Modares Civil Engineering Journal

Volume 26, Issue 6, 2027, 21-36
DOI: 10.48311/mcej.2026.99130.0

Tarbiat Modares University

Investigation of the characteristics of compressibility and Elastic modulus of the mixtures containing recycled concrete, crushed bricks, and PET for use as fill in embankments

A. Ekramifard[1], A. Akhtarpour[2*]

1. Ph.D. Student of Geotechnical Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.
2. Associate Prof., Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.

Abstract

Waste recycling plays a crucial role in enabling the efficient use of natural resources and mitigating the negative environmental impacts caused by mineral extraction. One significant type of waste that can be recycled is construction and demolition waste (CDW), which includes materials such as concrete, bricks, and wood from building sites. This waste can be processed and recycled for use in various construction applications, particularly in geotechnical engineering, where it serves as fill materials or base layers in foundations. The management and reuse of CDW not only help in reducing landfill waste but also contribute to the conservation of natural aggregates. When utilizing CDW as fill materials, it is essential to determine the compressibility properties of these materials. The compressibility coefficient is a key factor that influences the behavior of materials under load, which directly impacts the stability and durability of construction structures. The compressibility behavior of various types of CDW, including recycled concrete and crushed bricks, is influenced by their physical and chemical properties, such as particle size distribution and mineral composition. Consequently, understanding the compressibility characteristics of CDW requires more detailed and comprehensive studies. The authors of this study aimed to investigate the compressibility properties of CDW that had been stabilized through the addition of polyethylene terephthalate (PET), a type of plastic waste. PET is increasingly being explored as a stabilizing agent for various construction materials due to its beneficial effects on enhancing mechanical properties. The study also aimed to compare the performance of stabilized CDW with that of natural construction materials, such as natural stone aggregates, to assess their viability as substitutes in geotechnical applications. To achieve the study objectives, a series of oedometer tests were conducted using a hydraulic consolidation apparatus. These tests were performed under both saturated and optimum moisture content conditions for CDW, which included recycled concrete and crushed bricks mixed in different proportions. A reference sample (BM) made of natural stone aggregates with a similar gradation to the recycled materials was also tested for comparison. The key parameters measured in the study included compressibility coefficients, one-dimensional secant elastic modulus, and the Particle Breakage Index of the materials. The results of the study revealed that the compressibility of the materials increased with higher percentages of PET and crushed brick content. This suggests that the addition of PET and crushed brick enhances the compressibility of the materials. Additionally, the study found that with the increase in PET and crushed brick content, the hardness of the materials decreased. A key finding from the comparison between the saturated and optimum moisture content conditions was that compressibility was lower and hardness was higher under optimum moisture content. However, during the unloading and reloading phases of the test, greater crushing of the particles in the optimum moisture content condition led to a change in the gradation of the sample. As a result, the compressibility coefficient increased, and the hardness decreased, indicating that the material underwent more significant particle breakage in the optimum moisture content condition. Based on these findings, the study recommends that the percentage of crushed brick in recycled aggregates be limited to 30 percent to avoid excessive crushing and degradation of the material. Furthermore, it is suggested that when crushed brick is included in the recycled waste, 2 percent PET should be added to prevent further particle breakage and to improve the mechanical properties of the aggregates, ensuring better performance in construction applications. These recommendations provide valuable insights for engineers and practitioners looking to incorporate CDW in sustainable construction practices.

Review History
Received: Jan 02, 2025
Revised: Dec 07, 2025
Accepted: Jul 14, 202

Keywords
Rowe cell
Recycled Concrete
Crushed Brick
PET
Compression Index
Particle Breakage index

* Corresponding Author Email: akhtarpour@um.ac.ir - ORCID: 0000-0003-1654-0194

Copyright © 2026, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0) which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

مجله علمی مهندسی عمران مدرس

دوره ۲۶، شماره ۶، سال ۱۴۰۵ - صفحات ۲۱ تا ۳۶

DOI: 10.48311/mcej.2026.99130.0

بررسی مشخصات تراکم پذیری و مدول الاستیک مخلوط‌های حاوی مصالح بتن بازیافتی، آجرخردشده و pet برای استفاده به عنوان پرکننده خاکریزها

امین اکرامی‌فرد[۱]، علی اخترپور[۲*]

۱. دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، گروه عمران دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

۲. دانشیار، گروه عمران دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

چکیده

امروزه بازیافت زباله و استفاده مجدد از آن‌ها به عنوان یکی از مهمترین مسائل محیط زیستی مطرح است. یکی از انواع زباله‌ها، نخاله‌های ساختمانی است که می‌توانند جایگزین مناسبی برای مصالح ژئوتکنیکی باشند. برای نمونه می‌توان از نخاله‌های ساختمانی به عنوان مصالح پرکننده در خاکریزها استفاده نمود. برای این منظور لازم است ابتدا ضرایب تراکم‌پذیری و سختی مصالح تعیین شود. در این پژوهش از دستگاه تحکیم هیدرولیکی برای انجام آزمایش ادومتر در دو حالت اشباع و رطوبت بهینه استفاده شده است. ضرایب تراکم‌پذیری، مدول الاستیک یک‌بعدی و خردشدگی نخاله ساختمانی در مقایسه با مصالح طبیعی ارزیابی شده و تاثیر PET بر رفتار مصالح بررسی شده است. نخاله‌های ساختمانی مورد مطالعه در این پژوهش شامل بتن بازیافتی و آجر خردشده است که با نسبت‌های مختلف با یکدیگر ترکیب شده و ۱۰ نمونه مختلف تولید شده است. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که اگر درصد آجرخردشده و PET در مخلوط نخاله ساختمانی به ترتیب کمتر از ۳۰ و ۲ درصد باشد، می‌توان از آن‌ها به عنوان مصالح پرکننده در خاکریزها استفاده نمود.

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۳

بازنگری: ۱۴۰۴/۹/۱۶

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۲۳

کلمات کلیدی

تحکیم هیدرولیکی

بتن بازیافتی

آجر خردشده

PET

ضرایب فشردگی

شاخص خردشدگی

۱- مقدمه و تاریخچه تحقیقات

با افزایش جمعیت جهان و پیشرفت صنایع، تولید زباله با سرعت فزاینده‌ای در حال افزایش است. در نواحی با تراکم جمعیتی بالا و در مناطقی که دارای زمین حاصل‌خیز و با ارزش بوده، یافتن محل مناسب برای دفع زباله بسیار دشوار است. دفن غیراصولی زباله منجر به آلودگی محیط زیست خواهد شد. استخراج از منابع تجدیدناپذیر با توجه به توسعه صنعتی دنیا درحال افزایش است که قطعاً با مشکلات زیست محیطی مانند تغییرات در اکوسیستم منطقه، از بین رفتن گونه‌های جانوری و گیاهی، تغییرات اقلیمی و غیره همراه خواهد بود. امروزه بسیاری از نهادهای دولتی (مانند سازمان ملل) و نهادهای خصوصی بر استفاده صحیح از منابع طبیعی برای توسعه پایدار تاکید دارند [1]. بنابراین بازیافت و استفاده مجدد از زباله‌ها، با توجه به افزایش جمعیت، آلودگی خاک، آب و هوا، کمبود منابع معدنی و کاهش ذخایر نفتی در سطح جهان بسیار مهم است [2]. با کمک بازیافت زباله می‌توان استفاده‌ای موثر و کارآمد از منابع طبیعی داشت و از آثار منفی زیست محیطی، ناشی از استخراج مواد معدنی جلوگیری کرد.

* رایانامه نویسنده مسئول: akhtarpour@um.ac.ir – ORCID: 0000-0003-1654-0194

کپی‌رایت © ۲۰۲۶، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به‌صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0). بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، بازنشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.

یکی از انواع زباله‌ها، زباله‌های ناشی از تخریب سازه[1] است که با مدیریت صحیح و بازیافت، قابلیت استفاده به عنوان مصالح ژئوتکنیکی را دارند [3]. سالانه حجم زیادی از منابع معدنی در صنعت ساختمان مصرف می‌شود [4]. در سال ۲۰۰۴ حدود ۲ میلیارد تن زباله‌های ساختمانی در آمریکا [5] و در سال ۲۰۱۵ حدود ۲ میلیون تن زباله‌های ساختمانی در تایوان [6] تولید شده است. هم اکنون سالانه بیش از ۱۰ میلیارد تن زباله ساختمانی در دنیا تولید می‌شود [1]. مطالعات انجام شده در کشور مالزی نشان می‌دهد که یک سوم زباله‌های ساختمانی قابلیت بازیافت دارند [7]. بنابراین بازیافت زباله‌های ساختمانی می‌تواند نقش مهمی در حفظ و نگهداری منابع طبیعی و جلوگیری از تخریب محیط زیست ایفا کند.

زباله‌های ساختمانی مخلوط ناهمگن از مواد مختلف مانند بتن، آجر، شیشه، سرامیک، پلاستیک، چوب، فلز، خاک، سنگ، قیر، گچ و غیره است. براساس مطالعات انجام شده در کشورهای انگلستان، دانمارک، استونی، هلند، آلمان و ایرلند بیش از ۸۰ درصد زباله‌های ساختمانی بازیافت می‌شود [2 , 8]. به عنوان نمونه در کشور هلند از زباله بازیافتی بتنی و مصالح بنایی به عنوان لایه اساس استفاده می‌شود [9]. همچنین از مصالح بازیافتی می‌توان به عنوان مصالح پرکننده در سدهای خاکی [10]، لایه زیراساس در صنعت راه‌آهن [11]، خاکریزی دیوارهای وزنی [13 , 12] و محوطه سازی استفاده نمود.

در مطالعات گذشته روی مصالح نخاله ساختمانی، سختی و مقاومت مصالح با کمک آزمایش سه محوری [16, 15, 14 , 10]، رفتار بلند مدت مصالح با آزمایش خزش [11] و ظرفیت باربری و مدول برجهندگی مصالح با آزمایش سی‌بی‌آر[2] [17 , 15] مورد بررسی قرار گرفته است.

نائینی و همکاران در ۲۰۲۱ و ۲۰۱۹ استفاده از مصالح بازیافتی شامل بتن، آجر، پلاستیک و شیشه به عنوان مصالح زیراساس راه‌اهن مورد بررسی قرار دادند و بیان شد در صورت انتخاب درصد اختلاط صحیح می‌توان از این مصالح به عنوان مصالح زیراساس استفاده نمود [18 , 15]. در مقایسه مصالح پلاستیکی و شیشه‌ای، با توجه به وزن مخصوص پایین، مقاومت کم و ساختار پولکی مصالح پلاستیکی، حداکثر درصد اختلاط آن ۸ درصد وزنی است. اما مصالح شیشه بازیافتی با توجه به ساختار ۳ بعدی که مشابه سنگدانه‌های معدنی است و مقاومت فشاری زیاد، درصداختلاط تا ۵۰ درصد وزنی افزایش می‌یابد. لی[3] و همکاران با کمک آزمایش‌های تک محوری محدود نشده و سی‌بی‌آر کیفیت مصالح زباله ساختمانی را برای مصرف به عنوان زیراساس راهسازی بررسی نموده است [8].

آرولراجا[4] و همکاران در سال ۲۰۱۱ مشخصات مصالح آجرخردشده [19] و در سال ۲۰۱۲ مشخصات مصالح بتن خردشده و عملکرد آن‌ها به عنوان مصالح زیراساس مورد ارزیابی قرار دادند [20]. آرولراجا و همکاران در سال ۲۰۱۲ استفاده از ترکیب آجرخردشده با بتن بازیافتی و سنگ خردشده به عنوان مصالح زیراساس بررسی کردند. براساس نتایج مجموعه آزمایش‌های انجام شده مشاهده می‌شود که تا ۲۵ درصد آجرخردشده را می‌توان به مصالح بازیافتی اضافه نمود، به صورتی که استفاده از این مصالح برای زیراساس مناسب باشد [21]. لی و همکاران در سال ۲۰۲۰ مقاومت برشی نخاله‌های ساختمانی را مورد بررسی قرار دادند و نتایج نشان داد که در مصالح بازیافتی چسبندگی بین ۱۵/۵ تا ۳۳/۶ کیلوپاسکال و زاویه اصطکاک داخلی بین ۳۹/۷ تا ۴۲/۶درجه تغییر می‌کند [10].

مطالعات نشان می‌دهد که خاک‌های نرم را می‌توان با استفاده از نخاله‌های ساختمانی بهسازی نمود و پارامترهای مکانیکی آن‌را بهبود بخشید [22]. شارما[5] و همکاران بهسازی مصالح رسی خمیری زیاد (CH) با کمک نخاله‌های ساختمانی را بررسی کردند و نتایج نشان داد که استفاده از این مصالح منجر به افزایش مقاومت برشی مصالح رسی می‌شود [23]. نتایج مطالعات اوسلیمن[6] و همکاران نشان می‌دهد که با افزودن ۲۰ درصد شیشه یا بتن بازیافتی به رس متورم شونده، علاوه بر بهبود خواص مکانیکی آن، از تورم خاک نیز جلوگیری می‌کند [24]. در برخی دیگر از مطالعات نیز استفاده از بتن خردشده به عنوان مصالح دانه‌ای در ساخت بتن و آسفالت مورد ارزیابی قرار گرفته است [26 , 25].

خجسته و همکاران در سال ۲۰۲۴ استفاده از فیلترهای سیگار به عنوان افزودنی در ملات ماسه سیمان مورد بررسی قرار دارند. با

[1] Construction and Demolition Waste
[2] CBR
[3] Li
[4] Arulrajah
[5] Sharma
[6] Ouslimane

توجه به مشکلات زیست‌محیطی ناشی از انباشته شدن فیلترهای سیگار و مواد سمی موجود در آن‌ها، این تحقیق راهکارهایی برای بازیافت و استفاده مجدد از آن‌ها ارائه می‌دهد. برای این منظور ۱۰ نوع ملات ماسه سیمان با ترکیب درصدهای مختلفی از الیاف فیلترهای سیگار (حداکثر ۵ درصد) تهیه شده و مقاومت فشاری و کششی ملات ماسه سیمان تعیین شده است. نتایج نشان می‌دهد افزودن ٪۰٫۲ الیاف فیلتر سیگار موجب افزایش ٪۲۵ مقاومت فشاری در ۷ روز و ٪۱۹ در ۲۸ روز می‌شود. همچنین بیشترین مقاومت کششی با افزودن ٪۰٫۵ الیاف به دست می‌آید [27].

احمدی و همکاران در سال ۲۰۲۴ به بررسی استفاده از فیلترهای سیگار در تولید بتن پرداختند تا به مشکلات زیست‌محیطی ناشی از تولید زباله این فیلترها پاسخ دهند. برای این منظور ۱۰ نوع بتن با ترکیب درصدهای مختلفی از الیاف فیلترهای سیگار (حداکثر ۵ درصد) تهیه شده و مقاومت فشاری، خمشی و کششی آن‌ها تعیین شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزودن ٪۰٫۲ الیاف فیلتر سیگار به بتن منجر به افزایش ٪۳۴ در مقاومت فشاری و ٪۶۳ در مقاومت کششی می‌شود. افزایش مقادیر الیاف بالاتر از ٪۰٫۲ باعث کاهش خواص مکانیکی به دلیل تجمع الیاف شد. همچنین توانایی جذب انرژی و تحمل تغییر شکل در نمونه‌های بتنی با الیاف افزایش می‌یابد [28].

براساس جستجوهای انجام گرفته توسط نویسندگان این مقاله استاندارد و آیین نامه‌ای برای استفاده از مصالح بازیافتی در پروژه‌های ساختمانی ارائه نشده است. با توجه به تنوع نخاله‌های ساختمانی استفاده از آن‌ها نیازمند ارزیابی آزمایشگاهی است. در واقع ارزیابی کیفیت مصالح از طریق آزمایش‌های مرسوم انجام گرفته و با آیین‌نامه‌های موجود برای مصالح طبیعی مقایسه می‌شوند.

در پژوهش‌های انجام شده تاکنون، استفاده از مصالح نخاله ساختمانی برای کاربردهای خاص مانند اساس، زیراساس در راهسازی و راه‌آهن مورد بررسی قرار گرفته و تمرکز روی آزمایش‌های مرتبط مانند سی‌بی‌آر بوده و پارامترهای متناظر با کاربرد استخراج شده است. درصورت استفاده از نخاله‌های ساختمانی به عنوان مصالح پرکننده، تعیین ضرایب تراکم‌پذیری حائز اهمیت است [29] و به نظر می‌رسد که رفتار تراکم‌پذیری انواع نخاله‌های ساختمانی نیازمند مطالعات بیشتر و جامع‌تری است. به همین دلیل نویسندگان این مقاله تلاش دارند که خواص تراکم‌پذیری انواع نخاله‌های ساختمانی که با افزودن PET[1] بهسازی شده است، مورد بررسی قرار دهند و عملکرد آن‌ها را با مصالح طبیعی مقایسه نمایند. نخاله‌های ساختمانی مورد مطالعه شامل بتن بازیافتی، آجر خردشده و PET است که با درصدهای مختلف با یکدیگر مخلوط شده است. برای رسیدن به اهداف این پژوهش دو دسته آزمایش ادومتر روی انواع نخاله‌های ساختمانی انجام شده است: ۱. آزمایش ادومتر در حالت رطوبت بهنیه؛ ۲. آزمایش ادومتر در حالت اشباع. در ادامه براساس نتایج آزمایش ادومتر معیارهای ضرایب تراکم‌پذیری، مدول الاستیک ادومتری و شاخص خردشدگی مصالح بدست آمده است.

۲- تجهیزات

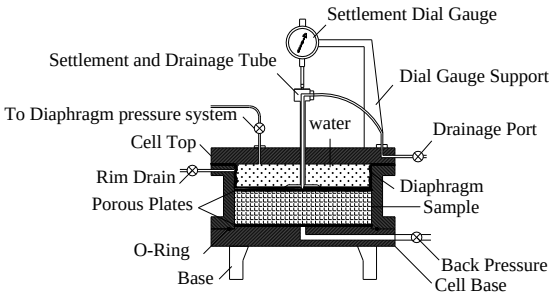
در این پژوهش برای انجام آزمایش ادومتر از دستگاه تحکیم هیدرولیکی[2] استفاده شده است. این دستگاه در سه اندازه مختلف با قطر ۳، ۶، ۱۰ و ۲۰ اینچ موجود است که با توجه به بیشترین قطر ذرات نمونه، می‌توان دستگاه با ابعاد مناسب را انتخاب نمود. در شکل (۱) نمایی از دستگاه تحکیم هیدرولیکی با قطر ۱۰ اینچ که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته، نشان داده شده است. متعلقات دستگاه شامل کمپرسور برای تامین فشار، دو عدد محفظه آب-هوا، ۳ عدد فشارسنج (برای اندازه‌گیری فشار قائم، فشار آب منفذی و پس فشار[3])، ۲ عدد تنظیم کننده فشار و ساعت اندازه‌گیری جابه‌جایی است. قطر و ارتفاع نمونه داخل دستگاه به ترتیب برابر ۱۰ و ۳/۷۵ اینچ خواهد بود [30].

همانطور که از نام دستگاه مشخص می‌شود برای اعمال تنش قائم از فشار هیدرولیکی آب استفاده می‌شود. کمپرسور هوای فشرده را به محفظه آب-هوا وارد نموده و از آنجا آب تحت فشار از طریق شیر اعمال فشار قائم وارد غشاء بالای نمونه می‌شود. با تنظیم فشار هوای ورودی به محفظه آب-هوا، مقدار فشار قائم اعمالی به نمونه تعیین می‌شود.

محفظه آب-هوا دوم برای تامین فشار پس فشار استفاده می‌شود. کمپرسور هوای فشرده را به محفظه آب-هوا وارد نموده و از آنجا آب تحت فشار از طریق شیر اعمال پس فشار از پایین به نمونه اعمال می‌شود.

[1] Poly-Ethylene Terephthalate
[2] Rowe Cell
[3] Back Pressure

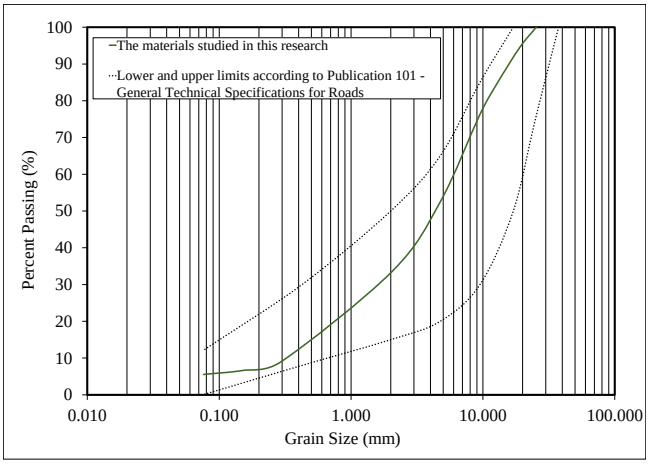
(الف)



(ب)

شکل ۱. نمایی از دستگاه تحکیم هیدرولیکی: الف. دستگاه تحکیم هیدرولیکی قطر ۱۰ اینچ، ب. ملحقات دستگاه تحکیم هیدرولیکی

Fig. 1. View of the Rowe cell: a. 10-inch Rowe cell, b. Accessories of the Rowe cell apparatus



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی مصالح بتن خردشده

Fig. 2. Grain size distribution curve of crushed concrete aggregates

در طول فرآیند آزمایش، نمونه تحت تنش اعمالی نشست می‌کند. مقدار نشست نمونه از طریق اندازه‌گیری جابه‌جایی راد موجود در دستگاه که روی سنگ متخلخل بالا قرار گرفته، تعیین می‌شود. علاوه بر این، مسیر زهکشی آب داخل نمونه نیز از داخل راد عبور می‌کند. آب خروجی ناشی از نشست نمونه، از طریق مسیر زهکشی از بالا نمونه خارج می‌شود. با تعبیه فشارسنج در مسیر زهکش، مقدار فشار آب منفذی تعیین می‌شود.

از جمله مزایا استفاده از این دستگاه برای انجام آزمایش ادومتر می‌توان به موارد زیر اشاره نمود [31]:

- کنترل اشباع شدن نمونه قبل از شروع آزمایش؛
- کنترل اتمام فرآیند تحکیم با اندازه‌گیری فشار آب منفذی؛
- انجام آزمایش روی مصالح درشت‌دانه؛
- اندازه گیری نفوذپذیری در دو راستا قائم و افق؛

۳- مشخصات فیزیکی مصالح

هدف از پژوهش حاضر بررسی مشخصات تراکم‌پذیری مصالح بازیافتی ساختمانی است. براساس مطالعات انجام شده و نمونه‌برداری از محل دفع زباله‌های ساختمانی در شهر مشهد، بتن و آجر بیشترین حجم نخاله‌های ساختمانی را شامل می‌شود [32]. بنابراین در این پژوهش ۳ نوع مصالح بازیافتی شامل بتن بازیافتی (C)، آجر خردشده (B) و پلاستیک (PET) انتخاب شده است. برای تعیین بیشترین قطر ذرات از روش پنمن استفاده شده است. در این روش بیشترین قطر ذرات در نمونه مورد آزمایش (d) براساس کوچکترین بعد نمونه (D) تعیین می‌شود. در این حالت باید $4<D/d<6$ باشد[33]. همان‌طور که در بخش ۲ اشاره شد، کوچکترین بعد نمونه برابر ۳/۷۵ اینچ است. بنابراین با توجه به تجهیزات آزمایشگاهی موجود، بزرگترین بعد ذرات ۲/۵۴ سانتی‌متر (الک ۱ اینچ) لحاظ شد.

برای تهیه بتن بازیافتی، قطعات بتنی در سنگ‌شکن خردشده است. از ۵ ناحیه مختلف مصالح خروجی سنگ شکن نمونه‌برداری انجام شده و منحنی دانه‌بندی آن‌ها بدست آمده است. متوسط منحنی‌های دانه‌بندی ۵ نمونه به عنوان معیار دانه‌بندی مصالح انتخاب شده است. در شکل (۲) منحنی دانه‌بندی مصالح بتن بازیافتی نشان داده شده است. در این شکل محدوده مجاز دانه‌بندی مصالح اساس و زیراساس مطابق نشریه شماره ۱۰۱ مشخصات فنی

عمومی راه نیز ارائه شده است [34]. نویسندگان در این مقاله سعی داشته اندازه ذرات مورد مطالعه را استاندارد و کاربردی در پروژه‌های عمرانی انتخاب نمایند. در جدول (۱) بطور خلاصه مشخصات دانه‌بندی مصالح مورد بررسی در این پژوهش شامل بیشترین بعد ذرات (D_{max})، میانگین قطر ذرات (D_{50})، ضریب یکنواختی (C_u)، ضریب خمیدگی (C_c)، درصد مصالح درشت‌دانه بزرگتر از الک شماره ۴ (PCF4) و درصد ریزدانه (FC) نشان داده شده است. طبقه‌بندی مصالح بازیافتی به روش متحد GW-GM است [35].

آجر خردشده مورد استفاده در این پژوهش از نوع آجر گری است. برای اطمینان از یکسان بودن نمونه‌ها، کلیه آجرها از یک دیوار ساختمان تخریب شده جمع‌آوری شده است. بنابراین تمامی آجرها دارای جنس یکسان هستند. برای از بین بردن تاثیر ابعاد، دانه‌بندی و بافت مصالح بر نتایج آزمایش‌ها، منحنی دانه‌بندی مصالح آجری مشابه مصالح بتنی شکل(۲) انتخاب شده است.

در این پژوهش از مواد PET به عنوان مصالح بازیافتی پلاستیکی استفاده شده است. از آنجا که PET دارای ساختار شیمیایی مشخصی است، می‌توان گفت که تمامی مصالح پلاستیکی مورد استفاده دارای رفتار مشابهی هستند. مصالح PET را می‌توان از بازیافت بطری‌های پلاستیکی بدست آورد. در شکل (۳) مصالح بازیافتی بتن، آجر و PET نشان داده شده است.

در جدول (۲) ویژگی‌های فیزیکی مصالح بازیافتی شامل وزن مخصوص توده جامد و درصد جذب آب که براساس ASTM C127 بدست آمده، به تفکیک ارائه شده است [36].

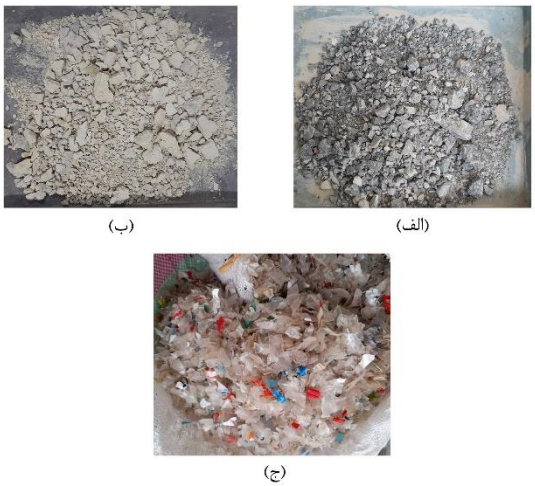
بعد از تهیه مصالح بازیافتی، آن‌ها را با نسبت‌های مختلف ترکیب نموده و ۱۰ نمونه مختلف تولید شده است. در جدول (۳) درصد اختلاط مصالح نشان داده شده است. در این پژوهش یک نمونه مرجع به نام BM با دانه‌بندی مشابه مصالح بازیافتی و از جنس مصالح سنگ طبیعی نیز مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از معرفی این نمونه مقایسه میان نتایج است.

برای تعیین وزن مخصوص خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه، روی ۱۰ نمونه معرفی شده در جدول (۳) و نمونه مرجع، آزمایش تراکم اصلاح شده مطابق استاندارد ASTM1557 انجام شده است [37]. در شکل (۴) منحنی تراکم اصلاح شده مصالح مورد آزمایش و در جدول (۴) خلاصه نتایج آزمایش تراکم ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات دانه‌بندی مصالح ([35] ASTM)

Table 1. Grain size specifications of the materials

Value	Characteristics
25.4	D_{max}(mm)
4.40	D_{50} (mm)
17.1	C_u
1.41	C_c
5.5	FC (%)



شکل ۳. مصالح بازیافتی ساختمانی: الف. بتن، ب. آجر و ج. PET

Fig. 3. Construction and Demolition Waste: a. Concrete, b. Brick, c. PET

جدول ۲. ویژگی‌های فیزیکی مصالح بازیافتی

Table 2. Physical properties of the CDW

Water absorption (%)	Gs	Material
6.6	2.66	Recycled Concrete
32.1	2.42	Crushed Brick
4.5	2.71	Benchmark Material

جدول ۳: درصد اختلاط مصالح بازیافتی

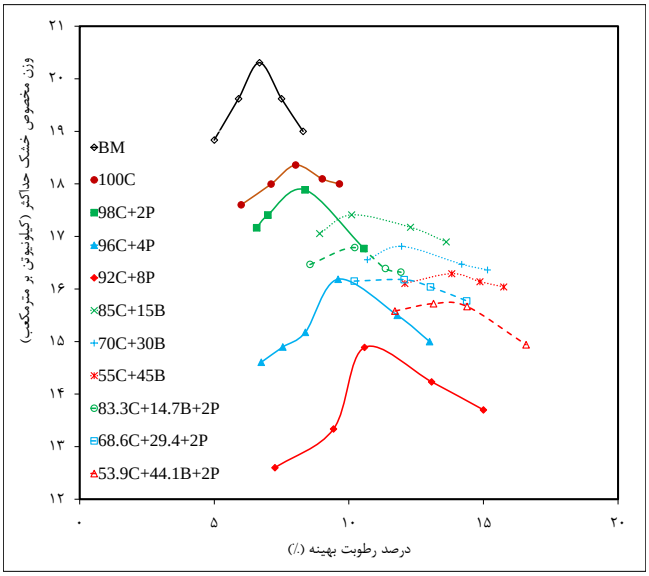
Table 3. Percentage of material mixture

PET	Crushed Brick	Recycled Concrete	CDW
0	0	100	100C
2	0	98	98C+2P
4	0	96	96C+4P
8	0	92	92C+8P
0	15	85	85C+15B
0	30	70	70C+30B
0	45	55	55C+45B
2	14.7	83.3	83.3C+14.7B+2P
2	29.4	68.6	68.6C+29.4B+2P
2	44.1	53.9	53.9C+44.1B+2P

جدول ۴: خلاصه نتایج آزمایش تراکم

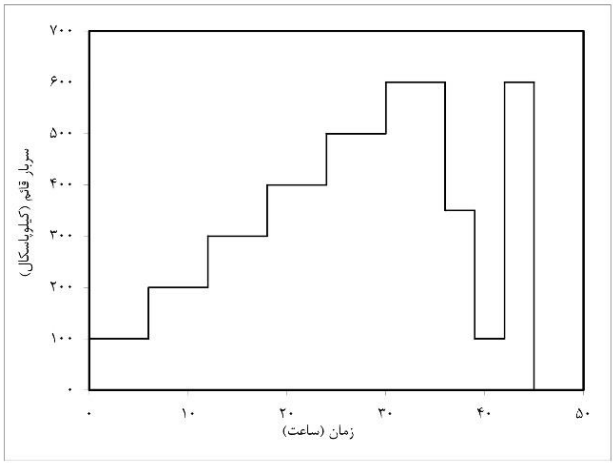
Table.4. Summary of the compaction test results

ω (%)	$\gamma_{d\,amx}$ $(\frac{kN}{m^3})$	CDW
6.68	20.31	BM
8.03	18.36	100C
8.37	17.85	98C+2P
9.60	16.19	96C+4P
10.58	14.89	92C+8P
10.10	17.41	85C+15B
11.96	16.81	70C+30B
13.83	16.29	55C+45B
10.22	16.79	83.3C+14.7B+2P
12.06	16.18	68.6C+29.4B+2P
14.39	15.75	53.9C+44.1B+2P



شکل ۴: منحنی تراکم اصلاح شده مصالح مورد آزمایش

Fig. 4. Modified compaction curve of CDW



شکل ۵: چگونگی بارگذاری قائم

Fig. 5. Vertical loading

۴- برنامه آزمون‌ها

با هدف بررسی تاثیر تغییرات رطوبت محیطی بر خواص مکانیکی و تراکم پذیری مصالح بازیافتی، آزمایش‌های ادومتر در دو حالت رطوبت بهینه و اشباع انجام شده است. احداث خاکریزها به روش تراکم مصالح با رطوبت بهینه انجام می‌شود. بنابراین آزمایش‌ها با رطوبت بهینه انجام شده است. همچنین رطوبت اشباع به عنوان حالت بحرانی درنظر گرفته شده و فاز ۲ آزمایش‌ها در حالت اشباع انجام شده است.

آزمایش ادومتر در ۲ مرحله انجام می‌شود: ۱. آماده سازی نمونه در داخل دستگاه؛ ۲. بارگذاری، باربرداری و بارگذاری مجدد. برای آماده سازی و ساخت نمونه ابتدا مصالح کاملاً خشک، مطابق درصد اختلاط ارائه شده در جدول (۳) ترکیب می‌شوند. سپس رطوبت بهینه به نمونه اضافه شده و آن را به هم زده تا رطوبت به صورت یکنواخت در کل نمونه پخش شود. با توجه به وزن مخصوص هر نمونه و ابعاد قالب، وزن مورد نیاز از مصالح مشخص می‌شود و در ۴ لایه یکسان داخل قالب تحکیم هیدرولیکی کوبیده می‌شود تا ارتفاع نمونه برابر ۳/۷۵ اینچ شود. در انتها سنگ متخلخل و کاغذ صافی روی نمونه قرار گرفته، کلاهک روسل بسته می‌شود و غشاء فوقانی پر از آب می‌شود.

در حالت رطوبت بهینه، پس از ساخت نمونه در داخل دستگاه و بستن کلاهک آن، تنش قائم ۱۰۰ کیلوپاسکال به نمونه اعمال می‌شود. همزمان با اعمال تنش مقدار نشست در زمان‌های مختلف ثبت می‌شود. بعد از اتمام تحکیم در گام اول، تنش قائم به صورت پله‌ای تا حداکثر تنش ۶۰۰ کیلوپاسکال به نمونه اعمال شده و جابه‌جایی قائم ثبت می‌شود. براساس نتایج اولیه مدت زمان هر مرحله بارگذاری ۶ ساعت لحاظ شده است. در شکل (۵) چگونگی بارگذاری قائم نشان داده شده است. در فاز دوم آزمایش، باربرداری در دو مرحله تا تنش ۱۰۰ کیلوپاسکال انجام می‌شود. در فاز سوم بارگذاری مجدد تا تنش ۶۰۰ کیلوپاسکال به نمونه اعمال می‌شود.

در حالت اشباع پس از ساخت نمونه در داخل دستگاه و بستن کلاهک آن، ابتدا آب از طریق شیر اعمال پس فشار به داخل نمونه وارد می‌شود. پس از پر شدن محفظه نمونه و خروج آب از شیر

زهکش، گذردهی آب از داخل نمونه به میزان دو برابر حجم نمونه انجام می‌شود. سپس شیر زهکش بسته می‌شود و نمونه شروع به اشباع شدن می‌کند. در ادامه با اندازه‌گیری فشار آب در محل شیر زهکش می‌توان با محاسبه نسبت افزایش فشار قائم به فشار آب منفذی، از اشباع بودن نمونه اطمینان حاصل نمود. پس از اشباع شدن نمونه، ادامه فرآیند مشابه آزمایش حالت رطوبت بهینه است و بار قائم به صورت پله‌ای به نمونه اعمال شده و جابه‌جایی قائم ثبت می‌شود [30].

در پایان آزمایش نمونه از دستگاه خارج شده و پس از خشک شدن، برای تعیین مقدار خردشدگی دانه‌بندی می‌شود.

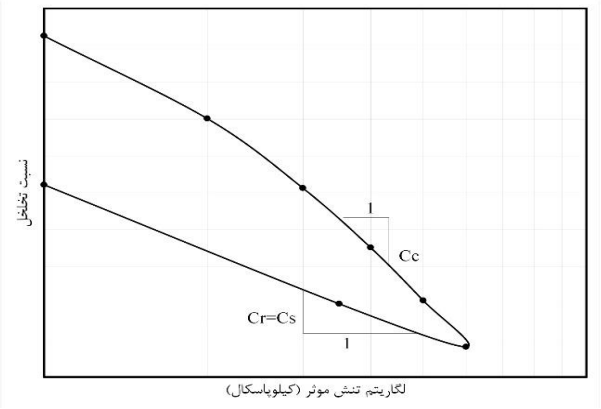
۵- ارائه نتایج و تفسیر

۵-۱- تراکم‌پذیری

ضرایب تراکم‌پذیری یکی از مشخصات مکانیکی خاک است که در طراحی سازه‌های مستقر روی خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مصالح دانه‌ای که دارای ذرات سخت هستند، تغییر حجم ناشی از حرکت، چرخش و باز آرایش ذرات است. اما در مصالح مانند نخاله ساختمانی تغییر حجم علاوه بر سازوکارهای بالا ناشی از خردشدگی و شکست ذرات است. همچنین در مصالح نرم مانند PET به علت مدول الاستیک کم، تغییر حجم ناشی از تغییرشکل ذرات است.

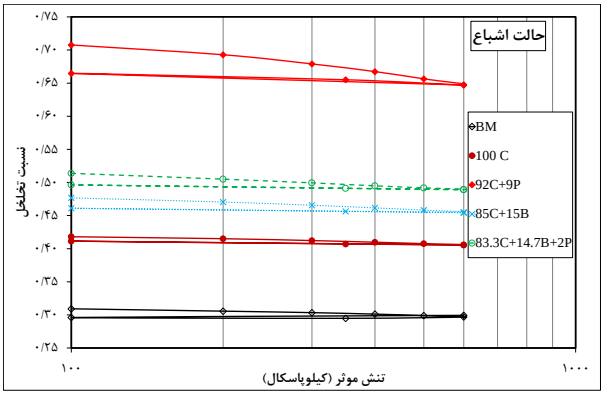
ضریب تراکم‌پذیری به صورت تغییر حجم بر اثر افزایش تنش تعریف می‌شود. ضرایب تراکم‌پذیری شامل ضریب فشردگی بارگذاری (Cc)، ضریب فشردگی باربرداری (Cs) و ضریب فشردگی بارگذاری مجدد (Cr) هستند. ضرایب تراکم‌پذیری براساس منحنی تحکیم در فضای نسبت تخلخل در برابر لگاریتم تنش موثر (e-$\log\sigma'$) بدست می‌آید. همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، منحنی تحکیم از دو بخش تقریبا خطی تشکیل شده است. شیب بخش اول به عنوان ضریب فشردگی بارگذاری و شیب بخش دوم ضریب فشردگی باربرداری (بارگذاری مجدد) تعریف می‌شود [38].

در این بخش نتایج آزمایش‌های ادومتر انجام شده روی نمونه‌های معرفی شده در جدول (۳) و نمونه مرجع BM ارائه شده است. منحنی‌های تحکیم مربوط به تعدادی از نمونه‌ها در فضای e-$\log\sigma'$ مربوط به حالت اشباع و رطوبت بهینه به ترتیب در شکل (۷ و ۸) نشان داده شده است.



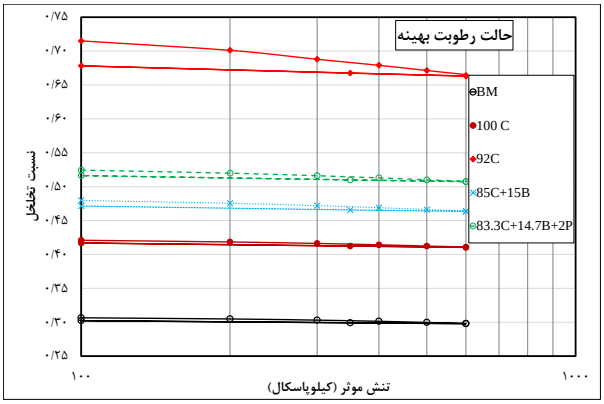
شکل ۶: تعریف ضریب فشردگی بارگذاری و ضریب فشردگی باربرداری (بارگذاری مجدد) در منحنی تحکیم

Fig. 6. Definition of the loading compressibility coefficient and the unloading compressibility coefficient (reloading) in the consolidation curve



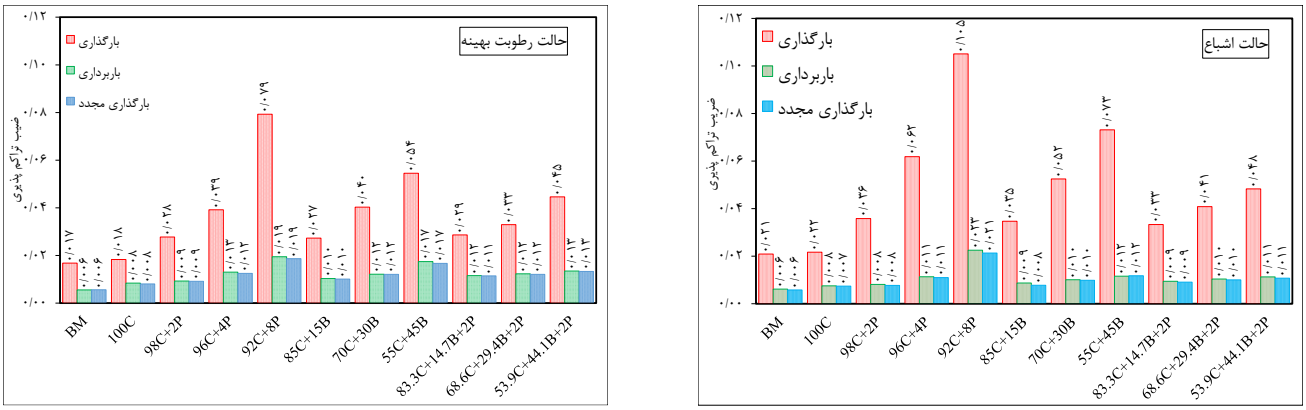
شکل ۷. منحنی‌های تحکیم در فضای لگاریتم تنش موثر در برابر نسبت تخلخل (حالت اشباع)

Fig. 7. Consolidation curves in the logarithmic space of effective stress versus void ratio (saturated condition)



شکل ۸. منحنی‌های تحکیم در فضای لگاریتم تنش موثر در برابر نسبت تخلخل (حالت رطوبت بهینه)

Fig. 8. Consolidation curves in the logarithmic space of effective stress versus void ratio (optimum moisture state)



شکل ۹. مقادیر ضرایب تراکم‌پذیری نمونه‌های مختلف: الف- حالت اشباع، ب. حالت رطوبت بهینه

Fig. 9. Values of compressibility coefficients for different samples: a. Saturated condition, b. Optimum moisture condition

جدول ۵: مقادیر نرمال شده ضرایب تراکم‌پذیری در دو حالت اشباع و رطوبت بهینه

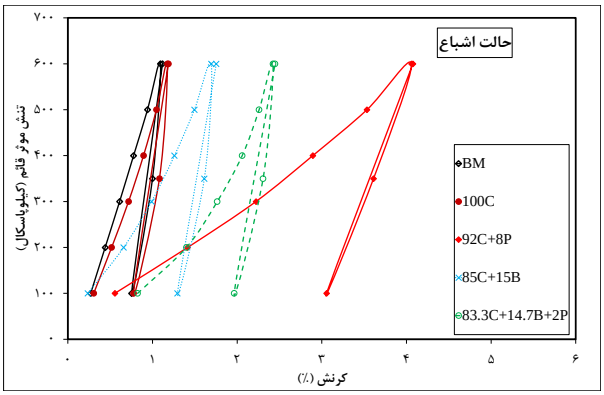
Table. 5. Normalized values of compressibility coefficients in two states: saturated and optimum moisture

optimum moisture			Saturated			CDW
Cs	Cr	Cc	Cs	Cr	Cc	
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	BM
1.44	1.51	1.09	1.29	1.23	1.04	100C
1.65	1.67	1.66	1.33	1.32	1.71	98C+2P
2.23	2.35	2.33	1.91	1.85	2.96	96C+4P
3.35	3.51	4.73	3.70	3.67	5.03	92C+8P
1.81	1.86	1.63	1.35	1.42	1.66	85C+15B
2.17	2.19	2.40	1.71	1.64	2.51	70C+30B
2.99	3.14	3.25	2.04	1.89	3.50	55C+45B
2.05	2.08	1.71	1.58	1.54	1.59	83.3C+14.7B+2P
2.17	2.22	1.96	1.74	1.70	1.95	68.6C+29.4B+2P
2.39	2.43	2.66	1.86	1.84	2.31	53.9C+44.1B+2P

در شکل (۹) مقادیر ضرایب تراکم‌پذیری نمونه‌های مختلف ارائه شده است که با نتایج مطالعات گذشته همخوانی دارد [39]. با مقایسه نتایج حالت اشباع و حالت رطوبت بهینه در مسیر بارگذاری، مشاهده می‌شود که تراکم‌پذیری در حالت رطوبت بهینه کمتر است. براساس مفاهیم مکانیک خاک غیراشباع، با کاهش درصد رطوبت به علت افزایش مکش بافتی، مقاومت و سختی خاک افزایش می‌یابد. بنابراین تراکم‌پذیری که از لحاظ مفهومی عکس سختی تعریف می‌شود، در نمونه‌های اشباع افزایش می‌یابد. اما در مسیر باربرداری و بارگذاری مجدد، تراکم‌پذیری نمونه‌های رطوبت بهینه بیشتر است. علت این پدیده با توجه به تفاوت خردشدگی نمونه‌ها در دو حالت رطوبت بهینه و اشباع قابل تفسیر است که در بخش ۴-۳ به آن اشاره خواهد شد. در مسیر باربرداری و بارگذاری مجدد، با توجه به خردشدگی بیشتر در حالت رطوبت بهینه، دانه‌بندی نمونه تغییر یافته و در نتیجه در مقایسه با آزمون حالت اشباع، ضریب تراکم‌پذیری بیشتر می‌شود.

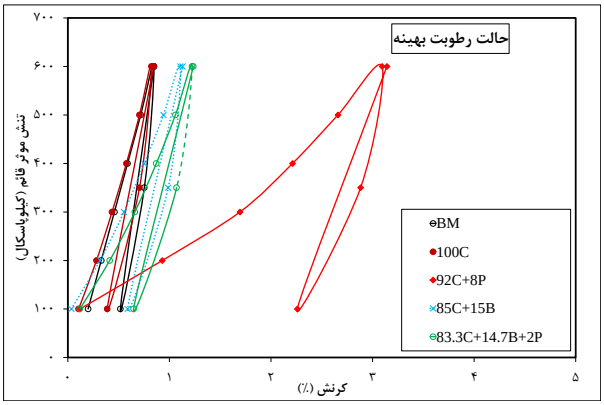
به منظور مقایسه ضرایب تراکم‌پذیری مصالح نخاله ساختمانی و مصالح طبیعی، مقادیر نسبت به مصالح مرجع (BM) نرمال شده و در جدول (۵) ارائه شده است. براساس این جدول موارد زیر را می‌توان مشاهده نمود:

- در نمونه 100C ضریب تراکم‌پذیری نسبت به مصالح طبیعی حدود ۶ درصد افزایش یافته است.
- با افزودن ۲، ۴ و ۸ درصد PET به بتن بازیافتی، ضریب تراکم‌پذیری نسبت به مصالح طبیعی به ترتیب ۶۸، ۱۶۵ و ۳۸۸ درصد افزایش یافته است. زیرا سختی مصالح PET در مقایسه با مصالح بتن بازیافتی کمتر است و با افزایش درصد آن تراکم‌پذیری نمونه‌ها افزایش می‌یابد.
- با افزودن ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درصد آجر به بتن بازیافتی، ضریب تراکم‌پذیری نسبت به مصالح طبیعی به ترتیب۶۴، ۱۴۶ و ۲۳۷ درصد افزایش یافته است. زیرا سختی مصالح آجری در مقایسه با مصالح بتن بازیافتی کمتر است و با افزایش درصد آن تراکم‌پذیری نمونه‌ها افزایش می‌یابد.
- در نمونه‌های S8 الی S10 که مشابه نمونه‌های S5 الی S7 هستند، افزودن ۲ درصد PET منجر به کاهش ضریب تراکم‌پذیری به مقدار حدود ۵۰ درصد می‌شود. زیرا PET مصالحی شکل‌پذیر و جاذب انرژی است. بنابراین وجود آن در ترکیب منجر به کاهش خردشدگی و در نتیجه کاهش تراکم‌پذیری می‌شود.



شکل ۱۰. منحنی‌های تحکیم در فضای $\sigma - \varepsilon$ (حالت اشباع)

Fig. 10. Consolidation curves in the σ-ε space (saturation state)



شکل ۱۱. منحنی‌های تحکیم در فضای $\sigma - \varepsilon$ (حالت رطوبت بهینه)

Fig. 11. Consolidation curves in σ-ε space (Optimum moisture state)

۵-۱- مدول الاستیک یک بعدی

مدول الاستیک یک بعدی یکی دیگر از پارامترهای خاک است که با کمک آزمایش ادومتر بدست می‌آید. برای محاسبه این پارامتر ابتدا براساس نتایج آزمایش، منحنی تنش موثر قائم در برابر کرنش محوری ($\sigma - \varepsilon$) رسم می‌شود. شیب خط بین هر دو نقطه از نمودار برابر مدول الاستیک یک بعدی در همان بازه است. مدول الاستیک یک بعدی درواقع مدول سکانتی بین دو نقطه مشخص از نمودار تنش-کرنش تعریف می‌شود که با رابطه زیر بدست می‌آید [39]:

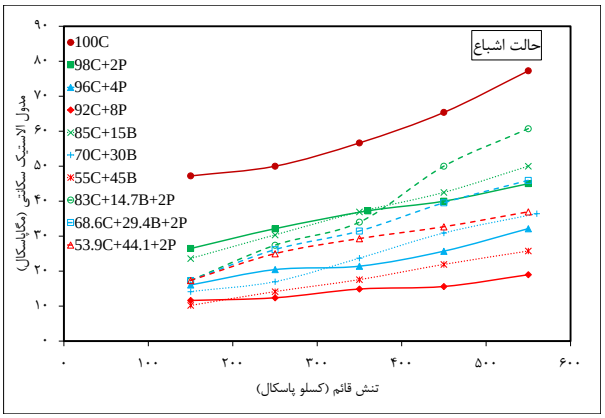
$$E_t = \frac{\Delta\sigma'}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_2' - \sigma_1'}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (۱)$$

در اشکال (۱۰ و ۱۱) نتایج تعدادی از آزمایش‌های ادومتر در فضای $\sigma - \varepsilon$ در دو حالت اشباع و رطوبت بهینه ارائه شده است.

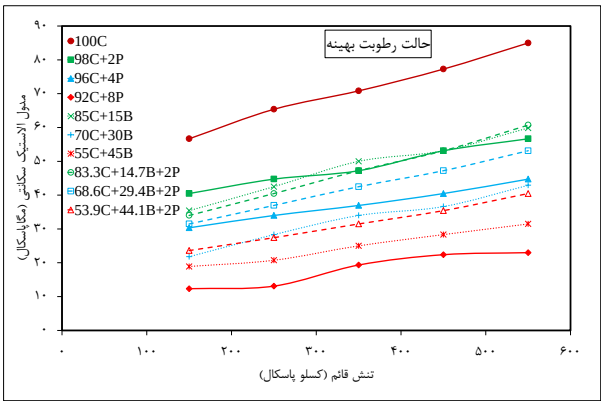
با هدف بررسی تاثیر سطح تنش بر سختی مصالح نخاله ساختمانی، مدول الاستیک یک بعدی سکانتی در سطوح مختلف تنش محاسبه شده است. مطابق شکل (۵)، آزمایش ادومتر در ۶ تنش مختلف انجام شده است. با کمک رابطه (۱) مقدار مدول الاستیک سکانتی میان هر دو سطح تنش متوالی محاسبه شده و به مقدار تنش متوسط دو گام بارگذاری متوالی، اختصاص می‌یابد. در شکل (۱۲) نمودار تغییرات مدول الاستیک یک بعدی سکانتی در برابر تنش قائم در دو حالت اشباع و رطوبت بهینه نشان داده شده است. براساس این شکل مشاهده می‌شود که:

- بطور کلی با افزایش سطح تنش مقدار سختی افزایش می‌یابد.
- بیشترین سختی مربوط به نمونه S1 با بیشترین مقدار بتن بازیافتی است. سختی نمونهS1 حدود ۶ درصد کمتر از مصالح طبیعی است. درحالی‌که کمترین مقدار مربوط به نمونه S4 با بیشترین درصد PET است.
- مقدار سختی مربوط به یک نمونه منحصر به فرد در حالت رطوبت بهینه بیشتر از حالت اشباع است. زیرا در حالت رطوبت بهینه سطح مکش بافتی افزایش یافته و مقاومت خاک افزایش می‌یابد.
- با افزایش درصد PET مدول الاستیک کاهش می‌یابد. با افزودن ۲، ۴ و ۸ درصد PET به ترتیب سختی حدود ۳۹، ۵۷ و ۷۶ درصد کاهش می‌یابد.
- با افزایش درصد آجرخردشده مدول الاستیک کاهش می‌یابد. با افزودن ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درصد آجرخردشده به ترتیب سختی ۳۹، ۵۹ و ۶۹ درصد کاهش می‌یابد.
- در نمونه‌های S8 الی S10 که مشابه نمونه‌های S5 الی S7 هستند، افزودن ۲ درصد PET منجر به افزایش ۱۵ درصد سختی می‌شود.
- همانطور که در بخش ۵-۲ به آن اشاره شد، وجود PET در ترکیب نخاله ساختمانی دارای تاثیر دوگانه است. از طرفی به علت سختی کم منجر به کاهش سختی ترکیب می‌شود. از طرف دیگر به علت شکل‌پذیر بودن از خردشدگی ذرات جلوگیری می‌کند.

همانطور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، در بیشتر نمونه‌ها رابطه خطی میان مدول الاستیک و سطح تنش برقرار است. در شکل (۱۳) برازش بهترین خط از میان داده‌های تجربی برای نمونه‌های S1 الی S4 نشان داده شده است. شیب خط (آهنگ تغییرات مدول الاستیک سکانتی در برابر تنش قائم) بیانگر میزان تاثیر سطح تنش بر مدول الاستیک است.



(الف)



(ب)

شکل ۱۲. نمودار تغییرات مدول الاستیک سکانتی در برابر تنش قائم

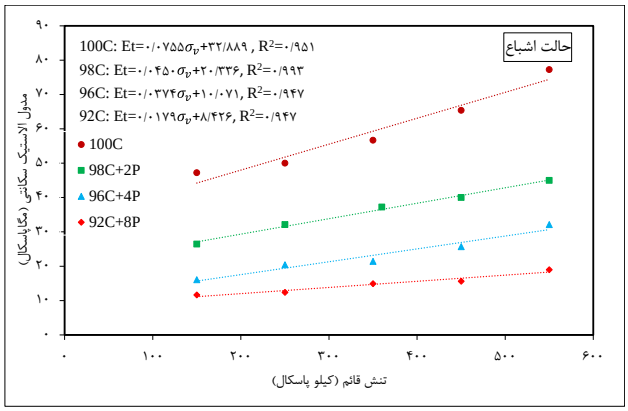
Fig. 12. Variations in the secant modulus against vertical stress

جدول ۶. آهنگ تغییرات مدول الاستیک سکانتی در برابر تنش قائم

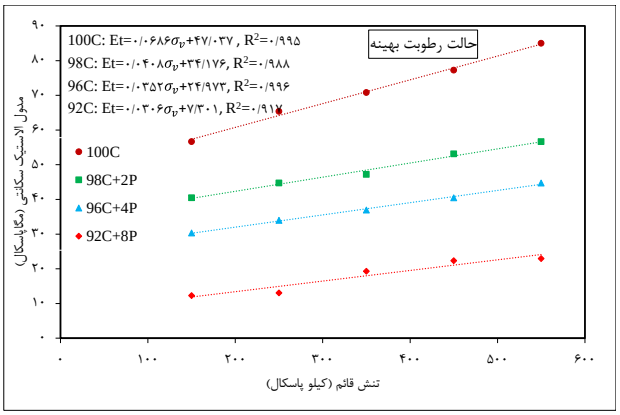
Table.6. The rate of variation of the secant modulus against vertical stress

The rate of variation of the secant modulus against vertical stress		CDW
optimum moisture	Saturated	
0.0686	0.0775	100C
0.0408	0.0450	98C+2P
0.0352	0.0374	96C+4P
0.0306	0.0179	92C+8P
0.0595	0.0649	85C+15B
0.0506	0.0573	70C+30B
0.0328	0.0389	55C+45B
0.0661	0.1093	83.3C+14.7B+2P
0.0536	0.0706	68.6C+29.4B+2P
0.0417	0.0469	53.9C+44.1B+2P

در جدول (۶) خلاصه نتایج مربوط به تعیین آهنگ تغییرات مدول الاستیک سکانتی در برابر تنش قائم، برای تمامی نمونه‌ها ارائه شده است. مقادیر این جدول بیانگر میزان تاثیر سطح تنش بر



(الف)



(ب)

شکل ۱۳. تعیین آهنگ تغییرات مدول الاستیک سکانتی در برابر تنش قائم

Fig. 13. determination of the rate of variation of the secant modulus against vertical stress

سختی مصالح است. همانطور که در جدول (۶) مشاهده می‌شود، می‌توان اشاره نمود:

- در نمونه‌های S1 الی S4 با افزایش درصد PET آهنگ تغییرات سختی کاهش می‌یابد. سختی پایین PET منجر به کاهش تاثیر سطح تنش بر سختی نمونه می‌شود.
- در نمونه‌های S1 و S5 الی S7 با افزایش درصد آجر، به علت افزایش خردشدگی ذرات، آهنگ تغییرات سختی نیز کاهش می‌یابد.
- در نمونه‌های S8 الی S10 که مشابه نمونه‌های S5 الی S7 هستند، افزودن ۲ درصد PET منجر به افزایش آهنگ تغییرات سختی می‌شود. زیرا افزودن PET به نمونه، مانع از خردشدگی و تغییر دانه‌بندی با افزایش سطح تنش می‌شود.
- برای یک نمونه منحصر به فرد، آهنگ تغییرات سختی در حالت اشباع بیشتر از حالت رطوبت بهینه است. زیرا در حالت رطوبت بهینه خرد شدگی ذرات بیشتر است و منجر به تغییر

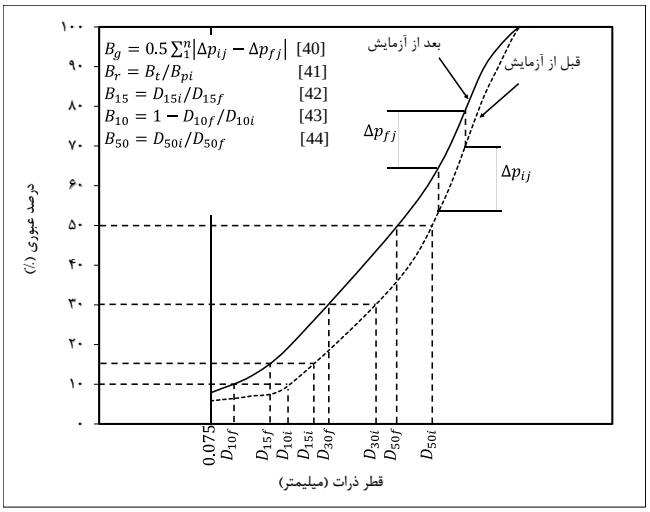
دانه‌بندی می‌شود. به عبارت دیگر در سطوح تنش بالا مصالح در حالت رطوبت بهینه دارای دانه‌بندی ریزتری نسبت به حالت اشباع است.

۵-۲- شاخص خردشدگی

شکست ذرات[1]، خرد شدن دانه‌های مصالح تحت تنش وارده است. برای تعیین شکست ذرات به صورت کمی شاخص‌های مختلفی معرفی شده است که با توجه به تغییر منحنی دانه‌بندی ذرات قبل و بعد از آزمایش بدست می‌آیند. مبنا شاخص‌های خردشدگی را می‌توان در ۴ دسته قرار داد: ۱. تغییر منحنی دانه‌بندی در چند اندازه ذره مشخص، ۲. تغییر در مساحت زیر منحنی دانه‌بندی، ۳. تغییر در مساحت ذرات خاک، ۴. نظریه فرکتال [40]. در شکل (۱۴) به صورت خلاصه ۵ روش مختلف برای تعیین شاخص خردشدگی نشان داده شده است [41].

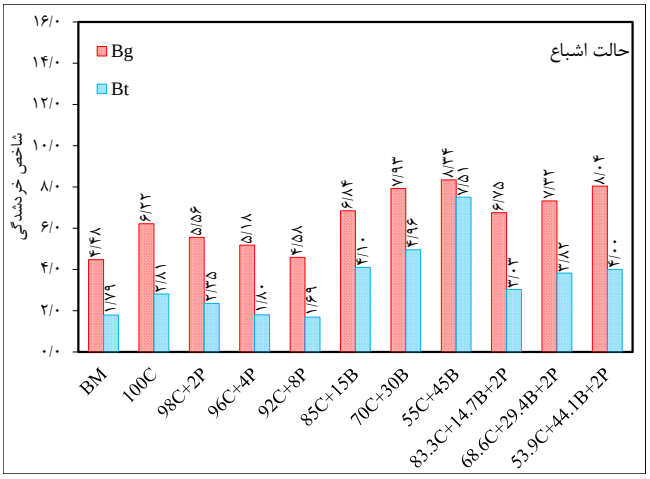
که در این روابط Δp_{ij} و Δp_{fj} به ترتیب اختلاف درصد عبوری ریزتر در منحنی دانه‌بندی اولیه و نهایی در الک سایز j است. B_{pi} و B_{pf} به ترتیب برابر مساحت محصور میان منحنی دانه‌بندی اولیه و نهایی با خط عبوری از قطر ذره ۰/۰۷۴ میلی‌متر است. در این پژوهش با هدف بررسی تاثیر PET و میزان رطوبت بر خردشدگی مصالح، شاخص خردشدگی با ۵ روش مختلف محاسبه شده است. در شکل (۱۵ و ۱۶) مقادیر شاخص خردشدگی بعد از آزمایش، مربوط به آزمون‌های ادومتر در دو حالت اشباع و رطوبت بهینه نشان داده شده است. براساس نتایج ارائه شده در این اشکال موارد زیر مشاهده می‌شود:

- کمترین و بیشترین خردشدگی به ترتیب مربوط به نمونه S4 (نمونه با بیشترین درصد PET) و نمونه S7 (نمونه با بیشترین درصد آجر) است.
- در نمونه‌های S1 و S5 الی S7 با افزایش درصد آجر خردشدگی افزایش می‌یابد. زیرا آجر نسبت به بتن مقاومت کمتری دارد. در نمونه‌های S8 الی S10 که مشابه نمونه‌های S5 الی S7 هستند با افزودن ۲ درصد PET به آن‌ها، منجر به کاهش شاخص خردشدگی به میزان حدود ۲۵ درصد شده است.

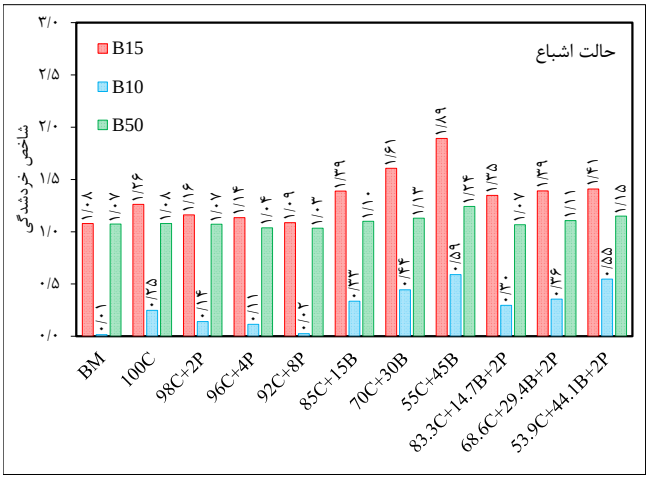


شکل ۱۴. تعریف شاخص خردشدگی بر اساس منحنی دانه‌بندی [42، 43، 44، 45، 46]

Fig. 14. Definition of the Particle Breakage based on the distribution curve



(الف)

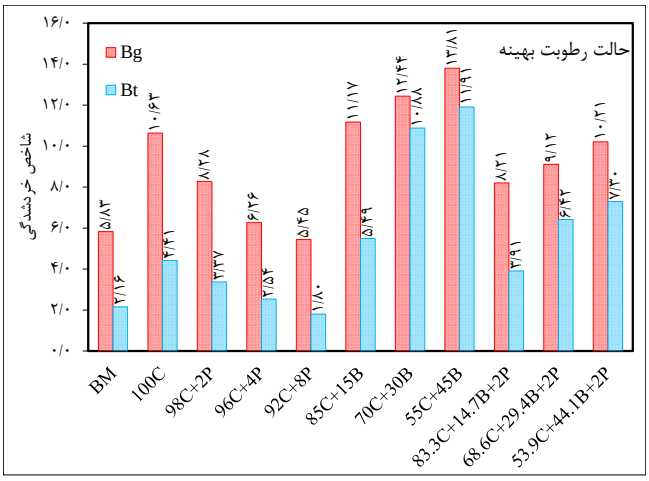


(ب)

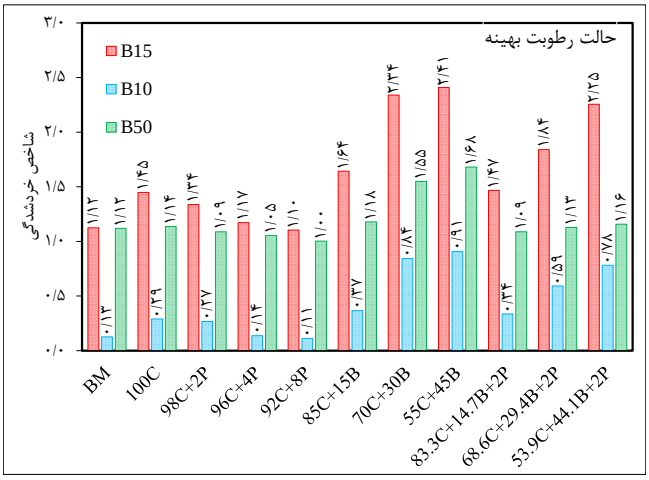
شکل ۱۵. مقادیر شاخص خردشدگی مربوط به آزمایش‌های ادومتر در حالت اشباع

Fig. 15. Particle breakage values related to oedometer tests in the saturated condition

[1] Particle Breakage



(الف)

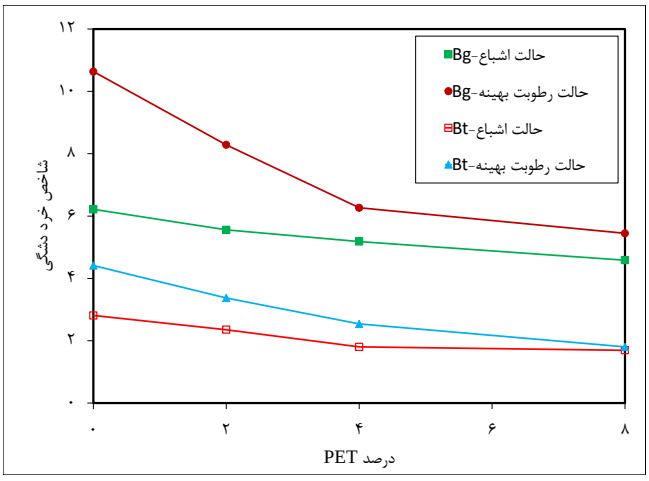


(ب)

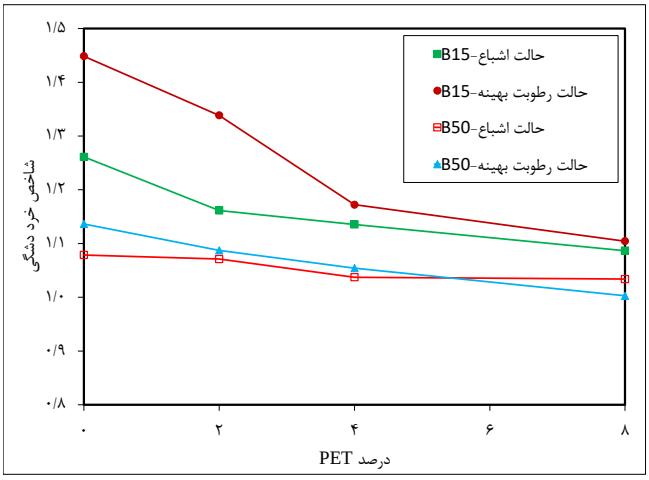
شکل ۱۶. مقادیر شاخص خردشدگی مربوط به آزمایش‌های ادومتر در حالت رطوبت بهینه

Fig. 16. Particle breakage values related to oedometer tests in the Optimum moisture state condition

- مقایسه شاخص خردشدگی برای هر نمونه منحصر به فرد در دو حالت اشباع و رطوبت بهینه نشان می‌دهد که در حالت اشباع خردشدگی کمتر است. زیرا وجود آب در منافذ، باعث روغن کاری سطح اتکا ذرات شده و در نتیجه تغییرشکل نمونه تحت تنش اعمالی، بیشتر ناشی از جابه‌جایی ذرات کنار یکدیگر است و خردشدگی کمتر می‌شود.
- در نمونه‌های S1 الی S4 با افزایش درصد PET شاخص خرد شدگی کاهش می‌یابد شکل (۱۷). زیرا مصالح PET دارای شکل‌پذیری بیشتری هستند. مشاهده می‌شود با افزایش درصد PET مقادیر شاخص خردشدگی حالت اشباع و رطوبت بهینه به یکدیگر نزدیک می‌شوند.



(الف)



(ب)

شکل ۱۷. تغییرات شاخص خردشدگی در برابر درصد PET

Fig. 17. Variations of the particle breakage against the PET

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش ضرایب تراکم‌پذیری و مدول الاستیک یک بعدی انواع نخاله‌های ساختمانی در مقایسه با مصالح طبیعی مورد ارزیابی قرار گرفته و تاثیر PET بر رفتار آن‌ها بررسی شده است. نخاله ساختمانی مورد بررسی شامل بتن بازیافتی و آجر خردشده است. در ابتدا نخاله‌های ساختمانی با درصدهای مختلف با یکدیگر ترکیب شدند و ۱۰ نمونه با درصد اختلاط متفاوت تهیه شده است. در ادامه نمونه‌ها تحت آزمایش ادومتر در حالت اشباع و رطوبت بهینه قرار گرفته است. در طول آزمایش تنش قائم معادل ۱۰۰ الی ۶۰۰ کیلو پاسکال به صورت پله‌ای به نمونه اعمال شده است. در پایان فرآیند آزمایش نیز باربرداری و بارگذاری مجدد انجام می‌گیرد. به صورت خلاصه نتایج زیر بدست آمده است:

- کمترین تراکم‌پذیری مربوط به نمونه S1 می‌شود که حدود ۶ درصد بیشتر از مصالح طبیعی است. بیشترین سختی نیز مربوط به نمونه S1 می‌شود که حدود ۶ درصد کمتر از مصالح طبیعی است. درحالیکه بیشترین تراکم‌پذیری و کمترین سختی مربوط به نمونه S4 با بیشترین درصد PET است.
- در نمونه‌های S1 الی S4 با افزایش درصد PET تراکم‌پذیری افزایش و سختی کاهش می‌یابد. با افزودن ۲، ۴ و ۸ درصد PET به بتن بازیافتی، ضریب تراکم‌پذیری نسبت به مصالح طبیعی به ترتیب ۶۸، ۱۶۵ و ۳۸۸ درصد افزایش یافته و سختی به ترتیب حدود ۳۹، ۵۷ و ۷۶ درصد کاهش می‌یابد.
- در نمونه‌های S1 و S5 الی S7 با افزایش درصد آجر خردشده تراکم‌پذیری افزایش و سختی کاهش می‌یابد. با افزودن ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درصد آجر به بتن بازیافتی، ضریب تراکم‌پذیری نسبت به مصالح طبیعی به ترتیب۶۴، ۱۴۶ و ۲۳۷ درصد افزایش یافته و سختی به ترتیب ۳۹، ۵۹ و ۶۹ درصد کاهش می‌یابد. بنابراین توصیه می‌شود درصد آجر خردشده در مصالح به مقدار ۳۰ درصد محدود شود.
- در نمونه‌های S8 الی S10 که مشابه نمونه‌های S5 الی S7 هستند، افزودن ۲ درصد PET منجر به ۵۰ درصد کاهش ضریب تراکم‌پذیری و ۱۵ درصد افزایش سختی می‌شود. بنابراین توصیه می‌شود درصورتی که در مصالح بازیافتی نخاله ساختمانی آجر خرد وجود دارد، ۲ درصدPET برای جلوگیری از خردشدگی و بهبود خواص مکانیکی مصالح افزوده شود.
- با مقایسه نتایج حالت اشباع و حالت رطوبت بهینه در مسیر بارگذاری، مشاهده می‌شود که در حالت رطوبت بهینه تراکم‌پذیری کمتر و سختی بیشتر است. اما در مسیر باربرداری و بارگذاری مجدد، با توجه به خردشدگی بیشتر در حالت رطوبت بهینه، دانه‌بندی نمونه تغییر یافته و در نتیجه در مقایسه با آزمون حالت اشباع، ضریب تراکم‌پذیری بیشتر و سختی کمتر می‌شود.
- در نمونه‌های S1 الی S4 با افزایش درصد PET آهنگ تغییرات سختی کاهش می‌یابد و در نمونه‌های S1 و S5 الی S7 با افزایش درصد آجرخردشده، آهنگ تغییرات سختی کاهش می‌یابد.
- برای یک نمونه منحصر به فرد، آهنگ تغییرات سختی در حالت اشباع بیشتر از حالت رطوبت بهینه است. زیرا در حالت رطوبت بهینه خرد شدگی ذرات بیشتر است. به عبارت دیگر در سطوح تنش بالا مصالح در حالت رطوبت بهینه دارای دانه‌بندی ریزتری نسبت به حالت اشباع است.
- براساس نتایج بدست آمده در این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت با انتخاب درصد اختلاط صحیح، می‌توان از نخاله ساختمانی به عنوان مصالح پرکننده در خاکریزی‌ها استفاده نمود.

قدردانی

از داوران محترم مقاله جهت بررسی آن سپاس‌گزاری می‌شود.

تعارض منافع

برای نویسندگان این مقاله با انتشار آن تعارض منافعی وجود ندارد.

نقش نویسندگان

سهم نویسندگان در این مقاله برابر است.

منابع مالی

در این پژوهش از منابع مالی شخص یا نهادی استفاده نشده است.

هوش مصنوعی

در این پژوهش از ابزار هوش مصنوعی استفاده نشده است.

References

[1] Aslam, M.S., Huang, B. and Cui, L., 2020. Review of construction and demolition waste management in China and USA. *Journal of Environmental Management*, 264, 110445. doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110445.

[2] Vieira, C.S. and Pereira, P.M., 2015. Use of recycled construction and demolition materials in geotechnical applications: a review. *Resources, Conservation and Recycling*, 103, pp.192–204. doi: 10.1016/j.resconrec.2015.07.023.

[3] Yang, C.-P., 2009. Composition of demolition wastes from Chi-Chi earthquake-damaged structures and the properties of their inert materials. *Canadian Geotechnical Journal*, 46, pp.470–481. doi: 10.1139/T08-131.

[4] Roque, A.J., Rodrigues, G.M. and da Silva, P.F., 2020.

Re-cycling of construction and demolition waste and steel slag: characterization of the durability. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 22, pp.1699–1711. doi: 10.1007/s10163-020-01061-y.

[5] Federal Highway Administration, 2004. *Transportation Applications of Recycled Concrete Aggregate: FHWA State of the Practice National Review*. Washington, DC: Federal Highway Administration.

[6] Lai, Y.-Y., Yeh, L.-H., Chen, P.-F., Sung, P.-H. and Lee, Y.-M., 2016. Management and recycling of construction waste in Taiwan. *Procedia Environmental Sciences*, 35, pp.723–730. doi: 10.1016/j.proenv.2016.07.077.

[7] Umar, U.A., Shafiq, N. and Ahmad, F.A., 2021. A case study on the effective implementation of the reuse and recycling of construction & demolition waste management practices in Malaysia. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(1), pp.283–291. doi: 10.1016/j.asej.2020.07.005.

[8] Li, Y., Zhou, H., Su, L., Hou, H. and Dang, L., 2017. Investigation into the application of construction and demolition waste in urban roads. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017, 9510212. doi: 10.1155/2017/9510212.

[9] Herrador, R., Pérez, P., Garach, L. and Ordóñez, J., 2012. Use of recycled construction and demolition waste aggregate for road course surfacing. *Journal of Transportation Engineering*, 138(2), pp.182–190. doi: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000320.

[10] Li, L., Qin, L., Xiao, H., Hu, Z., Xu, G. and Ma, Q., 2020. The triaxial test of construction and demolition (C&D) materials with different particle sizes and sand contents. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, pp.1–22. doi: 10.1080/19648189.2020.1820908.

[11] Li, Z., Yan, S., Liu, L. and Yang, J., 2020. Investigation into creep characteristics and model of recycled construction and demolition waste used in embankment filler. *Sustainability*, 12(5), 1924. doi: 10.3390/su12051924.

[12] Anita, A. and Divya, P.V., 2024. Construction and demolition waste as a sustainable backfill for geosynthetic-reinforced MSE walls. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 10, 36, pp.1–14. doi: 10.1007/s40891-024-00539-1.

[13] Cheshomi, A., Sabzi, Z. and Ramezannejad, R.S., 2020. Stabilization of a deep excavation using demolition and construction waste materials. *Engineering Geology*, 13, pp.47–59. (In Persian).

[14] Gabryś, K., Radzevičius, A., Szymański, A. and Šadzevičius, R., 2021. Shear strength characteristics of recycled concrete aggregate and recycled tire waste mixtures from monotonic triaxial tests. *Materials*, 14(23), 7400. doi: 10.3390/ma14237400.

[15] Naeini, M., Mohammadinia, A., Arulrajah, A. and Horpibulsuk, S., 2021. Recycled glass blends with recycled concrete aggregates in sustainable railway geotechnics. *Sustainability*, 13(5), 2463. doi: 10.3390/su13052463.

[16] Naeini, M., Mohammadinia, A., Arulrajah, A. and Horpibulsuk, S., 2021. Stress-dilatancy responses of recovered plastics and demolition waste blends as a construction material. *Construction and Building Materials*, 297, 123762. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123762.

[17] Sharma, A. and Sharma, R.K., 2020. Strength and drainage characteristics of poor soils stabilized with construction demolition waste. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38, pp.4753–4760. doi: 10.1007/s10706-020-01324-3.

[18] Naeini, M., Mohammadinia, A., Arulrajah, A., Horpibulsuk, S. and Leong, M., 2019. Stiffness and strength characteristics of demolition waste, glass and plastics in railway capping layers. *Soils and Foundations*, 59, pp.2238–2253. doi: 10.1016/j.sandf.2019.12.009.

[19] Arulrajah, A., Piratheepan, J., Aatheesan, T. and Bo, M., 2011. Geotechnical properties of recycled crushed brick in pavement applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23, pp.1444–1452. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000319.

[20] Arulrajah, A., Piratheepan, J., Ali, M.M. and Bo, M., 2012. Geotechnical properties of recycled concrete aggregate in pavement sub-base applications. *Geotechnical Testing Journal*, 35, pp.743–751. doi: 10.1520/GTJ103402.

[21] Arulrajah, A., Piratheepan, J., Bo, M. and Sivakugan, N., 2012. Geotechnical characteristics of recycled crushed brick blends for pavement sub-base applications. *Canadian Geotechnical Journal*, 49, pp.796–811. doi: 10.1139/t2012-041.

[22] Moreira, E.B., Baldovino, J.A. and Izzo, R.L.S., 2023. Transforming construction and demolition waste into soft-soil treatment for paving design. *Geotechnical and Geological Engineering*, 41, pp.4321–4334. doi: 10.1007/s10706-023-02503-8.

[23] Sharma, A. and Sharma, R., 2019. Effect of addition of construction–demolition waste on strength characteristics of high plastic clays. *Innovative Infrastructure Solutions*, 4, pp.1–11. doi: 10.1007/s41062-019-0216-1.

[24] Ouslimane, N., Barebita, H. and Belfaquir, M., 2023. Recovery and valorization of crushed concrete and glass waste in road construction in Morocco. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8, 239. doi: 10.1007/s41062-023-01198-3.

[25] Puthussery, J.V., Kumar, R. and Garg, A., 2017. Evaluation of recycled concrete aggregates for their suitability in construction activities: an experimental study. *Waste Management*, 60, pp.270–276. doi: 10.1016/j.wasman.2016.06.008.

[26] Cho, Y.-H. and Yeo, S.-H., 2004. Application of recycled waste aggregate to lean concrete subbase in

highway pavement. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 31, pp.1101–1108. doi: 10.1139/l04-088.

[27] Khojasteh Zinjanab, T., Ahmadi, H.R. and Rezaie, M., 2024. Production of green sand-cement mortar: a new strategy to reduce environmental pollution caused by cigarette butts. *Innovative Infrastructure Solutions*, 9, 342. doi: 10.1007/s41062-024-01643-x.

[28] Ahmadi, H.R., Rezaie, M. and Khojasteh Zinjanab, T., 2024. Using cellulose acetate fibers to product eco-friendly concrete: a new strategy to reduce environmental pollution. *Structural Engineering and Mechanics*, 92(1), pp.89–97. doi: 10.12989/sem.2024.92.1.089.

[29] Soleimanbeigi, A. and Edil, T.B., 2015. Compressibility of recycled materials for use as highway embankment fill. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141, 04015011. doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001285.

[30] Rowe, P.W. and Barden, L., 1966. A new consolidation cell. *Géotechnique*, 16(2), pp.162–170. doi: 10.1680/geot.1966.16.2.162.

[31] Ata, A., Mashhour, M. and Aly, A., 2007. The use of Rowe cell test results in predicting collapse settlement of soils. In: *Proceedings of the 3rd Asian Conference on Unsaturated Soils*. Beijing, China: Science Press, pp.169–172.

[32] Bolouri Bazaz, J. and Khayati, M., 2012. Properties and performance of concrete made with recycled low-quality crushed brick. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(4), pp.330–338. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000385.

[33] KomakPanah, A. and Majidi, M.A., 2010. Creep of gravel materials in a large-scale oedometer device with an approach to particle breakage phenomenon and Los Angeles test. *Omran Modares*, 10. (In Persian).

[34] *General Technical Specifications of the Road, No. 101*. (In Persian).

[35] ASTM, 2006. *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. C136-06. West Conshohocken, PA: ASTM International.

[36] ASTM, 2015. *ASTM C127: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. West Conshohocken, PA: ASTM International.

[37] ASTM, 2012. *ASTM D1557: Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³))*. West Conshohocken, PA: ASTM International.

[38] ASTM, 2011. *ASTM D2435: Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading*. West Conshohocken, PA: ASTM International.

[39] Gabryś, K., 2023. Experimental research on compressibility characteristics of recycled concrete aggregate: recycled tire waste mixtures. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, pp.1–12. doi: 10.1007/s10163-023-01694-9.

[40] Yu, F., 2021. Particle breakage in granular soils: a review. *Particulate Science and Technology*, 39, pp.91–100. doi: 10.1080/02726351.2019.1666946.

[41] Khonji, A., Bagherzadeh-Khalkhali, A. and Aghaei-Araei, A., 2020. Experimental investigation of rockfill particle breakage under large-scale triaxial tests using five different breakage factors. *Powder Technology*, 363, pp.473–487. doi: 10.1016/j.powtec.2020.01.032.

[42] John, N.J., Khan, I., Kandalai, S. and Patel, A., 2023. Particle breakage in construction materials: a geotechnical perspective. *Construction and Building Materials*, 381, 131308. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131308.

[43] Lade, P.V., Yamamuro, J.A. and Bopp, P.A., 1996. Significance of particle crushing in granular materials. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(4), pp.309–316. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:4(309).

[44] Marsal, R.J., 1967. Large scale testing of rockfill materials. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 93(2), pp.27–43. doi: 10.1061/JSFEAQ.0000958.

[45] Xiao, Y., Liu, H., Chen, Y. and Jiang, J., 2014. Strength and deformation of rockfill material based on large-scale triaxial compression tests. I: Influences of density and pressure. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(12), 04014070. doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001176.

[46] Lee, K.L. and Farhoomand, I., 1967. Compressibility and crushing of granular soil in anisotropic triaxial compression. *Canadian Geotechnical Journal*, 4, pp.68–86. doi: 10.1139/t67-012.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Ekramifard, A. and Akhtarpour, A., 2027. Investigation of the characteristics of compressibility and Elastic modulus of the mixtures containing recycled concrete, crushed bricks, and PET for use as fill in embankments. *Modares Civil Engineering journal*, 26(6), pp.21-36.