



Semnan University



Research Article

## Investigating the Mechanical Properties of Roller-Compacted Concrete Containing Waste Ceramic Aggregates

Danial Nasr<sup>a\*</sup>, Rezvan Babagoli<sup>b</sup>, Hooman Holakooy Naeini<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Khoraskan Branch, Islamic Azad University, Isfahan, I. R. Iran.

<sup>b</sup> Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Science and Technology of Mazandaran, Behshahr, I. R. Iran.

<sup>c</sup> Graduated MSc., Department of Civil Engineering, Khoraskan Branch, Islamic Azad University, Isfahan, I. R. Iran.

### PAPER INFO

#### *Paper history:*

Received: 2026-02-14

Revised: 2026-04-18

Accepted: 2026-04-18

#### *Keywords:*

Roller-Compacted Concrete,

Compressive strength, Tensile strength,

Waste ceramic aggregates.

### ABSTRACT

With the expansion of transportation networks, a large portion of national incomes is spent on road repair and maintenance. Due to the disadvantages of asphalt pavements and the rising cost of bitumen, concrete pavement has become economically justifiable. This study investigated using waste ceramic aggregates as a substitute for natural aggregates in roller-compacted concrete (RCC). Six mix designs were prepared for 7 and 28 days, with nine specimens per mix. Tests for compressive strength, tensile strength, specific gravity, and water absorption were conducted. The results showed that replacing fine aggregates with ceramic aggregates at 28 days significantly increased compressive and tensile strength, reaching up to 39 MPa and 5.2 MPa, respectively. Using ceramic aggregates as coarse aggregates also improved strength compared to the control sample. Overall, ceramic aggregates increased compressive strength by about 39% and indirect tensile strength by about 5%. In contrast, specific gravity decreased and water absorption increased by up to 80%, indicating higher porosity. These findings highlight the importance of ceramic aggregates for improving RCC performance. Finally, due to the use of ceramic aggregates, specific gravity decreased and water absorption increased because of their higher water absorption capacity.

\* Corresponding author.

E-mail address: danialnasr@iau.ac.ir

**How to cite this article:** Nasr, D., Babagoli, R., & Holakooy Naeini, H. (2026). Investigating the mechanical properties of roller-compacted concrete containing waste ceramic aggregates. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 11(4), 141-177.

<https://doi.org/10.22075/jtie.2026.40602.1755>

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



مقاله پژوهشی

بررسی خصوصیات مکانیکی بتن غلتکی حاوی سنگدانه‌های سرامیک ضایعاتی

دانیال نصر<sup>۱\*</sup>، رضوان باباگلی<sup>۲</sup>، هومن هلاکوی نائینی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، گروه عمران، واحد خوراسگان، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

<sup>۲</sup> استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران.

<sup>۳</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

با توسعه شبکه حمل و نقل، بخش زیادی از درآمدهای کشورها صرف تعمیر و نگهداری راه‌ها می‌شود. با توجه به معایب روسازی آسفالتی نسبت به روسازی بتنی و افزایش هزینه قیر، استفاده از روسازی بتنی توجیه اقتصادی پیدا کرده است. در این تحقیق به بررسی امکان استفاده از سنگدانه‌های سرامیک ضایعاتی به منظور جایگزینی با سنگدانه‌های طبیعی در بتن غلتکی پرداخته شد. استفاده از مواد ضایعاتی نه تنها باعث کاهش مواد ضایعاتی و بازیافت مناسب آنها می‌گردد بلکه با کاهش مصرف مصالح طبیعی به اقتصاد ساخت و محیط‌زیست نیز کمک خواهد کرد. برای دستیابی به این هدف، ۶ طرح اختلاط متفاوت برای سنین ۷ و ۲۸ روزه طراحی و برای هر طرح ۹ عدد نمونه ساخته شده و آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت کششی، وزن مخصوص و جذب آب روی نمونه‌های بتن غلتکی انجام گردید. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که مقاومت فشاری و کششی بتن غلتکی در سن ۲۸ روز با جایگزینی سنگدانه‌های سرامیکی به عنوان ریزدانه باعث افزایش چشمگیر مقاومت فشاری و کششی به ترتیب تا ۳۹ و ۵/۲ مگاپاسکال می‌شود. همچنین، استفاده از سنگدانه‌های سرامیکی به عنوان درشت‌دانه هم مقاومت فشاری و کششی بتن غلتکی را در مقایسه با نمونه شاهد بهبود می‌بخشد. نتایج نشان داد که استفاده از سنگدانه‌های سرامیکی منجر به افزایش مقاومت فشاری تا حدود ۳۹٪ و افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم تا حدود ۵٪ نسبت به نمونه شاهد شد. در مقابل، وزن مخصوص مخلوط‌ها کاهش یافته و جذب آب تا حدود ۸۰٪ افزایش نشان داد که بیانگر افزایش تخلخل در مخلوط‌های حاوی سرامیک است. نتایج این پژوهش گویای اهمیت کاربرد سنگدانه‌های سرامیکی جهت بهبود عملکرد بتن غلتکی می‌باشد. در نهایت، به دلیل استفاده از سنگدانه‌های سرامیکی در بتن، وزن مخصوص آن کاهش و جذب آب بیشتر به دلیل سنگدانه‌های سرامیکی افزایش یافته است.

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۱۱/۲۵  
بازنگری مقاله: ۱۴۰۵/۰۱/۲۹  
پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۱/۲۹

واژه‌های کلیدی:

بتن غلتکی،  
مقاومت فشاری،  
مقاومت کششی،  
سنگدانه‌های سرامیک  
ضایعاتی.

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: [danielnasr@iau.ac.ir](mailto:danielnasr@iau.ac.ir)

استناد به این مقاله: نصر، د.، باباگلی، ر. و هلاکوی نائینی، ه. (۱۴۰۴). بررسی خصوصیات مکانیکی بتن غلتکی حاوی سنگدانه‌های

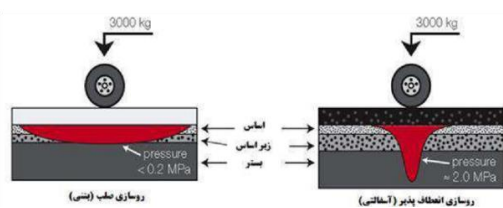
سرامیک ضایعاتی. مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۱۱(۴)، ۱۷۷-۱۴۱.

<https://doi.org/10.22075/jtie.2026.40602.1755>

## ۱. مقدمه

می‌باشد. بتن غلتکی معمولاً جهت ساخت روسازی برای ترافیک سنگین با سرعت کم و یا سدهای بتنی به کار گرفته می‌شود.

هدف از طراحی روسازی، فراهم آوردن یک ترکیب سازه‌ای روی مسیر حرکت جهت انتقال ترافیک عبوری به صورت ایمن، یکنواخت و کارآمد می‌باشد. به طور کلی، روسازی‌ها به سه دسته: صلب، انعطاف‌پذیر و مرکب تقسیم می‌شوند. روسازی‌های انعطاف‌پذیر به روسازی‌هایی اطلاق می‌شود که سطح آن‌ها با آسفالت یا مصالح قیری پوشش شده باشد. علت استفاده از واژه‌ی انعطاف‌پذیر در این نوع روسازی، خمش و تغییر شکل سازه‌ی روسازی تحت بارهای ترافیکی می‌باشد. از سوی دیگر، روسازی صلب (شکل ۱) به آن دسته از روسازی‌ها گفته می‌شود که لایه‌ی سطحی آن از بتن تشکیل شده باشد (کاظمی و همکاران، ۲۰۱۸).



شکل ۱. روش انتقال بار روسازی صلب و انعطاف

پذیر (کاظمی و همکاران، ۲۰۱۸)

با توسعه شبکه حمل و نقل، بخش زیادی از درآمدهای کشورها صرف تعمیر و نگهداری راه‌ها می‌شود. با توجه به معایب روسازی آسفالتی نسبت به روسازی بتنی و افزایش هزینه قیر، استفاده از روسازی بتنی توجیه اقتصادی پیدا کرده است. یکی از کاربردی‌ترین انواع روسازی بتنی، روسازی بتن غلتکی می‌باشد (شمسایی و آقایان، ۲۰۱۶).

بتن غلتکی راه‌حلی مناسب جهت توان‌بخشی سازه‌های بتن مسلح چه از لحاظ اقتصادی و چه از منظر سرعت در اجرا و صرفه‌جویی در زمان و هزینه کارگران به شمار می‌رود (شیروانی و دشتی رحمت‌آبادی، ۲۰۱۷). بتن غلتکی یا بتن متراکم‌شده (RCCP)<sup>۱</sup> مخلوط

در دنیای امروز، پیشرفت علم و صنایع مختلف، بهبود برخی خواص و افزایش سرعت و بهره‌وری آسان از مواد و مصالح را به همراه داشته که در پی آن، ناخواسته آسیب‌هایی هم به محیط‌زیست وارد گردیده است. از این‌رو محققان به دنبال راهکاری هستند که علاوه بر بهبود خواص، آسیبی به محیط‌زیست وارد نکنند. بتن به عنوان پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی در تمامی دنیا شناخته می‌شود که استفاده از آن همچنان در حال افزایش است. در کشورهای در حال توسعه، نخاله‌های ساختمانی بخش بزرگی از زباله شهری را به خود اختصاص می‌دهند که علاوه بر هزینه بسیار بالا برای دفع آن، عواقب نامطلوبی بر محیط‌زیست نیز دارند.

امروزه استفاده از بازیافت نخاله‌های ساختمانی و دورریز در بتن باعث کاهش خطرات زیست‌محیطی ناشی از تجزیه و یا انبار کردن آنها می‌شود و از سوی دیگر از هدر رفت منابع طبیعی جلوگیری می‌کند و جایگزینی سرامیک به عنوان شن و ماسه ضمن حفظ محیط‌زیست، می‌تواند منجر به تولید بتن قابل استفاده در صنعت ساختمان شود (رئیزی و ابادری، ۲۰۱۶؛ رضایی و همکاران، ۲۰۱۷).

در سازه‌های بتنی، برای رسیدن به مقاومت مورد نیاز، کاهش تخلخل و هوای درون بتن و همچنین حصول پایایی، بتن به روش‌های مختلف لرزانده می‌شود. با توسعه روزافزون کارهای بتنی و کمبود نسبی کارگران ماهر و یا سهل‌انگاری آنان در کارگاه‌ها و یا به دلیل مزاحمت‌های جسمی و روحی و یا هزینه لرزاندن بتن در هنگام ریختن بتن در قالب، به‌ویژه در موضعی که تراکم میلگرد وجود دارد عمل لرزاندن به‌طور کامل و صحیح انجام نگرفته و در نهایت مشخصات مکانیکی مطلوب بتن حاصل نمی‌گردد. توسعه فناوری‌های نوین در صنعت تولید بتن و در برخی موارد ضرورت‌های اجرایی، یکی از کاربردی‌ترین انواع روسازی بتنی، روسازی بتن غلتکی

سیمان کمک کند و از این طریق کمک شایانی به محیط‌زیست صورت گرفته باشد (توکلی و همکاران، ۲۰۱۳).

استفاده از ضایعات بتن، شیشه، آجر، سرامیک، موزاییک، سرباره کوره ذوب آهن و خاکستر پوسته برنج از جمله موارد استفاده از مواد ضایعاتی در بتن می‌باشند. مواد ضایعاتی در بتن می‌توانند جایگزین سیمان یا سنگدانه‌ها گردند. برخی مواد خاصیت استفاده به‌عنوان پوزولان را دارند، ولی از برخی مواد می‌توان تنها به‌عنوان پرکننده و یا سنگدانه استفاده کرد. در ادامه، مروری بر سرامیک خواهیم داشت (میر، ۲۰۰۹).

کاشی و سرامیک ساختمانی از مواد بسیار پرمصرف در سازه‌ها هستند. تولید جهانی کاشی در دنیا ۸۵۰۰ میلیون متر مربع است و این میزان تولید، کاشی و سرامیک ساختمانی را به‌عنوان یکی از پرمصرف‌ترین مواد در جهان قرار می‌دهد. تولید کاشی و سرامیک در ایران حدود ۴۰۰ میلیون متر مربع (رتبه پنجم تولید کاشی در جهان) و میزان تولید چینی بهداشتی در ایران حدود ۹۰ هزار تن است. معمولاً ضایعات کاشی، سرامیک و چینی‌های بهداشتی به چندین صورت ایجاد می‌شوند: بخشی از ضایعات در کارخانه‌ها در حین و بعد از فرآیند تولید به علت خطای ساخت و یا اشتباهات انسانی و مواد اولیه نامناسب، بخشی دیگر در مسیرهای حمل و نقل و توزیع و بخش اعظم در اثر تخریب ساختمان‌ها و ضایعات باقی‌مانده از آنها ایجاد می‌شوند. پیش‌بینی می‌شود حدود ۳-۷ درصد از تولید روزانه سرامیک در جهان به‌صورت ضایعات درمی‌آید. همچنین، میزان ضایعات ناشی از تخریب ساختمان‌ها نیز به این مورد اضافه می‌شود؛ که این میزان ضایعات به میلیون‌ها تن در سال می‌رسد. ماهیت این مواد به‌گونه‌ای است که نمی‌توان از آن‌ها مجدداً در چرخه تولید استفاده کرد و عملاً بدون استفاده می‌مانند و همچنین به‌صورت یک زباله ساختمانی باعث آلودگی محیط‌زیست می‌شوند و

سفت و نسبتاً خشکی با اسلامپ صفر است که از سنگدانه‌ها، مواد سیمانی و آب تشکیل شده و با ارتعاش توسط غلتک‌های بتنی محکم و سفت می‌شود. دو نوع بتن غلتکی در کارهای عمرانی استفاده می‌شود؛ یکی در ساخت سدها و سازه‌های حجیم و دیگری در اجرای لایه‌های روسازی بزرگراه‌ها و پوشش‌های مشابه که در آن‌ها مقاومت مکانیکی و سایشی بالایی مورد نیاز است. به‌طور کلی، بتن غلتکی به‌عنوان روسازی برای بار-های سنگین مناسب بوده و در این گونه کاربردها عملکرد آن به‌خوبی روسازی بتنی معمولی است. اما در عین حال باید توجه کرد که دستیابی به سطح صاف جهت سرعت-های بالا با بتن غلتکی دشوار بوده است.

امروزه، با توجه به افزایش استفاده از این نوع روسازی نیاز به استفاده از مصالح جدید است که بتواند خصوصیات مکانیکی و فیزیکی بتن را افزایش داده و در عین حال مقرون به صرفه‌تر کند احساس می‌شود و با توجه به اینکه بیش از ۷۵ درصد وزنی یا حجمی بتن را مصالح سنگی تشکیل می‌دهد، این مصالح تأثیر بسزایی در این خواص ایفا می‌کنند.

از سوی دیگر، امروزه در سراسر جهان فشار زیادی بر بخش‌های مختلف صنایع به‌منظور هماهنگی و تعامل بیش‌تر با محیط‌زیست اعمال می‌گردد، گرچه در بیش‌تر موارد انجام تغییرات عمده با بروز مشکلاتی همراه است. متخصصین محیط‌زیست ابراز می‌دارند مشکل اصلی صنایع این است که با تمرکز در هر بخش، به‌طور کامل به آن پرداخته می‌شود و ملزومات رشد و توسعه آن دنبال می‌گردد، بدون توجه به اینکه فعالیت صنعتی در آن بخش چه اندرکنشی با جامعه و مسائل محیط‌زیست دارد. مشکلاتی که زیاده‌های ساختمانی برای محیط‌زیست ایجاد می‌کنند به همان میزان که تولید سیمان با تولید دی‌اکسید کربن به محیط‌زیست ضربه می‌زند، اهمیت دارد. در این بین، استفاده از مواد ضایعاتی در بتن می‌تواند هم به کاهش زباله‌های ساختمانی و هم به کاهش مصرف

آزمایش‌ها نشان داد که استفاده از ضایعات سرامیک به عنوان سنگدانه سبب افزایش زمان تراکم بتن می‌شود. جایگزینی ۱۰ درصد ضایعات سرامیک با سنگدانه طبیعی باعث افزایش ۱۰ درصدی مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه نمونه بتن غلتکی نسبت به نمونه شاهد شد، که این افزایش ۱۰ درصدی، بیشتر از حداقل مقدار مجاز آیین-نامه بود. همچنین، جایگزین کردن ۲۵ درصد سرامیک با سنگدانه طبیعی کاهش مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه را در پی داشت. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که با استفاده از این ضایعات در مخلوط بتن غلتکی روسازی علاوه بر بهبود برخی ویژگی‌های مخلوط بتنی، می‌توان با هزینه کم مقدار زیادی از این ضایعات را بازیافت کرد و با کاهش مقدار سنگدانه طبیعی هزینه‌های ساخت را نیز کاهش داد.

حسن‌زاده و همکاران (۲۰۱۹) در تحقیقی به مطالعه نمونه‌های کنترلی، پودر سرامیک با ۲٪، ۵٪ و ۱۰٪ وزنی سیمان جایگزین شده پرداخته‌اند و در نهایت مشخصات بتن جدید و خواص مکانیکی روسازی بتن غلتکی مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که استفاده از پودرهای سرامیک باعث کاهش زمان ترکیب مخلوط بتن و کاهش مقاومت فشاری، کششی و خمشی می‌شود. در این آزمایش‌ها، نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های کنترل شده دچار افت کم مقاومت شده‌اند، در صورتی که مقاومت فشاری ۲۸ روزه این مخلوط‌ها بالاتر از مقدار حداقل مجاز برای لایه اصلی روسازی بتن غلتکی است. کمترین افت مقاومت در تمام آزمایش‌ها در نمونه‌های با ۵٪ جایگزینی پودر سرامیک بوده است. میانگین مقاومت فشاری، کششی و استحکام خمشی این نمونه‌ها پس از ۹۰ روز حدود ۲٪ کمتر از نمونه‌های کنترل شده است. بنابراین، استفاده از این ضایعات به جای بخشی از سیمان علاوه بر کاهش هزینه‌های ساخت و ساز، باعث حفظ منابع غیرقابل تجدید، ذخیره انرژی و جلوگیری از آلودگی محیط‌زیست می‌شود.

خسارت‌هایی به آن وارد می‌کنند (میر، ۲۰۰۹). ضرورت انجام این تحقیق را بدون تردید می‌توان در مشکلات بتن دانست که به علت پرمصرف‌ترین و مهم‌ترین مصالح ساختمانی قرن بیستم معرفی شده است و پس از آب بیشترین ماده‌ای است که بشر مصرف می‌کند. این در حالی است که فقط حدود دو قرن از ابداع سیمان و بتن گذشته است و این مصرف به سرعت در حال فزونی می‌باشد. اما متأسفانه در کشور ما به دلیل ارزانی قیر در چندین سال گذشته و عدم وجود دانش فنی و اجرایی مورد نیاز، مورد توجه قرار نگرفته است. از نظر تئوری و تجربی می‌توان نتیجه گرفت که از روسازی‌های بتنی در هر شرایط محیطی، ترافیک، خاک و... با در نظر گرفتن عوامل اقتصادی استفاده نمود.

از طرفی، در حدود ۷ درصد از کل انتشار دی‌اکسید کربن بر اثر تولید کلینکر در کارخانه‌های سیمان می‌باشد که نشان‌دهنده این است که استفاده از میزان بالای سیمان سبب افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی و افزایش هزینه‌های تولید سیمان می‌گردد (مدندوست، ۱۳۹۴). از این رو، یکی از راهکارهای کاهش مصرف سنگدانه طبیعی و سیمان، جایگزین کردن آن با مواد افزودنی در دسترس و ضایعاتی مانند سرامیک ضایعاتی به دلیل منابع فراوان آن در کشور و صرف انرژی کمتر هم به دلیل خاصیت پوزولانی، به‌کارگیری ضایعات ساختمانی و همچنین نقش آن‌ها در بهبود خصوصیات بتن و سازگاری با محیط‌زیست بسیاری از پسماندهای طبیعت را در جهت افزایش مقاومت آن می‌توان مورد استفاده قرار داد، می‌باشد (اسفندیاری و دیواندری، ۲۰۱۸).

اسدی و همکاران (۲۰۱۸) در مطالعه‌ای، به امکان-سنجی استفاده از ضایعات سرامیکی به عنوان بخشی از مصالح سنگی درشت‌دانه در مخلوط بتن غلتکی روسازی پرداختند. ضایعات سرامیک در دو نسبت ۱۰ و ۲۵ درصد وزنی جایگزین مصالح سنگی درشت‌دانه شدند. نتایج

خواص بتن باشد. از این رو، ضایعات خرد شده سرامیکی در بتن به عنوان جایگزینی برای مصالح درشت طبیعی با صفر، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد جایگزینی استفاده می‌شود. پس از تجزیه و تحلیل نتایج، مقدار بهینه ضایعات کاشی و سرامیک مورد استفاده در مخلوط بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۵ به عنوان حدود ۲۰٪ تعیین شد. مقاومت فشاری و کششی با مقدار بهینه جایگزینی به ترتیب ۳۵/۵۵ و ۴/۱ مگاپاسکال است که ۱۰/۰۹ و ۲۸/۹ درصد نسبت به بتن معمولی بیشتر است.

در تحقیق هالیکا و همکاران (۲۰۱۳) مطالعاتی در مورد استفاده مجدد از ضایعات بهداشتی و سرامیکی به عنوان مصالح (ریز و درشت) در بتن ارائه شد. ضایعات مواد سرامیکی بهداشتی به عنوان گروهی از پسماندهای غیر قابل تجزیه زیست تخریب پذیر، طبقه بندی می‌شوند. در این مقاله، ضایعات بهداشتی سرامیکی خرد شده به عنوان سنگدانه در بتن، با ضایعات سیمان آلومینا مخلوط و در دمای ۱۰۰۰ درجه سلسیوس قرار داده شد. برای مقایسه، نمونه‌هایی با سنگدانه طبیعی و سیمان آلومینا نیز گرم شدند. نتایج حاصل از بررسی برخلاف نمونه‌های بتن با سنگدانه‌های طبیعی، نمونه‌های با سنگدانه‌های سرامیکی، شکل و انسجام خود را حفظ کرده و هیچ ترک و نقصی از خود نشان ندادند. علیرغم کاهش مقاومت این نمونه‌ها پس از گرم شدن، مقاومت فشاری، کششی بالا و مقاومت در برابر سایش را نشان می‌دهند. بر اساس مطالعات انجام شده، می‌توان برای تهیه انواع خاص بتن از سنگدانه‌های سرامیکی ضایعاتی استفاده کرد.

در تحقیق دانیال و احمد (۲۰۱۵) کاربرد ضایعات مصالح کاشی و سرامیک در بتن مورد بررسی قرار گرفت. در ساخت‌های اخیر، مصرف مواد سرامیکی روز به روز در حال افزایش است. بنابراین استفاده از این ضایعات در تولید بتن می‌تواند یک اقدام مؤثر در حفظ محیط و بهبود خواص بتن باشد. از این رو، جایگزینی ضایعات خرد شده سرامیکی در بتن به عنوان مصالح طبیعی درشت‌دانه

در تحقیق رضایی و همکاران (۲۰۱۷) به تأثیر نسبت جایگزینی سرامیک در مشخصات مکانیکی و دوام بتن های بازیافتی پرداخته شد. برای این منظور، جهت بررسی اثر جایگزینی سرامیک با شن، ۶ طرح اختلاط با جایگزینی صفر، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد مصالح برای شن و ۳ طرح اختلاط با درصد جایگزینی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ برای ماسه ساخته شد. در این پژوهش، وزن مخصوص بتن بازیافتی با سرامیک، مقاومت فشاری و کششی بتن بازیافتی شامل سرامیک، مقاومت ویژه الکتریکی و دوام در برابر اسید مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی نشان می‌دهد که استفاده از سرامیک ضایعاتی به عنوان درشت‌دانه اثر مخربی روی مقاومت فشاری و کششی بتن ندارد و در مواردی حتی باعث افزایش مقاومت آن می‌شود؛ اما در عوض استفاده از سرامیک ضایعاتی به عنوان ریزدانه باعث کاهش مقاومت فشاری و کششی بتن بازیافتی می‌شود. از طرفی مقاومت ویژه الکتریکی و دوام بتن بازیافتی شامل سرامیک ریزدانه به طور کلی بهتر از بتن بازیافتی شامل سرامیک درشت‌دانه است. در مواردی که مقاومت فشاری و کششی بتن اهمیت بالایی دارد می‌توان از بتن بازیافتی که سرامیک جایگزین شن شده است استفاده کرد. اما در مواردی که دوام بتن از اهمیت بالایی برخوردار است می‌توان از بتن بازیافتی که سرامیک جایگزین ماسه شده استفاده کرد.

در تحقیق ماهندرا و همکاران (۲۰۱۹) به تأثیر زباله‌های کاشی و سرامیک به عنوان جایگزینی جزئی سنگدانه‌ها در بتن پرداخته شد. در ساخت‌های اخیر، مصرف مواد سرامیکی روز به روز به شکل کاشی، اتصالات بهداشتی، عایق‌های برقی و غیره در حال افزایش است. مقدار زیادی مواد سرامیکی به دلیل ماهیت شکننده آن، در هنگام ساخت و حمل و نقل به ضایعات تبدیل می‌شوند. بنابراین استفاده از این ضایعات در تولید بتن می‌تواند یک اقدام مؤثر در حفظ محیط و بهبود

(۲۰۱۸) به بررسی خواص مکانیکی بتن حاوی ضایعات آجر و سرامیک به عنوان بخشی از ریزدانه پرداخته شد. ابتدا جهت تعیین ترکیب بهینه سرامیک و آجر ضایعاتی به عنوان جایگزین ماسه، نمونه‌هایی با ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد وزنی جایگزینی سرامیک و ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد وزنی آجر ضایعاتی ساخته شد. سپس مخلوط‌های ترکیبی سرامیک و آجر ضایعاتی با انجام آزمایش‌های بتن در شرایط محیطی خشک و شرایط نگهداری در آب ۲۲ درجه سلسیوس مورد بررسی قرار گرفت. مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸ و ۴۲ روز مقدار ۴۰ درصد وزنی ماسه از سرامیک ضایعاتی و ۱۰ درصد وزن ماسه از آجر ضایعاتی به عنوان ترکیب بهینه تعیین شد. مقاومت کششی هم برای نمونه‌های ضایعات سرامیک و هم آجر با افزایش مقاومت فشاری، افزایش یافته است.

به منظور ارزیابی تطبیقی نتایج پژوهش حاضر، مقایسه‌ای با مطالعات منتخب در جدول ۱ ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در اغلب مطالعات، استفاده از سنگدانه‌های سرامیکی منجر به بهبود مقاومت فشاری در محدوده‌های مشخصی از درصد جایگزینی شده است، در حالی که در درصد‌های بالاتر، کاهش یا نوسان در خواص مکانیکی گزارش شده است. نتایج این پژوهش نیز روندی مشابه را نشان می‌دهد، با این تفاوت که میزان افزایش مقاومت فشاری در این مطالعه (تا ۳۹٪) بالاتر از بسیاری از مطالعات پیشین است. این اختلاف می‌تواند ناشی از تفاوت در نوع سرامیک مصرفی، توزیع دانه‌بندی، و ساختار ریزمقیاس ناحیه انتقالی (ITZ) باشد. همچنین، افزایش جذب آب در تمامی مطالعات به‌عنوان یک رفتار غالب مشاهده شده که بیانگر ماهیت متخلخل سنگدانه‌های سرامیکی است.

با ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد استفاده شد. پس از تجزیه و تحلیل نتایج، مقدار بهینه ضایعات کاشی و سرامیک با نسبت آب به سیمان ۰/۵ که در مخلوط بتن مورد استفاده قرار گرفت حدود ۳۰ درصد تعیین شد. مقاومت فشاری و خمشی بتن مطلوب به ترتیب ۵/۴۳ و ۳۲/۲ درصد بیشتر از نمونه شاهد بود. یافته‌ها نشان داد که استفاده از کاشی و سرامیک ضایعاتی باعث بهبود خصوصیات بتن می‌شود. استفاده از ضایعات کاشی و سرامیک درشت در مخلوط بتن منجر به کاهش قابل توجه کارایی در کلیه مخلوط‌ها می‌شود. همچنین، با افزایش ضایعات کاشی و سرامیک، به تدریج کارایی بتن کاهش می‌یابد. به عنوان یک نتیجه کلی، مشاهده شد که با افزایش نسبت سیمان به آب، چگالی بتن کاهش می‌یابد. سرانجام، استفاده از ضایعات سرامیکی در بتن یک اقدام مؤثر در جهت کاهش هزینه‌های بتن و کمک به حفظ محیط‌زیست در کنار مدیریت پسماند و کاهش استفاده از مواد اولیه طبیعی است.

در تحقیق مدینا و همکاران (۲۰۱۲) روابط بین شاخص دوام با مصالح بازیافت شده سرامیکی و بتن معمولی ساخته شده بررسی گردید. در پژوهش حاضر، ۲۰ و ۲۵ درصد از سنگدانه طبیعی درشت در بتن با مصالح بازیافت شده از صنایع بهداشتی جایگزین شد تا تأثیر آن بر نفوذ یون کلر، مقاومت الکتریکی و دوام بتن را بررسی نمود. نتایج نشان داد که با افزودن مصالح بازیافت شده به بتن باعث افزایش ۸٪ نفوذ یون کلر شد، که هیچ تغییری در رابطه بین شاخص‌های دوام مشاهده نشده و به طور مستقیم با تخلخل و نفوذپذیری بتن ارتباط دارد. در مقاومت الکتریکی به نوبه خود با استفاده از مصالح بازیافتی به دلیل خصوصیات ذاتی این ماده افزایش می‌یابد. بتن‌های جدید به اندازه مواد معمولی با دوام بوده و در تمام طول عمر خود عملکرد مطلوبی دارند.

در تحقیق شیری بنمار و پیرمحمدی عالیشاه

جدول ۱. مقایسه نتایج پژوهش حاضر با مطالعات منتخب در زمینه استفاده از سنگدانه‌های سرامیکی در بتن

مرجع	نوع سرامیک	درصد جایگزینی (%)	تغییر مقاومت فشاری (%)	تغییر مقاومت کششی (%)	تغییر جذب آب (%)	نکته کلیدی
Medina et al. (۲۰۱۲)	سرامیک بهداشتی	۲۰-۵۰	↑ ۲۱-۳۰	↑	↑ ۱۰-۲۵	بهبود ITZ و زبری سطح
Halicka et al. (۲۰۱۳)	سرامیک بازیافتی	۳۰-۱۰۰	↑ ۱۰-۲۰	—	↑ ۱۵-۳۵	عملکرد بهتر در درصد متوسط
Senthamarai et al. (۲۰۰۵)	کاشی سرامیکی	۲۵	↑ ۷-۲۱	↓ تا ۱۸	—	افت کششی در درصد بالا
Ceramic aggregate study (۲۰۱۶)	سرامیک درشت‌دانه	۱۰۰	↑ ۳۶.۱	↑	↑	افزایش شدید مقاومت با زبری سطح
Sustainable concrete (۲۰۲۴)	ضایعات خرد شده	۲۰	↑ ۲۲	↑	—	رفتار بهینه در درصد کم
Recycled ceramic concrete (PMC)	سرامیک بهداشتی	متغیر	↑ ۱۰.۵	↑ ۵.۹ (خمشی)	—	بهبود کلی خواص مکانیکی
RCMA (۲۰۲۳)	سرامیک بازیافتی	۲۵	↑ (حداکثر)	↑ (حداکثر)	↑	رفتار بهینه در ۲۵٪
Daniyal & Ahmad (۲۰۱۵)	کاشی ضایعاتی	۲۰-۶۰	↑ ۵-۱۵	—	↑ ۲۰-۴۰	افزایش تخلخل در درصد بالا

رود. سیمان پرتلند مورد استفاده باید الزامات استاندارد ASTM C150 را ارضا کند (آیین‌نامه ۳۵۴، ۲۰۰۹).

در این تحقیق، سیمان پرتلند تیپ II کارخانه سیمان اردستان اصفهان می‌باشد که به صورت یکجا تهیه و دپو شده است و طبق داده‌های کارخانه مشخصات شیمیایی و فیزیکی سیمان در مقایسه با استاندارد ASTM-C150 به ترتیب در جداول ۲ و ۳ آمده است.

## ۲. روش تحقیق

### ۲-۱. مواد و مصالح

#### ۲-۱-۱. سیمان

همه‌ی انواع سیمان پرتلند، بجز سیمان نوع III (سیمان با روند سریع سخت شدن)، می‌توانند در ساخت مخلوط‌های بتن غلتکی به کار روند. سیمان نوع III به علت گیرش سریع‌تر نسبت به دیگر انواع سیمان برای ساخت روسازی بتن غلتکی مناسب نبوده و نباید به کار

جدول ۲. مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی

ASTM	مقدار سیمان اردستان اصفهان (%)	آزمون شیمیایی
-	۲۲	SiO <sub>2</sub>
-	۵	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
-	۳.۸۲	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
-	۶۴	CaO
≤ ۶	۱/۹۰	MgO
≤ ۳/۵	۱/۵	SO <sub>3</sub>
≤ ۳		L.O.I
-	۰/۲۵	Na <sub>2</sub> O
-	۰/۴۹	K <sub>2</sub> O
-	۰/۴۶	باقی مانده نامحلول در اسید

جدول ۳. مشخصات فیزیکی سیمان مصرفی

ASTM	مقدار	واحد	آزمایش	آزمون فیزیکی
≤ ۲۸۰۰	≤ ۳۰۰۰	سانتی متر مربع بر گرم	بلین	سطح مخصوص
-	۰/۱۱	%	حداکثر	انسباط اتوکلاو
≥ ۴۵	۱۰۵-۸۵	دقیقه	ابتدایی	زمان گیرش (با سوزن ویکات)
≤ ۳۷۵	۱۸۰-۱۲۰	دقیقه	نهایی	
-	≥ ۱۷	مگاپاسکال	۳روزه	مقاومت فشاری
-	≥ ۲۷	مگاپاسکال	۷روزه	
-	≥ ۳۷	مگاپاسکال	۲۸روزه	

## ۲-۱-۲. آب

کیفیت و الزامات آب مورد استفاده در بتن غلتکی مشابه آب مصرفی در بتن معمولی طبق استاندارد ASTM C1602 است.

آب مصرفی باید تمیز و صاف بوده و عاری از مقادیر زیان‌آور روغن‌ها، اسیدها، قلیایی‌ها، نمک‌ها، مواد قندی، مواد آلی یا مواد دیگر باشد که ممکن است سبب مختل شدن در گیرش سیمان، اثر نامطلوب بر مقاومت بتن یا ملات، خوردگی میلگردها و سایر اقلام مدفون در کار شود. معمولاً آب آشامیدنی زلال، بی بو، بی رنگ، و بدون طعم را می‌توان در ساخت بتن و ملات در مناطقی که

خطر خوردگی وجود نداشته باشد مورد استفاده قرار داد. pH آب مصرفی بتن باید بین ۵ تا ۸/۵۰ باشد. مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزهی نمونه‌های ساخته‌شده با این آب حداقل ۹۰ درصد مقاومت نظیر نمونه‌های ساخته‌شده با آب مقطر می‌باشد. اگر میزان مواد جامد معلق، مواد محلول و یون‌های سولفات و کلر موجود در آن کمتر از مقادیر مجاز باشد، می‌تواند در بتن یا ملات به کار می‌رود (دفتر مقررات ملی ساختمان، ۲۰۱۳). در این پژوهش از آب آشامیدنی (لوله‌کشی شهر اصفهان) استفاده شده است. میزان استفاده در بتن غلتکی باید در محدوده کارایی پایین (اسلامپ صفر) باشد.

### ۳-۱-۲. سرامیک ضایعاتی

معمولاً ضایعات سرامیک به چندین صورت ایجاد می‌شوند. بخشی از ضایعات در کارخانه‌ها و در حین و بعد از فرآیند تولید به علت خطای ساخت و یا اشتباهات انسانی و مواد اولیه نامناسب و بخشی دیگر در مسیرهای حمل و نقل و بخش اعظم در اثر تخریب ساختمان‌ها و ضایعات باقی مانده از آن ایجاد می‌شوند. ماهیت این مواد به گونه‌ای است که نمی‌توان از آن‌ها مجدداً در چرخه تولید استفاده کرد و عملاً بی کاربرد باقی می‌مانند و همچنین، به صورت یک زباله ساختمانی خسارت‌هایی به محیط زیست وارد می‌کنند. بنابراین با توجه به این میزان تولید و روند رو به رشد این صنعت و استفاده‌ی روزافزون از این مواد و همچنین ضایعات قابل توجه آن، توجه به استفاده مجدد از ضایعات حاصل از مواد سرامیکی را بیش از پیش می‌طلبد (توکلی و همکاران، ۲۰۱۳).

یکی از راهکارهای ارائه شده جهت استفاده مجدد از سرامیک‌ها، استفاده از آن‌ها در بتن بوده است. این مواد به صورت‌های ریزدانه، درشت‌دانه و یا پودر به عنوان جایگزین سیمان در بتن قابل استفاده هستند. در این پژوهش، از سرامیک ضایعاتی به عنوان جایگزین بخشی از ریزدانه (ماسه) در بتن استفاده شد (شکل ۲). مقدار ضریب سایش<sup>۱</sup> برای سرامیک ضایعاتی ۱۹ درصد به دست آمد که کمتر از حد مجاز استاندارد روسازی است و نشان‌دهنده پایداری مکانیکی مناسب در برابر ترافیک و غلتک‌کوبی می‌باشد. سختی سرامیک بر اساس مقیاس موهس اندازه‌گیری شد و مقدار آن ۶/۴ ثبت گردید. این سختی بالا، مقاومت سرامیک را در برابر سایش ناشی از غلتک‌های سنگین تضمین می‌کند. آنالیز XRF (جدول ۴) نشان می‌دهد که مجموع اکسیدهای آلومینیوم و سیلیس در نمونه ۸۰ درصد است. همچنین، مشخصات فیزیکی آن در جدول ۵ آورده شده است.



شکل ۲. سرامیک ضایعاتی مصرفی

جدول ۴. آنالیز XRF سرامیک ضایعاتی مصرفی

LOI*	TiO <sub>2</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	Na <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	ترکیب
۰/۵	۰/۹	۰/۸	۷/۵	۲/۹	۳/۸	۱/۹	۱۹/۶	۶۰/۸	سرامیک ضایعاتی

1- Los Angeles Abrasion

جدول ۵. مشخصات فیزیکی سرامیک ضایعاتی

مشخصه	استاندارد	ریزدانه	درشت‌دانه
حداکثر اندازه اسمی مصالح سنگی	ASTM-C136	۴/۷۵	۱۹
چگالی واقعی (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	ASTM-C127	۲/۱۳	۲/۱۰
چگالی اشباع با سطح خشک (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	ASTM-C127	۲/۱۵	۲/۱۳
جذب آب (درصد)	ASTM-C127	۱/۳۰	۱/۲۳

#### ۲-۱-۴. مصالح سنگی طبیعی

در این آزمایش‌ها، سنگدانه‌های درشت از معدن سنگ لاشتر در اصفهان تهیه شده است. درشت‌دانه‌های مصرفی در بتن غلتکی می‌توانند از سنگدانه‌های طبیعی یا شکسته یا مخلوطی از این دو باشند. اندازه حداکثر شن مصرفی باید به ۱۹ میلی‌متر محدود گردد تا امکان دست‌یابی به کیفیت مطلوب سطح فراهم آید. بتن غلتکی ساخته شده با شن شکسته به انرژی بیشتری برای تراکم نیاز خواهد داشت ولیکن جدایش در آن کمتر اتفاق می‌افتاد. همچنین، بتن غلتکی ساخته شده با شن شکسته معمولاً مقاومت خمشی بیشتری دست می‌یابد. مشخصات کیفی مصالح در جدول ۶ بیان شده است.

سنگدانه‌ها حدود ۷۵ تا ۸۵ درصد از حجم مخلوط بتن غلتکی روسازی را تشکیل می‌دهند و لذا تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر خواص بتن تازه و مقاومت آن دارند (حیدری و همکاران، ۲۰۱۹). الزامات عمومی سنگدانه‌ها باید مطابق استاندارد ASTM C33 باشد. در بتن غلتکی، مصالح سنگی بر کارایی، کیفیت، تراکم و جدایش تأثیر می‌گذارند. مقاومت، مدول الاستیسیته، خواص حرارتی و دوام بتن سخت شده نیز متأثر از خواص سنگدانه‌ها است. سنگدانه‌های به کار رفته در بتن غلتکی باید دارای بخش ماسه به صورت مجزا و بخش شن به صورت مجزا باشند.

#### ۲-۱-۴-۱. دانه‌بندی شن مصرفی (درشت‌دانه)

جدول ۶. مشخصات فیزیکی سنگدانه‌های طبیعی

مشخصه	استاندارد	ریزدانه	درشت‌دانه
حداکثر اندازه اسمی مصالح سنگی	ASTM-C136	۴/۷۵	۱۹
چگالی واقعی (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	ASTM-C127	۲/۷۱۰	۲/۶۸۰
چگالی اشباع با سطح خشک (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	ASTM-C127	۲/۷۳۰	۲/۷۱۶
جذب آب (درصد)	ASTM-C127	۰/۵۶	۰/۵۱

#### ۲-۱-۴-۲. دانه‌بندی ماسه مصرفی (ریزدانه)

خشک‌شده با لرزاندن از الک‌های مختلف (با کاهش اندازه الک از بالا به پایین) عبور داده شده و اندازه دانه‌های روی هر الک و مقدار آن تعیین می‌گردد. در جدول ۷، اندازه الک‌هایی که در استاندارد ASTM C136 برای دانه‌بندی مصالح ریز به کار می‌روند آورده شده است (رئیزی و ابادزی، ۲۰۱۶).

ماسه‌های مصرفی نیز از معدن سنگ لاشتر اصفهان تهیه شده است. اصولاً تقسیم‌بندی یک نمونه از دانه‌ها به اندازه‌های یکسان، دانه‌بندی نام داشته و هدف از آن یافتن درجه‌بندی و توزیع ذرات مختلف در یک نمونه‌ی انتخاب‌شده است. در آزمایش دانه‌بندی، مصالح

جدول ۷. اندازه الک‌های استاندارد دانه‌بندی ریزدانه (ماسه)

اندازه الک	نمره الک
۴/۷۵ میلی‌متر	نمره ۴
۲/۳۶ میلی‌متر	نمره ۸
۱/۱۸ میلی‌متر	نمره ۱۶
۶۰۰ میکرومتر	نمره ۳۰
۳۰۰ میکرومتر	نمره ۵۰
۱۵۰ میکرومتر	نمره ۱۰۰
۷۵ میکرومتر	نمره ۲۰۰

دانه‌بندی را انجام می‌دهیم. بدین ترتیب، درصد سرامیک ضایعاتی باقی‌مانده روی هر الک قابل مقایسه می‌باشد. در نهایت، در حدی که کل دانه‌ها از ۴۵ میکرون کوچکتر شوند آسیاب و آماده انجام آزمایش‌ها شده است. در شکل ۳، دستگاه لس‌آنجلس نمایش داده شده است.

جهت انجام آزمایش، سرامیک ضایعاتی مورد نیاز از ضایعات کارخانه سرامیک تهیه شده است. برای خرد کردن سرامیک ضایعاتی مصرفی، مصالح را همراه با ۱۲ گوی داخل دستگاه لس‌آنجلس ریخته و آن را روی دور ۱۵۰۰ تنظیم می‌کنیم. بعد از خرد کردن، آن‌ها را از دستگاه خارج کرده و طبق استاندارد و مراحل ذکر شد



شکل ۳. دستگاه لس‌آنجلس

نمره ۳۰، نمره ۵۰ و نمره ۱۰۰) روی هم قرار داده و زیر الک را انتهای آخرین الک قرار داده شد. سپس مصالح را روی اولین الک ریخته و برای جلوگیری از پرتاب سنگ‌دانه‌ها به محیط اطراف در حین عمل لرزش، درپوش الک را روی آن قرار داده و سپس مجموعه را به مدت ۱۰ دقیقه روی دستگاه لرزاننده گذاشته تا مصالح

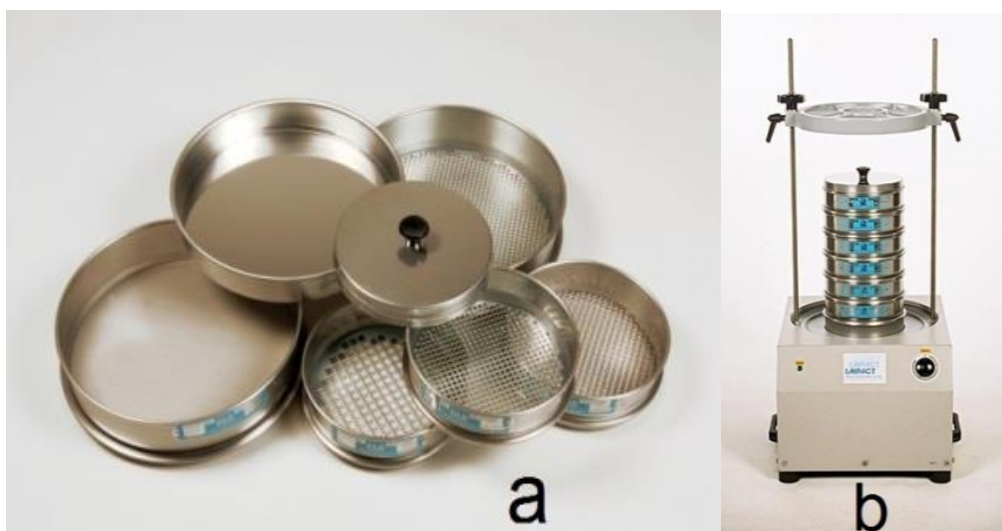
#### ۲-۱-۴-۳. روش انجام دانه‌بندی

ابتدا مصالح به هم چسبیده را به وسیله چکش لاستیکی از هم جدا کرده و کلیه مصالح را درون آن کامل خشک کرده، سپس الک‌ها را طبق استاندارد ASTM C33-03 به همان ترتیب گفته شده برای درشت‌دانه از الک (۱)، ۳/۴، ۱/۲، ۳/۸ اینچ) و ریزدانه (نمره ۴، نمره ۸، نمره ۱۶،

الک شوند. در انتها وزن مصالح موجود مانده و عبوری از الک‌ها به دست آورده می‌شود. در شکل‌های ۴ و ۵ انواع الک‌ها و دستگاه لرزاننده را مشاهده می‌کنید. در شکل‌های ۶ و ۷ روند دانه‌بندی نشان داده شده است.



شکل ۴. دستگاه لرزاننده مورد استفاده برای دانه‌بندی مصالح درشت (شن)



شکل ۵. الف) الک‌های دانه‌بندی مصالح و ب) دستگاه لرزاننده



شکل ۶. روند آسیاب سرامیک ضایعاتی

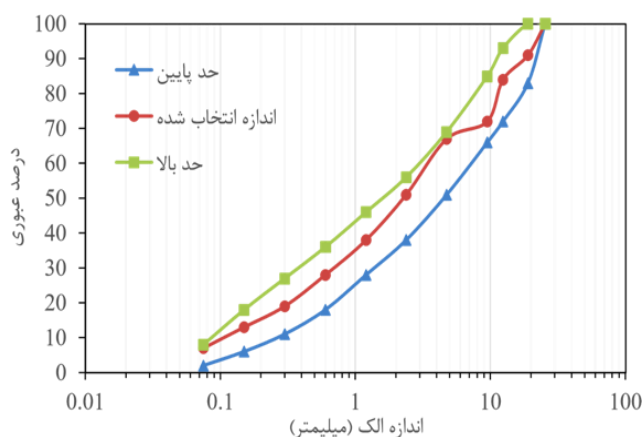


شکل ۷. ضایعات سرامیک در سایز مورد نظر

#### ۲-۱-۴-۴. منحنی دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها

یکی از فاکتورهای مهم و تعیین کننده و مؤثر در کیفیت و اقتصادی بودن بتن، انتخاب دانه‌بندی مناسب برای مصالح می‌باشد. مصالح دانه‌بندی شامل درشت‌دانه و ریزدانه هستند. در این پژوهش، منحنی دانه‌بندی استفاده شده مطابق الزامات ذکر شده در "آیین‌نامه طراحی و اجرای بتن غلتکی در راه‌های کشور" بوده و سعی شده منحنی دانه‌بندی مورد استفاده بین منحنی دانه‌بندی حد

بالا و پایین در آیین‌نامه باشد (سلیمانی و آقایان، ۲۰۱۸). دانه‌بندی ترکیبی شن و ماسه، به نحوی انتخاب شد که در حد امکان در چارچوب محدوده دانه‌بندی توصیه شده باشد. نتایج به دست آمده از دانه‌بندی را می‌توان در منحنی که محور عمودی آن نشان‌دهنده درصد تجمعی عبوری از هر الک و محور افقی آن نشان‌دهنده اندازه الک‌ها (با مقیاس لگاریتمی) است، نشان داد. منحنی‌های دانه‌بندی در شکل ۸ نشان داده شده‌اند.



شکل ۸. نمودار محدوده دانه‌بندی مصالح مصرفی

#### ۲-۱-۴-۵. مدول نرمی ماسه

ریزی یا نرمی ماسه‌ها با مدول نرمی سنجیده می‌شود و به‌خصوص در استاندارد ASTM C136-848 کاربرد دارد. مدول نرمی به صورت مجموع تجمعی مانده روی

الک‌های استاندارد است که به ۱۰۰ تقسیم شده باشد. مدول نرمی یک ضریب تجربی است (فروغی اصل و همکاران، ۲۰۱۴). سری استاندارد الک‌ها شامل الک‌هایی است که

برای ماسه کاربرد دارد و معمولاً برای شن محاسبه نمی‌گردد. مدول نرمی ریزی و درشتی سنگدانه‌ها را نشان می‌دهد تغییرات آن بین ۲/۳۰ تا ۹ بوده و هر چه سنگدانه‌ها درشت تر باشد، مقدار مدول نرمی آنها بیشتر خواهد شد (فروغی اصل و همکاران، ۲۰۱۴).

مدول نرمی ماسه مصرفی در این پژوهش با توجه به جدول دانه‌بندی برابر ۳/۸۵ می‌باشد.

اندازه‌ی هر کدام دو برابر ال‌ک قبلی است، نظیر ۶۰۰،۳۰۰،۱۵۰ میکرون، ۲/۲۶،۱/۱۸، ۵ میلی‌متر (استاندارد ASTM ال‌ک‌های نمره ۸،۱۶،۳۰،۵۰،۱۰۰ و ۱۵۰) که تا بالاترین قطر ال‌ک موجود ادامه می‌یابد (مستوفی نژاد، ۲۰۰۳).

محاسبه مدول نرمی از آن جهت مفید است که تغییرات جزئی در اندازه دانه‌ها که ممکن است در کارایی بتن تازه مؤثر باشد را نشان می‌دهد. مدول نرمی بیشتر

$$FM = \frac{(100 - 68) + (100 - 53) + (100 - 38) + (100 - 30) + (100 - 21) + (100 - 15) + (100 - 0)}{100} = 3.85$$

در نهایت، وزن آن‌ها را به عنوان وزن سنگدانه‌های اشباع از آب (مرطوب) تعیین کرده و از طریق روابط زیر، میزان رطوبت سنگدانه‌ها را به دست می‌آوریم.

۱۲۳۶ گرم وزن ماسه طبیعی خشک

۱۲۴۳ گرم وزن ماسه طبیعی اشباع با سطح خشک

$$\text{میزان جذب آب ماسه طبیعی} = \frac{1243 - 1236}{1236} \times 100 = 0.56\%$$

۱۳۸۴ گرم وزن ماسه طبیعی خشک

$$\text{میزان جذب آب سرامیک ضایعاتی} = \frac{1402 - 1384}{1384} \times 100 = 1.30\%$$

۱۴۰۲ گرم وزن ماسه طبیعی اشباع با سطح خشک

## ۲-۲. طرح اختلاط ملات‌ها

منظور از طرح اختلاط، تعیین مقادیر اجزای بتن شامل درشت‌دانه (شن)، ریزدانه (ماسه)، سیمان، مواد افزودنی و آب در واحد حجم بتن است. انتخاب مقادیر اجزا باید به نحوی صورت گیرد که الزامات مورد نظر مکانیکی بتن سخت شده که عمدتاً به صورت مقاومت فشاری یا کششی و یا خمشی در سن یا سنین مشخص تعریف می‌گردند حاصل گردند و الزامات دوام نیز ارضا شوند. همچنین، مخلوط باید با کارایی مناسب انجام گردد به نحوی که تراکم مطلوب آن با غلتک ارتعاشی میسر بوده و انسجام کافی مخلوط به نحوی فراهم آید که در حین عملیات اجرایی دچار جداشدگی نگردد (محمودی و

## ۲-۱-۴-۶. تعیین میزان جذب آب سنگدانه

به هنگام تعیین آب اختلاط بتن، باید میزان آب لازم جهت عمل هیدراتاسیون و همچنین میزان جذب آب توسط سنگدانه‌ها، محاسبه گردد تا هنگام انجام عمل هیدراتاسیون آب لازم جهت این واکنش شیمیایی جذب سنگدانه‌ها شده ذرات سازنده بتن به خوبی به هم متصل شوند. جذب آب به نسبت تفاضل وزن نمونه در حالت اشباع و کاملاً خشک (نمونه در دستگاه آون در دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت قرار داده می‌شود) به وزن نمونه کاملاً خشک که بر حسب درصد بیان می‌شود (شهرآبادی، ۲۰۱۵).

حال، مقداری سنگدانه دانه‌بندی شده (شن طبیعی یا سرامیک ضایعاتی) برداشته و در یک سینی فلزی ریخته. سپس سینی فلزی را درون دستگاه آون قرار داده و پس از ۲۴ ساعت سینی را از دستگاه بیرون آورده و وزن سنگدانه‌های خشک را به وسیله ترازو به دست می‌آوریم، عدد حاصل، وزن سنگدانه‌های خشک و بدون رطوبت است. سپس سنگدانه‌ها را این بار در یک ظرف ریخته و به مدت ۲۴ ساعت در حوضچه آب قرار می‌دهیم. پس از اتمام این مدت‌زمان آن را از آب بیرون آورده و به وسیله روزنامه سطح خارجی سنگدانه‌ها را کاملاً خشک کرده و آن‌ها را به وسیله ترازو وزن می‌کنیم.

پهلوانی، ۲۰۱۷).

روانی به روش تعیین زمان لازم جهت تراکم نمونه تحت سربار و درحالت ارتعاشی (زمان وی-بی اصلاح شده) تعیین می‌گردد. در روش‌های طرح اختلاط با استفاده از آزمایش‌های روانی، معمولاً کلیه پارامترهای مخلوط به غیر از یکی از آنها مانند مقدار آب، مواد سیمانی یا مقدار سنگدانه، ثابت نگه داشته شده و با انجام آزمایش‌های لازم، مقدار ماده متغیر تعیین می‌گردد تا روانی مناسب و سایر خواص مورد نظر تأمین گردد. بدین ترتیب مقدار بهینه هر یک از اجزای بتن به منظور دستیابی به خواص مورد نظر بتن غلتکی تازه و سخت شده، حاصل می‌شود. مقدار مواد سیمانی بر اساس الزامات مقاومت و دوام مورد نظر در روسازی تعیین می‌شود و غالباً بصورت درصدی از جرم کل مصالح خشک (سنگدانه و مواد سیمانی) بیان می‌گردد. مقدار مواد سیمانی بین ۱۰ تا ۱۷ درصد جرم مصالح خشک در مخلوط‌های بتن غلتکی روسازی تغییر می‌کند. ریزدانه و درشت‌دانه، به نحوی انتخاب می‌شوند که ترکیبی با دانه‌بندی مناسب ایجاد کنند (نشریه ۳۵۴، ۲۰۰۹).

چنانچه طرح اختلاط براساس واحد حجم محاسبه گردد مفیدتر خواهد بود تا براساس جرم و همه ترکیبات و نسبت‌های اختلاط به صورت نسبی و تجربی به دست آمده است. در این پژوهش، ابتدا عیار سیمان ۳۰۰ کیلوگرم به ازای هر متر مکعب برای ملات‌ها در نظر گرفته شد. سپس میزان آب مورد استفاده با توجه به سیمان پرتلند و نسبت آب به سیمان ۰/۵۹ مشخص گردید. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، از اهداف این پژوهش بررسی تأثیرات سنگدانه‌های سرامیک ضایعاتی به میزان‌های مختلف نسبت‌هایی از شن و ماسه طبیعی می‌باشد. بدین منظور، شش طرح ملات بر اساس واحد حجم ساخته شده که در جدول ۸ جزئیات طرح‌ها ارائه شده است.

روش‌های طرح اختلاط بتن غلتکی به دلیل سفت تر بودن مخلوط و دانه‌بندی متمایز آن، با روش‌های به کار رفته برای بتن‌های معمولی متفاوت است. بتن غلتکی به مقدار بیشتری ریزدانه برای دستیابی به دانه‌بندی و عملکرد مناسب تحت تراکم با غلتک ارتعاشی، نیاز دارد. به منظور حداقل‌سازی جدایش‌دگی و حصول سطح صاف در روسازی راه با بتن غلتکی، معمولاً حداکثر اندازه سنگدانه‌ها از ۱۹ میلی‌متر تجاوز نمی‌کند. کاربرد مقادیر مواد سیمانی زیادتر و سنگدانه‌های با کیفیت بیشتر در بتن غلتکی آن را نسبت به مخلوط‌های خاک-سیمان متمایز می‌کند. به منظور ایجاد تراکم کافی در بتن غلتکی لازم است تا این بتن به اندازه کافی خشک باشد تا بتواند وزن غلتک ارتعاشی را تحمل نماید. همچنین، لازم است به اندازه کافی مرطوب باشد تا خمیر سیمان در هنگام اختلاط و در حین تراکم بتواند به خوبی در بین ذرات سنگدانه پخش شود.

روش‌های مختلفی برای طرح اختلاط مخلوط‌های بتن غلتکی روسازی ارائه شده است. این روش‌ها را می‌توان به دو دسته کلی زیر تقسیم نمود:

- طرح اختلاط با استفاده از آزمایش‌های روانی بتن (روش بتنی)
- طرح اختلاط با استفاده از آزمایش‌های تراکم خاک (روش خاکی)

در کلیه روش‌های بتنی جهت دستیابی به مقاومت فشاری طرح (و یا الزامات دوام) نسبت آب به مواد سیمانی مد نظر قرار می‌گیرد و همچنین اجزای مخلوط به گونه‌ای تعیین می‌شوند که کارایی مخلوط جهت تراکم با غلتک ویرهای مناسب باشد. این کارایی بر پایه انجام آزمایش

جدول ۸. طرح اختلاط نمونه‌ها

کد طرح	علامت اختصاری	نمونه	مصالح طبیعی (Kg/m <sup>۳</sup> )	سرامیک ضایعاتی (Kg/m <sup>۳</sup> )	سیمان (Kg/m <sup>۳</sup> )	آب (Kg/m <sup>۳</sup> )	نسبت آب به سیمان	آب آزاد
طرح ۱ (شاهد)	RCC-P1	کلیه مصالح طبیعی	۲۰۴۱	۰	۳۰۰	۱۴۵	۰/۵۹	۴۱
طرح ۲	RCC-P2	مانده روی الک #۵۰ مصالح طبیعی + عبوری از الک #۵۰ سرامیک	۱۶۶۱	۳۰۲	۳۰۰	۱۴۵	۰/۵۹	۵۰
طرح ۳	RCC-P3	مانده روی الک #۱۶ مصالح طبیعی + عبوری از الک #۱۶ سرامیک	۱۳۰۱	۵۹۰	۳۰۰	۱۴۵	۰/۵۹	۶۰
طرح ۴	RCC-P4	مانده روی الک #۴ مصالح طبیعی + عبوری از الک #۴ سرامیک	۸۴۱	۹۵۸	۳۰۰	۱۴۵	۰/۵۹	۷۲
طرح ۵	RCC-P5	مانده روی الک #۱/۲ مصالح طبیعی + عبوری از الک #۱/۲ سرامیک	۴۰۱	۱۲۱۴	۳۰۰	۱۴۵	۰/۵۹	۷۸/۵
طرح ۶	RCC-P6	کلیه مصالح سرامیکی	۰	۱۶۲۹	۳۰۰	۱۴۵	۰/۵۹	۹۴

### ۳-۲. روش اختلاط

دیگر مصالح با یکدیگر مخلوط گردید.

- مخلوط کن را بعد از ۹۰ ثانیه خاموش نموده و دور ظرف را تمیز نموده و در بقیه‌ی فاصله زمانی روی جام با سرپوش گذاشته می‌شود.
- به دلیل این که بتن غلتکی دارای آب کمی بوده و ملات سریعاً آب خود را از دست می‌دهد و میزان مصالح مخلوط شده حداکثر به اندازه دو عدد قالب استوانه‌ای توزین و مخلوط می‌شود تا فرصت کافی برای عمل تراکم وجود داشته باشد و منجر به از بین رفتن رطوبت مخلوط نشود.
- همچنین، در حین عمل تراکم نیز با استفاده از پاشش آب، میزان آب از دست رفته ملات جبران شد.

اختلاط مصالح بدین صورت انجام شد که هر یک از اجزای ملات به تفکیک وزن شده، سپس طبق استاندارد ASTM C305 به‌قرار زیر ساخته شد:

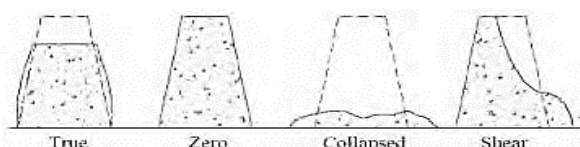
- ابتدا مصالح مورد نیاز محاسباتی، به میزان لازم وزن شده، سپس اجزای درشت‌دانه، ریزدانه (طبیعی و سرامیک ضایعاتی) و سیمان در مخلوط‌کن قرار گرفته و به مدت ۳۰ ثانیه با سرعت کم عمل اختلاط انجام شد.
- در حالی که مخلوط‌کن عمل اختلاط را انجام می‌دهد در فاصله‌ی ۳۰ ثانیه نصف آب محاسباتی به آرامی به داخل مخلوط‌کن اضافه می‌شود و در ادامه به تدریج بقیه آب را به مخلوط اضافه نموده و به مدت ۶۰ تا ۹۰ ثانیه

### ۳. روش آزمایشگاهی

حتی با افزایش دانش در زمینه رئولوژی بتن، آزمایش اسلامپ عمدتاً روش مورد استفاده است. آزمایش اسلامپ معروفترین و پُرکاربردترین روش آزمایش برای مشخص نمودن کارایی بتن تازه می‌باشد. شکل ۹، حالت‌های مختلف به وجود آمده از آزمایش اسلامپ را نشان می‌دهد (دلبری و همکاران، ۲۰۱۷؛ فتاح‌پور و همکاران، ۲۰۱۶).

جهت بررسی خصوصیات مکانیکی و سایر ویژگی‌های نمونه‌ها، آزمایش‌های گوناگونی باید روی آنها انجام می‌شد. در این قسمت، برنامه آزمایشگاهی و روش‌های آزمایش مطابق با استاندارد ASTM شرح داده می‌شود.

#### ۳-۱. آزمایش اسلامپ بتن



شکل ۹. چهار نوع اسلامپ (درست، صفر، فروپاشی، برشی). (دلبری و کرکان، ۲۰۱۷)

زیر بار غلتک متراکم شود. در نتیجه باید اسلامپی برابر صفر داشته باشد. انجام آزمایش اسلامپ را در شکل ۱۰ مشاهده می‌کنید.

بتن غلتکی در حالت تازه باید قابلیت تحمل وزن غلتک جهت متراکم شدن را داشته باشد. از این‌رو، بتنی سفت و خشک است که میزان آب آن بسیار کم است. اگر بتن غلتکی کارایی بالایی داشته باشد، جاری شده و نمی‌تواند



شکل ۱۰. دستگاه آزمایش روانی بتن

#### ۳-۲. آزمایش مقاومت فشاری

استوانه‌ای  $۱۵۰ \times ۳۰۰$  میلی‌متر استفاده شد. مبنای طراحی نمونه‌ها در سنین ۷ و ۲۸ روز پیشنهاد شد. رابطه مقاومت فشاری بتن در سنین ۷ و ۲۸ روزه در منابع مختلف ارائه شده است که طبق روابطی از روی سن ۷ روزه می‌توان مقاومت فشاری بتن ۲۸ روزه را تخمین زد و به این

مقاومت فشاری، به میزان بار وارد بر نمونه در سن مشخص در هنگام شکست نمونه در هر سانتی‌متر مربع گفته می‌شود. برای انجام آزمایش مقاومت فشاری طبق استاندارد (ASTM C39/C39M)، از نمونه‌های

ضربه‌ای، در قالب‌ها بر اساس استاندارد (ASTM C 1435) انجام گرفت. در شکل‌های ۱۱ و ۱۲، نمونه‌های استوانه‌ای ساخته‌شده و دستگاه اندازه‌گیری مقاومت فشاری نشان داده شده است.

صورت کیفیت و مقاومت بتن را زودتر پیش‌بینی کرد. به همین منظور، جهت تعیین دقیق‌تر مقاومت فشاری برای هر طرح و هر سن، سه نمونه برای مقاومت فشاری ۷ روزه و سه نمونه برای مقاومت فشاری ۲۸ روزه مورد آزمایش قرار گرفتند. ساخت نمونه‌ها توسط چکش



شکل ۱۱. نمونه و دستگاه اندازه‌گیری مقاومت فشاری



شکل ۱۲. عمل‌آوری نمونه‌ها در حوضچه

این اعمال نیرو باعث ایجاد تنش کششی در صفحه‌ای که نیرو بدان وارد می‌شود می‌گردد. در این تحقیق، از نمونه‌های استوانه‌ای  $150 \times 300$  میلی‌متر استفاده شد. از هر طراحی، سه نمونه برای مقاومت کششی غیرمستقیم ۲۸ روزه، مورد آزمایش قرار گرفتند. در شکل ۱۳، نمونه‌های استوانه‌ای ساخته‌شده و دستگاه اندازه‌گیری مقاومت کششی نشان داده شده است.

### ۳-۳. آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

یکی دیگر از پارامترهای مکانیکی مهم، مقاومت کششی بتن است. در این تحقیق، آزمون مقاومت کششی غیرمستقیم طبق استاندارد ASTM C496 انجام شد. این دستورالعمل بر اساس اعمال نیروی فشاری در راستای قطر نمونه و در سراسر طول نمونه استوانه‌ای می‌باشد و



شکل ۱۳. نمونه و دستگاه اندازه‌گیری مقاومت کششی غیرمستقیم

افزایش مقاومت بتن غلتکی در طی زمان است که مشابه بتن‌های معمولی به علت توسعه فرایند هیدراتاسیون سیمان صورت می‌گیرد (لک زاده و همکاران، ۲۰۱۸).

### ۳-۵. آزمایش وزن مخصوص

به دلیل این که وزن مخصوص سرامیک ضایعاتی کمتر از مصالح سنگی طبیعی است و انتظار می‌رفت وزن مخصوص طرح‌های ساخته شده کمتر از بتن غلتکی معمولی باشد، در نتیجه، آزمایش وزن مخصوص برای تمام طرح‌ها انجام گرفت. ابتدا از نمونه‌های تست شده توسط دستگاه برش نمونه کوچکتر جدا کرده (مطابق شکل ۱۴) و وزن خشک نمونه‌ها اندازه‌گیری شد و سپس توسط ترازوی ارشمیدس، وزن در آب هر کدام نیز به دست آمد و وزن مخصوص نمونه‌ها محاسبه شد.



شکل ۱۴. نمونه استوانه‌ای برش زده

### ۳-۴. آزمایش مقاومت خمشی

هرچند مقاومت خمشی معمولاً به عنوان مبنای طراحی روسازی‌های بتن غلتکی قرار می‌گیرد، لیکن به علت دشواری‌های موجود در تهیه نمونه‌های خمشی، مخصوصاً در کنترل کیفیت بتن غلتکی، در بسیاری از موارد رابطه‌ای بین مقاومت فشاری و مقاومت خمشی تعیین و یا فرض شده و طرح اختلاط بر مبنای مقاومت فشاری ارائه می‌شود. مقاومت فشاری مورد نظر برای بتن غلتکی جهت ساخت روسازی به میزان قابل توجهی بیشتر از مقاومت‌های در نظر گرفته شده برای بتن‌های غلتکی مورد استفاده در سدسازی است. بدیهی است برای یک مخلوط بتن غلتکی با افزایش مقدار مواد سیمانی و یا کاهش نسبت آب به موادسیمانی، مقاومت مخلوط افزایش می‌یابد. نکته قابل توجه دیگر، مسئله

### ۳-۶. آزمایش جذب آب

جذب آب یکی از مشخصات بتن بوده که قابلیت بتن را برای مقاومت در برابر ورود یون‌های متجاوز مورد بررسی قرار می‌دهد. جذب آب بلندمدت مطابق با استاندارد ASTM C642 انجام گرفته است. جذب آب به طور غیرمستقیم بیانگر میزان تخلخل و ارتباط بین حفرات است، به گونه‌ای که هر چه منافذ موجود کمتر باشند در نتیجه میزان تخلخل کمتر و جذب آب نیز کمتر خواهد بود (صدر ممتازی و نواللهی، ۲۰۱۵؛ کاظمی و همکاران، ۲۰۱۸).

$$\left| \text{جذب آب} \right| = \frac{W_{ssd} - W_{dry}}{W_{dry}} \times 100$$

### ۳-۷. مدل‌های پیش‌بینی

برای پیش‌بینی خواص مکانیکی بتن غلتکی (RCC) حاوی مصالح سرامیکی ضایعاتی، از چهار مدل پیش‌بینی استفاده شد: رگرسیون غیرخطی چندگانه (MNL)، بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO<sup>3</sup>)، ترکیبی MNL-<sup>4</sup> PSO، و جنگل تصادفی. این مدل‌ها برای مدل‌سازی روابط غیرخطی بین ویژگی‌های ورودی (مقدار سرامیک ضایعاتی، مقدار مصالح طبیعی، و زمان عمل‌آوری) و متغیرهای خروجی (مقاومت فشاری در ۷ و ۲۸ روز) انتخاب شدند. در این بخش، هر مدل به صورت دقیق، همراه با مبانی ریاضی، جزئیات پیاده‌سازی، و ارتباط آن با مطالعه حاضر شرح داده می‌شود.

به منظور مدل‌سازی دقیق رفتار مقاومت فشاری بتن غلتکی حاوی سنگدانه‌های سرامیکی، استفاده از مدل‌های پیش‌بینی مختلف ضروری است. رفتار مکانیکی این نوع بتن به دلیل تأثیر همزمان پارامترهای متعددی نظیر درصد جایگزینی سنگدانه‌های سرامیکی، دانه‌بندی، و زمان عمل‌آوری، ماهیتی غیرخطی و پیچیده دارد. از این رو، در این پژوهش از چندین رویکرد مدل‌سازی شامل رگرسیون غیرخطی چندگانه (MNL) به عنوان یک

روش پایه، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) به منظور بهبود پارامترهای مدل، مدل ترکیبی MNL-PSO برای افزایش دقت پیش‌بینی، و مدل جنگل تصادفی (RF) به عنوان یک روش مبتنی بر یادگیری ماشین استفاده شده است. مقایسه این مدل‌ها امکان ارزیابی دقت، پایداری و قابلیت تعمیم هر یک را فراهم می‌سازد.

### ۳-۷-۱. آماده‌سازی و افزایش داده‌ها

با توجه به محدود بودن مجموعه داده‌ها (شامل ۶ طرح اختلاط RCC-P1 تا RCC-P6)، افزایش داده‌ها برای اطمینان از آموزش قوی مدل‌ها و جلوگیری از بیش‌برازش ضروری بود. ویژگی‌های ورودی شامل مقدار سرامیک ضایعاتی (kg/m<sup>3</sup>)، مقدار مصالح طبیعی (kg/m<sup>3</sup>)، و زمان عمل‌آوری (۷ یا ۲۸ روز) بودند، و مقاومت فشاری (MPa) به عنوان متغیر خروجی اصلی در نظر گرفته شد. به همین منظور، از تکنیک‌های افزایش داده<sup>۱</sup> شامل روش SMOTE و افزودن نویز گوسی استفاده شد تا تنوع داده‌ها افزایش یابد و در عین حال در محدوده‌های منطقی (مقاومت فشاری بین ۲۰ تا ۴۰ مگاپاسکال) باقی بمانند. این فرآیند حدود ۱۵۰ نمونه تولید کرد که برای آموزش و ارزیابی مدل‌ها کافی بود. با این حال، از آنجا که این روش ممکن است تنوع داده‌ها را به طور کامل پوشش ندهد، نویز گوسی با میانگین صفر و انحراف معیار کنترل‌شده به داده‌ها افزوده شد تا تغییرات طبیعی ناشی از خطاهای آزمایشگاهی و ناهمگنی مصالح شبیه‌سازی شود.

برای اطمینان از واقع‌گرایی داده‌های تولیدشده:

- دامنه تغییرات داده‌ها محدود به بازه‌های فیزیکی قابل قبول برای خواص بتن در نظر گرفته شد،
- توزیع آماری داده‌های مصنوعی با داده‌های واقعی مقایسه گردید،

غیرخطی برای پیش‌بینی مقاومت فشاری استفاده شد. تابع انتخاب شده به صورت زیر است:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_1^2 + b_3x_2 + b_4x_2^2 + b_5x_3$$

که در آن  $b_i$  پارامترهای بهینه‌سازی شده، و  $x_1, x_2$ ، و  $x_3$  به ترتیب مقدار سرامیک ضایعاتی، مقدار مصالح طبیعی، و زمان عمل‌آوری هستند. PSO با مقیاس اولیه جمعیتی از ذرات (هر ذره یک مجموعه از  $(b_i)$  کار می‌کند. هر ذره در فضای جستجو بر اساس سرعت خود حرکت می‌کند که به صورت زیر به روزرسانی می‌شود:

$$v_i(t+1) = w \cdot v_i(t) + c_1 \cdot r_1 \cdot (pbest_i - x_i(t)) + c_2 \cdot r_2 \cdot (gbest - x_i(t))$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1)$$

$t$  در زمان  $i$  سرعت ذره:

$x_i$ : موقعیت ذره:

$pbest_i$ : بهترین موقعیت قبلی ذره:

$gbest$ : بهترین موقعیت کل جمعیت:

$w$ : وزن اینرسی:

$c_1$  و  $c_2$ : ضرایب یادگیری:

$r_1$  و  $r_2$ : اعداد تصادفی در بازه  $[0, 1]$ :

### ۳-۷-۴. ترکیب MNLR-PSO

مدل ترکیبی MNLR-PSO از ساختار مدل چندجمله‌ای غیرخطی (MNLR) استفاده می‌کند. اما به جای روش‌های معمولی مانند رگرسیون خطی برای محاسبه ضرایب از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) برای تنظیم ضرایب مدل استفاده می‌شود. مدل ترکیبی MNLR-PSO از معادله MNLR استفاده می‌کند، اما ضرایب آن  $(b_0)$  تا  $(b_9)$  با PSO بهینه می‌شوند. معادله همان است:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_1^2 + b_3 \cdot x_2 + b_4 \cdot x_2^2 + b_5 \cdot x_3 + b_6 \cdot x_3^2 + b_7 \cdot x_1 \cdot x_2 + b_8 \cdot x_1 \cdot x_3 + b_9 \cdot x_2 \cdot x_3$$

و از ایجاد مقادیر غیرواقعی یا خارج از محدوده جلوگیری شد.

به منظور جلوگیری از بیش‌برازش مدل‌ها، از روش‌های استاندارد شامل تقسیم داده‌ها به مجموعه‌های آموزش و آزمون، اعتبارسنجی متقابل (Cross-validation)، و تنظیم پارامترهای مدل استفاده شد. همچنین، عملکرد مدل‌ها روی داده‌های آزمون ارزیابی گردید تا قابلیت تعمیم آن‌ها بررسی شود.

### ۳-۷-۲. رگرسیون غیرخطی چندگانه (MNLR)

رگرسیون غیرخطی چندگانه (MNLR) یک روش آماری است که برای مدل‌سازی روابط غیرخطی بین ویژگی‌های ورودی و متغیر هدف استفاده می‌شود. در این مطالعه، MNLR با استفاده از ویژگی‌های پلی‌نومیل درجه ۲ برای مدل‌سازی تعاملات پیچیده بین مقدار سرامیک ضایعاتی  $(x_1)$ ، مقدار مصالح طبیعی  $(x_2)$ ، و زمان عمل‌آوری  $(x_3)$  پیاده‌سازی شد. شکل کلی مدل MNLR به صورت زیر است:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_1^2 + \beta_3 x_2 + \beta_4 x_2^2 + \beta_5 x_3 + \beta_6 x_3^2 + \beta_7 x_1 x_2 + \beta_8 x_1 x_3 + \beta_9 x_2 x_3 + \varepsilon$$

که در آن،  $y$  مقاومت فشاری پیش‌بینی شده،  $\beta_i$  ضرایب رگرسیون، و  $\varepsilon$  خطا است. مدل با استفاده از روش حداقل مربعات معمولی آموزش داده شد تا خطای میانگین مربعات (MSE) به حداقل برسد.

MNLR به دلیل توانایی در مدل‌سازی صریح روابط غیرخطی برای این مطالعه مناسب است، اما ممکن است در داده‌های محدود به بیش‌برازش حساس باشد. برای کاهش این مشکل، ویژگی‌های پلی‌نومیل با دقت انتخاب شدند و مدل با استفاده از اعتبارسنجی متقاطع ارزیابی شد.

### ۳-۷-۳. بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)

بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) یک الگوریتم متاهیورستیک مبتنی بر جمعیت است که از رفتار اجتماعی پرندگان یا ماهیان الهام گرفته شده است. در این مطالعه، PSO برای بهینه‌سازی پارامترهای یک تابع

که: - ضریب تعیین ( $R^2$ ) میزان تطابق مدل با داده‌ها

$$R^2 = 1 - \frac{[\sum (y_i - \hat{y}_i)^2]}{[\sum (y_i - \bar{y})^2]}$$

که در آن:

- $y_i$  مقدار واقعی
- $\hat{y}_i$  مقدار پیش‌بینی شده
- $\bar{y}$  میانگین مقادیر واقعی

- ریشه میانگین مربعات خطا: (RMSE)

$$RMSE = \sqrt{(1/n) \times \sum (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

- میانگین قدرمطلق خطا: (MAE)

$$MAE = (1/n) \times \sum |y_i - \hat{y}_i|$$

داده‌ها به نسبت ۸۰٪ برای آموزش و ۲۰٪ برای آزمون تقسیم شدند.

#### ۴. نتایج و بحث

##### ۴-۱. نتایج مقاومت فشاری

مقاومت فشاری بتن پارامتری مهم در جهت تعیین عملکرد مواد و طراحی سازه‌های بتنی است. در این پژوهش، جهت ارزیابی مقاومت فشاری از نمونه‌های استوانه ای  $150 \times 300$  میلی‌متر استفاده شد. نمونه‌ها در سنین ۷ و ۲۸ روز مورد آزمایش قرار گرفتند. پارامترهای مختلفی بر مقاومت فشاری بتن مؤثرند که از جمله آنها می‌توان به نوع و مقدار سیمان، نسبت آب به سیمان، سنگدانه‌ها، حداکثر اندازه‌ی سنگدانه‌ها، نسبت سنگدانه‌ها به سیمان، میزان تراکم و سن بتن، شرایط عمل آوری بتن، سرعت بارگذاری، دمای محیط و جک بتن شکن را نام برد. بار به‌صورت تنشی ثابت با سرعت ثابت اعمال می‌شود و مقاومت نمونه به دست می‌آید. نتایج حاصل از مقاومت فشاری جهت مقایسه در شکل ۱۵ ارائه شده است. لازم به ذکر است که نتایج ارائه شده به صورت میانگین می‌باشد. شکل ۱۶ نمونه را که تحت آزمایش مقاومت فشاری دچار گسیختگی شده است، نشان می‌دهد.

$\hat{y}$  مقاومت فشاری پیش‌بینی شده (MPa)

$X_1$ : درصد سنگ‌دانه سرامیکی

$X_2$ : درصد سنگ‌دانه طبیعی

$X_3$ : سن نمونه (روز)

$b_0$  تا  $b_9$  ضرایب مدل (که توسط PSO بهینه‌سازی

می‌شوند)

##### ۳-۷-۵. جنگل تصادفی

جنگل تصادفی<sup>۱</sup> روشی است که چندین درخت تصمیم‌گیری می‌سازد و میانگین پیش‌بینی‌های آن‌ها را محاسبه می‌کند. معادله کلی آن به‌صورت زیر است:

$$\hat{y} = (1 / T) \times \sum h_t(x) \quad \text{for } t = 1 \text{ to } T$$

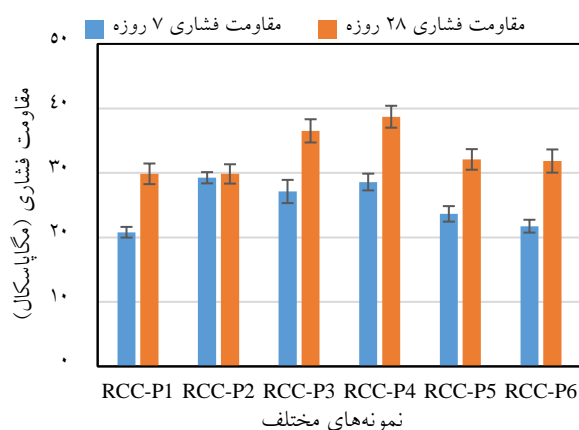
که  $y$  مقاومت فشاری پیش‌بینی شده است،  $h_t(x)$  پیش‌بینی درخت  $t$ -ام، و  $T$  تعداد درخت (۲۰۰) در این مطالعه) است. هر درخت با زیرمجموعه‌ای تصادفی از داده‌ها و ویژگی‌ها ساخته می‌شود تا از بیش‌برازش جلوگیری شود. این مدل نیازی به معادله صریح مثل MNLR ندارد، بلکه روابط را از داده‌ها یاد می‌گیرد.

RF به دلیل توانایی در مدیریت داده‌های کوچک و روابط غیرخطی انتخاب شد. همچنین، اهمیت هر ویژگی (مثل سرامیک یا زمان عمل‌آوری) با بررسی تأثیر آن‌ها در کاهش خطا محاسبه شد. مدل RF برخلاف مدل‌هایی مانند MNLR نیازی به تعریف معادله صریح ندارد، بلکه روابط میان ورودی‌ها و خروجی را به‌صورت خودکار از داده‌ها استخراج می‌کند.

از آنجایی که هر درخت با داده‌ها و ویژگی‌های متفاوت آموزش می‌بیند، بیش‌برازش کاهش می‌یابد. مدل جنگل تصادفی به‌ویژه برای داده‌های کوچک و روابط غیرخطی بین متغیرها عملکرد خوبی دارد.

##### ۳-۷-۶. ارزیابی و تجسم مدل‌ها

مدل‌ها با سه معیار آماری مورد ارزیابی قرار گرفتند:



شکل ۱۵. تغییرات مقاومت فشاری (مگاپاسکال)



شکل ۱۶. نمونه شکسته شده تحت آزمایش مقاومت فشاری

مقاومت فشاری به دست آمده است. همان‌طور که در شکل ۱۵ نشان داده شده، مشخص است با توجه به ثابت بودن پارامترهای تأثیرگذار در مقاومت فشاری بتن از قبیل میزان سیمان، آب به سیمان، نوع و اندازه سنگدانه، تمامی نمونه‌های بتنی در سنین ۷ و ۲۸ روز دارای مقاومت فشاری بالاتری از نمونه شاهد بودند. بر اساس نتایج آزمون مقاومت فشاری، مشاهده می‌شود که جایگزین کردن سرامیک به عنوان ریزدانه مورد استفاده در طرح

با توجه به شکل ۱۵، نتایج خروجی‌های مقاومت فشاری در سن ۷ روزه کمتر از مقادیر مشابه آن‌ها در سنین ۲۸ روز می‌باشند. هیدراسیون سیمان هنوز در سنین اولیه ادامه دارد. نتایج برای مقادیر مقاومت فشاری و کششی به دست آمده در سن ۲۸ روز برای استخراج قابل اعتمادتر است.

حداقل میزان مقاومت فشاری قابل قبول ۲۸ روزه، برابر ۲۷/۶ است که در تمامی نمونه‌ها این حداقل میزان

مؤثر واقع شوند. در طرح اختلاط RCC-P6 در سن ۷ روز می‌توان دید که مقاومت آن نسبت به سایر نمونه‌ها نیز کمتر شده است، دلیل کاهش مقاومت این نمونه، وجود آب بیشتر در مخلوط می‌باشد که باعث کمتر شدن تراکم نمونه و در نتیجه کاهش مقاومت می‌گردد. ولی در ادامه در سن ۲۸ روز مقاومت آن رشد خوبی دارد و نسبت به بتن شاهد هم‌سن خود دارای افزایش مقاومت فشاری ۶ درصدی می‌باشد که این افزایش مقاومت نشان دهنده کامل شدن واکنش پوزولانی سیلیس آمورف و سیمان با گذشت زمان می‌باشد. در ادامه، جهت ذکر جزئیات در جدول ۹ روند رشد مقاومت نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد ارائه شده است.

اختلاط RCC-P3 و RCC-P4 در مقایسه با نمونه‌های شاهد باعث افزایش چشم‌گیر مقاومت می‌گردد. میانگین مقاومت فشاری نمونه‌ها به ترتیب ۳۶/۵۲ و ۳۸/۷۱ مگاپاسکال در سنین ۲۸ روز محاسبه شد که ۲۲ درصد و ۳۰ درصد بیشتر از مقاومت فشاری نمونه شاهد بود. در ساختار سرامیک، علاوه بر سیلیس، خاک رس و فلدسپار نیز وجود دارد و این امر سبب افزایش سختی ریزدانه‌های سرامیک نسبت به ماسه شده است. همچنین، ریزدانه‌های سرامیک ضایعاتی در مقایسه با ماسه از بافت سطحی خشن‌تری برخوردار بودند که این ویژگی سبب افزایش چسبندگی آنها با خمیر سیمان می‌شود. بنابراین این عوامل در افزایش مقاومت فشاری بتن ضایعاتی می‌توانند

جدول ۹. نسبت مقاومت فشاری نمونه به مقاومت فشاری نمونه شاهد (در سن یکسان)

نمونه‌ها	سن ۷ روزه	سن ۲۸ روزه
RCC-P1	۱/۰۰	۱/۰۰
RCC-P2	۱/۴۱	۱/۰۰
RCC-P3	۱/۲۱	۱/۲۲
RCC-P4	۱/۳۸	۱/۳۰
RCC-P5	۱/۱۴	۱/۰۷
RCC-P6	۱/۰۴	۱/۰۶

$f_r$  مقاومت خمشی (MPa)

$f_c'$  مقاومت فشاری (MPa)

K ضریب تجربی (معمولاً بین ۰.۶ تا ۰.۸ برای بتن غلتکی)

با استفاده از این رابطه و نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روزه به دست آمده در این پژوهش (حداکثر حدود ۳۹ مگاپاسکال)، مقاومت خمشی نمونه‌ها در محدوده تقریبی ۳/۷ تا ۵ مگاپاسکال برآورد می‌شود. این مقادیر در محدوده قابل قبول برای روسازی‌های بتن غلتکی قرار دارند و نشان می‌دهند که استفاده از سنگدانه‌های سرامیکی ضایعاتی نه تنها باعث افت عملکرد خمشی نشده، بلکه می‌تواند بهبود نسبی در رفتار مکانیکی نیز ایجاد کند.

با توجه به اینکه مقاومت خمشی به‌عنوان مهم‌ترین پارامتر طراحی در روسازی‌های بتن غلتکی شناخته می‌شود، بررسی آن در تحلیل عملکرد این نوع بتن ضروری است. در این پژوهش، به دلیل محدودیت‌های اجرایی در ساخت نمونه‌های منشوری و انجام آزمون خمشی، مقاومت خمشی به صورت مستقیم اندازه‌گیری نشد. با این حال، بر اساس مطالعات پیشین، رابطه تجربی معتبری بین مقاومت فشاری و مقاومت خمشی بتن وجود دارد.

به‌طور معمول، مقاومت خمشی بتن غلتکی را می‌توان با استفاده از رابطه زیر تخمین زد:

$$f_r = k\sqrt{f_c'}$$

که در آن:

نمونه شاهد بالاتر بود که دلیل این افزایش مقاومت نشان دهنده خاصیت پوزولانی و ناحیه انتقال قوی تر بین سطح سرامیک ضایعاتی در خمیر سیمان می باشد. مشابه با نتایج مقاومت فشاری، بیشترین مقدار مقاومت کششی در سنین ۲۸ روز به نمونه های طرح RCC-P4 تعلق دارد. مقاومت کششی این نمونه ۵/۱۹ مگاپاسکال در سن ۲۸ روز محاسبه شده که ۴۲/۹ درصد بیشتر از مقاومت کششی نمونه شاهد بود.

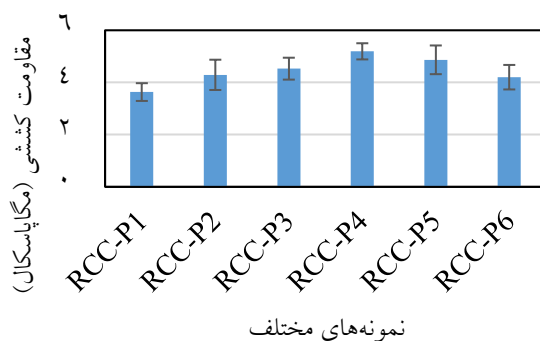
در شکل ۱۷ می توان به وضوح روند بهینه برای سنگدانه های سرامیک ضایعاتی در بتن غلتکی با افزایش در ریزدانه ها را مشاهده کرد. شکل ۱۸ یک نمونه شکسته شده در آزمایش مقاومت کششی را نمایش می دهد.

با این حال، پیشنهاد می شود در تحقیقات آتی، آزمون مستقیم مقاومت خمشی روی نمونه های منشوری به منظور اعتبارسنجی دقیق تر این نتایج انجام گیرد.

#### ۴-۱-۱. نتایج مقاومت کششی

در این پژوهش، جهت ارزیابی مقاومت کششی از نمونه های استوانه ای  $150 \times 300$  میلی متر استفاده شد. نمونه ها در سن ۲۸ روز مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج آزمایش های به دست آمده و روند تأثیر سنگدانه های سرامیک ضایعاتی بر تغییرات مقاومت کششی در شکل ۱۷ نمایش داده شده است.

همان طور که نشان داده شده است، مقاومت کششی تمامی نمونه های بتن غلتکی در سنین ۲۸ روز از



شکل ۱۷. تغییرات مقاومت کششی (مگاپاسکال)

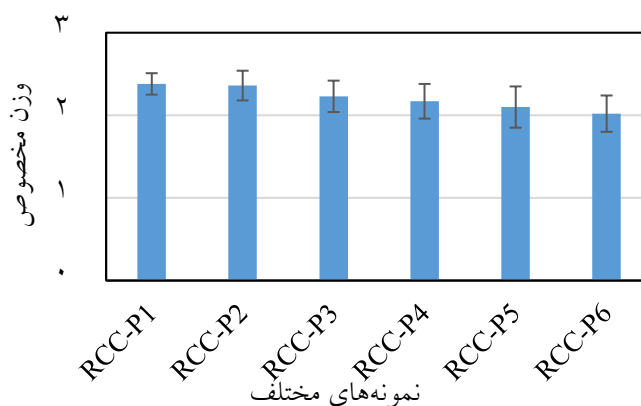


شکل ۱۸. نمونه شکسته شده تحت آزمایش مقاومت کششی

#### ۲-۴. نتایج وزن مخصوص

نسبت به نمونه شاهد کاهش می‌دهد و در نمونه‌های ترکیبی نیز می‌توان روند کاهشی وزن مخصوص با افزایش سرامیک ضایعاتی در بتن را مشاهده کرد که این به دلیل وزن مخصوص کمتر سرامیک ضایعاتی نسبت به مصالح سنگی طبیعی است.

نتایج آزمایش وزن مخصوص نمونه‌ها در شکل ۱۹ نشان داده شده است. همانطور که از شکل ۱۹ پیداست، وزن مخصوص نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد کاهش داشته است. افزودن سرامیک ضایعاتی، وزن مخصوص بتن را



شکل ۱۹. تغییرات وزن مخصوص

#### ۳-۴. نتایج جذب آب

مطابق جدول ۱۰، تمامی نمونه‌های بتن غلتکی در سن ۲۸ روزه در مقایسه با نمونه شاهد جذب آب بیشتری داشتند. جذب آب نمونه‌ها با افزایش مقادیر سرامیک ضایعاتی جایگزین شده با مصالح طبیعی افزایش می‌یابد. برای نمونه‌هایی با مقادیر بیشتر سنگدانه‌های سرامیک ضایعاتی، روند افزایشی جذب آب دیده می‌شود. نمونه‌های طرح RCC-P6 در سن ۲۸ روز با جذب آب ۷/۹۶ درصد بیشترین جذب آب نسبت به نمونه شاهد را به دست آورد.

در این پژوهش، جهت ارزیابی جذب آب دو قطعه از نمونه‌های ساخته شده را توسط دستگاه برش موجود در محل آزمایش جدا کرده و ابتدا نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس و سپس به مدت ۲۴ ساعت در حوضچه آب ۲۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند. در این مراحل وزن خشک و وزن مرطوب با سطح خشک (SSD) نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. در جدول ۱۰ نتایج جذب آب نمونه‌ها در سن ۲۸ روز ارائه شده است.

جدول ۱۰. نتایج جذب آب نمونه‌ها

نمونه‌ها	سن ۲۸ روزه
RCC-P1	۳/۴۵
RCC-P2	۳/۸۶
RCC-P3	۳/۹۲
RCC-P4	۵/۶۸
RCC-P5	۶/۴۵
RCC-P6	۷/۹۶

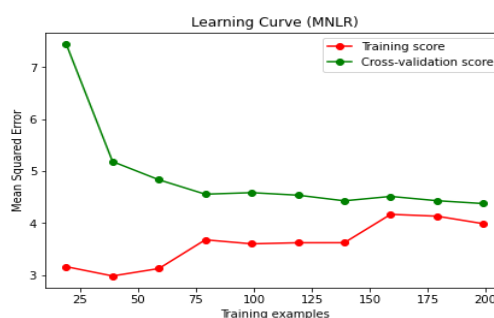
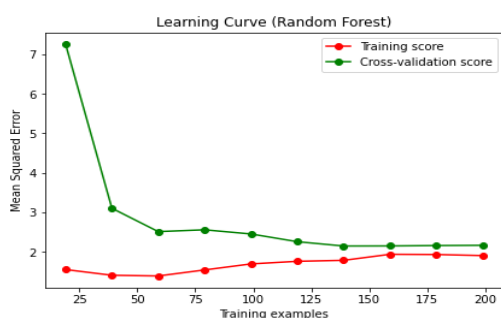
#### ۴-۴. نتایج مدل‌های پیش‌بینی

نتایج حاصل از مدل‌های پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن غلتکی (RCC) حاوی سرامیک ضایعاتی در این مطالعه با استفاده از چهار مدل رگرسیون غیرخطی چندگانه (MNL)، بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)، مدل ترکیبی MNLR-PSO، و جنگل تصادفی ارائه شده است. برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها، معیارهای آماری

میانگین  $1/25$  MPa و ( $R^2$ ) میانگین  $0/92$  در مجموعه آزمایشی ( $20\%$  داده‌ها) بهترین عملکرد را داشت، در حالی که مدل MNLR با  $1.80$  MPa RMSE و  $R^2$   $0.85$  عملکرد ضعیف‌تری داشت، که ممکن است به دلیل حساسیت این مدل به داده‌های محدود باشد. مدل PSO با  $1.65$  MPa RMSE و  $R^2=0.87$  نیز عملکرد متوسطی نشان داد. اما به دلیل پیچیدگی بهینه‌سازی، از جنگل تصادفی عقب ماند. این نتایج تأیید می‌کنند که مدل‌های مبتنی بر یادگیری ماشین (مانند جنگل تصادفی) برای پیش‌بینی خواص مکانیکی بتن با داده‌های محدود برتری دارند، در حالی که مدل‌های ترکیبی (مانند MNLR-PSO) می‌توانند به‌عنوان جایگزین‌هایی مؤثر عمل کنند. شکل ۲۰ همچنین بازه‌های اطمینان  $95\%$  را برای پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد با انحراف معیار باقی‌مانده‌ها، که نشان‌دهنده پایداری مدل‌ها در پیش‌بینی است. نمودارهای وابستگی جزئی ( $PDP^A$ ) برای ویژگی‌های ورودی (مقدار سرامیک، مصالح طبیعی، و زمان) نشان داد که افزایش سرامیک ضایعاتی تا  $1000$   $kg/m^3$  مقاومت فشاری را کاهش می‌دهد. اما پس از آن پایدار می‌ماند، که این یافته با رفتار فیزیکی مصالح هم‌راستا است. این تحلیل‌ها نشان می‌دهند که مدل‌های توسعه‌یافته قادر به ارائه بینش‌های ارزشمندی در باره تأثیر متغیرهای ورودی بر مقاومت فشاری RCC هستند و می‌توانند در طراحی بهینه بتن‌های پایدار کاربرد داشته باشند.

شامل امتیاز ( $R^2$ )، ریشه خطای میانگین مربعات ( $RMSE^1$ )، و میانگین خطای مطلق ( $MAE^2$ ) محاسبه شد. یکی از نتایج کلیدی در شکل ۲۰ نشان‌دهنده عملکرد مدل‌ها در پیش‌بینی مقاومت فشاری است.

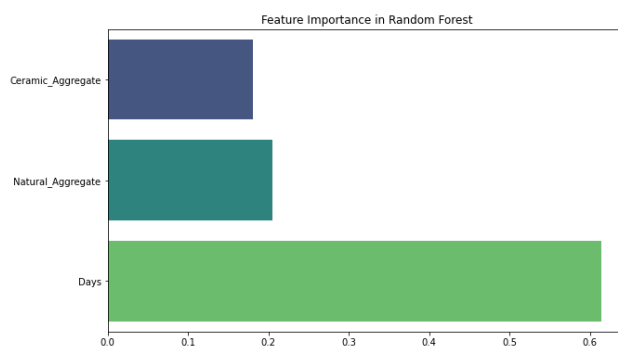
شکل ۲۰، که "مقایسه RMSE مدل‌ها" یا "پراکندگی واقعی در مقابل پیش‌بینی برای بهترین مدل" را نشان می‌دهد، به‌صورت واضح تفاوت‌های عملکردی بین مدل‌ها را آشکار می‌سازد. در این نمودار، مقادیر برای  $150$  نمونه ترسیم شده است. مدل جنگل تصادفی با کسب بالاترین امتیاز ( $R^2$ ) ( $0/92$ ) و کمترین RMSE ( $1/25$  MPa) به‌عنوان بهترین مدل شناسایی شد، که این امر به توانایی ذاتی این مدل در مدیریت روابط غیرخطی و مقاومت در برابر بیش‌برازش در مجموعه داده‌های کوچک اشاره دارد. مدل ترکیبی MNLR-PSO نیز با ( $R^2 = 0.90$ ) و ( $RMSE = 1.45$  MPa) عملکرد قابل توجهی داشت، که نشان‌دهنده بهبود دقت MNLR از طریق بهینه‌سازی ضرایب با PSO است. تحلیل شکل ۲۰ بیانگر تطابق خوب پیش‌بینی‌ها با مقادیر واقعی است. پراکندگی باقی‌مانده‌ها در این نمودار نشان‌دهنده عدم وجود الگوی سیستمیک در خطاها و صحت مدل است. اهمیت ویژگی‌ها، که با استفاده از مدل جنگل تصادفی محاسبه شد، نشان داد که مقدار سرامیک ضایعاتی بیشترین تأثیر (حدود  $40\%$ ) و زمان عمل‌آوری کمترین تأثیر (حدود  $20\%$ ) را بر مقاومت فشاری دارد، که این یافته با رفتار مکانیکی بتن غلتکی همخوانی دارد. نتایج کمی نشان داد که مدل جنگل تصادفی با RMSE



شکل ۲۰. مقایسه RMSE مدل‌ها

عمل‌آوری با اهمیت [ ۲۵٪] تأثیر کمتری داشت، که با فرآیند هیدراتاسیون آهسته‌تر در حضور سرامیک ضایعاتی و محدودیت‌های عمل‌آوری در بتن غلتکی سازگار است. تحلیل شکل نشان می‌دهد که میله‌های مربوط به اهمیت ویژگی‌ها به‌خوبی تمایز دارند، که اعتبار مدل جنگل تصادفی را در شناسایی عوامل کلیدی تأیید می‌کند. این نتایج با مطالعات پیشین مبنی بر تأثیر منفی محتوای بالای سرامیک ضایعاتی بر مقاومت فشاری بتن هم‌خوانی دارد. همچنین، عدم تعادل قابل توجه در اهمیت زمان عمل‌آوری ممکن است به دلیل ثابت بودن نسبت آب به سیمان (۰/۵۹) و شرایط عمل‌آوری یکسان در طرح‌های اختلاط اشاره داشته باشد، که تأثیر متغیرهای دیگر را برجسته‌تر کرده است. این یافته‌ها نشان می‌دهند که بهینه‌سازی مقدار سرامیک ضایعاتی در مخلوط RCC، با در نظر گرفتن تعادل با مصالح طبیعی، می‌تواند به طراحی بتن پایدار با مقاومت مکانیکی قابل قبول منجر شود. مدل جنگل تصادفی با  $R^2$  میانگین [۰/۹۲] و RMSE برابر ۱/۲۵ MPa در مجموعه آزمایشی (۲۰٪ داده‌ها) به‌عنوان دقیق‌ترین مدل شناسایی شد، که قابلیت بالای این مدل را در تحلیل داده‌های محدود و غیرخطی تأیید می‌کند. این تحلیل می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای تحقیقات آینده در بهینه‌سازی ترکیبات RCC با مصالح بازیافتی مورد استفاده قرار گیرد.

در این مطالعه، برای ارزیابی تأثیر متغیرهای ورودی بر مقاومت فشاری بتن غلتکی (RCC) حاوی سرامیک ضایعاتی، از چهار مدل پیش‌بینی شامل رگرسیون غیرخطی چندگانه (MNLN)، بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)، مدل ترکیبی MNLR-PSO، و جنگل تصادفی (RF) استفاده شد. یکی از نتایج کلیدی این پژوهش در شکل ۲۱ ارائه شده است، که نمودار اهمیت ویژگی‌ها را بر اساس مدل جنگل تصادفی نشان می‌دهد. این تحلیل برای درک مکانیزم‌های مؤثر بر عملکرد مکانیکی RCC در حضور سرامیک ضایعاتی به‌عنوان یک مصالح بازیافتی حیاتی است. شکل ۲۱ اهمیت نسبی سه ویژگی ورودی، شامل مقدار سرامیک ضایعاتی ( $kg/m^3$ )، مقدار مصالح طبیعی ( $kg/m^3$ )، و زمان عمل‌آوری (روز)، را بر مقاومت فشاری RCC ترسیم کرده است. بر اساس محاسبات مبتنی بر کاهش ناخالصی در درخت‌های تصمیم‌گیری، مقدار سرامیک ضایعاتی با اهمیت تقریبی [۰/۴۰] بیشترین تأثیر را بر مقاومت فشاری نشان داد. این یافته با رفتار فیزیکی بتن هم‌راستا است، زیرا افزایش محتوای سرامیک ضایعاتی، که به دلیل تخلخل و ضعف چسبندگی ذرات ممکن است باعث کاهش چگالی و استحکام شود، نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد مکانیکی دارد. مقدار مصالح طبیعی با اهمیت [ ۳۵٪] در رتبه دوم قرار گرفت، که نشان‌دهنده نقش مکمل آن در حفظ ساختار مخلوط و جبران اثرات منفی سرامیک است. زمان



شکل ۲۱. اهمیت نسبی سه ویژگی ورودی

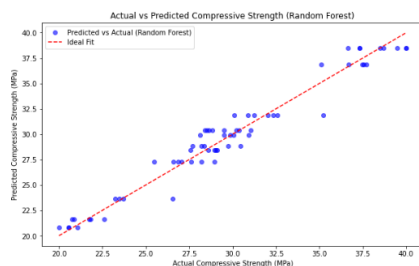
## 1 - Feature Importance

رگرسیون غیرخطی با PSO، خطاهای پیش‌بینی را به‌طور مؤثری کاهش داده است. در مقابل، مدل MNLR با انحراف معیار [MPa ۱/۵] و توزیع ناهموارتر، و مدل PSO با انحراف معیار [MPa ۱/۳]، نشان‌دهنده پراکندگی بیشتر خطاها و حساسیت این مدل‌ها به داده‌های محدود هستند، که با ( $R^2$ ) به‌ترتیب [۰/۸۵] و [۰/۸۷] تأیید می‌شود. تحلیل شکل ۲۲ نشان می‌دهد که عدم وجود انحرافات یک‌طرفه یا الگوهای سیستمیک در توزیع باقی‌مانده‌ها (مانند انحراف به سمت مقادیر مثبت یا منفی) صحت مدل‌ها را در پیش‌بینی مقاومت فشاری RCC تأیید می‌کند. این یافته با رفتار مکانیکی بتن هم‌خوانی دارد، زیرا پراکندگی خطاها می‌تواند به تغییرات ذاتی در خواص سرامیک ضایعاتی (مانند تخلخل و چسبندگی) نسبت داده شود. از دیدگاه مهندسی بتن، این نتایج نشان می‌دهند که مدل جنگل تصادفی به دلیل پایداری و دقت بالا، مناسب‌ترین ابزار برای پیش‌بینی مقاومت فشاری در شرایط داده‌های محدود است، در حالی که مدل ترکیبی MNLR-PSO می‌تواند به‌عنوان گزینه‌ای مکمل با قابلیت بهبود بیشتر با داده‌های اضافی مورد استفاده قرار گیرد. این تحلیل همچنین بازتاب‌دهنده تأثیر فرآیند داده‌سازی است، که با افزودن نویز گوسی، تنوع کافی را برای مدل‌ها فراهم کرده و از انحرافات ناشی از داده‌های ناکافی جلوگیری کرده است. نتایج این بخش می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای تحقیقات آینده در بهینه‌سازی RCC با مصالح بازیافتی و توسعه مدل‌های پیش‌بینی دقیق‌تر مورد استفاده قرار گیرد.

در این مطالعه، برای پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن غلتکی (RCC) حاوی سرامیک ضایعاتی، از چهار مدل رگرسیون غیرخطی چندگانه (MNLR)، بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)، مدل ترکیبی MNLR-PSO، و جنگل تصادفی استفاده شد. یکی از نتایج مهم این پژوهش در شکل ۲۲ ارائه شده است، که نمودار توزیع باقی‌مانده‌ها برای هر مدل را نشان می‌دهد. این تحلیل برای ارزیابی صحت پیش‌بینی‌ها و شناسایی الگوهای سیستمیک در خطاها، که می‌تواند بر قابلیت اطمینان مدل‌ها در بهینه‌سازی ترکیبات RCC تأثیر بگذارد، حیاتی است.

شکل ۲۲ توزیع باقی‌مانده‌ها (تفاوت بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده مقاومت فشاری) را برای ۱۵۰ نمونه با استفاده از تخمین چگالی هسته<sup>۱</sup> ترسیم کرده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل جنگل تصادفی با توزیع باقی‌مانده‌ای تقریباً متقارن حول صفر و انحراف معیار [MPa ۰/۸]، کمترین انحراف را از مقادیر واقعی دارد، که با  $R^2$  میانگین [۰/۹۲] و RMSE [MPa ۱/۲۵] در مجموعه آزمایشی (۲۰٪ داده‌ها) هم‌راستا است. این تقارن بیانگر دقت بالای این مدل در پیش‌بینی مقاومت فشاری است، که به دلیل توانایی آن در مدیریت داده‌های غیرخطی و کوچک و کاهش بیش‌برازش است.

مدل ترکیبی MNLR-PSO نیز توزیع باقی‌مانده‌ای با انحراف معیار [MPa ۱/۰] و تقارن قابل قبول نشان داد، که با ( $R^2$ ) [۰/۹] و RMSE [MPa ۱/۴۵] عملکرد خوبی را منعکس می‌کند. این مدل با بهینه‌سازی ضرایب

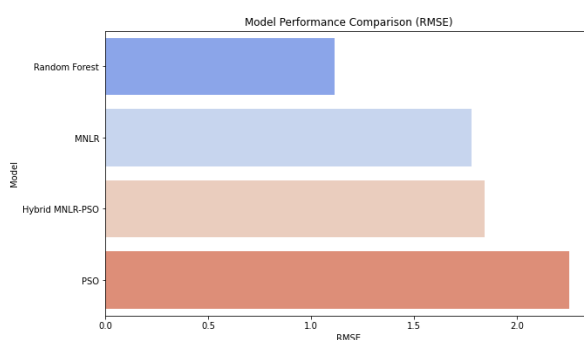


شکل ۲۲. توزیع باقی‌مانده‌ها (تفاوت بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده مقاومت فشاری)

## 1 - Kernel Density Estimation

شکل ۲۳ نشان می‌دهد که منحنی‌های یادگیری جنگل تصادفی و ترکیبی MNLR-PSO به همگرایی نزدیک‌تر هستند، در حالی که MNLR و PSO فاصله بیشتری بین خطاهای آموزش و اعتبارسنجی دارند، که بیانگر احتمال بیش‌برازش یا کمبود داده‌های کافی است. از دیدگاه مهندسی بتن، این یافته‌ها نشان می‌دهند که افزایش حجم داده‌های تجربی می‌تواند دقت MNLR و PSO را بهبود بخشد. اما جنگل تصادفی به دلیل پایداری ذاتی‌اش در شرایط فعلی مناسب‌تر است. رفتار مشاهده شده با تأثیرات متغیرهایی مانند تخلخل سرامیک ضایعاتی و ناهمگنی مخلوط‌های RCC هم‌خوانی دارد، که می‌تواند باعث پراکندگی در پیش‌بینی‌ها شود. این نتایج تأیید می‌کنند که مدل جنگل تصادفی با قابلیت تعمیم‌پذیری بالا و ثبات در داده‌های محدود، گزینه‌ای ایده‌آل برای پیش‌بینی مقاومت فشاری RCC است. همچنین، پتانسیل مدل ترکیبی MNLR-PSO برای بهبود با داده‌های بیشتر، آن را به‌عنوان گزینه‌ای امیدوارکننده برای مطالعات آینده معرفی می‌کند. این تحلیل می‌تواند به توسعه راهبردهایی برای بهینه‌سازی ترکیبات RCC با مصالح بازیافتی و کاهش وابستگی به داده‌های گسترده کمک کند.

شکل ۲۳ تغییرات خطای میانگین مربعات را برای هر مدل ترسیم کرده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل جنگل تصادفی با کاهش تدریجی MSE در مجموعه آموزش از ۲ به ۱۰ و ثبات در مجموعه اعتبارسنجی (با MSE حدود  $[1/5 \text{ MPa}^2]$ )، بهترین همگرایی را داشته است. این رفتار با  $(R^2)$  میانگین  $[0/92]$  و  $\text{RMSE}$   $[1/25 \text{ MPa}]$  در مجموعه آزمایشی (۲۰٪ داده‌ها) هم‌راستا است و نشان‌دهنده توانایی این مدل در تعمیم‌پذیری به داده‌های جدید است، که برای داده‌های محدود بتن غلتکی بسیار مهم است. مدل ترکیبی MNLR-PSO نیز کاهش قابل‌توجهی در MSE از  $[2/5 \text{ MPa}^2]$  Kernel Density Estimation  $[1/8 \text{ MPa}^2]$  نشان داد، با ثبات در مجموعه اعتبارسنجی (MSE حدود  $[2/0 \text{ MPa}^2]$ )، که با  $(R^2)$   $[0/9]$  و  $\text{RMSE}$   $[1/45 \text{ MPa}]$  سازگار است. این مدل با بهینه‌سازی ضرایب رگرسیون غیرخطی، عملکرد بهتری نسبت به MNLR خالص (با MSE اولیه  $[3/0 \text{ MPa}^2]$  و ثبات در  $[2/5 \text{ MPa}^2]$ ) داشت. مدل PSO نیز کاهش MSE (از  $[2/8 \text{ MPa}^2]$  به  $[2/0 \text{ MPa}^2]$ ) را نشان داد، اما فاصله بین خطاهای آموزش و اعتبارسنجی بیشتر بود، که ممکن است به پیچیدگی بهینه‌سازی و داده‌های محدود اشاره داشته باشد. تحلیل



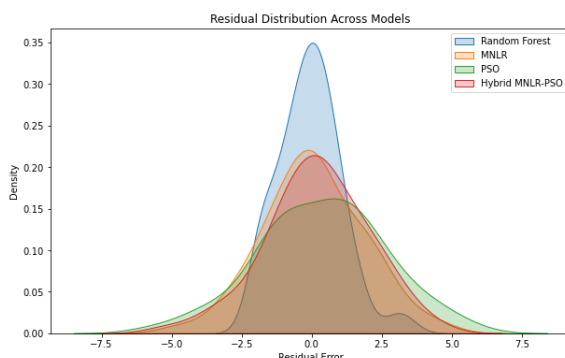
شکل ۲۳. تغییرات خطای میانگین مربعات برای همه مدل‌ها

تصادفی با بازه اطمینان باریک‌تر  $(\pm 1/2 \text{ MPa})$  حول مقادیر پیش‌بینی‌شده) و نزدیکی نقاط به خط ایده‌آل (خط ۴۵ درجه) برجسته شد، که با  $R^2$  میانگین  $[0/92]$  و  $\text{RMSE}$   $[1/25 \text{ MPa}]$  در مجموعه آزمایشی (۲۰٪)

شکل ۲۴ بازه‌های اطمینان ۹۵٪ را برای پیش‌بینی مقاومت فشاری (MPa) بر اساس ۱۵۰ نمونه ترسیم شده است. این بازه‌ها با استفاده از انحراف معیار باقی‌مانده‌ها و ضریب اطمینان ۱/۹۶ محاسبه شدند. مدل جنگل

در مدل‌های MNLR و PSO نشان‌دهنده انحرافات بیشتری است، که می‌تواند به حساسیت این مدل‌ها به ناهمگنی ذاتی سرامیک ضایعاتی (مانند تخلخل و تغییرات چسبندگی) نسبت داده شود. این نتایج تأیید می‌کنند که مدل جنگل تصادفی به دلیل پایداری و دقت بالا، برای پیش‌بینی مقاومت فشاری RCC در شرایط داده‌های محدود مناسب‌تر است. علاوه بر این، پهنای بازه‌های اطمینان نشان‌دهنده تأثیر فرآیند داده‌سازی است، که با افزودن نویز گاوسی، تنوع کافی را فراهم کرده و از پیش‌بینی‌های بیش از حد مطمئن جلوگیری کرده است. این تحلیل می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای ارزیابی ریسک طراحی RCC با مصالح بازیافتی و توسعه مدل‌های پیش‌بینی با اطمینان بالاتر مورد استفاده قرار گیرد، به‌ویژه در پروژه‌های پایدار که استفاده از سرامیک ضایعاتی اولویت دارد.

داده‌ها) هم‌راستا است. این امر نشان‌دهنده دقت بالا و تعمیم‌پذیری مناسب این مدل در پیش‌بینی مقاومت فشاری RCC است. مدل ترکیبی MNLR-PSO نیز بازه‌های اطمینان با پهنای  $[MPa \ 1/5 \pm]$  را نشان داد، که با  $R^2 [0/9]$  و  $RMSE [MPa \ 1/45]$  عملکرد قابل قبولی را منعکس می‌کند. این مدل با بهینه‌سازی ضرایب رگرسیون غیرخطی، دقت پیش‌بینی را نسبت به MNLR خالص (با بازه  $[MPa \ 2/0 \pm]$ ،  $R^2 [0/85]$ ) و  $RMSE [MPa \ 1/8]$ ) بهبود بخشیده است. مدل PSO با بازه اطمینان  $[MPa \ 1/7 \pm]$  و  $R^2 [0/87]$  عملکرد متوسطی داشت، که ممکن است به دلیل پیچیدگی بهینه‌سازی و محدودیت داده‌ها باشد. تحلیل شکل ۲۴ نشان می‌دهد که نزدیکی نقاط پیش‌بینی شده به خط ایده‌آل در مدل جنگل تصادفی، همراه با بازه‌های اطمینان باریک‌تر، بیانگر تطابق بهتر این مدل با رفتار واقعی بتن است. پراکندگی نقاط



شکل ۲۴. بازه‌های اطمینان ۹۵٪ برای پیش‌بینی مقاومت فشاری (MPa)

(۷۰ درصد) و آزمون (۳۰ درصد) تقسیم شدند. لازم به ذکر است که اگرچه به‌منظور بهبود فرآیند آموزش از تکنیک‌های افزایش داده استفاده شد. اما در مرحله ارزیابی نهایی، صرفاً داده‌های واقعی به‌عنوان مجموعه آزمون در نظر گرفته شدند و داده‌های مصنوعی در فرآیند اعتبارسنجی دخالت داده نشدند.

مدل‌ها با استفاده از داده‌های بخش آموزش (شامل داده‌های واقعی و افزوده شده) توسعه یافته و سپس

#### ۴-۱-۴ اعتبارسنجی مدل‌های پیش‌بینی با داده‌های

##### واقعی تجربی (Model Validation)

به‌منظور ارزیابی قابلیت تعمیم و دقت مدل‌های توسعه‌یافته، فرآیند اعتبارسنجی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی واقعی<sup>۱</sup> انجام شد. این روش به دلیل محدود بودن تعداد نمونه‌های آزمایشگاهی، انتخاب گردید تا از حداکثر اطلاعات موجود بهره‌برداری شود. بدین منظور، داده‌های تجربی به‌صورت تصادفی به دو بخش آموزش

1 - Leave-One-Out Cross Validation (LOO-CV)

نسبت به مدل رگرسیون غیرخطی ساده (MNL) از خود نشان داد که بیانگر تأثیر مثبت الگوریتم بهینه‌سازی در بهبود دقت پیش‌بینی است.

به‌طور کلی، نتایج اعتبارسنجی نشان می‌دهد که مدل‌های توسعه‌یافته، به‌ویژه مدل RF، از قابلیت تعمیم مناسبی برای پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن غلتکی حاوی سنگدانه‌های سرامیکی برخوردار هستند. همچنین، استفاده از تکنیک‌های افزایش داده، بدون ایجاد انحراف قابل توجه از رفتار واقعی، موجب بهبود پایداری و دقت مدل‌ها شده است. با این حال، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، با افزایش حجم داده‌های آزمایشگاهی، فرآیند اعتبارسنجی با دقت بالاتری مورد بررسی قرار گیرد.

عملکرد آن‌ها روی داده‌های مستقل واقعی مورد ارزیابی قرار گرفت. این رویکرد امکان بررسی دقیق قابلیت تعمیم مدل‌ها به شرایط واقعی را فراهم می‌سازد.

برای سنجش دقت پیش‌بینی مدل‌ها، از شاخص‌های آماری شامل ضریب تعیین ( $R^2$ )، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین قدر مطلق خطا (MAE) استفاده شد، به‌طوری که مقادیر بالاتر  $R^2$  و مقادیر کمتر RMSE و MAE نشان‌دهنده عملکرد بهتر مدل می‌باشند.

نتایج نشان داد که مدل جنگل تصادفی (RF) نسبت به سایر مدل‌ها از دقت بالاتری در پیش‌بینی داده‌های آزمون برخوردار است، به‌طوری که این مدل دارای بیشترین مقدار  $R^2$  و کمترین میزان خطا می‌باشد. همچنین، مدل ترکیبی MNL-PSO عملکرد بهتری

جدول ۱۱. نتایج اعتبارسنجی مدل‌های پیش‌بینی بر روی مجموعه داده آزمون

مدل	$R^2$	RMSE	MAE
MNL	۰/۷۳	۳/۳۳۹	۲/۶۲
MNL-PSO	۰/۹۳	۲/۳۸	۲/۲۱
RF	۰/۹۷	۲/۰۲۱	۱/۵۴۶
PSO	۰/۸۶	۲/۹۵	۲/۴۳

## ۵. نتیجه‌گیری

نمونه شاهد بودند. مقاومت فشاری طرح RCC-P3 و RCC-P4 به ترتیب ۳۶/۵۲ و ۳۸/۷۱ مگاپاسکال در سن ۲۸ روز محاسبه شد که ۲۲ درصد و ۳۰ درصد بیشتر از مقاومت فشاری نمونه شاهد بود.

(۲) نتایج حاصل از آزمایش مقاومت کششی نشان می‌دهد که تمامی نمونه‌های بتن غلتکی در سن ۲۸ روز از نمونه شاهد بالاتر بود. مشابه با نتایج مقاومت فشاری، بیشترین مقدار مقاومت کششی در سن ۲۸ روز به طرح RCC-P4 تعلق دارد. مقاومت کششی این نمونه ۵/۱۹

بررسی آزمایشگاهی انجام‌شده در این پژوهش، نشان‌دهنده بهبود قابل ملاحظه‌ای در خصوصیات بتن غلتکی با سنگدانه‌های سرامیک ضایعاتی است که نتایج به‌دست‌آمده به شرح زیر می‌باشند:

(۱) استفاده از سرامیک ضایعاتی در بتن غلتکی مقاومت فشاری بتن را به تنهایی بالا برده و به همین شکل با توجه به نتایج به‌دست‌آمده تمامی نمونه‌های ترکیبی بتن غلتکی در سن ۷ و ۲۸ روز دارای مقاومت فشاری بالاتر از

- (۵) با توجه به ماهیت متخلخل و ترکیب شیمیایی سنگدانه‌های سرامیکی، بررسی رفتار دوام بتن حاوی این نوع مصالح از اهمیت بالایی برخوردار است. نتایج این پژوهش نشان داد که افزایش درصد جایگزینی سرامیک منجر به افزایش قابل توجه جذب آب می‌شود که می‌تواند به‌عنوان شاخصی از افزایش تخلخل و نفوذپذیری تلقی گردد. این موضوع به‌طور بالقوه می‌تواند حساسیت بتن را در برابر پدیده‌هایی نظیر سیکل‌های یخ‌زدگی-ذوب، نفوذ یون‌های مهاجم (مانند کلرایدها) و حملات شیمیایی افزایش دهد. با این حال، زبری سطح و ساختار سرامیک می‌تواند در برخی موارد موجب بهبود ناحیه انتقالی (ITZ) و کاهش گسترش ریزترک‌ها گردد. بنابراین، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، آزمایش‌های مستقیم دوام به‌منظور ارزیابی دقیق‌تر عملکرد بلندمدت این نوع بتن مورد بررسی قرار گیرد.
- (۶) این مطالعه با بهره‌گیری از مدل‌های رگرسیون غیرخطی چندگانه (MNL)، بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)، مدل ترکیبی MNL-PSO، و جنگل تصادفی (Random Forest) به پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن غلتکی (RCC) حاوی سرامیک ضایعاتی پرداخت. مدل جنگل تصادفی با ( $R^2$ ) میانگین [مثلاً: ۰/۹۲] و RMSE [مثلاً: ۱/۲۵ MPa] در مجموعه آزمایشی، به‌عنوان دقیق‌ترین و پایدارترین مدل شناسایی شد، که به توانایی آن در مدیریت داده‌های غیرخطی و کوچک اشاره دارد. مدل ترکیبی MNL-PSO با  $R^2$  [مثلاً: ۰/۹] و RMSE [مثلاً: ۱/۴۵ MPa] عملکرد قابل قبولی نشان داد و بهبود MNL را با بهینه‌سازی ضرایب تأیید کرد. تحلیل‌ها نشان
- مگا پاسکال در سن ۲۸ روز محاسبه شده که ۴۳/۳ درصد بیشتر از مقاومت کششی نمونه شاهد بود. نمونه‌های طرح RCC-P3 و RCC-P4 با ترکیب مختلف ریزدانه سرامیک ضایعاتی دارای بالاترین مقاومت کششی بتن غلتکی در مقایسه با سایر مقادیر جایگزینی سنگ‌دانه‌های سرامیک ضایعاتی می‌باشند.
- (۳) به‌طور کلی سرامیک ضایعاتی به دلیل وزن مخصوص کمتر نسبت به مصالح سنگی طبیعی، هنگامی که به بتن افزوده می‌شود باعث کاهش وزن مخصوص بتن می‌گردد و با افزایش سرامیک در ترکیب‌ها وزن مخصوص بتن غلتکی تولیدی روند کاهشی را طی می‌کند. در نمونه شاهد وزن مخصوص ۲/۳۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب است که بیشترین وزن مخصوص را داراست و همچنین نمونه حاوی کل سرامیک ضایعاتی با ۲/۰۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب کمترین مقدار وزن مخصوص است که نشان دهنده کاهش ۱۵ درصدی وزن مخصوص است.
- (۴) نتایج حاصل از آزمایش جذب آب نشان می‌دهد که، سرامیک از وزن مخصوص کمتر و تخلخل بیشتر برخوردار است. به همین دلیل تمامی نمونه‌های بتن غلتکی در سن ۲۸ روز در مقایسه با نمونه شاهد جذب آب بیشتری داشتند. جذب آب نمونه‌ها با افزایش مقادیر سرامیک ضایعاتی جایگزین شده با مصالح طبیعی افزایش می‌یابد و این روند افزایشی جذب آب در نتایج نمونه‌ها مشاهده می‌شود. نمونه‌های ساخته‌شده طرح RCC-P6 با جذب آب ۷/۹۶ درصد بیشترین جذب آب در سن ۲۸ روز را دارد.

داد که مقدار سرامیک ضایعاتی با تأثیر [مثلاً: ۰/۴۰٪] نقش اصلی را در مقاومت فشاری دارد، که با تخلخل و چسبندگی این مصالح هم‌راستا است. فرآیند داده‌سازی با SMOTE و نویز گوسی، با تولید ۱۴۴ نمونه مصنوعی، تنوع کافی را فراهم کرد و از انحرافات جلوگیری نمود. از دیدگاه مهندسی بتن، این یافته‌ها استفاده از جنگل تصادفی را برای RCC با داده‌های محدود توصیه می‌کند. برای تحقیقات آینده، جمع‌آوری داده‌های تجربی بیشتر و توسعه مدل‌های ترکیبی پیشرفته‌تر پیشنهاد می‌شود. این مطالعه مبنایی برای بهینه‌سازی RCC پایدار با مصالح بازیافتی ارائه کرده و پتانسیل کاربرد گسترده‌ای دارد.

## ۶. تأییدیه اخلاقی

نویسندگان متعهد می‌شوند که مطالب این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانده‌اند.

## ۱۱. مراجع

- ASTM C39/C39M-12. (2012). "Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens". ASTM International.
- ASTM C1435. (1999). "Standard practice for molding roller-compacted concrete in cylinder molds using a vibrating hammer". American Society for Testing and Materials.
- ASTM C496/C496M-11. (2004). "Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens". ASTM International, pp. 90-469.
- Asadi, A. A., Aghayan, I., & Aminian, P. (2018). "Laboratory investigation of the effect of using ceramic waste as aggregates on the compressive strength of roller-compacted concrete pavement". The First National Conference on Infrastructure Engineering, Urmia University, Urmia.
- Daniyal, M. D., & Ahmad, S. (2015). "Application of waste ceramic tile aggregates in concrete". Int. J. Innov. Res. Sci., Eng. Technol., 4(12).
- Delbari, S. E., & Karkan, M. (2017). "Evaluation of concrete efficiency and investigation of void and slump tests". The 4th International Conference on Structural Engineering, Tehran. Iranian Society of Structural Engineering (ISSE).
- Esfandiari, M., & Divandari, H. (2018). "Investigation of flexural and compressive behavior of fiber-reinforced roller-compacted concrete and its comparison with ordinary roller-compacted concrete". National Conference on Fundamental Research in Civil Engineering, Architecture and Urban Development, Tehran, Iran.
- Fattahpour, M., & Habibi, M. R. (2016). "Investigation of the effect of nano-clay on slump and specific gravity tests of hardened concrete". The 2nd International Conference on Human, Architecture, Civil Engineering and Urban Development, Tabriz, Strategic Center for Architecture and Urban Studies.
- Foroughi Asl, A., Nazarpour, M., & Seyedian Chobi, S. (2014). "Investigation of the effect of sand fineness

## ۷. مشارکت‌های نویسندگان

کلید نویسندگان در تهیه مقاله همکاری داشته‌اند.

## ۸. منابع مالی

این اثر تحت حمایت هیچ سازمان یا مؤسسه‌ای انجام نشده است.

## ۹. تعارض منافع

نویسندگان مقاله اعلام می‌کنند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

## ۱۰. پی‌نوشت‌ها

Rolled Compacted Concrete Pavement  
Roller Compacted Concrete  
Particle Swarm Optimization  
Multiple Nonlinear Regression  
Root Mean Squared Error  
Mean Absolute Error  
Partial Dependence Plots

- modulus correction on the performance of self-compacting concrete". The 8th National Congress on Civil Engineering, Ba7bol, Noshirvani University of Technology.
- Halicka, A., Ogrodnik, P., & Zegardlo, B. (2013). "Using ceramic sanitary ware waste as concrete aggregate". *Constr. Build. Mater.*, 48: 295–305.
- Heydari, K., & Mardookhpour, A. R. (2019). "Use of rice husk ash and microsilica combination to experimentally investigate the mechanical properties of roller-compacted concrete pavement (RCCP)". The 6th National Conference on Applied Research in Civil Engineering, Architecture and Urban Management, Tehran, K. N. Toosi University of Technology.
- Hassanzadeh, M., Chelavi, Gh., & Abroomand, M. (2019). "Use of ceramic waste as a partial replacement of cement in roller-compacted concrete pavement". The 4th National Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Development, Shirvan, *Payashahr Scientific Journal & Rahjuyan Payaye Shahr-e Atrak Research Institute*.
- Kazemi, R., Keshmiri, A. R., & Eslamloo, M. H. (2018). "Effect of optimum moisture on durability of zero-slump concrete". The 10th National Concrete Conference, Tehran, Concrete Society of Iran.
- Lakzadeh, M., Manzari Tavakoli, M., & Naghdi, M. M. (2018). "Study of the effect of using natural pozzolans on mechanical properties of roller-compacted concretes". The 3rd International Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Design, Tabriz, Meead University in cooperation with Tabriz Islamic Art University, Kharazmi University, Shahrekord University.
- Mahmoudi, A., & Pahlavani, D. (2017). "Investigation of the effect of compaction energy on compressive strength of roller-compacted concrete with different gradations and water-cement ratios". International Conference on New Trends in Urban Management, Civil Engineering and Technology & Civil Engineering in Modern Architecture, Dubai, UAE, Research Institute of Art and Media, Institute of Culture and Arts.
- Mahendra, K., Ravitheja, A., Bommisetty, J., & Keertan, T. S. (2019). "Effect of waste ceramic tiles as a partial replacement of aggregates in concrete". *Mater. Today: Proceedings*.
- Medina, C., De Rojas, M. I., & Frías, M. (2012). "Microstructure and properties of recycled concretes using ceramic sanitary ware industry waste as coarse aggregate". *Constr. Build. Mater.*, 31: 112–118.
- Miri, M., & Ali Ahmad, M. (2017). "Investigation of the effect of pozzolan on properties of roller-compacted road pavement concrete". International Conference on Contemporary Iranian Civil Engineering, Architecture and Urban Development, Tehran, Osveh University.
- National Building Regulations Office, Iranian National Building Code, Section 8: Design and Construction of Masonry Buildings. (2013). Tehran: Tose-e Iran Publishing, (2nd ed.).
- Rezaei, M., Vahdani, M., Mirahmadi, R., & Ansari, M. (2017). "Effect of ceramic replacement ratio on mechanical properties and durability of recycled concretes". The 5th International Congress on Civil Engineering, Architecture and Urban Development, Tehran, Shahid Beheshti University.
- Raiesi, M., & Abazari, N. (2016). "Investigation of the effect of zeolite and microsilica combination on physical, mechanical and durability properties of self-compacting concrete in sulfate environment". Master's thesis, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Najafabad Branch.
- Sadrmomtazi, A., & Noroullahi, Z. (2015). "Investigation of the effect of cement replacement with zeolite on rheological and mechanical properties of self-compacting mortars". The 7th Annual National Concrete Conference, Tehran, Concrete Society of Iran.
- Shahrabadi, H. (2015). "Comparison of water absorption and permeability of concretes containing marble aggregates in marine and tidal environments". International Conference on New Research Achievements in Civil Engineering, Architecture and Urban Development, Tehran, Nikan Institute of Higher Education & University of Tehran.
- Shamsaei, M., & Aghayan, I. (2016). "Experimental investigation of the effect of aggregate type on compressive strength of roller-compacted concrete pavement". The 4th Conference on Applied Research in Civil Engineering, Architecture and Urban Management, Tehran, K. N. Toosi University of Technology.
- Shirvani, M., & Dashti Rahmatabadi, M. A. (2017). "Introduction to roller-compacted concrete and investigation of its properties in road pavement". The 5th International Congress on Civil Engineering, Architecture and Urban Development, Tehran, Conference Permanent Secretariat.
- Shiri Benmar, M., & Pirmohammadi Alishah, F. (2018). "Investigation of concrete properties containing crushed brick ceramic waste as partial replacement of sand". The 1st International Congress on Construction Industry with a Focus on New Technologies in the Construction Industry, Tabriz, East Azerbaijan Young Engineers Association.
- Soleymani, M., & Aghayan, I. (2018). "Experimental evaluation of using ceramic waste in roller-compacted concrete pavement mixtures". The 3rd International Conference & 7th National Conference on New Materials and Structures in Civil Engineering, Hamedan, Bu-Ali Sina University.

- Tavakoli, S., Heydari, A., Moghimi, M. N., & Nilforoushan, M. R. (2013). "Evaluation of the effect of using ceramic powder and waste brick along with nano-silica to produce high-strength concrete, a step towards waste management and reducing environmental impacts of cement production". National Conference on Nanotechnology: Advantages and Applications, Hamedan, Hegmataneh Environmental Assessors Association.
- Vice Presidency for Strategic Planning and Supervision, Ministry of Roads and Transportation, "Guidelines for Design and Construction of Roller-Compacted Concrete in Road Pavements of Iran". (2009), Publication No. 354, Tehran: Transportation Research Institute.