



University Of Qom



Innovative Approach to Sustainable Construction: Utilization of Refined Travertine Processing By-products as Partial Cement Replacement in Eco-friendly Concrete

Pedram Hosseini^{1✉}, Ali Naghian², Amir Abedi³

1. Corresponding author, Faculty of Engineering, Mahallat Institute of Higher Education, Mahallat, Iran. E-mail: P.hosseini@mahallat.ac.ir
2. Faculty of Engineering, Mahallat Institute of Higher Education, Mahallat, Iran. E-mail: a_naghian78@yahoo.com
3. Faculty of Engineering, Mahallat Institute of Higher Education, Mahallat, Iran. E-mail: amir.abedi080@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 18 Dec 2024
Revised 25 May 2025
Accepted 30 May 2025
Published 31 May 2025

Keywords:
Travertine Waste,
Cement Replacement,
Green Concrete,
Mechanical Properties,
Concrete Durability.

ABSTRACT

The construction industry faces significant environmental challenges, with cement production being a major contributor to global CO₂ emissions, while the stone processing industry generates substantial waste material, particularly travertine sludge, creating disposal problems and environmental hazards. This research investigates the potential of Refined Travertine Waste Material (RTWM) as a partial cement replacement in concrete production, with various mixtures prepared using 0% to 50% RTWM replacing cement by mass, and evaluating their mechanical properties and durability characteristics through comprehensive testing at 7, 28, and 90 days. Results demonstrate that RTWM can effectively replace up to 40% of cement without significant strength loss, with optimal performance observed in the 35-40% substitution range, attributed to physical filling effects, improved particle packing, and limited chemical interactions within the cementitious matrix. Water permeability decreased consistently with increasing RTWM content, indicating enhanced durability, and statistical analysis confirmed these findings with regression models providing reliable strength prediction tools. Environmental assessment revealed that optimal RTWM incorporation could reduce CO₂ emissions by up to 32% and energy consumption by approximately 25% in concrete production while maintaining or improving key performance characteristics.

Cite this article: Hosseini P, Naghian A, Abedi A. Innovative Approach to Sustainable Construction: Utilization of Refined Travertine Processing By-products as Partial Cement Replacement in Eco-friendly Concrete. Civil Infrastructure Researches. 2025; 11(1): 105-125. <https://doi.org/10.22091/cer.2025.11940.1588>



Introduction

The construction industry faces dual environmental challenges: cement production contributes approximately 7% of global CO₂ emissions, while the stone processing industry generates substantial waste, particularly travertine sludge. This research investigates the potential of Refined Travertine Waste Material (RTWM) as a partial cement replacement in concrete production. Travertine waste, primarily composed of calcium carbonate (CaCO₃), presents unique opportunities for sustainable construction due to its fine particle size and chemical composition. Unlike previous studies limited to 20% replacement with stone waste, this research explores higher replacement levels up to 50%.

Methodology

Ten concrete mixtures were prepared with RTWM replacing cement at 0%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 45%, and 50% by weight. Mix designs followed ACI 211 guidelines targeting 40 MPa characteristic strength. Comprehensive testing included compressive strength (ASTM C39), flexural strength (ASTM C78), and water permeability (BS EN 12390-8) at 7, 28, and 90 days. Statistical analysis employed box plots, heat maps, and regression models to evaluate performance trends. A total of 210 specimens were tested to ensure statistical reliability.

Results and Discussion

Compressive strength results demonstrated optimal performance at 35-40% RTWM replacement, with 90-day strength comparable to control mix. The 40% replacement mix achieved 14.7% strength increase compared to control. Flexural strength followed similar trends, maintaining acceptable values up to 40% replacement. Water permeability decreased by 65% at 40% RTWM content, indicating enhanced durability. Regression analysis revealed quadratic relationships between RTWM content and mechanical properties ($R^2 > 0.85$). The mechanism involves both physical (filler effect, improved particle packing) and limited

chemical interactions between RTWM and cement hydration products.

Conclusion

RTWM can effectively replace up to 40% cement without compromising concrete performance. Environmental assessment indicates 32.2% reduction in CO₂ emissions and 24.8% decrease in energy consumption at optimal replacement level. Economic analysis shows 22% cost reduction compared to conventional concrete. This research demonstrates RTWM's viability as a sustainable cementitious material, contributing to circular economy principles in construction while maintaining structural integrity and durability.

Funding Statement

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Declaration of Competing Interest

■ **No competing interests:** The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Authors' Contributions

Pedram Hosseini:

Conceptualization; Data curation; Formal analysis; Investigation; Methodology; Project administration; Resources; Software; Supervision; Validation; Visualization; Roles/Writing– original draft; Writing– review & editing.

Ali Naghian:

Data curation; Investigation; Validation; original draft.

Amir Abedi:

Data curation; Investigation; Validation.

رویکردی نوین در ساخت و ساز پایدار: استفاده از پسماندهای فرآوری شده تراورتن به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در بتن سازگار با محیط زیست

پدرام حسینی^۱، علی نقیان^۲، امیر عابدی^۳

۱. نویسنده مسئول، دانشکده مهندسی، مرکز آموزش عالی محلات، محلات، ایران. رایانامه: P.hosseini@mahallat.ac.ir

۲. دانشکده مهندسی، مرکز آموزش عالی محلات، محلات، ایران. رایانامه: a_naghian78@yahoo.com

۳. دانشکده مهندسی، مرکز آموزش عالی محلات، محلات، ایران. رایانامه: amir.abedi080@gmail.com

چکیده

صنعت ساخت و ساز با چالش‌های زیست محیطی قابل توجهی روبرو است، با تولید سیمان به عنوان یک منبع اصلی انتشار CO_2 ، در حالی که صنعت سنگ نیز حجم قابل توجهی ضایعات، به ویژه لجن تراورتن، تولید می‌کند که مشکلات دفع و خطرات زیست محیطی ایجاد می‌نماید. این پژوهش به بررسی پتانسیل پسماندهای فرآوری شده تراورتن (RTWM) به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در تولید بتن می‌پردازد، با تهیه مخلوط‌های مختلف بتن با جایگزینی RTWM به میزان صفر تا ۵۰٪ وزن سیمان و ارزیابی خواص مکانیکی و دوام آن‌ها از طریق آزمایش‌های جامع در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز. نتایج نشان می‌دهد که RTWM می‌تواند تا ۴۰٪ سیمان را بدون کاهش قابل توجه مقاومت جایگزین کند، با عملکرد بهینه در محدوده جایگزینی ۳۵-۴۰٪، که به دلیل اثرات فیزیکی پرکنندگی، بهبود بسته‌بندی ذرات و واکنش‌های شیمیایی محدود RTWM در ماتریس سیمانی است. نفوذپذیری آب با افزایش محتوای RTWM به طور مداوم کاهش یافت که نشان‌دهنده بهبود دوام است، و تحلیل آماری این یافته‌ها را تأیید کرد و مدل‌های رگرسیون ابزارهای قابل اعتمادی برای پیش‌بینی مقاومت ارائه دادند. ارزیابی زیست محیطی نشان داد که استفاده بهینه از RTWM می‌تواند انتشار CO_2 را تا ۳۲٪ و مصرف انرژی را حدود ۲۵٪ در تولید بتن کاهش دهد، در حالی که ویژگی‌های عملکردی کلیدی را حفظ یا بهبود می‌بخشد.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۹

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۳/۱۰

کلیدواژه‌ها:

ضایعات تراورتن،

جایگزین سیمان،

بتن سبز،

بتن سبز،

دوام بتن.

استناد: حسینی پدرام، نقیان علی، عابدی امیر. رویکردی نوین در ساخت و ساز پایدار: استفاده از پسماندهای فرآوری شده تراورتن به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در بتن سازگار با محیط زیست. *پژوهش‌های زیرساخت‌های عمرانی*. ۱۴۰۴؛ ۱۱(۱): ۱۰۵-۱۲۵.

<https://doi.org/10.22091/cer.2025.11940.1588>

۱- مقدمه

امر علاوه بر آلودگی خاک و منابع آب، خطرات بهداشتی جدی برای ساکنان مناطق مجاور ایجاد می‌کند [۱۱].

آنالیز شیمیایی نشان می‌دهد که لجن تراورتن عمدتاً از کربنات کلسیم (CaCO_3) با مقادیر کمی ناخالصی مانند سیلیس و آلومینا تشکیل شده است [۱۱]. محتوای بالای کلسیم و اندازه ذرات ریز لجن تراورتن، این ماده را به گزینه‌ای مناسب برای استفاده به عنوان جایگزین بخشی از سیمان و ماده پرکننده در بتن تبدیل می‌کند [۱۲]. البته وجود ناخالصی‌های آلی در لجن، فرآیند تصفیه را برای استفاده در تولید بتن ضروری می‌سازد.

مطالعات پیشین در زمینه استفاده از پودر سنگ آهک و گرد مرمر، که ترکیبات شیمیایی مشابهی با لجن تراورتن دارند، نتایج امیدوارکننده‌ای در بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن نشان داده‌اند [۱۳-۱۵]. با این وجود، استفاده از لجن تراورتن به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در بتن به طور جامع مورد بررسی قرار نگرفته و مطالعات موجود عمدتاً محدود به بررسی اثرات سطوح پایین جایگزینی (تا ۲۰٪) بر خواص بتن بوده‌اند [۱۶ و ۱۷].

امروزه با افزایش تولید ضایعات صنعتی و تشدید پدیده گرمایش جهانی، یافتن مصالح ساختمانی پایدار و سازگار با محیط زیست به یکی از مهم‌ترین چالش‌های جوامع تبدیل شده است. پژوهشگران مهندسی عمران تلاش‌های گسترده‌ای را برای استفاده از ضایعات صنعتی و شهری در تولید بتن آغاز کرده‌اند تا ضمن کاهش اثرات زیست محیطی، خواص مهندسی بتن را نیز بهبود بخشند. در این راستا، استفاده از موادی مانند خاکستر ضایعات چوب [۱۸]، خرده آسفالت بازیافتی و نانوسیلیس [۱۹]، ضایعات مرمر [۲۰] و پلاستیک‌های بازیافتی [۲۱-۲۳] مورد مطالعه قرار گرفته است.

همچنین شمسی و همکاران [۲۴] امکان استفاده از اسکوریا در بتن خودتراکم ژئوپلیمری را بررسی نموده و نشان دادند که با انتخاب میزان بهینه مواد فعال‌کننده، می‌توان بتنی با خواص مطلوب و سازگار با محیط زیست تولید نمود.

امروزه صنعت ساخت و ساز با چالش‌های زیست محیطی متعددی روبرو است که در این میان، تولید سیمان به عنوان یکی از عوامل اصلی انتشار گازهای گلخانه‌ای، سهم قابل توجهی از انتشار جهانی CO_2 را به خود اختصاص می‌دهد [۱ و ۲]. مطالعات نشان می‌دهد که تولید هر تن سیمان پرتلند، حدود یک تن CO_2 منتشر می‌کند که این میزان حدود ۷ درصد از کل انتشار گازهای گلخانه‌ای جهان را شامل می‌شود. همزمان، صنعت فرآوری سنگ با تولید حجم قابل توجهی ضایعات، چالش‌های دفع و نگرانی‌های زیست محیطی جدی را ایجاد کرده است [۳].

در سال‌های اخیر، پژوهشگران رویکردهای مختلفی را برای کاهش اثرات زیست محیطی صنعت ساخت و ساز مورد بررسی قرار داده‌اند. یکی از امیدوارکننده‌ترین این رویکردها، استفاده از مواد ضایعاتی و محصولات جانبی به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در تولید بتن است [۴-۶]. شاه حسینی و همکاران [۷] تأثیر ژئولیت حرارت دیده را بر خواص مقاومتی و دوام بتن بررسی کرده و نشان دادند که این ماده پوزولانی می‌تواند مقاومت بتن در محیط‌های مخرب را افزایش دهد. تحقیقات پیشین استفاده از مواد سیمانی مکمل در بتن خودتراکم را برای بهبود خواص آن مورد بررسی قرار داده‌اند [۸]. این رویکرد نه تنها به کاهش اثرات زیست محیطی تولید سیمان کمک می‌کند، بلکه مسائل مربوط به مدیریت و دفع ضایعات را نیز مورد توجه قرار می‌دهد.

تراورتن، به عنوان یکی از پرمصرف‌ترین سنگ‌های ساختمانی، نوعی سنگ آهک است که توسط چشمه‌های معدنی تشکیل می‌شود و به دلیل جذابیت ظاهری، دوام و مقاومت مطلوب، به طور گسترده در صنعت ساختمان و تزئینات مورد استفاده قرار می‌گیرد [۹ و ۱۰]. با این حال، فرآیند برش و پردازش این سنگ، مقادیر قابل توجهی پودر ریز و لجن تولید می‌کند که عمدتاً در محل‌های دفن زباله یا مناطق اطراف کارخانه‌های سنگبری تخلیه می‌شوند. این

الزامات استاندارد بوده و برای استفاده در این پژوهش مناسب است.

۲-۱-۲- سنگدانه‌ها

ماسه طبیعی رودخانه‌ای به عنوان سنگدانه ریز مطابق با استاندارد ASTM C33 و شن شکسته به عنوان سنگدانه درشت مورد استفاده قرار گرفت [۲۶]. مشخصات فیزیکی سنگدانه‌ها شامل وزن مخصوص، مدول نرمی، حداکثر اندازه اسمی، چگالی توده‌ای و درصد جذب آب در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین نتایج آزمایش دانه‌بندی سنگدانه‌های ریز و درشت در شکل ۲ نشان داده شده است. منحنی‌های دانه‌بندی نشان می‌دهند که هر دو نوع سنگدانه در محدوده مجاز استاندارد ASTM C33 قرار دارند.

۲-۱-۳- پسماند فرآوری شده تراورتن

برای این پژوهش، پسماند تراورتن از کارخانه‌های سنگبری شهرستان محلات در استان مرکزی که یکی از قطب‌های اصلی تولید تراورتن در کشور محسوب می‌شود، تهیه گردید. این پسماند خام که به صورت لجن حاوی ناخالصی‌های آلی بود، طی فرآیند چند مرحله‌ای دقیق (شکل ۳) به پسماند فرآوری شده تراورتن (PTWM) تبدیل شد.

این فرآیند شامل خشک کردن، آسیاب کردن، شستشو برای حذف ناخالصی‌ها، فیلتر کردن، خشک کردن مجدد و الک کردن می‌باشد که منجر به تولید ماده‌ای با توزیع اندازه ذرات مشابه سیمان پرتلند تیپ II (نرمی بلین حدود ۳۱۴۱ سانتی‌متر مربع بر گرم) گردید. ترکیب شیمیایی لجن تراورتن که با استفاده از آزمون XRF تعیین شده، در شکل ۴ ارائه شده است. همچنین به منظور شناسایی فازهای کریستالی موجود در لجن تراورتن، آزمایش XRD انجام شد که نتایج آن در شکل ۵ نمایش داده شده است. نتایج این آزمایش‌ها نشان می‌دهد که ماده حاصل عمدتاً از کربنات کلسیم تشکیل شده و برای استفاده به عنوان ماده سیمانی مکمل در تولید بتن مناسب می‌باشد.

بررسی جامع ادبیات فنی نشان می‌دهد که تاکنون مطالعات محدودی در زمینه استفاده از ضایعات سنگی در بتن انجام شده، اما هیچ مطالعه‌ای به طور خاص به پتانسیل لجن تراورتن به عنوان جایگزین بخشی از سیمان نپرداخته است. بر این اساس، هدف اصلی پژوهش حاضر، بررسی جامع امکان استفاده از پسماندهای فرآوری شده تراورتن (PTWM) به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در تولید بتن است. این پژوهش با تمرکز ویژه بر سطوح بالای جایگزینی (تا ۵۰٪)، که فراتر از محدوده مطالعات پیشین (حداکثر ۲۰٪) است، به دنبال یافتن نقطه بهینه برای دستیابی به عملکرد مطلوب همراه با حداکثر کاهش مصرف سیمان می‌باشد. نوآوری‌های کلیدی این پژوهش شامل موارد زیر است:

- اولین مطالعه در زمینه استفاده از لجن تراورتن به عنوان جایگزین سیمان
- بررسی سطوح بالای جایگزینی (تا ۵۰٪) در حالی که مطالعات مشابه با ضایعات سنگی دیگر محدود به ۲۰٪ بوده‌اند
- ارائه مدل آماری پیش‌بینی خواص مکانیکی
- ارزیابی همزمان خواص مکانیکی، دوام و اثرات زیست محیطی

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد مصرفی

۲-۱-۱- سیمان

در این پژوهش از سیمان پرتلند تیپ II مطابق با استاندارد ASTM C150 استفاده شد [۲۵]. مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی شامل درصد اکسیدهای مختلف و همچنین خواص فیزیکی آن نظیر سطح مخصوص، زمان گیرش و وزن مخصوص در شکل ۱ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که سیمان مورد استفاده مطابق با

¹- Purified Travertine Waste Material

۲-۱-۴- آب

برای حفظ کارایی ثابت (اسلامپ) در تمامی

مخلوطها و نگه داشتن نسبت آب به پودر در مقدار ثابت

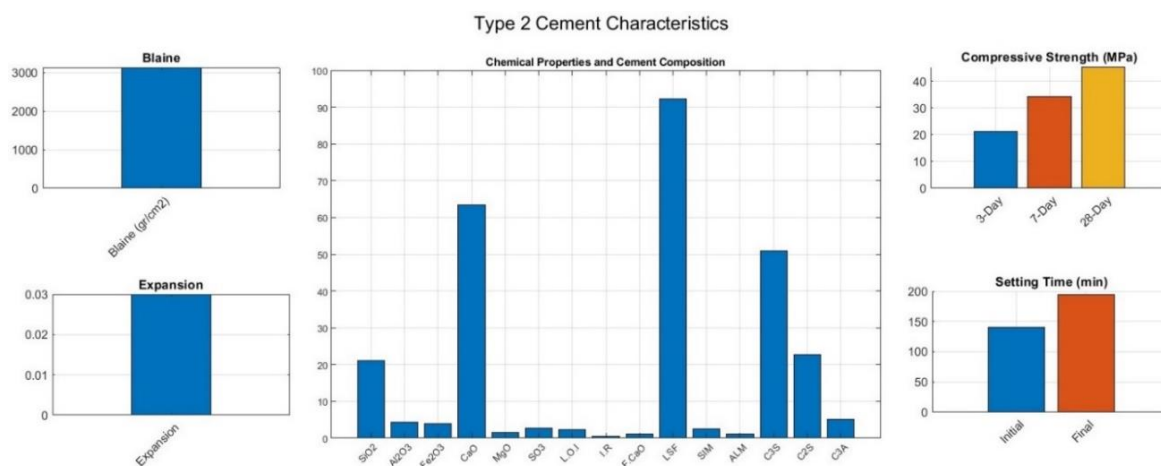
۰/۴۵، از فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلات استفاده

گردید.

از آب آشامیدنی شبکه توزیع محلی برای ساخت و

عمل آوری نمونه های بتنی استفاده شد.

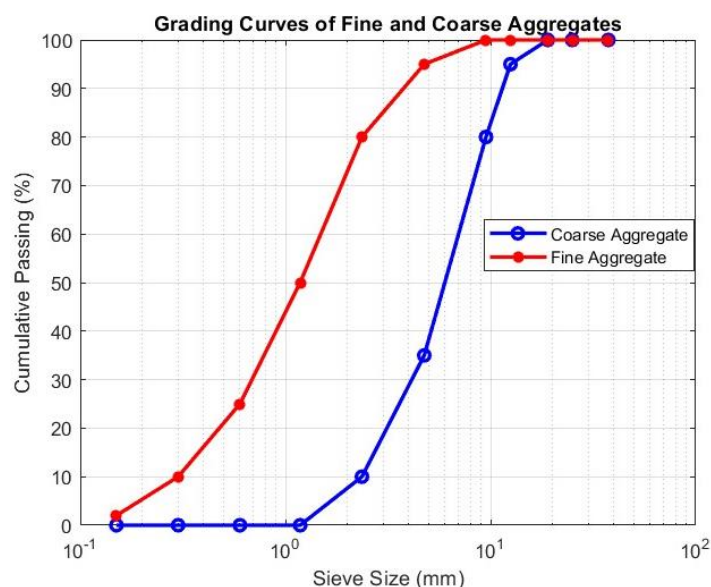
۲-۱-۵- فوق روان کننده



شکل ۱. نمودار مشخصات شیمیایی و فیزیکی سیمان پرتلند تیپ II.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی سنگدانه ها.

مشخصات	ماسه (سنگدانه ریز)	شن (سنگدانه درشت)
وزن مخصوص	2.60	2/65
مدول نرمی	2.7	-
حداکثر اندازه اسمی	-	25 میلی متر
چگالی توده ای (kg/m ³)	1600	1550
جذب آب (%)	1.2	0/8



شکل ۲. منحنی های دانه بندی سنگدانه های ریز و درشت.

۲-۲- طرح اختلاط و آماده‌سازی نمونه‌ها

برای آزمایش مقاومت فشاری: نمونه‌های مکعبی $150 \times 150 \times 150$ میلی‌متر در قالب‌های فولادی ریخته شده و با استفاده از میز ویبره به مدت ۳۰ ثانیه متراکم شدند. پس از ۲۴ ساعت، نمونه‌ها از قالب خارج و تا زمان آزمایش در حوضچه آب با دمای 23 ± 2 درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند.

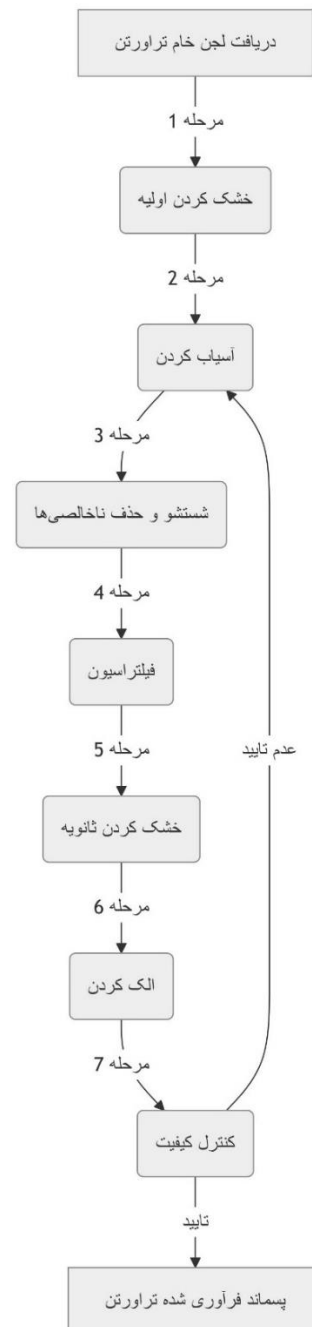
برای آزمایش مقاومت خمشی: نمونه‌های تیری $100 \times 100 \times 500$ میلی‌متر در قالب‌های فولادی ریخته شده و با استفاده از میز ویبره به مدت ۴۵ ثانیه متراکم شدند. پس از ۲۴ ساعت، نمونه‌ها از قالب خارج و تا زمان آزمایش در حوضچه آب نگهداری شدند.

برای آزمایش نفوذپذیری آب: نمونه‌های مکعبی $200 \times 200 \times 120$ میلی‌متر در قالب‌های فولادی ریخته شده و با استفاده از میز ویبره به مدت ۶۰ ثانیه متراکم شدند. پس از ۲۴ ساعت، نمونه‌ها از قالب خارج و به مدت ۲۸ روز در حوضچه آب نگهداری شدند. سپس نمونه‌ها به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد خشک شده و قبل از آزمایش به دمای محیط رسانده شدند.

در این پژوهش، ۱۰ طرح اختلاط بتن با جایگزینی پسماند فرآوری شده تراورتن (PTWM) به میزان صفر، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵ و ۵۰٪ وزن سیمان تهیه شد. طرح‌های اختلاط مطابق با دستورالعمل ACI 211 و با هدف دستیابی به مقاومت فشاری مشخصه ۴۰ مگاپاسکال در سن ۲۸ روز طراحی شدند [۲۷]. توزیع انواع نمونه‌های آزمایشگاهی و تعداد آنها در شکل ۶ و جزئیات طرح‌های اختلاط در شکل ۷ ارائه شده است.

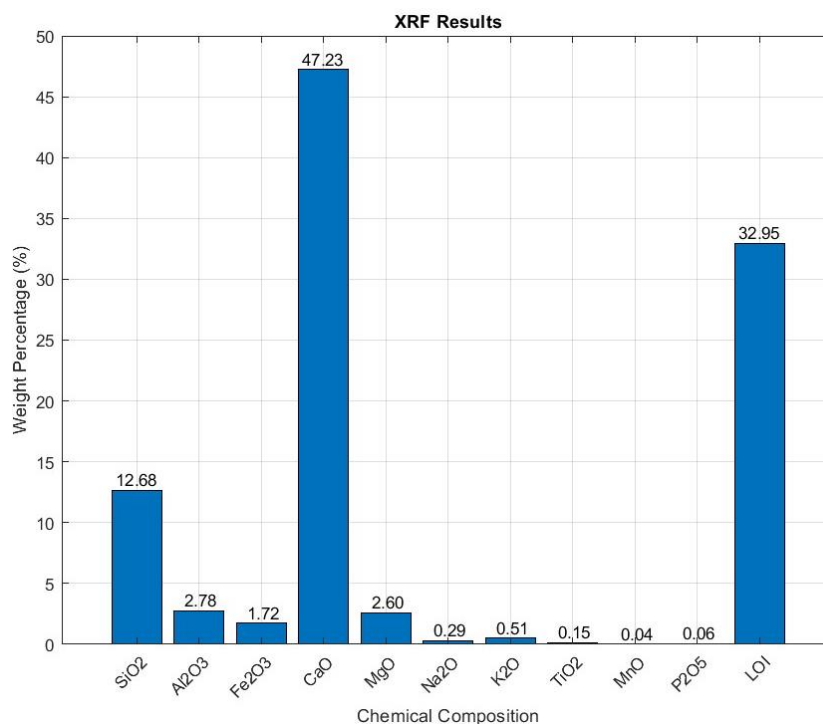
برای ساخت نمونه‌های بتنی از یک مخلوط‌کن آزمایشگاهی با ظرفیت ۵۰ لیتر استفاده شد. فرآیند اختلاط شامل مخلوط کردن خشک سیمان، PTWM (در صورت وجود) و سنگدانه‌ها به مدت ۲ دقیقه، سپس افزودن آب و فوق روان‌کننده و ادامه اختلاط به مدت ۳ دقیقه اضافی بود. کارایی بتن تازه با استفاده از آزمایش اسلامپ مطابق با استاندارد ASTM C143 ارزیابی شد [۲۸]. محدوده اسلامپ مجاز برای این مطالعه بین ۵۰ تا ۷۰ میلی‌متر تعیین شد که مطابق با توصیه‌های ACI 211.1-91 برای کاربردهای سازه‌ای مختلف مناسب است [۲۹]. نتایج آزمایش اسلامپ برای هر مخلوط در شکل ۸ نشان داده شده است.

در مطالعات اولیه برای بررسی تأثیر PTWM بر خواص خمیر سیمان، مشخصات فیزیکی سیمان مانند زمان

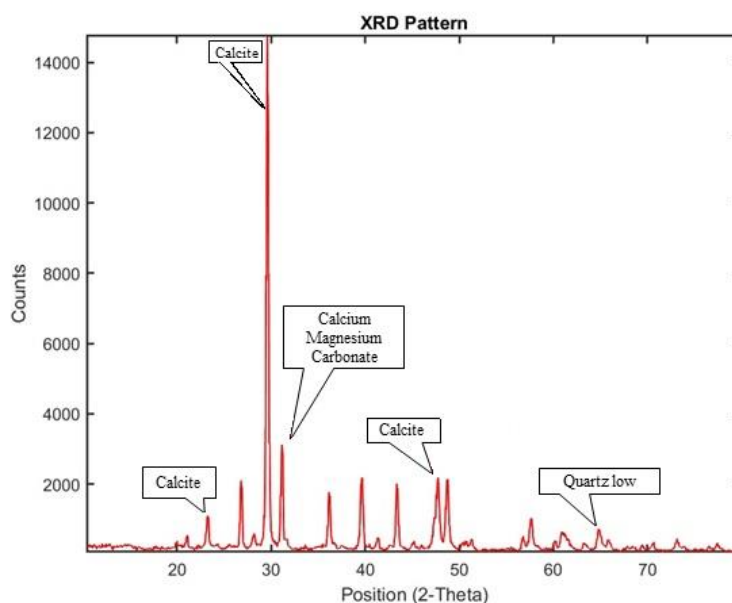


شکل ۳. نمودار جریان فرآیند تولید پسماند فرآوری شده تراورتن (PTWM)

گیرش و روانی خمیر (طبق شکل ۱) به عنوان مبنا در نظر گرفته شد.



شکل ۴. ترکیب شیمیایی لجن تراورتن بر اساس نتایج آنالیز XRF.

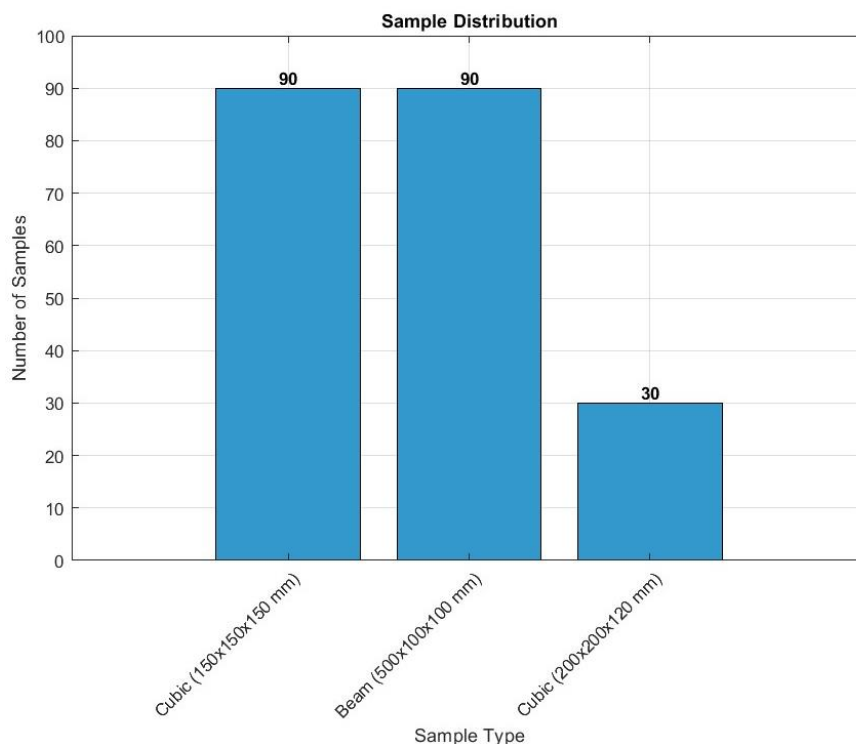


شکل ۵. الگوی پراش اشعه XRD لجن تراورتن

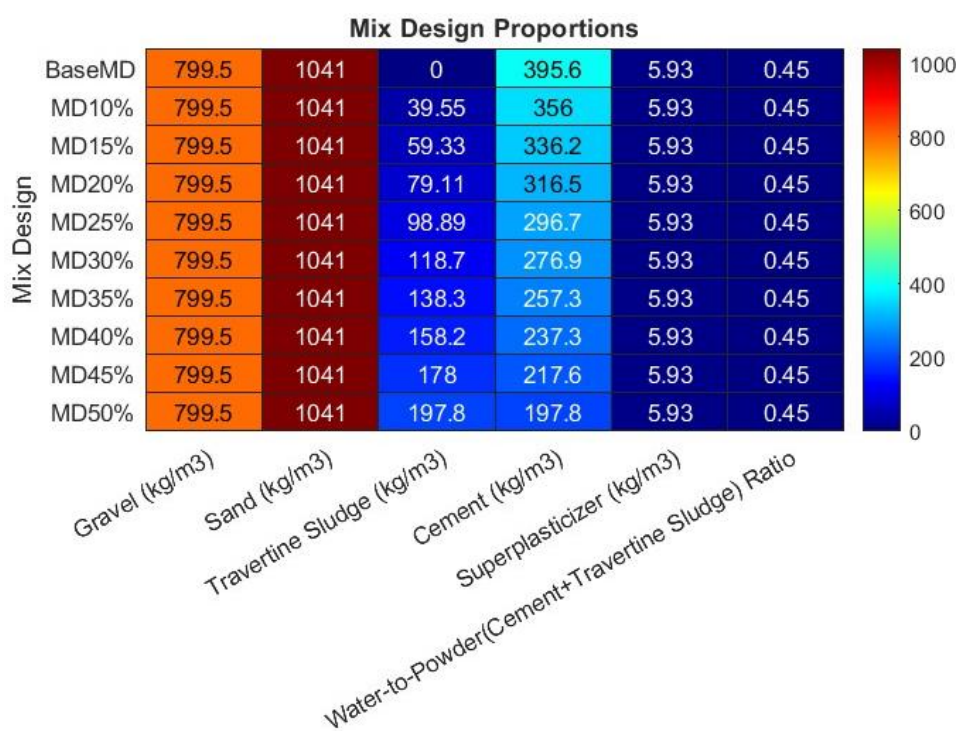
اثر روان کنندگی ذرات ریز PTWM است. این مشاهدات با نتایج آزمایش اسلامپ (شکل ۸) نیز همخوانی دارد. نتایج آزمایش اسلامپ نشان دهنده رابطه پیچیده‌ای بین محتوای PTWM و کارایی بتن است. کاهش اولیه اسلامپ در جایگزینی ۱۰٪ می‌تواند به دلیل افزایش نیاز به

مشاهدات نشان داد که با افزایش میزان PTWM، زمان گیرش اولیه و نهایی نسبت به سیمان خالص افزایش می‌یابد که احتمالاً به دلیل کاهش محتوای سیمان و تأخیر در واکنش‌های هیدراتاسیون است. روانی خمیر سیمان نیز با افزایش میزان PTWM تا ۴۰٪ بهبود یافت که به دلیل

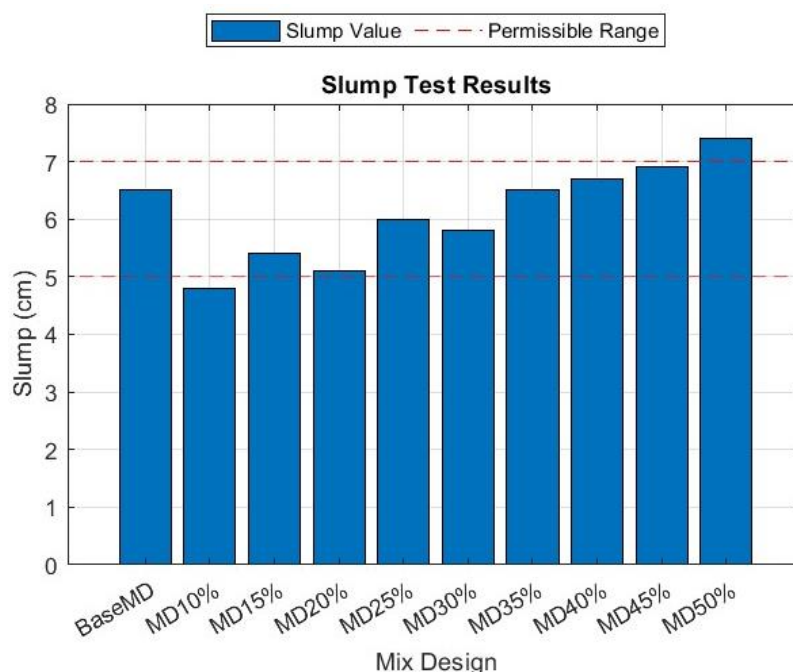
آب و تغییر در برهم کنش ذرات باشد. با افزایش محتوای
PTWM، اثرات مفید بهبود بسته بندی ذرات و تغییر در
سینتیک هیدراتاسیون برجسته تر می شود که منجر به
بهبود کارایی می گردد.



شکل ۶. توزیع انواع و تعداد نمونه های مورد استفاده در پژوهش



شکل ۷. طرح اختلاط مخلوط های بتنی



شکل ۸. نتایج آزمایش اسلامپ برای مخلوط‌های مختلف بتن

شده و اختلاط به مدت سه دقیقه ادامه یافت. پس از یک دقیقه استراحت، اختلاط نهایی به مدت دو دقیقه انجام شد. برای کنترل کیفیت مخلوط‌ها، همگنی ظاهری مخلوط‌ها به صورت چشمی و از طریق آزمایش اسلامپ (شکل ۸) بررسی شد.

- برای انجام آزمایش‌ها، نمونه‌های زیر تهیه شدند:
- نمونه‌های مکعبی $150 \times 150 \times 150$ میلی‌متر برای آزمایش مقاومت فشاری
- نمونه‌های تیری $100 \times 100 \times 500$ میلی‌متر برای آزمایش مقاومت خمشی
- نمونه‌های مکعبی $200 \times 200 \times 120$ میلی‌متر برای آزمایش نفوذپذیری آب

نمونه‌ها در قالب‌های فولادی ریخته و با استفاده از میز ویبره متراکم شدند [۳۱]. سپس با ورق‌های پلاستیکی پوشانده شدند تا از اتلاف رطوبت جلوگیری شود. پس از ۲۴ ساعت، نمونه‌ها از قالب خارج و تا زمان آزمایش در حوضچه آب با دمای 23 ± 2 درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند.

۲-۳- روش‌های آزمایش

همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، در تمامی طرح‌های اختلاط، از جمله مخلوط با ۵۰٪ جایگزینی PTWM، از مقدار ثابت فوق روان‌کننده استفاده شد. با وجود استفاده از فوق روان‌کننده، اسلامپ مخلوط MD50% بالاتر از محدوده مجاز بود که نشان‌دهنده افزایش روانی در سطوح بالای جایگزینی می‌باشد. با این حال، برای حفظ نسبت آب به پودر ثابت (۰/۴۵) در تمامی مخلوط‌ها و امکان مقایسه نتایج، از کاهش میزان آب یا فوق روان‌کننده در این مخلوط خودداری شد. این افزایش روانی را می‌توان به اثر روان‌کنندگی ذرات بسیار ریز PTWM و کاهش اصطکاک داخلی در مخلوط نسبت داد.

برای اطمینان از همگنی و یکنواختی مخلوط‌ها، ابتدا فرآیند فرآوری PTWM با دقت زیاد و طی مراحل متعدد طبق نمودار جریانی شکل ۳ انجام شد. سپس فرآیند اختلاط مطابق با استاندارد ASTM C192 به شرح زیر اجرا گردید [۳۰]. ابتدا سنگدانه‌های درشت و ریز به مدت ۳۰ ثانیه در مخلوط‌کن خشک مخلوط شدند. سپس سیمان و PTWM (طبق نسبت‌های نشان داده شده در شکل ۷) اضافه شده و به مدت یک دقیقه دیگر مخلوط شدند. پس از آن، آب و فوق روان‌کننده به تدریج طی ۳۰ ثانیه اضافه

اختلاط در هر سن، سه نمونه تیری با استفاده از دستگاه آزمایش مقاومت خمشی و با نرخ بارگذاری ۰/۰۲ میلی‌متر بر ثانیه مورد آزمایش قرار گرفت. میانگین مقاومت خمشی سه نمونه به عنوان نتیجه نهایی برای هر طرح اختلاط گزارش شد.

۲-۳-۳- نفوذپذیری آب

نفوذپذیری آب نمونه‌های بتنی در سن ۲۸ روز مطابق با استاندارد BS EN 12390-8 ارزیابی شد [۳۴]. راهبردهای مدیریت مناسب ضایعات در صنعت ساخت و ساز برای به حداقل رساندن اثرات زیست محیطی و مالی ضروری است [۳۵]. برای هر طرح اختلاط، سه نمونه مکعبی تحت فشار آب ۵ بار به مدت ۷۲ ساعت قرار گرفتند. پس از آزمایش، نمونه‌ها از وسط شکافته شدند و حداکثر عمق نفوذ آب در سه نقطه در امتداد سطح شکست اندازه‌گیری شد. میانگین عمق نفوذ آب سه نمونه به عنوان نتیجه نهایی برای هر طرح اختلاط گزارش شد.

۲-۳-۴- آزمایش اسلامپ

آزمایش اسلامپ مطابق با استاندارد ASTM C143 برای اطمینان از کارایی یکنواخت انجام شد [۲۸].

۲-۳-۵- تحلیل آماری

روش‌های آماری برای تحلیل داده‌های مقاومت فشاری بتن در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز به کار گرفته شد. از نمودارهای جعبه‌ای برای نمایش توزیع مقادیر مقاومت برای هر مخلوط استفاده شد. برای کمی‌سازی تفاوت‌های نسبی بین مخلوط‌ها، مقایسه جفتی انجام و نتایج به صورت نقشه حرارتی ارائه شد.

علاوه بر این، تحلیل رگرسیون برای مدل‌سازی رابطه بین سطوح جایگزینی PTWM و مقاومت فشاری در سنین مختلف انجام شد. مدل‌های رگرسیون درجه دوم برای در نظر گرفتن روابط غیرخطی احتمالی به داده‌ها برازش شد. ضریب تعیین (R-squared) برای ارزیابی نیکویی برازش مدل‌های رگرسیون محاسبه گردید.

برای اطمینان از تکرارپذیری نتایج، همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، تمامی آزمایش‌ها حداقل بر روی سه نمونه مشابه انجام شد و میانگین نتایج به همراه انحراف معیار گزارش گردید. نمودارهای جعبه‌ای در شکل‌های ۱۰، ۱۳ و ۱۶ نشان‌دهنده توزیع مقادیر اندازه‌گیری شده برای هر طرح اختلاط است. در مواردی که انحراف معیار بیش از ۱۰٪ میانگین بود، آزمایش مجدداً تکرار شد. تمامی آزمایش‌ها در شرایط یکسان آزمایشگاهی (دما 23 ± 2 درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی 55 ± 5 ٪) انجام شد تا اثر شرایط محیطی بر نتایج به حداقل برسد.

در این مطالعه، مجموعاً ۲۱۰ نمونه آزمایشی (۹۰ نمونه مکعبی برای مقاومت فشاری، ۹۰ نمونه تیری برای مقاومت خمشی و ۳۰ نمونه مکعبی برای نفوذپذیری آب، طبق شکل ۶) برای ۱۰ طرح اختلاط مختلف و در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز مورد آزمایش قرار گرفت. همچنین، تحلیل‌های آماری پیشرفته شامل نمودارهای جعبه‌ای، نقشه‌های حرارتی تفاوت‌های نسبی و مدل‌های رگرسیون برای درک بهتر روابط بین پارامترها انجام شد. این حجم از داده‌ها برای ارزیابی جامع امکان استفاده از PTWM به عنوان جایگزین بخشی از سیمان کافی بوده و اعتبار نتایج را تضمین می‌کند.

۲-۳-۱- مقاومت فشاری

مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز مطابق با استاندارد ASTM C39 تعیین شد [۳۲]. برای هر طرح اختلاط در هر سن، سه نمونه مکعبی با استفاده از دستگاه آزمایش مقاومت فشاری و با نرخ بارگذاری ۲۵/۰ مگاپاسکال بر ثانیه مورد آزمایش قرار گرفت. میانگین مقاومت فشاری سه نمونه به عنوان نتیجه نهایی برای هر طرح اختلاط گزارش شد.

۲-۳-۲- مقاومت خمشی

مقاومت خمشی نمونه‌های بتنی در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز با استفاده از آزمایش خمش سه نقطه‌ای مطابق با استاندارد ASTM C78 ارزیابی شد [۳۳]. برای هر طرح

مقاومت فشاری به عنوان مهم‌ترین پارامتر در ارزیابی عملکرد بتن، اولین خاصیت مورد بررسی در این پژوهش بود. نتایج آزمایش مقاومت فشاری برای ده طرح اختلاط مختلف در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز در شکل ۹ ارائه شده است. استفاده از پسماند تراورتن به عنوان جایگزین بخشی از سیمان تأثیر قابل توجهی بر روند توسعه مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی داشته است.

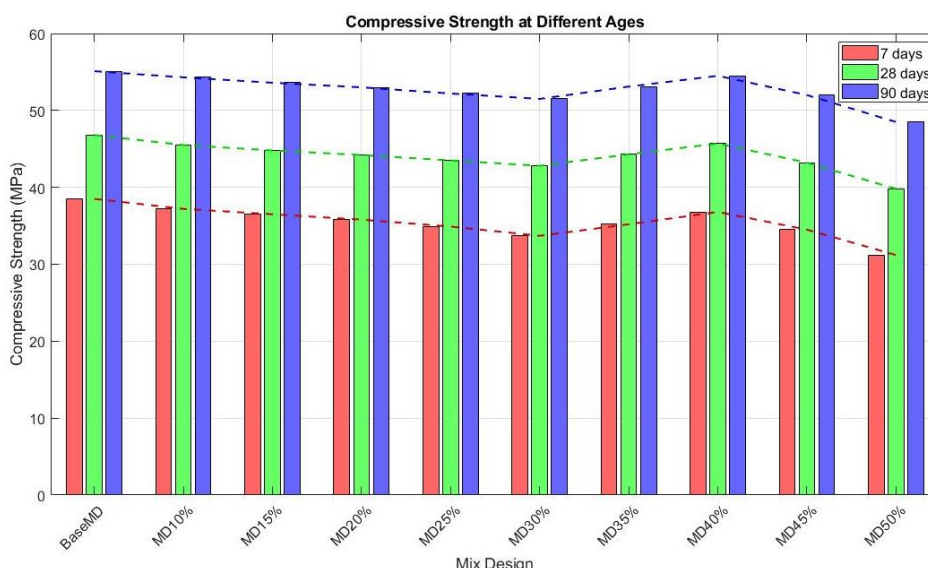
شکل ۹ نتایج مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی حاوی درصد‌های مختلف پسماند فرآوری شده تراورتن (PTWM) را در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز نشان می‌دهد. مخلوط شاهد (BaseMD) که فاقد PTWM است، به عنوان مرجع برای مقایسه عملکرد سایر مخلوط‌ها مورد استفاده قرار گرفته است.

این رویکرد امکان ارزیابی جامع الگوهای توسعه مقاومت و عملکرد نسبی سطوح مختلف جایگزینی PTWM در طول زمان را فراهم می‌کند، همچنین مدل‌های پیش‌بینی‌کننده برای مقاومت فشاری براساس محتوای PTWM ارائه می‌دهد.

پس از انجام آزمایش‌های جامع بر روی ۲۱۰ نمونه آزمایشی و جمع‌آوری داده‌های کافی، نتایج حاصل در بخش‌های زیر به تفکیک خواص مکانیکی، دوام و ارزیابی‌های زیست محیطی- اقتصادی ارائه و تحلیل می‌گردد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مقاومت فشاری

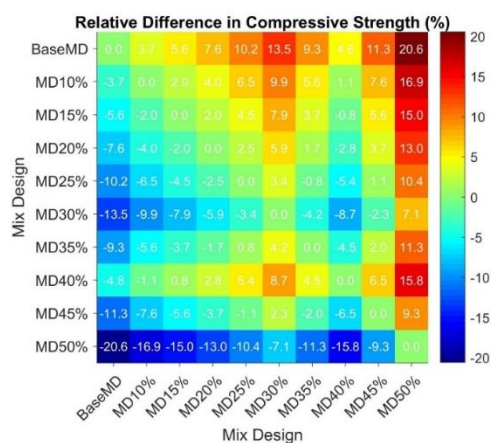
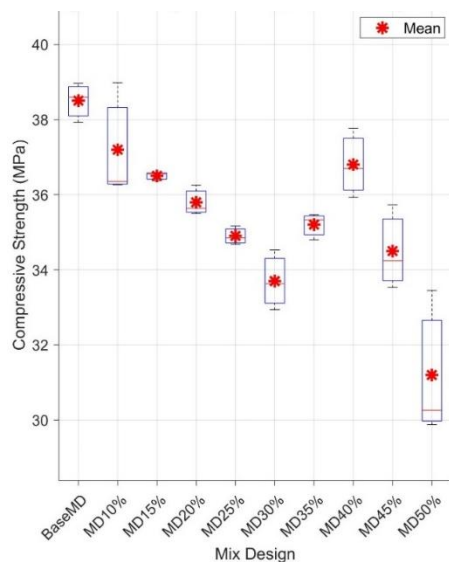


شکل ۹. مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی در سنین مختلف

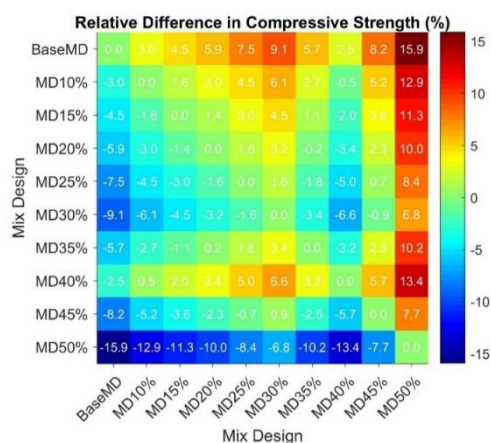
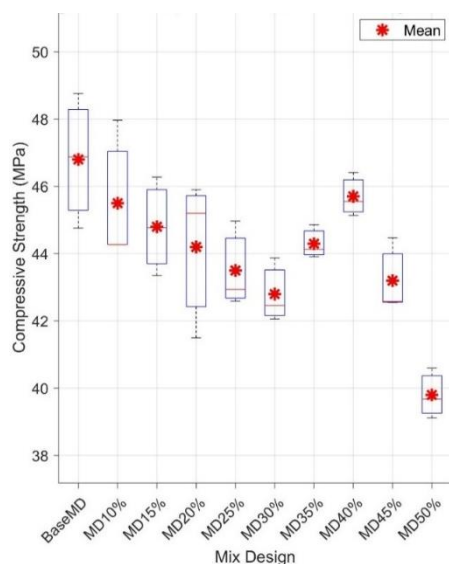
روز در شکل ۱۰ ارائه شده است. همچنین نتایج تحلیل رگرسیون که رابطه بین میزان PTWM و مقاومت فشاری در سنین مختلف را نشان می‌دهد، در شکل ۱۱ نمایش داده شده است.

تحلیل رگرسیون بینش‌های ارزشمندی درباره رابطه بین میزان جایگزینی PTWM و مقاومت فشاری در سنین مختلف ارائه می‌دهد.

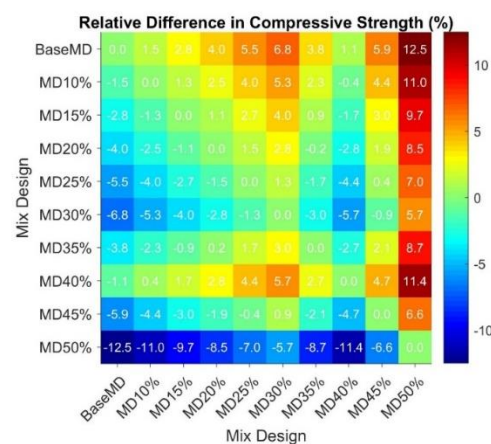
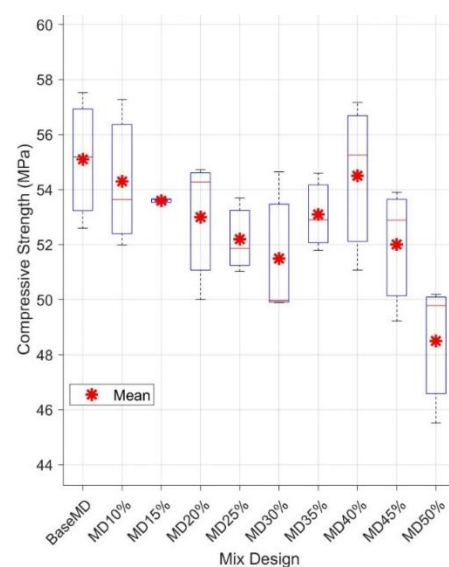
در سن ۷ روز، با افزایش میزان PTWM تا ۳۰٪ جایگزینی، کاهش تدریجی در مقاومت فشاری مشاهده می‌شود. با این حال، افزایش قابل توجهی در مقاومت برای سطوح جایگزینی ۳۵ و ۴۰٪ مشاهده می‌شود، به طوری که مخلوط با ۴۰٪ جایگزینی (MD40%) به مقاومتی نزدیک به مخلوط شاهد دست می‌یابد. در سطوح جایگزینی بالاتر از ۴۰٪، کاهش محسوس‌تری در مقاومت مشاهده می‌شود. تحلیل آماری جامع مقاومت فشاری برای مخلوط‌های بتنی با درصد‌های مختلف PTWM در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰



(الف)

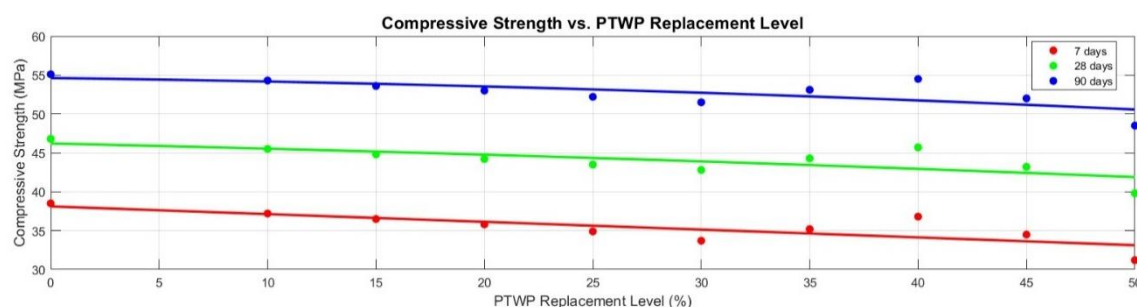


(ب)



(پ)

شکل ۱۰. تحلیل آماری مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی با درصدهای مختلف PTWM در سنین الف (۷ روز، ب) ۲۸ روز و ج) ۹۰ روز



شکل ۱۱. تحلیل رگرسیون چندگانه مقاومت فشاری در برابر درصد جایگزینی PTWM در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز

هیدراتاسیون کافی نبوده و اثرات مثبت پرکنندگی PTWM نمی‌تواند این کمبود را جبران کند.

- توسعه مقاومت بهتر در طول زمان، به ویژه در ۹۰ روز، نشان‌دهنده اثرات تدریجی کربناسیون و واکنش‌های شیمیایی محدود بین PTWM و محصولات هیدراتاسیون سیمان است که منجر به بهبود ریزساختار ماتریس می‌شود [۱۳].

تحلیل جامع نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و نفوذپذیری آب (به ترتیب در شکل‌های ۹، ۱۲ و ۱۵) در کنار بررسی ترکیب شیمیایی و ساختار کریستالی PTWM (شکل‌های ۴ و ۵)، نشان می‌دهد که مکانیزم عملکرد این ماده در بتن، ترکیبی از اثرات فیزیکی و شیمیایی است که در ادامه تشریح می‌گردد. از نظر فیزیکی، ذرات ریز PTWM (با نرمی بلین حدود ۳۱۴۱ سانتی‌متر مربع بر گرم، تقریباً مشابه با سیمان) به عنوان پرکننده عمل کرده و فضاهای خالی بین ذرات سیمان را پر می‌کنند. این عمل باعث افزایش تراکم ماتریس سیمانی و کاهش نفوذپذیری می‌شود که به وضوح در شکل ۱۵ مشهود است. همچنین، از نظر شیمیایی، کربنات کلسیم موجود در PTWM (که طبق شکل ۵ فاز غالب آن کلسیت است) می‌تواند با فاز آلومینات سیمان (C_3A) واکنش داده

مدل‌ها نشان‌دهنده کاهش کلی مقاومت با افزایش محتوای PTWM هستند، اما این روند در سنین مختلف متفاوت است. مقادیر بالای ضریب تعیین (R-squared) نشان می‌دهد که مدل‌ها برازش خوبی با داده‌ها دارند و بخش قابل توجهی از تغییرات مقاومت فشاری را توضیح می‌دهند.

این رفتار را می‌توان به عوامل زیر نسبت داد:

- کاهش اولیه مقاومت (تا ۳۰٪ جایگزینی) احتمالاً به دلیل اثر رقیق‌سازی است، جایی که کاهش محتوای سیمان منجر به تولید محصولات هیدراتاسیون کمتری می‌شود [۴].
- عملکرد بهتر در جایگزینی ۴۰٪ نشان‌دهنده تعادل بهینه بین کاهش سیمان و اثرات فیزیکی و شیمیایی PTWM است. در این سطوح، ذرات ریز PTWM به طور مؤثر فضاهای خالی در ماتریس بتن را پر کرده و باعث بهبود بسته‌بندی ذرات می‌شوند. همچنین، این ذرات می‌توانند به عنوان هسته‌های هتروژن برای تشکیل محصولات هیدراتاسیون عمل کنند [۱۴].
- کاهش قابل توجه مقاومت در جایگزینی بیش از ۴۰٪ نشان می‌دهد که با کاهش بیش از حد محتوای سیمان، میزان کلینکر برای تولید محصولات

منجر به رقیق‌سازی بیش از حد ماتریس و کاهش محصولات هیدراتاسیون می‌شود [۱۳ و ۱۴].

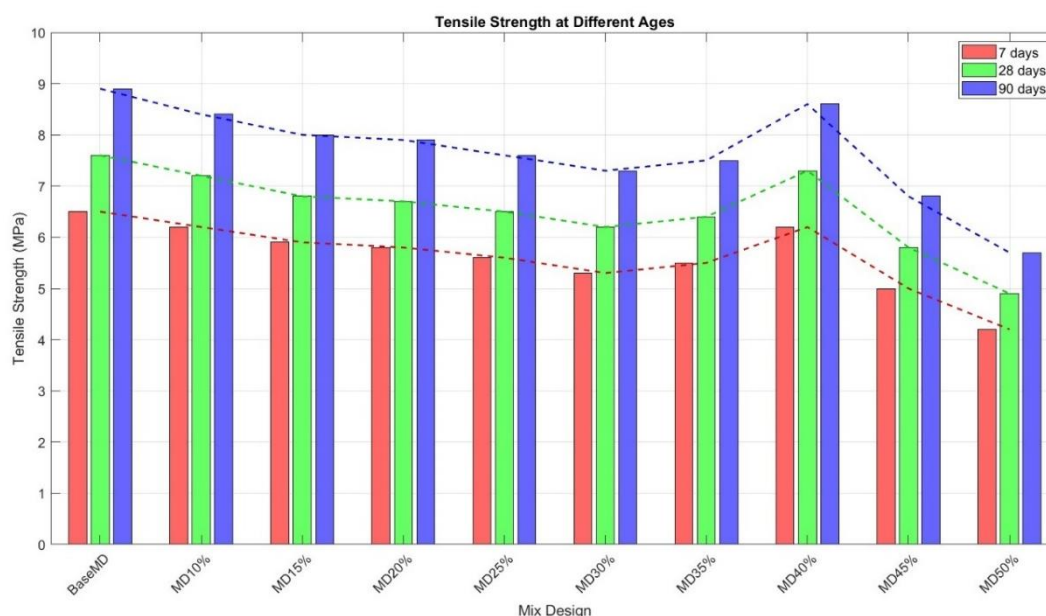
عرب یار محمدی و همکاران نیز روش مشابهی را برای ارزیابی خواص مکانیکی بتن غلتکی روسازی مورد استفاده قرار داده و نشان دادند که عوامل مختلف می‌توانند بر رفتار پس از ترک‌خوردگی بتن تأثیرگذار باشند [۳۶].

۳-۲- مقاومت خمشی

علاوه بر مقاومت فشاری، مقاومت خمشی نیز به عنوان شاخص مهمی از عملکرد بتن، به ویژه در کاربردهای سازه‌ای نظیر دال‌ها و تیرها، مورد ارزیابی قرار گرفت. همانند روند مشاهده شده در مقاومت فشاری، نتایج مقاومت خمشی (شکل ۱۲) نیز الگوی مشابهی را نشان می‌دهد. استفاده از پسماند تراورتن به عنوان جایگزین بخشی از سیمان تأثیری مشابه با مقاومت فشاری بر توسعه مقاومت خمشی نمونه‌های بتنی داشته است.

و کربوآلومینات کلسیم هیدراته تشکیل دهد. این ترکیب به تقویت ماتریس سیمانی کمک می‌کند و در توسعه مقاومت بلندمدت نقش دارد، که در مقاومت ۹۰ روزه مخلوط‌های حاوی PTWM قابل مشاهده است (شکل ۹)

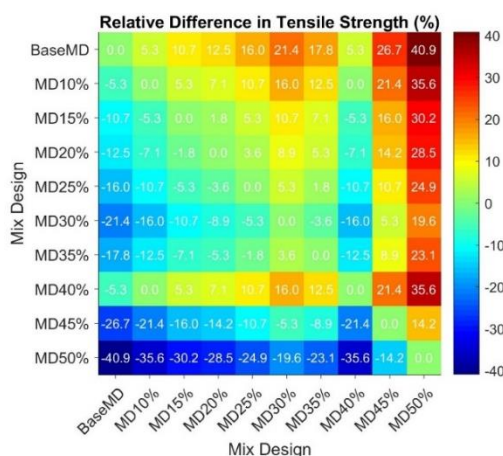
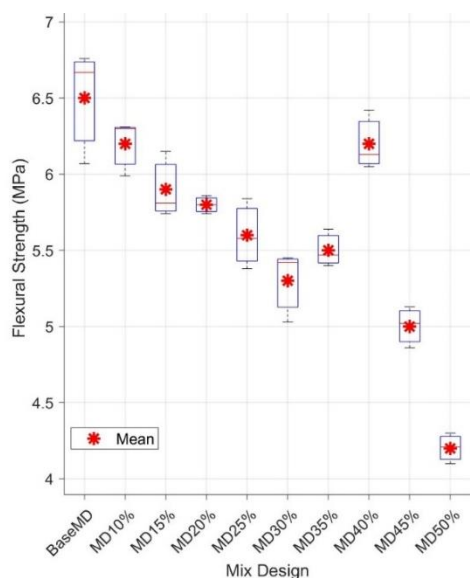
با توجه به محتوای بالای کربنات کلسیم در PTWM حدود ۴۷.۲۳٪ طبق شکل ۴، مکانیزم عمل این ماده در بتن ترکیبی از اثرات فیزیکی (پرکنندگی) و شیمیایی است. در سطوح جایگزینی تا ۴۰٪، اثرات مثبت پرکنندگی و بهبود ساختار منافذ غالب بوده و باعث حفظ یا حتی بهبود مقاومت می‌شود. همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، رابطه بین میزان جایگزینی PTWM و مقاومت فشاری غیرخطی است و در محدوده ۳۵-۴۰٪ یک نقطه عطف وجود دارد. در سطوح بالاتر از ۴۰٪، کاهش قابل توجه در محتوای کلینکر سیمان (منبع اصلی C_3S و C_2S) منجر به کاهش محصولات هیدراتاسیون و در نتیجه کاهش مقاومت می‌گردد. مطالعات قبلی نیز نشان داده‌اند که جایگزینی بیش از حد مواد پرکننده در سیستم‌های سیمانی



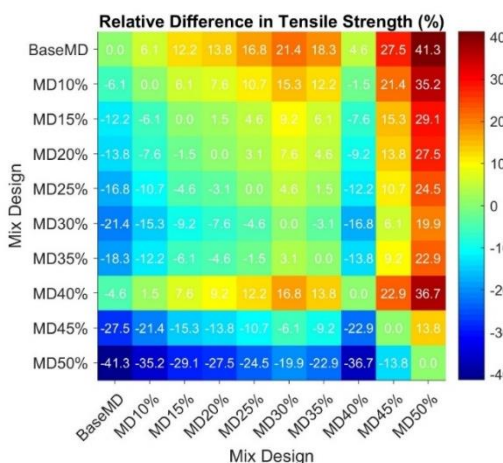
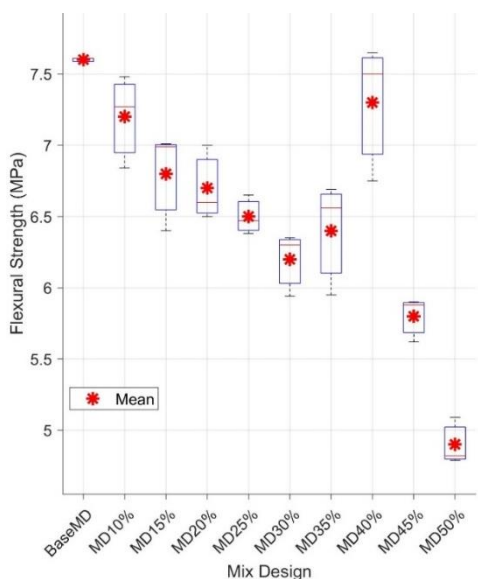
شکل ۱۲. مقاومت خمشی مخلوط‌های بتنی در سنین مختلف

مقاومت خمشی را نشان می‌دهد. با افزایش PTWM، روند کلی کاهش مقاومت خمشی مشاهده می‌شود، به طوری که MD50% کمترین مقاومت را نشان می‌دهد.

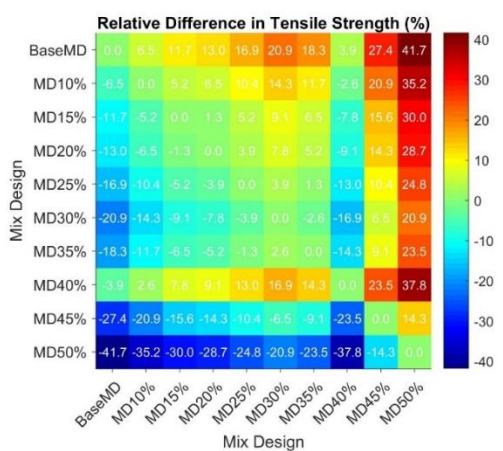
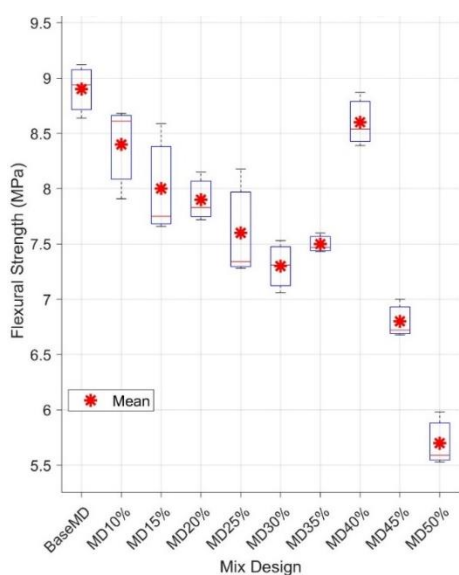
تحلیل جامع توسعه مقاومت خمشی در مخلوط‌های بتنی با درصد‌های مختلف PTWM در سنین ۷ روز (الف)، ۲۸ روز (ب) و ۹۰ روز (ج) در شکل ۱۳ ارائه شده است. در سن ۷ روز، مخلوط شاهد (BaseMD) بیشترین میانگین



(الف)



(ب)



(پ)

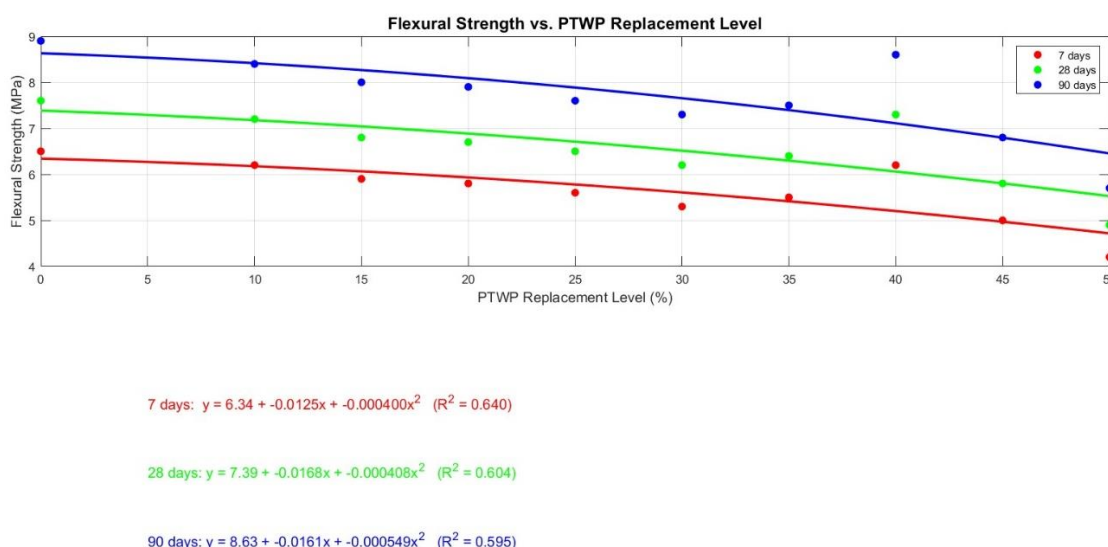
شکل ۱۳. تحلیل مقاومت خمشی مخلوط‌های بتنی با درصدهای مختلف PTWM در سنین الف (۷ روز، ب) ۲۸ روز و ج) ۹۰ روز

مقاومت بین ۷ تا ۲۸ روز کم می‌کند و تا حدی جایگزینی سیمان را جبران می‌نماید.

در سن ۹۰ روز، روند برای مخلوط‌های حاوی PTWM مطلوب‌تر می‌شود. اگرچه BaseMD همچنان بیشترین میانگین مقاومت را نشان می‌دهد، مخلوط‌ها تا MD40% به مقاومت‌های نزدیک به مخلوط شاهد دست می‌یابند. رابطه بین مقاومت خمشی و میزان جایگزینی PTWM در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

با این حال، مخلوط‌ها تا MD40% مقاومت‌های نزدیک به مخلوط شاهد را حفظ می‌کنند که نشان می‌دهد سطوح متوسط جایگزینی PTWM تأثیر شدیدی بر مقاومت خمشی اولیه ندارد.

نتایج ۲۸ روزه روند مشابهی را نشان می‌دهند، اما با مقادیر مقاومت بالاتر. مخلوط BaseMD به بیشترین میانگین مقاومت خمشی دست می‌یابد، در حالی که MD40% مقاومتی نزدیک به مخلوط شاهد حفظ می‌کند. این نشان می‌دهد که واکنش پوزولانی PTWM به توسعه



شکل ۱۴. تحلیل رگرسیون چندگانه مقاومت خمشی در برابر درصد جایگزینی PTWM در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز

پس از بررسی خواص مکانیکی، ارزیابی دوام بتن از طریق آزمایش نفوذپذیری آب انجام شد. این آزمایش به دلیل ارتباط مستقیم با عمر مفید سازه‌های بتنی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. نتایج نفوذپذیری آب مخلوط‌های بتنی در سن ۲۸ روز در شکل ۱۵ نشان داده شده است. استفاده از پسماند تراورتن به عنوان جایگزین بخشی از سیمان تأثیر قابل توجهی بر نفوذپذیری آب نمونه‌های بتنی داشته است.

شکل ۱۵ رابطه پیچیده‌ای بین محتوای PTWM و نفوذپذیری آب را نشان می‌دهد:

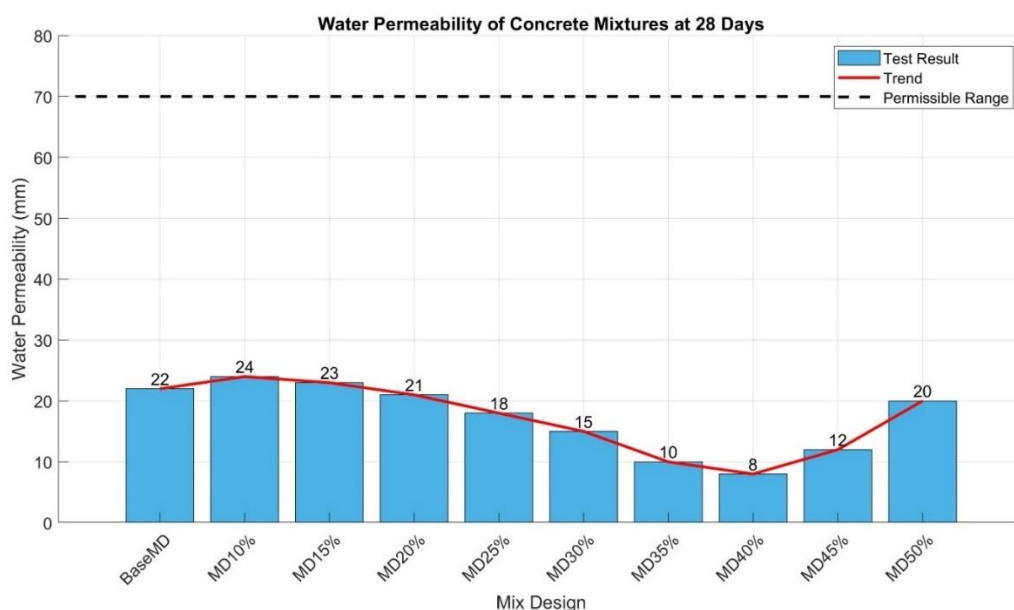
- روند کلی: از BaseMD تا MD40% یک روند نزولی در نفوذپذیری مشاهده می‌شود، اگرچه این کاهش یکنواخت نیست.

معادلات رگرسیون برای هر سن در زیر نمودار همراه با ضرایب تعیین (R -squared) مربوطه ارائه شده است. این معادلات یک مدل ریاضی برای پیش‌بینی مقاومت خمشی براساس محتوای PTWM و سن بتن ارائه می‌دهند.

این نتایج نشان می‌دهد که PTWM می‌تواند به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در بتن مورد استفاده قرار گیرد، بدون اینکه تأثیر شدیدی بر مقاومت خمشی داشته باشد، به ویژه در سطوح جایگزینی تا ۴۰٪. داده‌ها همچنین نشان‌دهنده اثر تدریجی PTWM در بهبود ریزاختر و تراکم ماتریس سیمانی است که به توسعه مقاومت بلندمدت کمک می‌کند و به ویژه در نتایج ۹۰ روزه مشهود است.

۳-۳- نفوذپذیری آب

- افزایش اولیه: از BaseMD تا MD10% و MD15% افزایش جزئی در نفوذپذیری مشاهده می‌شود.
- کاهش تدریجی: از MD15% تا MD40% کاهش تدریجی در نفوذپذیری مشاهده می‌شود.
- نقطه بهینه: MD40% کمترین نفوذپذیری را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده بهترین عملکرد است.
- افزایش بعدی: برای MD45% و MD50% نفوذپذیری مجدداً افزایش می‌یابد.
- محدوده مجاز: تمامی مخلوط‌ها زیر حد مجاز قرار دارند که نشان می‌دهد در محدوده قابل قبول هستند.



شکل ۱۵. نفوذپذیری آب مخلوط‌های بتنی در سن ۲۸ روز

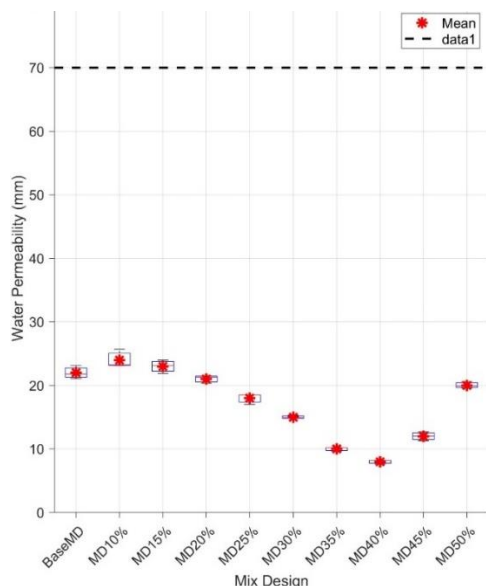
کمترین نفوذپذیری در حدود ۴۰٪ جایگزینی PTWM مشاهده می‌شود که نشان می‌دهد این سطح جایگزینی برای بهبود مقاومت در برابر نفوذ آب بهینه است.

شکل ۱۷ نشان می‌دهد که رابطه بین میزان جایگزینی PTWM و نفوذپذیری آب را می‌توان با معادله درجه دوم $y = 0.0051x^2 - 0.5035x + 25.99$ با ضریب تعیین $R^2 = 0.500$ توصیف کرد. کاهش نفوذپذیری آب با افزایش محتوای PTWM تا ۴۰٪ را می‌توان به چندین مکانیزم نسبت داد. اول، ذرات بسیار ریز PTWM (با نرمی بلین مشابه سیمان طبق شکل ۱) باعث بهبود بسته‌بندی ذرات و کاهش تخلخل در ماتریس سیمانی می‌شوند [۱۲] و [۱۳]. دوم، این ذرات ریز می‌توانند در منافذ مویینه قرار گرفته و مسیرهای انتقال آب را مسدود کنند [۱۴]. تحقیقات نشان داده است که استفاده از پودر سنگ آهک

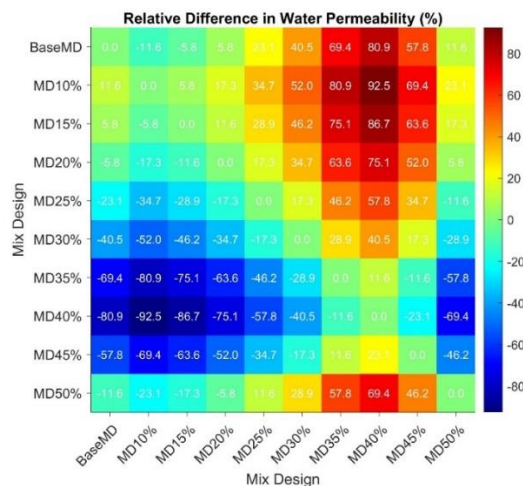
خصوصیات نفوذپذیری آب مخلوط‌های بتنی با درصد‌های مختلف PTWM در سن ۲۸ روز در شکل ۱۶ نشان داده شده است. تحلیل آماری جامعی از نتایج آزمایش نفوذپذیری آب در مخلوط‌های مختلف بتن در این شکل ارائه شده است. رابطه بین میزان جایگزینی PTWM و نفوذپذیری آب نمونه‌های بتنی در سن ۲۸ روز در شکل ۱۷ نمایش داده شده است.

شکل ۱۷ رابطه پیچیده‌ای بین میزان جایگزینی PTWM و نفوذپذیری آب در بتن در سن ۲۸ روز را نشان می‌دهد. منحنی رگرسیون درجه دوم نشان‌دهنده یک روند غیرخطی در نفوذپذیری با افزایش محتوای PTWM است. در ابتدا، افزایش جزئی در نفوذپذیری در سطوح پایین جایگزینی (۱۰-۱۵٪) مشاهده می‌شود، که به دنبال آن کاهش قابل توجهی با افزایش PTWM تا ۴۰٪ رخ می‌دهد.

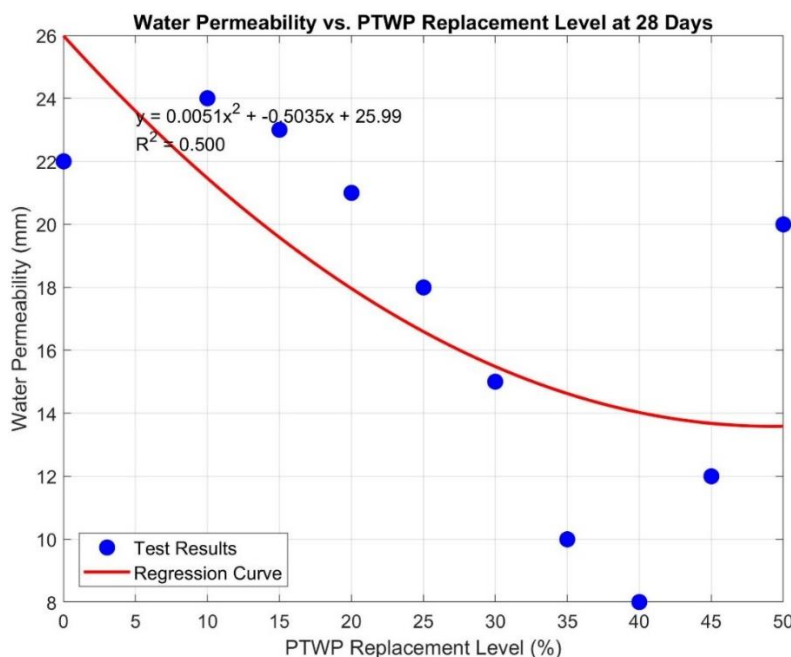
PTWM نسبت به نمونه شاهد قابل توجه است. افزایش نفوذپذیری در سطوح جایگزینی بالاتر از ۴۰٪ احتمالاً به دلیل کاهش بیش از حد محصولات هیدراتاسیون و افزایش تخلخل ناشی از کمبود ژل C-S-H است [۱۳].



به عنوان ماده معدنی در بتن می‌تواند ریزساختار منطقه انتقالی بین خمیر سیمان و سنگدانه‌ها را بهبود بخشد [۱۵]. این بهبود ریزساختار منجر به کاهش مسیرهای نفوذپذیری و افزایش مقاومت در برابر نفوذ آب می‌شود. کاهش نفوذپذیری تا ۶۵٪ در نمونه‌های حاوی ۴۰٪



شکل ۱۶. تحلیل آماری نفوذپذیری آب برای مخلوط‌های بتنی با درصد‌های مختلف PTWM در سن ۲۸ روز



شکل ۱۷. نفوذپذیری آب در برابر درصد جایگزینی PTWM در سن ۲۸ روز

این محدوده، تعادل مناسبی بین حفظ یا بهبود عملکرد بتن و حداکثرسازی استفاده از مواد ضایعاتی ایجاد می‌کند. با توجه به نتایج مطلوب خواص مکانیکی و دوام در سطح جایگزینی ۳۵-۴۰ درصد، ارزیابی جنبه‌های زیست محیطی

۳-۴- سطح جایگزینی بهینه

براساس نتایج ترکیبی خواص مکانیکی و دوام، سطح جایگزینی بهینه PTWM بین ۳۵ تا ۴۰ درصد تعیین شد.

و اقتصادی این سطح از جایگزینی ضروری است تا تصویر کاملی از مزایای استفاده از PTWM ارائه گردد.

۳-۵- ارزیابی زیست محیطی

استفاده از PTWM به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در تولید بتن مزایای زیست محیطی قابل توجهی به همراه دارد. بر اساس ارزیابی چرخه حیات (LCA) انجام شده طبق استاندارد ISO 14040 مقایسه اثرات زیست محیطی بتن معمولی با بتن حاوی PTWM به عنوان جایگزین سیمان انجام شد [۳۷].

محاسبات نشان می‌دهد که تولید هر تن سیمان پرتلند حدود ۰/۹ تن CO₂ منتشر می‌کند [۳۸]. با جایگزینی ۴۰٪ سیمان با PTWM، میزان انتشار CO₂ به ۰/۶۱ تن به ازای هر تن مواد سیمانی (سیمان PTWM+) کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده کاهش ۳۲/۲٪ است. همچنین، مصرف انرژی در تولید سیمان پرتلند حدود ۴/۶ گیگاژول بر تن است [۳۹]، در حالی که فرآوری PTWM (طبق فرآیند نشان داده شده در شکل ۳) تنها حدود ۰/۸ گیگاژول بر تن انرژی مصرف می‌کند [۴۰]. بنابراین، جایگزینی ۴۰٪ سیمان با PTWM منجر به کاهش حدود ۲۴/۸ درصد در مصرف انرژی می‌شود.

علاوه بر کاهش انتشار CO₂ و مصرف انرژی، استفاده از PTWM به حفظ منابع طبیعی و کاهش دفن ضایعات کمک می‌کند. براساس مطالعه انجام شده توسط رانا و همکاران [۲]، استفاده از ضایعات سنگی در بتن می‌تواند تا ۱۸٪ در هزینه‌های تولید صرفه‌جویی ایجاد کند. تحقیقات یورداکول [۱۰] نیز نشان می‌دهد که حدود ۲۰٪ از سنگ استخراج شده در فرآیند تولید و فرآوری به ضایعات تبدیل می‌شود که استفاده مجدد از آن‌ها در صنعت ساختمان می‌تواند هر ساله از دفن میلیون‌ها تن ضایعات جلوگیری کند.

۳-۶- بررسی اقتصادی

در کنار مزایای زیست محیطی قابل توجه، بررسی جنبه‌های اقتصادی استفاده از PTWM نیز برای توجیه کاربرد صنعتی این ماده ضروری است.

یکی از جنبه‌های مهم در استفاده از PTWM به عنوان جایگزین بخشی از سیمان، مزایای اقتصادی آن است. براساس قیمت‌های بازار در زمان انجام تحقیق (سال ۱۴۰۲)، هزینه تولید ۱ مترمکعب بتن معمولی (بدون PTWM) حدود ۱۰۰٪ در نظر گرفته شده است. با افزایش میزان جایگزینی PTWM، هزینه تولید بتن کاهش می‌یابد، زیرا هزینه فرآوری PTWM (با توجه به فرآیند نسبتاً ساده نشان داده شده در شکل ۳) حدود ۳۰٪ هزینه تولید سیمان است [۲]. در سطح جایگزینی بهینه (۴۰٪)، کاهش هزینه حدود ۲۲٪ نسبت به بتن معمولی است که صرفه اقتصادی قابل توجهی را نشان می‌دهد. علاوه بر این، استفاده از PTWM باعث کاهش هزینه‌های دفع ضایعات نیز می‌شود که یک مزیت اقتصادی جانبی به حساب می‌آید.

با در نظر گرفتن حجم بالای تولید بتن در صنعت ساختمان، این کاهش هزینه می‌تواند به صرفه‌جویی قابل توجهی در پروژه‌های عمرانی منجر شود. همچنین، با توجه به افزایش مداوم قیمت سیمان، استفاده از PTWM می‌تواند استراتژی موثری برای مدیریت هزینه‌ها در بخش ساخت و ساز باشد.

برای درک بهتر جایگاه PTWM در میان سایر مواد معدنی مورد استفاده در بتن، جدول ۲ مقایسه‌ای از نتایج این پژوهش با مطالعات مشابه ارائه می‌دهد. همانطور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، پسماند تراورتن با امکان جایگزینی ۳۵-۴۰٪ سیمان، عملکرد بهتری نسبت به سایر مواد معدنی دارد. این در حالی است که مطالعات پیشین نشان داده‌اند که لجن مرمر و پودر گرانیات به ترتیب تا ۱۰ و ۱۵٪ قابل جایگزینی بوده‌اند. کاهش ۶۵٪ در نفوذپذیری آب نیز نشان‌دهنده تأثیر مثبت قابل توجه PTWM بر دوام بتن است.

جدول ۲. مقایسه نتایج مطالعه حاضر با مقالات مشابه استفاده از ضایعات سنگی در بتن

مرجع	اثر بر دوام	حداکثر افزایش مقاومت فشاری	درصد جایگزینی بهینه	نوع ماده معدنی
مطالعه حاضر	کاهش ۶۵٪ نفوذپذیری آب	14.7%	35-40% سیمان	پسماند تراورتن
Singh و همکاران [41]	کاهش ۱۵٪ نفوذپذیری کلرید	14.7%	20% ماسه	پودر سنگ آهک
Rana و همکاران [2]	بهبود مقاومت در برابر کلرید	اندکی	10% سیمان	لجن مرمر
Vijayalakshmi و همکاران [42]	افزایش مقاومت الکتریکی	-	15% ماسه	پودر گرانیت

۴- نتیجه گیری

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی جامع پتانسیل استفاده از پسماند فرآوری شده تراورتن (PTWM) به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در تولید بتن پایدار انجام شد. بر اساس نتایج آزمایش‌های گسترده و تحلیل‌های آماری، یافته‌های کلیدی این پژوهش به شرح زیر خلاصه می‌گردد:

- مقاومت فشاری و خمشی: مخلوط‌های بتنی با جایگزینی تا ۴۰٪ PTWM، مقاومت‌های مشابه یا کمی بهتر نسبت به مخلوط شاهد در سنین ۲۸ و ۹۰ روز نشان دادند.

- نفوذپذیری آب: استفاده از PTWM به طور قابل توجهی نفوذپذیری آب را کاهش داد، به طوری که بهترین عملکرد در جایگزینی ۴۰٪ مشاهده شد.
- سطح جایگزینی بهینه: بر اساس خواص مکانیکی و دوام، سطح جایگزینی بهینه PTWM بین ۳۵ تا ۴۰ درصد تعیین شد.

- اثرات زیست محیطی: ارزیابی اولیه چرخه حیات نشان داد که جایگزینی ۴۰٪ PTWM می‌تواند انتشار CO₂ را تا ۳۲٪ و مصرف انرژی را حدود ۲۵٪ در تولید بتن کاهش دهد.

- کارایی: PTWM به طور کلی کارایی بتن را بهبود بخشد، به ویژه در سطوح جایگزینی بالاتر، که احتمالاً به دلیل اندازه ذرات ریز و خواص فیزیکی آن است.

-بهبود دوام: نتایج آزمایش نفوذپذیری آب (شکل ۱۵)

نشان داد که استفاده از PTWM باعث بهبود قابل توجه دوام بتن می‌شود. در سطح جایگزینی ۴۰٪، کاهش ۶۵٪ در نفوذپذیری نسبت به نمونه شاهد مشاهده شد. این بهبود به دلیل افزایش تراکم ماتریس سیمانی و کاهش تخلخل مویینه است.

-صرفه اقتصادی: استفاده از PTWM به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در سطح بهینه ۴۰٪ می‌تواند منجر به کاهش حدود ۲۲٪ در هزینه‌های تولید بتن شود.

این یافته‌ها نشان می‌دهد که PTWM می‌تواند به طور موثر به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در بتن استفاده شود و به کاهش ضایعات و حفظ منابع در صنعت ساختمان کمک کند. تحقیقات آینده باید بر دوام طولانی مدت، تحلیل ریزساختاری و کاربرد عملی بتن حاوی PTWM در شرایط محیطی مختلف متمرکز شود.

با توجه به نتایج امیدوارکننده این پژوهش، گام‌های بعدی برای توسعه و کاربرد صنعتی PTWM در بتن ضروری است. تحقیقات آینده می‌تواند در راستای تکمیل این مطالعه شامل بررسی ریزساختاری با استفاده از آنالیز SEM، بررسی دوام بتن حاوی PTWM در شرایط محیطی مختلف، مطالعه رفتار طولانی مدت، و کاربرد عملی این نوع بتن در اجزای سازه‌ای باشد. به ویژه انجام آنالیز SEM و بررسی‌های شیمیایی می‌تواند به درک بهتر مکانیزم‌های واکنش هیدراتاسیون و نقش PTWM در تشکیل فازهای سیمان هیدراته کمک کند. همچنین، استفاده از روش‌های

پیشرفته یادگیری ماشین برای بهینه‌سازی طرح اختلاط و پیش‌بینی خواص بتن حاوی PTWM می‌تواند یک زمینه تحقیقاتی جذاب برای مطالعات آینده باشد.

References

- [1] Juenger MCG, Winnefeld F, Provis JL, Ideker JH. Advances in alternative cementitious binders. *Cement and Concrete Research*. 2011 Dec;41(12):1232-1243. doi: **10.1016/j.cemconres.2010.11.012**
- [2] Rana A, Kalla P, Csetenyi LJ. Sustainable use of marble slurry in concrete. *Journal of Cleaner Production*. 2015 May;94:304-311. doi: **10.1016/j.jclepro.2015.01.053**
- [3] Hou SD, Zhang M, Li Q, Wang Y, Jiang F, Zhang X. Utilization of marble dust in concrete production and its effects on mechanical properties and microstructure. *Construction and Building Materials*. 2020 Nov;260:119990. doi: **10.1016/j.conbuildmat.2020.119990**
- [4] Ergün A. Effects of the usage of diatomite and waste marble powder as partial replacement of cement on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*. 2011 Feb;25(2):806-812. doi: **10.1016/j.conbuildmat.2010.07.002**
- [5] Topçu IB, Bilir T, Uygunoğlu T. Effect of waste marble dust content as filler on properties of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*. 2009 May;23(5):1947-1953. doi: **10.1016/j.conbuildmat.2008.09.007**
- [6] Uysal M, Yilmaz K, Ipek M. The effect of mineral admixtures on mechanical properties, chloride ion permeability and impermeability of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*. 2012 Dec;27(1):263-270. doi: **10.1016/j.conbuildmat.2011.07.049**
- [7] Shahhoseini MR, Sharbatdar MK, Kheyroddin A. Experimental Investigation of Strength and Durability Properties of Concretes Cast with Heated Zeolite. *Civil Infrastructure Researches*. 2024;10(2):35-50. doi: **10.22091/cer.2024.10381.1540**
- [8] Torabi MR, Hosseini M, Hajimohammadrezaee R. Proposing a Model for Compressive Strength Prediction of Self Compacting Concrete Using ANN. *Civil Infrastructure Researches*. 2024. doi: **10.22091/cer.2024.11015.1564**
- [9] Ghodousian O, Ghodousian A, Shafaie V, Hajiloo S, Movahedi Rad M. Study of Bonding between Façade Stones and Substrates with and without Anchorage Using Shear-Splitting Test—Case Study: Travertine, Granite, and Marble. *Buildings*. 2023 May;13(5):1275. doi: **10.3390/buildings13051275**
- [10] Yurdakul M. Natural stone waste generation from the perspective of natural stone processing plants: An industrial-scale case study in the province of Bilecik, Turkey. *Journal of Cleaner Production*. 2020 Dec;276:123339. doi: **10.1016/j.jclepro.2020.123339**
- [11] Sarami N, Mahdavian L. Comparison of artificial stone made from sludge stone with travertine stone waste of stone cutting factory. *International Journal of Engineering Research in Africa*. 2016;23:94-102. doi: **10.4028/www.scientific.net/JERA.23.94**
- [12] Rocha JHA, Toledo Filho RD. The utilization of recycled concrete powder as supplementary cementitious material in cement-based materials: A systematic literature review. *Journal of Building Engineering*. 2023 Mar;66:107319. doi: **10.1016/j.jobbe.2023.107319**
- [13] Zhang Y, Yang B, Gu X, Han DJ, Wang Q. Improving the performance of ultra-high performance concrete containing lithium slag by incorporating limestone powder. *Journal of Building Engineering*. 2023 Apr;72:105648. doi: **10.1016/j.jobbe.2023.105648**
- [14] Ionescu BA, Barbu AM, Lăzărescu AV, Rada S, Gabor T, Florean C. The influence of substitution of fly ash with marble dust or blast furnace slag on the properties of the alkali-activated geopolymer paste. *Coatings*. 2023 Feb;13(2):403. doi: **10.3390/coatings13020403**
- [15] Adıgüzel E, Subaşı N, Mumcu TV, Ersoy A. The effect of the marble dust to the efficiency of photovoltaic panels efficiency by SVM. *Energy Reports*. 2023 Nov;9:66-76. doi: **10.1016/j.egyr.2022.12.012**
- [16] Abdulkareem OA, Al Bakri MM, Kamarudin H, Nizar IK, Saif AA. Effects of elevated temperatures on the thermal behavior and mechanical performance of fly ash geopolymer paste, mortar and lightweight concrete. *Construction and Building Materials*. 2014 Jan;50:377-387. doi: **10.1016/j.conbuildmat.2013.09.047**
- [17] Ann KY, Moon HY, Kim YB, Ryou J. Durability of recycled aggregate concrete using pozzolanic materials. *Waste Management*. 2008;28(6):993-999. doi: **10.1016/j.wasman.2007.03.003**
- [18] Martínez-García R, Jagadesh P, Zaid O, Șerbănoiu AA, Fraile-Fernández FJ, de Prado-Gil J, Qaidi SMA, Grădinaru CM. The Present State of the Use of Waste Wood Ash as an Eco-Efficient Construction Material: A Review. *Materials*. 2022 Aug;15(15):5349. doi: **10.3390/ma15155349**
- [19] Malakouti Olounabadi M, Jahanbazi M, Hashemi SS, Golchin B, Meshkabadi R. Mechanical Performance of Roller-compacted Concrete Containing Recycled Asphalt Aggregate and Nano-Silica. *Civil Infrastructure*

- Researches. 2024. doi: 10.22091/cer.2024.11343.1575
- [20] Ahmadi M, Abdollahzadeh E, Kioumars M. Using marble waste as a partial aggregate replacement in the development of sustainable self-compacting concrete. *Materials Today: Proceedings*. 2023 Jun;15(2):125-134. doi: 10.1016/j.matpr.2023.02.034
- [21] Ahmad J, Majdi A, Elhag AB, Deifalla AF, Soomro M, Isleem HF, Qaidi S. A Step towards Sustainable Concrete with Substitution of Plastic Waste in Concrete: Overview on Mechanical, Durability and Microstructure Analysis. *Crystals*. 2022 Jul;12(7):944. doi: 10.3390/cryst12070944
- [22] Zamani AA, Ahmadi M, Dalvand A, Aslani F. Effect of single and hybrid fibers on mechanical properties of high-strength self-compacting concrete incorporating 100% waste aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2023 Mar;35(3):04022365. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004522
- [23] Qaidi S, Al-Kamaki Y, Hakeem I, Dulaimi AF, Özkılıç Y, Sabri M, Sergeev V. Investigation of the physical-mechanical properties and durability of high-strength concrete with recycled PET as a partial replacement for fine aggregates. *Frontiers in Materials*. 2023 Feb;10:1101146. doi: 10.3389/fmats.2023.1101146
- [24] Shamsi AR, Mousavi SY, Tabarsa AR. Effects of NaOH concentration and Na₂SiO₃/NaOH Ratio on the Performance of Self-compacted Geopolymer Concrete containing Scoria. *Civil Infrastructure Researches*. 2024. doi: 10.22091/cer.2025.11254.1570
- [25] ASTM C150/C150M-21. Standard Specification for Portland Cement. ASTM International. West Conshohocken, PA, 2021. doi: 10.1520/C0150_C0150M-21
- [26] ASTM C33/C33M-18. Standard Specification for Concrete Aggregates. ASTM International. West Conshohocken, PA, 2018. doi: 10.1520/C0033_C0033M-18
- [27] ACI 211.1-91. Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete. American Concrete Institute. Farmington Hills, MI, 1991.
- [28] ASTM C143/C143M-15a. Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. ASTM International. West Conshohocken, PA, 2015. doi: 10.1520/C0143_C0143M-15A
- [29] ACI 211.1-91. Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete. American Concrete Institute. Farmington Hills, MI, 1991.
- [30] ASTM C192/C192M-19. Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. ASTM International. West Conshohocken, PA, 2019. doi: 10.1520/C0192_C0192M-19
- [31] Azizi N, Sharifi M, Shokrzadeh MR. Experimental Investigation of the Effect of Mold Type and Mold Oil on the Physical Characteristics of Self-Compacting Concrete. *Civil Infrastructure Researches*. 2024. doi: 10.22091/cer.2024.10881.1559
- [32] ASTM C39/C39M-20. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International. West Conshohocken, PA, 2020. doi: 10.1520/C0039_C0039M-20
- [33] ASTM C78/C78M-18. Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading). ASTM International. West Conshohocken, PA, 2018. doi: 10.1520/C0078_C0078M-18
- [34] BS EN 12390-8:2019. Testing Hardened Concrete - Depth of Penetration of Water Under Pressure. British Standards Institution. London, 2019.
- [35] Datta SD, Rana MJ, Assafi MN, Mim NJ, Ahmed S. Investigation on the generation of construction wastes in Bangladesh. *International Journal of Construction Management*. 2022 Apr;23(13):2260-2269. doi: 10.1080/15623599.2022.2050977
- [36] Arabyarmohammadi H, Sharbatdar MK, Naderpour H. Experimental Investigating the Effect of Non-steel Fibers on the Consistency and Mechanical Properties and Toughness of RCCP. *Civil Infrastructure Researches*. 2023;9(2):17-33. doi: 10.22091/cer.2023.8714.1435
- [37] ISO 14040:2006. Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. International Organization for Standardization. Geneva, Switzerland, 2006.
- [38] Andrew RM. Global CO₂ emissions from cement production, 1928–2018. *Earth System Science Data*. 2019;11(4):1675-1710. doi: 10.5194/essd-11-1675-2019
- [39] Worrell E, Price L, Martin N, Hendriks C, Meida LO. Carbon dioxide emissions from the global cement industry. *Annual Review of Energy and the Environment*. 2001;26:303-329. doi: 10.1146/annurev.energy.26.1.303
- [40] Xing W, Tam VWY, Le KN, Hao JL, Wang J. Life cycle assessment of sustainable concrete with recycled aggregate and supplementary cementitious materials. *Resources, Conservation and Recycling*. 2023;193:106947. doi: 10.1016/j.resconrec.2023.106947
- [41] Singh J, Mukherjee A, Dhiman VK, Deepmala. Impact of crushed limestone dust on concrete's properties. *Materials Today: Proceedings*. 2021;43(Part 1):341-347. doi: 10.1016/j.matpr.2020.11.674
- [42] Vijayalakshmi M, Sekar ASS, Ganesh prabhu G. Strength and durability properties of concrete made with granite industry waste. *Construction and Building Materials*. 2013;46:1-7. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.04.018