

بررسی مقاومت و دوام بتن‌های بازیافتی و معمولی در چرخه‌های ذوب و انجماد

کیوان حاجیان اسرمی^{۱*}، غلامرضا عبدالله زاده^۲، سید کامیل هاشمی حیدری^۳

۱- دانشجوی دکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان
۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
۳- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

k_hajian@semnan.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۰۵

چکیده

به علت افزایش تقاضا برای ساخت سازه‌های بتنی و از طرفی محدود بودن منابع اولیه و نگرانی‌های زیست محیطی ناشی از برداشت بی‌رویه از منابع زمین، بتن بازیافتی مورد توجه قرار گرفته است. سنگدانه‌های بتن‌های بازیافتی از تخریب انواع بتن‌ها و مصالح ساختمانی به کار رفته در سازه‌ها تامین می‌شود، علت تخریب این سازه‌ها می‌تواند، فرسودگی، جنگ و سوانح طبیعی باشد. با توجه به گستردگی منابع بتن‌های بازیافتی و عدم شناخت از آن‌ها و از طرفی نتایج متناقض پژوهشگران در مورد ویژگی‌های بتن بازیافتی لازم است تحقیقات گسترده‌تری پیرامون آن انجام گیرد. در این تحقیق ابتدا مشخصات فیزیکی از جمله وزن و ظاهر سنگدانه‌های بازیافتی مورد آزمایش قرار گرفته شد. سپس مقاومت و دوام بتن بازیافتی ساخته شده از سنگدانه‌های بازیافتی بعد از اعمال چرخه‌های ذوب و انجماد بررسی شد و با بتن طبیعی مورد مقایسه قرار گرفته است. با استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی حاصل از تخریب ضایعات بتنی، آزمون‌های بتنی در سه گروه RC، RN و NC که به ترتیب شامل ۱۰۰، ۵۰ و ۰ درصد سنگدانه بازیافتی بودند، با دو نسبت ۴۵ و ۵۵ درصد آب به سیمان ساخته شدند. در مجموع ۵۷ آزمون بتنی برای آزمایش خمشی (مکعبی ۱۰×۱۰×۵۰ سانتی‌متری) فشاری و کششی (استوانه ای ۱۰×۲۰ سانتی‌متری) و امواج فراصوتی (مکعبی ۷×۷×۴۰ سانتی‌متری) ساخته شد. بعد از اتمام چرخه‌های ذوب و انجماد مطابق استاندارد ASTM C666، آزمایش‌های تعیین مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری، کشش غیرمستقیم و خمش تک نقطه‌ای روی آزمون‌ها انجام شد. جذب آب سنگدانه‌های بازیافتی و طبیعی به ترتیب ۱۳ و ۶/۵ اندازه گیری شده است. بتن کاملاً بازیافتی بعد از اعمال چرخه ذوب و انجماد کاهش در مقاومت فشاری، خمشی و کششی و مدول الاستیسیته به ترتیب برابر ۴۱، ۱۸، ۱۰ و ۲۸ درصد را تجربه نموده است. با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی میزان این کاهش بیشتر مشاهده شده است. مدول دینامیکی نسبت به شرایط اولیه در پایان چرخه‌ها، برای بتن بازیافتی و طبیعی به ترتیب ۹۵ و ۹۳ درصد بوده است. بتن با جایگزینی ۵۰ درصد سنگدانه بازیافتی، مقاومت کمتر اما نزدیک به بتن طبیعی داشته است و در عین حال کاهش مدول دینامیکی کمتری را نیز تجربه کرده است. پس در بتن‌های بازیافتی، افزایش درصد جایگزینی سنگدانه‌های بیش از این مقدار توصیه نمی‌شود.

واژگان کلیدی: بتن بازیافتی، چرخه ذوب و انجماد، نسبت آب به سیمان، سنگدانه بازیافتی، دوام.

۱- مقدمه

بتن به عنوان پر مصرف ترین ماده بعد از آب در ساخت سازه‌های عمرانی مانند: پل‌ها، انواع ساختمان‌ها با کاربری‌های مختلف، نیروگاه‌ها، فرودگاه‌ها، سکو‌ها، پالایشگاه‌ها، خطوط و لوله‌های بتنی به شمار می‌رود. مصرف این ماده با گذشت زمان و با افزایش جمعیت و مطابق آن افزایش نیاز به سازه‌ها و ساختمان‌های جدید روز به روز چشمگیرتر خواهد شد و حجم ضایعات بتنی بوجود آمده از ساخت و سازها نیز قابل توجه است. از طرف دیگر حفظ محیط زیست از دغدغه‌های دوست‌داران محیط‌زیست و باعث نگرانی جوامع بشری است. ازین رو دانشمندان در دهه‌های اخیر باز یافت بتن را مورد بررسی قرار داده‌اند و با عنوان بتنی بنام بتن باز یافتی شاخه تحقیقاتی جدیدی را در مهندسی عمران بوجود آوردند که توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است. سنگدانه باز یافتی توسط پژوهشگران در انواع بتن‌ها از جمله: معمولی، خود متراکم، مقاومت بالا... استفاده شده است.

در سال‌های اخیر، به دلیل نیاز به توسعه سریع زیر ساخت‌ها، تقاضا برای سنگدانه‌های طبیعی به سرعت در کشورهای در حال توسعه مانند هند و چین افزایش یافته است. بازار جهانی کالا در سال ۲۰۱۵، میزان نیاز به سنگدانه‌ها را ۴۸ میلیارد تن تخمین زده و انتظار می‌رود تا سال ۲۰۲۲ به ۶۶.۳ میلیارد تن افزایش یابد [1]. براساس آژانس حفاظت از محیط زیست آمریکا، در سال ۲۰۱۴، ۵۳۴ میلیون تن ضایعات ساختمانی در ایالات متحده تولید شد [2]. اتحادیه اروپا تا سال ۲۰۲۰، باز یافت ضایعات بتنی را به میزان ۷۰ درصد هدف گذاری کرده است [3]. از طرفی، استفاده از هر سنگدانه تخریبی در بتن توصیه نمی‌شود، در سنگدانه‌های باز یافتی بیشتر بتن خرد شده یافت می‌شود زیرا بیشترین مصالح ساختمانی در کاربردهای سازه‌ای است. سازمان-ها در کشورهای مختلف آیین نامه‌هایی را ارایه داده اند، که باید حداقل ۹۰ درصد حجم سنگدانه‌های باز یافتی، برپایه سنگدانه طبیعی و سیمان پرتلند باشد [4]. مسئله مهم دیگر در بتن‌ها، دوام آن‌ها است که در کنار مقاومت بتن‌ها از شاخص‌های مهم

طراحی و استفاده بتن‌ها می‌باشد. به مقاومت بتن در برابر عوامل جوی (ذوب و انجمادهای متناوب)، حملات شیمیایی، سایش و فرسایش و فرآیندهای تخریبی دیگر از جمله سنگدانه‌های واکنش‌زا، دوام بتن گفته می‌شود. یکی از مهمترین فاکتورهای که برای کاربرد سنگدانه باز یافتی در تولید بتن باید مورد توجه قرار داد، تامین و یا عدم تامین ویژگی‌های دوام و پایداری بتن باز یافتی است.

جایگزینی سنگدانه‌های باز یافتی باید با توجه به میزان مصرف و مشخصات سنگدانه‌ها (نوع سنگدانه، جنس و ریزدانه‌گی و دانه بندی و...) مورد بررسی قرار گیرد. مطالعات پیشین نشان می‌دهد جایگزینی سنگدانه‌های باز یافتی به جای سنگدانه‌های طبیعی در بتن تا مقدار ۳۰ درصد بر مقاومت بتن در برابر سیکل‌های ذوب و انجماد و نفوذ پذیری بتن تأثیر محسوسی ندارد، و ویژگی‌های تقریباً مشابه با بتن طبیعی داشته است، در این تحقیق، سنگدانه‌های باز یافتی از تخریب عناصر بتنی پیش ساخته با مقاومت بالا حاصل شده است. اندازه سنگدانه باز یافتی بین ۱۰-۲۰ میلی‌متر برای درشت دانه و ۵-۱۰ میلی‌متر برای ریز دانه در نظر گرفته شد، چگالی سنگدانه باز یافتی نسبت به سنگدانه طبیعی ۹ تا ۷ درصد کمتر بوده است و جذب آب آن‌ها دوبرابر سنگدانه‌های باز یافتی بوده است، میزان ملات چسبیده به سنگدانه‌های ۱۱.۳ درصد اندازه گیری شده است [5]. مقاومت در برابر یخ‌زدگی بتن باز یافتی به طور کلی نسبت به بتن معمولی پایین‌تر است. زاهاریوا و همکاران با مطالعه روی سنگدانه‌های باز یافتی حاصل از تخریب سازه‌های بتنی ساختمان‌های فرسوده، با درصد جذب آب ۱۲ درصد به این نتیجه رسیدند، مقاومت بتن باز یافتی در برابر چرخه ذوب و انجماد در مقایسه با بتن معمولی ضعیف‌تر است و بتن باز یافتی نباید در سازه‌های در معرض آب و هوای شدید قرار گیرد، به ویژه زمانی که سنگدانه‌های باز یافتی از قبل اشباع شده باشند، دلیل این توصیه، تخلخل بالا و نسبت آب به سیمان بالاتر و جذب آب بالاتر این سنگدانه‌ها است. نکته قابل ذکر این است که بتن-های باز یافتی اگرچه مقاومت کمتری در برابر چرخه‌های ذوب و انجماد دارند، اما طبق استاندارد ASTM C666 در اثر ۳۰۰

چرخه، آسیب نمی بیند. در این تحقیق سنگدانه‌های بازیافتی دارای تخلخل ۱۱ تا ۲۰ درصد بودند، و علت اصلی افت مقاومت بتن بازیافتی و مقاومت کم در برابر چرخه ذوب و انجماد جذب آب بالا و تخلخل سنگدانه‌ها به خصوص درشت دانه‌ها، اعلام شد. در این تحقیق سنگدانه‌ها قبل از استفاده با شست و شو پیش آماده سازی شده بودند، که بتن ساخته شده با این سنگدانه‌ها در مقایسه با بتن طبیعی، چگالی کمتر، تخلخل بیشتر و مقاومت کمتری داشته است [6]. با این حال، یافته‌های متناقضی از مقاومت بتن بازیافتی در برابر چرخه ذوب و انجماد و مقاومت آن بدست آمده است، که به دلیل درجه مقاومت بتن اصلی است. مقاومت در برابر انجماد و ذوب بتن سنگدانه بازیافتی هنوز به دلیل تنوع زیاد در کیفیت و ترکیب بتن‌های تخریب شده نامشخص است. دیلمان تأثیر سطح مقاومت بتن منبع را بر مقاومت در برابر انجماد و ذوب بتن بازیافتی با ترکیب درشت دانه و ریزدانه بازیافت شده در نسبت‌های جایگزین مختلف مورد بررسی قرار داد، و دریافت که تفاوت قابل توجهی در دوام بتن - های بازیافتی از نظر سطح مقاومت بتن منبع در برابر چرخه ذوب و انجماد وجود ندارد [7]. هوسوکاوا و همکاران تأثیر میزان ملات چسبیده به درشت دانه بازیافت شده بر عملکرد انجماد و ذوب بتن مورد بررسی قرار دادند، تأثیر محسوسی بر دوام بتن، در اثر کاهش ملات چسبیده به سنگدانه‌ها، در برابر چرخه و ذوب و انجماد مشاهده نشد. نتایج نشان داد که اگر کیفیت بتن منبع به اندازه کافی بالا باشد، ملات چسبیده به سنگدانه عامل تأثیرگذاری بر مقاومت در برابر چرخه انجماد و ذوب تأثیر نیستند [8]. کسایی و همکاران گزارش دادند که با افزایش نسبت جایگزینی درشت دانه بازیافتی، مقاومت در برابر انجماد و ذوب شدن کاهش یافت. توصیه می‌شود، از درشت دانه بازیافتی در مواردی چرخه ذوب و انجماد شدید استفاده نشود [9]. برخی محققان دریافتند عملکرد بتن بازیافتی با وجود هواسازها وقتی کیفیت مصالح بازیافتی خوب است و درشت‌دانه بازیافتی جایگزین شود، قابل قبول خواهد بود، در تحقیق ذکر شده سنگدانه‌های بازیافتی از تخریب نمونه‌های بتنی یک ساله ساخته شده در آزمایشگاه با نسبت آب به سیمان ۴۵ درصد و با استفاده

از هواساز بوده است. مقاومت نمونه‌های آزمایشگاهی برای تخریب، ۵۰ مگاپاسکال اندازه‌گیری شده بود، در این آزمایش از سنگدانه‌هایی که ملات قدیمی به آن‌ها چسبیده بود کمتر استفاده شده است. در این تحقیق مشخص شد بدون استفاده از هواسازها حتی با بتن منبع مناسب، افت مدول دینامیکی نسبی به ۶۰ درصد در کمتر از ۹۰ سیکل رسیده است که نشان از دوام پایین بتن بدون هواساز در برابر چرخه ذوب و انجماد دارد [10]. ویژگی‌های فیزیکی سنگدانه‌های بازیافتی به خصوصیات سنگدانه‌های بتن تولید شده از آن بستگی دارد. با افزایش مقاومت بتن مادر و بهبود کیفیت ملات و در نتیجه افزایش چسبندگی بین ملات و سنگدانه می‌توان به بهبود این پدیده کمک کرد. افزایش سنگدانه‌های بازیافتی باعث کاهش وزن مخصوص و افزایش جذب آب بتن بازیافتی می‌شود و این تفاوت چگالی باعث کاهش دوام بتن بازیافتی در برابر چرخه ذوب و انجماد شده است. همچنین چرخه‌های ذوب و انجماد باعث کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها شده است، هرچه سنگدانه بازیافتی در بتن بیشتر باشد، افت مقاومت فشاری بیشتر است، اما تأثیر چرخه ذوب و انجماد بر مقاومت خمشی بتن بازیافتی قابل چشم پوشی بوده است [11].

جذب آب سنگدانه بازیافتی بسیار بیشتر از سنگدانه طبیعی است. به طور معمول ۲ الی ۷ درصد برای دانه‌های درشت و ۴ الی ۱۳ درصد برای دانه‌های ریز است. جذب آب بیشتر به علت ملات قدیمی سیمان متصل به سنگدانه‌هاست. جذب آب بالاتر می‌تواند اثر منفی روی مقاومت در برابر چرخه ذوب و انجماد بتن بگذارد [12]. بر اساس نتایج به دست آمده می‌توان دریافت که به طور کلی با افزایش نسبت جایگزینی سنگدانه بازیافتی به جای سنگدانه طبیعی، مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. با این حال توپکو و سنگل [13] دریافتند که اگر میزان جایگزینی سنگدانه بازیافتی کمتر از ۳۰ درصد باشد، اثر کاربرد سنگدانه بازیافتی بر مقاومت فشاری بتن قابل چشم پوشی است. این پژوهشگران به این نتیجه رسیدند که مانند مقاومت فشاری، مقاومت کششی در تمام سطوح جایگزینی کمتر از آزمون شاهد بوده است، برای نمونه کاهش مقاومت کششی برای جایگزینی ۱۰۰ درصدی

سنگدانه‌ها برای بتن رده C16 و C20 به ترتیب برابر ۲۷ و ۱۳ درصد اندازه‌گیری شد. سنگدانه‌های بازیافتی مورد استفاده در این تحقیق ضایعات حاصل از زلزله بوده است.

پون و همکاران با تحقیق روی بتن‌های بازیافتی ساخته شده با سنگدانه‌های اشباع شده با سطح خشک و اشباع کامل به این نتیجه رسیدند که، بتن بازیافتی ساخته شده با سنگدانه‌های بازیافتی اشباع با سطح خشک مقاومت فشاری بهتری داشته‌اند، و دریافتند که استفاده از سنگدانه بازیافتی اشباع پیوند خمیری بین ملات و سنگدانه‌های بازیافتی را تضعیف می‌کند، سنگدانه‌های بازیافتی استفاده شده در این تحقیق حاصل از خرد کردن باند فرودگاه قدیمی و ساختمان‌های بتن مسلح بوده است [14].

تابش و همکاران با مطالعه روی سه نوع بتن بازیافتی حاصل از سنگدانه‌های بازیافتی با منشا بتن قوی، ضعیف و منبأ ناشناخته قدیمی به این نتیجه رسیدند که، بتن بازیافتی با منبأ ناشناخته به دلیل قدیمی بودن و کیفیت پایین‌تر سنگدانه‌ها، بیشترین میزان افت مقاومت فشاری و کششی را به همراه داشته است. آن‌ها با تحقیق روی میزان چسبندگی سنگدانه‌های بازیافتی و ملات جدید به این نتیجه رسیدند که چسبندگی بین سنگدانه بازیافتی و سیمان به دلیل زاویه دار بودن سنگدانه‌های بازیافتی مناسب به نظر می‌رسد. آن‌ها دریافتند، استفاده از درشت دانه بازیافتی با منبأ بتن با مقاومت ۵۰ مگاپاسکال، عملکرد مناسبی در برابر آزمایش فشار و کشش نشان داده است [15].

براساس تحقیقاتی که هنس [16] انجام داده است، برای جایگزینی همزمان درشت دانه و ریزدانه، کاهش در مشخصات مکانیکی و مقاومت فشاری به حدود ۱۵ تا ۴۰ درصد می‌رسد. پدرو و همکاران با مطالعه بر سنگدانه‌های بازیافتی حاصل از تخریب و خردکردن نمونه‌های بتنی ساخته شده در آزمایشگاه با سن ۲۸ روزه و مقاومت ۷۰ مگاپاسکال نیز نتیجه گرفتند، برای سطح ۱۰۰ درصد جایگزینی درشت دانه و ریز دانه بازیافتی، کاهش مقاومت فشاری به ترتیب، ۴/۵ تا ۹/۷ درصد و ۹/۹ تا ۳/۱۵ درصد است. از این رو، توصیه کردند که سطح جایگزینی ریزدانه محدود شود، با توجه به اینکه درصد جذب ریزدانه و

درشت‌دانه به ترتیب ۶ و ۳ درصد بوده است [17]. کارل سپس و همکاران [18] با جایگزینی ۱۰۰ درصد سنگدانه‌های بازیافتی به این نتیجه رسیدند که با انجام ۵۰ چرخه ذوب و انجماد روی بتن بازیافتی مقاومت فشاری و مقاومت کششی به ترتیب ۴۷ و ۱۰ درصد کاهش یافته است، آن‌ها به این نتیجه رسیدند که به دلیل جذب آب بالای بتن بازیافتی، این بتن در برابر چرخه ذوب و انجماد مقاومت مناسبی ندارد. به دلیل اینکه چرخه ذوب و انجماد چسبندگی بین سنگدانه‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد، مقاومت فشاری بتن را تنها ناشی از مقاومت فشاری سنگدانه‌ها تشخیص دادند، در نهایت، مقاومت فشاری نمونه‌ها بعد از اعمال چرخه ذوب و انجماد افت محسوسی داشت. آن‌ها گزارش کردند، مقاومت بتن بازیافتی به منبع وابسته است، اما به دلیل اینکه مراکز بازیافت منبع بتن‌ها را مشخص نمی‌کند، پراکندگی‌هایی در نتیجه‌گیری در مورد بتن‌های بازیافتی وجود دارد که بسیار بیشتر از بتن‌های طبیعی است. نتایج به دست آمده توسط ژائو و لائو [19] نشان می‌دهد که افزایش حجم سنگدانه‌های بازیافتی در مخلوط بتن منجر به کاهش مقاومت کششی تک محوره می‌شود. زمانی که نسبت جایگزینی برابر ۱۰۰ درصد باشد، مقاومت کششی بتن بازیافتی در مقایسه با بتن معمولی با شرایط فیزیکی و روانی مشابه، ۳۱ درصد کاهش یافته است.

۲- ابزار و روش

این پژوهش به بررسی رفتار بتن‌های حاوی سنگدانه‌های بازیافتی پرداخته است. نمونه‌های بتنی با دو نسبت آب به سیمان ۴۵ و ۵۵ درصد ساخته شدند. هدف این بررسی تاثیر اعمال چرخه‌های ذوب و انجماد بر بتن‌های بازیافتی بوده است، و در انتها، تاثیر تغییرات فوق بر مشخصات فیزیکی (وزن و شکل ظاهری) و مکانیکی بتن‌های بازیافتی مورد بررسی قرار گرفت، و نتایج مورد مقایسه قرار گرفت. برای ساخت نمونه‌های بتنی بازیافتی، نمونه‌های مکعبی با مقاومت ۲۵ تا ۳۰ مگاپاسکال جمع‌آوری شد و پس از خرد کردن و سرنده کردن توسط دستگاه‌های خرد کن مورد استفاده قرار گرفت. درضمن سعی شد تا دانه‌بندی

۲-۱- سنگدانه‌ها

سنگدانه‌های بازیافتی مورد استفاده، از خرد شدن و شکستن نمونه بتن‌های جمع‌آوری شده از شهر ساری برای پروژه‌های عمرانی و ساختمانی می‌باشد. نمونه‌ها در آزمایشگاه شکسته شده و نمونه‌های با مقاومت فشاری ۲۵ تا ۳۰ مگاپاسکال برای خرد و سرنده کردن به سایت تخریب و سنگ شکن فرستاده‌شد. سنگدانه طبیعی استفاده شده در این تحقیق، از سنگ معدن شهر نکا تهیه شده‌است. جداول زیر نشان دهنده خصوصیات و ویژگی‌های سنگدانه‌های بازیافتی و طبیعی است. سنگدانه‌های بازیافتی از لحاظ ساختار به سه شکل تقسیم می‌شوند: (۱) ملات قدیمی چسبیده به سنگدانه، (۲) ملات قدیمی به عنوان سنگدانه و (۳) سنگدانه طبیعی شکسته شده. گروه یک و گروه دو باعث تفاوت ویژگی‌های بتن بازیافتی با بتن‌های معمولی می‌شود و عامل اصلی تغییر ویژگی‌های این نوع بتن است (شکل ۱).

شکل ۱. (a) ملات قدیمی چسبیده به سنگدانه، (b) ملات قدیمی به عنوان سنگدانه، (c) سنگدانه طبیعی شکسته



Fig. 1. a) Old mortar attaching to aggregate b) Old mortar as aggregate c) broken Natural aggregate

جدول ۱. ویژگی سنگدانه‌های بازیافتی و طبیعی مورد استفاده

The maximum diameter(mm)	Humidity before Construction (%)	Water absorption (s.s.d)(%)	Speciality of aggregates
19	0.96	13	Recycled aggregates
19	0.19	5.36	Natural aggregates
19	0.61	8.08	Both(50%)

Table. 1. Speciality of recycled and natural aggregates

نتایج مربوط به سنگدانه‌ها شامل آزمایش تعیین درصد رطوبت، درصد جذب آب سنگدانه‌ها و دانه‌بندی در جدول (۱) نشان داده شده است. مدول نرمی ماسه طبیعی ۴/۳ و مدول نرمی ماسه بازیافتی ۵/۳ اندازه‌گیری شده است. طبق استاندارد، مدول نرمی ماسه باید بین ۳/۲ تا ۱/۳ قرار گیرد. مدول نرمی نشان‌گر این

سنگدانه‌های بازیافتی دست نخورده باقی بماند تا از صرف وقت و هزینه کاسته شده و دانه‌بندی بدست آمده از سایت تخریب مستقیماً مورد آزمایش قرار گیرد. با توجه به این موضوع سعی شد تا دانه‌بندی سنگدانه‌های طبیعی مطابق با دانه‌بندی سنگدانه‌های بازیافتی باشد تا شباهت بیشتری نسبت به یکدیگر پیدا کنند.

با توجه به فرضیات آزمایش و هر ابعاد نمونه عنوان شده در فوق، سه آزمونه ساخته شد که یکی از آن‌ها برای قرار دادن درون یخچال ذوب و انجماد، آزمونه دوم برای آزمایش در سن ۲۸ روزه و آزمونه سوم به عنوان شاهد آزمونه اول در نظر گرفته شد. آزمونه شاهد، به منظور مقایسه با آزمونه‌های درون یخچال، به صورت همزمان و در یک سن مورد آزمایش قرار گرفتند. با توجه به موارد فوق، در مجموع برای آزمایش‌های فشاری (استوانه‌ای ۱۰×۲۰ سانتی‌متر)، کششی (استوانه‌ای ۱۰×۲۰ سانتی‌متر) و خمشی (مکعبی ۱۰×۱۰×۵۰ سانتی‌متر)، ۱۵ آزمونه در نظر گرفته شده است. مبنای انجام این تحقیق، اندازه‌گیری دوام بتن بازیافتی در برابر چرخه‌های ذوب و انجماد براساس استاندارد ASTM C666 است [20]. با توجه به این استاندارد، دو آزمونه مکعبی (۷×۷×۴۰ سانتی‌متر) برای آزمایش عبور امواج فراصوتی که آزمایش بدون تخریب است در نظر گرفته‌شد، آزمونه اول برای قرار دادن در دستگاه ذوب و انجماد و دیگری به عنوان شاهد آزمونه اول ساخته شد، که در مجموع ۱۲ آزمونه مکعبی (۷×۷×۴۰ سانتی‌متر) ساخته شده است. لازم به ذکر است که در مجموع، ۵۷ آزمونه برای این تحقیق در نظر گرفته شد. طبق استاندارد ASTM C666 آزمونه‌های درون دستگاه ذوب و انجماد، تحت چرخه ذوب و انجماد قرار گرفتند، وزن آزمونه‌ها در تمام مراحل اندازه‌گیری شده است. پس از اتمام ۳۰۰ چرخه، تحت آزمایش مقاومت فشاری، کششی غیرمستقیم، خمش سه نقطه‌ای و تعیین مدول الاستیسیته قرار گرفتند. مصالح مصرفی در این تحقیق شامل سنگدانه‌های بازیافتی و سنگدانه‌های طبیعی و سیمان پرتلند تیپ ۲، افزودنی حباب ساز و آب می‌باشد که در ادامه مورد بررسی خواهد گرفت.

و ۳۵ درصد درشت‌دانه تقسیم‌بندی شده است. لازم به ذکر است، طبق پیشنهاد استاندارد ASTM C666 افزودنی حباب‌ساز برای آزمایش ذوب و انجماد برای افزایش مقاومت در برابر یخ زدگی استفاده شده است. میزان مصرف افزودنی حباب‌ساز نیاز آزمایش ۰.۰۵ درصد وزن سیمان در تمامی طرح‌ها در نظر گرفته شد.

شکل ۲. منحنی دانه بندی سنگدانه های بازیافتی و طبیعی

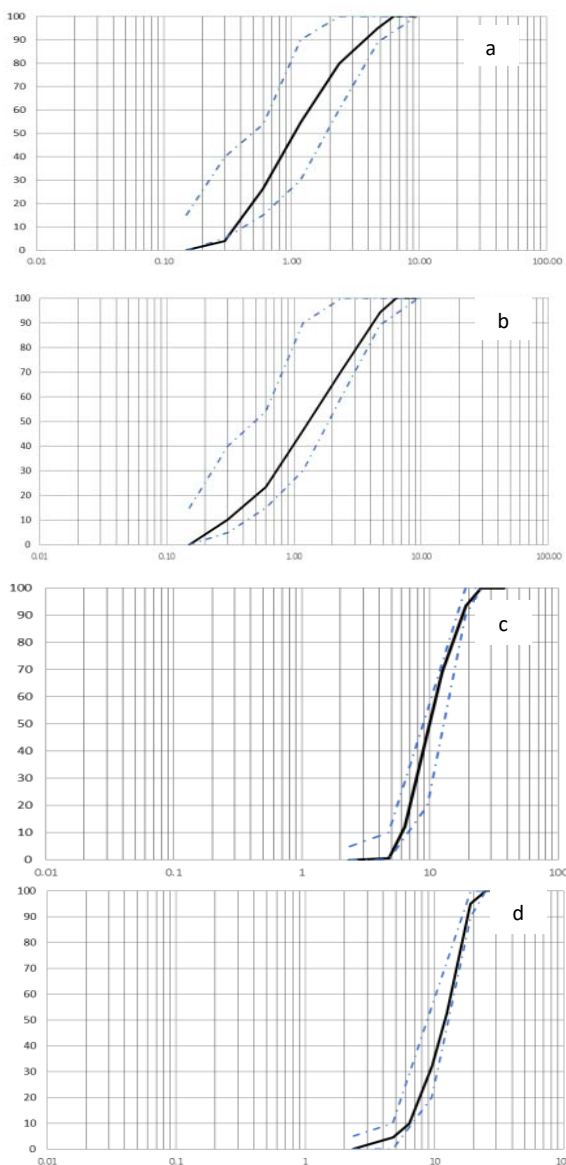


Fig. 2. Grading curve a) Fine Natural aggregate b) Fine Recycled aggregate c) Coarse Natural aggregate d) Coarse Recycled aggregate

است که ماسه‌های بازیافتی و طبیعی مصرفی، بافت درشت دانه دارند. همان‌گونه که در آزمایش دانه بندی مشخص است میزان درشت دانه بازیافتی بر ریز دانه بازیافتی غلبه دارد. به علت وجود ملات چسبیده در سنگدانه‌های بازیافتی درصد جذب آب آن از سنگدانه‌های طبیعی بیشتر است. جذب آب سنگدانه بازیافتی ۲.۵ برابر سنگدانه‌های طبیعی اندازه‌گیری شده است که نشان دهنده تخلخل بالای سنگدانه بازیافتی است. شکل (۲) نمودار دانه‌بندی سنگدانه‌های بازیافتی و طبیعی است، دو خط آبی رنگ، محدوده استاندارد دانه‌بندی می‌باشد.

۲-۲- طرح اختلاط

طرح اختلاط به صورت وزنی در ۶ طرح مورد استفاده قرار گرفته است. که در جدول (۲) جزئیات آن مشخص است. طرح اختلاط در سه گروه بتن بازیافتی، بتن نیمه بازیافتی و بتن معمولی و با درصد‌های مختلف آب به سیمان (۴۵ و ۵۵ درصد وزنی سیمان) برای هرگروه معین شد. سنگدانه مصرفی در این سه طرح اختلاط به صورت با دانه‌بندی کاملاً طبیعی (NC)، دانه‌بندی کاملاً بازیافتی (RC) و دانه‌بندی مختلط طبیعی و بازیافتی بطور مساوی (RN) در نظر گرفته شده است. دانه‌بندی درشت دانه مختلط شامل ۵۰ درصد درشت دانه بازیافتی و ۵۰ درصد طبیعی، به همین ترتیب ریزدانه مختلط شامل، ۵۰ درصد ریزدانه بازیافتی و ۵۰ درصد ریزدانه طبیعی است. از آن جایی که سنگ دانه‌ها در حالتی غیر اشباع و در حالت خشک قرار داشتند، مقداری از آب مصرفی صرف اشباع کردن سنگدانه‌ها شده است که از میزان آب آزاد کاسته می‌شود. در ادامه نتایج مربوط به دانه‌بندی و طرح اختلاط نشان داده خواهد شد. از طرفی، با توجه به بافت درشت دانه سنگدانه‌های بازیافتی و همچنین سطح شکسته و زاویه دار درشت دانه‌های بازیافتی، در نتیجه ایجاد فضای خالی بین درشت‌دانه‌ها، نیاز به ریزدانه‌های بازیافتی برای پر کردن فضاهای خالی افزایش می‌یابد. به همین علت در طرح‌های اختلاط این پژوهش، و پس از بررسی طرح‌های مختلف، حجم سنگدانه‌ها به میزان ۶۵ درصد ریزدانه

جدول ۲. نسبت های اختلاط

Air entrainment Admixture (gr)	Cement (kg)	Water (kg)	(0-4 mm) Sand (kg)		(4-19 mm) Gravel (kg)		Sample Name - water/cement ratio
			Natural	Recycled	Natural	Recycled	
175	350	157.5	-	1230.12	-	662.37	RC-45
175	350	157.5	1230.12	-	662.37	-	NC-45
175	350	157.5	615.1	615.1	331.2	331.2	RN-45
175	350	192.5	-	1207.37	-	650.12	RC-55
175	350	192.5	1207.37	-	650.12	-	NC-55
175	350	192.5	603.7	603.7	325.06	325.06	RN-55

Table. 2. Mix proportions

جدول ۳. مشخصات سیمان

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Chemical compounds	Cement
21.9	4.86	3.3	63.32	1.15	2.1	0.56	0.36	Weight percentage	

Table. 3. Specifications of cement and Air-entrained admixture

جدول ۴. مشخصات افزودنی حباب ساز

Chloride (ppm)	Density in 20°C	physical state	Ionic nature	PH	color	Air-entrained admixture
500	0.98-1.02 (kg/lit)	Liquid	Anionic	7.5-9.5	Colorless	

Table. 4. Specifications of Air-entrained admixture

می یابد. نتایج نشان می دهد با افزایش نسبت جایگزینی سنگدانه های بازیافتی افت وزن آزمونه ها نیز بیشتر می شود. آزمونه ها تا چرخه ۳۰۰ به میزان افت مجاز نرسیده اند و آزمایش برای تمام طرح ها تا چرخه ۳۰۰ ادامه پیدا کرده است. لازم به ذکر است، که میزان افت طرح ها نسبت به یکدیگر متفاوت بوده است. با گذشت چرخه ها و انجام آزمایش سرعت عبور امواج اولتراسونیک، سرعت عبور امواج اندازه گیری شده از بتن ها بیشتر می شود. همان گونه که مشخص است، سرعت عبور امواج با افزایش نسبت آب به سیمان کمتر می شود، و برخلاف آن با افزایش درصد سنگدانه های بازیافتی سرعت امواج کاهش می یابد. طبق استاندارد ASTM C666 اگر مدول دینامیکی نسبی بعد از چرخه ذوب و انجماد بیشتر باشد بتن با دوام تر است.

جدول ۵. وزن و درصد افت مدول دینامیکی نسبی بعد از ۳۰۰ چرخه

Relative Dynamic Modulus Of Elasticity(%)	Weight (kg)			Sample Name
	Loss (%)	300 cycles	0 cycle	
93.75	1.3	4.840	4.905	NC-45
95.3	1.8	4.541	4.625	RN-45
95.36	1.98	4.792	4.889	RC-45
92.66	2	4.253	4.34	NC-55
93.93	2.12	4.479	4.576	RN-55
94.36	2.75	4.186	4.305	RC-55

Table. 5. Loss of Weight and Relative Dynamic Modulus of Elasticity

۳ - نتایج

۳-۱ تغییر شکل و افت مدول دینامیکی نسبی

طبق استاندارد ASTM C666 روی آزمونه ها باید در هر دوره ۴۰ چرخه ای آزمایش عبور امواج اولتراسونیک انجام گیرد. به این صورت که امواج اولتراسونیک در ابتدا چرخه و پایان هر دوره از آزمونه ها گذرانده می شود و طبق استاندارد مذکور اگر میزان افت مدول دینامیکی نسبی به مقدار ۶۰ درصد اولیه برسد، آزمایش به پایان می رسد در غیر این صورت چرخه ها تا پایان ۳۰۰ سیکل ادامه پیدا می کند. در این آزمایش آزمونه ها در هر دوره تحت آزمایش عبور امواج اولتراسونیک قرار گرفتند و آزمایش تا سیکل ۳۰۰ ادامه یافت. در ادامه نتایج بدست آمده گزارش داده می شود. جدول (۳) نتایج توزین آزمونه ها قبل و بعد از چرخه ذوب و انجماد را نشان می دهد. همان گونه که مشخص است با گذشت چرخه ها آزمونه ها با کاهش وزن همراه هستند. چرخه های ذوب و انجماد در مجاورت آب، باعث نفوذ آب به عمق بتن، از طریق خلل و فرج های موجود در سطح آن می شود. این آب نفوذ یافته بر اثر چرخه ذوب و انجماد باعث انبساط و انقباض آب در نتیجه فشار به بتن و سنگدانه های آن می شود. این فشار هیدرولیکی ابتدا باعث ایجاد خرابی در سطح بتن می شود و در صورت نفوذ آب به عمق آن باعث تخریب بتن می شود. افزایش نسبت آب به سیمان، افت وزن ناشی از چرخه ذوب و انجماد افزایش

شکل ۵. تخریب نواحی گوشه‌دار نمونه‌ها



Fig. 5. Damage of corner areas of specimens after 300 freeze-thaw cycles

شکل (۵)، تخریب نواحی گوشه‌دار را نشان می‌دهد. نمونه‌های استوانه‌ای به علت دایروی بودن محیط آن، از سطح سالم‌تری نسبت به نمونه‌های مکعبی برخوردار بوده‌اند. نمونه‌های مکعبی در گوشه‌ها خرابی بیشتری داشته‌اند، به این دلیل که در کناره‌های نمونه‌ها به علت عدم همجواری سنگدانه‌ها (از سه طرف با فضای آزاد احاطه شده بودند و مانعی برای حرکت آزادانه نداشته‌اند)، فضای بیشتری برای انبساط داشته‌اند. شکل (۶)، میانگین درصد افت وزن نمونه‌ها را در هر دوره ۴۰ چرخه‌ها را نشان می‌دهد. با گذشت چرخه‌ها، افت وزن در هر دوره، از دوره قبل بیشتر می‌شود که نشان از تضعیف و نفوذ تخریب به عمق بتن‌ها می‌باشد. با وجود اینکه در دوره آخر، تعداد چرخه‌ها نسبت به بقیه دوره‌ها نصف می‌شود، ولی میزان افت وزن نمونه‌ها بیشتر از همه دوره‌ها می‌باشد.

شکل ۶. درصد افت وزن نمونه‌ها در هر ۴۰ چرخه

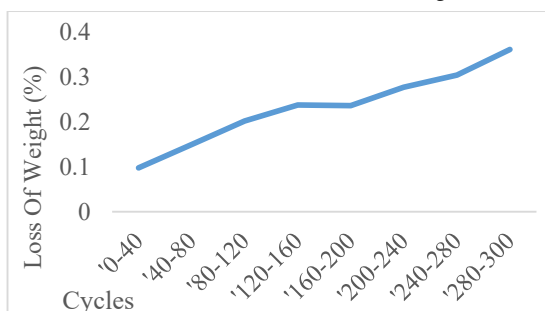


Fig. 6. Loss of specimen's weights after freeze-thaw cycles

همان‌طور که در جدول (۵) مشخص است، مدول دینامیکی نسبی تمامی طرح‌ها حدود ۵ درصد افت داشته‌اند. مدول دینامیکی نسبی بتن‌های با نسبت آب به سیمان بیشتر، افت بیشتری داشته است، که این نشان دهنده تأثیر منفی افزایش نسبت آب به سیمان بر دوام بتن‌ها است، البته در این آزمایش اختلاف آن بسیار کم اندازه‌گیری شده است. شکل (۳) تغییر شکل بتن‌ها بر اثر چرخه ذوب و انجماد را نشان می‌دهد. جداسدن درشت دانه و ریزدانه در پایان ۳۰۰ چرخه نشان دهنده آسیب‌پذیری طرح‌ها در برابر چرخه ذوب و انجماد بوده است. با توجه به شکل (۴)، نمونه بتن بازیافتی دارای نقاط پوسته شده بیشتری روی سطح بوده است. در نتیجه وزن بیشتری را از دست داده است. و بتن معمولی در مقایسه با بتن بازیافتی تخریب کمتری داشته است.

شکل ۳. جداسدن سنگدانه‌ها بعد از ۳۰۰ چرخه



Fig. 3. Detachment of aggregate after 300 cycles

شکل ۴. مقایسه تأثیر چرخه‌های ذوب و انجماد بر طرح‌ها



Fig. 4. Damage of specimens after 300 freeze-thaw cycles

۳-۲- مقاومت‌ها و مدول الاستیسیته

جدول ۶. مقاومت و مدول الاستیسیته طرح‌ها

Age	Sample Name	Strength (MPa)			Modulus Of Elasticity (GPa)
		Compressive	Flexural	Tensile	
28 Days	NC-45	34.8	8.75	3.84	23.62
	RN-45	32.1	8.15	3.32	20.62
	RC-45	20	7.17	3.29	19.02
Testate Specimen (120 Days)	NC-45	35.8	10.4	4.03	24.06
	RN-45	35.6	10.7	3.6	19.96
	RC-45	26.1	7.75	3.3	19.57
After Freeze-Thaw Cycles	NC-45	30.2	8.54	3.1	18.67
	RN-45	28.9	7.25	3.14	17.16
	RC-45	15.3	6.32	2.97	14.1
28 Days	NC-55	23.9	7.24	3.2	20.51
	RN-55	22.9	6.63	3.1	17.68
	RC-55	12.6	5.96	3.24	15.89
After Freeze and Thaw Cycles	NC-55	20.3	6.39	3.1	15.37
	RN-55	16.8	5.83	2.82	14.4
	RC-55	7.76	5.1	3.1	10.76

Table. 6. Strengths and modulus of elasticity

مقاومت فشاری، خمشی، کششی و مدول الاستیسیته آزمون‌ها پس از ساخت و عمل‌آوری در سنین ۲۸ روزه و ۱۲۰ روزه (همزمان با پایان ۳۰۰ چرخه دستگاه ذوب و انجماد) و بعد از اعمال چرخه ذوب و انجماد مطابق استاندارد ASTM C666، اندازه‌گیری شده‌اند. مقاومت فشاری مطابق با استاندارد ASTM C39، مقاومت خمشی براساس استاندارد ASTM C78-94، آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم بر اساس استاندارد ASTM C496 و مدول الاستیسیته توسط استاندارد ASTM C469 تعیین شده است. نتایج مربوط به مقاومت‌ها در جدول (۶) نشان داده شده است. در ادامه با ارائه نمودارها تاثیر افزایش نسبت آب به سیمان، افزایش درصد سنگدانه بازیافتی و اعمال چرخه ذوب و انجماد بر بتن های مختلف را مورد بررسی قرار خواهیم داد.

شکل ۷. افت مدول دینامیکی نسبی بر اثر اعمال چرخه ها

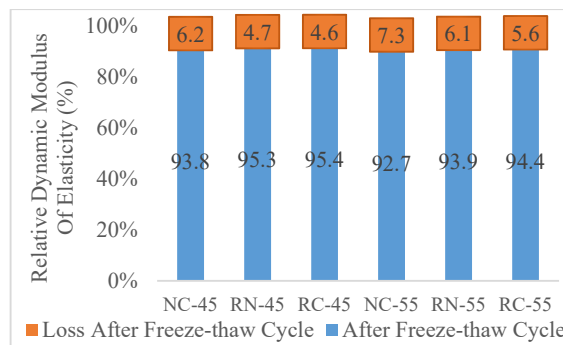


Fig. 7. Loss of Relative dynamic modulus of elasticity after 300 freeze-thaw cycles

شکل (۷) میزان افت مدول دینامیکی نسبی طرح‌ها نشان داده شده است. بیشترین میزان افت مدول دینامیکی نسبی مربوط به طرح NC-55 با ۳/۷ درصد بوده است. با دوام ترین آزمون به افت ۶۳/۴ درصد مربوط به طرح RC-45 بوده است. با توجه به شکل (۸)، با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه بازیافتی افت مدول دینامیکی نسبی کمتر می‌شود که نشان از دوام مناسب بتن بازیافتی در مقایسه با بتن طبیعی است.

شکل ۸. تاثیر درصد جایگزینی سنگدانه بازیافتی بر مدول دینامیکی نسبی

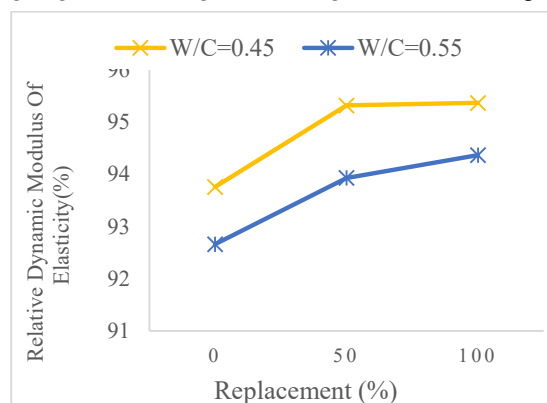


Fig. 8. Loss of Relative dynamic modulus of elasticity after 300 freeze-thaw cycles for different replacement

شکل ۹. تاثیر افزایش نسبت آب به سیمان (a) مقاومت فشاری، (b) مقاومت کششی، (c) مقاومت خمشی، (d) مدول الاستیسیته

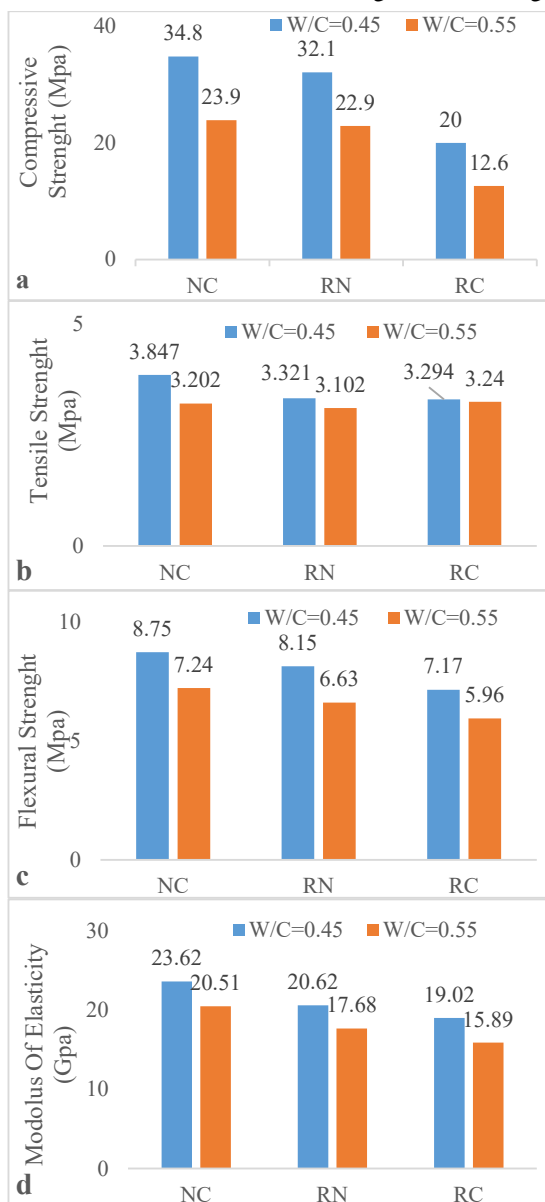


Fig. 9. Effect of W/C ratio on a)Compressive b)Tensile c)Flexural strength and d)Modulus of Elasticity

با توجه به نمودار شکل (۹)، با افزایش نسبت آب به سیمان، مقاومت فشاری ۲۸ روزه در RC، RN و NC به ترتیب، ۳۷، ۲۸ و ۳۲ درصد کاهش یافته است. به همین ترتیب، مقاومت کششی ۲۸ روزه در RC، RN و NC به ترتیب، ۷، ۲ و ۱۷ درصد افت داشته است. با توجه به شکل ۹، با افزایش نسبت آب به سیمان از ۰.۴۵ به ۰.۵۵، در RC، RN و NC به ترتیب، ۱۷، ۱۹ و ۱۷ درصد افت مقاومت خمشی بوجود آمده است. با افزایش نسبت آب به سیمان، میزان مدول الاستیسیته طرح‌ها کاهش یافته است که NC، RN و RC به ترتیب، ۱۳، ۱۴ و ۱۶ درصد بوده است. با توجه به شکل (۱۰) مقاومت فشاری آزمون‌ها بعد از تحمل ۳۰۰ چرخه در مقایسه با آزمون شاهد در طرح‌های RC-45، RN-45 و NC-45 به ترتیب، ۴۱، ۱۹ و ۱۵ درصد کاهش یافته است، که کمترین افت مقاومت فشاری مربوط به بتن طبیعی بوده است. با توجه به شکل (۱۰)، افت مقاومت کششی آزمون‌های درون دستگاه ذوب و انجماد نسبت به آزمون شاهد RC، RN و NC به ترتیب، ۱۰، ۱۳ و ۲۳ درصد بوده است. بیشترین افت مربوط به بتن طبیعی بوده است. بتن‌های حاوی سنگدانه بازیافتی عملکرد مناسبی در برابر اعمال نیروی کششی از خود به نمایش گذاشته‌اند و رفتار مشابه با بتن طبیعی نشان داده‌اند. به علاوه، بر اثر چرخه ذوب و انجماد عملکرد بهتری نسبت به بتن طبیعی داشته‌اند.

مقاومت خمشی آزمون‌ها بعد از قرارگیری در دستگاه ذوب و انجماد کاهش پیدا کرده است که این کاهش برای طرح‌های RC-45، RN-45 و NC-45 به ترتیب، ۱۸، ۲۸ و ۱۸ درصد بوده است. با توجه به شکل (۱۰)، چرخه ذوب و انجماد باعث افت مدول الاستیسیته در طرح‌های با نسبت آب به سیمان ۰.۴۵ شده است، افت برای طرح‌های NC-45، RN-45 و RC-45 به ترتیب، ۲۲، ۱۴ و ۲۸ بوده است.

شکل ۱۰. تاثیر چرخه‌های ذوب و انجماد بر (a) مقاومت فشاری، (b) مقاومت کششی، (c) مقاومت خمشی، (d) مدول الاستیسی

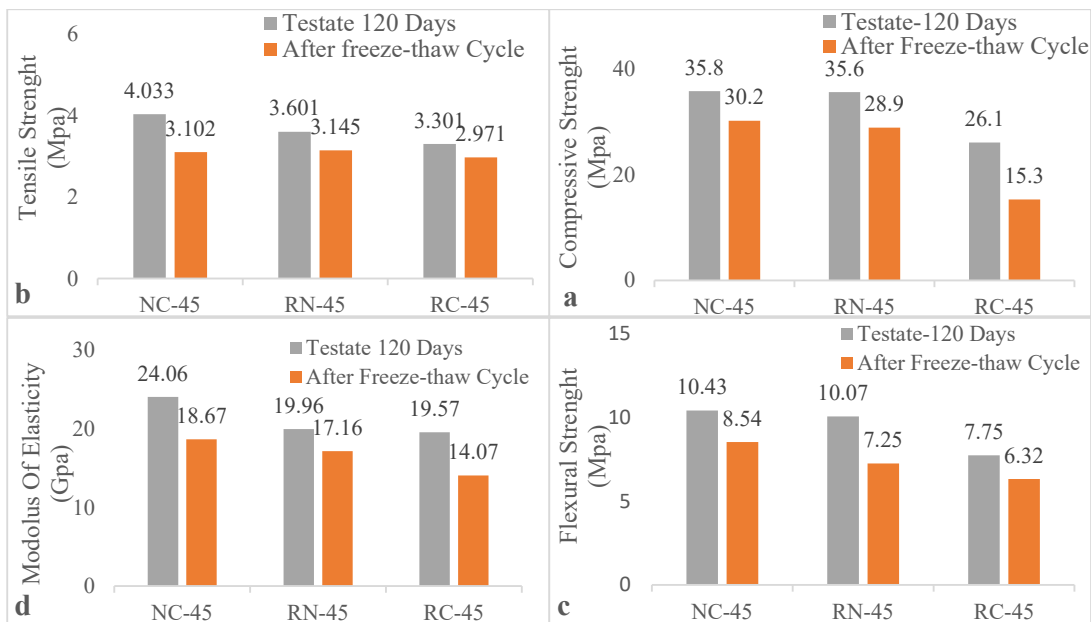


Fig. 10. Effect of 300 freeze-thaw cycles on a)Compressive b)Tensile c)Flexural strength and d)Modulus of Elasticity

شکل ۱۱. تاثیر افزایش سنگدانه بازیافتی بر، (a) مقاومت فشاری، (b) مقاومت کششی، (c) مقاومت خمشی، (d) مدول الاستیسی

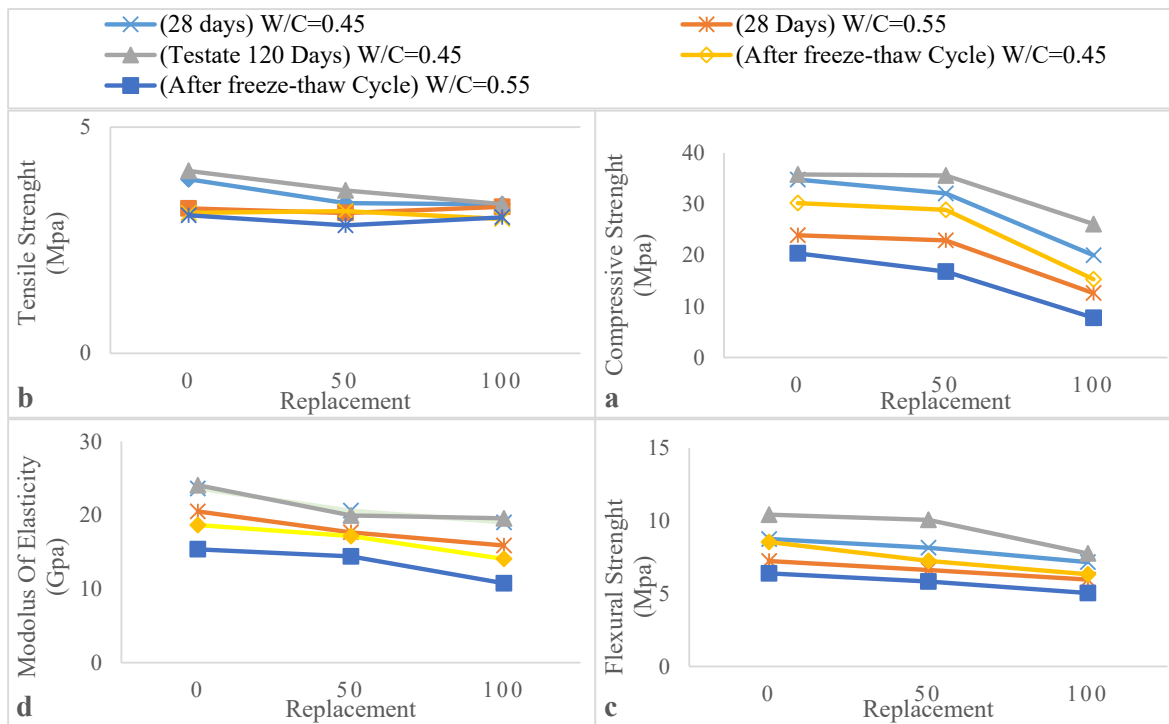


Fig. 11. Effect of RA substitution a)Compressive b)Tensile c)Flexural strength and d)Modulus of Elasticity

گرفته‌است. شکل (۱۲)، تاثیر افزایش نسبت جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی را بر نمودار تنش-کرنش نشان می‌دهد. در این شکل نمودار تنش-کرنش طرح‌های مختلف در سن ۲۸ روزه و با درصد آب به سیمان ۴۵ و ۵۵ مورد مقایسه قرار گرفته است. همان‌گونه که از شکل (۱۲)، مشخص است، بتن کاملاً بازیافتی با هر دو نسبت آب به سیمان ۴۵ و ۵۵ درصد با کاهش شدید کرنش مواجه بوده است، به طوری که به کرنش 0.002 نزدیک هم نشده است و مقاومت فشاری کمتری از خود به نمایش گذاشته است. برخلاف آن، بتن با درصد جایگزینی ۵۰ درصد سنگدانه بازیافتی، عملکرد تقریباً مشابهی نسبت به بتن طبیعی داشته است و به میزان کرنش استاندارد بتن رسیده‌است و نشان از رفتار مناسب و مطلوب این بتن دارد.

شکل ۱۲. تاثیر چرخه ذوب و انجماد بر نمودار تنش-کرنش با نسبت آب به سیمان الف) ۵۵ درصد، ب) ۴۵ درصد

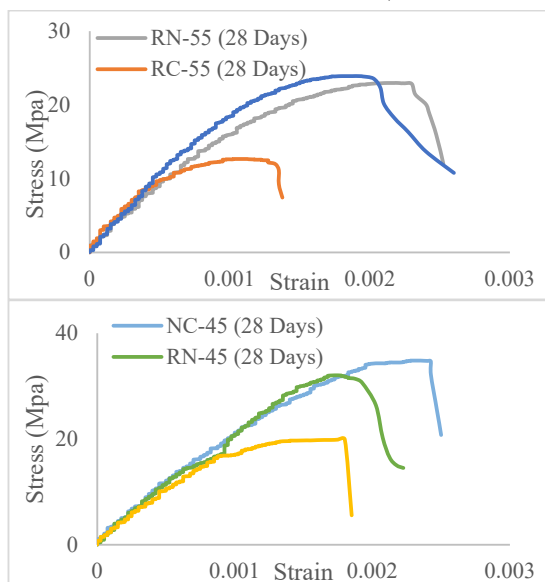


Fig. 12. Effect of W/C ratio on stress-strain curve a) 55% b) 45%

شکل (۱۳) تاثیر چرخه‌های ذوب و انجماد را بر نمودار تنش کرنش طرح‌ها نشان می‌دهد. با اعمال چرخه ذوب و انجماد مقاومت بتن در هر سه نوع بتن RC، RN و NC با نسبت آب به سیمان ۰.۴۵ کاهش می‌یابد. همان‌گونه که مشخص است طرح‌های NC و RN بعد از اعمال چرخه ذوب و انجماد هم به میزان کرنش بتن غیر مسلح (0.002) رسیده‌اند و نشان از رفتار

جدول ۷. درصد افت مقاومت و مدول الاستیسیته طرح‌ها

Variation	Sample Name	Strength			Modulus Of Elasticity
		Tensile	Flexural	Compressive	
Age (120 days vs 28 days)	NC-45	3	19	5	2
	RN-45	11	23	8	0
	RC-45	31	8	1	3
After 300 freeze-thaw cycles vs 120 days	NC-45	-15	-18	-23	-22
	RN-45	-19	-28	-13	-14
	RC-45	-41	-18	-10	-28
W/C ratio (55% vs 45%) at 28 days	NC	-32	-17	-17	-13
	RN	-28	-19	-7	-14
	RC	-37	-17	-2	-16
RA vs NC (50% Replacement)	RN-45	-4	-8	-8	-13
	RN-55	-10	-8	-5	-10
RA vs NC (100% Replacement)	RC-45	-40	-23	-12	-15
	RC-55	-54	-19	-2	-27

Table. 7. Strengths and modulus of elasticity Loss (%)

شکل (۱۱)، تاثیر افزایش سنگدانه بازیافتی را در طرح‌ها نشان می‌دهد که با افزایش آن مقاومت و مدول الاستیسیته کاهش می‌یابد. که میزان افت مقاومت فشاری با توجه به شیب نمودار شکل (۱۱) بیشتر بوده است. لازم به ذکر است، میزان افت کششی آزمون‌های حاوی سنگدانه بازیافتی کم بوده است که نشان دهنده عملکرد مناسب بتن‌های حاوی سنگدانه بازیافتی در برابر نیروی کششی می‌باشد. جدول (۷)، میزان افت مقاومت آزمون‌ها را بر اثر اعمال تغییرات شامل افزایش سن، چرخه ذوب و انجماد، افزایش نسبت آب به سیمان و افزایش نسبت جایگزینی سنگدانه بازیافتی نشان می‌دهد.

۳-۳- نمودار تنش-کرنش

تغییر طول طرح‌ها با استفاده از سنسورهای جابه‌جایی نصب شده روی آزمون‌ها هنگام انجام آزمایش فشاری اندازه‌گیری شد و نیروی متناظر با جابه‌جایی‌ها ثبت شد. با استفاده از این داده‌ها کرنش و تنش آزمون‌ها اندازه‌گیری شد. نمودارهای تنش-کرنش آزمون‌ها با استفاده از داده‌های رایانه‌ای ترسیم شد. در ادامه نمودارهای تنش و کرنش طرح‌ها ارائه و مورد بررسی قرار

آب می‌شود. درصد جذب آب برای سنگدانه‌های بازیافتی مورد استفاده در این آزمایش به طور متوسط $43/2$ برابر بیشتر از سنگدانه طبیعی اندازه گیری شده‌است.

۲- افت مدول دینامیکی نسبی بر اساس استاندارد ASTM C666 نشان دهنده دوام مطلوب بتن‌های بازیافتی در برابر چرخه ذوب و انجماد است. از طرفی با توجه به نتایج بدست آمده، بتن‌های حاوی سنگدانه‌های بازیافتی اگرچه دارای افت مقاومت بیشتری بوده‌اند ولی در برابر پدیده ذوب و انجماد دوام بالاتری از خود به نمایش گذاشته‌اند. می‌توان از بتن بازیافتی در شرایطی که فاکتور دوام مهمتر از فاکتور مقاومت مکانیکی باشد، استفاده کرد.

۳- بعد از اعمال ۳۰۰ چرخه ذوب و انجماد سطح بتن‌های بازیافتی دارای خرابی و پوسته شدگی بیشتری بوده و با افت وزن بیشتری همراه بوده است. نواحی گوشه‌دار نمونه‌ها بعد از اعمال ۳۰۰ چرخه بیشترین تخریب را داشته‌اند، که این امر با توجه به عدم پیوستگی و همجواری سنگدانه‌ها در گوشه، در نتیجه آزاد بودن سنگدانه‌ها قابل توجیه است.

۴- با افزایش درصد آب به سیمان از ۴۵ به ۵۵ مقاومت‌های اندازه‌گیری شده و مدول الاستیسیته بتن‌های بازیافتی، طبیعی و نیمه بازیافتی کاهش می‌یابد. این افت در بتن بازیافتی بیشتر بوده است.

۵- بتن‌های حاوی سنگدانه‌های بازیافتی به میزان ۱۰۰ درصد رفتار ضعیف و شکننده در برابر فشار از خود به نمایش گذاشته است. بتن کاملاً بازیافتی به کرنش استاندارد بتن نزدیک نشده است. از طرفی این نمایش ضعیف بعد از اعمال چرخه ذوب و انجماد به شدت تشدید شده است. در مقابل، بتن‌های حاوی سنگدانه بازیافتی به میزان ۵۰ درصد رفتار مناسب و قابل قبولی در برابر نیروی فشاری از خود به نمایش گذاشته‌اند، که شامل کاهش ۱۰ درصدی در مقاومت فشاری و مدول دینامیکی نسبی همراه بوده‌است و مانند بتن کاملاً طبیعی توانستند تحت بار فشاری، کرنش $0.002/0$ را تجربه کنند. این مسئله حتی بعد از اعمال چرخه ذوب و انجماد هم برای بتن معمولی و نیمه بازیافتی

مناسب این نوع بتن‌ها در برابر چرخه‌های ذوب و انجماد دارد. بتن کاملاً بازیافتی به کرنش 0.002 رسیده است، اما بعد از اعمال چرخه ذوب و انجماد به کرنش 0.002 نرسیده است. این امر نشان دهنده رفتار ضعیف بتن بازیافتی در برابر چرخه ذوب و انجماد است که باعث شکننده شدن و افت مقاومت فشاری آن می‌شود.

شکل ۱۳. تاثیر چرخه ذوب و انجماد بر نمودار تنش-کرنش، (a) بتن معمولی، (b) بتن نیمه بازیافتی، (c) بتن بازیافتی

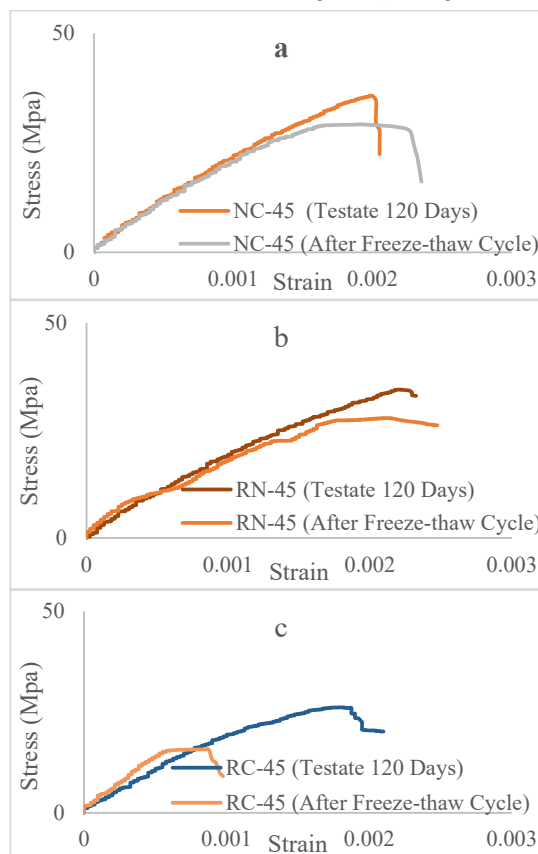


Fig. 13. Effect of 300 freeze-thaw cycles on stress-strain curve a) NC b) RN c) RC

۴- نتیجه گیری

با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها نتایج زیر حاصل شده‌است.

۱- سنگدانه‌های بازیافتی نسبت به سنگدانه‌های طبیعی دارای جذب آب بیشتر است و این به دلیل تخلخل بیشتر و ملات چسبیده به سنگدانه‌های بازیافتی است که باعث افزایش جذب

- of Recycled Concrete Aggregate, London, UK, 1998, pp. 239 – 253
- [8] Y. Hosokawa, N. Maeda, T. Hayasaka, Influence of the time of removing mortar from recycled coarse aggregate on the properties of concrete products using recycled coarse aggregate from waste concrete, Proceedings of CSCE/JSCE International Conference on Engineering Materials, Ottawa, Canada, 1997, pp. 775 – 788
- [9] Y. Kasai, M. Hisaka, K. Yanagi, Durability of concrete using recycled coarse aggregate, Proceedings of the Second International Symposium (RILEM) on Demolition and Reuse of Concrete and Masonary, Tokyo, Japan vol. 2, (1988) 623 – 632
- [10] Gokce, A. et al. (2004) 'Freezing and thawing resistance of air-entrained concrete incorporating recycled coarse aggregate: The role of air content in demolished concrete', 34, pp. 799–806. doi: 10.1016/j.cemconres.2003.09.014.
- [11] C. Shi, Y. Li, J. Zhang, W. Li, L. Chong, and Z. Xie, "Performance enhancement of recycled concrete aggregate - A review," *J. Clean. Prod.*, 2015.
- [12] A. K. Padmini, K. Ramamurthy, and M. S. Mathews, "Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 2, pp. 829–836, 2009.
- [13] Topc, B. and Selim sengel (2004) 'Properties of concretes produced with waste concrete aggregate', 34, pp. 1307–1312. doi: 10.1016/j.cemconres.2003.12.019.
- [14] C. S. Poon, Z. H. Shui, L. Lam, H. Fok, and S. C. Kou, "Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete," vol. 34, pp. 31–36, 2004.
- [15] S. W. Tabsh and A. S. Abdelfatah, "Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 2, pp. 1163–1167, 2009.
- [16] Hansen, T. C. (1985) 'Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments', pp. 201–246.
- [17] Pedro, D., Brito, J. De and Evangelista, L. (2017) 'Structural concrete with simultaneous incorporation of fine and coarse recycled concrete aggregates: Mechanical, durability and long-term properties', Construction and
- اتفاق افتاده است. بنابراین استفاده از بتن بازیافتی تا سطح جایگزینی ۵۰ درصد سنگدانه بازیافتی توصیه می‌شود.
- ۶- بر اساس نتایج به دست آمده برای ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگدانه بازیافتی و بتن بازیافتی می‌توان نتیجه گرفت، که وجود لایه‌هایی از ملات قدیمی در اطراف سنگدانه بازیافتی باعث می‌شود تا ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی این سنگدانه در مقایسه با مصالح طبیعی کاهش یابد.
- ۷- کاهش مقاومت کششی بتن‌های بازیافتی برخلاف مقاومت فشاری در مقایسه با بتن معمولی در برابر تغییرات اعمال شده مناسب بوده است. با توجه به تغییر نسبت ریزدانه به درشت دانه در طرح اختلاط به میزان ۶۵ ریزدانه به ۳۵ درصد درشت دانه، این اتفاق قابل توجیه است. از طرفی می‌توان بیان داشت که مقاومت کششی بتن بازیافتی توسط ترکیبی از دو حالت متفاوت کنترل می‌شود؛ نخست، مقاومت خمیر سیمان جدید و چسبندگی بین سنگدانه بازیافتی و خمیر سیمان جدید و دیگری مقاومت ملات قدیمی و یا مقاومت بین ملات قدیمی و سنگدانه.

۵- مراجع

- [1] Freedonia (2012) World Construction Aggregates. Industry Study No. 2838. The Freedonia Group, Cleveland, Ohio, USA.
- [2] 'EPA. United States Environmental Protection Agency: Advanced sustainable materials management: 2014 tables and figures' (2016).
- [3] Eurostat, Waste statistics: Statistics explained. Available from: , http://ec.europa.eu/eurostat/statistics_explained . (accessed 21.09.17.). (2017).
- [4] EN-12620. Aggregates for concrete. Comité Européen de Normalisation (CEN), Brussels, Belgium; 2002. 56 p.
- [5] Limbachiya, M. C., Leelawat, T. and R. K. Dhir (2000) 'Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete', 33(November), pp. 574–580.
- [6] Zaharieva, R. (2004) 'Frost resistance of recycled aggregate concrete', 34, pp. 1927–1932. doi: 10.1016/j.cemconres.2004.02.025.
- [7] R. Dillmann, Concrete with recycled concrete aggregate, Proceedings of the International Symposium on Sustainable Construction: Use

- [19] Xiao, J.-Z. and Lan, Y. (2006) 'Investigation on the tensile behavior of recycled aggregate concrete', *Jianzhu Cailiao Xuebao* (Journal of Building Materials), 154–158.
- [20] ASTM C666 (2015) 'Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing'. doi: 10.1520/C0666.
- Building Materials, 154, pp. 294–309. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.215.
- [18] Šeps, K., Fládr, J. and Broukalová, I. (2016) 'Resistance of recycled aggregate concrete to freeze-thaw and deicing salts', *Procedia Engineering*. Elsevier B.V., 151, pp. 329–336. doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.367.

Investigation and comparison of the effect of freeze and thaw cycles on the strength and durability of recycled and conventional concrete

K. Hajian asrami ^{*1}, GH. Abdollahzadeh ², K. Hashemi Heydari ³

1- PhD Student, Faculty of Civil Engineering of Semnan University, semnan, Iran.

2- Professor., Faculty of Civil Engineering of Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

3- Associate Prof., Faculty of Civil Engineering of Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

Abstract

Recycling of concrete has been the focus of researchers owing to the large volume of concrete waste and the limited resources of valuable materials. Recycled Aggregate Concrete (RAC) contains aggregates of various types of concrete and building materials that have been destroyed due to their shelf life or as a result of war and natural disasters. In order to use different types of Recycled Aggregates (RA), it is necessary to conduct more detailed and sensitive research on the behavior of Recycled Aggregate Concrete (RAC) in order to reach the highest possible level of quality and cost in the construction process. On the other hand, recycled aggregates (RA) are made of concrete with different properties and its aggregates have been subjected to different form of loading, hence it is important to carefully examine their behavior and properties. On the other hand, the new approach of researchers to the durability of concrete structures that have emerged in recent years, such as durability of concrete, has been considered. Therefore, in this study, the strength and the durability of Recycled Aggregate Concrete (RAC) after freeze and thaw cycles were compared with natural concrete while different water/cement ratios are used. Concrete waste with a compressive strength of 25 to 30 MPa was used. Concrete scrap in crushers and crushers became suitable grains for concrete application and were used without change in aggregation.

In this study, Recycled Aggregates (RA) were extracted from demolished waste concrete specimens and used to produce three mixtures named RC, RN and NC while 100, 50 and 0 percent of Recycled Aggregates (RA) were replaced respectively. Water to cement ratio were kept as 45 and 55 percent of cement. A total number of 57 samples for flexural, compressive, tensile strength and ultrasonic tests were made. 24 samples were placed in the refrigerator and freeze and thaw cycles were applied on. 18 and 15 specimens were prepared for testing at 28 and 120 days of age, respectively. According to ASTM C666, the relative dynamic modulus of the specimens was tested using ultrasonic test after each 40 cycle's period. After the test was finished, compressive strength, single point bending, indirect tensile tests and elastic modulus were determined for each specimens. Finally, the behavior of recycled and natural concrete was compared. The purpose of this study was to evaluate the behavior of recycled concrete against the melting and freezing cycles.

The results showed that the freeze and thaw cycles reduced the resistance of both Recycled Aggregate Concrete (RAC) and NAC. Recycled aggregates have 2.5 times more water absorption than Natural aggregates. RAC has lost 41%, 18%, 10% and 28% of its compressive, flexural, tensile strength and modulus of elasticity, after the freeze and thaw cycle, respectively. The 100% replacement of RA reduced even more the mechanical behavior of samples. The relative dynamic modulus at the end of the cycles for RAC was 2% higher than that of NAC, indicating its better durability properties against freeze and thaw cycles. Concrete with 50% replacement of recycled aggregate has almost the same durability and strength as NAC, hence is recommended to be use in similar condition. Concrete with 50% replacement recycled aggregate has the same durability and strength as natural concrete.

Keywords: Recycled Aggregate Concrete, Freeze and Thaw Cycle, Water to Cement ratio, Recycled Aggregate, Durability.