بررسی خصوصیات مکانیکی بتن غلتکی روسازی حاوی سنگدانه‌های بتن بازیافتی

حسن طاهرخانی (مسئول مکاتبات)، دانشیار، گروه عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

حیدر سازگار، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد زنجان، زنجان، ایران

E-mail: taherkhani@znu.ac.ir

دریافت: ۱۳۹٦/۰۷/۱۹ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۳/۰۹

چکیده

در این تحقیق برخی از خصوصیات مکانیکی بتن غلتکی حاوی سنگدانه های به دست آمده از بتن ضایعاتی مورد مطالعه قرار گرفته است. ترکیبات مختلفی از بتن غلتکی که در آنها بخش ریزدانه، درشت دانه یا تمام سنگدانه های ریز و درشت طبیعی بتن غلتکی با سنگدانه های به دست آمده از بتن ضایعاتی جایگزین گردید T ساخته شده و مقاومت فشاری و خمشی، مدول الاستیسیته و قابلیت جذب انرژی آنها ارزیابی شده است. مقاومت فشاری و خمشی ترکیبات در عمرهای مختلف ۷، ۲۸ و ۹۱ روز و مدول الاستیسیته و جذب انرژی در عمر ۲۸ روز اندازه گیری شده است. نتایج نشان می دهد که بتن غلتکی حاوی مصالح بازیافتی دارای مقاومت فشاری کمتری نسبت به بتن حاوی سنگدانه های طبیعی بوده ولی این تفاوت قابل توجه نیست. مخلوطی حاوی بخش درشت دانه بازیافتی و ریز دانه طبیعی بیشترین مقاومت فشاری را در بین مخلوطهای حاوی مصالح بازیافتی دارد. همچنین، مخلوطهای حاوی مصالح بازیافتی دارای مقاومت خمشی بیشتری از مخلوط کنترل با مصالح طبیعی هستند و بیشترین مقاومت خمشی مربوط به ترکیبی است که حاوی درشت دانه بازیافتی و ریزدانه طبیعی است. نتایج همچنین نشان دهنده این است که نسبت مقاومت خمشی به فشاری، که به عنوان نشانه ای از جذب انرژی است، در مخلوطهای حاوی مصالح بازیافتی بیشتر از مخلوط کنترل است و بیشترین مقدار این نسبت مربوط به مخلوطی است که حاوی بخش ریزدانه و درشت دانه بازیافتی است. نتایج آزمایش مدول الاستیسیته نیز نشان دهنده قابلیت جذب انرژی بالاتر مخلوطهای حاوی مصالح بازیافتی بوده، ولی مدول الاستیسیته این ترکیبات کمتر از مخلوط کنترل بوده و کمترین مدول الاستیسیته مربوط به مخلوطی است که حاوی درشت دانه و ریزدانه بازیافتی است. نتیجه گیری کلی این تحقیق بیانگر قابل استفاده بودن سنگدانه های بازیافتی به دست آمده از بتن سازه ای در بتن غلتکی است.

واژه های کلیدی: بتن غلتکی، بتن ضایعاتی، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، مدول الاستیسیته

۱. مقدمه

بتن غلتکی نوعی از بتن سیمان پرتلند است که از اختلاط مصالح سنگی درشت و ریز، سیمان و آب به مقدار کم ساخته شده و با اسلامپ نزدیک به صفر توسط فینیشر مخصوص آسفالت پخش شده و توسط غلتکهای ارتعاشی متراکم می شود [Hazaree et al. 2012; Omran et al. 2017]. بتن غلتکی دارای کاربردهای متعددی از جمله در سدسازی و روسازی راهها و پارکینگها و کفهای صنعتی است. از مزایای روسازی بتن غلتکی نسبت به بتن معمولی عدم نیاز به قالب بندی، آرماتورهای تسلیح، میلگردهای اتصال و تای بار و درز است [Krishna Rao et al. 2016]. در صورت اجرای مناسب، این نوع بتن مقاومت های بالایی را کسب نموده و دوام رضایت بخشی را در مقابل شرایط محیطی خواهد داشت [Courard, Michel and Delhez, 2010]. همچنین، از دیگر مزایای این نوع روسازی می توان به عدم نیاز به پرداخت سطح و دوام بالای آن اشاره نمود [Modarres and Hosseini, 2014]. روسازی بتن غلتکی حساسیت کمتری به ترک خوردگی ناشی از انقباض در اثر خشک شدن دارد. استفاده از بتن غلتکی باعث صرفه جویی در زمان و منابع به مقدار ۱۰ تا ٤۰٪ نسبت به بتن معمولی می گردد [ACI Committee 325, 2011; Naik et al. 2001]. همه این ویژگی ها باعث شده اند که روسازی بتن غلتکی در مقایسه با روسازی آسفالتی و بتن معمولی هزینه کمتری داشته باشد و گزینه مناسبی برای خیلی از کاربردها باشد. روسازی بتن غلتکی با محیط زیست سازگارتر بوده و در ساخت و بهره برداری از آن انرژی کمتری مصرف می گردد. یکی از مهمترین کاربردهای روسازی بتن غلتکی محلهایی است که دارای ترافیک سنگین و ایستا هستند، مثل محل توقف هواپیماها و باندهای خزش در فرودگاهها، پارکینگ ماشین آلات سنگین و راههای دسترسی به مناطق صنعتی [Management and Planning Org., 2009]. عملکرد روسازی بتن غلتکی به مقدار زیادی به خصوصیات مکانیکی آن، از جمله مقاومت فشاری، خمشی و مدول الاستیسیته بستگی دارد.

امروزه آلودگی های زیست محیطی حاصل از ضایعات تولیدی به یکی از مسائل مهم جوامع شهری در دنیا تبدیل شده است. ضایعات ساخت و تخریب[1] (CDW) یکی از اصلی ترین مواد ضایعاتی هستند. این ضایعات در حین ساخت و تعمیر ساختمانها و یا در اثر تخریب آنها یا سایر زیر ساختها تولید می‌شوند. با توجه به حجم انبوه این مواد انباشتن آنها در اطراف شهرها از نظر ظاهری، اشغال سطح وسیعی از زمینها و سایر آلودگی ها مشکل ساز گردیده است. در اتحادیه اروپا سالیانه ۸۵۰ میلیون تن ضایعات ساخت و تخریب تولید می شود که حدود ۳۱٪ از کل ضایعات این اتحادیه را تشکیل می دهد [Fisher and Erge, 2009]. ضایعات ساخت و تخریب متشکل از انواع زیادی از مواد و مصالح، شامل بتن، ملات، آجر، چوب، پلاستیک، شیشه و انواع فلزات هستند. یکی از مهم‌ترین بخشهای ضایعات ساخت و تخریب بتن است [Tam, 2008; Kim and Kim, 2007]. بتن ضایعاتی از تخریب و نوسازی رویه های بتنی، تخریب ساختمانهای بتنی و سایر منابع تولید می‌گردد. یکی از مناسب‌ترین روشهای مدیریت ضایعات بازیافت و بکارگیری مجدد آنها در تولید محصولات جدید است. بتن سخت ضایعاتی را می‌توان خرد نموده و به عنوان بخشی از، یا تمام سنگدانه های مورد استفاده در مصالح جدید استفاده نمود. سنگدانه های بتن بازیافتی، به دلیل وجود ملات سیمان در اطراف آنها، در مقایسه با سنگدانه های معمولی، دارای مقاومت کمتر، جذب آب بیشتر، مقاومت سایشی و چگالی کمتری هستند [Radevic et al. 2017]. همچنین این سنگدانه ها دارای بافت سطحی زبرتر، گوشه های تیزتر و سطح ویژه بیشترهستند [Chen, Lin and Wu, 2011; Michigan Department of Transportation, 2011]. مطالعات و تجربیات گذشته نشان می دهند که سنگدانه های بتن ضایعاتی قابل استفاده در مخلوطهای آسفالتی [Radevic et al. 2017; Chen, Lin and Wu, 2011; Ektas and

Karakasu, 2012; Zulkati, Wong and Song, 2013; Arabani, Moghadas Nejad and Azarhoosh, 2013]، بتن سازه ای [Etxeberria, 2007; Moghimi and Berenjian, 2009]، اساس یا زیر اساس تثبیت شده [Marradi and Lancieri, 2008, Agrela et al. 2012; Del Rey et al. 2015; Houben, Molenaar and Shui, 2010] و مصالح سنگی غیر چسبنده مثل اساس و زیر اساس [Poon and Chan, 2006; O' Mahoney; 1991] است. در آمریکا در حدود ۸۵٪ از سنگدانه های بتن ضایعاتی در اساس راهها استفاده می‌شود [Wilburn and Goonan, 1998]. در برخی از کشورها از سنگدانه های حاصل از بتن بازیافتی به عنوان بخشی از مصالح سنگی بتن استفاده می‌شود. برای مثال، درانگلستان ۱۰٪ از حجم کل سنگدانه هایی که در این کشور استفاده می شود حاصل از بتن بازیافتی است[Collins, 1994]. معمولا حد معینی برای میزان استفاده از سنگدانه های بازیافتی در بتن مشخص می‌گردد [Agrela et al. 2012]. راو و همکارانش در سال ۲۰۰۷ امکان استفاده از نخاله‌های ساختمانی را در بتن بررسی کردند و از جنبه‌های مختلف مشکلات مربوط به نخاله‌های ساختمانی، بازیافت آن‌ها و استفاده مجدد از آنها در بتن را مورد ارزیابی قرار دادند [Rao et al. 2007]. ملبوچی تأثیر افزودن درصدهای مختلف خرده‌های آجر، ماسه و سیمان را روی مصالح بتنی بازیافت شده مورد ارزیابی قرار داده است [Melbouci, 2009]. پون و چان احتمال استفاده از مصالح بتنی بازیافت شده و آجر رسی خرد شده را در زیر اساس راه بررسی کردند[Poon and Chan, 2006]. نتایج تحقیق آنها نشان داد که با استفاده از ۱۰۰٪ مصالح بتنی بازیافت شده در زیر اساس راه، رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثر در مقایسه با مصالح طبیعی به ترتیب افزایش و کاهش پیدا کردند. پون و چان احتمال استفاده از مصالح بتنی بازیافت شده و آجر رسی خرد شده را در زیر اساس راه بررسی کردند [Poon and Chan, 2006]. نتایج تحقیق آنها نشان داد که با استفاده از ۱۰۰٪ مصالح بتنی بازیافت شده در زیر اساس راه، رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثر در مقایسه با مصالح طبیعی به ترتیب افزایش و کاهش پیدا کردند. مارادی و لانسیری پتانسیل استفاده از مخلوط خرده‌های بتن که با سیمان تثبیت شده‌اند را به عنوان مصالح لایه‌اساس و زیراساس بررسی‌کردند[Marradi and Lancieri, 2008]. نتایج کار آنها نشان داد که سن بتن بازیافتی در کارایی بتن بازیافتی تثبیت شده با سیمان بسیار تاثیرگذار است. در نهایت آنها به این نتیجه رسیدند که این مواد قابلیت استفاده در لایه‌های اساس و زیراساس را دارند و می‌توان به عنوان مصالح جایگزین از آنها بهره برد. آگرلا و همکارانش امکان استفاده از خرده های بتن ضایعاتی را در زیراساس تثبیت شده راه بررسی کردند. آنها این مصالح را در دو مقطع از یک راه در مالاگای اسپانیا استفاده نموده و نشان دادند که امکان پذیری در این کاربرد وجود دارد [Agrela et al. 2012]. رادویچ و همکارانش [Radevic et al. 2017] از سنگدانه های بتن ضایعاتی در مخلوط بتن آسفالتی استفاده نمودند و دریافتند که مخلوطهای حاوی سنگدانه های بازیافتی دارای سختی کمتری نسبت به مخلوطهای حاوی سنگدانه های طبیعی هستند، اما مقاومت در برابر تغییر شکل آنها تفاوت قابل توجهی ندارد. لوپز- اوسدا و همکارانش [Lopez-Uceda et al. 2016] خصوصیات بتن غلتکی که در آن بخش درشت دانه با ۵۰ و ۱۰۰٪ مصالح سنگی بتن بازیافتی جایگزین شده بود را مطالعه نمودند و دریافتند که با جایگزینی مصالح سنگی طبیعی با مصالح بازیافتی، مقاومت فشاری، خمشی و کششی و مدول الاستیسیته کاهش می یابند.

اگرچه مطالعات متعددی درخصوص استفاده از آسفالت بازیافتی در بتن غلتکی انجام‌گرفته است [Modarres and Hosseini, 2014; Settari et al. 2015] ، اما بررسی خصوصیات بتن غلتکی حاوی سنگدانه های به دست آمده از بتن بازیافتی به خوبی مطالعه نشده است. بنابراین، در این تحقیق، خصوصیات مکانیکی بتن غلتکی که در آن بخش های درشت

دانه و ریزدانه با مصالح سنگی به دست آمده از بتن سیمانی بازیافتی جایگزین شده اند مورد مطالعه قرارگرفته است.

۲. مواد و مصالح

مواد مورد استفاده در این تحقیق شامل مصالح سنگی طبیعی و بازیافتی، سیمان و آب است. مصالح سنگی طبیعی مورد استفاده برای ساخت نمونه های بتن غلتکی از معدن کوهی حصار خرابه در نازلوی ارومیه تهیه گردید. مصالح سنگی در سه اندازه درشت (۱۲/۵تا ۲۵ میلیمتر)، متوسط(۵تا ۱۲/۵) و ریز (۰ تا ۵ میلیمتر) تهیه گردیدند. مصالح سنگی هر بخش به طور جداگانه دانه بندی گردیدند تا بر اساس دانه بندی آنها و محدوده دانه بندی مورد استفاده برای مخلوط بتن غلتکی، که از نشریه شماره ۳۵٤ به دست آمد [Management and Planning Org., 2009] درصد اختلاط هر کدام آنها محاسبه گردید. ضمنا، آزمایش مرغوبیت نیز بر روی مصالح سنگی انجام گرفت که نتایج آن در جدول ۱ ارائه گردیده اند. با توجه به تهیه مصالح طبیعی از سنگ شکسته کوهی، الزام مربوط به حداقل درصد شکستگی درشت دانه ها نیز تامین می‌شود. مصالح سنگی بتن بازیافتی از خرد کردن نمونه های بتنی مکعبی ۱۵ × ۱۵ × ۱۵ اخذ شده از آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک در پروژه راه آهن مراغه – ارومیه به دست آمد. مقاومت ٤۲ روزه آن ها بین ۳۳۰ تا ٤۳۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع بود. نمونه های مکعبی ضایعاتی توسط چکش به قطعات کوچکتر تقسیم، سپس با استفاده از سنگ شکن آزمایشگاهی به قطعات ریزتر تبدیل شدند (شکل ۱). مصالح بازیافتی بتنی بعد از خرد کردن در سه اندازه درشت (۲۵– ۱۲/۵ میلیمتر)، متوسط (۱۲/۵– ۵ میلیمتر) و ریز (۵–۰ میلیمتر) تقسیم بندی شدند. سپس، آزمایش دانه بندی بر روی هر قسمت انجام گرفت. شکل ۲ مصالح سنگی بازیافتی در اندازه های مختلف را نشان می دهد. همانند مصالح اصلی، آزمایشات مرغوبیت مصالح روی مصالح بازیافتی نیز انجام گردید، که نتایج آن در جدول ۱ نشان داده شده اند. همانگونه که ملاحظه می گردد، مصالح بازیافتی به طور کلی کیفیت پایینتری از مصالح طبیعی دارند. افت وزنی در آزمایش لس آنجلس برای مصالح بازیافتی دقیقا برابر با حداکثر مجاز است، که این موضوع به دلیل وجود خمیر سیمان در اطراف این سنگدانه‌ها است که مقاومت زیادی در برابر سایش و ضربه ندارند. در صورت عدم تامین این مشخصه می‌توان جایگزینی بخشی از درشت دانه های طبیعی را با مصالح بازیافتی در نظر گرفت. با این حال، الزامات مشخصات فنی مورد نیاز برای مصالح سنگی بتن غلتکی [Management and Planning Org., 2009]را برآورده می‌نمایند. به دلیل شکسته بودن سنگدانه های بتن بازیافتی الزام حداقل درصد شکستگی در یک جبهه نیز تامین می‌شود.

به دلیل عدم تامین مصالح عبوری از الک ۲۰۰ توسط مصالح بازیافتی، برای تامین این بخش از مصالح، فیلرهای چند کارخانه آسفالت بررسی گردید و با توجه به ویژگی های لازم از نظر دانه بندی، در همه ترکیبات مختلف، از فیلر کارخانه آسفالت شرکت ارومیه بتن استفاده گردید. در این تحقیق، ٤ ترکیب مختلف از مصالح سنگی مورد مطالعه قرار گرفته است. ترکیب اول، که به عنوان مخلوط کنترل استفاده می شود، متشکل از مصالح سنگی درشت و ریز طبیعی است و سنگدانه های بازیافتی در آن استفاده نشده اند. سه مخلوط دیگر، به ترتیب، شامل درشت و ریز بازیافتی، ریز بازیافتی و درشت طبیعی و درشت بازیافتی و ریز طبیعی هستند. با توجه به دانه بندی بخش های درشت، متوسط و ریز مصالح اصلی و بازیافتی و محدوده دانه بندی مورد نیاز برای مخلوط، درصد اختلاط هر بخش و فیلر در چهار ترکیب مورد استفاده در این تحقیق تعیین گردید. درصدهای اختلاط طوری تعیین گردید که اختلاف قابل قبولی بین دانه بندی ها وجود داشته باشد تا نتایج قابل مقایسه باشند. جدول ۲ درصد اختلاط بخش های مختلف را در مخلوط نشان می‌دهد. این درصدهای اختلاط باعث گردید منحنی دانه بندی مخلوط ها به یکدیگر خیلی نزدیک باشند. شکل ۳ منحنیهای دانه بندی مخلوطهای مختلف و محدوده دانه بندی مشخصات فنی را نشان

می دهد. درصد فیلر مصرفی در ترکیبات مختلف یکسان نبوده است. فیلر مورد استفاده در مخلوطهای حاوی مصالح بازیافتی، به دلیل وجود مواد ریز بیشتر در آنها کمتر از فیلر مورد استفاده در مخلوط ساخته شده با مصالح سنگی طبیعی بود.

سیمان مورد استفاده در تحقیق برای ساخت نمونه ها سیمان پوزولانی تهیه شده از کارخانه سیمان ارومیه است. جدول ۳ ترکیبات شیمیایی و برخی از مشخصات سیمان مورد استفاده در تحقیق را نشان می دهد. بر اساس نشریه شماره ۳۵٤، مقدار سیمان بتن غلتکی بین ۱۲ تا ۱٦٪ وزن خشک مصالح سنگی است. در این تحقیق، درصد سیمان ۱٤٪ وزن خشک مخلوط انتخاب گردید.

آب مورد استفاده در ساخت بتن غلتکی باید دارای مشخصات آب برای بتن معمولی باشد. در این تحقیق، از آب شرب ارومیه استفاده گردیده است. آزمایشهای کنترل کیفی بر روی آب انجام گردید که نتایج نشان داد تامین کننده مشخصات مورد نیاز است.

شکل ۱. دستگاه سنگ شکن آزمایشگاهی

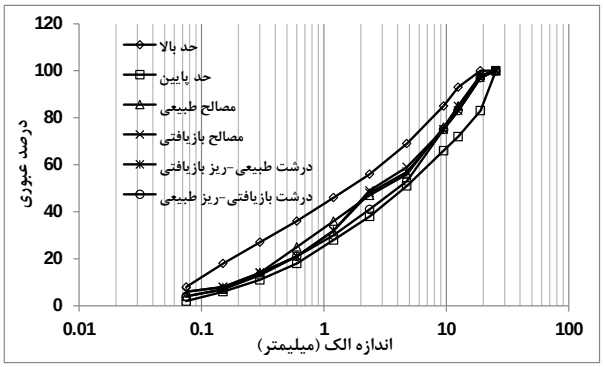
جدول ۱. خصوصیات مصالح سنگی طبیعی و بازیافتی مورد استفاده در تحقیق

مشخصات	مصالح طبیعی		مصالح بازیافتی	حداقل	حداکثر
درصد سایش روش لس آنجلس	۲۵		۳۵	–	۳۵
درصد دانه های سوزنی	۱۸		۱۸	–	۳۰
درصد دانه های پولکی	۱٤		۱۲	–	۲۰
درصد افت وزنی در مقابل سولفات سدیم و سلامت سنگدانه ها	بخش درشت	۱/۳	۲/٦	–	–
	بخش ریز	۱/٤	۷/٦		
درصد جذب آب	بخش درشت	۰/۷	٦	–	–
	بخش ریز	۱/۲	۱۱/٤		
وزن مخصوص بخش درشت	ظاهری	۲/۷۲۷	۲/۷۲۸	–	–
	حقیقی	۲/٦۷۸	۲/۳٤٦		
وزن مخصوص بخش ریز	ظاهری	۲/۸۱٤	۲/۷۵۷	–	–
	حقیقی	۲/۷۷۰	۲/۱		
ارزش ماسه ای	۸۵		۷۸	۷۵	–

شکل ۲. مصالح سنگی بازیافتی

جدول۲. درصد اختلاط بخش های مختلف

نوع مخلوط	درشت دانه	متوسط	ریز	فیلر
کنترل	۲۱	۱۹	۵۵	۵
تماما بازیافتی	۲۱	۲۲	۵۵	۲
درشت بازیافتی	۲۱	۱۹	۵۵	۵
ریز بازیافتی	۲۱	۲۲	۵۵	۲



شکل ۳. دانه بندی مصالح سنگی در مخلوطهای مختلف

جدول ۳. مشخصات سیمان مصرفی در تحقیق

ویژگی	ترکیب شیمیایی						افت وزنی	باقی مانده	وزن	سطح
	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	SO_3	در اثر حرارت ٪	نامحلول ٪	مخصوص(gr/cm^3)	مخصوص (cm^2/gr)
مقدار	۵۹/۷	۲۴/۷۲	٤/٤٦	۲/۷۲	۳/۷	۲/۳۳	٤/۳	۷/۹۹	۳/۰۵	۳۸۱۰

۳. طرح اختلاط

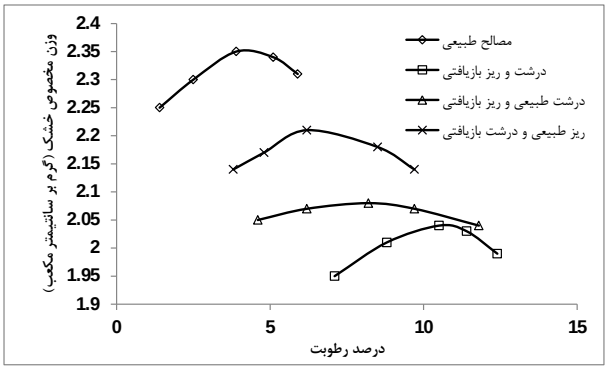
همانگونه که قبلا ذکر گردید، درصد اختلاط بخش درشت، متوسط، ریز و فیلر مصالح سنگی، بر اساس دانه بندی اجزاء مختلف و محدوده دانه بندی مشخصات فنی تعیین گردیدند. مقدار سیمان در بتن غلتکی بر اساس الزامات مقاومت و دوام تعیین می‌شود که در حدود ۱۲ تا ۱۶٪ وزن مصالح سنگی خشک پیشنهاد می‌شود. در این تحقیق مقدار میانی این محدوده، یعنی ۱۴٪، انتخاب گردید. مقدار رطوبت بهینه برای بتن غلتکی بر اساس روش مورد استفاده در تراکم خاک و منطبق با استاندارد ASTM D1557 تعیین گردید. به این منظور، برای هر کدام از مخلوطها، ۵ نمونه ۵/۸ کیلوگرمی از مخلوط سیمان و مصالح سنگی تهیه شده و به هر کدام مقدار رطوبتهای مختلف اضافه گردیده و به خوبی مخلوط گردید. مخلوط حاصل در ۵ لایه مختلف در قالب های تراکم ریخته شده و با چکش تراکم ٤/٥ کیلوگرمی و ارتفاع سقوط ٤٥ سانتیمتری، تعداد ٥٦ ضربه به هر لایه وارد گردید. سپس، وزن مخصوص خشک مربوط به نمونه های متراکم شده در هر رطوبت اندازه گیری شده و تغییرات آن با درصد رطوبت ترسیم گردید، و رطوبت بهینه متناظر با حداکثر وزن مخصوص خشک تعیین گردید. شکل ٤ منحنیهای تراکم مخلوطها را نشان می دهد. همچنین، جدول ٤ مقدار هر کدام از اجزا برای ساخت یک نمونه متراکم، چگالی خشک حداکثر، رطوبت بهینه و نسبت آب به سیمان را برای مخلوطهای مختلف نشان می دهد. همانگونه که ملاحظه می گردد، ترکیبات حاوی مصالح بازیافتی دارای حداکثر وزن مخصوص خشک کمتر و درصد رطوبت بهینه بیشتر هستند. همچنین ملاحظه می‌گردد که ترکیب حاوی ریزدانه بازیافتی، دارای رطوبت بهینه بیشتری از مخلوط حاوی درشت دانه بازیافتی است. این موضوع به دلیل درصد جذب آب بیشتر ریزدانه بازیافتی است که در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین، ریزدانه ها درای سطح مخصوص بیشتر بوده و رطوبت مورد نیاز برای تراکم را افزایش می‌دهد. همچنین، همانگونه که در جدول ملاحظه می‌گردد، نسبت آب به سیمان برای مخلوطهای حاوی مصالح بازیافتی بیش از مخلوط کنترل است، که این موضوع به دلیل جذب آب بالای مصالح بازیافتی است. لازم به ذکر است که این نسبت ها برای مصالح خشک است، ولی معمولا نسبت آب به سیمان بر اساس مصالح سنگی اشباع بیان می‌شود که مقادیر آن نیز معمولا کمتر از مقادیر ذکر شده در جدول است.

به منظور بررسی تاثیر تراکم بر دانه بندی مخلوطها، مصالح سنگی مخلوط حاوی درشت دانه و ریز دانه بازیافتی بعد از عملیات تراکم (بدون استفاده از سیمان) مجددا دانه بندی شده و ملاحظه گردید که تفاوت درصد های عبوری با قبل از تراکم کمتر از ۳٪ است. این مقدار برای مخلوط حاوی مصالح سنگی طبیعی نیز کنترل گردیده و ۱/۵٪ تعیین شد. بیشتر خرد شدگی بعد از تراکم مربوط به درشت دانه ها بود و بخش ریز دانه تغییر قابل توجهی نداشت.

جدول ٤. نسبت اجزا مخلوطهای مختلف

نوع مخلوط	وزن مصالح سنگی درشت(گرم)	وزن مصالح سنگی متوسط(گرم)	وزن ماسه (گرم)	وزن فیلر (گرم)	وزن سیمان (گرم)	وزن مخصوص خشک حداکثر(gr/cm^3)	رطوبت بهینه٪	نسبت آب به سیمان
تماما طبیعی	۱۰۵۰	۹۵۰	۲۷۵۰	۲۵۰	٦۷۵	۲/۳۵	٤/۲	۰/٤۸
تماما بازیافتی	۱۰۵۰	۱۱۰۰	۲۷۵۰	۱۰۰	٦۷۵	۲/۰٤	۱۰/۳	۰/۸۷

درشت طبیعی و ریز بازیافتی	۱۰۵۰	۱۱۰۰	۲۷۵۰	۱۰۰	٦۷۵	۲/۰۸	۷/۹	۰/۷
درشت بازیافتی و ریز طبیعی	۱۰۵۰	۹۵۰	۲۷۵۰	۲۵۰	٦۷۵	۲/۲۱	٦/۸	۰/٦۵



شکل ٤. منحنیهای تراکم مخلوطها

٤. طرح آزمایش و ساخت نمونه ها

همانگونه که قبلا ذکر گردید، چهار ترکیب مختلف در این تحقیق مورد مقایسه قرار گرفته اند. ترکیب کنترل که در آن تمامی درشت دانه و ریز دانه از مصالح سنگی طبیعی است (ترکیب NA)، ترکیب دیگر حاوی ریز دانه از مصالح سنگی طبیعی بوده و درشت دانه آن از مصالح سنگی بتن ضایعاتی(RC-NF)، ترکیب سوم حاوی درشت دانه از مصالح سنگی طبیعی و ریز دانه به دست آمده از بتن ضایعاتی (NC-RF) و ترکیب چهارم شامل سنگدانه های ریز و درشت از بتن ضایعاتی است(RA). خصوصیات مکانیکی شامل مقاومت فشاری و خمشی در عمرهای مختلف ۷، ۲۸و ۹۱ روز و مدول الاستیسیته و قابلیت جذب انرژی مخلوطهای مختلف در عمر ۲۸ روز اندازه گیری گردید. جدول ۵ طرح آزمایشهای بکار رفته در این تحقیق را نشان می‌دهد. سه نمونه برای انجام هر آزمایش استفاده گردید. برای اندازه گیری مقاومت فشاری از نمونه های مکعبی با ابعاد ۱۵×۱۵×۱۵سانتیمتر استفاده گردید. ۳٦ نمونه مکعبی برای اندازه گیری مقاومت فشاری ساخته شد. برای آزمایش مقاومت خمشی نمونه های تیر منشوری با طول ۳۵ سانتیمتر و عرض و ارتفاع ۱۰ سانتیمتر ساخته شد. ۳٦ نمونه نیز برای تعیین مقاومت خمشی ساخته شد. برای اندازه گیری مدول الاستیسیته و قابلیت جذب انرژی مخلوطها نمونه های استوانه ای به قطر ۱۵ و ارتفاع ۳۰ سانتیمتر ساخته شد. ۱۲ نمونه استونه ای نیز برای اندازه گیری مدول الاستیسیته ساخته شد. نمونه ها به روش ارتعاش بر روی میز لرزان تحت سربار و مطابق با استاندارد ASTM C1176 ساخته شدند (شکل ۵). طبق این استاندارد، نمونه های استوانه ای در سه لایه مساوی تحت سربار ۹۱۰۰ گرم روی میز لرزان به مدت حدود ۳۵ ثانیه مرتعش گردیدند. مدت زمان ارتعاش با استفاده از آزمایش Vebe بدست آمد. در مورد نمونه های مکعبی و منشوری نیز همین رویه تکرار گردید، با این تفاوت که چون سطح نمونه های مکعبی ($۲۲۵cm^2$) و نمونه های منشوری (

$350cm^2$) بیشتر از سطح نمونه های استوانه ای ($176/7cm^2$) است، بنابراین، به نسبت افزایش سطح، وزن سربار نیز افزایش یافت. وزن سربار برای نمونه های مکعبی مقدار ۱۱۵۹٤ گرم و برای نمونه منشوری مقدار ۱۸۰۳۵ گرم محاسبه و استفاده گردید. عمل آوری نمونه های مکعبی و منشوری طبق استاندارد ۱۱۱ BS۱۸۸۱ –Part در حوض آب در دمای ۲± ۲۰ درجه سانتی گراد انجام گردید. نمونه های استوانه ای طبق استاندارد ASTM C31 در حوض آب در دمای ۲± ۲۳ درجه انجام شد. برای جلوگیری از هدر رفتن بخش آهکی سیمان نمونه ها آب با آهک شکفته اشباع گردید. مقدار آهک موجود در آب طبق استاندارد ASTM C31 باید ۱۳ گرم در لیتر باشد.

۵. آزمایشها

بر روی نمونه های مکعبی ساخته شده و عمل آوری شده در سنین مختلف ۷، ۲۸ و ۹۱ روز، طبق استاندارد ۱۱٦ Part– BS۱۸۸۱ آزمایش مقاومت فشاری انجام شد (شکل ٦– الف). مقاومت خمشی مخلوطها با استفاده از نمونه‌های منشوری با طول ۳۵ سانتیمتر و عرض و ارتفاع ۱۰ سانتیمتر و عمل آوری شده در سنین ۷، ۲۸ و ۹۱ روز اندازه گیری گردید. این کار طبق استاندارد BS EN 12390 Part 5 انجام گرفت(شکل ٦– ب). در این آزمایش، با بارگذاری در وسط تیر و ادامه آن تا لحظه شکست، از رابطه ۱ مقدار مقاومت خمشی یا مدول شکست محاسبه گردید.

$$f_b = \frac{3PL}{2bd^2} \qquad (۱)$$

که در آن f_b مقاومت خمشی بر حسب MPa، P مقدار بار در لحظه شکست بر حسب N، L طول دهانه تیربرحسب mm، b عرض تیر و d ارتفاع تیر بر حسب میلیمتر هستند.

آزمایش مدول الاستیسیته طبق استاندارد ASTM C469 بر روی نمونه های استوانه ای انجام گرفت. برای این کار، چون نمونه استوانه ای بایستی تحت بار تک محوری قرار گیرد، باید دو مقطع دایره ای استوانه کاملا صاف باشد. بنابراین، ابتدا طبق استاندارد ASTM C617 نمونه ها توسط گوگرد کلاهک گذاری شدند. سپس دستگاه اندازه گیری تغییر شکل روی آن نصب شد و همزمان با ثبت بار محوری (فشاری) مقدار تغییر شکل نیز ثبت گردید (شکل ٦–ج). سپس با رسم نمودار تنش – کرنش مدول الاستیسیته هر نمونه، مطابق استاندارد ASTM C469 با استفاده از رابطه (۲) تعیین گردید.

$$E_c = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - 0.00005} \qquad (۲)$$

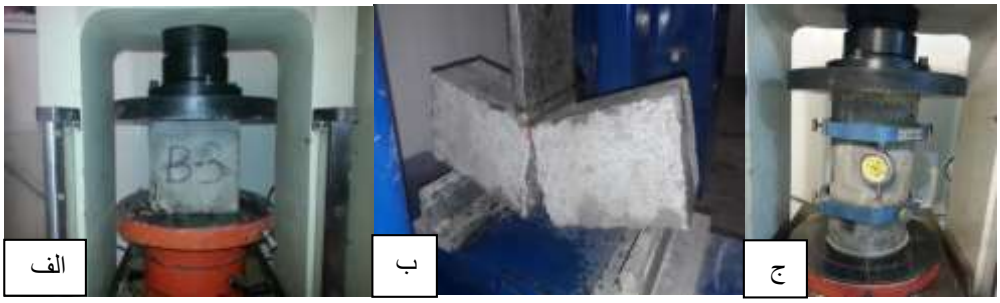
که در آن S_2 تنش متناظر با ٤۰٪ تنش بیشینه، S_1 تنش متناظر با کرنش ۰/۰۰۰۰۵ و ε_2 کرنش متناظر با تنش S_2 است.

لازم به ذکر است که قبل از انجام آزمایشها، نمونه ها وزن شده و با اندازه گیری ابعاد آنها، وزن مخصوص ترکیبات مختلف با محاسبه میانگین آنها به دست آمدند.

شکل ۵. ساخت نمونه ها بر روی میز لرزان

جدول ۵. طرح آزمایشهای انجام شده در تحقیق

نام ترکیب	ریزدانه	نوع درشت دانه	عمر عمل آوری		
			۷	۲۸	۹۱
NA	طبیعی	طبیعی	مقاومت فشاری- مقاومت خمشی	مقاومت فشاری- مقاومت خمشی- مدول الاستیسیته	مقاومت فشاری- مقاومت خمشی
RC-NF	طبیعی	بازیافتی	مقاومت فشاری- مقاومت خمشی	مقاومت فشاری- مقاومت خمشی- مدول الاستیسیته	مقاومت فشاری- مقاومت خمشی
NC-RF	بازیافتی	طبیعی	مقاومت فشاری- مقاومت خمشی	مقاومت فشاری- مقاومت خمشی- مدول الاستیسیته	مقاومت فشاری- مقاومت خمشی
RA	بازیافتی	بازیافتی	مقاومت فشاری- مقاومت خمشی	مقاومت فشاری- مقاومت خمشی- مدول الاستیسیته	مقاومت فشاری- مقاومت خمشی



شکل ٦. نمونه های تحت آزمایش (الف)آزمایش مقاومت فشاری (ب) مقاومت خمشی (ج) مدول الاستیسیته

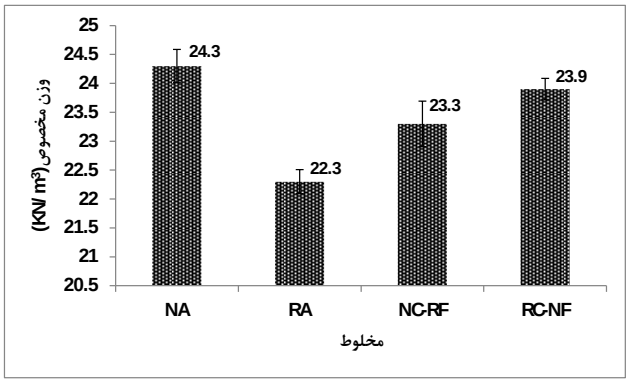
٦. نتایج و بحث

٦-١ نتایج وزن مخصوص

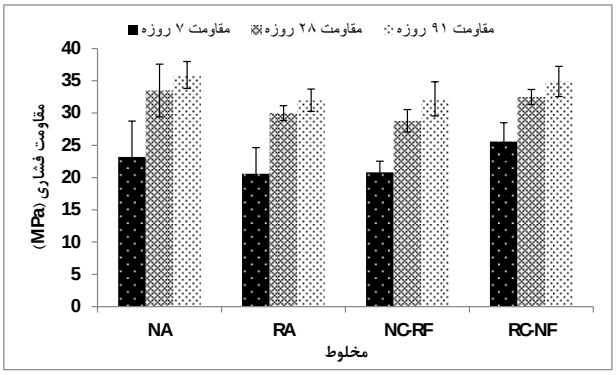
شکل۷ وزن مخصوص ترکیبات مختلف را نشان می دهد. همانگونه که ملاحظه می گردد، ترکیب ساخته شده با مصالح بازیافتی دارای وزن مخصوص کمتری از ترکیب ساخته شده با مصالح طبیعی هستند. به طوری که ترکیب ساخته شده با مصالح سنگی ریز و درشت بازیافتی، دارای وزن مخصوصی حدودا ۱۰٪ کمتر از مخلوط کنترل است. این موضوع به دلیل وزن مخصوص کمتر سنگدانه‌های بازیافتی نسبت به سنگدانه‌های طبیعی است. کاهش وزن مخصوص بتن غلتکی می‌تواند هزینه های حمل و اجرای روسازی را کاهش دهد.

٦-٢ نتایج آزمایش مقاومت فشاری

مقاومت فشاری به تنهایی در عملکرد روسازی بتن غلتکی به اندازه مقاومت کششی و یا خمشی دارای اهمیت نیست، زیرا مقدار تنش های فشاری وارده به بتن در روسازی خیلی کمتر از مقدار مقاومت فشاری است. اما، مقاومت کششی بتن، زیاد نبوده و تنشهای دمایی در روسازی ممکن است از آن بیشتر شده و باعث ترک خوردگی گردد. مقاومت خمشی بتن نیز مستقیما به عمر خستگی آن ارتباط می‌یابد و کافی نبودن آن می‌تواند باعث بروز ترک خوردگی خستگی گردد. مقاومت فشاری بتن روسازی از آن جهت اهمیت دارد که به مقاومت کششی، خمشی و مدول الاستیسیته بتن ارتباط می‌یابد. معمولا بتن دارای مقاومت فشاری بالا، دارای مقاومت کششی و خمشی و مدول الاستیسیته بیشتر است. معمولا مشخصات فنی در کشورهای مختلف، حداقل مقاومت فشاری معینی را برای بتن غلتکی روسازی ها الزام می‌نمایند. برای مثال، "انجمن بتن آمریکا" حداقل مقاومت فشاری ٢٧/٦MPa را در عمر ٢٨ روز پیشنهاد می‌نماید [ACI, 2000]. شکل ٨، مقدار مقاومت فشاری نمونه های مکعبی ترکیبات مختلف را در عمرهای عمل آوری ٧، ٢٨ و ٩١ روز نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، به طور کلی، مقاومت فشاری مخلوطهای ساخته شده با مصالح بازیافتی، کمتر از مخلوط ساخته شده با مصالح طبیعی است. این نتایج با تحقیقات قبلی انجام گرفته توسط لوپز اوسدا و همکاران [Lopez-Uceda et al. 2016] همخوانی دارد، که با جایگزینی ٥٠ و ١٠٠٪ درشت دانه بتن غلتکی با سنگدانه های بتن بازیافتی دریافتند که مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. استفاده از آسفالت ضایعاتی در بتن غلتکی نیز نشان داده است که باعث کاهش مقاومت فشاری می گردد [Modarres and Hosseini, 2014; Settari et al. 2015]. موضوع به دلیل سختی پایین‌تر سنگدانه های بازیافتی به دلیل وجود ملات سیمان در اطراف آنهاست که باعث شکستگی و بروز ترک در این سنگدانه ها می‌شود. اما، کاهش مقاومت در مخلوطهای حاوی مصالح بازیافتی قابل توجه نیست. مقاومت ٢٨ روزه مخلوط حاوی درشت و ریز بازیافتی(RA)، ریز بازیافتی و درشت طبیعی(NC-RF) و درشت بازیافتی و ریز طبیعی(RC-NF)، به ترتیب، ١٠/٥٪، ١٤٪ و ٣٪ کمتر از مخلوط کنترل است. استفاده از ریزدانه بازیافتی تاثیر بیشتری در کاهش مقاومت دارد. با این حال، مخلوطهای حاوی مصالح بازیافتی دارای مقاومتی بیش از حداقل مورد نیاز هستند. نتایج مقاومت فشاری در عمرهای عمل آوری مختلف نشان می‌دهند که روند کسب مقاومت در عمرهای مختلف در مخلوطهای حاوی مصالح بازیافتی با مخلوط کنترل تفاوت معنی داری ندارد. تحقیقات قبلی نشان داده است که برای بتن غلتکی حاوی مصالح سنگی درشت بازیافتی مقدار رشد مقاومت در فاصله ٢٨ تا ٩١ روز بیشتر از مخلوط کنترل است [Lopez-Uceda et al. 2016]. اما، نتایج این تحقیق نشان می دهد که غیر از مخلوطی که حاوی ریزدانه بازیافتی است، در بقیه مخلوطها چنین روندی وجود ندارد. همچنین، در تحقیقات قبلی نشان داده شد که نسبت مقاومت فشاری ٧ روزه به ٢٨ روزه مخلوط کنترل و مخلوطهای حاوی سنگدانه درشت بتن بازیافتی حدود ٨٥٪ است[Lopez-Uceda et al. 2016]. اما، این نسبت برای مخلوطهای استفاده شده در این تحقیق حدود ٧٠٪ است. این اختلاف به تفاوت در نوع سیمان ارتباط می یابد.



شکل ۷. وزن مخصوص ترکیبات مختلف



شکل ۸. مقاومت فشاری ترکیبات مختلف

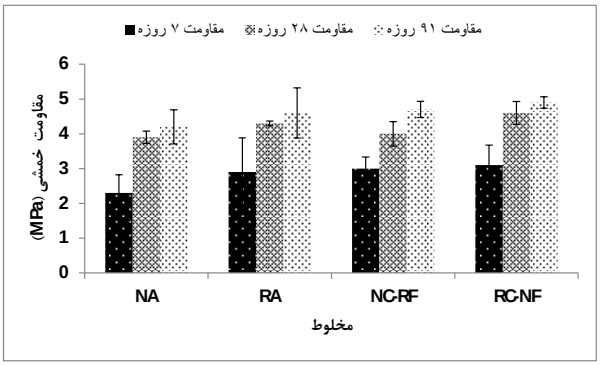
۶-۳ نتایج آزمایش مقاومت خمشی

همانگونه که در بخش قبلی ذکر گردید، مقاومت خمشی یا مدول شکست لایه های بتنی در روسازی دارای اهمیت زیادی است. لایه های بتنی با مقاومت خمشی بیشتر عمر خستگی بالاتری داشته و دیرتر ترک می خورند. از همین رو، از این شاخص در طراحی روسازی های صلب استفاده می شود. مطابق روش طرح روسازی اشتو، حداقل مقاومت خمشی ۲۸ روزه مورد نیاز ۳/۵MPa است [AASHTO, 2009]. شکل ۹ مقاومت خمشی مخلوطهای مختلف را بعد از عمل آوری به مدت ۷، ۲۸ و ۹۱ روز نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، برای تمام دوره های عمل آوری، مخلوطهای حاوی مصالح بازیافتی دارای مقاومت خمشی بیشتری از مخلوط کنترل ساخته شده با مصالح طبیعی است. به نظر می‌رسد این موضوع می تواند به دلیل زبری بیشتر سنگدانه های بازیافتی و قفل و بست بیشتر بین آنها باشد که باعث می‌شود مقاومت خمشی بیشتر شود. این نتایج با یافته های تحقیقات قبلی در تضاد است [Lopez-Uceda et al. 2016]. در تحقیقات قبلی نشان داده شده است که در مخلوط بتن غلتکی حاوی ۵۰ و ۱۰۰٪ مصالح سنگی درشت بتن بازیافتی مقاومت خمشی بیشتر از آن در بتن غلتکی کنترل با سنگدانه های طبیعی است. بر خلاف مقاومت فشاری که سختی سنگدانه ها تاثیر زیادی در مقاومت فشاری دارد، برای مقاومت خمشی چسبندگی خمیر سیمان بین سنگدانه ها و قفل و بست سنگدانه ها تاثیر بیشتری دارد. مقایسه مخلوط حاوی درشت بازیافتی با ریز بازیافتی بیانگر این است که مخلوط حاوی ریزدانه بازیافتی دارای مقاومت خمشی کمتری از مخلوط حاوی درشت دانه بازیافتی است. این موضوع می‌تواند به دلیل ایجاد اتصال بیشتر بین سنگدانه ها در حالتی است که از درشت دانه بازیافتی، که دارای سطح زبرتری از درشت دانه طبیعی است، باشد. اما،

وقتی از ریز دانه بازیافتی استفاده می‌گردد، ضعف سنگدانه های بازیافتی با زبری بیشتر آنها جبران نمی‌شود. بر همین اساس، مخلوطی که در آن به طور همزمان از درشت دانه و ریز دانه بازیافتی استفاده می شود، مقاومت خمشی مابین دو حالت فوق است. بر اساس نتایج نشان داده شده در شکل ۹، مقاومت خمشی مخلوط RC-NF، NC-RF و RA، به ترتیب، ۱۷، ۱۰ و ۲/۵٪ بیشتر از مخلوط کنترل است. افزایش مقاومت خمشی باعث می شود که به ضخامت کمتری از این مصالح در روسازی نیاز باشد، که این موضوع هزینه اجرای روسازی را کاهش خواهد داد. مقایسه مقدار مقاومت خمشی در عمرهای عمل آوری مختلف نشان می دهد که مخلوطهای حاوی مصالح بازیافتی مقدار بیشتری از مقاومت خمشی خود را در عمر عمل آوری ۷ روزه کسب می نمایند. به طوری که، مقدار مقاومت خمشی ۹۱ روزه مخلوط کنترل ۸۵٪ بیش از مقاومت خمشی ۷ روزه آن است، در حالی که، این مقدار برای مخلوطهایRA، NC-RF وRC-NF به ترتیب، حدودا ۵۸، ٥٦ و ۵۸٪ است. مطالعات انجام گرفته در قبل نشان داده است که نسبت مقاومت خمشی به مقاومت فشاری مخلوط حاوی درشت دانه بتن بازیافتی به مقدار ۵۰ و ۱۰۰٪ مشابه مخلوط کنترل بوده و مقدار آن حدود ۱۱٪ است[Lopez-Uceda et al. 2016]. اما، در این تحقیق نتایج نشان می‌دهند که اگرچه این نسبت برای مخلوط کنترل حدود ۱۱٪ است، اما برای مخلوطهای حاوی سنگدانه بتن بازیافتی حدودا ١٤٪ است. این اختلاف می تواند به تفاوت سایر عوامل، مثل نوع و مقدار سیمان و نوع سنگدانه های طبیعی و بتن بازیافتی ارتباط یابد و به بررسی بیشتر در این ارتباط نیاز است.

با استفاده از روش طرح روسازی "مهندسین ارتش آمریکا" ضخامت روسازی بتن غلتکی با استفاده از چهار ترکیب مختلف مورد استفاده در این تحقیق محاسبه گردیده است. در این روش طراحی ضخامت بر اساس تنش کششی در دال و محدودیت ترک خوردگی خستگی در بتن بر اساس ۱۰ شاخص طرح، که براساس گروه بار ترافیکی و تعداد آنها تعیین می شود، محاسبه می‌گردد. این طرح شامل یک رویه بتن غلتکی است که بر روی لایه اساس سنگدانه ای قرار گرفته بر روی بستر رسی با CBR برابر با ۵ است. مقدار ضریب عکس العمل موثر بستر رویه بتنی در این طرح ۷۰MPa/m در نظر گرفته می‌شود. ضخامت رویه بتنی برای شاخص طراحی حداقل ۱ و حداکثر ۱۰ در جدول ٦ نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، در شاخص طراحی ۱۰، که مربوط به ترافیک زیاد یا بارهای سنگین تر است، استفاده از بتن غلتکی حاوی مصالح سنگی بازیافتی به کاهش قابل توجهی در ضخامت منجر خواهد شد. در شاخص طراحی ۱، استفاده از بتن غلتکی حاوی مصالح سنگی بازیافتی منجر به استفاده از حداقل ضخامت مورد نیاز ۱۰ سانتیمتر خواهد شد. بنابراین، استفاده از سنگدانه های بازیافتی در بتن غلتکی روسازی با ترافیک زیاد یا سنگین اقتصادی تر است.

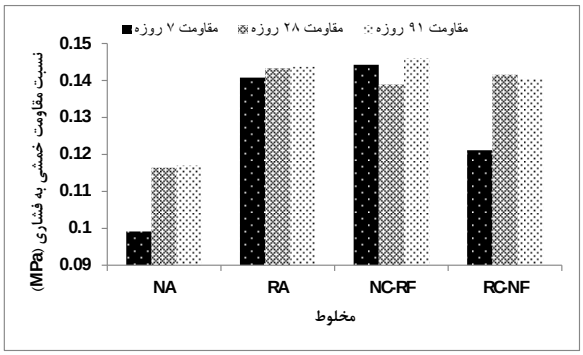
نسبت مقاومت خمشی به مقاومت فشاری مخلوطهای مختلف در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مقدار بیشتر این نسبت بیانگر قابلیت جذب بالاتر انرژی مخلوط است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، به طور کلی، این نسبت برای مخلوطهای حاوی بتن بازیافتی بیشتر از مخلوط کنترل است. از بین مخلوطهای حاوی مصالح بازیافتی، مخلوطی که در آن از درشت دانه طبیعی و ریزدانه بازیافتی استفاده شده است بیشترین نسبت را دارد، که بعد از آن مخلوط حاوی ریز دانه و درشت دانه بازیافتی و مخلوط حاوی درشت دانه بازیافتی و ریزدانه طبیعی قرار می‌گیرند.



شکل ۹. مقاومت خمشی ترکیبات مختلف

جدول ٦. ضخامت رویه بتنی برای مخلوطهای مختلف

نوع مخلوط	مدول شکست (MPa)	ضخامت برای شاخص طراحی ۱(cm)	ضخامت برای شاخص طراحی ۱۰(cm)
NA	۳/۹	۱۱	۲۳/۳
RA	٤/۳	۱۰	۲۱/۳
NC-RF	٤	۱۰/٦	۲۲/۸
RC-NF	٤/٦	۱۰	۲۰/۵



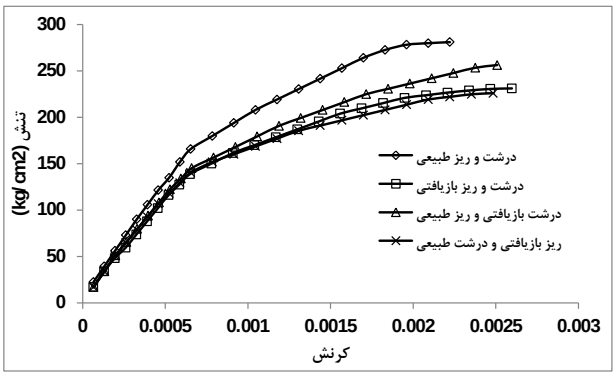
شکل ۱۰. نسبت مقاومت خمشی به مقاومت فشاری ترکیبات مختلف

٦-٤ قابلیت جذب انرژی و مدول الاستیسیته

مدول الاستیسیته مخلوطها با ترسیم منحنی تغییرات تنش با کرنش نمونه ها تعیین گردید. شکل ۱۱ منحنی تغییرات کرنش عمودی به تنش اعمال شده را در نمونه های استوانه ای مورد استفاده در آزمایش تعیین مدول الاستیسیته نشان می دهد. همانگونه که ملاحظه می گردد، تغییرات تنش با کرنش مخلوطها در ابتدا خطی بوده و سپس وارد ناحیه غیر خطی می‌گردد تا زمانی که با ایجاد کرنش معینی، نمونه به حداکثر مقاومت خود رسیده و شکسته می‌شود. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد، مخلوط حاوی سنگدانه‌های طبیعی دارای بیشترین مقاومت، و بعد از آن مخلوطهای حاوی درشت دانه بازیافتی و ریز طبیعی، ریز و درشت بازیافتی و ریز بازیافتی و درشت طبیعی قرار می‌گیرند، که با نتایج مقاومت فشاری ارائه شده در شکل(۸) سازگار است. همچنین، مخلوط حاوی مصالح طبیعی، کمترین کرنش در لحظه شکست را دارد که بیشترین مقدار برای آن در مخلوط حاوی ریزدانه و درشت دانه بازیافتی دیده می شود.

جدول ۷. مساحت زیر منحنی تنش- کرنش مخلوطها

نوع مخلوط	NA	RA	RC-NF	NC-RF
مساحت زیر منحنی (kg/cm^2)	۰/٤۲۸	۰/٤۳٥	۰/٤٤	۰/٤۰۲



شکل ۱۱. منحنی های تنش-کرنش مخلوطهای مختلف

با محاسبه سطح زیر منحنی تنش-کرنش مخلوطها، که نشان دهنده قابلیت جذب انرژی مخلوطهاست، نتایج در جدول ۷ ارائه گردیده اند. همانگونه که ملاحظه میگردد، مخلوط حاوی درشت دانه بازیافتی و ریز طبیعی بیشترین قابلیت جذب انرژی را دارا است، که بعد از آن مخلوط حاوی ریز و درشت بازیافتی بیشترین جذب انرژی را دارد. دلیل بالاتر بودن قابلیت جذب انرژی مخلوط حاوی مصالح طبیعی از مخلوط ساخته شده با ریز دانه بازیافتی و درشت دانه طبیعی بیشتر بودن مقاومت و تنش کمینه است.

مدول الاستیسیته بتن از ویژگی های مهم و تاثیرگذار این مصالح در عملکرد روسازی است که بیانگر سختی لایه بتنی است. اغلب روشهای طراحی روسازی بتنی از این ویژگی بتن در تعیین ضخامت لایه بتنی استفاده می‌کنند. شکل(۱۲) مقادیر مدول الاستیسیته مخلوطهای مختلف را که از رابطه (۲) محاسبه گردیده اند را نشان می دهد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، مخلوطهای حاوی مصالح بازیافتی دارای سختی کمتر از مخلوط حاوی مصالح طبیعی است. این موضوع به دلیل وجود سنگدانه های بازیافتی با سختی کمتر در داخل بتن سخت شده است که باعث می شود عملکردی شبیه وجود حفره در بتن داشته باشند و سهمشان در تحمل بار کاهش یابد. محققین قبلی نیز دریافته اند که مدول الاستیسیته بتن غلتکی با به کارگیری سنگدانه های بتن بازیافتی به عنوان بخشی از درشت دانه یا تمام آن کاهش می یابد [Lopez-Uceda et al. 2016]. لوپز اوسدا و همکارانش دریافتند که در بتن غلتکی ساخته شده با ۳۵۰ کیلوگرم سیمان در متر مکعب مدول الاستیسیته بتن غلتکی حاوی ۵۰و ۱۰۰٪ سنگدانه درشت بازیافتی، به ترتیب، ۲۱ و ۳۱٪ کمتر از آن برای بتن غلتکی کنترل است. نتایج مشابهی توسط دبیاب و همکارانش به دست آمد، که دریافتند با جایگزینی تمام سنگدانه ها با بتن بازیافتی مدول الاستیسیته ۳۲٪ نسبت به مخلوط کنترل کاهش می‌یابد [Debieb et al. 2009]. از بین مخلوطهای حاوی مصالح بازیافتی، مخلوط حاوی درشت دانه بازیافتی و ریزدانه طبیعی دارای بیشترین مدول است، و کمترین مدول الاستیسیته مربوط به مخلوطی است که از ریزدانه و درشت دانه بازیافتی استفاده شده است.

۷. تحلیل آماری نتایج

به منظور بررسی معنی دار بودن تفاوت بین ویژگی های مخلوطهای مختلف مورد بررسی در این تحقیق، تحلیل واریانس یک طرفه (One-way ANOVA) از نتایج به دست آمده از مقاومتهای فشاری و خمشی و مدول الاستیسیته مخلوطهای مختلف شامل NA، RA، NC-RF و RC-NF، با استفاده از نرم افزار excel انجام گرفت. نتایج این تحلیل در جدول (۸) ارائه گردیده اند. با توجه به مقادیر P-value برای خصوصیات مختلف که کوچک‌تر از سطح معنی داری ۰/۰۵ است، می توان نتیجه گرفت که اختلاف بین ویژگی های مختلف برای چهار نوع مخلوط ذکر شده معنی دار است.

جدول ۸. نتایج تحلیل واریانس نتایج آزمایشگاهی

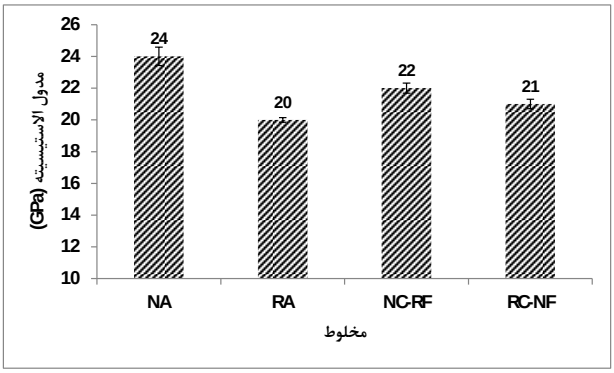
مقاومت فشاری ۲۷ روزه						
	جمع مربعات	درجه آزادی	متوسط مربعات	F	P-value	F بحرانی
بین گروهی	۵۱۹/۳۳	۳	۱۷۰۶/٤٤	۳۸	٤/۱٦×۱۰-٦	٤/۰٦
درون گروهی	۳۵۳/۳۳	۸	٤٤/۱٦٦۷			
کل	٥٤۷۲/٦٦۷	۱۱				
مقاومت فشاری ۲۸ روزه						
	جمع مربعات	درجه آزادی	متوسط مربعات	F	P-value	F بحرانی
بین گروهی	٤۸۱۸/۲٥	۳	۱٦۰٦/۰۸۳	۹٥/٤۱	۱/۳۳×۱۰-٦	٤/۰٦٦
درون گروهی	۱۳٤/٦٦٦۷	۸	۱٦/۸۳۳			
کل	٤۹٥۲/۹۲۲	۱۱				
مقاومت خمشی ۹۱ روزه						
	جمع مربعات	درجه آزادی	متوسط مربعات	F	P-value	F بحرانی
بین گروهی	۳۱۷۲/۲٥	۳	۱۰٥۷/٤۱۷	۷۱/۲۸	٤/۱٦×۱۰-٦	٤/۰٦٦
درون گروهی	۱۱۸/٦٦٦۷	۸	۱٤/۸۳۳۳۳			
کل	۳۲۹٦/۹۱۷	۱۱				
مقاومت خمشی ۷ روزه						
	جمع مربعات	درجه آزادی	متوسط مربعات	F	P-value	F بحرانی
بین گروهی	٥۰/۸٤	۳	۱٦/۹٤۸۸۹	۱۳/٤۲٤	۰/۰۰۱۷۲۸	٤/۰٦٦۸
درون گروهی	۱۰/۱	۸	۱/۲٦۲			
کل	٦۰/۹٤	۱۱				
مقاومت خمشی ۲۸ روزه						
	جمع مربعات	درجه آزادی	متوسط مربعات	F	P-value	F بحرانی
بین گروهی	۱۰۱/۳۷٥۸	۳	۳۳/۷۹۱۹٤	۱٦۸/۲٥۸	۱/٤٥×۱۰-۷	٤/۰٦٦۱۸۱
درون گروهی	۱/٦۰٦٦٦	۸	۰/۲۰۰۸۳۳			
کل	۱۰۲/۹۸۲٥	۱۱				

مقاومت خمشی ۹۱ روزه

	جمع مربعات	درجه آزادی	متوسط مربعات	F	P-value	F بحرانی
بین گروهی	۹۰/۷۱۵۸۳	۳	۳۰/۲۳۸۶۱	٤۷/۷٤٥۱۸	۱/۸۹×۱۰−٥	٤/۰٦٦۱۸۱
درون گروهی	٥/۰٦٦٦٦۷	۸	۰/٦۳۳۳۳			
کل	۹٥/۷۸۲٥	۱۱				

مدول الاستیسیته ۲۸ روزه

	جمع مربعات	درجه آزادی	متوسط مربعات	F	P-value	F بحرانی
بین گروهی	۲٥/۸۱٦٦۷	۳	۸/٦۰٥٥٥٦	۲۱/۱۱	۰/۰۰۳۷۱	٤/۰٦٦۱۸۱
درون گروهی	۳/۲٦	۸	۰/٤۰۷٥			
کل	۲۹/۰۷٦٦۷	۱۱				



شکل ۱۲. مدول الاستیسیته مخلوطهای مختلف

۸. جمع بندی و نتیجه گیری

در این تحقیق سنگدانه های بازیافتی به دست آمده از بتن ضایعاتی جایگزین بخش درشت دانه و ریزدانه یک بتن غلتکی با مصالح سنگی طبیعی شده و خصوصیات مخلوطهای به دست آمده مورد ارزیابی قرار گرفتند. به طور خلاصه نتایج زیر از این تحقیق گرفته می شوند.

- استفاده از بتن ضایعاتی در بتن غلتکی، باعث افزایش رطوبت بهینه و کاهش وزن مخصوص بتن می‌گردد.
- بتن های حاوی سنگدانه های بازیافتی دارای مقاومت فشاری کمتری از بتن حاوی مصالح طبیعی هستند ولی این تفاوت قابل توجه نبوده و مخلوطهای حاوی سنگدانه های بازیافتی بیش از حداقل مقدار مورد نیاز مقاومت دارند.
- مخلوطهای حاوی مصالح سنگی بازیافتی دارای مقاومت خمشی بیشتری از بتن غلتکی حاوی سنگدانه طبیعی هستند.
- مخلوطی که در آن بخش درشت دانه مصالح سنگی با سنگدانه بازیافتی جایگزین شده است دارای مقاومت فشاری و خمشی بیشتری از سایر ترکیبات حاوی سنگدانه بازیافتی هستند.
- نسبت مقاومت خمشی به فشاری، که بیانگر قابلیت جذب انرژی مخلوط نیز است، برای مخلوطهای حاوی سنگدانه بازیافتی بیشتر از مخلوطهای حاوی سنگدانه طبیعی است.
- مدول الاستیسیته مخلوطهای حاوی سنگدانه بازیافتی از مخلوط کنترل کمتر است. اما، مقدار اختلاف قابل توجه نبوده و

مخلوط حاوی درشت دانه و ریزدانه بازیافتی با کمترین مدول الاستیسیته، حدود ۱۷٪ سختی کمتری از مخلوط کنترل دارد.

- استفاده از مصالح سنگی بازیافتی باعث کاهش ضخامت لایه بتنی در روسازی شده و باعث اقتصادی تر شدن روسازی می‌شود.
- به طور کلی، می‌توان بیان کرد که مصالح سنگی بازیافتی قابلیت استفاده در بتن غلتکی را دارند، اما، ازبین مخلوطهای حاوی مصالح سنگی بازیافتی، بهترین نتیجه و عملکرد در حالتی به دست می‌آید که درشت دانه بازیافتی در مخلوط استفاده شود.
- برای تکمیل این تحقیق، توصیه می شود عملکرد مخلوطها از نظر دوام در مقابل شرایط محیطی نیز بررسی گردد.

۹. پی نوشت‌ها

1. Construction and Demolition Waste

۱۰. مراجع

- ایران. سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور (۱۳۸۸) "راهنمای طراحی و اجرای بتن غلطکی در روسازی راههای کشور"، تهران: سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور.

- ACI Committee 325 (2001) “Report on roller compacted concrete pavements”, Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.

- Agrela, F., Ramirez, A., Barbrado, A. and Galvin, A. P. (2012) "Real application of cement treated mixed recycled aggregates on road based in Malaga", Transportation Research Board Annual Meeting.

- Arabani, M., Moghadas Nejad, F. and Azarhoosh, A. R. (2013) "Laboratory evaluation of recycled waste concrete into asphalt mixtures", International Journal of Pavement Engineering, Vol. 14, No. 6, pp. 531–539.

- Chen, M., Lin, J. and Wu, S. (2011) "Potential of recycled fine aggregates powder as filler in asphalt mixture”, Construction and Building Materials, Vol. 25, pp. 3909–3914.

- Collins, R. J. (1994) "Reuse of demolition materials in relation to specifications in the UK. Demolition and reuse of concrete and masonry: guidelines for demolition and reuse of concrete and masonry", Proceedings of the Third International RILEM Symposium On Demolition And Reuse Of Concrete Masonry, Odense, Denmark, pp. 49-56.

- Courard, L., Michel, F. and Delhez, P. (2010) "Use of concrete road recycled aggregate for roller compacted concrete", Construction and Building Materials, Vol. 24, pp. 390-395.

- Debieb, F., Courard, L., Kenai, S. and Degeimbre, R. (2009) "Roller compacted concrete with contaminated recycled aggregates", Construction and Building Materials, Vol. 23, pp. 3382–3387.

- Del Rey, I., Ayuso, J., Barbudo, A., Galvin, A. P., Agrela, F. and de Brito, J. (2015) "Feasibility study of cement-treated 0–8 mm recycled aggregates from construction and demolition waste as road base layer", Road Materials and Pavement Design, Vol. 23, No. 4, pp.678–692.

- Ektas, S. and Karacasu, M. (2012) "Use of recycled concrete in hot mix asphalt and an ANN model for prediction of resilient modulus", Ekoloji, Vol. 21, No. 83, pp. 53–60.

- Etxeberria, M., Vazquez, E., Mari, 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. 1, pp. 735–742.

- Fisher, C. and Werge, M. (2009) "EU as a Recycling Society. ETC/SCP working paper 2/2009. Present recycling levels of Municipal Waste and Construction & Demolition Waste in the EU, 2009.

- Hazaree, C., Ceylan, H. and Wang, K. (2011) "Influences of mixture composition on

properties and freeze–thaw resistance of RCC", Construction and Building Materials, Vol. 25, pp. 313-319.

- Houben, L. J. M., Molenaar, A. A. A. and Shui, Z. (2010) "Cement treated recycled demolition waste as a road base material", Journal of Wuhan University of Technology-Material Science Edition, Vol. 25, No. 2, pp. 696–699.

- Jin, R. and Chen, Q. (2015) "Investigation of concrete recycling in the U.S. construction Industry", International Conference on Sustainable Design, Engineering and Construction, Proc. Eng. 118, pp. 894–901.

- Kim, G. D. and Kim, T. B. (2007) "Development of recycling technology from waste aggregate and dust from waste concrete", Journal of. Ceramic Processing Research, Vol. 8, No. 1, pp. 82–86.

- Krishna Rao, S., Sravan, P. and Chandrasekhar Rao, T. (2016) "Abrasion resistance and mechanical properties of Roller Compacted Concrete with GGBS", Construction and Building Materials, Vol. 114, pp. 925-933.

- Lopez-Uceda, A., Agrela, F., Cabrera, M., Jesús Ayuso, J. and Martín López, M. (2016) "Mechanical performance of roller compacted concrete with recycled concrete aggregates", Road Materials and Pavement Design, DOI:10.1080/14680629.2016.1232659, September 2016.

- Marradi, A. and Lancieri F. (2008) "Performance of cement stabilized recycled crushed concrete", First International Conference on Transport Infrastructure, Beijing, China, pp. 1-10.

- Melbouci, B. (2009) "Compaction and shearing behaviour study of recycled aggregates", Construction and Building Materials, Vol. 23, pp. 2723-2730.

- Michigan Department of Transportation (2011) "Using recycled concrete in MDOT's transportation infrastructure – Manual of Practice", Report Number RC-1544, Michigan, US, 2011.

- Modarres, A. and Hosseini, Z. (2014)" Mechanical properties of roller compacted concrete containing rice husk ash with original and recycled asphalt pavement material", Materials and Design, Vol. 64, No. 1, pp. 227–236.

- Molenaar, A. A. A., Xuan, D. X., Houben, L. J. M. and Shui, Z. (2011) "Prediction of the Mechanical Characteristics of Cement Treated Demolition Waste for Road Bases and Subbases", Proceedings of 10th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa, KwaZulu-Natal, South Africa.

- Molenaar, A. A. A. and Van Niekerk, A. A. (2002) "Effects of gradation, composition, and degree of compaction on the mechanical characteristics of recycled unbound materials", Transportation 325 Research Record, No. 1787, pp. 73-82.

- Naik, T. R., Chun, Y. M., Kraus, R. N., Singh, S. S., Pennock, L. L. C. and Ramme, B. W. (2001) "Strength and durability of roller-compacted HVFA concrete pavements", Practice Periodical on Structural Design and Construction, Vol. 6, pp.154–165.

- Oikonomou, N. D. (2005) "Recycled concrete aggregates", Cement and Concrete Composites, Vol. 27, pp. 315-318.

- Omran, A., Harbec, D., Tagnit-Hamou, D. and Gagne, R. (2017) "Production of roller-compacted concrete using glass powder: Field study", Construction and Building Materials, Vol. 133, pp. 450-458.

- O'Mahony, M. M. and Milligan, G.W.E. (1991) "Use of recycled materials in sub-base layers", Transportation Research Record, Vol.1310, pp. 73–80.

- Paranavithana, S. and Mohajerani, A. (2006) "Effects of recycled concrete aggregates on properties of asphalt concrete" Resources

Conservation Recycling, Vol. 48, No. 1, pp. 1–12.

- Poon, C. S. and Chan, D. (2005) "Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base", Construction and Building Materials, Vol. 20, pp. 578-585.

- Radevic, A., Durekovic, A., Zakic, D. and Mladenovic, D. (2017) "Effects of recycled concrete aggregate on stiffness and rutting resistance of asphalt concrete" Construction and Building Materials, Vol. 136, pp. 386-393.

- Settari, C., Debieb, F., Kadri, E. H. and Boukendakdji, O. (2015) "Assessing the effects of recycled asphalt pavement materials on the performance of roller compacted concrete", Construction and Building Materials, Vol. 101, pp. 617–621.

- Tam, V. W. Y. (2008) "Economic comparison of concrete recycling: a case study Approach", Resources Conservation Recycling, Vol. 52, No. 5, pp. 821–828.

- Wong, Y. D., Sun, D. D. and Lai, D. (2007) "Value-added utilization of recycled concrete in hot-mix asphalt", Waste Management Journal, Vol. 27, No. 2, pp. 294–301.

- Wilburn, D. and Goonan, T. (1998) "Aggregates from natural and recycled sources: Economic assessments for construction applications – a materials flow Analysis", in: U.S. Geological Survey Circular 1176, U.S. Department of the Interior, Washington, DC.

- Zulkati, A., Wong, Y. D. and Sun, D. D. (2013) "Mechanistic performance of asphalt-concrete mixture incorporating coarse recycled concrete aggregate", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 25, No. 9, pp. 1299–1305.

حسن طاهرخانی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۷۱ از دانشگاه علم وصنعت ایران و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی راه و ترابری را در سال ۱۳۷۵ از دانشگاه تربیت مدرس تهران اخذ نمود. در سال ۱۳۸۵ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی راه و ترابری از دانشگاه ناتینگهام انگلستان گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان مضالح و مواد روسازی بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه دانشیار در دانشگاه زنجان است.

حیدر سازگار، درجه کارشناسی در رشته دبیر فنی عمران را در سال ۱۳۸۲ از دانشگاه شهید مدنی آذربایجان (تبریز) و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی راه و ترابری را در سال ۱۳۹۶ از دانشگاه آزاد زنجان اخذ نمود. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان مضالح و مواد روسازی، بتن و مکانیک خاک بوده و درحال حاضر به‌عنوان کارشناس مکانیک خاک آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک سد کانی سیب پیرانشهر مشغول بکار است.