

Mechanical Properties and Durability under Freeze–Thaw Cycles of Fiber-Reinforced Concrete containing Municipal Wastewater

Mohammad Mehdi Hemmati¹, Mohammad Kazem Sharbatdar^{2*}, Majid Gholhaki²

Master Engineer, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

msharbatdar@semnan.ac.ir

Received: 23 October 2025 Revised: 27 May 2026 Accepted: 01 June 2026

Research paper

Abstract

This study investigates the use of a specific type of treated municipal wastewater from one of the Iranian cities as a substitute for mixing water in concrete. In addition, metakaolin (12.5% by weight of cement) and fibers were incorporated into the concrete mixtures. The chemical characteristics of the wastewater were carefully analyzed, and after confirming the absence of significant harmful substances, concrete specimens were prepared with various wastewater replacement ratios (0%, 50%, 70%, and 100%) and tested for mechanical strength and durability. The results indicated that replacing up to 50% of the mixing water with the studied treated wastewater, in combination with additives, not only did not reduce the concrete's properties but even improved some of its strength characteristics. In contrast, replacement levels above 70% without the use of additives led to a significant deterioration in the mechanical properties of the concrete. Metakaolin, through its pozzolanic reactions, and fibers, by controlling microcracks, played crucial roles in enhancing compressive strength, impact resistance, and durability under Freeze–Thaw Cycles, particularly in samples containing 100% wastewater. The combined use of treated wastewater, metakaolin, and fibers can result in the production of sustainable (“green”) concrete with desirable performance and durability, while effectively reducing freshwater consumption and environmental impacts. Since the characteristics and quality of municipal wastewater vary from city to city, the mix design proposed in this study cannot be universally applied, and separate experimental evaluations should be conducted based on the local wastewater quality and concrete properties.

Keywords: Municipal Wastewater, Metakaolin, Fibers, Compressive Strength, Concrete Durability, Freeze–Thaw Cycles, Reduced Water Consumption.

*Corresponding Author: Mohammad Kazem Sharbatdar

Hemmati M. M., Sharbatdar M. K., Gholhaki M. Mechanical Properties and Durability under Freeze–Thaw Cycles of Fiber-Reinforced Concrete containing Municipal Wastewater. J. Concr. Struct. Mater., 2026; 10(1): 163-179. <http://doi.org/10.30478/jcsm.2026.548467.1399>

2538-5828/ © 2026The Authors. Published by Iranian Concrete Society

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

خواص مکانیکی و دوام در چرخه‌های یخ زدن و آب شدن بتن الیافی حاوی پساب فاضلاب شهری

محمد مهدی همتی^۱، محمد کاظم شربتدار^{۲*}، مجید قلهکی^۳

۱. کارشناس ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۲. استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۳. استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

پست الکترونیکی نویسنده مسئول: msharbatdar@semnan.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۰۱، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۰۶، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۱

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

این پژوهش به بررسی استفاده از نوعی پساب فاضلاب شهری تصفیه‌شده، متعلق به یکی از شهرهای ایران، به‌عنوان جایگزین آب در ساخت بتن پرداخته است. در این مطالعه، همچنین متاکائولین (به میزان ۱۲/۵٪ وزنی سیمان) و الیاف به مخلوط بتن افزوده شده‌اند. ویژگی‌های شیمیایی پساب با دقت اندازه‌گیری شد و پس از اطمینان از عدم وجود ترکیبات زیان‌آور قابل توجه، نمونه‌های بتنی با درصدهای مختلف جایگزینی پساب (۰، ۵۰، ۷۰ و ۱۰۰٪) ساخته و از نظر مقاومت‌های مکانیکی و دوام مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج آزمایشات نشان داد که جایگزینی تا ۵۰٪ از آب اختلاط با پساب شهری مورد مطالعه، در حضور افزودنی‌ها نه‌تنها موجب افت خواص بتن نشد، بلکه بهبود برخی مقاومت‌ها را نیز به همراه داشت. در مقابل، جایگزینی بیش از ۷۰٪ پساب بدون استفاده از افزودنی‌ها، کاهش چشمگیر خواص مکانیکی بتن را در پی داشت. متاکائولین از طریق واکنش‌های پوزولانی و الیاف با کنترل ریزترک‌ها، نقش مهمی در افزایش مقاومت فشاری، مقاومت ضرب‌های و دوام چرخه‌های یخ زدن و آب شدن، به‌ویژه در نمونه‌های حاوی ۱۰۰٪ پساب، ایفا کردند. نتایج نشان می‌دهد که استفاده‌ی ترکیبی از پساب فاضلاب، متاکائولین و الیاف می‌تواند به تولید بتن سبز با کارایی و دوام مطلوب منجر شود و در کاهش مصرف آب شیرین و اثرات زیست‌محیطی مؤثر باشد. با توجه به اینکه ویژگی‌ها و کیفیت پساب فاضلاب در شهرهای مختلف متفاوت است، طرح اختلاط ارائه‌شده در این پژوهش قابلیت تعمیم مستقیم به سایر مناطق را ندارد و لازم است آزمایش‌های جداگانه بر اساس کیفیت پساب و خواص بتن هر منطقه انجام گیرد.

واژه‌های کلیدی: پساب فاضلاب شهری، متاکائولین، الیاف، مقاومت فشاری، دوام بتن، چرخه‌های یخ زدن و آب شدن، کاهش مصرف آب.

بتن به عنوان پرمصرفترین مصالح ساختمانی جهان، نقشی اساسی در توسعه زیرساخت‌ها و پروژه‌های عمرانی ایفا می‌کند، اما تولید و مصرف آن پیامدهای زیست‌محیطی و اقتصادی قابل توجهی به همراه دارد. تولید هر تن سیمان پرتلند منجر به انتشار حدود یک تن گاز دی‌اکسید کربن در جو می‌شود که یکی از اصلی‌ترین عوامل گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی محسوب می‌گردد (Smith, 2018; Zhang & Li, 2020). علاوه بر این، مصرف آب شیرین در فرآیند ساخت و عمل‌آوری بتن بسیار بالاست، به‌طوری‌که سالانه بیش از یک تریلیون گالن آب در جهان به این منظور استفاده می‌شود (Mehta & Monteiro, 2014). این موضوع در شرایطی که بحران کمبود آب در بسیاری از کشورها تشدید شده است، نگرانی‌های زیست‌محیطی و اقتصادی فراوانی ایجاد کرده است. برای مقابله با این چالش‌ها، توسعه بتن سبز یا بتن اکوپلیمر با استفاده از مواد زائد صنعتی و منابع بازیافتی به‌عنوان جایگزین سیمان، سنگدانه و یا آب اختلاط تولید می‌شود و می‌تواند نقش مهمی در کاهش مصرف منابع طبیعی، مدیریت پسماندها و کاهش اثرات زیست‌محیطی صنعت ساخت‌وساز داشته باشد (Kumar et al., 2019). یکی از رویکردهای نوین در این زمینه، جایگزینی آب اختلاط بتن با پساب فاضلاب شهری تصفیه‌شده است. این اقدام علاوه بر صرفه‌جویی در منابع آبی، مانع از ورود فاضلاب به آب‌های سطحی شده و در نتیجه از آلودگی محیط‌زیست جلوگیری می‌کند (Rahimi & Zeinab, 2021). تحقیقات پیشین نشان داده‌اند که کیفیت پساب به‌ویژه میزان مواد آلی محلول در آن نقش کلیدی در عملکرد بتن دارد و لازم است مقدار این مواد کمتر از ۲۰ میلی‌گرم در لیتر باشد تا تأثیر منفی بر خواص بتن نگذارد (Ali & Hussain, 2017). همچنین، استفاده از مواد پوزولانی مکمل نظیر متاکائولین، خاکستر بادی و سرباره کوره بلند، به دلیل واکنش‌های پوزولانی و تشکیل فازهای ثانویه C-S-H، می‌تواند تخلخل بتن را کاهش داده و دوام آن را افزایش دهد (Mehta & Monteiro, 2014). به‌کارگیری الیاف تقویتی نیز با کنترل رشد ریزترک‌ها و افزایش مقاومت در برابر بارهای دینامیکی، نقش مؤثری در بهبود رفتار مکانیکی بتن دارد (Zhang & Li, 2020).

از این منظر، تحقیق حاضر بر ترکیب سه راهکار پایدار تمرکز دارد: استفاده از پساب فاضلاب تصفیه‌شده به‌عنوان جایگزین آب اختلاط، کاهش مصرف سیمان پرتلند از طریق جایگزینی بخشی از آن با متاکائولین و استفاده از الیاف تقویتی. در این پژوهش نمونه‌های بتنی با درصد‌های مختلف جایگزینی پساب (۰، ۵۰، ۷۰ و ۱۰۰ درصد) ساخته و تحت آزمون‌های مقاومت فشاری، کششی، خمشی، ضرب‌های و دوام در برابر سیکل‌های ذوب و یخبندان بررسی می‌شوند. نتایج مطالعات اولیه نشان داده است که استفاده تا سطح ۵۰ درصد پساب همراه با متاکائولین و الیاف نه‌تن‌ها موجب کاهش خواص مکانیکی بتن نمی‌شود، بلکه در برخی موارد مقاومت فشاری و کششی را افزایش می‌دهد. با این حال، جایگزینی بیش از ۷۰ درصد پساب بدون افزودنی‌های اصلاحی منجر به افت قابل توجه مقاومت و کاهش دوام بتن می‌گردد (Rahimi & Zeinab, 2021). جالب آن‌که در برخی ترکیبات، نمونه‌های حاوی ۱۰۰ درصد پساب در ترکیب با الیاف بالاترین مقاومت مکانیکی و انرژی جذب ضرب‌های را نشان داده‌اند که بیانگر هم‌افزایی مثبت میان این افزودنی‌ها است. در مجموع، یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که با طراحی بهینه مخلوط بتنی و استفاده ترکیبی از پساب تصفیه‌شده، متاکائولین و الیاف، می‌توان به تولید بتن سبزی دست یافت که از نظر دوام و عملکرد مکانیکی قابل قبول بوده و در عین حال مصرف آب شیرین و انتشار گازهای گلخانه‌ای را به میزان چشمگیری کاهش می‌دهد. این رویکرد می‌تواند گامی مؤثر در جهت توسعه پایدار، کاهش اثرات زیست‌محیطی صنعت ساخت‌وساز و تحقق اهداف اقتصاد چرخشی در کشورها باشد.

بتن سبز یا بتن اکوپلیمر نوعی بتن پایدار است که در آن بخشی از سیمان پرتلند و سنگدانه‌ها با مواد بازیافتی و سازگار با محیط زیست جایگزین می‌شوند. این مفهوم نخستین‌بار در سال ۱۹۹۸ در دانمارک معرفی شد و به‌سرعت به‌عنوان راهکاری برای کاهش

اثرات زیست‌محیطی صنعت ساخت‌وساز گسترش یافت (Mehta & Monteiro, 2014). هدف اصلی از تولید بتن سبز، کاهش مصرف منابع طبیعی، کاهش انتشار دی‌اکسید کربن، مدیریت پسماندهای صنعتی و ساختمانی و تحقق اهداف توسعه پایدار است (Kumar et al., 2019). در ساخت بتن سبز، از موادی همچون خاکستر بادی، سرباره کوره بلند دان‌های آسیاب‌شده (GGBS)، میکروسیلیس، خاکستر پوسته برنج، خاکستر چوب، پودر شیشه و سایر مواد پوزولانی استفاده می‌شود. این مواد علاوه بر کاهش مصرف سیمان پرتلند، موجب بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن نیز می‌شوند. برای مثال، جایگزینی ۳۰ تا ۵۰ درصد سیمان با GGBS یا خاکستر بادی می‌تواند مقاومت درازمدت، تراکم ریزساختار و دوام در برابر نفوذ یون کلر و سولفات‌ها را بهبود دهد (Chen et al., 2021). همچنین استفاده از خاکستر پوسته برنج و دوده سیلیس، به دلیل فعالیت پوزولانی بالا و پرکردن منافذ خمیر سیمان، موجب کاهش تخلخل و افزایش مقاومت فشاری و دوام بتن در محیط‌های مهاجم می‌شود (Muthusamy & Zamri, 2016; Hossain, 2017). از سوی دیگر، استفاده از مصالح بازیافتی مانند شیشه خردشده، لاستیک‌های فرسوده و نخاله‌های ساختمانی، علاوه بر کاهش حجم زباله‌های دفنی، به کاهش استخراج بی‌رویه منابع طبیعی کمک می‌کند (Gupta et al., 2020). هرچند برخی معایب نیز مطرح هستند؛ برای مثال، کاهش کارپذیری، افزایش انقباض و خزش، یا افت مقاومت در سنین اولیه بتن، که معمولاً با به‌کارگیری افزودنی‌های شیمیایی و الیاف قابل کنترل است (Thomas & Wilson, 2021).

یکی از نوآوری‌های مهم در این حوزه، استفاده از پساب فاضلاب تصفیه‌شده به جای آب شیرین در فرآیند اختلاط و عمل‌آوری بتن است. صنعت بتن به‌طور میانگین برای تولید هر مترمکعب بتن حدود ۲۰۰-۱۸۰ لیتر آب مصرف می‌کند، که فشار زیادی بر منابع آب شیرین وارد می‌سازد (Babu & Kumar, 2017). مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از پساب تصفیه‌شده در مقادیر جایگزینی تا ۵۰ درصد، تأثیر منفی قابل‌توجهی بر خواص مکانیکی ندارد و حتی در ترکیب با مواد پوزولانی مانند متاکائولین یا الیاف، می‌تواند منجر به بهبود مقاومت فشاری و خمشی شود (Rahman et al., 2020). به علاوه، این رویکرد علاوه بر کاهش مصرف آب آشامیدنی، به جلوگیری از ورود فاضلاب به آب‌های سطحی و کاهش آلودگی محیطی کمک می‌کند (Moral et al., 2021). در مجموع، بتن سبز نه تنها یک ماده جایگزین برای کاهش اثرات زیست‌محیطی صنعت ساخت‌وساز است، بلکه با طراحی بهینه مخلوط‌های سیمانی، استفاده از پسماندهای صنعتی و بهره‌گیری از آب‌های غیرمتعارف، می‌تواند عملکرد مکانیکی و دوام قابل قبولی نیز داشته باشد. این ویژگی‌ها، بتن سبز را به یکی از راهکارهای کلیدی در تحقق اهداف توسعه پایدار در حوزه ساخت‌وساز تبدیل کرده است. آب یکی از اجزای کلیدی بتن است که در تمام مراحل تولید و عملکرد آن نقش حیاتی دارد. مهم‌ترین وظیفه آب، شرکت در واکنش شیمیایی هیدراتاسیون سیمان است که منجر به تشکیل خمیر سیمان چسبنده و اتصال سنگدانه‌ها می‌شود (Mehta & Monteiro, 2014). نسبت آب به سیمان (W/C) معمولاً حداقل ۰٫۳ است تا واکنش هیدراتاسیون کامل انجام شود، ولی برای افزایش کارایی و روانی بتن، مقدار آب بیشتری به مخلوط اضافه می‌شود. آب همچنین به توزیع یکنواخت سنگدانه‌ها، تسهیل تراکم، افزایش چسبندگی بین سنگدانه و خمیر سیمان و کاهش جذب آب توسط سنگدانه‌ها کمک می‌کند (Neville, 2012). این ویژگی‌ها باعث می‌شوند که بتن به راحتی جابه‌جا، ریخته و در قالب‌ها قرار گیرد و در نهایت مقاومت و دوام مناسب حاصل شود. کیفیت آب مصرفی به‌طور مستقیم بر مقاومت، دوام و خواص کارایی بتن تأثیر دارد. استانداردهای معمول برای آب بتن مشابه آب آشامیدنی است تا از ناخالصی‌هایی مانند مواد معلق، مواد آلی، نمک‌های محلول، روغن و جلبک‌ها جلوگیری شود. ناخالصی‌ها می‌توانند باعث کاهش مقاومت اولیه و بلندمدت بتن، افزایش خوردگی میلگردها و ایجاد حباب‌های هوا شوند (Babu & Kumar, 2017). استفاده از پساب فاضلاب تصفیه‌شده به‌عنوان جایگزین آب شیرین، رویکردی پایدار برای صرفه‌جویی در منابع آب است.

مطالعات نشان داده‌اند که جایگزینی تا ۵۰٪ آب مصرفی با پساب تصفیه‌شده می‌تواند بدون کاهش محسوس خواص مکانیکی و

دوام بتن انجام شود. اثرات پساب بر زمان گیرش، اسلامپ و کارایی بتن بسته به ترکیب و کیفیت پساب متفاوت است (Rahman et al., 2020; Moral et al., 2021). مفاخری (۱۴۰۱)، اثر الیاف پروپیلن و پساب صنعتی کارخانه رنگ بر بتن خودمتراکم را بررسی کرد. افزودن ۰.۱٪ الیاف باعث افزایش ۱۰٪ مقاومت فشاری و ۹٪ مقاومت کششی شد، ولی ۰.۲٪ الیاف مقاومت فشاری ۳۰٪ کاهش یافت. استفاده همزمان الیاف و پساب، مقاومت فشاری و خمشی را کاهش داد، اما افزودن ۰.۲٪ میکروسیلیس تا حدی آن را بهبود بخشید. آزمایش SEM افزایش حفرات و ترک‌ها را نشان داد. دردائی و همکاران (۱۴۰۰)، بتن خودتراکم با پساب تصفیه‌شده و آب آشامیدنی مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد جایگزینی پساب، کاهش ناچیز مقاومت فشاری و کششی و افزایش کمی در نفوذپذیری ایجاد می‌کند و تفاوت قابل توجهی با بتن مرجع ندارد. حسین دخت و همکاران (۲۰۱۶): استفاده از پساب تصفیه‌شده در بتن غیرمسلح موجب بهبود مقاومت فشاری و کارایی شد، مصرف آب تازه کاهش یافت، انتشار گازهای گلخانه‌ای تا ۹۰ مگاتن CO₂ در هر میلیون مترمکعب بتن کاهش یافت و مصرف انرژی تا ۱۰۰ مگاوات ساعت کم شد. آجی کومار و همکاران (۲۰۲۳)، بتن ساخته شده با آب فاضلاب نسبت به آب لوله‌کشی مقاومت فشاری کمتری تحلیل کرد و به این نتیجه رسید که جذب آب آن بیشتر بود، ولی استفاده از فاضلاب بازیافتی برای کاهش بحران آب و مشکلات زیست‌محیطی مرتبط با دفع فاضلاب مؤثر است. جایگزینی بخشی از آب بتن با پساب تصفیه‌شده می‌تواند ضمن حفظ کارایی، مزایای زیست‌محیطی قابل توجهی داشته باشد، اما اثر بر مقاومت و دوام بسته به نوع پساب و ترکیب بتن متفاوت است.

۲. روش پژوهش

۲-۱. مصالح

مصالح مصرفی در ساخت مخلوط‌های بتنی شامل سیمان پرتلند معمولی (نوع ۲ شاهرود، سطح ویژه ۳۲۰۰ سانتی‌متر مربع بر گرم)، ماسه، سنگدانه درشت (حداکثر اندازه ۱۹ میلی‌متر)، آب لوله‌کشی، پساب تصفیه شده شهری، متاکائولین، ژئولیت و الیاف پلی‌پروپیلن بودند. ترکیب شیمیایی سیمان و متاکائولین با استفاده از آنالیز XRF تعیین شد. مشخصات فیزیکی و شیمیایی آب و پساب نشان داد که پساب دارای COD، BOD و TDS بالاتری نسبت به آب معمولی بوده و حاکی از آلودگی آلی و معدنی است، در حالی که pH هر دو نمونه نزدیک به خنثی بود (جدول ۱). پساب مربوطه از یکی از تصفیه‌خانه‌های مدرن که دارای کیفیت نسبتاً مناسب پساب برای کاربردهای متفاوت است انتخاب شده است. قطعاً نوع پساب می‌تواند تأثیرات متفاوت بر خصوصیات بتن‌ها داشته باشد.

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی دو نوع آب و پساب

نوع	pH	TDS	T	BOD	COD
پساب	7.66	464	23.76	23.4	34.9
آب معمولی	7.15	144	22.40	3.24	1.72

۲-۲. طرح اختلاط

در این تحقیق، ۱۶ طرح اختلاط برای بررسی اثر جایگزینی پساب با درصد‌های ۰، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰٪ به جای آب معمولی، با و بدون ۱۲/۵٪ متاکائولین (به وزن سیمان) و ۰.۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن، آماده شد. در کار تحقیقاتی انجام شده توسط شریعتی پور و شربتدار (۱۴۰۲)، از ۰ تا ۲۵٪ متاکائولین جایگزین سیمان در طرح‌های اختلاط استفاده شد که پیش‌نهاد ۱۰ تا ۱۵٪ بعنوان مقادیر بهینه

در حفظ و افزایش مقاومت ها داده شد که از همین پیشنهاد در این تحقیق با مقدار ۱۲/۵٪ استفاده گردید. مقاومت فشاری هدف ۳۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شد. طرح اختلاط بر اساس استانداردهای آیین‌نامه بتن ایران و روش ملی طراحی مخلوط، با توجه به دانه‌بندی سنگدانه‌ها، نسبت آب به سیمان و روانه بتن تعیین شد. مقادیر نهایی اجزاء برای یک متر مکعب بتن در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. نام گذاری طرح اختلاط ها

ردیف	نام طرح	دانه بندی	آب	مکمل معدنی	الیاف
			معمولی	پساب	متاکاتولین
		B		100%	M
1	RW0	✓	✓	—	—
2	RW50	✓	✓	✓	—
3	RW70	✓	✓	✓	—
4	RW100	✓	—	—	✓
5	MRW0	✓	✓	—	✓
6	MRW50	✓	—	✓	✓
7	MRW70	✓	—	✓	✓
8	MRW100	✓	—	—	✓
9	FRW0	✓	✓	—	✓
10	FRW50	✓	—	✓	✓
11	FRW70	✓	—	✓	✓
12	FRW100	✓	—	—	✓
13	MFRW0	✓	✓	—	✓
14	MFRW50	✓	—	✓	✓
15	MFRW70	✓	—	✓	✓
16	MFRW100	✓	—	—	✓

برای بررسی تأثیر درصدهای مختلف پساب، جایگزینی ۱۵٪ ژئولیت و افزودن ۰.۴٪ الیاف پلی پروپیلن، نمونه‌های مکعبی ۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متر ساخته شدند. مصالح بر اساس طرح اختلاط وزن‌کشی و در میکسر مخلوط شدند و پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج شدند. نمونه‌ها به مدت ۷ و ۲۸ روز در حوضچه آب شرب عمل‌آوری و سپس به محیط خشک منتقل شدند. پس از اندازه‌گیری وزن، آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی انجام شد. نامگذاری نمونه‌ها به صورت RW (پساب) با درصد جایگزینی، M (متاکائولین ۱۵٪) و F (الیاف ۰.۴٪) بود.

جدول ۲. وزن هر یک از سنگدانه ها در یک متر مکعب بتن

ترکیب	کل سنگدانه بتن	شن	ماسه
وزن (kg/m ³)	۱۵۷۶	۷۸۸	۷۸۸

حدول، ۳. طرح اختلاط اوله

ترکیب	سیمان	آب آزاد	ماسه	شن
وزن (kg/m ³)	۵۰۰	۲۴۵	۷۸۸	۷۸۸

۳-۲- آماده‌سازی و عمل‌آوری نمونه‌ها

اجزاء بتن مطابق با طرح اختلاط وزن‌کشی و در میکسر مکانیکی مخلوط شدند. نمونه‌ها در قالب‌های استاندارد ریخته و متراکم شدند. نمونه‌های مکعبی (۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متر) پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج شده و به مدت ۷ و ۲۸ روز در حوضچه آب شرب عمل‌آوری شدند. تیرها (۵۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر) و استوانه‌ها (۲۰۰×۱۰۰ میلی‌متر) نیز به همین ترتیب عمل‌آوری شدند و پس از آن در شرایط کنترل‌شده نگهداری شدند.

۴-۲. آزمایش‌های انجام شده

نمونه‌های مکعبی در روزهای ۷، ۲۸ و ۱۲۰ مطابق ASTM C39 آزمایش شدند و مقاومت فشاری با تقسیم بار ماکزیمم بر سطح مقطع محاسبه شد. نمونه‌های استوانه‌های در سن ۲۸ روزه مطابق ASTM C293-79 آزمایش و مقاومت کششی از بار ماکزیمم محاسبه شد. تیرها مطابق شکل ۱ تحت بارگذاری سه‌نقطه‌ای با دستگاه ۲۰۰ کیلو نیوتن مطابق ASTM C293 آزمایش شدند و مقاومت خمشی از بار ماکزیمم محاسبه شد. نمونه‌های مکعبی (۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر) مطابق شکل ۲ تحت ۳۰۰ چرخه بین ۴+ و ۱۸- درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. شاخص دوام نسبی (RD) برای ارزیابی مقاومت بتن استفاده شد.



شکل ۱. مراحل آزمایش مدول گسیختگی (مقاومت خمشی) تیر بتنی

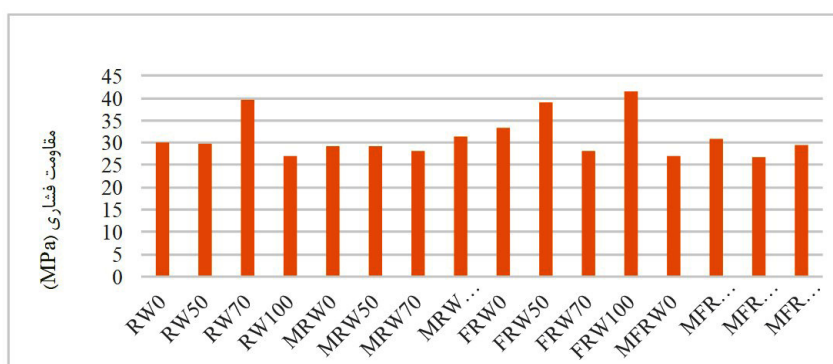


شکل ۲. نمونه آزمایشگاهی تحت چرخه های ذوب و یخبندان

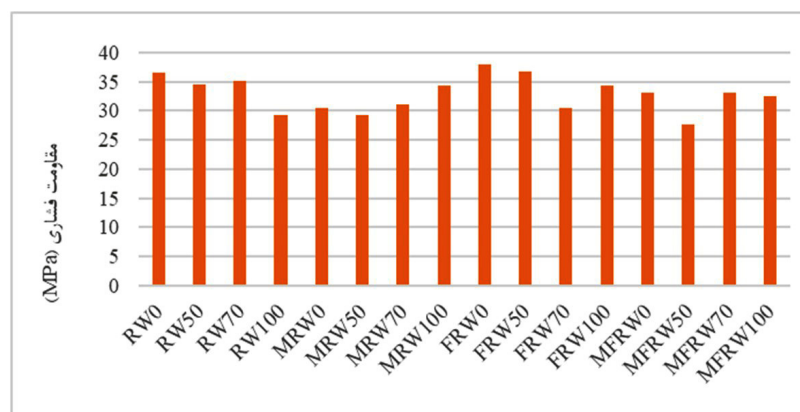
۳. نتایج و تحلیل یافته‌ها

۳-۱- مقاومت فشاری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روز عمل‌آوری در شکل های ۳ و ۴ ارائه داده شده است. در شکل ۳ و ۴، تاثیر متاکائولین و الیاف بر مقاومت بتن‌های حاوی پساب فاضلاب مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۳. میانگین مقاومت ۷ روزه نمونه‌های آزمایشگاهی



شکل ۴. میانگین مقاومت ۲۸ روزه نمونه‌های آزمایشگاهی با ۲۸ روز عمل‌آوری

مقاومت فشاری ۷ روز بتن مرجع برابر ۳۰ مگاپاسکال است مقاومت بتن های حاوی ۵۰، ۷۰ و ۱۰۰ درصد پساب به ترتیب ۲۹،۷، ۲۹،۸ و ۲۷ مگاپاسکال بود که کاهش کمتر از ۱۰٪ نشان دادند همچنین مقاومت های ۱۲۰ روز نمونه های پساب نسبت به نمونه مرجع (۳۶،۶) هم به ترتیب ۳۴،۵، ۳۵،۲ و ۲۹،۳ مگاپاسکال بودند که گرچه کاهش حدود ۲۰٪ در نمونه با ۱۰۰٪ پساب فاضلاب مشاهده شد ولی هنوز مقاومت در حد مقاومت مورد انتظار سازه ای بوده است. افزودن متاکائولین تن ها، تاثیری در نمونه های دارای ۵۰ و ۷۰٪ پساب نداشت ولی افت مقاومت ۷ روز بتن با پساب ۱۰۰٪ را جبران کرد و به عدد ۳۱،۴۴ مگاپاسکال افزایش داد. مقاومت ۱۲۰ روز نمونه با پساب ۱۰۰٪ و متاکائولین به ۳۴،۵ رسید که اختلاف کمتر از ۵٪ با نمونه مرجع دارد و متاکائولین باعث جبران ۱۵٪ افت مقاومت شد. نتایج نشان داد که بیشترین اثر متاکائولین مربوط به نمونه RW100 است، به طوری که مقاومت فشاری آن ۱۷٪ افزایش یافت. این افزایش ناشی از خاصیت پوزولانی متاکائولین است که با هیدروکسید کلسیم آزاد موجود در خمیر سیمان واکنش داده و ژل C-S-H اضافی تولید می کند. این فرآیند باعث کاهش تخلخل و افزایش تراکم ماتریس بتن شده و مقاومت فشاری را بهبود می بخشد. در سایر درصدهای پساب، اثر متاکائولین منفی و موجب کاهش مقاومت شد. علت این کاهش، ترکیب شیمیایی پساب و حضور یون های محلول است که هیدراسیون سیمان را مختل کرده و پیوستگی بین خمیر سیمان و سنگدانه ها را کاهش می دهد. اثر مستقل متاکائولین در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴. اثر افزودن متاکائولین بر مقاومت ۱۲۰ روزه نمونه های آزمایشگاهی

نام نمونه	مقاومت فشاری (MPa)	درصد کاهش مقاومت هر نمونه به نمونه مرجع
RW0	36.62	-
RW50	34.50	۵
RW70	35.18	۴
RW100	29.30	۲۰
MRW0	30.50	۱۶
MRW50	29.25	۲۰
MRW70	30.98	۱۵
MRW100	34.30	۴

افزودن الیاف نیز بر مقاومت بتن تاثیر داشت که بیشترین تاثیر بر مقاومت کوتاه مدت ۷ روز داشت که منجر به پیوند سریعتر اجزاء بتن می گردد و واکنش دیر هنگام هیدراسیون احتمالا بعضی سیمان ها را جبران می کند ولی در مقاومت ۱۲۰ روز افزایش قابل توجهی نبوده است و سیمان واکنش هیدراسیون خود را کامل انجام داده است و الیاف عمدتاً از کاهش مقاومت بتن حاوی پساب جلوگیری کرده و جبران نمونه است. در نمونه RW100 مقاومت فشاری ۷ روز تا ۳۲٪ افزایش یافت، زیرا الیاف با ایجاد پل بندی بین ریزترک ها و افزایش انسجام بین خمیر سیمان و سنگدانه ها، ضعف ساختاری بتن حاوی پساب ۱۰۰٪ را جبران کردند. در نمونه RW50، مقاومت تا ۱۷٪ افزایش یافت، چرا که در این سطح از جایگزینی پساب، افت کیفیت خمیر سیمان کمتر است و الیاف همچنان با کنترل ریزترک ها و بهبود پیوستگی موجب ارتقای مقاومت می شوند، هرچند اثر آن به اندازه RW100 چشمگیر نیست. در نمونه RW70، اثر الیاف منفی بود و مقاومت کاهش یافت، زیرا ترکیب شیمیایی پساب و کاهش پیوستگی بین الیاف و خمیر سیمان باعث تمرکز تنش ها و افزایش تخلخل شد، در نتیجه الیاف نقش تقویت کننده نداشتند. اثر مستقل الیاف در جدول ۵ نشان داده شده است.

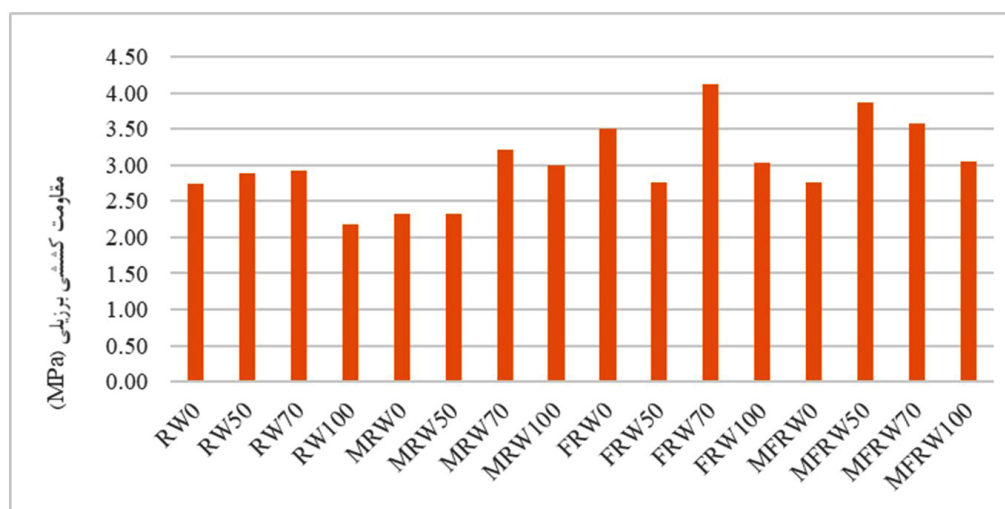
جدول ۵. اثر افزودن الیاف بر مقاومت ۱۲۰ روزه نمونه‌های آزمایشگاهی

نام نمونه	مقاومت فشاری (MPa)	نسبت مقاومت هر نمونه به نمونه مرجع
RW0	36.62	۱
FRW0	37.88	۱,۰۳
FRW50	36.80	۱,۰۰۴
FRW70	30.50	۰,۸۴
FRW100	34.26	۰,۹۴

استفاده همزمان از الیاف و متاکائولین در در مقاومت های ۷ یا ۱۲۰ روز در نمونه‌های متفاوت با هم فرق می‌کند ولی میزان افزایش قابل توجهی اتفاق نیفتاده است و مقاومت ها بدون کاهش بیش از ۱۰ درصد در حد مقاومت نمونه مرجع هستند. برخی نمونه‌ها، به ویژه RW100، منجر به بهبود قابل توجه مقاومت شد. این اثر ترکیبی ناشی از هم‌افزایی دو عامل است: متاکائولین با کاهش تخلخل و افزایش تراکم خمیر و الیاف با ایجاد پل‌بندی میان ریزترک‌ها و افزایش انسجام خمیر و سنگدانه‌ها مقاومت را بهبود می‌دهند. با این حال، اثر ترکیبی در درصد‌های میانی مانند RW70 کمتر یا منفی بود، زیرا کیفیت خمیر سیمان تحت تأثیر شیمیایی پساب کاهش یافته و پیوستگی بین الیاف و خمیر ضعیف شده بود، بنابراین مقاومت نهایی کاهش یافت. به طور کلی، نتایج نشان داد که متاکائولین و الیاف در سطوح پایین و بسیار بالای جایگزینی پساب اثر مثبت بر مقاومت بتن دارند، به ویژه در پساب ۱۰۰٪ که الیاف می‌توانند ضعف خمیر سیمان را جبران کنند، اما در محدوده‌های میانی مانند ۷۰٪ ممکن است اثر منفی مشاهده شود.

۳-۲. مقاومت کششی برزیلی

نتایج آزمایش مقاومت کششی برزیلی نمونه‌های ترکیبی در شکل ۵ ارائه داده شده است.



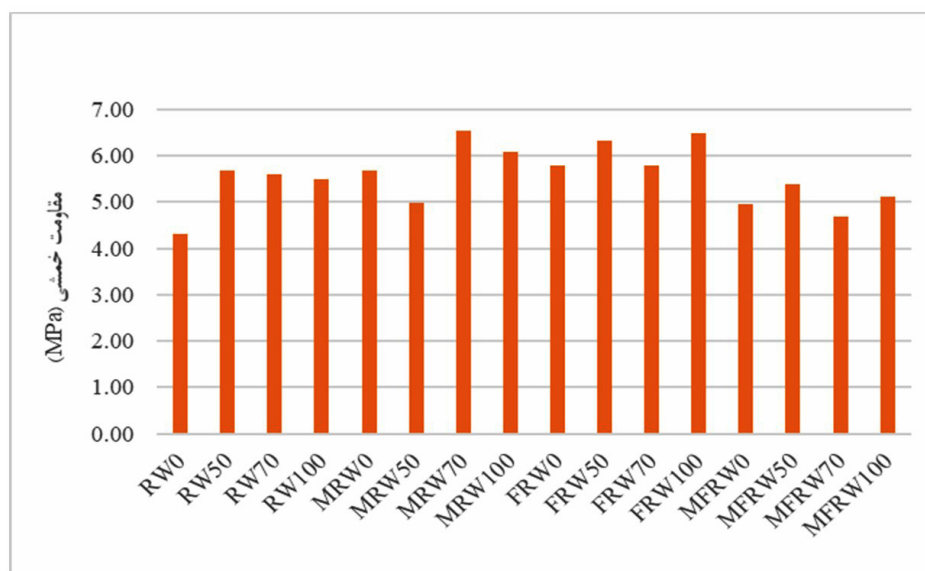
شکل ۵. میانگین مقاومت کششی برزیلی نمونه‌ها

بررسی اثر الیاف بر مقاومت کششی برزلی نمونه‌های بتنی نشان داد که بیشترین افزایش مقاومت مربوط به نمونه RW70 است، به‌طوری‌که مقاومت کششی برزلی آن تا ۴۰٪ افزایش یافت. این موضوع حاکی از آن است که در بتن با ۷۰٪ جایگزینی پساب که مقاومت کششی پایین دارد، افزودن الیاف توانسته مقاومت را به سطح مطلوب برساند. پس از آن، نمونه RW100 با ۳۸٪ افزایش قرار دارد. در سایر نمونه‌ها، افزودن الیاف موجب کاهش مقاومت کششی شد. علت این رفتار به تفاوت در ساختار ماتریس سیمان و میزان پساب مربوط است؛ در RW70 و RW100، ترکیب مناسب پساب و الیاف باعث بهبود پیوستگی، انتقال بهتر تنش و کنترل ریزترک‌ها شده و الیاف نقش مؤثری در افزایش مقاومت ایفا کرده‌اند. اما در نمونه‌های دیگر که ماتریس سیمانی ضعیف‌تر است یا چسبندگی بین الیاف و خمیر سیمان کمتر است، الیاف به جای تقویت، باعث تمرکز تنش و کاهش مقاومت شده‌اند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که افزودن الیاف در شرایطی که بتن به دلیل مصرف پساب ضعف کششی دارد، می‌تواند مقاومت را به طور قابل توجهی افزایش دهد، اما اثر آن وابسته به درصد پساب، کیفیت ترکیب بتن و توزیع مناسب الیاف است و در همه شرایط نمی‌توان انتظار افزایش مقاومت داشت.

در بررسی اثر همزمان الیاف و متاکائولین بر مقاومت کششی برزلی مشاهده شد که بیشترین افزایش مقاومت مربوط به نمونه RW100 است، به‌طوری‌که مقاومت تا ۳۹٪ افزایش یافت. پس از آن نمونه RW50 با ۳۳٪ افزایش و نمونه RW70 با ۲۱٪ افزایش قرار دارند. بنابراین در تمامی نمونه‌های بتنی دارای پساب، افزودن همزمان الیاف و متاکائولین موجب افزایش مقاومت کششی می‌شود. دلیل این بهبود، اثر هم‌افزایانه متاکائولین و الیاف است؛ متاکائولین با واکنش پوزولانی خود باعث افزایش چسبندگی، کاهش نفوذپذیری و بهبود ساختار داخلی ماتریس سیمانی می‌شود، و الیاف با ایجاد پل‌بندی در ریزترک‌ها و افزایش انسجام، عملکرد مکانیکی بتن را تقویت می‌کنند. بنابراین، استفاده همزمان از الیاف و متاکائولین در بتن‌های حاوی پساب راهکار مؤثری برای جبران کاهش مقاومت کششی و ارتقای عملکرد مکانیکی بتن به شمار می‌آید.

۳-۳- مقاومت کششی برزلی

نتایج آزمایش مقاومت خمشی ۴ نقطه ای نمونه‌های ترکیبی در شکل ۶ ارائه داده شده است.



شکل ۶. مقاومت خمشی ۴ نقطه ای تیر به ابعاد ۵۰*۱۰*۱۰ سانتی متر

به نمونه پایه RW100 حدود ۱۷٪ افزایش دارد. این افزایش ناشی از اثر ترکیبی الیاف و پساب ۱۰۰٪ است؛ الیاف با ایجاد پل‌بندی در ریزترک‌ها مانع گسترش ترک‌ها می‌شوند و پساب بهینه موجب تشکیل ماتریس یکنواخت و واکنش هیدراتاسیون کامل‌تر سیمان می‌گردد. رتبه دوم مربوط به نمونه FRW50 با مقاومت ۳۹,۹۱ مگاپاسکال است که تقریباً ۱۵٪ کمتر از FRW100 می‌باشد. این نمونه نشان می‌دهد که در درصد‌های کمتر پساب، هرچند حضور الیاف به افزایش مقاومت کمک می‌کند، اما توانایی ماتریس در تحمل چرخه‌های یخ‌زدگی کمتر از ترکیب کامل پساب است. رتبه سوم متعلق به نمونه MRW70 با مقاومت ۳۸,۲۶ مگاپاسکال است که نسبت به نمونه RW70 حدود ۶۱٪ افزایش یافته و اثر مثبت متاکائولین در پر کردن منافذ ریز، کاهش نفوذپذیری و بهبود پیوستگی ماتریس سیمانی را نشان می‌دهد. در مقابل، کمترین مقاومت دوام فشاری تحت سیکل یخ‌زدگی برای نمونه RW70 بدون افزودنی ثبت شد که نسبت به FRW100 حدود ۴۹٪ کمتر است، که بیانگر ضعف ساختاری و افزایش تخلخل در نمونه‌های بدون افزودنی است.

تاثیر هر یک از مولفه‌ها و میزان مقاومت فشاری نمونه‌ها بعد از ۳۰۰ سیکل نسبت به نمونه مرجع در جدول ۶ نشان داده شده است. با افزایش پساب به ۵۰، ۷۰ و ۱۰۰٪ مقاومت و دوام به میزان ۶، ۱۲ و ۲۲۵ کاهش یافت ولی افزودن متاکائولین باعث ثبات و یا افزایش تا ۴٪ مقاومت فشاری بعد از ۳۰۰ سیکل شد که تاثیرپذیری بالای این ماده بر دوام را نشان می‌دهد. الیاف هم به تنهایی نقش موثرتر در افزایش پیوند بین مولفه‌ها و جلوگیری از افزایش و گسترش ترک‌های ناشی از سیکل‌های یخ‌زدن و آب‌شدن شد و باعث حفظ دوام حتی با افزودن تا ۷۰ و ۱۰۰٪ پساب گردید. اثرپذیری افزودن همزمان الیاف و متاکائولین به منظور بهبود دوام، کمتر از افزودن تن‌های متاکائولین یا الیاف است مگر اینکه با افزودن الیاف، افزایش مقاومت کششی یا خمشی و یا حتی کنترل ترک‌های آبرفتگی مدنظر باشد.

جدول ۶. اثر افزودن مولفه‌ها بر دوام نمونه‌های آزمایشگاهی بعد از ۳۰۰ سیکل

نام نمونه	متوسط مقاومت فشاری معادل استوانه ای (مگاپاسکال)	نسبت مقاومت هر نمونه به نمونه مرجع RW0
RW0	34.61	1.00
RW50	32.45	0.94
RW70	30.62	0.88
RW100	27.05	0.78
MRW0	36.16	1.04
MRW50	35.41	1.02
MRW70	35.59	1.03
MRW100	33.47	0.97
FRW0	35.55	1.03
FRW50	34.50	1.00
FRW70	34.56	1.00
FRW100	33.30	0.96
MFRW0	33.37	0.96
MFRW50	32.15	0.93
MFRW70	31.2	0.90
MFRW100	31.60	0.91

مقایسه مقاومت نمونه‌ها در محیط آزمایشگاه و پس از سیکل‌های ذوب و یخبندان نشان داد که نمونه‌های دارای الیاف یا متاکائولین افت مقاومت بسیار کمی بین ۲ تا ۵٪ دارند، و حتی نمونه FRW100 افزایش حدود ۳٪ را تجربه کرده است. دلیل این عملکرد مطلوب، تراکم بیشتر ماتریس سیمانی ناشی از واکنش پوزولانی متاکائولین و م‌هار ترک‌ها توسط الیاف است که نفوذپذیری بتن را کاهش داده و انرژی تنش وارد بر ترک‌ها را جذب می‌کند. این مکانیسم باعث می‌شود بتن در برابر افزایش حجم آب در منافذ هنگام یخ‌زدگی مقاوم باشد و ریزترک‌ها توسعه نیابند. در مقابل، نمونه‌های دارای پساب بدون افزودنی افت قابل توجهی حدود ۱۰ تا ۱۵٪ داشتند، زیرا تخلخل بالاتر و ماتریس ضعیف‌تر باعث نفوذ بیشتر آب و آسیب در اثر یخ‌زدگی شد. این نتایج نشان می‌دهد که ترکیب بهینه پساب و افزودنی‌ها عامل اصلی بهبود دوام و مقاومت بتن در شرایط محیطی سخت است و استفاده از الیاف و متاکائولین، به صورت جداگانه یا توأمان، می‌تواند مقاومت فشاری را به طور چشمگیر افزایش دهد. بنابراین، بهترین عملکرد دوام تحت سیکل‌های یخ‌زدگی-ذوب برای نمونه FRW100 با ۱۷٪ افزایش نسبت به نمونه پایه حاصل شد، رتبه دوم برای نمونه FRW50 با افت ۱۵٪ نسبت به FRW100 و رتبه سوم برای نمونه MRW70 با ۶۱٪ افزایش نسبت به نمونه بدون افزودنی هم‌رده است. این نتایج نشان می‌دهد که انتخاب نوع افزودنی و درصد بهینه پساب، نقشی کلیدی در افزایش دوام بتن در شرایط سخت محیطی دارد.

۴. نتیجه گیری

طرح اختلاط های مختلف بتن حاوی درصدهای مختلف پساب فاضلاب شهری مهدیشهر در استان سمنان جایگزین آب معمولی به‌مراه استفاده از متاکائولین در این تحقیق بررسی شدند و آزمایشات مقاومت مکانیکی به‌مراه دوام در مقابل سیکل های یخ زدن و آب شدن انجام شدند که نتایج زیر حاصل گردید:

- نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که استفاده از پساب و افزودنی‌ها (الیاف و متاکائولین) اثر قابل توجهی بر مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی بتن دارد. در نمونه‌های ۷ روزه، بیشترین مقاومت فشاری مربوط به FRW100 با ۴۱،۴۵ مگاپاسکال است؛ این افزایش ناشی از ترکیب کامل پساب و الیاف است. پساب با پر کردن منافذ و تسریع واکنش هیدراتاسیون، ساختار بتن را متراکم می‌کند و الیاف با کنترل و م‌هار ترک‌های ریز، مانع گسترش آن‌ها می‌شوند، که باعث افزایش ۳۲٪ مقاومت نسبت به نمونه RW100 بدون افزودنی می‌شود. در همین حالت، نمونه‌های FRW50 و RW70 نیز مقاومت‌های مناسبی نشان دادند.

- بتن حاوی تن‌ها ۱۰۰٪ پساب دارای افت مقاومت فشاری ۲۰٪ در ۱۲۰ روز نسبت به نمونه مرجع بود ولی با اینحال مقاومت فشاری مشخصه مورد نظر را تامین نمونه است. افزودن متاکائولین باعث جبران این افت به ۵٪ شد که تاثیر ۱۵٪ افزایش مقاومت با متاکائولین در این بتن را نشان داد.

- در نمونه‌های ۲۸ روزه، بیشترین مقاومت فشاری مربوط به بتن مرجع FRW0 با ۳۷،۸۸ مگاپاسکال بود. نمونه FRW50 با ۳۶،۸۰ مگاپاسکال تن‌ها ۳٪ کاهش نسبت به مرجع داشت که نشان می‌دهد استفاده از ۵۰٪ پساب با مدیریت مناسب کیفیت، بدون افت چشمگیر مقاومت امکان‌پذیر است. افزودن متاکائولین و الیاف به بتن با ۱۰۰٪ پساب مقاومت را به ترتیب تا ۱۷٪ و ۳۲٪ افزایش داد. در درصدهای پایین‌تر پساب، اثر متاکائولین محدود یا حتی منفی بود، اما الیاف در ۵۰٪ پساب باعث افزایش مقاومت شدند. در ۷۰٪ پساب، الیاف به دلیل ضعف پیوستگی و افزایش تخلخل، مقاومت را کاهش دادند.

- مقاومت کششی برزلی نیز نشان داد که نمونه FRW70 با ۴،۱۱ مگاپاسکال بیشترین مقاومت را دارد که ناشی از طرح اختلاط مناسب، حضور الیاف یا افزودنی و چسبندگی بهتر و تراکم بالای بتن است. افزودن متاکائولین در RW100 مقاومت کششی را تا ۳۷٪ افزایش داد، و الیاف در RW70 و RW100 باعث افزایش مقاومت به ترتیب ۴۰٪ و ۳۸٪ شدند. اثر همزمان متاکائولین و الیاف

بیشترین افزایش را در RW100 (۳۹٪) ایجاد کرد، و پس از آن RW50 (۳۳٪) و RW70 (۲۱٪) قرار گرفتند. این افزایش‌ها ناشی از بهبود چسبندگی، کاهش نفوذپذیری و کنترل ترک‌هاست و نشان می‌دهد که ترکیب متاکائولین و الیاف راهکار مؤثری برای بهبود عملکرد کششی بتن‌های دارای پساب است.

● در مقاومت خمشی ۴ نقطه‌ای، بیشترین مقدار در نمونه FRW100 با ۶,۴۷ مگاپاسکال مشاهده شد که نشان‌دهنده نقش مثبت الیاف در بهبود ظرفیت خمشی بتن‌های دارای پساب است. افزایش درصد پساب تا ۱۰۰٪ باعث تشکیل ماتریس یکنواخت‌تر و پراکندگی بهتر الیاف شده و ظرفیت خمشی را افزایش داد. نمونه‌های MRW70 و FRW50 نیز مقاومت‌های خمشی مناسبی داشتند و تفاوت میان نمونه‌ها اندک بود، که نشان می‌دهد حتی در درصدهای پایین‌تر پساب، ترکیب مناسب الیاف و افزودنی می‌تواند مقاومت خمشی قابل قبولی ایجاد کند. افزودن متاکائولین در MRW70 و MRW100 باعث افزایش مقاومت خمشی تا ۱۶٪ و ۱۰٪ شد، در حالی که در RW50 کاهش مقاومت مشاهده شد؛ این موضوع نشان‌دهنده وابستگی اثر متاکائولین به درصد پساب و نیاز آبی مخلوط است. استفاده همزمان از متاکائولین و الیاف در اکثر نمونه‌ها اثر منفی داشت و باعث کاهش مقاومت خمشی شد، مگر در RW100 که افزایش ۱۰٪ مشاهده شد.

● آزمایش دوام تحت سیکل‌های ذوب و یخبندان نشان داد که بالاترین مقاومت پس از ۳۰۰ سیکل متعلق به FRW100 با ۴۶,۱۸ مگاپاسکال است. این نمونه به دلیل ترکیب کامل پساب و الیاف، ماتریس متراکم و چسبندگی بالاتری دارد و ترک‌خوردگی در اثر یخ‌زدگی و ذوب کاهش یافته است. نمونه FRW50 حدود ۱۵٪ کمتر از FRW100 مقاومت داشت و نمونه MRW70 با ۳۸,۲۶ مگاپاسکال نشان داد که متاکائولین با پر کردن منافذ و کاهش نفوذپذیری دوام بتن را افزایش می‌دهد. نمونه RW70 بدون افزودنی کمترین مقاومت را داشت، که ضعف ساختار و تخلخل بالای آن علت اصلی بود. نمونه‌های دارای متاکائولین، الیاف یا ترکیب هر دو، افت مقاومت ناچیزی در برابر سیکل‌های ذوب و یخبندان نشان دادند، و حتی FRW100 کمی افزایش مقاومت داشت.

● درنتیجه، بهترین عملکرد بتن در استفاده از ۵۰٪ پساب همراه با افزودنی‌های متاکائولین و الیاف حاصل می‌شود که باعث افزایش مقاومت فشاری، کششی و خمشی، کاهش تخلخل و بهبود دوام در شرایط محیطی سخت می‌شود. درصدهای بالاتر پساب (۷۰-۱۰۰٪) بدون طراحی مناسب باعث کاهش مقاومت و افزایش تمرکز تنش می‌شوند، اما با ترکیب صحیح افزودنی‌ها می‌توان افت مقاومت را جبران کرد. الیاف بیشترین تأثیر مثبت را در بتن‌های دارای پساب بالا داشته و متاکائولین بیشترین اثر را در بهبود ریزساختار و مقاومت خمشی نمونه‌های دارای پساب ۷۰-۱۰۰٪ نشان می‌دهد.

● به طور کلی، استفاده از ۵۰٪ پساب همراه با متاکائولین و الیاف راهکاری اقتصادی، پایدار و محیط‌زیست‌پسند برای تولید بتن با عملکرد مکانیکی و دوام مناسب است. این ترکیب علاوه بر صرفه‌جویی در مصرف آب شرب، کاهش هزینه‌ها و حفظ محیط زیست، خواص بتن را در برابر بارهای فشاری، خمشی و کششی و شرایط محیطی سخت (سیکل‌های ذوب و یخبندان) بهبود می‌بخشد و گزینه مناسبی برای ساخت بتن سبز و اقتصادی محسوب می‌شود.

● از آنجائیکه ویژگی‌ها و کیفیت پساب فاضلاب شهری در نقاط مختلف ممکن است متفاوت باشد، توصیه می‌شود طرح اختلاط‌های ارائه‌شده در این پژوهش بعنوان راهنما استفاده گردد. لازم است آزمایش‌های جداگانه بر اساس کیفیت پساب و خواص بتن هر منطقه بطور جداگانه انجام شود تا قابلیت کاربرد برای یک منطقه خاص باشد.

قدردانی

نویسندگان مقاله از مدیرعامل و کارشناسان سازمان عمران و بازآفرینی فضاهای شهری شهرداری سمنان به دلیل حمایت و همکاری ارزشمندشان، و نیز از کارشناس آزمایشگاه بتن دانشگاه سمنان صمیمانه قدردانی می کنند.

مراجع

شریعتی پور، سعید، شربتدار، محمدکاظم (۱۴۰۲)، بهبود دوام تحت چرخه های انجماد و ذوب و مقاومت فشاری بتن های خودمترکم با جایگزینی متاکائولین با سیمان، دهمین کنفرانس ملی بتن ایران، تهران، ایران.

- [1] Ali, S., & Hussain, R. (2017). *Mechanical properties of green concrete with recycled aggregates*. *Construction and Building Materials*, 146, 455–463.
- [2] Babu, G. L. S., & Kumar, V. G. (2017). *Use of treated wastewater for concrete mixing*. *Journal of Environmental Management*, 203, 843–850. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.07.043>.
- [3] Chen, R., Yu, Y., & Zhang, J. (2021). *Engineering properties and environmental impact of sustainable concrete with fly ash and GGBS*. *Construction and Building Materials*, 316, 125776. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125776>.
- [4] Gupta, T., Siddique, S., & Sharma, R. K. (2020). *Influence of waste rubber fibers on the mechanical strength and durability of green concrete*. *Journal of Cleaner Production*, 258, 120561. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120561>.
- [5] Hossain, K. M. A. (2017). *Performance of volcanic ash and pumice based blended cement concretes in marine environments*. *Cement and Concrete Composites*, 83, 81–92. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.07.002>.
- [6] Kumar, P., Singh, A., & Verma, S. (2019). *Sustainable concrete using industrial by-products: A review*. *Journal of Cleaner Production*, 228, 1237–1250. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.303>.
- [7] Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, properties, and materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- [8] Moral, M., Etxeberria, M., & Aguado, A. (2021). *Reuse of wastewater treatment plant effluents in concrete production: Environmental and mechanical benefits*. *Resources, Conservation and Recycling*, 169, 105503. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105503>.
- [9] Muthusamy, K., & Zamri, N. (2016). *Mechanical properties and durability performance of concrete containing rice husk ash*. *Journal of Cleaner Production*, 112, 731–740. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.064>.
- [10] Rahimi, A., & Zeinab, M. (2021). *Use of treated wastewater in concrete: Environmental and mechanical impacts*. *Environmental Engineering Research*, 26(5), 1–12.
- [11] Rahman, M. A., Al-Azzawi, W., & Sarker, P. K. (2020). *Use of recycled wastewater in concrete: A review*. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5), 104237. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104237>.
- [12] Smith, J. (2018). *Global CO2 emissions from cement production*. *Environmental Science & Technology*, 52(12), 6985–6993.
- [13] Thomas, M., & Wilson, M. L. (2021). *Supplementary cementing materials in concrete: Sus-*

tainability and durability. *Cement and Concrete Research*, 143, 106394. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106394>.

[14] Zhang, Y., & Li, H. (2020). *Life cycle assessment of sustainable concrete mixtures*. *Journal of Sustainable Construction Materials*, 9(3), 215–229.