



تولید بتن خودمتر اکم سبز با استفاده از پساب تصفیه شده خروجی تصفیه خانه فاضلاب شهری

محمود صادق پور

الهام اسدپوریان

پویا کریمی

نویسندگان: مهدی محسن زاده

چکیده:

صنعت ساخت و ساز یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان آب شرب به‌شمار می‌رود. در این مطالعه، عملکرد بتن ساخته شده با استفاده از فاضلاب شهری تصفیه شده، به‌عنوان جایگزینی برای آب شرب در فرآیند اختلاط، مورد بررسی قرار گرفته است. ده طرح اختلاط مختلف تهیه شد که در آن‌ها از آب تصفیه شده با درصد‌های جایگزینی متفاوت (۱۰۰٪، ۷۴٪، ۴۰٪ و ۲۴٪) در مقایسه با طرح کنترل حاوی ۱۰۰٪ آب شرب استفاده گردید. نسبت آب به سیمان در تمامی طرح‌ها برابر با ۰/۵۴ نگه داشته شد و در دو طرح، ۱۰٪ میکروسیلیس نیز به‌عنوان جایگزین سیمان به منظور بررسی بهبود خواص مکانیکی افزوده شد. ویژگی‌های بتن تازه از طریق آزمایش جریان اسلامپ ارزیابی گردید و مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین ۷ و ۲۸ روز اندازه‌گیری شد. همچنین، بررسی‌های ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) برای تحلیل مورفولوژی داخلی و نحوه توزیع ذرات در بتن سخت شده انجام گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش درصد فاضلاب مصرفی، مقاومت فشاری به‌طور جزئی کاهش یافته، اما همچنان در محدوده مجاز برای کاربردهای سازه‌ای باقی مانده است. نکته قابل توجه آن است که طرح اختلاط حاوی میکروسیلیس، بهبود چشمگیری در مقاومت فشاری و روانی از خود نشان داد؛ به‌طوری که در مقایسه با طرح کنترل، افزایش مقاومت فشاری بیش از ۱۱٪ مشاهده گردید. این پژوهش قابلیت استفاده از فاضلاب تصفیه شده در تولید بتن، به‌ویژه در ترکیب با مواد مکمل سیمانی نظیر میکروسیلیس، را تأیید می‌کند. این پژوهش روشی کارآمد برای کاهش مصرف آب شرب در بتن بدون کاهش قابل ملاحظه عملکرد سازه‌ای را ارائه می‌دهد.

Abstract

The construction industry is one of the largest consumers of potable water. This study investigates the performance of concrete made using treated municipal wastewater as a substitute for potable water in the mixing process. Ten different mix designs were prepared, incorporating treated water at various replacement percentages (100%, 74%, 40%, and 24%) compared to a control mix with 100% potable water. The water-to-cement ratio was maintained at 0.54 across all mixes, and in two mixes, 10% microsilica was added as a cement replacement to evaluate improvements in mechanical properties. The fresh concrete properties were assessed through the slump flow test, and the compressive strength of the specimens was measured at 7 and 28 days. Additionally, microstructural analyses were conducted using scanning electron microscopy (SEM) to examine the internal morphology and particle distribution in the hardened concrete. The results indicated that as the percentage of wastewater increased, the compressive strength slightly decreased but remained within acceptable limits for structural applications. Notably, mix designs containing microsilica exhibited significant improvements in compressive strength and workability, with an increase in compressive strength exceeding 11% compared to the control mix. This research confirms the feasibility of using treated wastewater in concrete production, particularly when combined with supplementary cementitious materials like microsilica. It presents an effective approach to reducing potable water consumption in concrete without significantly compromising structural performance.

Keywords: Green concrete, treated wastewater, sustainable construction, compressive strength, microsilica

۱- مقدمه

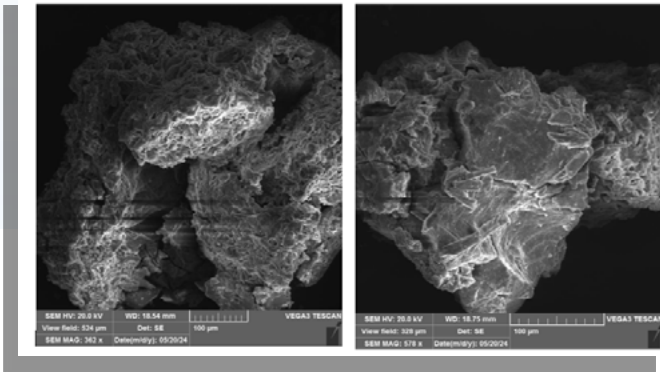
برای مصرف انسان قابل‌دسترس است. تغییرات اقلیمی، گسترش شهرنشینی و فعالیت‌های صنعتی، بحران جهانی آب را به‌ویژه در مناطقی مانند ایران تشدید کرده است. افزایش جمعیت و کاهش منابع تجدیدپذیر آب، یافتن منابع جایگزین آب برای مصارف صنعتی را به یک اولویت حیاتی تبدیل کرده است [۴].

در این میان، استفاده از منابع غیرمترعارف آب نظیر فاضلاب شهری تصفیه شده در تولید بتن، توجه پژوهشگران و صنعت‌گران را به خود جلب کرده است. استانداردهای ملی و بین‌المللی بر اهمیت رعایت معیارهای دقیق کیفیت آب تأکید دارند [۵]. این استانداردها، حدود مجاز مشخصی برای کلراید، سولفات و جامدات معلق تعیین کرده‌اند تا از بروز آثار مخرب بر خواص بتن جلوگیری شود [۶]. عدم تطابق با این شاخص‌ها می‌تواند منجر به کاهش مقاومت بتن، خوردگی آرماتورها، لکه‌دار شدن سطح و تأخیر در گیرش سیمان گردد [۷]. بنابراین، انجام آزمایش‌های دقیق و پایبندی کامل به ضوابط مقرراتی، شرط لازم برای استفاده از منابع آبی جایگزین در طرح اختلاط بتن است [۸]. فاضلاب شهری تصفیه شده، در صورت تصفیه کافی، می‌تواند به‌عنوان جایگزینی پایدار برای آب

صنعت ساخت و ساز در مقیاس جهانی با فشار فزاینده‌ای برای کاهش اثرات زیست‌محیطی و حرکت به‌سوی شیوه‌های ساخت و ساز پایدار مواجه است؛ این مسئله ناشی از افزایش تقاضا برای انرژی، کاهش منابع طبیعی و بحران فزاینده کم‌آبی است [۱]. بتن، به‌عنوان پرمصرف‌ترین ماده ساختمانی در جهان، نقشی حیاتی در توسعه زیرساخت‌ها ایفا می‌کند، اما هم‌زمان از جمله مواد با مصرف بالای منابع اولیه نیز به‌شمار می‌رود [۲]. تولید سیمان، به‌عنوان جزء اصلی بتن، مسئول حدود ۸ درصد از انتشار جهانی دی‌اکسید کربن است و استخراج مصالح سنگی (سنگدانه‌ها) نیز منجر به تخریب زیست‌بوم‌ها و از بین رفتن زیستگاه‌های طبیعی می‌گردد. علاوه بر این، تولید بتن سنتی به شدت وابسته به آب آشامیدنی است؛ منبعی محدود که در بسیاری از مناطق، به‌ویژه مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران، با تهدید جدی روبه‌روست [۳]. با وجود آنکه بیش از ۷۰ درصد سطح کره زمین را آب پوشانده است، تنها حدود ۳ درصد از این منابع آب شیرین هستند و بخش اندکی از آن

ادامه در صفحه بعد





شکل ۲. تصویر SEM از نمونه بتن سبز خودتراکم

طبق مطالعه کرمی و همکاران (۲۰۲۵) افزون بر این، استفاده از افزودنی‌های سازگار با محیط زیست از جمله مصالح بازیافتی و محصولات جانبی صنعتی، تأثیر چشمگیری در ارتقای ویژگی‌های عملکردی و نیز پایداری زیست‌محیطی بتن ایفا کرد [۱۸]. نکته حائز اهمیت آن است که مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن سبز مورد بررسی، قابل قیاس با بتن معمولی بوده و این موضوع قابلیت اطمینان سازه‌ای آن را در بلندمدت تأیید می‌نماید. بهره‌گیری از طراحی مخلوط دقیق، دانه‌بندی بهینه‌شده، و استفاده راهبردی از مواد مکمل سیمانی، نه تنها موجب بهبود خواص مکانیکی بتن گردیده، بلکه منجر به کاهش چشمگیر اثرات زیست‌محیطی تولید آن شده است؛ موضوعی که با اهداف توسعه پایدار در صنعت ساخت‌وساز هم‌راستا است.

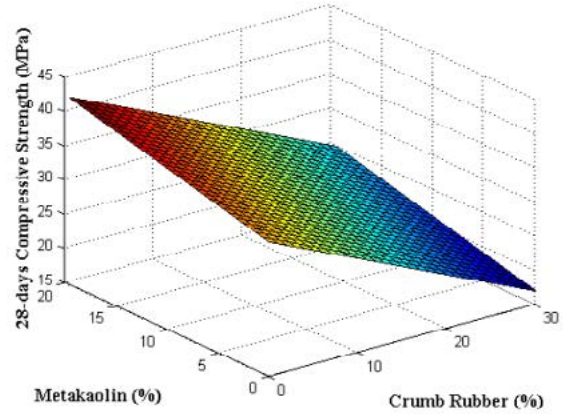
۳- نتایج و بحث

۳-۱- تحلیل مقاومت فشاری

در چارچوب برنامه آزمایشگاهی تدوین‌شده، بررسی دانه‌بندی مصالح سنگی نیز صورت پذیرفت. نتایج نشان داد که شاخص نرمی مصالح برداشت‌شده از دیو سنگ‌شکن برابر با ۰/۴ بوده که از حد مجاز استاندارد (۰/۳) فراتر رفته است. بر این اساس، به‌منظور حصول عملکرد بهینه، از روش طرح اختلاط بتن مرکز تحقیقات مسکن و ساختمان بهره‌گیری شد. در طرح اختلاط مختلف تهیه گردید که هر کدام شامل چهار نمونه مکعبی با ابعاد $14 \times 14 \times 14$ سانتی‌متر بود. از این میان، سه نمونه از هر طرح در سن ۷ روز و دو نمونه در سن ۲۸ روز مورد آزمون مقاومت فشاری قرار گرفتند؛ در مجموع، ۴۰ نمونه آزمایش شدند. هدف از این آزمون‌ها، دستیابی به طرح اختلاطی با کارایی بالا و مقاومت فشاری مطلوب، مناسب برای کاربرد در سازه‌های بتن مسلح بود. طرح اختلاطی که عملکرد مناسبی از نظر روانی و رفتار شکست مکانیکی در سن ۷ و ۲۸ روز از خود نشان داد، به‌عنوان طرح کنترل انتخاب شد. در این طرح، از آب شرب به‌عنوان تنها منبع تأمین آب استفاده شد، در حالی که در سایر طرح‌ها، آب شرب با آب فاضلاب تصفیه‌شده به‌صورت کامل یا به نسبت‌های ۷۴٪، ۴۰٪ و ۲۴٪ جایگزین گردید.

۳-۲- آزمایش جریان اسلامپ

برای ارزیابی روانی مخلوط‌های بتنی، از آزمون جریان اسلامپ استفاده شد. نتایج به‌دست‌آمده کاهش تدریجی مقدار اسلامپ را با افزایش درصد جایگزینی آب فاضلاب تصفیه‌شده نشان دادند. این کاهش می‌تواند به حضور ذرات معلق و تغییرات شیمیایی جزئی در ترکیب فاضلاب نسبت



شکل ۱. تأثیر اندازه ذرات بر مقاومت فشاری ۲۸ روزه

کاربرد اصلی این آزمایش حاضر تأثیر هم‌زمان نانوذرات و متاکائولین بر مقاومت فشاری بتن است. این آزمایش به‌منظور ارزیابی چگونگی بهبود خواص مکانیکی بتن از طریق افزودن نانوذرات، به‌ویژه در حضور افزودنی‌های مکمل مانند متاکائولین، طراحی شده است. نتایج این تحقیق می‌تواند راهگشای توسعه بتن‌های پیشرفته با کارایی بالا باشد، به‌ویژه در پروژه‌هایی که مقاومت فشاری بالا و دوام طولانی‌مدت از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. در ارتباط با پژوهش حاضر، این آزمایش نقش بسیار مهم و مثبتی ایفا کرده است. تجربیات حاصل از اجرای این بررسی به ما نشان داد که استفاده‌ی هم‌زمان از نانوذرات و متاکائولین می‌تواند به‌طور چشمگیری عملکرد مکانیکی بتن را ارتقاء دهد. در واقع، نتایج به‌دست‌آمده به‌وضوح اثبات کرد که حضور متاکائولین، به‌عنوان یک افزودنی فعال پوزولانی، موجب تشدید واکنش پذیری نانوذرات شده و بهبود قابل‌توجهی در ساختار ریزدانه‌ی بتن ایجاد می‌کند؛ که این امر نهایتاً به افزایش چشمگیر مقاومت فشاری منجر می‌شود. این یافته‌ها برای ما بسیار ارزشمند بود، چرا که مسیر طراحی و تولید بتن با مشخصات مهندسی‌شده را هموارتر ساخت. از سوی دیگر، تجربه‌ی کار با ترکیبات نانویی در کنار متاکائولین باعث شد شناخت دقیق‌تری از برهم‌کنش این مواد به‌دست آوریم؛ شناختی که مستقیماً در بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن پروژه‌ی ما مؤثر واقع شد. به‌طور خلاصه، می‌توان گفت که این آزمایش نه‌تنها از نظر علمی، بلکه از دیدگاه عملی نیز ارزش بالایی برای پروژه‌ی ما داشت و نقش کلیدی در پیشبرد کیفیت نهایی محصول ایفا کرد.

توزیع اندازه ذرات به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی در تعیین مقاومت فشاری بتن، به‌ویژه در بازه ۲۸ روز نخست عمل‌آوری، شناسایی شده است. بهینه‌سازی دانه‌بندی ذرات با افزایش تراکم و کاهش فضای خالی در ماتریس بتن، نقش مؤثری در ارتقاء مقاومت فشاری اولیه ایفا می‌کند. به‌طور کلی، این مطالعه تأکید دارد که بهره‌گیری هدفمند و هم‌زمان از نانوذرات و متاکائولین‌ها، در کنار طراحی مناسب دانه‌بندی، می‌تواند به‌عنوان یک رویکرد نوین و اثربخش در افزایش دوام و عملکرد سازه‌های بتن در نظر گرفته شود. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود بتن سبز این پژوهش دارای ریزساختاری یکنواخت و به‌خوبی تعریف‌شده بود، به‌طوری که توزیع ذرات در آن به‌صورت همگن و بدون هرگونه تجمع موضعی (Agglomeration) از مواد ریزدانه یا درشت‌دانه مشاهده شد. نسبت بهینه آب به سیمان (w/c) نقش مؤثری در کاهش جذب مویرگی آب ایفا کرده و در عین حال، کارایی و مقاومت مکانیکی مناسبی را برای بتن حفظ نمود.





Environmental Analytical Chemistry, 2025: p. 1-27.

6. Li, F.-F., et al., Atmospheric Water Resources and Their Exploitability in the Middle East. *Journal of Hydrometeorology*, 2025. 26(3): p. 273-291.

7. Mohsenzadeh, M.M., N. Hamidi, and S. Hasanzadeh. A Novel Dual-Input Single-Output Boost Inverter Topology with Dual-Control Mechanism. in 2025 12th Iranian Conference on Renewable Energies and Distributed Generation (ICREDG). 2025. IEEE.

8. Karimidastenaee, Z., et al., Unconventional water resources: Global opportunities and challenges. *Science of the Total Environment*, 2022. 827: p. 154429.

9. Ahmad, S., et al., Water resources and their management in Pakistan: A critical analysis on challenges and implications. *Water-Energy Nexus*, 2023. 6: p. 137-150.

10. Grison, C., et al., Integrated water resources management in cities in the world: global challenges. *Water Resources Management*, 2023. 37(6): p. 2787-2803.

11. Hashmi, A.F., et al., Green concrete: an eco-friendly alternative to the OPC concrete. *Construction*, 2022. 2(2): p. 93-103.

12. Gupta, K., et al., A Quasi-Newton Method to Solve Uncertain Multiobjective Optimization Problems with Uncertainty Set of Finite Cardinality. *arXiv preprint arXiv:2505.13967*, 2025.

13. Al-Hamrani, A., et al., Green concrete for a circular economy: A review on sustainability, durability, and structural properties. *Materials*, 2021. 14(2): p. 351.

14. Mudiyo, R., A.D. Haidar, and A. Fredy. Analysis of Environmentally Friendly Concrete (Green Concrete) Using Coal Fly Ash as a Substitute Material for Portland Cement in Road Pavement. in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2024. IOP Publishing.

15. Karamifar, M., et al., Ultrasonic-assisted synthesis of TiO₂/MWCNT/Pani nanocomposite: Photocatalyst characterization and optimization of efficient variables in the degradation of benzene via RSM-CCD. *Powder Technology*, 2024. 432: p. 119176.

16. Alani, A.H., et al., Optimizing strength behavior of sustainable ultra high performance green concrete with minimum cement content using response surface method. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 2024. 9(2): p. 110.

17. Chen, Z., M. Li, and L. Guan, Safety and Effect of Fly Ash Content on Mechanical Properties and Microstructure of Green Low-Carbon Concrete. *Applied Sciences*, 2024. 14(7): p. 2796.

18. Karami, P., et al., Eco-Friendly Synthesis of Copper Nanoparticles for Efficient Congo Red Dye Removal from Wastewater. *Iranian Journal of Science*, 2025: p. 1-15.

19. Ghaedi, H. and M. Bahrami, Evaluating the Quality of Shiraz Wastewater Treatment Plant Effluent for Agricultural Uses in Drought Conditions Utilizing IRWQI, NSFQI, and OWQI Indicators. *Journal of Drought and Climate change Research*, 2024. 2(1): p. 1-14.

20. Karami, Pouya and Mohsenzadeh, Mahdi, 1403, Dual Functional Conductive Hydrogels based on Polyaniline: An Innovative Approach for Urban Wastewater Treatment, *Environment Management in Shiraz City, Shiraz*, <https://civilica.com/doc/2151676>

داده شود که خواص رئولوژیکی بتن تازه را تحت تأثیر قرار می‌دهند. مطالعه‌ای مقایسه‌ای توسط فاندی همکاران (۲۰۲۴) در زمینه استفاده از آب شست‌وشوی بتن در تولید بتن تازه، نشان داد که این آب می‌تواند زمان گیرش نهایی سیمان را کاهش دهد، بدون آنکه تأثیر معناداری بر روانی داشته باشد. با این حال، استفاده از میکروسیلیس و افزودنی‌های شیمیایی در آن پژوهش منجر به کاهش مقاومت فشاری شد [۱۹]. لازم به ذکر است که پژوهش مذکور بر بتن معمولی متمرکز بود، در حالی که مطالعه حاضر بر بتن خود متراکم (SCC) با استفاده از فاضلاب تصفیه‌شده شهری از تصفیه‌خانه شیراز متمرکز دارد [۲۰].

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

این مطالعه به بررسی امکان‌سنجی فنی و زیست‌محیطی استفاده از فاضلاب تصفیه‌شده شهری به‌عنوان جایگزین جزئی یا کامل آب شرب در تولید بتن خودمتراکم سبز پرداخت. در چارچوب یک برنامه آزمایشگاهی جامع شامل سه طرح اختلاط با سطوح مختلف جایگزینی فاضلاب و مقادیر متفاوت میکروسیلیس، پارامترهای کلیدی نظیر روانی و مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روز مورد بررسی قرار گرفتند. یافته‌ها نشان دادند که جایگزینی آب شرب با فاضلاب تصفیه‌شده، کاهش متوسطی در مقاومت فشاری ۷ روزه ایجاد می‌کند؛ با این حال، تمامی مقادیر کاهش کمتر از ۱۰٪ و در محدوده مجاز آیین‌نامه‌ای قرار داشتند. نتایج ۲۸ روزه نیز مؤید آن بود که عملکرد مقاومت فشاری درازمدت بتن حاوی فاضلاب تصفیه‌شده با بتن متداول قابل مقایسه است. به‌ویژه، استفاده از میکروسیلیس به‌عنوان جایگزین جزئی سیمان منجر به افزایش چشمگیر مقاومت فشاری حتی در نمونه‌هایی با ۱۰۰٪ فاضلاب شد، به‌طوری که افزایش مقاومت بیش از ۱۱٪ مشاهده گردید. این ارتقاء به واکنش پوزولانی و اثرات میکروفیلری میکروسیلیس نسبت داده می‌شود که موجب تراکم بیشتر ماتریس بتنی و بهبود فرآیند هیدراتاسیون می‌گردد. همچنین، نتایج آزمون جریان اسلامپ نشان‌دهنده کاهش روانی با افزایش مقدار فاضلاب مصرفی بودند، ولی مقادیر حاصله همچنان در محدوده قابل قبول بتن‌های خودمتراکم قرار گرفتند. تحلیل ریزساختاری نیز توزیع یکنواخت ذرات و عدم وجود توده‌شدگی را تأیید نمود که مؤید دوام بلندمدت و پایداری سازه‌های طرح‌های اختلاط بود.

در مجموع، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از فاضلاب شهری تصفیه‌شده، در صورت رعایت استانداردهای کیفی مناسب، می‌تواند به‌عنوان راهکاری عملی و پایدار در تولید بتن مورد استفاده قرار گیرد، بدون آنکه عملکرد مکانیکی یا دوام بتن را به‌طور معناداری کاهش دهد. این رویکرد، گامی مؤثر در راستای کاهش مصرف آب شرب در صنعت ساخت‌وساز و تحقق اهداف ساختمان سبز و توسعه پایدار محسوب می‌شود.

منابع

1. Karami, P., et al., Biosynthesized ZnO and MnO nanoparticles from Aegle marmelos peel extract for alkylphenol removal in wastewater. *Results in Chemistry*, 2025. 13: p. 102018.
2. Fode, T.A., Y.A.C. Jande, and T. Kivevele, Physical, mechanical, and durability properties of concrete containing different waste synthetic fibers for green environment-A critical review. *Heliyon*, 2024.
3. Abbasi, F., et al., A Review of Water Consumption Management Indicators of different Crops in Iran. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 2024. 25(94): p. 1-16.
4. Lotfifrad, M., et al., Allocation of water resources with management approaches and under climate change scenarios in an arid and semi-arid watershed (study area: Hablehroud watershed in Iran). *Applied Water Science*, 2025. 15(4): p. 74.
5. Agbasi, J.C., et al., Reimagining water quality assessment: a nutritional indexing perspective for drinking water resources management. *International Journal of En-*