

بررسی خواص بتن های بازیافتی ساخته شده از سنگدانه ی آسفالت بازیافتی

امیرمسعود علامی^۱، محمد سلطانی^۲

^۱ کارشناسی ارشد سازه، پژوهشگر گروه فنی مهندسی پژوهشکده دانشگاه امام علی (ع).

^۲ کارشناسی ارشد عمران، پژوهشگر گروه مهندسی پژوهشکده دانشگاه امام علی (ع).

نام نویسنده مسئول:

امیرمسعود علامی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۲/۲۶

چکیده

بتن به عنوان پرکاربردترین مصالح مورد استفاده در ساخت و ساز است که تخریب آن بیشترین حجم حاصله از دیپوی مصالح را حاصل می کند. برای جلوگیری از مشکلات زیست محیطی ناشی از دیپو و کاهش هزینه های ناشی از حمل و نقل و تخلیه این مصالح، ساخت بتن با مصالح بازیافتی می تواند رویکردی پایدار در مورد بتن های بازیافتی حاصله از دورریزها ارائه دهد. بتن بازیافتی در سال های اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته و آزمایشات زیادی برای جایگزینی مصالح بتنی بازیافتی یا مصالح بنایی بازیافتی با مصالح طبیعی انجام گرفته است. حال آنکه مصالح آسفالت بازیافتی بیشتر مورد استفاده در اساس و زیراساس راه ها و تهیه ی مخلوط آسفالت گرم بوده و کمتر در بتن مورد توجه قرار گرفته است در حالی که این مصالح بسیار در دسترس بوده و دیپوی آن ها همواره مشکلات زیست محیطی فراوانی ایجاد کرده است. این تحقیق به بررسی خواص بتن با سنگدانه ی آسفالت بازیافتی شامل مقاومت فشاری، کششی، خمشی و دوام در برابر چرخه های متوالی یخ و مقایسه ی خواص بتن حاوی سنگدانه ی آسفالت بازیافتی با سایر انواع بتن های بازیافتی می پردازد. نتایج نشان می دهد که بتن با سنگدانه ی آسفالت بازیافتی با درصد های جایگزینی متناسب می تواند به عنوان جایگزینی برای بتن های معمولی در موارد خاص استفاده شود. مقایسه ی نتایج حاصله با سایر انواع بتن های بازیافتی نشان از آن دارد که این نوع بتن خواص مشابهی با آن ها داشته و سنگدانه ی آسفالت بازیافتی مصالح مناسبی برای جایگزینی سنگدانه ی طبیعی در بتن می باشد.

واژگان کلیدی: بتن بازیافتی، سنگدانه ی آسفالتی، مشخصات مکانیکی، دوام در برابر چرخه یخ و ذوب.

مقدمه

صنعت بتن در سال‌های اخیر با افزایش چشم‌گیر تقاضا برای سنگ‌دانه مواجه شده است. به طوری که تقاضای جهانی با نرخ رشد سالانه حدود ۵.۲ درصد، در سال ۲۰۱۹ به ۵۱.۷۹ میلیارد تن رسیده است [۱]. از طرفی کاهش میزان معادن شن و ماسه‌ی موجود و احتمال اتمام آن‌ها از طرفی حجم زیاد نخاله‌های ساختمانی مبحث بتن بازیافتی را مطرح می‌کند [۲]. استفاده بیش از حد از سنگدانه‌ی طبیعی (NA) نگرانی زیادی در مورد کاهش منابع و تخریب محیط زیست ایجاد نموده است. بدین منظور تقاضای استفاده از سنگدانه‌ی بازیافتی (RA) در سالیان اخیر رشد چشم‌گیری داشته است [۳]. سنگدانه‌های بازیافتی شامل سنگدانه‌ی بازیافتی حاصله از تخریب سازه‌های بتنی (RCA)، تخریب روسازی‌های آسفالتی (RAP)، سنگدانه‌های حاصله از نخاله‌ی سرامیک، آجر و سایر مصالح می‌باشد [۴]. استفاده از سنگدانه‌ی آسفالت بازیافتی بیش‌تر در زیرسازی راه‌ها مورد توجه بوده است حال آنکه استفاده از این مصالح در بتن می‌تواند رویکردی نو در استفاده از آن برای روسازی‌های بتنی و سایر کاربردهای بتن باشد. پارامتر اصلی تاثیرگذار در رفتار سنگدانه‌ی آسفالت بازیافتی ملات قیری قدیمی چسبیده به این سنگدانه‌هاست. به طوری که تفاوت میان ویژگی‌های فیزیکی سنگدانه‌های بازیافتی متأثر از میزان ملات چسبیده به این سنگدانه‌هاست و با افزایش تخلخل این نوع سنگدانه‌ها میزان ملات چسبیده به آن‌ها افزایش می‌یابد [۵]. سنگدانه‌ی آسفالت بازیافتی باعث کاهش چگالی انبوهی و افزایش میزان جذب آب می‌شود، هم‌چنین استفاده از این مصالح، کاهش مقاومت‌های کششی و فشاری بتن را به همراه دارد به طوری که استفاده همزمان از شن و ماسه‌ی حاصله از بازیافت سنگدانه‌های آسفالتی تاثیر بیش‌تری در این کاهش می‌گذارد [۳]. علاوه بر موارد ذکر شده سنگدانه‌های بازیافتی سختی کمتری نسبت به سنگدانه‌ی طبیعی دارند [۶]. تکرار فرآیند بازیافت در این مصالح باعث افت ویژگی‌های سنگدانه‌ها مانند افزایش جذب آب و کاهش چگالی انبوهی بتن حاصله در اثر افزایش ترک در مصالح بازیافتی می‌گردد [۷]. حذف یک لایه‌ی قیری از سنگدانه آسفالت بازیافتی با استفاده از سایش و اصطکاک، ویژگی‌های بتن بازیافتی حاصله را ارتقا می‌بخشد [۸].

بتن تازه ماده متخلل اشباعی شناخته می‌شود که در آن هیدراتاسیون، تبخیر و جذب آب به صورت همزمان اتفاق می‌افتد و خواص بتن را تحت تاثیر قرار می‌دهد. شکل هندسی نامنظم، سطح زبر و خشن و جذب آب بالای سنگدانه‌های بازیافتی بر ویژگی‌های بتن تازه اثرگذار است [۹]. تخلخل سنگدانه‌ی آسفالتی بازیافتی به علت وجود ملات قیری چسبیده اطراف سنگدانه‌ها نسبت به سنگدانه‌ی طبیعی اختلاف زیادی دارد [۱۰]. مقاومت پایین‌تر سنگدانه‌ی بازیافتی در برابر ضربه نیز باعث خرد شدن این مصالح و افزایش میزان ریزدانه‌ی مخلوط بتن می‌گردد که عامل دیگری در کاهش اسلامپ می‌باشد [۱۱]. در نظرگیری مدت زمان فرآیند جذب آب سنگدانه‌های بازیافتی [۱۲]، استفاده از فوق روان‌کننده‌ها در مخلوط بتن [۱۳ و ۱۴]، افزایش میزان سیمان مورد استفاده [۱۵] و اشباع سنگدانه‌ی بازیافتی پیش از اختلاط [۵] می‌تواند اثرات کاهش روانی در بتن با مصالح بازیافتی را بهبود بخشد.

وزن کمتر سنگدانه‌ی بازیافتی باعث می‌گردد تا وزن مخصوص بتن حاصله کمتر شود. به طوری که چگالی اشباع با سطح خشک (SSD) سنگدانه‌ی بازیافتی همواره از سنگدانه‌ی طبیعی مشابه کمتر می‌باشد. علت این امر پر شدن درصدی از حجم سنگدانه‌ی بازیافتی با ملات قدیمی و هم‌چنین تخلخل بیش‌تر سنگدانه‌ی بازیافتی می‌باشد که باعث کاهش وزن مخصوص بتن حاصله بدون توجه به نوع سنگدانه‌ی بازیافتی می‌گردد [۱۶].

مقاومت فشاری بتن مهم‌ترین مشخصه‌ی مکانیکی بتن در اکثر موارد کاربرد شناخته می‌شود. در بررسی اکثر محققین استفاده از سنگدانه‌ی بازیافتی باعث افت میزان مقاومت فشاری بتن می‌گردد [۷، ۱۷، ۱۸]. ناحیه‌ی انتقالی (ITZ) شکل گرفته بین ملات یا قیر چسبیده به سنگدانه‌ی بازیافتی و سنگدانه‌ی بازیافتی به دلیل لزجت کمتر قیر، به عنوان یک سطح اتصال ضعیف عمل کرده و در مقاومت فشاری نهایی اثرگذار می‌باشد [۱۹]. هم‌چنین مقاومت خود سنگدانه‌های بازیافتی نیز معمولاً کمتر از سنگدانه‌ی طبیعی مشابه می‌باشد که عامل موثری در رفتار مقاومتی بتن حاصله می‌باشد [۲۰]. در صورتی که جایگزینی سنگدانه‌ی بازیافتی با سنگدانه‌ی طبیعی در طرح اختلاط کمتر از ۳۰ درصد باشد می‌توان از اثر کاربرد این سنگدانه صرف‌نظر نمود [۲۱]. افزایش زمان عمل‌آوری و سن بتن حتی تا ۵ سال نیز نمی‌تواند فاصله‌ی ایجاد شده بین مقادیر مقاومت فشاری بتن با سنگدانه‌ی بازیافتی نسبت به بتن معمولی را پوشش دهد، هرچند افزایش مقاومت در سنین بعد از ۲۸ روز در بتن بازیافتی به نسبت بیش از بتن

معمولی است [۱۱]. افزایش عیار بتن بازیافتی اختلاف ایجاد شده بین مقادیر مقاومتی بتن بازیافتی با بتن معمولی را کاهش می‌دهد [۲۱]. کاهش میزان نسبت آب به سیمان و افزایش میزان سیمان مصرفی [۱۳]، افزودن فوم سیلیکا [۲۲]، فوق روان کننده [۲۳] و پودر شیشه [۲۴] همگی می‌تواند عملکرد مقاومتی بتن بازیافتی را بهبود بخشد.

مقاومت کششی و مقاومت خمشی بتن به عنوان دو مشخصه مکانیکی مهم دیگر در بتن بازیافتی شناخته می‌شوند. در بررسی‌های صورت گرفته معمولاً مقاومت کششی بتن بازیافتی با افزایش میزان جایگزینی سنگدانه‌ی بازیافتی رابطه‌ی عکس داشته و کاهش پیدا می‌کند [۲۵، ۲۶]. استفاده از ریزدانه‌ی بازیافتی می‌تواند باعث کاهش چشم‌گیرتر در مقاومت کششی بتن بازیافتی گردد [۲۷]. در فرآیند شکست کششی بتن بازیافتی، ایجاد شکست کششی در میان خود سنگدانه‌ها به جای ناحیه‌ی بین سنگدانه و خمیر سیمان مشاهده شده است که اتفاقی متفاوت از بتن معمولی می‌باشد [۲۵]. همانند مقاومت فشاری افزایش عیار سیمان بر مقاومت کششی نیز تاثیر گذار بوده و باعث کاهش اختلاف بین مقادیر مقاومت کششی بتن بازیافتی با بتن معمولی می‌شود [۲۱].

بررسی مقاومت خمشی بتن بازیافتی در مواردی کاهش و در موارد دیگر افزایش مقاومت خمشی نسبت به بتن معمولی را نشان می‌دهد؛ که دلیل این رفتار را می‌توان مربوط به مقاومت خمشی خود سنگدانه‌های بازیافتی دانست [۲۸، ۲۹]. ایجاد یک لایه‌ی مقاوم در برابر کشش در سنگدانه‌ی بازیافتی به دلیل جذب آب بیش‌تر باعث می‌گردد تا کاهش مقاومت خمشی نسبت به نمونه‌ی بتن معمولی کم باشد [۳۰]. همچنین در جریان شکست خمشی شکست از ناحیه‌ی سطح مشترک سنگدانه و خمیر سیمان اتفاق می‌افتد در حالی که در بتن معمولی این شکست از درون خود سنگدانه‌ها اتفاق می‌افتد [۳۱].

مقاومت در برابر چرخه‌ی یخ و ذوب به مشخصات خمیر سیمان، مقاومت ناحیه‌ی انتقال و ویژگی‌های سنگدانه بستگی دارد، تنش‌های ایجاد شده در اثر چرخه‌ی یخ و ذوب ناشی از ۳ عامل کلی زیر است:

فشارهای هیدرولیکی ایجاد شده هنگام انبساط بلورهای یخ

توسعه‌ی بلورهای یخ مویینه

فشارهای ایجاد شده در اثر جدایش یخ از محلول

تحقیقات انجام گرفته در مورد مقاومت در برابر چرخه‌ی یخ و ذوب بتن بازیافتی به نسبت سایر موارد مورد بررسی کمتر می‌باشد. در تحقیقات صورت گرفته جایگزینی سنگدانه‌ی بازیافتی معمولاً باعث کاهش مقاومت در برابر چرخه‌ی یخ و ذوب (کاهش مقاومت فشاری و کاهش جرم و حجم نمونه‌ها) به نسبت سنگدانه‌ی معمولی شده است [۳۲-۳۴]. علت کاهش مقاومت در برابر چرخه‌ی یخ و ذوب فضای خالی بیش‌تر در اطراف سنگدانه‌ی بازیافتی عنوان می‌شود که این فضای خالی راه نفوذ زیادی برای بلور یخ ایجاد می‌کند، در نتیجه کاهش ملات چسبیده به سنگدانه‌ی بازیافتی توانسته میزان مقاومت در برابر چرخه‌ی یخ و ذوب را افزایش دهد. علاوه بر بیش‌تر بودن تخلخل سنگدانه‌ی بازیافتی، بررسی فرآیند جذب آب در بتن بازیافتی بیانگر یکسان بودن فرآیند جذب در بتن بازیافتی نسبت به بتن معمولی، اما سرعت و مقدار جذب آب بیش‌تر این بتن به نسبت بتن معمولی به دلیل سطح خشن سنگدانه‌ی بازیافتی می‌باشد [۳۵]. این امر می‌تواند در کوتاه مدت در مقاومت یخ و ذوب بتن بازیافتی موثر واقع شود. همانند بتن معمولی افزایش حباب هوا در مخلوط بتن راهکاری موثر برای افزایش مقاومت بتن بازیافتی در برابر چرخه‌ی یخ و ذوب است [۳۲].

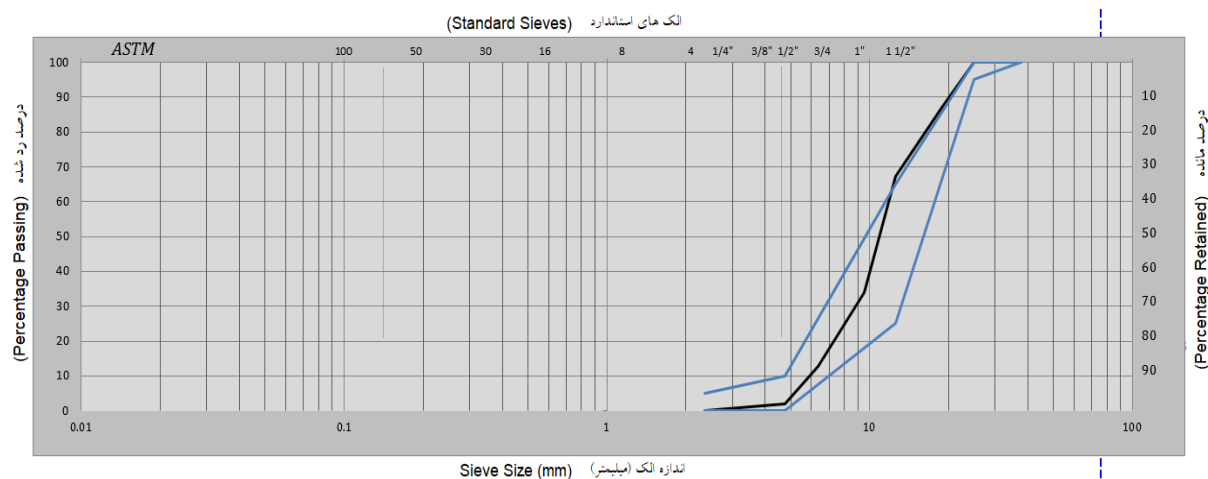
در تحقیق پیش‌رو ویژگی‌های بتن بازیافتی در آزمایش‌های روانی بتن، جرم مخصوص، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی و دوام در برابر چرخه یخ و ذوب متوالی مورد بررسی قرار گرفته است. نمونه‌ها با جایگزینی‌های ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصدی درشت‌دانه‌ی بازیافتی آسفالتی با سنگدانه‌ی طبیعی در برابر نمونه‌ی شاهد مورد سنجش قرار گرفته‌اند.

مواد و روش‌ها

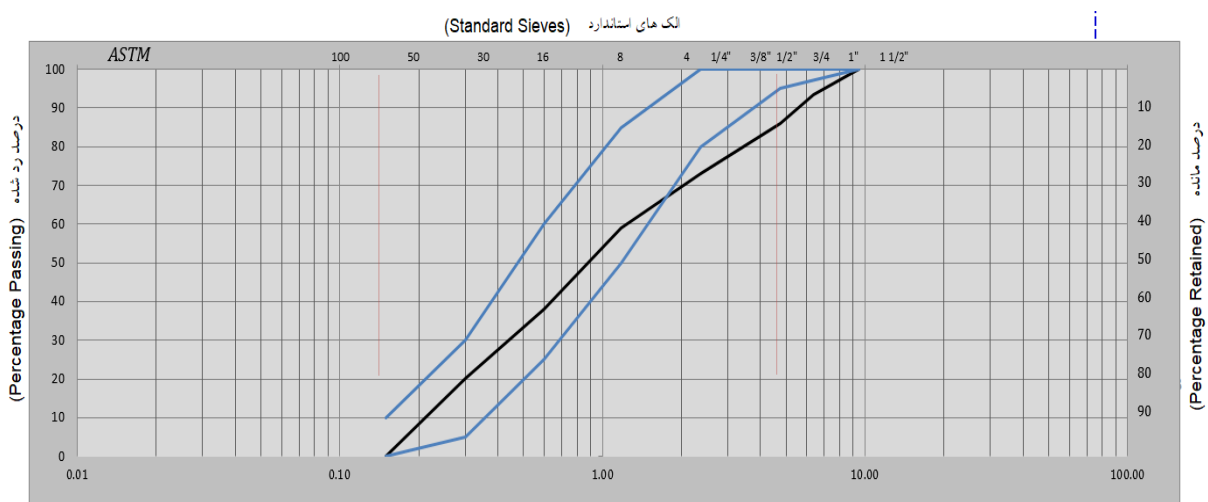
مشخصات مصالح مورد استفاده

در این تحقیق مصالح درشت‌دانه‌ی آسفالت بازیافتی حاصله از تخریب روسازی راه از سازمان عمران شهرداری تیران تهیه و سپس توسط سنگ‌شکن خرد و بعد از آن دانه‌بندی شده است. سنگ‌دانه‌ی طبیعی مورد استفاده نیز از نوع سنگدانه‌های ریز و

درشت معمولی کارگاهی تهیه شده است. به منظور مدل سازی شرایط کارگاهی دانه بندی سنگ دانه ها عوض نشده است. مشخصات دانه بندی درشت دانه ی باز یافتی و ماسه مورد استفاده در شکل ۱ و مشخصات مصالح سنگی نیز در جدول ۱ مطابق استانداردهای ASTM C128، ASTM C136، ASTM C127 ذکر شده است [۳۶-۳۷-۳۸]



دانه بندی درشت دانه ی باز یافتی



دانه بندی ماسه (ریز دانه)

شکل ۱- دانه بندی درشت دانه ی باز یافتی آسفالتی و ماسه

جدول ۱- مشخصات مصالح مورد استفاده

مدول نرمی	درصد جذب آب	وزن مخصوص SSD	مصالح
-	۰.۶۴	۲.۶۶	درشت دانه طبیعی
-	*_	۲.۵۲	درشت دانه باز یافتی
۳.۲۶	۲.۶	۲.۵۶	ماسه

* ذکر این نکته ضروری است که درشت دانه ی آسفالتی باز یافتی به دلیل ذوب قیر چسبیده به آن در دمای بالا قابلیت قرار گیری در کوره را ندارد و به همین دلیل این مصالح به صورت اشباع وارد مخلوط بتن می گردند.

سیمان مورد استفاده در این تحقیق نیز سیمان پرتلند نوع ۲ شرکت سیمان سپاهان با سطح مخصوص ۳۵۰۰ بلین و انبساط اتوکلاو ۰.۰۸ می باشد.

طرح اختلاط و مشخصات ساخت نمونه‌ها

تمامی قالب‌ها و استانداردهای مورد استفاده در جدول ۲ به طور خلاصه ذکر شده است. تمام نمونه‌ها پس از گذشت ۲۴ ساعت باز شده و تحت عمل آوری داخل حوضچه‌ی آب با دمای ۲۸ درجه‌ی سانتی گراد قرار گرفته‌اند. انتخاب طرح اختلاط با استفاده از روش حجمی مطابق استاندارد ACI 211 انجام گرفته است [۴۳]. به منظور مقایسه‌ی بین نمونه‌ها در تمامی طرح‌های اختلاط نسبت آب به سیمان مورد استفاده ثابت و برابر ۰.۵ در نظر گرفته است. میزان سیمان مورد استفاده نیز برابر ۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد. در طرح‌های اختلاط از حرف RA برای نمایش درصد مورد استفاده از درشت‌دانه‌ی بازیافتی و از حرف NA برای نمایش درصد مورد استفاده از درشت‌دانه‌ی طبیعی استفاده شده است. جدول ۳ مشخصات تمامی طرح‌های اختلاط را نشان می‌دهد.

جدول ۲- مشخصات قالب‌ها و آیین‌نامه‌های مورد استفاده

آزمایش	استاندارد	شکل قالب	ابعاد قالب (cm)	تعداد لایه‌ها
مقاومت فشاری	BS-1881 [۳۹]	مکعبی	۱۰*۱۰*۱۰	۲
مقاومت کششی	ASTM-C496 [۴۰]	استوانه‌ای	۱۰*۲۰	۲
مقاومت خمشی	ASTM-C78 [۴۱]	مکعب	۱۰*۱۰*۳۵	۲
چرخه‌ی یخ و ذوب	ASTM-C666 [۴۲]	مکعب	۱۰*۱۰*۱۰	۲

جدول ۳- مشخصات طرح‌های اختلاط مورد استفاده

نام طرح	سیمان kg/m^3	نسبت آب به سیمان	درشت‌دانه‌ی طبیعی kg/m^3	درشت‌دانه‌ی بازیافتی kg/m^3	ماسه‌ی طبیعی kg/m^3
RA0NA100	۴۰۰	۰.۵	۷۸۱.۶۴	۰	۹۱۹.۴۲
RA25NA75	۴۰۰	۰.۵	۵۸۶.۲۳	۱۸۵.۱۳	۹۱۹.۴۲
RA50NA50	۴۰۰	۰.۵	۳۹۰.۸۲	۳۷۰.۲۵	۹۱۹.۴۲
RA75NA25	۴۰۰	۰.۵	۱۹۵.۴	۵۵۵.۳۸	۹۱۹.۴۲
RA100NA0	۴۰۰	۰.۵	۰	۷۴۰.۵	۹۱۹.۴۲

نحوه‌ی انجام و نتایج آزمایشات

آزمایشات بتن تازه

آزمایش اسلامپ

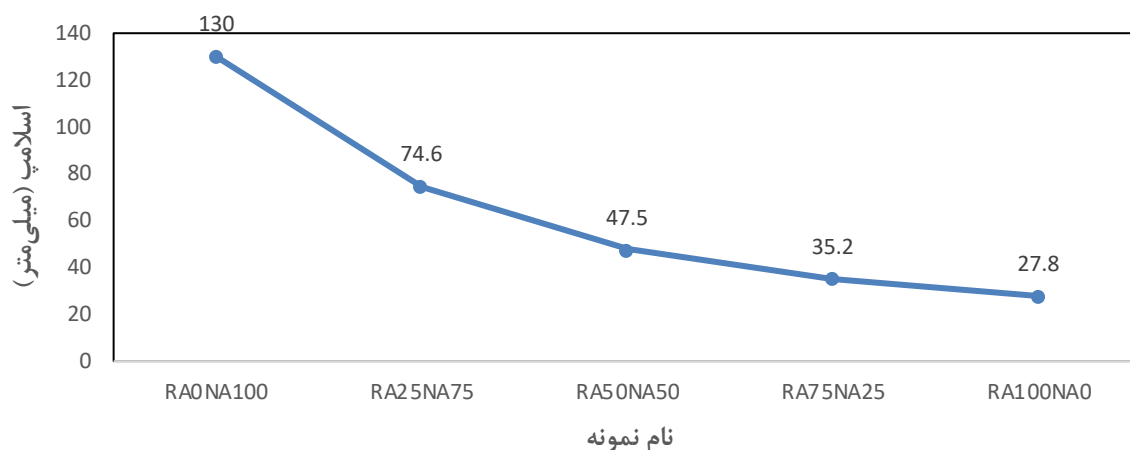
در این آزمایش مخروط ناقص به ابعاد ۱۰*۲۰*۳۰ با بتن طی سه مرحله پر و با ۲۵ ضربه‌ی میله استاندارد متراکم می‌گردد و در نهایت فاصله‌ی وضعیت تغییر شکل یافته‌ی بتن و وضعیت اولیه بتن ثبت می‌شود [۴۴]. شکل ۲ میزان اسلامپ در طرح‌های اختلاط مختلف را نشان می‌دهد.

مطابق انتظار اسلامپ بتن ساخته شده با سنگ‌دانه‌ی بازیافتی آسفالتی با افزایش میزان جایگزینی درشت‌دانه‌ی بازیافتی روند کاهشی دارد. این کاهش در نمونه با جایگزینی ۱۰۰ درصدی به میزان ۷۸ درصد می‌باشد که کارایی بتن را به شدت کاهش می‌دهد لذا استفاده از روان کننده‌ها امری بدیهی برای درصدهای جایگزینی بالای سنگ‌دانه‌ی آسفالتی می‌باشد. این کاهش اسلامپ در نمونه‌های دیگر به ترتیب میزان جایگزینی برابر ۴۲، ۶۳ و ۷۳ درصد می‌باشد.

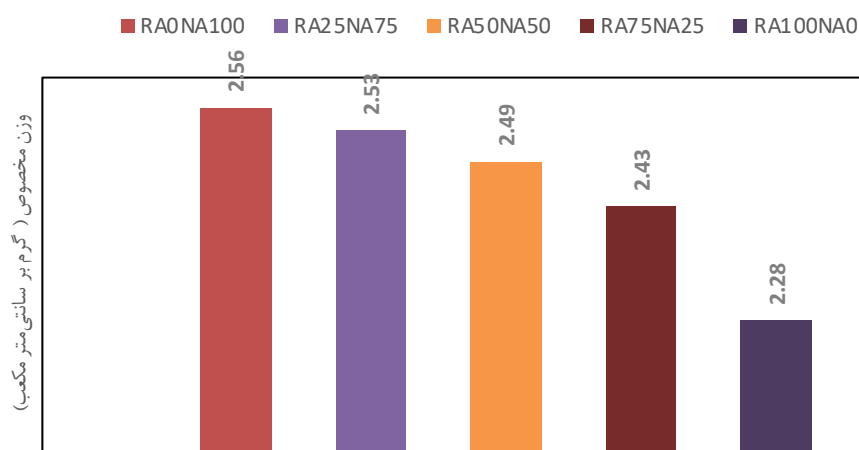
در توضیح علت کاهش اسلامپ می‌توان بیان داشت که بافت مصالح سنگدانه‌ای بازیافتی که بافتی نامنظم‌تر و خشن‌تر است باعث انسجام بیشتر بافت بتن حاصله شده و اسلامپ را کاهش می‌دهد. همچنین خرد شدن سنگدانه‌ای بازیافتی در هنگام اختلاط باعث می‌شود تا میزان گرد و غبار و فیلر مخلوط افزایش یابد و افزایش ریزدانه عامل مهمی کاهش اسلامپ می‌باشد.

آزمایش وزن مخصوص

برای انجام آزمایش وزن مخصوص، بتن را در قالب استوانه‌ای ۳ لیتری وزن مخصوص ریخته و سپس با توجه به حجم قالب و وزن بتن حاصله از کسر وزن ظرف با بتن و ظرف خالی، وزن بتن نیز به دست می‌آید [۳۷]. نتایج حاصله در شکل ۳ گردآوری شده است.



شکل ۲- میزان اسلامپ نمونه‌ها با طرح‌های اختلاط مختلف

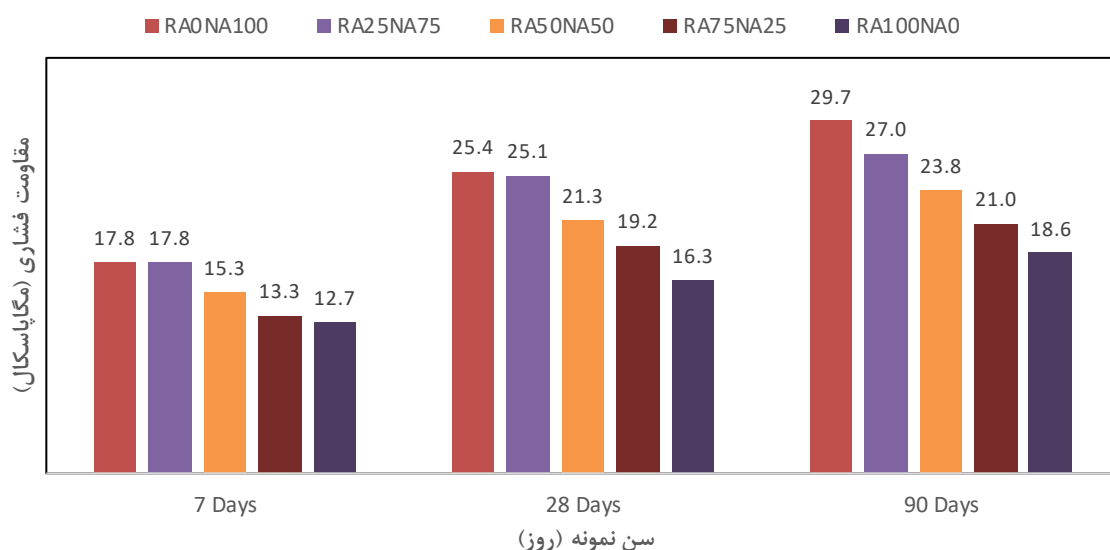


شکل ۳- وزن مخصوص نمونه‌ها با طرح‌های اختلاط مختلف

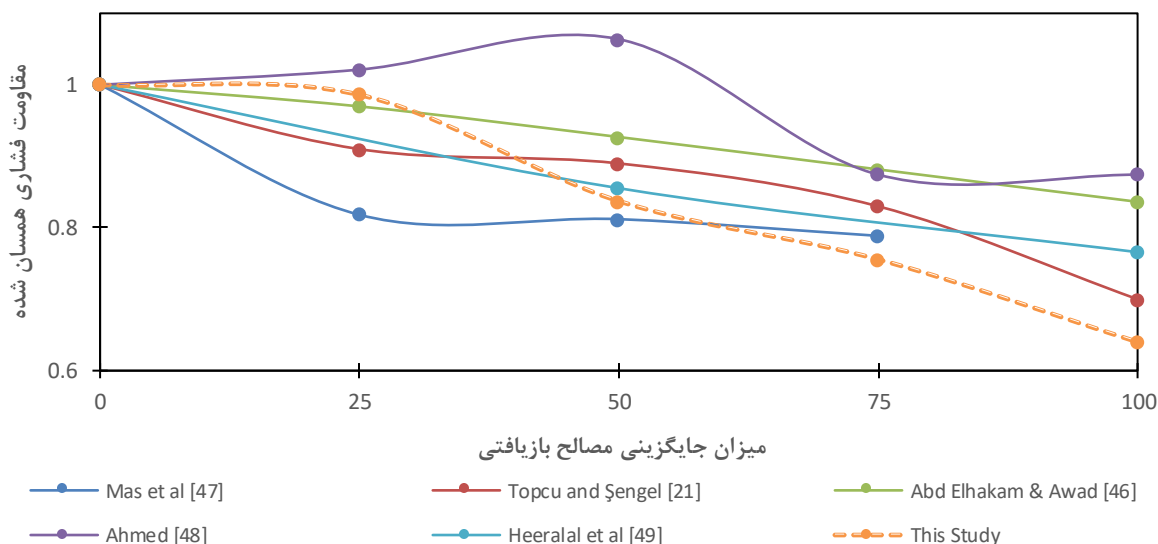
با توجه به شکل ۳ می‌توان دریافت که با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه‌ای آسفالت بازیافتی، وزن مخصوص بتن کاهش می‌یابد. دلیل این امر، کمتر بودن وزن مخصوص سنگدانه‌ای آسفالت بازیافتی نسبت به سنگدانه‌ای طبیعی به خاطر محاط شدن آن در ملات قدیمی است. تخلخل بیش‌تر سنگدانه‌ای آسفالتی نیز عاملی دیگر در کاهش وزن سنگدانه‌ها و در نتیجه کاهش وزن بتن می‌باشد.

مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری بتن با استفاده از استاندارد BS1881 در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه به وسیله‌ی جک استاندارد با سرعت بارگذاری ۰.۲ تا ۰.۴ مگاپاسکال بر ثانیه انجام شده است. بدین منظور برای هر آزمایش سه نمونه شکسته شده و نتایج با اختلاف حداکثری ۵ درصد نسبت به میانگین ثبت گردیده‌اند [۳۹]. برای مقایسه‌ی نتایج با نتایج آزمایش استاندارد رایج ACI 318 ابتدا بر طبق توضیحات استاندارد برای تبدیل مقاومت در قالب ۱۰*۱۰ به قالب ۱۵*۱۵ بر ضریب ۱.۱ تقسیم و پس از آن برای تبدیل مقاومت نمونه‌ی مکعبی ۱۵*۱۵ به نمونه‌ی استاندارد استوانه‌ای ۱۵*۳۰ عدد حاصله در ضریب ۰.۸ ضرب خواهد شد. شکل ۴ نتایج مقاومت فشاری مطابق با استاندارد ACI 318 را در سنین مختلف را نشان می‌دهد. [45]



شکل ۴- نتایج مربوط به مقاومت فشاری طرح‌های اختلاط مختلف



شکل ۵- مقایسه‌ی مقاومت فشاری بتن با سنگدانه‌ی بازیافتی با سایر بتن‌های بازیافتی

در شکل ۴ روند کاهشی در تمامی سنین بتن مشاهده می‌شود. شکست نمونه‌ی با جایگزینی ۱۰۰ درصدی، به خوبی شکست در ناحیه‌ی انتقال را نمایش می‌دهد. این شکست به دلیل عدم ایجاد چسبندگی صحیح بین سنگدانه و خمیر سیمان می‌باشد که علت این عدم چسبندگی را می‌توان لایه‌ی قیری چسبیده به سنگدانه‌ی آسفالتی عنوان نمود. این ناحیه‌ی انتقال ضعیف در تمامی

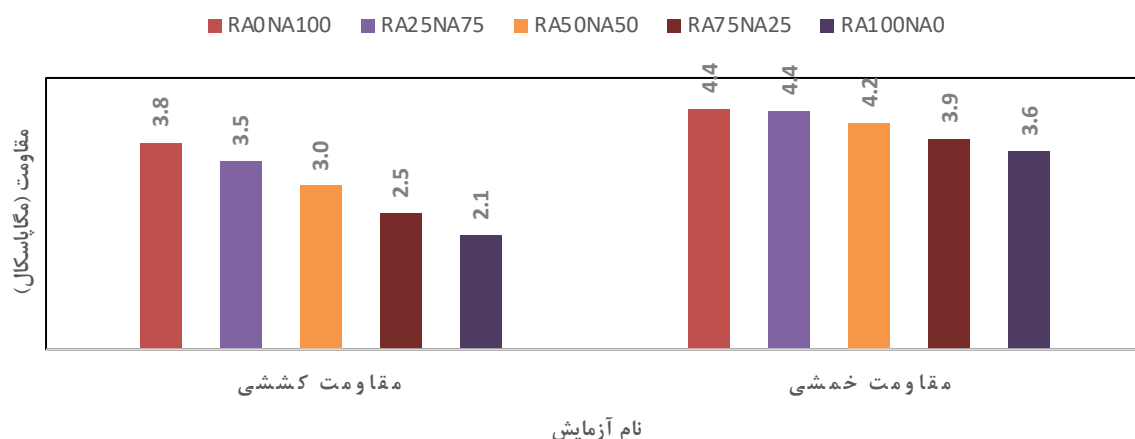
نمونه‌ها به نسبت جایگزینی اثر خود را در نتایج نمایش می‌دهد. از طرفی بر خلاف انتظار در نمونه‌های با سن بیش‌تر میزان اختلاف بین مقاومت فشاری بتن معمولی و بتن بازیافتی کاهش نیافته است. علت این امر را می‌توان به دلیل اشباع سنگدانه‌ی آسفالت بازیافتی در هنگام اختلاط دانست که باعث می‌شود بر خلاف نمونه‌های دیگر بتن بازیافتی که با افزایش سن نمونه جذب آب بیش‌تر باعث بهبود عملکرد چسبندگی بین سنگدانه‌ی بازیافتی و خمیر سیمان می‌شود تغییر محسوسی در این ناحیه اتفاق نیافتد. خردشدگی سنگدانه‌ی بازیافتی در هنگام اختلاط و افزایش فیلر و گرد و غبار را نیز در نتایج به‌دست‌آمده موثر است. به هر ترتیب با وجود کاهش مقادیر مقاومتی ثبت‌شده، این کاهش به میزانی نیست که بتوان بتن بازیافتی را بدون کاربرد دانست. نکته‌ی مهم دیگر نیز میزان اختلاف نمونه‌ی شاهد و نمونه‌ی با ۲۵ درصد جایگزینی می‌باشد، که می‌توان نمونه‌ی ۲۵ درصد را عملاً با نمونه‌ی طبیعی یکسان فرض نمود. در نمونه‌ی ۲۵ درصد همانند نمونه‌ی شاهد شکست غالب از میان خود بافت سنگدانه‌ها اتفاق افتاده است.

برای درک بهتر عملکرد مناسب بتن با سنگدانه‌ی آسفالت بازیافتی نتایج حاصله با تحقیقاتی که در آن از سنگدانه‌ی بازیافتی متفاوت استفاده شده است و دارای نسبت‌های آب به سیمان تقریباً مشابه با طرح اختلاط حاضر می‌باشد مقایسه می‌گردد. به این منظور به مقایسه‌ی نتایج با سنگدانه‌ی بتن بازیافتی [21-46] مخلوط سنگدانه‌ی بتن بازیافتی، سرامیک‌ها و سایر مصالح متفرقه بازیافتی ساختمان [47]، مخلوط سنگدانه‌ی حاصل از بتن بازیافتی و مصالح بنایی و سرامیک [48] و سنگدانه‌ی مخلوط از انواع دورریزهای ساختمانی [49] در قالب شکل 5 پرداخته شده است.

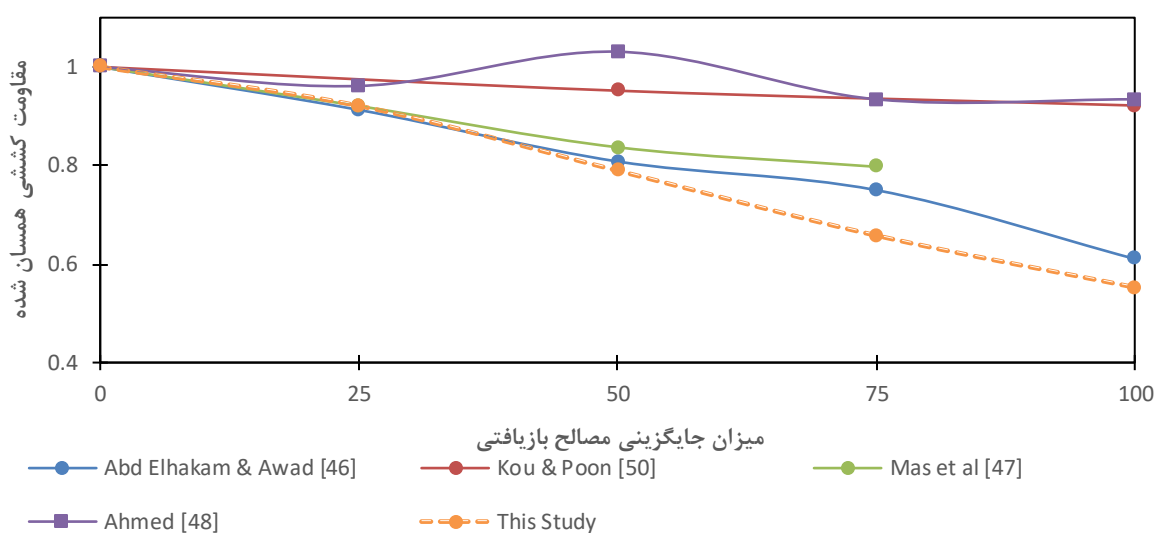
مقایسه‌ی نتایج مقاومت فشاری نشان می‌دهد که عملکرد بتن با سنگدانه‌ی آسفالتی بازیافتی تفاوت چندانی با بتن‌های بازیافتی دیگر که تماماً بدون استفاده از مواد افزودنی ساخته شده‌اند ندارد. هر چند افت مقاومت بتن با افزایش میزان جایگزینی سنگدانه‌ی بازیافتی در سنگدانه‌ی آسفالت بازیافتی به نسبت سایر بتن‌های بازیافتی بیش‌تر می‌باشد. دلیل این امر فیلر موجود در سنگدانه‌ی آسفالت بازیافتی می‌باشد که به صورت گلوله‌هایی همراه با قیر در این سنگدانه وجود داشته و با جذب آب بالاتر باعث می‌گردد تا آب فرآیند هیدراتاسیون از دسترس سیمان خارج گردد و از طرفی فضای خالی بین قیر و سنگدانه که دارای حباب‌های هوا است در نمونه‌های بتن ساخته شده ایجاد خلل و فرج کند. این خلل و فرج در نمونه‌های شکسته شده با میزان جایگزینی بالاتر کاملاً مشهود است و افت بیش‌تر مقاومت فشاری، ناشی از عملکرد فیلر همراه با قیر در این سنگدانه‌هاست. اما در بتن با جایگزینی ۲۵ درصدی میزان افت مقاومت به نسبت سایر بتن‌ها کمتر بوده که نشان از مقاومت بالای سنگدانه‌ی آسفالتی دارد.

مقاومت کششی و خمشی

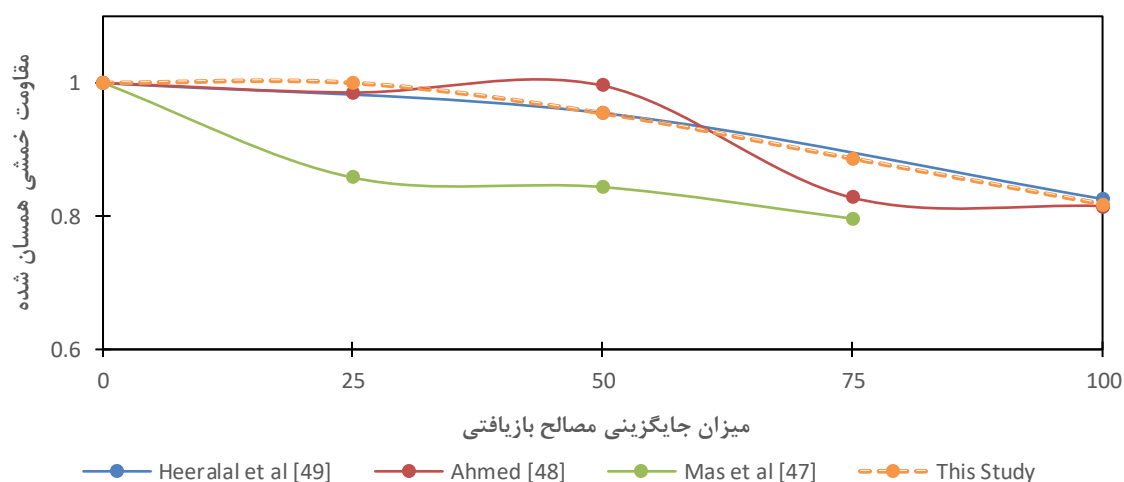
مطابق استاندارد ASTM C496 آزمایش مقاومت کششی بتن به روش دونیم‌شده‌ی استوانه‌ای (کشش برزلی) در سن ۲۸ روز و با شکست ۳ نمونه از هر طرح اختلاط با اختلاف از میانگین قابل قبول ۵ درصدی نتایج حاصله انجام شده است [40]. هم‌چنین مطابق استاندارد ASTM C78 آزمایش مقاومت خمشی به روش نقطه یک سوم در سن ۲۸ روزگی و همانند حالات قبل با سه نمونه در هر آزمایش انجام گشته است [41]. نتایج حاصله از این دو آزمایش در قالب نمودار در شکل ۶ ارائه گشته است.



شکل ۶- مقادیر مقاومت خمشی و کششی طرح‌های اختلاط مختلف



شکل ۷- مقایسه‌ی مقاومت کششی بتن با سنگدانه‌ی آسفالت بازیافتی با سایر بتن‌های بازیافتی



شکل ۸- مقایسه‌ی مقاومت خمشی بتن با سنگدانه‌ی آسفالت بازیافتی با سایر بتن‌های بازیافتی

همانند حالات قبل در این دو آزمایش نیز روند کاهش بتن بازیافتی به نسبت نمونه‌ی بتن معمولی مشاهده می‌گردد. در آزمایش مقاومت کششی در نمونه‌ها ترک‌های زودرس پیش از تحمل حداکثر بار اعمالی ایجاد می‌شود. علت این امر وجود گلوله‌های متشکل از قیر و فیلر هم‌اندازه با سنگدانه است که در هنگام اختلاط قابل تفکیک نمی‌باشد. از طرفی نیز فیلر چسبیده به مواد قیری با جذب آب بالاتر خود باعث می‌گردد تا آب جذب شده توسط سنگدانه‌ی بازیافتی پس از مدتی تبخیر شده و در بتن ایجاد خلل و فرج کند که عاملی در راستای کاهش مقاومت کششی بتن می‌باشد.

به جهت مقایسه‌ی عملکرد بتن با سنگدانه‌ی بازیافتی مقادیر مقاومت کششی این نوع بتن با بتن‌های بازیافتی با سنگدانه‌های بتن بازیافتی [۴۶-۵۰] مخلوط سنگدانه‌ی بتن بازیافتی، سرامیک‌ها و سایر مصالح متفرقه بازیافتی ساختمان [۴۷]، مخلوط سنگدانه‌ی حاصل از بتن بازیافتی و مصالح بنایی و سرامیک [۴۸] مطابق نمودار شکل ۷ مقایسه گردیده است.

بر طبق مقایسه‌ی انجام شده بتن با سنگدانه‌ی آسفالت بازیافتی هم‌چنان عملکرد قابل قبولی در مقایسه با سایر بتن‌های بازیافتی دارد، اما افت مقاومت کششی در این نوع بتن بیش‌تر است. همانگونه که ذکر گردید ترک‌های زودرس ایجاد شده در بتن با سنگدانه‌ی آسفالت بازیافتی باعث این تفاوت می‌گردد.

در آزمایش مقاومت خمشی روند کاهش به مراتب شیب کمتری نسبت به حالات قبل دارد. در نمونه‌های شکسته شده می‌توان مشاهده نمود که خطوط شکست در فاز انتقالی ایجاد شده و در میان خود سنگدانه‌ها نیست. اما مقاومت و بافت خود سنگدانه‌ی بازیافتی عاملی مهم در کاهش کمتر مقادیر مقاومت خمشی است. لذا با توجه به رفتار نمونه‌ها می‌توان بیان داشت که سنگدانه‌ی آسفالت بازیافتی به تنهایی مقاومت مناسبی در برابر نیروهای خمشی دارد.

برای مقایسه‌ی عملکرد بتن با سنگدانه‌ی آسفالت بازیافتی با سایر انواع بتن بازیافتی به مقایسه عملکرد این بتن با بتن‌های بازیافتی با سنگدانه‌های بازیافتی مختلف مشابه آنچه قبلاً شرح داده شد مطابق شکل ۸ پرداخته می‌شود. [۴۷-۴۹-۴۹] همانطور که نشان داده شده است، میزان افت مقاومت خمشی بتن با سنگدانه‌ی آسفالت بازیافتی به دلیل مقاومت بالای خود سنگدانه‌ها به نسبت کم بوده و عملکردی قابل قبول در مقایسه با سنگدانه‌های بازیافتی دیگر دارد.

چرخه‌ی ذوب و یخبندان

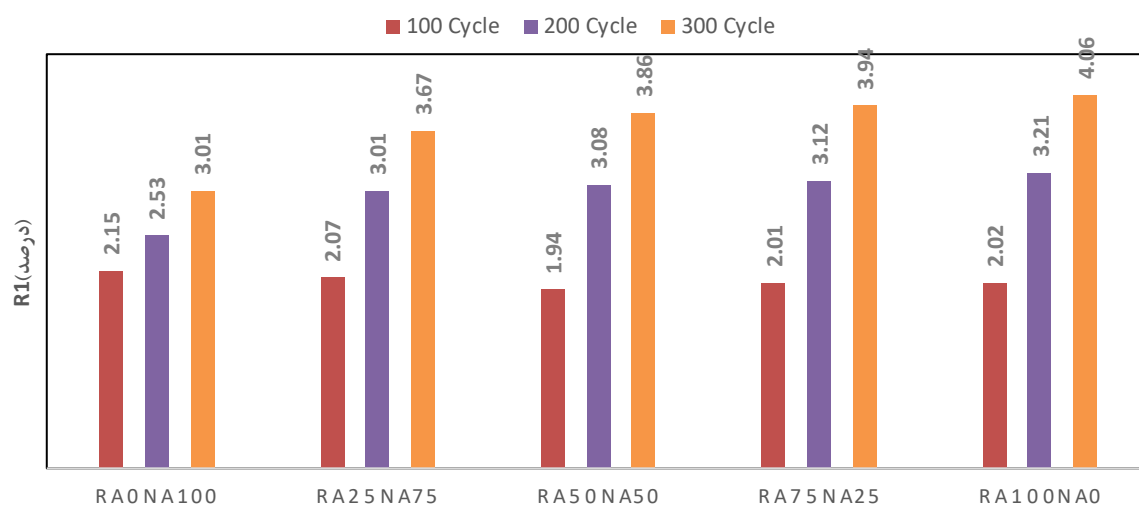
مطابق استاندارد ASTM C666 دو روش برای انجام آزمایش چرخه یخ و ذوب وجود دارد، روش اول یخ‌زدگی نمونه‌ها در آب و سپس ذوب آن‌ها در آب و روش دوم یخ زدن نمونه‌ها در هوا و سپس ذوب آن‌ها در آب می‌باشد. در این تحقیق با توجه به امکانات موجود از روش دوم استفاده شده است. لذا نمونه‌ها پس از ۱۴ روز عمل‌آوری ابتدا حدود ۳۰ دقیقه در معرض ذوب قرار گرفته و سپس در معرض یخ‌زدگی قرار می‌گیرند، لذا زمان هر چرخه در حدود ۵ ساعت طول می‌کشد و دمای نمونه‌ها در بازه‌ی بین ۴.۴+ تا ۱۷.۸- درجه‌ی سانتی‌گراد تغییر می‌کند. در این آزمایش از هر طرح اختلاط ۳ نمونه برای هر یک از چرخه‌های ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ انتخاب گشته و وزن نمونه‌ها نسبت به حالت قبل از قرارگیری در دستگاه و بعد از چرخه‌های ذکر شده مقایسه می‌گردد. هم‌چنین مقادیر مقاومت فشاری نمونه‌ها نیز پس از چرخه‌های ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ با نمونه‌ی ۲۸ روزه مقایسه می‌گردد. روابط ۱ و ۲ به ترتیب بیانگر نحوه‌ی محاسبه‌ی درصد کاهش وزن و درصد تغییرات مقاومت فشاری می‌باشد [۴۲].

$$R_1 = \frac{w_1 - w_2}{w_1} \times 100 \quad (1)$$

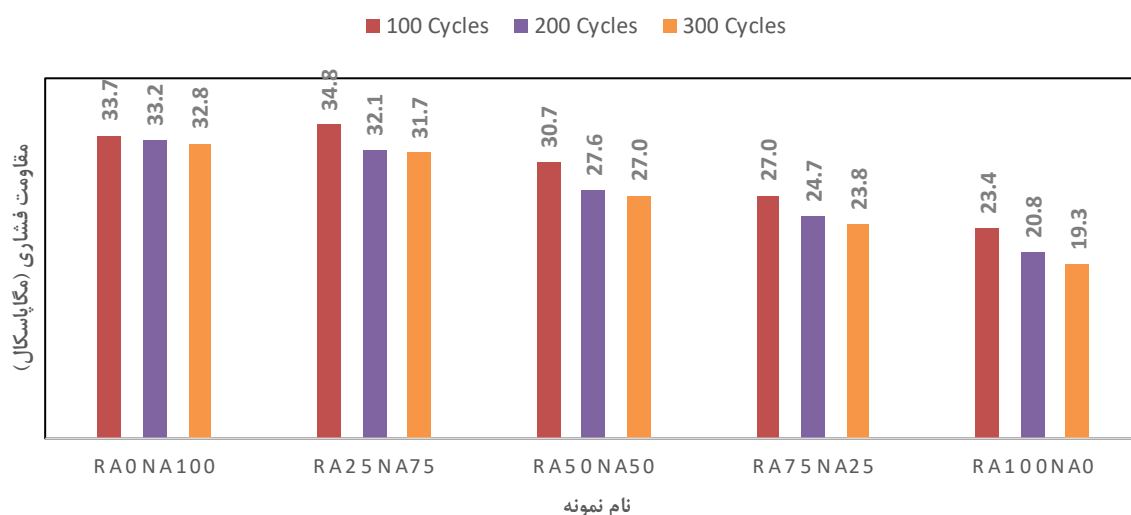
$$R_2 = \frac{f_2 - f_1}{f_1} \times 100 \quad (2)$$

که در روابط ۱ و ۲ به ترتیب w_1 بیانگر وزن خشک نمونه قبل از قرارگیری در فریزر، w_2 بیانگر وزن خشک نمونه پس از قرارگیری در فریزر، R_1 بیانگر درصد کاهش وزن نمونه، f_1 مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه، f_2 مقاومت فشاری نمونه‌ی درون دستگاه و R_2 درصد تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ها تعریف می‌شوند. ذکر این نکته ضروری است که با توجه به عدم امکان قرارگیری نمونه‌ها در دستگاه خشک‌کن نمونه‌ها به مدت حداقل ۲ روز تا ثابت ماندن وزن آن‌ها توسط آفتاب خشک شده‌اند.

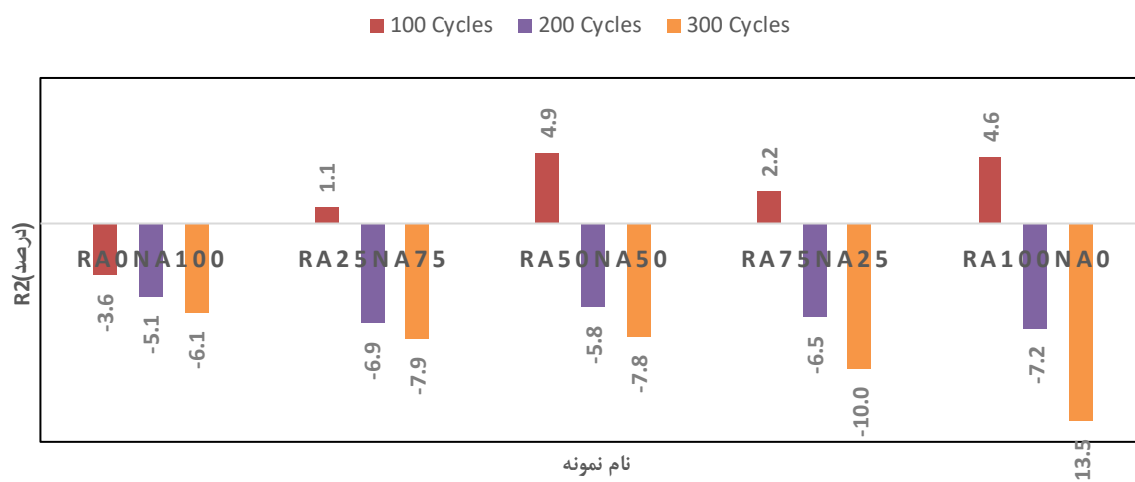
اشکال ۹ و ۱۰ و ۱۱ به ترتیب نتایج مربوط به درصد تغییرات وزن نمونه‌ها، میزان مقاومت فشاری نمونه‌ها و درصد تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ها را نمایش می‌دهند.



شکل ۹- درصد تغییرات جرم نمونه‌ها پس از چرخه‌های مختلف یخ و ذوب



شکل ۱۰-مقاومت فشاری نمونه‌ها پس از چرخه‌های مختلف یخ و ذوب



شکل ۱۱- درصد تغییرات مقاومت فشاری پس از چرخه‌های مختلف یخ و ذوب

در شکل ۶ بررسی تغییرات وزن نمونه‌ها نشان می‌دهد در ۱۰۰ چرخه بیش‌ترین میزان تغییر وزن مربوط به نمونه‌ی بدون سنگدانه‌ی بازیافتی می‌باشد. در توضیح این پدیده می‌توان بیان داشت که عملکرد حفرات بین قیر چسبیده به سنگدانه‌های بازیافتی باعث می‌گردد تا مقداری حباب هوا دورن نمونه‌ها خارج شود که این امر سبب عملکرد بهتر نمونه‌های بتن بازیافتی در برابر چرخه‌های یخ و ذوب می‌گردد. پس از ۱۰۰ چرخه به مراتب تغییر وزن نمونه‌های دارای سنگدانه‌ی بازیافتی بیشتر می‌شود به طوری که جدایش ملات چسبیده به سنگدانه‌های بازیافتی و ایجاد ترک‌های ریز درون سنگدانه‌ی بازیافتی مشاهده می‌گردد. در نمونه‌های شکسته شده، جدایش و ترک‌خوردگی سنگدانه‌ی بازیافتی به وضوح قابل تشخیص می‌باشد، که به دلیل مقاومت کمتر خود مصالح سنگدانه‌ی بازیافتی نیز است. این امر موجب شده تا ریزدانه‌ی مخلوط بیش‌تر شود و هم‌چنین جدایش مواد از سنگدانه‌های بازیافتی اتفاق بیافتد.

در مورد تغییرات مقاومت فشاری نیز همانند آنچه در اشکال ۷ و ۸ مشهود است، میزان مقاومت نمونه‌های دارای سنگدانه‌ی بازیافتی تا چرخه ۱۰۰ روندی افزایشی را نشان می‌دهد. علت این امر را می‌توان در تاثیر بیش‌تر هیدراسیون در زمان حدود ۲۰ روزه‌ی قرارگیری نمونه‌ها در دستگاه یخ و ذوب دانست. در نمونه‌های دارای سنگدانه‌ی بازیافتی ایجاد حباب‌های هوا توسط حفرات درون سنگدانه‌های بازیافتی و بین آسفالت قدیمی و سنگدانه باعث متخلخل‌تر شدن و مقاومت بهتر در برابر انبساط حاصل از یخ‌زدگی و هم‌چنین جایگزینی شیره‌ی هیدراسیون به جای یخ تا چرخه ۱۰۰ می‌گردد. هم‌چنین این احتمال نیز وجود دارد که ایجاد ترک‌های ریز در اثر یخ‌زدگی در میان ملات چسبیده به سنگدانه‌ی بازیافتی باعث چسبیدن بیش‌تر ملات سیمان و سنگدانه‌ی بازیافتی (که دارای بافت خشن‌تر است) شده و ناحیه‌ی انتقالی قوی‌تری نسبت به حالت عادی در نمونه‌های دارای سنگدانه‌ی بازیافتی ایجاد کند. اما نتایج ۲۰۰ چرخه بیانگر کاهش مقاومت سریع‌تر نمونه‌های دارای سنگدانه‌ی بازیافتی می‌باشد که حاکی از عملکرد تخریبی سریع‌تر چرخه یخ و ذوب نسبت به عملکرد مثبت هیدراسیون سیمان می‌باشد. شکست سنگدانه‌ی بازیافتی درون ملات و جدایش آن‌ها به علاوه‌ی ایجاد ترک در ناحیه‌ی انتقالی سنگدانه‌ی بازیافتی می‌تواند علت کاهش سریع‌تر مقاومت در این سنگدانه‌ها باشد. در ۳۰۰ چرخه نیز همین روند کاهش مقاومت به دلایل مشابه ادامه می‌یابد.

در نمونه‌های با جایگزینی ۱۰۰ درصدی یک نمونه به دلیل تغییر شکل زیاد، قابلیت خود برای انجام آزمایش مقاومت فشاری را از دست داد. طبق استاندارد در صورتی که افت مقاومت به میزان بیش از ۱۰ درصد و یا افت وزن نمونه بیش از ۵ درصد باشد نشانگر تخریب در بتن می‌باشد. این امر فقط در نمونه‌های با جایگزینی ۷۵ و ۱۰۰ درصدی پس از ۳۰۰ چرخه قابل مشاهده می‌باشد.

عملکرد بتن با سنگدانه‌ی آسفالت بازیافتی به نسبت نمونه‌های بتن بازیافتی با سنگدانه‌های متفاوت قابل قبول [۵۱-۵۲-۵۳] می‌باشد. گستردگی نتایج و نحوه‌ی انجام آزمایشات یخ و ذوب امکان ترسیم نمودار همانند حالات قبل را نمی‌دهد، اما مقایسه با

تحقیقات همسو، نشان می‌دهد که سنگدانه‌ی آسفالت بازیافتی عملکرد قابل قبولی در برابر چرخه‌ی یخ و ذوب در مقایسه با سایر بتن‌های بازیافتی دارد. علت این امر حضور حباب‌های هوای بیشتر در این نوع سنگدانه می‌باشد که باعث می‌گردد با ایجاد تخلخل بیش‌تر مقاومت بهتری در هنگام انبساط‌های حاصله ایجاد گردد.

نتایج

سنگدانه‌ی آسفالت بازیافتی به عنوان جایگزینی برای سنگدانه‌ی طبیعی در بتن در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. خواص بتن با سنگدانه‌ی آسفالت بازیافتی به نسبت نمونه‌ی شاهد افت داشته اما این افت باعث عدم کارایی این نوع بتن نگردیده است. همچنین سنگدانه‌ی آسفالت بازیافتی در مقایسه با سایر انواع سنگدانه‌های بازیافتی عملکرد قابل قبولی دارد. نتایج زیر را می‌توان از بررسی عملکرد بتن با سنگدانه‌ی آسفالت بازیافتی استنباط نمود:

روانی و کارایی بتن بازیافتی با سنگدانه‌ی آسفالتی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد، به نحوی که می‌توان بیان داشت برای ایجاد کارایی مناسب نیاز به استفاده از افزودنی‌های بتن می‌باشد.

چگالی بتن بازیافتی به نسبت بتن معمولی کمتر است.

میزان افت مقاومت فشاری و کششی در بتن بازیافتی به نسبت زیاد است اما هنوز مقادیر مقاومتی قابلیت کاربری را به بتن بازیافتی می‌دهد. این میزان افت در مقاومت خمشی کمتر است.

لایه‌ی قیر قدیمی چسبیده به سنگدانه‌ی بازیافتی که عامل ایجاد ناحیه‌ی انتقالی ضعیف در بتن است مهم‌ترین مشکل بتن بازیافتی با سنگدانه‌ی آسفالتی قلمداد می‌شود.

میزان کاهش وزن و مقاومت بتن بازیافتی در برابر چرخه‌های یخ و ذوب تا چرخه ۱۰۰ نشانگر عملکرد بهتر این بتن در برابر چرخه‌های یخ و ذوب می‌باشد.

عملکرد بتن بازیافتی در برابر چرخه‌های یخ و ذوب متوالی بیش از ۱۰۰ چرخه از بتن معمولی ضعیف‌تر می‌باشد.

بتن بازیافتی حاصله در مقایسه با سایر انواع بتن بازیافتی، دارای خواص مکانیکی و دوام قابل قبولی می‌باشد. اما به دلیل لایه‌ی قیر چسبیده به آن و فیلر موجود در لایه‌ی قیری عملکردی متفاوت در برخی خواص به نسبت سایر انواع بتن بازیافتی دارا است

منابع و مراجع

- [1] Kurad R, Silvestre J, Brito J, and Ahmed H. (2017). "Effect of incorporation of high volume of recycled concrete aggregates and fly ash on the strength and global warming potential of concrete." *Journal of cleaner productio*. vol. 166 .pp. 485-502.
- [2] Yeheyis M, Hewage K, Alam M , Eskicioglu C, and Sadiq R (2013). "An overview of construction and demolition waste management in Canada: a lifecycle analysis approach to sustainability." *Clean technologies environmental policy*, vol. 15, no. 1, pp. 81-91.
- [3] Hassan K, Brooks J, and Erdman M. (2000). "The use of reclaimed asphalt pavement (RAP) aggregates in concrete." in *Waste management series*, vol. 1, pp. 121-128.
- [4] Pellegrino C and Faleschini F. (2016). "Recycled Aggregates for Concrete Production: State-of-the-Art." in *Sustainability Improvements in the Concrete Industry*: Springer, pp. 5-34.
- [5] Katz A. (2003) "Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete." *Cement and concrete research*. vol. 33, no. 5, pp. 703-711.
- [6] Debieb F, Courard L, Kenai S, and Degeimbre R. (2010). "Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates." *Cement and Concrete Composites*, vol. 32, no. 6, pp. 421-426.
- [7] Huda S and Alam M. (2014). "Mechanical behavior of three generations of 100% repeated recycled coarse aggregate concrete." *Construction And Building materials*, vol. 65 .pp. 574-582.
- [8] Singh S, Ransinchung G, and Kumar P. (2017). "An economical processing technique to improve RAP inclusive concrete properties." *Construction and Building Materials*, vol. 148, pp. 734-747.
- [9] Vázquez E, Barra M, Aponte D, Jiménez C, and Valls S. (2014). "Improvement of the durability of concrete with recycled aggregates in chloride exposed environment." *Construction And Building Materials*, vol. 67, pp. 61-67.
- [10] Lima C, Caggiano A ,Faella C, Martinelli E, Pepe M, and Realfonzo R. (2013). "Physical properties and mechanical behaviour of concrete made with recycled aggregates and fly ash." *Construction And Building Materials*, vol. 47, pp. 547-559.
- [11] Kou S, Poon C, and Etxeberria M. (2011). "Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete" *Cement And Concrete Composites*, vol. 33, no. 2, pp. 286-291.
- [12] Matias D, De Brito J, Rosa A, and Pedro D. (2013). "Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates–Influence of the use of superplasticizers," *Construction And Building materials*, vol. 44, pp. 101-109.
- [13] Etxeberria M, Vázquez E, Marí A, and Barra M. (2007). "Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete." *Cement And Concrete research*, vol. 37, no. 5, pp. 735-742.
- [14] Matias D, de Brito J, Rosa A, and Pedro D.(2014). "Durability of concrete with recycled coarse aggregates: influence of superplasticizers," *Journal of materials in civil engineering*, vol. 26, no. 7, p. 06014011.
- [15] González-Fontebo B and Martínez-Abella F (2008). "Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume. Materials and mechanical properties" *Building And Environment*, vol. 43, no. 4, pp. 429-437.
- [16] Li X (2008). "Recycling and reuse of waste concrete in China: Part I. Material behaviour of recycled aggregate concrete." *Resources, Conservation And Recycling*, vol. 53, no. 1-2, pp. 36-44.

- [17] Matias D, De Brito J, Rosa A, and Pedro D. (2013). "Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates–Influence of the use of superplasticizers," Construction And Building materials, vol. 44, pp. 101-109.
- [18] Amer A, Ezziane K, and Bougara. (2016). "Rheological and mechanical behavior of concrete made with pre-saturated and dried recycled concrete aggregates." Construction And Building Materials, vol. 123, pp. 300-308.
- [19] Kwan W, Ramli M, Kam Kenn J, and Sulieman M, (2012). "Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties." Construction And Building Materials, vol. 26, no. 1, pp. 565-573.
- [20] Rasheeduzzafar A and Khan A. (1984). "Recycled concrete-a source of new aggregate." Journal of the American Society of Testing Materials, Cement, Concrete, Aggregate, vol. 6, no. 1.
- [21] Topcu I and Şengel S. (2004). "Properties of concretes produced with waste concrete aggregate." Cement And Concrete research, vol. 34, no. 8, pp. 1307-1312.
- [22] Dilbas H, Şimşek M, and Çakır Ö. (2014). "An investigation on mechanical and physical properties of recycled aggregate concrete (RAC) with and without silica fume." Construction And Building materials, vol. 61, pp. 50-59.
- [23] Limantono H, Ekaputri J, and Susanto TE. (2016). "Effect of silica fume and glass powder on high-strength paste." Engineering Materials, vol. 673, pp. 37-46: Trans Tech Publ.
- [24] Mukharjee B and Barai S. (2014). "Influence of nano-silica on the properties of recycled aggregate concrete." Construction And Building Materials, vol. 55, pp. 29-37.
- [25] Xiao J and Lan Y. (2006). "Investigation on the tensile behavior of recycled aggregate concrete." Jianzhu Cailiao Xuebao, vol. 9, no. 2, pp. 154-158.
- [26] Liu Q, Xiao J, and Sun Z. (2011). "Experimental study on the failure mechanism of recycled concrete." Cement And Concrete Research, vol. 41, no. 10, pp. 1050-1057.
- [27] Sri R and Tam C. (1985). "Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate." Magazine of concrete research, vol. 37, no. 130, pp. 29-38.
- [28] Bairagi NK, Ravande K, and Pareek VK. (1993). "Behaviour of concrete with different proportions of natural and recycled aggregates." Resources, conservation and recycling, vol. 9, no. 1-2, pp. 109-126.
- [29] Kisku N, Joshi H, Ansari M, Panda SK, Nayak Sanket, and Dutta S. (2017). "A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material." Construction and Building Materials, vol. 131, pp. 721-740.
- [30] Arora S and Singh SP. (2016). "Analysis of flexural fatigue failure of concrete made with 100% coarse recycled concrete aggregates." Construction And Building materials, vol. 102, pp. 782-791.
- [31] Erdem S and Blankson M. (2014). "Environmental performance and mechanical analysis of concrete containing recycled asphalt pavement (RAP) and waste precast concrete as aggregate." Journal of hazardous materials, vol. 264, pp. 403-410.
- [32] Gokce A, Nagataki S, Saeki T, and Hisada M. (2004). "Freezing and thawing resistance of air-entrained concrete incorporating recycled coarse aggregate: The role of air content in demolished concrete." Cement And Concrete Research, vol. 34, no. 5, pp. 799-806.
- [33] Neville Adam M. Properties of concrete. Longman London.
- [34] Topcu I and Şengel S. (2004). "Properties of concretes produced with waste concrete aggregate." Cement And concrete research, vol. 34, no. 8, pp. 1307-1312.
- [35] Debieb F, Courard L, Kenai S, and Degeimbre R. (2010). "Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates." Cement And Concrete Composites, vol. 32, no. 6, pp. 421-426.

- [36] ASTM C127-01.(2001). "Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate." ASTM International West Conshohocken, PA, USA, 2001.
- [37] ASTM C136. (2011). "Standard Test Method for Sieve Analysis of Coarse Aggregate"
- [38] ASTM C128. (2015). "Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate"
- [39] BS1881.(1970). "Testing concrete. Methods of testing hardened concrete for other than strength , Part5." ed. London: British Standard Institution.
- [40] ASTM C496/C496M-11. (2004). "Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens." ed: ASTM International, West Conshohocken, PA, pp. 469-90.
- [41] ASTM C78. (2010). "Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third-point loading)." in American Society for Testing and Materials, ed
- [42] ASTM C666. (2015). "Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing."
- [43] ACI211.(1991). "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete." " American Concrete Institute.
- [44] ASTM C143-03.(2003). "Standard test method for slump of hydraulic-cement concrete." ed: ASTM West Conshohocken, PA, USA.
- [45] ACI Committee, & International Organization for Standardization. (2008). "Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and commentary." American Concrete Institute.
- [46] Abd Elhakam, A., & Awad, E. (2012). "Influence of self-healing, mixing method and adding silica fume on mechanical properties of recycled aggregates concrete." Construction and Building Materials, vol. 35, pp. 421-427.
- [47] Mas, B., Cladera, A., Del Olmo, T., & Pitarch, F. (2012). "Influence of the amount of mixed recycled aggregates on the properties of concrete for non-structural use." Construction and Building Materials, vol. 27, pp. 612-622.
- [48] Ahmed, S. F. U. (2014). "Properties of concrete containing recycled fine aggregate and fly ash." The Journal of Solid Waste Technology and Management, vol. 40, pp. 70-78.
- [49] Heeralal, M., Kumar, R. P., & Rao, Y. V. (2009). "Flexural fatigue characteristics of steel fiber reinforced recycled aggregate concrete (SFRRAC)." Facta universitatis-series: Architecture and Civil Engineering, vol. 7(1), pp. 19-33.
- [50] Kou, S. C., & Poon, C. S. (۲۰۱۳). Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash. Cement and Concrete Composites, ۳۷, ۱۲-۱۹.
- [51] Tuyan, M., Mardani-Aghabaglou, A., & Ramyar, K. (2014). "Freeze-thaw resistance, mechanical and transport properties of self-consolidating concrete incorporating coarse recycled concrete aggregate." Materials & Design, vol. 53, pp. 983-991.
- [52] Gokce, A., Nagataki, S., Saeki, T., & Hisada, M. (2004). "Freezing and thawing resistance of air-entrained concrete incorporating recycled coarse aggregate: The role of air content in demolished concrete." Cement and Concrete Research, vol. 34, pp. 799-806.
- [53] Medina, C., de Rojas, M. I. S., & Frías, M. (2013). "Freeze-thaw durability of recycled concrete containing ceramic aggregate." Journal of Cleaner Production, vol. 40, pp. 151-160.