای مخلوط های با نسبت آب به مواد پودری ۰/۳۴ و ۰/۳۹ نشان می دهد تفاوت معناداری بین نتایج آزمایش کاهش وزن برای این مخلوط ها وجود ندارد همچنین تغییر ابعاد بزرگترین اندازه سنگدانه نیز تفاوتی در نتایج این آزمایش در پی نداشت.

## ۶- پیشنهادات پژوهش

- مطالعات بر روی ریز ساختار بتن های تحت درجه حرارت بالا صورت پذیرد.
- تأثیر استفاده از پوزولان بر خواص سخت شده بتن خودتراکم تحت حرارت بررسی شود.
- تأثیر استفاده از ترکیب لاستیک با سایر مواد پودری مختلف بر خواص سخت شده بتن خودتراکم تحت حرارت بررسی شود.

## منابع

۱. زینلی پور، مجید، (۱۴۰۰)، بررسی مقاومت بتن خودتراکم در برابر حرارت با افزودن مواد هوازا و الیاف. دانشگاه آزاد اسلامی واحد بندرعباس، دانشکده فنی و مهندسی.
۲. نوری شیرازی، محمدرضا، (۱۴۰۰)، بررسی تاثیر محیط اسیدی و تاثیرات دمایی بر روی بتن خودتراکم و ترمیم آن توسط الیاف شیشه. دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، دانشکده فنی و مهندسی.
۳. رعیت پناه، محمد علی، (۱۳۹۹)، تأثیر میکروسیلیس بر روی بتن خودتراکم در محیط سولفاتی. موسسه آموزش عالی صالحان، گروه عمران و نقشه برداری.
۴. نعمت زاده، مهدی: ذبیحی، رضا. (۱۳۹۹). بهینه سازی مقاومت فشاری بتن حاوی لاستیک تایر بازیافتی همراه با الیاف فولادی در معرض دماهای بالا. نشریه علمی- پژوهشی مهندسی عمران مدرس، دوره ۲۰، شماره ۳. از
۵. راحت دهمرده، سامان: میرابی مقدم، محمدرضا. (۱۳۹۹). ارزیابی ایده استفاده از ضایعات پلاستیکی در تولید بتن با در نظر گرفتن خواص مهندسی ذرات. دوفصلنامه علمی کارافن، شماره ۴۵، ص ۱۵۱-۱۶۸.
۶. سهرابی فیل آبادی، رضا، (۱۳۹۹)، بررسی آزمایشگاهی دوام بتن خودتراکم عمل آوری شده داخلی با سوپر پلیمرهای جاذب آب. دانشگاه یزد، پردیس فنی و مهندسی - دانشکده مهندسی عمران.
۷. بهفرنیاء، کیاچهر: حسن زاده، محسن: اعتمادی، محسن: بزرگپور، همایون. (۱۳۹۸). بررسی خصوصیات مکانیکی بتن حاوی ذرات لاستیک تایر ضایعاتی. نشریه تحقیقات بتن، سال سوم، شماره ۲، ص ۳۹-۴۷.
۸. صدرممتازی، علی و ذرشین زنوش، رومینا: بابایی، هاشم. (۱۳۹۷). خصوصیات استاتیکی و دینامیکی بتن حاوی ذرات لاستیک تایر ضایعاتی. نشریه مهندسی مکانیک، جلد ۴۸، شماره ۴، ص ۱۷۹-۱۸۸.
۹. بخشی، علیرضا، (۱۳۹۷)، مقایسه بتن خودتراکم تولید شده با زئولیت و میکروسیلیس در نسبت آب به سیمان ثابت از دیدگاه مدیریت زمان و هزینه. دانشگاه آزاد اسلامی واحد دماوند.
۱۰. کربلایی، محمد: سهرابی، محمدرضا. (۱۳۹۶). بررسی و مقایسه بتن حاوی خرده لاستیک و پودر لاستیک به همراه میکروسیلیس. نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، جلد ۴۲، شماره ۴، ص ۱-۶۶.
۱۱. مظاهری بودانی، مصطفی، (۱۳۹۶)، بررسی آزمایشگاهی خواص مهندسی بتن خود تراکم همراه فوق روان کننده توام با ضایعات لاستیکی در حالت تازه و سخت شده. موسسه آموزش عالی علامه نائینی.

۱۲. رئیس قاسمی، امیرمازیار و رمضانیان پور، علی اکبر و تدین، محسن و پرهیزکار، طیبه و شیرزادی جاوید، علی اکبر و قدوسی، پرویز و شکرچی زاده، محمد، (۱۳۹۵)، بتن خودتراکم

13. Wang, H., Wu, Y., Cheng, B., (2022) ,Mechanical properties of alkali-activated concrete containing crumb rubber particles Case Studies in Construction Materials, Volume 16.
14. Abadel, A., Alenzi, S., Almusallam, T., Abbas, H., Al-Salloum, Y. , (2022) , Shear behavior of self-consolidating concrete deep beams reinforced with hybrid of steel and GFRP bars. Ain Shams Engineering.
15. Weiqiang Wan, Pei Lv, Fuchu Liu, Linhong Xu, Wei Bai, Guangchao Han, (2022) , Evaluation of interfacial friction characteristics in multi-mode ultrasonic vibration assisted micro-extrusion process. Journal of Manufacturing Processes.
16. Thorneycroft, J., Orr, J., Savoikar, P., & Ball, R. J. (2018). Performance of structural concrete with recycled plastic waste as a partial replacement for sand. Construction and Building Materials, 161, 63-69.
17. Zhu, W., Gibbs, J. C., & Bartos, P. J. (2017). Uniformity of in situ properties of self-compacting concrete in full-scale structural elements. Cement and concrete composites, 23(1), 57-64.
18. Sukontasukkul, P., & Chaikaew, C. (2016). Properties of concrete pedestrian block mixed with crumb rubber. Construction and Building Materials, 20(7), 450-457.
19. Bignozzi, M. C., & Sandrolini, F. (2016). Tyre rubber waste recycling in self-compacting concrete. Cement and concrete research, 36(4), 735-739.
20. Thomas, B., Kumar, S., Mehra, P., Gupta, R.C., Joseph, M., Csetenyi, L.J., (2016) , Abrasion resistance of sustainable green concrete containing waste tire rubber particles. Construction and Building Materials.
21. Olivares, F. H., Barluenga, G., Bollati, M., & Witoszek, B. (2015). Static and dynamic behaviour of recycled tyre rubber-filled concrete. Cement and Concrete Research, 32(10), 1587-1596.
22. Guo, Y. C., Zhang, J. H., Chen, G. M., & Xie, Z. H. (2014). Compressive behaviour of concrete structures incorporating recycled concrete aggregates, rubber crumb and reinforced with steel fibre, subjected to elevated temperatures. Journal of cleaner production, 72, 193-203.
23. Li, L., Ruan, S., Zeng, L. , (2014) ,Mechanical properties and constitutive equations of concrete containing a low volume of tire rubber particles. Construction and Building Materials.
24. Sobral, M., Samagaio, A. J. B., Ferreira, J. M. F., & Labrincha, J. A. (2013). Mechanical and acoustical characteristics of bound rubber granulate. Journal of Materials Processing Technology, 142(2), 427-433.
25. Saikia, N., & De Brito, J. (2012). Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review. Construction and Building Materials, 34, 385-401.
26. Rai, B., Rushad, S. T., Kr, B., & Duggal, S. K. (2012). Study of waste plastic mix concrete with plasticizer. International Scholarly Research Notices.
27. Bartos, P.J.M., Gibbs, J.C. and Zhu, W., "Uniformity of in situ properties of Self-compacting Concrete in full scale structural elements Cement and Concrete Composites, 2011.