



University Of Qom



Mechanical Performance of Roller-compacted Concrete Containing Recycled Asphalt Aggregate and Nano-Silica

Mahmoud Malakouti Olounabadi¹, Milad Jahanbazi Goojani², Seyed Shaker Hashemi³,
Babak Golchin⁴, Ramin Meshkabadi⁵

1. Corresponding author, Department of Civil Engineering, Persian Gulf University, Bushehr, Iran. E-mail: malakooti@pgu.ac.ir
2. Department of Civil Engineering, Persian Gulf University, Bushehr, Iran. E-mail: jahanbazi18.milad@gmail.com
3. Department of Civil Engineering, Persian Gulf University, Bushehr, Iran. E-mail: sh.hashemi@pgu.ac.ir
4. Department of Civil Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: b.golchin@uma.ac.ir
5. Faculty of Advanced Technologies, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: r_meshkabadi@uma.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 18 Sep 2024
Revised 01 Nov 2024
Accepted 05 Dec 2024
Published 08 Dec 2024

Keywords:

Roller-Compacted Concrete,
Recycled Asphalt Aggregate,
Nano-silica,
Optimal Humidity,
Resistance.

ABSTRACT

Roller-compacted concrete, a type of concrete with zero slump, is being used in road pavement construction. The use of recycled asphalt in roller-compacted concrete is an environmental approach for reducing emissions. This study examines the impact of recycled asphalt aggregate and nano-silica on the strength behavior of roller-compacted concrete. Cylindrical samples were fabricated to determine optimal moisture content and maximum dry density. The compressive strength, along with stress and strain curves at optimal moisture, were evaluated. Additionally, the surface area under the stress-strain curve and energy absorption were measured. Results indicate that adding asphalt aggregates decreases the optimal moisture content in roller-compacted concrete. Conversely, nano-silica increases the optimal moisture content and enhances the maximum dry density of the samples. Replacing recycled asphalt with coarse aggregate revealed a decrease in compressive strength of roller-compacted concrete samples at both 7 and 90 days. Moreover, nano-silica did not improve the reduced compressive strength, with its negative impact being more pronounced at 90 days than at 7 days. The study also found that recycled asphalt increases the area under the stress-strain curve and enhances energy absorption. However, adding nano-silica to control samples and those with recycled asphalt does not improve ductility or energy absorption.

Cite this article: Malakouti Olounabadi M, Jahanbazi Goojani M, Hashemi SSH, Golchin B, Meshkabadi R. Mechanical Performance of Roller-Compacted Concrete Containing Recycled Asphalt Aggregate and Nano-Silica. *Civil Infrastructure Researches*. 2024; 10(2): 179-199. <https://doi.org/10.22091/cer.2024.11343.1575>



بررسی رفتار مقاومتی بتن غلتکی حاوی مصالح خرده آسفالت بازیافتی و نانوسیلیس

محمود ملکوتی علون‌آبادی^۱✉، میلاد جهانبازی گوجانی^۲، سید شاکر هاشمی^۳، بابک گلچین^۴، رامین مشک‌آبادی^۵

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران. رایانامه: malakooti@pgu.ac.ir

۲. گروه مهندسی عمران، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران. رایانامه: jahanbazi18.milad@gmail.com

۳. گروه مهندسی عمران، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران. رایانامه: sh.hashemi@pgu.ac.ir

۴. گروه مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: b.golchin@uma.ac.ir

۵. دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: r_meshkabadi@uma.ac.ir

چکیده

بتن غلتکی، بتنی با اسلامپ صفر است که کاربرد آن در روسازی راه‌ها، رو به افزایش است. از طرفی، استفاده از خرده آسفالت بازیافتی در بتن غلتکی راهکاری زیست‌محیطی برای کاهش آلاینده‌گی‌ها می‌باشد. در این تحقیق، اثر خرده آسفالت و نانوسیلیس بر رفتار مقاومتی بتن غلتکی بررسی شده است. بدین منظور، نمونه‌های استوانه‌ای، برای تعیین رطوبت بهینه و وزن مخصوص تهیه شده، سپس مقاومت فشاری نمونه‌ها و منحنی تنش و کرنش آنها در رطوبت بهینه به‌دست آمده است. آنگاه مقدار سطح زیر نمودار تنش-کرنش و مقدار جذب انرژی اندازه‌گیری گردیده است. نتایج نشان داده است که افزودن خرده آسفالت، مقدار رطوبت بهینه در ساخت نمونه‌های بتن غلتکی را کاهش می‌دهد. در نقطه مقابل، افزودن نانوسیلیس میزان رطوبت بهینه نمونه‌ها را افزایش داده و حداکثر وزن مخصوص خشک آن‌ها را بیشتر می‌نماید. جایگزین کردن خرده آسفالت به‌جای مصالح سنگی نشان داده است که مقاومت فشاری نمونه‌های بتن غلتکی در سن ۷ و ۹۰ روزه کاهش می‌یابد. از طرفی نانوسیلیس نتوانسته است مقاومت فشاری کاهش یافته را بهبود دهد، به‌طوری که تأثیر منفی نانوسیلیس بر مقاومت فشاری در سن ۹۰ روزه بیشتر از سن ۷ روزه است. در این پژوهش مشاهده شده است که افزودن خرده آسفالت سطح زیر نمودار تنش-کرنش را افزایش داده و میزان جذب انرژی را بهبود می‌دهد. در نقطه مقابل، افزودن نانوسیلیس به نمونه شاهد و نمونه‌های حاوی خرده آسفالت، شکل‌پذیری و میزان جذب انرژی را افزایش نمی‌دهد.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۲۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۱۸

کلیدواژه‌ها:

بتن غلتکی،
خرده آسفالت بازیافتی،
نانوسیلیس،
رطوبت بهینه،
مقاومت.

استناد: ملکوتی علون‌آبادی محمود، جهانبازی گوجانی میلاد، هاشمی سید شاکر، گلچین بابک، مشک‌آبادی رامین. بررسی رفتار مقاومتی بتن غلتکی حاوی مصالح خرده آسفالت بازیافتی و نانوسیلیس. پژوهش‌های زیرساخت‌های عمرانی، ۱۴۰۳؛ (۲)۱۰: ۱۷۹-۱۹۹.

<https://doi.org/10.22091/cer.2024.11343.1575>

۱- مقدمه

دوام آن است. تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که در یک بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۵۵ فاکتور کارایی سیلیس بین سه تا چهار کیلوگرم است. این فاکتور بدین معنی است که یک کیلوگرم نانوسیلیس می‌تواند جایگزین سه تا چهار کیلوگرم سیمان شود بدون آنکه در مقاومت بتن اثر بگذارد. از آنجا که ذرات نانوسیلیس ۱۰۰ تا ۱۵۰ مرتبه کوچک‌تر از ذرات سیمان هستند می‌توانند فضای خالی بین مواد تشکیل‌دهنده بتن را پر نموده و سبب کاهش چشمگیر در قابلیت نفوذ در بتن شوند. از طرفی، توزیع مناسب نانومواد، باعث افزایش ویسکوزیته بتن شده، مانع جدا شدن مواد تشکیل‌دهنده در بتن گردیده و چسبندگی بتن را افزایش می‌دهند. استفاده از نانومواد باعث پر شدن فضای خالی مابین ذرات سیمان شده، مصرف آب را کاهش داده و مانع گیر افتادن آب به حالت آزاد در بتن می‌شوند. در نتیجه، از ایجاد ترک در محل‌های اتصال بتن به سازه‌های صیقلی جلوگیری کرده و باعث بهبود خواص کششی آن‌ها می‌شوند [۶].

ماه‌سوران و همکاران مطالعه‌ای بر روی اثر نانوسیلیس در بتن انجام دادند. در این مطالعه، اثر پر کردن منافذ و خاصیت پوزولانی سیمان و نانومواد در بهبود ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی بررسی شد. نتایج مطالعه بهبود در میزان نفوذپذیری، مقاومت و دوام را نشان دادند [۷].

منجم و همکاران، مطالعه‌ای تحت عنوان بررسی تأثیر دوده سیلیس بر خصوصیات بتن غلتکی روسازی راه‌ها انجام دادند. در این مطالعه، اثر این ماده بر مقاومت فشاری، کششی، خمشی، انقباض و نفوذپذیری بتن غلتکی بررسی شد. نتایج مطالعه ایشان، اثر قابل توجه این ماده را در ویژگی‌های فیزیکی مخلوط‌های بتن غلتکی نشان داد [۸]. شیرگیر، به صورت آزمایشگاهی اثر نانوسیلیس را بر خواص مکانیکی روسازی بتنی ارزیابی کرد. نتایج نشان داد که اثر نانوسیلیس بر خواص مکانیکی بتن بیشتر از اثر میکروسیلیس است. همچنین استفاده از مقدار بهینه نانوسیلیس، مقاومت خمشی و فشاری نمونه‌ها را به ترتیب ۵۶ و ۴۲ درصد افزایش می‌دهد. وی مشاهده

روسازی بتن غلتکی از انواع روسازی‌های صلب است که به خاطر سرعت بخشیدن در ساخت رویه و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری می‌تواند به عنوان گزینه مناسب برای ادارات راه مطرح شود [۱]. بتن غلتکی، بتن بدون اسلیمی است که قبل از گیرش می‌تواند وزن غلتک‌هایی را که برای تراکم در آن به کار می‌رود، تحمل کند [۲]. از ویژگی‌های ساخت بتن غلتکی که منطبق بر اصول مربوط به ساخت سازه‌های خاک-سیمان است، سرعت بخشیدن به عملیات اجرایی است. از مزایای دیگر استفاده از بتن غلتکی می‌توان به هزینه کمتر در ساخت آن اشاره کرد؛ در رویه‌های بتن غلتکی از میلگرد برشی، میلگرد مسلح‌کننده و قالب استفاده نمی‌شود. این موضوع، باعث کاهش هزینه قابل توجهی نسبت به رویه‌های معمولی و سنتی می‌گردد.

علم نانو زمینه‌ای فرارشته‌ای است که علوم و صنایع مختلف مانند مهندسی عمران را تحت تأثیر قرار داده است [۳]. در سال‌های اخیر، فناوری نانو، امیدهای زیادی را در بهبود خواص مواد مختلف به وجود آورده است. در پژوهش‌های مختلف، اثر استفاده از نانومواد بر روی خواص مکانیکی و فیزیکی در نمونه‌های بتنی صورت گرفته که تمرکز بیشتر این پژوهش‌ها بر روی استفاده از نانوسیلیس، اکسید آلومینیوم و اکسیدهای آهن و روی بوده است [۴] و [۵]. امروزه استفاده از نانوسیلیس در صنایع مختلف از جمله صنایع مرتبط با مهندسی عمران بسیار مورد توجه قرار گرفته است. خاصیت پوزولانی نانوسیلیس، ناشی از واکنش دی‌اکسیدسیلیسیم با هیدروکسیدکلسیم است که منجر به تشکیل ژلی با چسبندگی زیاد می‌شود. با مصرف هیدروکسیدکلسیم از اثر مخرب آن در ملات سیمان جلوگیری می‌شود، زیرا هیدروکسیدکلسیم موجود در ملات سیمان در معرض حملات شیمیایی قلیایی قرار گرفته و باعث تخریب بتن می‌شود. اثر دیگر تشکیل ژل با چسبندگی زیاد، بالا بردن مقاومت در سنین اولیه بتن و

آسفالتی می‌تواند استفاده شود. گاه‌ها تحلیل‌های فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی موجب می‌شود این ماده در تولید بتن استفاده شود. بهبود کارایی بتن، هزینه پایین این مواد در مقایسه با مصالح سنگی با کیفیت و نیز استفاده مجدد از مصالح در راستای اهداف توسعه پایدار دلایلی هستند که استفاده از خرده آسفالت بازیافتی را در بتن توجیه می‌کنند. در سال‌های اخیر، پژوهش‌های مختلفی در خصوص کاربرد این ماده در بتن غلتکی صورت گرفته است. پژوهشگران مطالعاتی با هدف ارزیابی رفتار بتن غلتکی حاوی خرده آسفالت و الیاف فولادی برای استفاده در لایه اساس راه‌ها انجام دادند. در این پژوهش، مصالح سنگی به مقدار صفر، ۴۰ و ۸۰ درصد وزنی با خرده آسفالت جایگزین شدند. عیار بتن برابر با ۲۸۰ و نسبت آب به سیمان ۰/۵۱ انتخاب گردید. نتایج نشان داد که افزایش مقدار خرده آسفالت می‌تواند مقاومت بتن را کاهش دهد. همچنین استفاده از خرده آسفالت باعث افزایش تغییرات مدول سختی با تغییر دما و فرکانس بارگذاری شود [۱۷]. فریب^۳ و همکاران، به بررسی نحوه شکست مخلوط بتنی حاوی خرده آسفالت بازیافتی پرداختند. در این پژوهش، مقاومت فشاری و کششی مورد بررسی قرار گرفت. مقدار خرده آسفالت مورد استفاده در این پژوهش برابر با ۱۶ درصد وزنی کل مصالح سنگی بود. نتایج کاهش مقاومت بتن را در حضور خرده آسفالت بازیافتی نشان داد [۱۸]. مدرس و حسینی، به بررسی تأثیر استفاده از خرده آسفالت و خاکستر پسته برنج در بتن غلتکی پرداختند. چهار ترکیب برای مصالح سنگی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین سیمان مورد استفاده نیز به مقدار سه و پنج درصد با خاکستر پسته برنج جایگزین شد. نتایج نشان داد که استفاده از خرده آسفالت باعث کاهش مقدار رطوبت بهینه و چگالی خشک می‌شود [۱۹]. در یک مطالعه دیگر، اثر خرده آسفالت

کرد که در شرایط یکسان، میکروسلیس اثر کاهنده بیشتری بر نفوذپذیری بتن متخلخل نسبت به نانوسلیس دارد [۹]. سیف‌الهی و محمدی از نانوسلیس در حضور الیاف فولادی در بتن غلتکی استفاده نمودند. نتایج کارهای آزمایشگاهی ایشان نشان داد که افزودن نانوسلیس به بتن غلتکی موجب افزایش مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی به ترتیب به میزان ۶/۸، ۱۳/۸ و ۱۱/۲ درصد می‌گردد [۱۰]. همالازا^۱ و همکاران، اثر نانوسلیس و الیاف طبیعی را بر مقاومت فشاری بتن غلتکی بررسی نمودند. نتایج نشان داد که استفاده از دو درصد نانوسلیس به همراه ۱/۵ درصد الیاف طبیعی، یک ترکیب بهینه برای رسیدن به بیشترین مقاومت فشاری در بتن غلتکی می‌باشد [۱۱]. امیری و همکاران، اثر اندازه و مقدار نانوسلیس را بر مقاومت فشاری و دوام بتن غلتکی در شرایط ذوب و یخبندان بررسی نمودند. در این پژوهش، نمونه‌های حاوی نانوسلیس، مقاومت و دوام بیشتری نسبت به بتن غلتکی بدون افزودنی نشان دادند [۱۲]. الطالب و همکاران، اثر نانوسلیس و الیاف فلزی را بر رفتار دینامیکی و استاتیکی بتن سبک سازه‌ای بررسی کردند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که سه درصد نانوسلیس به همراه یک درصد الیاف فولادی مقاومت فشاری بیشینه را برای بتن سبک نشان می‌دهد [۱۳]. آدامو^۲ و همکاران از روش بهینه‌سازی چندمعیاره برای شناسایی ترکیب بهینه بتن غلتکی حاوی نانوسلیس و پودر لاستیک استفاده کردند. ایشان ترکیب یک درصد نانوسلیس و صفر درصد پودر لاستیک را در بتن غلتکی به عنوان ترکیب بهینه معرفی کردند [۱۴].

یک روش در تعمیر و نگهداری راه‌های آسفالتی، تراش دادن تمام یا بخشی از رویه آسفالت قدیمی و جایگزین کردن آن با مصالح آسفالتی جدید است [۱۵] و [۱۶]. خرده آسفالت بازیافتی مجدداً در تهیه مخلوط‌های

^۱- Hemalatha

^۲- Adamu

^۳- Ferrebee

از این مقادیر، امکان‌سنجی استفاده حداکثری از خرده آسفالت در بتن غلتکی است. از آنجا که در تحقیقات گذشته، افت پارامترهای مقاومتی به دلیل حضور خرده آسفالت گزارش شده است، اثر نانوسیلیس بر احتمال بهبود مقاومت این نوع از بتن‌های غلتکی بررسی می‌گردد. بدین منظور، ابتدا رطوبت بهینه برای تهیه تک‌تک نمونه‌های بتن غلتکی حاوی خرده آسفالت بازیافتی و نانوسیلیس به دست می‌آید. آنگاه تغییرات مقدار تنش و کرنش بر اثر اعمال بار قائم فشاری بر نمونه‌های ساخته شده در رطوبت بهینه ثبت می‌شود و سپس تحلیل‌های لازم بر مقدار مقاومت فشاری نهایی و میزان انرژی جذب شده صورت می‌گیرد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مصالح مصرفی

مصالحی که در طرح اختلاط بتن غلتکی استفاده می‌شود، همان مصالحی هستند که در طرح اختلاط بتن معمولی به کار می‌رود. این مصالح شامل سنگ‌دانه‌های درشت و ریز (شن و ماسه)، مصالح چسبنده (سیمان)، آب و گاهی اوقات افزودنی‌ها می‌باشد. در این تحقیق از مصالح سنگ‌دانه‌ای (شامل هر دو گروه درشت‌دانه و ریزدانه)، خرده آسفالت بازیافتی (بخش درشت‌دانه)، مصالح چسبنده (سیمان)، آب و نانوسیلیس استفاده شده است. سنگ‌دانه مصرفی استفاده شده در این تحقیق از معادن اطراف شهر بوشهر تهیه شده است. بزرگ‌ترین قطر اسمی درشت‌دانه استفاده شده، ۱۹ میلی‌متر می‌باشد که علاوه بر رعایت توصیه آیین‌نامه ACI 211.3R برای ساخت نمونه‌های استوانه‌ای به طول ۳۰۰ میلی‌متر و قطر سطح مقطع ۱۵۰ میلی‌متر مناسب می‌باشد [۲۶]. در شکل ۱، منحنی دانه‌بندی مصالح سنگی نشان داده شده است.

خرده آسفالت مورد استفاده در این پژوهش از تراشیدن و خرد کردن لایه آسفالتی در طی عملیات ترمیم و بازسازی راه‌های استان بوشهر در مسیر کنار تخته

بازیافتی در طراحی ضخامت لایه‌های نیم صلب برای یک روسازی به روش مکانیستیک و تجربی بررسی شد. این تحقیق نشان داد که استفاده از ۱۵ درصد خرده آسفالت به جای مصالح درشت‌دانه در بتن غلتکی، یک گزینه ایده‌آل می‌باشد [۲۰]. فخری و همکاران، ویژگی‌های مکانیکی بتن غلتکی حاوی مقادیر مختلف خرده آسفالت بازیافتی و خرده لاستیک را بررسی نمودند. خرده آسفالت در این پژوهش به مقدار ۲۵ تا ۱۰۰٪ جایگزین مصالح خرده لاستیک نیز به مقدار پنج تا ۲۵٪ جایگزین مصالح گردید. نتایج نشان داد که استفاده ۱۰۰ درصدی از خرده آسفالت به عنوان سنگ‌دانه باعث عدم تأمین حداقل مقاومت فشاری در مخلوط خواهد شد. از طرفی، نتایج نشان‌دهنده تأثیر مثبت استفاده از پنج درصد خرده لاستیک روی مقاومت فشاری بود [۲۱]. دبارما^۴ و همکاران گزارش نمودند که نوع و میزان پیرشدگی خرده آسفالت به همراه مقدار و دانه‌بندی آن و نیز میزان و نوع تراکم بر مقاومت و دوام بتن غلتکی اثر دارد [۲۲].

استفاده از خرده آسفالت در مطالعات آزمایشگاهی مخلوط‌های آسفالتی نیز مشاهده می‌شود [۲۳]. کی‌منش و همکاران از خرده آسفالت در تهیه نمونه‌های خمش نیم‌دایره آسفالتی استفاده کرده و رفتار آنها را در دماهای میانی بررسی نمودند [۲۴]. در تحقیقی دیگر، غنی‌زاده و فتحی‌زاده از مصالح خرده بتنی در ساخت مخلوط‌های آسفالتی استفاده کردند. نتایج تحقیقات ایشان نشان داد که در لایه‌های آسفالتی با ضخامت‌های بالای ۱۵ سانتی‌متر می‌توان از مصالح خرده بتنی استفاده نمود [۲۵].

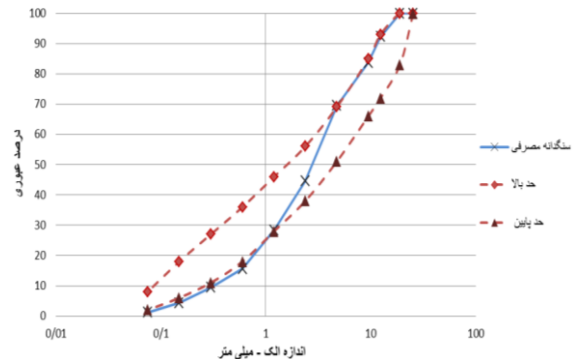
در مطالعه حاضر، از خرده آسفالت بازیافتی به عنوان یک رویکرد زیست‌محیطی در ساخت نمونه‌های بتن غلتکی با درصد‌های صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ به عنوان جایگزین مصالح درشت‌دانه استفاده شده و پارامترهای مقاومتی آن سنجیده شده است. علت استفاده

^۴ Debbarma

خرده آسفالت در گرمخانه قرار گرفته و پس از نرم شدن، توسط چکش لاستیکی کاملاً خرد شدند تا دانه بندی مورد آن تعیین شود. برای جداسازی سنگدانه های درشت و ریز (شن و ماسه) از الک شماره ۴ (۴/۷۵ میلی متر) استفاده شده است. برای قرارگیری نمونه ها در شرایط یکسان، خرده آسفالت ها مشابه با سنگدانه های طبیعی دانه بندی شده اند. خرده آسفالت ها با درصد های صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ جایگزین مصالح درشت دانه بتن غلتکی شدند. مشخصات خرده آسفالت مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۱ آمده است.

در این تحقیق از سیمان پرتلند تپ ۲، محصول کارخانه سیمان دشتستان بوشهر، استفاده شده است. مشخصات فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی سیمان مذکور در جدول های ۲، ۳ و ۴ ارائه شده است.

تهیه شده است. درصد قیر موجود در آن با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ اندازه گیری شده و برابر با پنج درصد می باشد.



شکل ۱- منحنی دانه بندی سنگدانه مصرفی

وزن مخصوص این مصالح مطابق با استاندارد ASTM C128 و ASTM C127 اندازه گیری شده و برابر ۲/۳۴ گرم بر سانتی متر مکعب است. تکه های بزرگ

جدول ۱- خصوصیات خرده آسفالت بازیافتی

مشخصات درشت دانه		استاندارد مربوطه
حداکثر اندازه (میلی متر)	۱۹ میلی متر	ASTM C136
وزن مخصوص (کیلوگرم بر متر مکعب)	۲/۳۴	ASTM C127
درصد رطوبت طبیعی	صفر	ASTM C566
درصد سایش در آزمایش لس آنجلس	۲۲	ASTM C131

جدول ۲- مشخصات مکانیکی سیمان مورد استفاده در این تحقیق

مقاومت فشاری (MPa)		مشخصات مکانیکی (توصیه ASTM C150)
۲۸ روزه	هفت روزه	
۲۸	۱۹	حداقل پیشنهادی
۵۴	۳۷	سیمان مصرفی

جدول ۳- مشخصات فیزیکی سیمان مورد استفاده در این تحقیق

زمان گیرش (دقیقه)		سطح مخصوص (سانتی متر مربع بر گرم)	مشخصه فیزیکی
گیرش نهایی	گیرش اولیه		
Max=۶۰۰	Min=۶۰	Min=۲۶۰۰	ASTM C150
۳۶۰	۴۵	۳۰۰۰	سیمان مصرفی

نانومتر می باشد. این نانوماده از شرکت پیشگامان نانو مواد ایرانیان (واردکننده مواد از شرکت دیگوشای آلمان) تهیه شده و با درصد های صفر و دو درصد سیمان در ساخت نمونه ها استفاده گردیده است. برای نمونه فاقد خرده

آب مصرفی در تهیه نمونه های بتن غلتکی، آب شرب شهر بوشهر می باشد. در این پژوهش از نانوسیلیس به عنوان یک افزودنی استفاده شده است. نانوماده مورد استفاده در این پژوهش دارای ذرات با قطر ۱۱ تا ۱۳

آسفالت چهار درصد نیز استفاده شده است. نانوسیلیس به کار رفته در این تحقیق در شکل ۲ نمایش داده شده است. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی این نانوماده مطابق

جدول ۴- مشخصات شیمیایی سیمان مورد استفاده در این تحقیق

درصد موجود در سیمان مصرفی	ترکیبات شیمیایی سیمان
۲۱/۷	SiO ₂
۵/۳	Al ₂ O ₃
۳/۹	Fe ₂ O ₃
۶۶/۰۵	CaO
<۱/۷	MgO
<۰/۴	SO ₃
<۰/۷	قلیای کلی
<۰/۵	LoI
<۰/۰۳	Cl
<۰/۹	F.CaO
<۰/۲۵	I.R



شکل ۲- نانوسیلیس مورد استفاده در این تحقیق

جدول ۵- ترکیب شیمیایی نانوسیلیس

عنصر	Fe	Na	Ca	Ti	SiO ₂
مقدار (ppm)	>۲۰	>۵۰	>۷۰	>۱۲۰	<۹۹٪

جدول ۶- خصوصیات فیزیکی نانوسیلیس

مقادیر	مشخصات
۹۹	خلوص (درصد)
۱۱ - ۱۳	اندازه ذرات (نانومتر)
۲۰۰	سطح مخصوص (مترمربع بر گرم)
سفید	رنگ
<۰/۱۰	چگالی ظاهری (گرم بر سانتی مترمکعب)
۲/۴	چگالی واقعی (گرم بر سانتی مترمکعب)

۲-۲- روش تهیه نمونه‌ها و آزمایش لازم

از دیدگاه مکانیک خاک، دو روش پیشنهادی برای تراکم نمونه‌های بتن غلتکی وجود دارد: استفاده از روش چکش پراکتور اصلاح شده ASTM D1557 و استفاده از روش چکش ارتعاشی ASTM C1435 [۲۷ و ۲۸]. در روش پراکتور اصلاح شده، استوانه‌ها در پنج لایه پر شده و هر لایه ۲۵ بار به وسیله چکشی با وزن ۴/۵ کیلوگرم که از ارتفاع ۴۵۷ میلی‌متری رها می‌شود، کوبیده می‌شود. صرف‌نظر از تغییرات ایجاد شده در روش پراکتور اصلاح شده، این روش به خاطر تعداد ضربه‌ها و تعداد لایه‌های موجود بسیار زمان‌بر است [۲۹]. در روش دوم از چکش ارتعاشی یا چکش ضربه‌ای استفاده می‌شود. یک نوع از این چکش دارای کله کوبشی صفحه مانند به قطر ۱۳۳ میلی‌متر است که برای تراکم نمونه‌های استوانه‌ای در چهار لایه ۷۶ میلی‌متری به کار می‌رود [۳۰]. در مطالعه حاضر از روش دوم استفاده شده است؛ تراکم و ساخت نمونه‌ها با استفاده از چکش ارتعاشی گستلی انجام گردیده است. این چکش الکتریکی دارای توان ۷۵۰ وات بوده و در هر دقیقه ۲۷۵۰ ضربه به سطح وارد می‌کند. ارتفاع این چکش ۴۵۰ میلی‌متر و وزن آن ۷/۵ کیلوگرم است.

$$\rho_{dry} = \frac{W_{total} - W_{mold}}{v(1 + \omega)} \quad (1)$$

برای تعیین درصد رطوبت بهینه نسبت به وزن مصالح خشک، از پنج میزان رطوبت در طرح‌های اختلاط فاقد نانوسیلیس و شش میزان رطوبت در طرح‌های اختلاط حاوی نانوسیلیس استفاده گردیده است. در طرح‌های اختلاط فاقد نانوسیلیس از ۴، ۴/۷۵، ۵/۵، ۶/۲۵ و ۷ درصد رطوبت نسبت به وزن مصالح خشک (سنگ‌دانه‌ها و سیمان) استفاده شده است، ولی در طرح‌های اختلاط حاوی نانوسیلیس از درصدهای ۴، ۴/۷۵، ۵/۵، ۶/۲۵، ۷ و ۷/۵ استفاده گردیده است. اختلاط در مخلوط‌کن برقی انجام گرفته است. گنجایش مخلوط‌کن ۴۰ لیتر و سرعت آن ۵۰ دور در دقیقه بود. از هر مخلوط‌کن سه نمونه استوانه‌ای ۱۵۰×۳۰۰ میلی‌متری که از قبل وزن‌کشی شده بودند تهیه گردید. به منظور تعیین رطوبت بهینه، ابتدا مصالح خشک در حدود ۲-۴

که در آن ρ_{dry} دانسیته خشک نمونه، W_{total} وزن نمونه به همراه قالب بلافاصله پس از تراکم، W_{mold} وزن قالب، ω درصد رطوبت و v حجم نمونه می‌باشد. در هر طرح اختلاط، نمودار دانسیته خشک در برابر رطوبت رسم شد و از روی آن رطوبت مربوط به بیشترین وزن مخصوص تعیین شد. این رطوبت به عنوان رطوبت بهینه در ساخت نمونه‌های اصلی به کار گرفته شد. طرح اختلاط‌های به کار رفته در این تحقیق مطابق جدول ۷ می‌باشد. در این جدول، حرف R از اول کلمه RAP (خرده آسفالت بازیافتی) اقتباس شده است که با درصدهای صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ بیان شده است که به ترتیب بیانگر مقدار درصد جایگزین خرده آسفالت بازیافتی به جای بخش درشت‌دانه در نمونه‌های بتن غلتکی می‌باشند. به همین ترتیب، منظور از حرف N، مقدار درصد نانوسیلیس به کار برده شده می‌باشد که با ضرایب صفر، ۲ و ۴ درصد بیان شده‌اند.

برای ساخت و تهیه نمونه‌های بتنی از قالب‌های استوانه‌ای استاندارد به قطر ۱۵ و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر استفاده شده است. پس از گذشت ۲۴ ساعت، نمونه‌ها از قالب جدا شده و به منظور عمل‌آوری تا سن آزمایش ۷ و ۹۰ روزه درون حوضچه آب قرار گرفتند.

جدول ۷- مقادیر وزنی طرح اختلاط‌های استفاده شده در این پژوهش

نام‌گذاری نمونه‌ها										
R100N2	R75N2	R50N2	R25N2	R100N0	R75N0	R50N0	R25N0	R0N4	R0N2	R0N0
نسبت درشت‌دانه به ریزدانه										
۳۰ به ۷۰										
درصد وزن مصالح چسبیده به سنگ‌دانه‌ها										
۱۳										
درصد خرده آسفالت بازیافتی										
۱۰۰	۷۵	۵۰	۲۵	۱۰۰	۷۵	۵۰	۲۵	صفر	صفر	صفر
درصد نانوسیلیس										
۲	۲	۲	۲	صفر	صفر	صفر	صفر	۲	۴	۲

۳- نتایج و بحث

۳-۱- درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص

شکل ۴، نمودارهای لازم در تعیین رطوبت بهینه برای بتن‌های غلتکی بدون افزودنی نانوسیلیس و حاوی خرده آسفالت بازیافتی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۴، مشاهده می‌شود که درصد رطوبت بهینه برای نمونه شاهد بتن غلتکی برابر ۵/۸ است و همچنین وزن مخصوص مربوط به این رطوبت برابر ۲۱۰۷/۸۲ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد. با افزودن ۲۵ درصد خرده آسفالت بازیافتی به جای درشت‌دانه طبیعی، رطوبت بهینه با اندکی کاهش به ۵/۷۶ درصد رسید. بیشترین وزن مخصوص مربوط به این رطوبت برابر با ۲۱۰۴/۹۳ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد. افزودن ۲۵ درصد خرده آسفالت، درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص مربوط به آن را در مقایسه با نمونه شاهد کاهش داد. مشاهده می‌گردد که با افزودن ۵۰ درصد خرده آسفالت بازیافتی به جای درشت‌دانه طبیعی، رطوبت بهینه مجدداً کاهش یافته و به ۵/۶۹ درصد می‌رسد. بیشترین وزن مخصوص مربوط به این رطوبت برابر با ۲۰۹۶/۳۳ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد. با افزایش خرده آسفالت از ۲۵ به ۵۰ درصد، رطوبت بهینه و وزن مخصوص به ترتیب دو و یک درصد کاهش یافت. مشاهده شد که با افزودن ۷۵ درصد خرده آسفالت بازیافتی به جای درشت‌دانه طبیعی، رطوبت بهینه کاهش یافته و به ۵/۶۱ درصد رسیده است. نتایج نشان

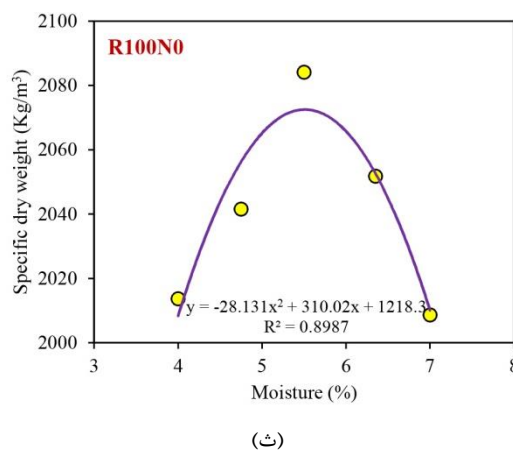
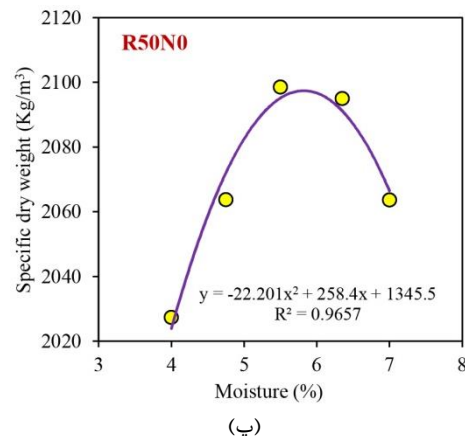
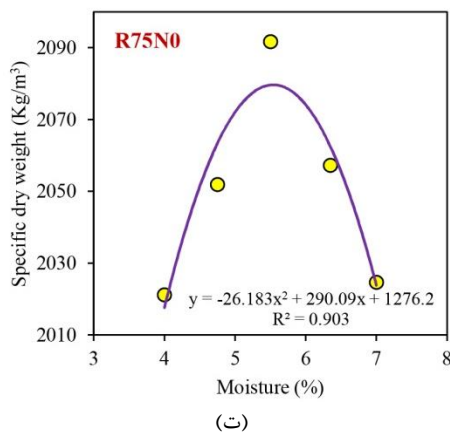
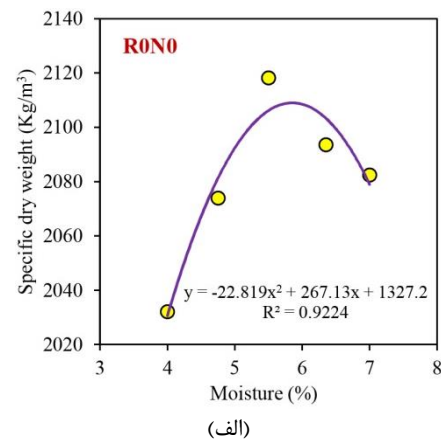
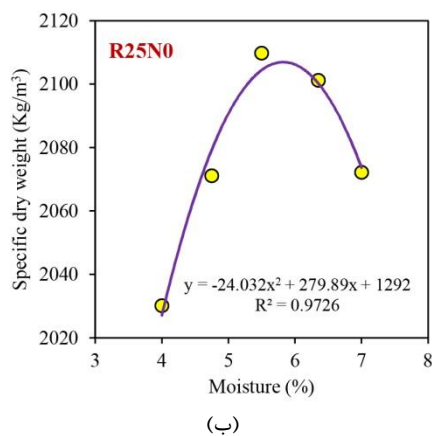
پس از عمل‌آوری لازم، آزمایش مقاومت فشاری انجام و اطلاعات مربوط به منحنی تنش- کرنش ثبت شد. البته مبنای ترسیم نمودار اولیه به صورت نیرو- جابه‌جایی بود. نیروی اعمال شده در این آزمایش با سرعت ۰/۰۱ متر بر ثانیه بر نمونه‌ها وارد شد و تا تسلیم کامل نمونه ادامه یافت. جهت اعمال یکنواخت نیرو و به منظور جلوگیری از شکست زود هنگام، نمونه‌های آزمایشگاهی کلاهک‌گذاری شدند. بدین منظور در دو انتهای نمونه‌ها، یک ملات زودگیر توسط دستگاه کپینگ طبق دستورالعمل استاندارد ASTM C617 قرار داده شد [۳۱]. از یک جک بتن‌شکن دیجیتالی با ظرفیت ۲۰۰ تن برای شکست نمونه‌ها استفاده گردید. شکل ۳ تصاویری از آماده‌سازی نمونه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۳- تصاویری از روند آماده‌سازی نمونه‌های بتن غلتکی

درصد و مقایسه با نمونه شاهد مشخص شد که رطوبت بهینه و وزن مخصوص به ترتیب پنج و دو درصد کاهش یافت. کاهش رطوبت بهینه و افزایش وزن مخصوص در بتن غلتکی با افزایش دادن مقدار خرده آسفالت با مطالعات آزمایشگاهی ستاری و همکاران سازگاری دارد [۳۲].

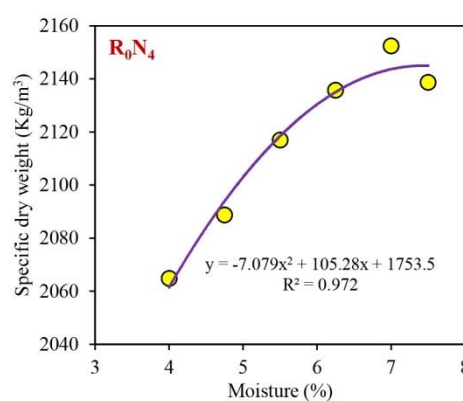
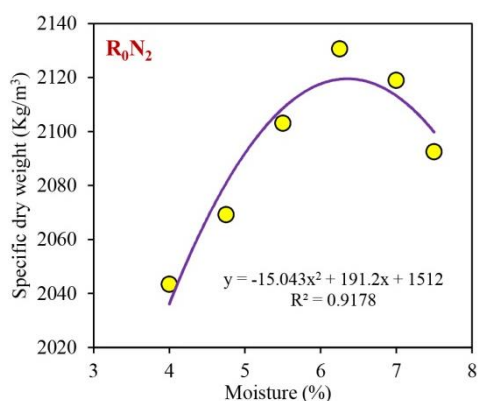
داد بیشترین وزن مخصوص مربوط به این رطوبت، ۲۰۷۷/۸۳ کیلوگرم بر مترمکعب است. با افزودن ۱۰۰ درصد خرده آسفالت بازیافتی به جای درشت‌دانه طبیعی، رطوبت بهینه کاهش یافته و به ۵/۵ درصد رسیده است که بیشترین وزن مخصوص مربوط به این رطوبت برابر با ۲۰۷۰/۹۴ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد. با افزایش خرده آسفالت بازیافتی به جای درشت‌دانه طبیعی تا میزان ۱۰۰



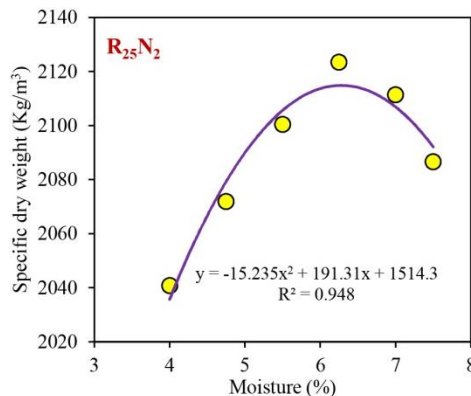
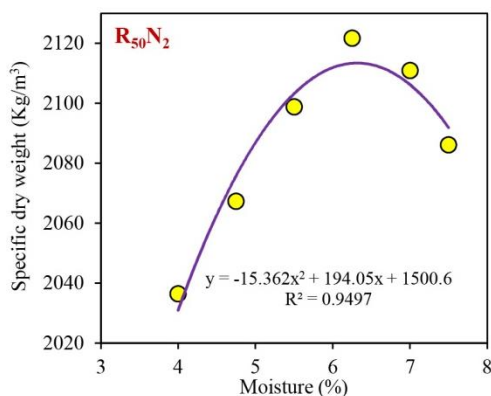
شکل ۴- تعیین رطوبت بهینه نمونه‌های (الف) شاهد و نمونه‌های شامل (ب) ۲۵، (پ) ۵۰، (ت) ۷۵ و (ث) ۱۰۰ درصد خرده آسفالت بدون افزودنی نانوسیلیس

که بیانگر تأثیر افزودن نانوسیلیس است. از طرفی، وزن مخصوص هم افزایش یافت. مشاهده گردید که درصد رطوبت بهینه بتن غلتکی نمونه حاوی چهار درصد نانوسیلیس برابر ۷/۳۵ است. افزایش وزن مخصوص مربوط به این رطوبت به عدد ۲۱۴۴/۷۹ کیلوگرم بر مترمکعب افزایش یافت. نتایج نشان داد که با افزایش درصد نانوسیلیس از دو به چهار درصد، رطوبت بهینه مورد نیاز به ۱۵ درصد افزایش یافت.

شکل ۵، نمودارهای لازم در تعیین رطوبت بهینه برای طرح اختلاط‌های مختلف بتن غلتکی با افزودنی نانوسیلیس را نشان می‌دهد. در شکل ۵، درصد رطوبت بهینه بتن غلتکی در نمونه حاوی دو درصد نانوسیلیس برابر ۶/۳۵ به دست آمد و همچنین وزن مخصوص مربوط به این رطوبت برابر ۲۱۱۹/۶۷ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد. همان‌طور که مشاهده شد درصد رطوبت بهینه در مقایسه با نمونه شاهد، افزایش محسوسی داشته است

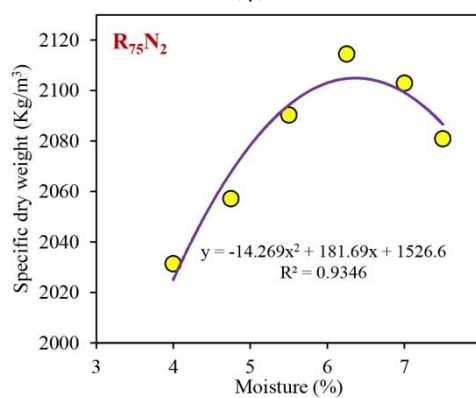
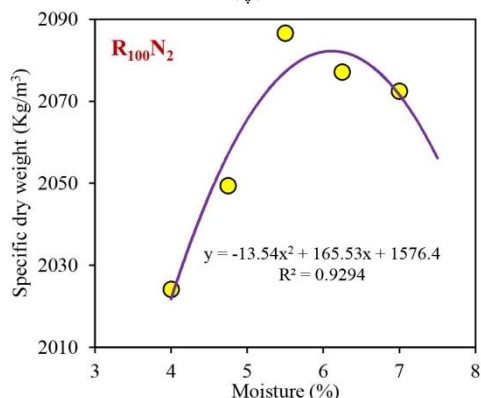


(الف)



(پ)

(ب)



(ث)

(ت)

شکل ۵- تعیین رطوبت بهینه نمونه‌های (الف) شاهد و نمونه‌های شامل (ب) ۲۵، (پ) ۵۰، (ت) ۷۵ و (ث) ۱۰۰ درصد خرده آسفالت با افزودنی نانوسیلیس

بازیافتی و دو درصد نانوسیلیس برابر ۵/۸۶ درصد و همچنین وزن مخصوص مربوط به این رطوبت برابر ۲۰۸۱/۳۱ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد.

نتایج نشان داد در نمونه حاوی دو درصد نانوسیلیس با افزایش خرده آسفالت بازیافتی از ۲۵ به ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد رطوبت بهینه به ترتیب ۳، ۴ و ۷ درصد کاهش یافت. البته لازم به ذکر است که تغییرات رطوبت بهینه در حدود دهم درصد و یا تغییر حداکثر وزن مخصوص بین یک و دو درصد در کارهای ژئوتکنیکی با توجه به خطاهای متداول، عملاً تغییرات معناداری نمی‌باشد. این تغییرات با توجه به مقادیر کم اختلاف، گاهی مورد توجه قرار نمی‌گیرد.

۳-۲- مقاومت فشاری

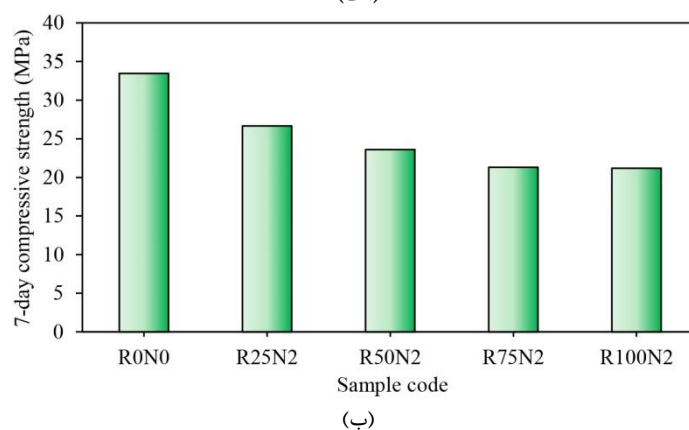
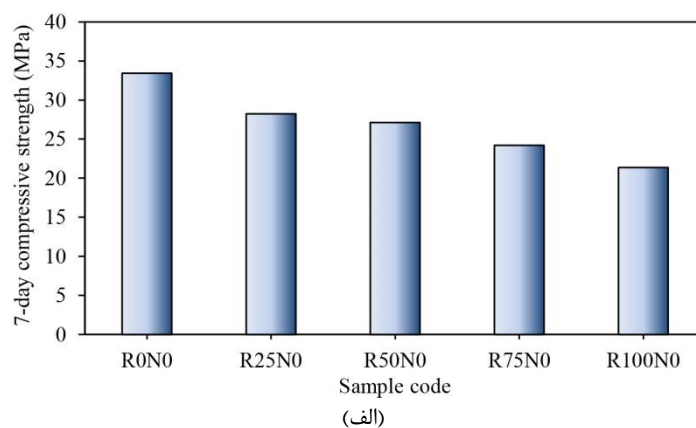
۳-۲-۱- مقاومت فشاری نمونه‌های ۷ روزه

جدول ۸ به همراه شکل ۶، نتایج مربوط به مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه‌های بتن غلتکی را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۱ مشاهده شد که مقاومت فشاری بتن غلتکی روسازی با افزودن نانوسیلیس کاهش یافته و از مقدار ۳۳/۴۴ مگاپاسکال به ۳۰/۲۱ مگاپاسکال (کاهش تقریباً برابر ۱۰ درصد) رسیده است. این کاهش مقاومت، با توجه به نحوه و نوع شکست نمونه (شکل ۷) به نظر می‌رسد ناشی از تردشدگی بتن در اثر افزودن نانوسیلیس به بتن باشد. در هنگام ساخت نمونه‌های حاوی نانوسیلیس با افزودن نانوسیلیس مقدار آب مصرفی بیشتری مصرف شد که نشان از خشک‌تر یا ترد بودن نمونه‌ها در مقایسه با نمونه شاهد بود. نشریه شماره ۷۳۱ سازمان برنامه‌وبودجه در خصوص طراحی، اجرا و نگهداری روسازی بتنی راه‌ها، مقدار مقاومت فشاری بتن غلتکی را معمولاً بین ۲۸ تا ۴۰ مگاپاسکال معرفی می‌کند. این نشریه بیان می‌کند که مقاومت مشخصه فشاری بتن غلتکی ۲۸ روزه نباید کمتر از ۲۵ مگاپاسکال باشد [۳۴].

محققان در یک مقاله مروری در بررسی اثر نانوسیلیس بر رفتار انواع مختلف بتن، گزارش نمودند که این نانوماده به علت داشتن سطح مخصوص بیشتر، مقدار آب مورد نیاز برای بتن را افزایش می‌دهد [۳۳]. افزایش رطوبت بهینه مورد نیاز در بتن غلتکی حاوی این نانوماده با گزارش این پژوهشگران تطابق دارد. در شکل ۵ نشان داده شده است که درصد رطوبت بهینه بتن غلتکی نمونه حاوی ۲۵ درصد خرده آسفالت بازیافتی و دو درصد نانوسیلیس برابر ۶/۳۱ درصد است. همچنین وزن مخصوص مربوط به این رطوبت برابر ۲۱۱۵/۵۶ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد. نتایج نشان داد که درصد رطوبت بهینه در نمونه حاوی ۲۵ درصد خرده آسفالت و دو درصد نانوسیلیس در مقایسه با نمونه حاوی فقط نانوسیلیس کمی کاهش یافته است که بیانگر تأثیر اندک وجود این مقدار خرده آسفالت است. مقایسه‌ها نشان می‌دهند که در خرده آسفالت ۲۵ درصد، نانوسیلیس توانسته است مقدار رطوبت بهینه و وزن مخصوص را افزایش دهد. درصد رطوبت بهینه بتن غلتکی نمونه حاوی ۵۰ درصد خرده آسفالت بازیافتی و دو درصد نانوسیلیس برابر ۶/۱۵ درصد و همچنین وزن مخصوص مربوط به این رطوبت برابر ۲۱۱۳/۳۶ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد. نتایج نشان داد که درصد رطوبت در نمونه حاوی ۵۰ درصد خرده آسفالت و نانوسیلیس در مقایسه با نمونه حاوی فقط نانوسیلیس و همچنین ۲۵ درصد خرده آسفالت کاهش یافته است. درصد رطوبت بهینه بتن غلتکی نمونه حاوی ۷۵ درصد خرده آسفالت بازیافتی و دو درصد نانوسیلیس برابر ۶/۰۵ درصد و همچنین وزن مخصوص مربوط به این رطوبت برابر ۲۱۰۳/۶۴ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد. نتایج نشان داد که در نمونه حاوی دو درصد نانوسیلیس با افزایش درصد خرده آسفالت بازیافتی از ۵۰ به ۷۵ درصد، رطوبت بهینه و وزن مخصوص به ترتیب ۲ و ۱ درصد کاهش یافت. با توجه به شکل ۵ مشاهده شد که درصد رطوبت بهینه بتن غلتکی نمونه حاوی ۱۰۰ درصد خرده آسفالت

جدول ۸- نتایج مربوط به آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های ۷ روزه بتن غلتکی

طرح اختلاط	وزن مخصوص خشک (کیلوگرم بر مترمکعب)	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	درصد تغییرات (کاهش) مقاومت فشاری در مقایسه با نمونه شاهد بتن غلتکی
R0N0	۲۲۱۸/۶۱	۳۳/۴۴	-
R0N2	۲۲۲۳/۰۸	۳۰/۲۱	-۹/۶۵
R25N0	۲۲۱۱/۱۴	۲۸/۲۵	-۱۵/۵۲
R50N0	۲۲۰۲/۴۸	۲۷/۱۳	-۱۸/۸۶
R75N0	۲۱۸۸/۵۲	۲۴/۲۲	-۲۷/۵۷
R100N0	۲۱۷۸/۱۲	۲۱/۳۸	-۳۶/۰۶
R25N2	۲۲۱۹/۲۳	۲۶/۶۵	-۲۰/۳۰
R50N2	۲۲۰۹/۷۸	۲۳/۵۹	-۲۹/۴۵
R75N2	۲۱۹۸/۶۱	۲۱/۳۰	-۳۶/۳۰
R100N2	۲۱۹۱/۸۹	۲۱/۱۸	-۳۶/۶۶



شکل ۶- مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی (الف) خرده آسفالت بازیافتی و (ب) خرده آسفالت بازیافتی و نانوسیلیس با نمونه شاهد در سن ۷ روز

نتایج جدول ۸ و شکل ۶ نشان داد که با جایگزین کردن خرده آسفالت بازیافتی با مصالح درشت‌دانه طبیعی، مقاومت فشاری بتن غلتکی کاهش می‌یابد. ستاری و همکاران نیز، نتیجه مشابهی را در تحقیقات خود گزارش نمودند [۳۲].

مطالعه منابع علمی دیگر نشان می‌دهد مقدار حداقل مقاومت فشاری برای روسازی بتن غلتکی در سن ۹۰ روزه عمدتاً بیشتر از ۲۷/۶ مگاپاسکال است. با توجه به این مطالعات، مقاومت فشاری ۷ روزه R0N2 از مقدار حداقل مقاومت فشاری ۹۰ روزه بیشتر است. از طرفی،

شد. رضایی و همکاران نشان دادند که میکروسلیس با سطح مخصوص کمتر از نانوسلیس می‌تواند مقاومت فشاری بتن غلتکی حاوی خرده آسفالت را افزایش دهد [۳۵]. شاید دلیل کاهش مقاومت در تحقیق حاضر، اثر متفاوت این نانوماده در عمرهای مختلف بتن غلتکی، درجه خلوص و عدم واکنش‌پذیری آن در شرایط اختلاط و عمل‌آوری باشد.

۳-۲-۲- مقاومت فشاری نمونه‌های ۹۰ روزه

در جدول ۹ و متناظر با آن در شکل ۸، نتایج مربوط به مقاومت فشاری ۹۰ روزه نمونه‌های بتن غلتکی ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد مقاومت فشاری بتن غلتکی نمونه شاهد RONO با افزودن دو درصد نانو سیلیس، ۱۱/۲۴ درصد کاهش می‌یابد. این کاهش مقاومت نسبت به نمونه مشابه خود در سن ۷ روز با درصد افت بیشتری همراه است که بیانگر تأثیر منفی بیشتر این نوع نانوسلیس در سنین بالاتر است. با توجه به نتایج جدول ۹ مشاهده می‌شود که با جایگزین کردن خرده آسفالت بازیافتی با مصالح درشت‌دانه طبیعی، مقاومت فشاری بتن غلتکی همانند نمونه‌های ۷ روزه کاهش می‌یابد. همان‌طور که بیان شد کاهش مقاومت فشاری بتن غلتکی احتمالاً ناشی از سطح چرب و لایه نازک قیر در سطح این سنگ‌دانه‌ها است. جایگزین کردن خرده آسفالت بازیافتی به مقدار ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد به جای مصالح طبیعی درشت‌دانه باعث کاهش مقاومت فشاری به ترتیب برابر ۱۱، ۱۸ و ۲۱ درصدی نسبت به نمونه شاهد بتن غلتکی می‌شود. لازم به ذکر است که با جایگزین کردن خرده آسفالت بازیافتی حداکثر به مقدار ۷۵ درصد (R25N0، R50N0، R75N0)، به جای مصالح طبیعی درشت‌دانه همچنان حداقل مقاومت فشاری ۲۷/۶ مگاپاسکال ۹۰ روزه تأمین شده است. از طرفی، مشاهده شد که با افزایش سن در نمونه‌های بتن غلتکی تا ۹۰ روز مقاومت فشاری نسبت به نمونه‌های با سن ۷ روز افزایش می‌یابد. نتایج همچنان نشان داد که افزودن نانو سیلیس

کاهش مقاومت فشاری بتن غلتکی ناشی از سطح چرب و لایه نازک قیر در سطح این سنگ‌دانه‌ها است. در نمونه حاوی ۲۵ درصد خرده آسفالت بازیافتی، کاهش ۱۵/۵۲ درصدی مقاومت نسبت به نمونه شاهد قابل مشاهده است.



شکل ۷- نوع شکست نمونه‌های بتن غلتکی در مقاومت ۷ روزه

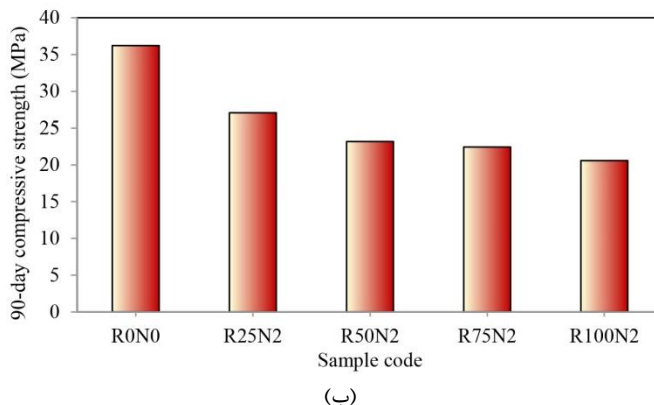
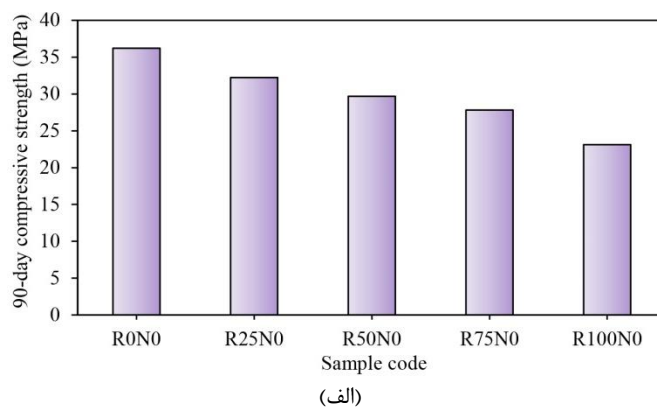
با افزودن درصد خرده آسفالت بازیافتی به مقدار ۵۰ درصد کاهش مقاومت فشاری تا مقدار ۱۸/۸۶ درصد بوده است. این کاهش نسبت به نمونه حاوی ۲۵ درصد آسفالت، چندان اختلاف زیادی نمی‌تواند باشد. در نمونه حاوی ۷۵ درصد خرده آسفالت بازیافتی، مقدار ۲۷/۵۷ درصد کاهش مقاومت مشاهده شد که مقدار قابل توجهی است. در نهایت، نمونه حاوی ۱۰۰ درصد خرده آسفالت بازیافتی کاهش مقاومت ۳۶/۰۶ درصد را ثبت نمود. می‌توان ادعا کرد که با جایگزین کردن خرده آسفالت تا مقدار نصف مصالح درشت‌دانه، حداقل مقاومت فشاری موردنظر قابل تأمین است. همچنین نتایج جدول ۸ و شکل ۶ نشان داد که افزودن نانوسلیس، نمی‌تواند مقاومت فشاری بتن غلتکی حاوی خرده آسفالت را افزایش دهد. این اتفاق خلاف انتظاری بود که برای بهبود مقاومت فشاری در حضور نانوسلیس پیش‌بینی می‌شد. در نمونه حاوی نانوسلیس و ۲۵ درصد خرده آسفالت بازیافتی، کاهش مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد بتن غلتکی ۲۰/۳۰ درصد می‌باشد. در نمونه‌های ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصدی حاوی نانوسلیس و خرده آسفالت بازیافتی به ترتیب کاهش مقاومت فشاری به مقدار ۲۹/۴۵، ۳۶/۳۰ و ۳۶/۶۶ درصدی در مقایسه با نمونه شاهد بتن غلتکی مشاهده

بازیافتی به میزان ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد به جای درشت‌دانه طبیعی به ترتیب مقاومت فشاری نمونه‌ها را با مقادیر ۲۵، ۳۶، ۳۸ و ۴۱ درصد نسبت به نمونه شاهد بتن غلتکی کاهش می‌دهد. شکل ۹، نحوه شکست نمونه‌های بتن غلتکی در مقاومت ۹۰ روزه را نشان می‌دهد.

به بتن غلتکی حاوی خرده آسفالت بازیافتی مقاومت فشاری ۹۰ روزه را بهبود نمی‌دهد. به عنوان مثال در نمونه بتن غلتکی حاوی ۲۵ درصد خرده آسفالت بازیافتی با افزودن دو درصد نانوسیلیس به این نمونه، مقاومت فشاری ۱۴/۲۸ درصد کاهش می‌یابد. از طرفی، حضور نانوسیلیس به همراه جایگزین کردن خرده آسفالت

جدول ۹- نتایج مربوط به آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های ۹۰ روزه بتن غلتکی روسازی

طرح اختلاط	وزن مخصوص خشک (کیلوگرم بر مترمکعب)	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	درصد تغییرات (کاهش) مقاومت فشاری در مقایسه با نمونه شاهد بتن غلتکی
R0N0	۲۲۶۸/۷۲	۳۶/۱۹	-
R0N2	۲۲۷۳/۶۳	۳۲/۱۲	-۱۱/۲۴
R25N0	۲۲۶۱/۰۶	۳۲/۲۳	-۱۰/۹۴
R50N0	۲۲۵۲/۸۸	۲۹/۶۷	-۱۸
R75N0	۲۲۳۸/۲۵	۲۸/۴۵	-۲۱/۳۸
R100N0	۲۲۲۸/۳۹	۲۳/۱۰	-۳۶/۱۷
R25N2	۲۲۶۹/۱۸	۲۷/۰۶	-۲۵/۲۲
R50N2	۲۲۵۹/۱۱	۲۳/۱۵	-۳۶
R75N2	۲۲۴۸/۰۲	۲۲/۴۱	-۳۸
R100N2	۲۲۴۱/۵۲	۲۰/۵۶	-۴۱/۱۹



شکل ۸- مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی (الف) خرده آسفالت بازیافتی و (ب) خرده آسفالت بازیافتی و نانوسیلیس با نمونه شاهد در سن ۹۰ روز



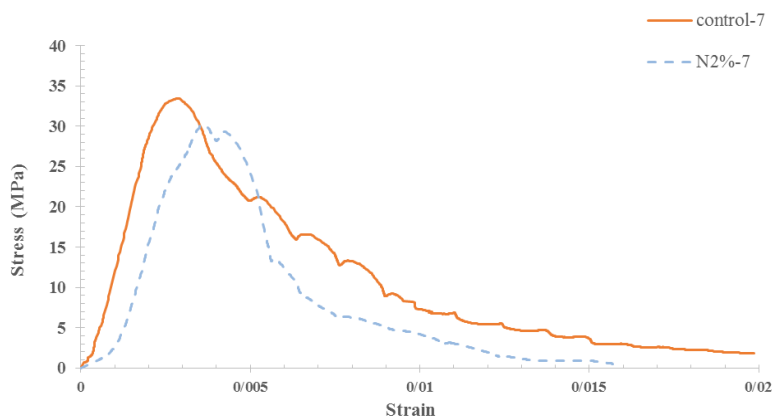
شکل ۹- نوع شکست نمونه‌های بتن غلتکی در مقاومت ۹۰ روزه

۳-۳-۱- بررسی و مقایسه رفتار نمونه‌های ۷ روزه بتن غلتکی

در شکل ۱۱، رفتار تنش- کرنش نمونه بتن غلتکی کنترل در کنار نمونه حاوی نانوسیلیس ارائه شده است. در این شکل، منحنی مربوط به نمونه حاوی نانوسیلیس نسبت به نمونه کنترل به سمت راست حرکت کرده و دارای کشیدگی کمتری است. همچنین با علم بر اینکه سطح زیر نمودار تنش- کرنش معادل انرژی جذب شده توسط نمونه‌هاست، مشاهده می‌شود که سطح زیر نمودار نمونه حاوی نانوسیلیس کمتر از مقدار نمونه کنترل می‌باشد. این بدان معنی است که این افزودنی باعث تردشدگی بتن غلتکی شده و شکنندگی آن را افزایش می‌دهد.

۳-۳-۲- بررسی نمودار تنش- کرنش نمونه‌های بتن غلتکی

تغییرات نیرو در مقابل جابه‌جایی برای نمونه‌های آزمایشگاهی بتن غلتکی در آزمایش مقاومت فشاری به صورت دیجیتال و با استفاده ترانسفورماتور دیفرانسیل متغیر خطی ثبت گردید. ترسیم نمودار اولیه به صورت نیرو- جابه‌جایی است. نیروی اعمال شده تا لحظه تسلیم کامل ادامه یافته و نمودار نیرو- جابه‌جایی برحسب کیلوگرم- میلی‌متر توسط دستگاه برای هر نمونه ترسیم می‌شود. در پایان برای ترسیم منحنی‌های تنش- کرنش مقدار نیرو برحسب کیلوگرم به مگاپاسکال و جابه‌جایی برحسب میلی‌متر به کرنش تبدیل شده، منحنی تنش- کرنش ترسیم می‌گردد.



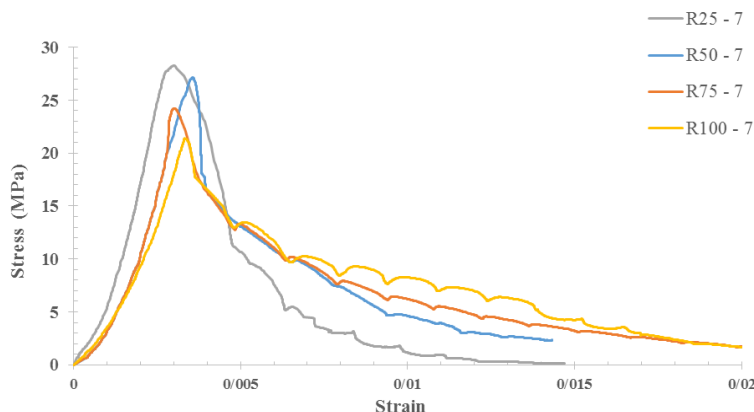
شکل ۱۱- مقایسه رفتار نمونه حاوی نانوسیلیس با نمونه کنترل در سن ۷ روز

زیر نمودارها افزایش می‌یابد. علت این امر می‌تواند به دلیل افزایش میزان خرده آسفالت بازیافتی و درصد قیر بیشتر در اطراف سنگ‌دانه‌ها باشد. بنابراین می‌توان گفت استفاده از خرده آسفالت بازیافتی، شکل‌پذیری نمونه‌های

در شکل ۱۲، منحنی تنش- کرنش نمونه‌های حاوی خرده آسفالت بازیافتی نشان داده شده است. محاسبه مساحت زیر نمودارها نشان می‌دهد که با افزایش درصد خرده آسفالت بازیافتی از ۲۵ تا ۱۰۰ درصد، سطح

نیز در این زمینه موثر است [۲۱]. نتیجه حاصل از جدول ۱۰، مقدار درصد کاهش یا افزایش انرژی جذب شده نمونه‌ها را در مقایسه با نمونه کنترل نشان می‌دهد.

بتن غلتکی را افزایش می‌دهد. فخری و عموسلطانی نیز در مطالعات خود برای افزایش شکل‌پذیری و جذب انرژی در بتن غلتکی از خرده آسفالت استفاده کردند. ایشان نشان دادند که علاوه بر خرده آسفالت، استفاده از پودر لاستیک



شکل ۱۲- مقایسه رفتار نمونه‌های حاوی خرده آسفالت بازیافتی در درصد‌های مختلف با یکدیگر در سن ۷ روز

جدول ۱۰- درصد جذب انرژی نمونه‌های حاوی خرده آسفالت بازیافتی در مقایسه با نمونه‌های حاوی نانوسیلیس و نمونه کنترل در سن ۷ روز

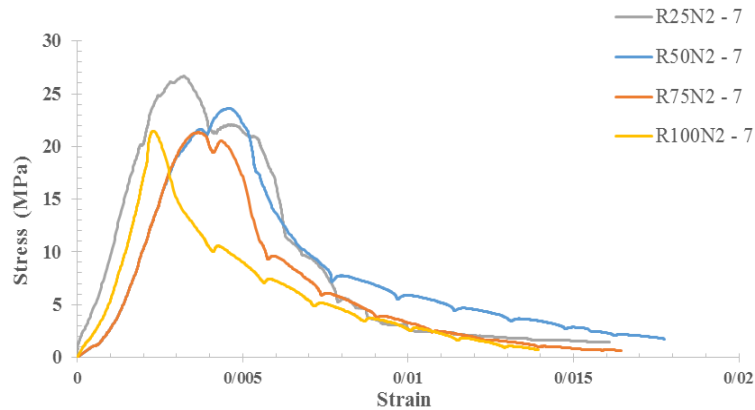
نام نمونه	درصد انرژی جذب شده نسبت به نمونه کنترل
Control - 7	-
N2% - 7	-۶۴/۲۹
R25 - 7	۴۷/۲۲
R50 - 7	۵۷/۸۰
R75 - 7	۶۶/۰۰
R100 - 7	۷۰/۱۶

نانوسیلیس بر شکل‌پذیری و تأثیر مثبت خرده آسفالت بر شکل‌پذیری مشهود است.

۳-۳-۲- بررسی و مقایسه رفتار نمونه‌های ۹۰ روزه بتن غلتکی

در شکل ۱۴، منحنی تنش- کرنش نمونه شاهد (کنترل) بتن غلتکی در مقایسه با نمونه حاوی نانوسیلیس بتن غلتکی ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که منحنی نمونه حاوی نانوسیلیس نسبت به نمونه کنترل به سمت راست حرکت کرده است و شکل‌پذیری نمونه حاوی نانوسیلیس نسبت به نمونه کنترل کاهش پیدا کرده است. میزان جذب انرژی در این نمونه در مقایسه با نمونه مشابه ۷ روزه بیشتر است.

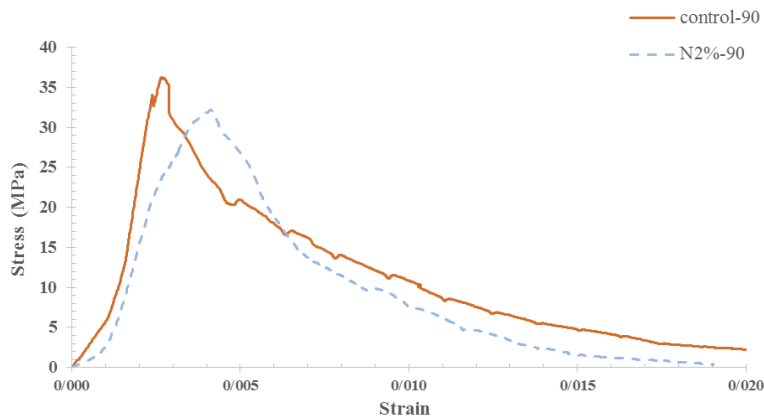
شکل ۱۳، نمودار تنش- کرنش نمونه‌های بتن غلتکی حاوی درصد‌های مختلف خرده آسفالت بازیافتی و نانوسیلیس را نشان می‌دهد. جدول ۱۱، مقدار انرژی جذب شده نمونه‌ها را در مقایسه با نمونه کنترل نشان می‌دهد. سطح زیر نمودار نمونه‌های حاوی خرده آسفالت بازیافتی و نانوسیلیس کمتر از سطح زیر نمودار نمونه کنترل است که بیانگر جذب انرژی کمتر نسبت به نمونه کنترل می‌باشد. از مقایسه رفتار نمونه حاوی خرده آسفالت بازیافتی و نانوسیلیس با نمونه حاوی فقط نانوسیلیس مشاهده می‌شود که شکل‌پذیری نمونه حاوی خرده آسفالت و نانوسیلیس بیشتر بوده و تأثیر منفی



شکل ۱۳- مقایسه رفتار نمونه‌های حاوی نانوسیلیس و خرده آسفالت بازیافتی در درصدهای مختلف با یکدیگر در سن ۷ روز

جدول ۱۱- نتایج مربوط درصد جذب انرژی نمونه حاوی نانوسیلیس و خرده آسفالت بازیافتی نسبت به نمونه کنترل در سن ۷ روز

نام نمونه	درصد انرژی جذب شده نسبت به نمونه کنترل
Control - 7	-
R25N2 - 7	۶۸/۵۷
R50N2 - 7	۶۵/۸۲
R75N2 - 7	۴۹/۰۰
R100N2 - 7	۴۰/۱۲



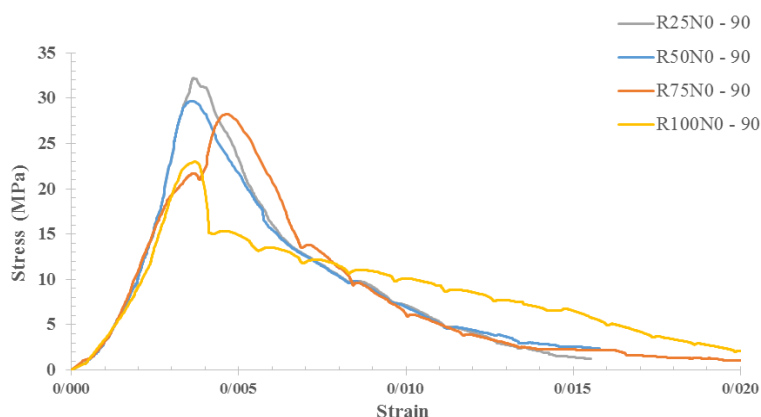
شکل ۱۴- مقایسه رفتار نمونه حاوی نانوسیلیس با نمونه کنترل در سن ۹۰ روز

جدول ۱۲ مقدار درصد انرژی جذب شده در مقایسه با نمونه کنترل نشان داده شده است.

در شکل ۱۶ منحنی تنش- کرنش بتن غلتکی حاوی نانوسیلیس و درصدهای مختلف خرده آسفالت بازیافتی نشان داده شده است. سطح زیر نمودار نمونه‌های حاوی خرده آسفالت بازیافتی و نانوسیلیس کمتر از سطح زیر نمودار نمونه کنترل است که بیانگر جذب انرژی کمتر نسبت به نمونه کنترل است. از مقایسه رفتار نمونه‌های حاوی خرده آسفالت بازیافتی و نانوسیلیس با نمونه حاوی فقط نانوسیلیس در سن ۹۰ روز مشاهده شد که

در شکل ۱۵ منحنی تنش- کرنش نمونه‌های حاوی خرده آسفالت بازیافتی در سن ۹۰ روز نشان داده شده است. سطح زیر نمودار نمونه‌های حاوی خرده آسفالت بازیافتی کمتر از نمونه کنترل است که بیانگر جذب انرژی کمتر است. نتایج نشان داد که کشیدگی نمودار حاوی ۱۰۰ درصد خرده آسفالت بازیافتی بیشتر از نمودار حاوی ۷۵ درصد خرده آسفالت بازیافتی می‌باشد که می‌تواند به خاطر وجود درصد قیر بیشتر اطراف سنگ‌دانه‌ها باشد و باعث شکل‌پذیری و جذب انرژی بیشتر شده است. در

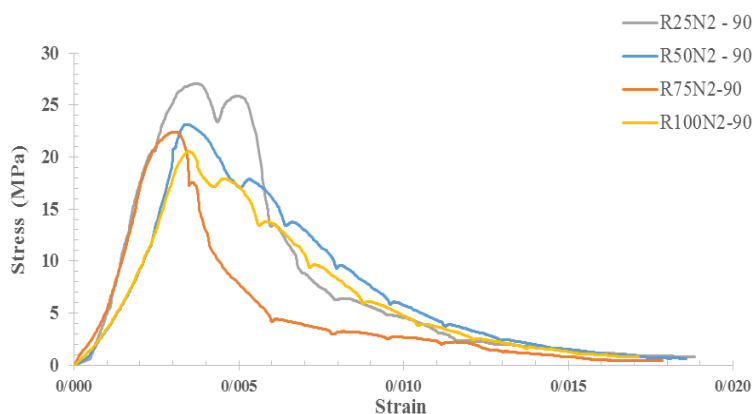
شکل‌پذیری نمونه‌های حاوی خرده آسفالت و نانوسیلیس
کمتر است. در جدول ۱۳، مقدار انرژی جذب شده در مقایسه با نمونه کنترل نشان داده شده است.



شکل ۱۵- مقایسه رفتار نمونه‌های حاوی خرده آسفالت بازیافتی در درصد‌های مختلف با یکدیگر در سن ۹۰ روز

جدول ۱۲- جذب انرژی نمونه‌های حاوی خرده آسفالت بازیافتی در مقایسه با نمونه‌های حاوی نانوسیلیس و نمونه کنترل در سن ۹۰ روز

نام نمونه	درصد انرژی جذب شده نسبت به نمونه کنترل
Control - 7	-
N2% - 90	۷۷/۱۸
R25 - 90	۶۹/۸۸
R50 - 90	۷۲/۱۱
R75 - 90	۷۴/۳۵
R100 - 90	۷۷/۶۲



شکل ۱۶- مقایسه رفتار نمونه‌های حاوی نانوسیلیس و خرده آسفالت بازیافتی در درصد‌های مختلف با یکدیگر در سن ۹۰ روز

جدول ۱۳- درصد جذب انرژی نمونه حاوی نانو سیلیس و خرده آسفالت بازیافتی نسبت به نمونه کنترل در سن ۹۰ روز

نام نمونه	درصد انرژی جذب شده نسبت به نمونه کنترل
Control - 7	-
R25N2 - 90	۶۵/۱۰
R50N2 - 90	۵۹/۲۷
R75N2 - 90	۵۱/۶۹
R100N2 - 90	۳۸/۸۵

۳-۴ تحلیل اقتصادی

در زمان تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی، قیمت مصالح سنگی و خرده آسفالت در استان بوشهر استعلام شده بود. نتیجه این بود که هزینه مصرف این مواد به ازای یک تن بسیار به هم نزدیک بودند. این نزدیکی، تمرکز آنالیز قیمت را بر روی ماده چسباننده قرار می داد. قیمت استعلام شده برای یک کیسه ۵۰ کیلوگرمی سیمان برابر ۱۴۰ هزار تومان است، درحالی که یک کیلوگرم نانوسیلیس حدوداً ۱۰ میلیون تومان ارزش دارد. این بدان معناست که استفاده از دو درصد نانوسیلیس در سیمان قیمت یک کیلو ماده چسباننده را به اندازه بسیار فاحشی افزایش می دهد. چنین می توان نتیجه گرفت که اگر نانوسیلیس در اشل صنعتی با حجم زیاد و قیمت اندک تولید نشود، گزینه جذاب اقتصادی برای رقابت با سیمان نخواهد بود. آبهیلاش^۵ و همکاران در مقاله مروری خود بیان می کنند که تولید سیمان به اندازه ۵ الی ۷ درصد کل دی اکسیدکربن جهان را تولید می کند [۳۳]. این بدان معناست که از دیدگاه زیست محیطی هر اقدامی که منجر به کاهش مصرف سیمان شود، می تواند تأثیرات زیست محیطی و آفری بر کره زمین داشته باشد.

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق، تأثیر استفاده از خرده آسفالت بازیافتی به عنوان جایگزین با درصدهای مختلف در قسمت درشت دانه مصالح سنگی بتن غلتکی در حضور نانوسیلیس و بدون حضور آن مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور وزن حجمی، درصد بهینه رطوبت، مقاومت فشاری و انرژی جذب شده در نمونه‌های بتن غلتکی بررسی شد. نتایج نشان داد که:

۱- با افزودن خرده آسفالت بازیافتی به نمونه بتن غلتکی با درصدهای ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد،

تغییرات بسیار محسوس و بزرگی در درصد رطوبت بهینه ایجاد نشد. صرفاً مقدار کاهش رطوبت بهینه با در نظر گرفتن خطاهای آزمایشگاهی به ترتیب ۰/۸۶، ۱/۹، ۳/۲۷ و ۵/۱۷ نسبت به نمونه شاهد بودند. وزن مخصوص نمونه‌های بتن غلتکی با جایگزینی خرده آسفالت بازیافتی کاهش پیدا کرد که این امر ناشی از وجود قیر در اطراف سنگ دانه‌ها می باشد.

۲- با افزودن نانوسیلیس به نمونه‌های بتن غلتکی، درصد رطوبت بهینه جهت ساخت نمونه‌ها افزایش یافت. نتایج نشان داد که با افزودن دو درصد نانوسیلیس به نمونه شاهد بتن غلتکی، رطوبت بهینه نه درصد و با افزودن چار درصد نانوسیلیس، رطوبت بهینه ۲۱ درصد در نمونه‌های بتن غلتکی افزایش یافت. همچنین وزن مخصوص نمونه‌های بتن غلتکی روسازی با افزودن نانوسیلیس افزایش یافت.

۳- در نمونه‌های بتن غلتکی حاوی خرده آسفالت بازیافتی و نانوسیلیس، مشاهده شد که در نمونه حاوی ۱۰۰٪ خرده آسفالت و دو درصد نانوسیلیس مقدار درصد رطوبت بهینه جهت ساخت نمونه بتن غلتکی تقریباً برابر با درصد رطوبت بهینه نمونه شاهد بتن غلتکی است؛ که بیانگر تقابل نانوسیلیس و خرده آسفالت بازیافتی به ترتیب در جهت افزایش و کاهش درصد رطوبت بهینه جهت ساخت نمونه‌های بتن غلتکی روسازی است.

۴- مقاومت فشاری نمونه‌های بتن غلتکی روسازی در سنین ۷ و ۹۰ روز با جایگزین کردن خرده آسفالت بازیافتی کاهش یافت. در سن ۷ روزه با جایگزین کردن خرده آسفالت بازیافتی تا مقدار نصف (۵۰٪)، حداقل مقاومت فشاری موردنظر تأمین می شود، ولی در سن ۹۰ روزه با جایگزین

کرنش شد که بیانگر جذب انرژی بیشتر است. با افزودن نانوسیلیس به نمونه شاهد بتن غلتکی و نمونه‌های حاوی خرده آسفالت بازیافتی، مشاهده شد که شکل‌پذیری کاهش می‌یابد که باز هم بیانگر تأثیر منفی نانوسیلیس بر جذب انرژی و شکل‌پذیری نمونه‌های بتن غلتکی می‌باشد.

کردن تا مقدار ۷۵٪ درصد خرده آسفالت بازیافتی حداقل مقاومت فشاری به دست می‌آید. تأثیر منفی نانوسیلیس بر مقاومت فشاری در سن ۹۰ روزه بیشتر از سن ۷ روزه است. ۵- افزودن خرده آسفالت بازیافتی با درصد‌های بیشتر، موجب افزایش سطح زیر نمودار تنش-

References

- [1] Tayabji SD, Sherman TW, Arent WL, Kohn S, Piggott RW, Berry JR, Larsen RL, Ragan SA, Cole L, Lopez RW, Rice JL. Report on Roller-Compacted Concrete Pavements. 1995.
- [2] Committee A. Editor Roller-compacted Mass Concrete. American Concrete Institute. 1999:
- [3] Gopinath S, Mouli PC, Murthy A, Iyer NR, Maheswaran S. Effect of nano silica on mechanical properties and durability of normal strength concrete. Archives of Civil Engineering. 2012; 433-444. doi: 10.2478/v.10169-012-0023-y
- [4] Björnström J, Martinelli A, Matic A, Börjesson L, Panas I. Accelerating effects of colloidal nano-silica for beneficial calcium-silicate-hydrate formation in cement. Chemical Physics Letters. 2004; 392(1-3): 242-248. doi: 10.1016/j.cplett.2004.05.071
- [5] Li H, Zhang M-h, Ou J-p. Abrasion resistance of concrete containing nano-particles for pavement. Wear. 2006; 260(11-12): 1262-1266. doi: 10.1016/j.wear.2005.08.006
- [6] Chaipanich A. Silica fume: Its role in cement and concrete technology. CMU J Spec Issue Nanotechnol. 2005; 4(1): 121-124.
- [7] Maheswaran S, Bhuvaneshwari B, Palani G, Nagesh R, Kalaiselvam S. An overview on the influence of nano silica in concrete and a research initiative. Research Journal of Recent Sciences. 2013; 2277: 17-24.
- [8] Monajem M S, M. T. Investigating the effect of silica fume on the properties of roller-compacted concrete in road pavement. 6th National Congress on Civil Engineering; Semnan: Semnan University; 2010.
- [9] Ranjani A, Keerthana K, K. AN. Study on effect of micro silica and nano silica in polyester fibre reinforced concrete. International Research Journal of Engineering and Technology. 2016; 3(4): 1031-1034.
- [10] Seifollahi F, Mohammadi Y. The effects of nano silica and steel fibers on mechanical properties of roller-compacted concrete pavement. Concrete Research. 2020; 13(2): 31-43. doi: 10.22124/jcr.2020.14965.1405
- [11] Hemalatha M, Khed VC, Harsha G, Adamu M. Feasibility study on compressive strength of roller compacted concrete pavement using nano silica and natural fibre. InAIP Conference Proceedings 2022 Dec 7; 2426(1): 020006. doi: 10.1063/5.0127345
- [12] Amiri MM, Adabi M, Darvishan E, Armanpour AH. Investigation of effect of size and content of nano/SiO₂ on the strength and durability of RCC in freezing-thawing cycles. Sharif Journal of Civil Engineering. 2022; 38(1.2): 145-154. doi: 10.24200/j30.2021.58139.2958 [In Persian]
- [13] Altalib F, Tavakoli H, Hashemi SK. Investigating the Static and Dynamic Behavior of Structural Lightweight Concrete Containing Nano-Silica and Steel Fibers. Civil Infrastructure Researches. 2024; 10(1): 85-107. doi: 10.22091/cer.2023.9673.1497 [In Persian]
- [14] Adamu M, Raut AN, Ibrahim YE, Janga S, Khed VC. Multicriteria-based optimization of roller compacted concrete pavement containing crumb rubber and nano-silica. Nanotechnology Reviews. 2024; 13(1): 20240046. doi: 10.1515/ntrev-2024-0046
- [15] Mariyappan R, Palammal JS, Balu S. Sustainable use of reclaimed asphalt pavement (RAP) in pavement applications—a review. Environmental Science and Pollution Research. 2023; 30(16): 45587-45606. doi: 10.1007/s11356-023-25847-3
- [16] Rout MD, Biswas S, Shubham K, Sinha AK. A systematic review on performance of reclaimed asphalt pavement (RAP) as sustainable material in rigid pavement construction: Current status to future perspective. Journal of Building Engineering. 2023 Oct 1; 76: 107253. doi: 10.1016/j.jobbe.2023.107253
- [17] Bilodeau K, Sauzeat C, Di Benedetto H, Olard F, Bonneau D. Laboratory and in situ investigations of steel fiber-reinforced compacted concrete containing reclaimed asphalt pavement. Transportation Research Board 90th Annual Meeting; Washington DC, United States. 2011.
- [18] Ferrebee EC, Brand AS, Kachwalla AS, Roesler JR, Gancarz DJ, Pforr JE. Fracture properties of roller-compacted concrete with virgin and recycled aggregates. Transportation Research Record. 2014; 2441(1): 128-134. doi: 10.3141/2441-17

- [19] Modarres A, Hosseini SZ. Investigation of Behavioral Characteristics of Roller Compacted Concrete Containing Recycled Asphalt Pavements. *Quarterly Journal of Transportation Engineering*. 2015; 7(2): 297-231. [In Persian]
- [20] Oss-Emer AL, dos Santos AG. Predicting the Performance of Semi-Rigid Pavement with Partial Replacement of RAP in RCC and Designed Using a Mechanistic–Empirical Method. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2024: 1-15. doi: **10.1007/s42947-024-00429-9**
- [21] Fakhri M, Amoosoltani E. The effect of reclaimed asphalt pavement and crumb rubber on mechanical properties of roller compacted concrete pavement. *Construction and Building Materials*. 2017; 137: 470-484. doi: **10.1016/j.conbuildmat.2017.01.136**
- [22] Debbarma S, Ransinchung G. Achieving sustainability in roller compacted concrete pavement mixes using reclaimed asphalt pavement aggregates–state of the art review. *Journal of Cleaner Production*. 2021; 287: 125078. doi: **10.1016/j.jclepro.2020.125078**
- [23] Xing C, Li M, Liu L, Lu R, Liu N, Wu W, Yuan D. A comprehensive review on the blending condition between virgin and RAP asphalt binders in hot recycled asphalt mixtures: Mechanisms, evaluation methods, and influencing factors. *Journal of Cleaner Production*. 2023 Apr 20; 398: 136515. doi: **10.1016/j.jclepro.2023.136515**
- [24] Keymanesh MR, Mohammad Karimi M, Taghinezhad omran A. Evaluation of the Effect of Aging on the Long-Term Performance of WMA Containing High Percentage of RAP Based on the Results of SCB Test at Intermediate Temperature. *Civil Infrastructure Researches*. 2022; 8(1): 1-20. doi: **10.22091/cer.2021.7526.1320** [In Persian]
- [25] Ghanizadeh AR, Fathizadeh F. Numerical Investigation of the Effect of Using Base Materials Containing Recycled Concrete Aggregates on the Performance of Asphalt Pavements Considering Nonlinear Behavior of Materials. *Civil Infrastructure Researches*. 2023; 8(2): 115-130. doi: **10.22091/cer.2022.8110.1386** [In Persian]
- [26] American Concrete Institute, Guide for selecting proportions for no-slump concrete reported by ACI committee 211. 2002; 2: 1-26.
- [27] ASTM. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 Ft-lbf/ft³ (600 KN-m/m³)) 1. 2007.
- [28] ASTM. Standard practice for molding roller-compacted concrete in cylinder molds using a vibrating hammer. 2014.
- [29] Choi Y-K, Groom JL. RCC mix design-soils approach. *Journal of materials in Civil Engineering*. 2001; 13(1): 71-76. doi: **10.1061/(ASCE)0899-1561(2001)13:1(71)**
- [30] Portland Cement Association, Roller-compacted concrete density: Principles and practices. Portland Cement Association, Skokie, Illinois. 2004.
- [31] ASTM. Standard practice for capping cylindrical concrete specimens. American Society for Testing and Materials-Committee C09 on Concrete and Concrete Aggregates-Subcommittee C. 2015.
- [32] Settari C, Debieb F, Kadri EH, Boukendakdji O. Assessing the effects of recycled asphalt pavement materials on the performance of roller compacted concrete. *Construction and building materials*. 2015; 101: 617-621. doi: **10.1016/j.conbuildmat.2015.10.039**
- [33] Abhilash P, Nayak DK, Sangoju B, Kumar R, Kumar V. Effect of nano-silica in concrete; a review. *Construction and Building Materials*. 2021; 278: 122347. doi: **10.1016/j.conbuildmat.2021.122347**
- [34] Guidelines for the design, implementation and maintenance of concrete paving of roads. The Planning and Budget Organization of Iran. 2018. [In Persian]
- [35] Rezaei MR, Abdi Kordani A, Zarei M. Experimental investigation of the effect of Micro Silica on roller compacted concrete pavement made of recycled asphalt pavement materials. *International Journal of Pavement Engineering*. 2022; 23(5): 1353-1367. doi: **10.1080/10298436.2020.1802024**