

• **Model Yorumlanabilirliği ve Açıklanabilir YZ (XAI)**

İhtiyacı: Birçok gelişmiş YZ/MÖ modeli, özellikle Derin Sinir Ağları (DNN'ler) ve karmaşık topluluk modelleri (ensemble models), genellikle "kara kutu" (black box) olarak nitelendirilir. Bu, modellerin son derece doğru tahminler yapabilmesine rağmen, bu tahminlere veya kararlara nasıl ulaştıklarının, yani içsel karar verme mekanizmalarının insanlar tarafından kolayca anlaşılamaması anlamına gelir. Bu durum, özellikle yapısal güvenlik ve dayanıklılığın hayati önem taşıdığı inşaat ve beton teknolojisi sektöründe ciddi bir endişe kaynağıdır [25]. Eğer bir mühendis, bir YZ modelinin neden belirli bir beton karışımını önerdiğini, bir yapıda neden bir hasar riski öngördüğünü veya bir malzemenin neden belirli bir performansı sergileyeceğini tahmin ettiğini anlayamazsa, o modele güvenmesi ve kritik kararlarını bu tahminlere dayandırması beklenemez. Bu güvensizlik, YZ/MÖ teknolojilerinin endüstriyel ölçekte benimsenmesini ve pratik uygulamalarda yaygınlaşmasını yavaşlatan önemli bir faktördür. YZ/MÖ'nün "kara kutu" doğası ile inşaat endüstrisinin doğası gereği riskten kaçınan ve muhafazakâr yapısı arasındaki bu etkileşim, teknoloji transferini ve pratik uygulamayı yavaşlatan bir tür kısır döngü yaratma potansiyeline sahiptir. Açıklanabilir Yapay Zekâ (Explainable Artificial Intelligence - XAI) teknikleri, bu döngüyü kırmak için kritik bir anahtar sunmaktadır. SHAP (SHapley Additive exPlanations), LIME (Local Interpretable Model-agnostic Explanations) gibi XAI yöntemleri, modelin belirli bir tahmin için hangi girdi özelliklerine ne kadar önem verdiğini, bu özelliklerin tahmini ne yönde etkilediğini ve özellikler arasındaki potansiyel etkileşimleri ortaya koyarak model kararlarını daha şeffaf ve anlaşılır hale getirmeye yardımcı olabilir, ancak XAI tekniklerinin kendileri de hâlâ gelişim aşamasındadır ve özellikle çok karmaşık modeller için tam bir açıklanabilirlik sağlamak zor olabilir. Bu alanda daha fazla araştırmaya ve kullanıcı dostu XAI araçlarının geliştirilmesine ihtiyaç vardır. Model şeffaflığı (XAI aracılığıyla) artırılmadıkça, endüstrinin YZ/MÖ'ye olan güvensizliği devam edecek ve bu da veri toplama, yatırım yapma ve uzman yetiştirme gibi diğer önemli gelişim alanlarını olumsuz etkileyerek teknolojinin yaygınlaşmasını engelleyecektir. Bu nedenle XAI, sadece teknik bir iyileştirme değil, aynı zamanda YZ/MÖ ile endüstri arasında bir güven köprüsü kuran sosyo-teknik bir gerekliliktir.

• **Endüstrinin YZ/MÖ Teknolojilerini Benimseme Hızı ve Direnç:** İnşaat sektörü, geleneksel olarak dijitalleşme ve yeni teknolojileri benimseme konusunda diğer sektörlerle kıyasla daha muhafazakâr ve yavaş bir tutum sergilemektedir. Bu durumun altında yatan birçok neden bulunmaktadır:

Projelerin yüksek risk ve maliyet içermesi nedeniyle denenmiş ve test edilmiş yöntemlere olan güçlü bağlılık, her projenin kendine özgü ve değişken olması nedeniyle standart çözümlerin uygulanmasındaki zorluklar, sektörün proje bazlı ve genellikle parçalı bir yapıya sahip olması (farklı paydaşların farklı aşamalarda sorumluluk alması), ve veri paylaşımına yönelik genel bir isteksizlik gibi kültürel ve yapısal engeller, YZ/MÖ gibi yenilikçi teknolojilerin yaygınlaşmasını zorlaştırmaktadır. Bu direncin kırılması, teknolojinin faydalarının somut bir şekilde gösterilmesi, başarılı uygulama örneklerinin yaygınlaştırılması ve endüstri profesyonellerine yönelik eğitim ve farkındalık programlarının artırılması ile mümkün olabilir.

• **Yüksek Başlangıç Maliyetleri ve Uzman Personel**

İhtiyacı: YZ/MÖ sistemlerinin geliştirilmesi, uygulanması ve sürdürülebilir bir şekilde bakımı; uygun veri toplama altyapısının kurulması, gelişmiş yazılımların ve donanımların tedarik edilmesi ve en önemlisi bu sistemleri tasarlayacak, eğitecek, yönetecek ve yorumlayacak yetenekli veri bilimcileri, YZ uzmanları ve saha bilgisine sahip mühendisler gibi kalifiye personel istihdamını gerektirir. Tüm bunlar, özellikle küçük ve orta ölçekli işletmeler için önemli bir engel teşkil edebilecek yüksek başlangıç maliyetleri anlamına gelmektedir. Ayrıca hem inşaat sektöründe hem de genel olarak YZ/MÖ alanında yetenekli uzman açığı bulunmaktadır, bu da uygun personeli bulmayı ve elde tutmayı zorlaştırmaktadır.

• **Standardizasyon ve Regülasyon Eksikliği:** Beton teknolojisinde YZ/MÖ uygulamaları için henüz tam olarak oluşturulmuş standartlaştırılmış veri formatları, test protokolleri, model doğrulama prosedürleri ve performans değerlendirme yönergeleri bulunmamaktadır. Bu durum, farklı araştırmacılar veya kurumlar tarafından geliştirilen modellerin ve elde edilen sonuçların birbirleriyle karşılaştırılmasını, doğrulanmasını ve genelleştirilmesini zorlaştırmaktadır. Mevcut tahribatsız muayene (NDT) standartları (örneğin, ASTM, ACI, EN, ISO tarafından yayımlananlar) dâhenüz YZ/MÖ tekniklerinin entegrasyonunu ve bu tekniklerle elde edilen sonuçların nasıl yorumlanacağını tam olarak ele almamaktadır. Bu belirsizlikler, teknolojinin endüstriyel kabulünü ve güvenilirliğini olumsuz etkileyebilir.

• **Teknik Sınırlamalar ve Aşırı Uyuma (Overfitting) Riski:**

YZ/MÖ modelleri, özellikle eğitim için kullanılan veri seti sınırlı, gürültülü veya belirli bir problemi tam olarak temsil etmiyorsa, "aşırı uyuma" (overfitting) riskine yatkındır. Aşırı uyuma, modelin eğitim verilerindeki örüntüleri ve gürültüyü ezberlemesi, ancak yeni ve daha önce görmediği veriler üzerinde düşük tahmin performansı sergilemesi durumudur.

Bu, modelin gerçek dünya uygulamalarında güvenilir olmamasına yol açar. Ayrıca, laboratuvar koşullarında belirli bir malzeme seti ve test prosedürü ile geliştirilen bir modelin, farklı malzeme kaynakları, farklı çevresel koşullar (sıcaklık, nem), farklı inşaat pratikleri veya farklı yapı tipleri arasında genelleştirilmesi, yani benzer bir doğrulukla çalışması genellikle zordur. Bu genelleme sorunu, YZ/MÖ modellerinin pratik değerini sınırlayan önemli bir teknik engeldir.

6. Sonuç

Bu rapor, beton teknolojisi alanında yapay zekâ (YZ) ve makine öğreniminin (MÖ) artan rolünü, mevcut uygulamalarını, karşılaşılan zorlukları ve gelecekteki potansiyelini kapsamlı bir şekilde incelemiştir. Elde edilen bulgular, YZ/MÖ'nün beton endüstrisinde önemli dönüşümler yaratma kapasitesine sahip olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

- YZ/MÖ teknikleri, beton karışım tasarımının optimizasyonu, taze ve sertleşmiş beton özelliklerinin (basınç dayanımı, işlenebilirlik vb.) doğru bir şekilde tahmin edilmesi, yapısal sağlık izlemesi yoluyla hasarların (özellikle çatlakların) erken tespiti ve sınıflandırılması, beton dayanıklılığının ve kalan kullanım ömrünün değerlendirilmesi, üretim süreçlerinde kalite kontrolünün artırılması ve sürdürülebilir beton uygulamalarının (düşük karbonlu beton geliştirme, atık malzemelerin kullanımı) teşvik edilmesi gibi beton teknolojisinin birçok kritik alanında önemli faydalar sağlamaktadır. Bu uygulamalar, çok sayıda akademik çalışma ve bazı endüstriyel pilot projelerle desteklenmektedir.
- Bu teknolojilerin kullanımı, malzeme geliştirme ve test süreçlerinde önemli ölçüde zaman ve maliyet tasarrufu sağlama, beton performansını ve kalitesini artırma, yapıların güvenliğini ve ömrünü uzatma ve daha çevre dostu, sürdürülebilir inşaat çözümleri geliştirme potansiyeline sahiptir.
- YZ/MÖ'nün beton teknolojisinde yaygın olarak benimsenmesinin önünde önemli engeller bulunmaktadır. Bunlar arasında en belirgin olanları; büyük, çeşitli ve yüksek kaliteli veri setlerine erişimdeki zorluklar ve veri paylaşımındaki isteksizlik; birçok YZ/MÖ modelinin (özellikle derin öğrenme modellerinin) kararlarının yorumlanmasındaki güçlükler ve buna bağlı güven eksikliği; inşaat sektörünün yeni teknolojilere adaptasyonundaki genel yavaşlık ve kültürel direnç; YZ/MÖ sistemlerinin geliştirilmesi ve uygulanması için gereken yüksek başlangıç maliyetleri ve kalifiye uzman personel eksikliği; ve son olarak, veri formatları, model doğrulama prosedürleri ve etik kullanım konularında standartlaşma ve regülasyon eksikliğidir.

Yapay zekâ ve makine öğrenimi, beton teknolojisinde bir devrim yaratma potansiyeline sahiptir. Bu teknolojiler, betonun tasarımından üretimine, uygulanmasından ömrünün sonuna kadar olan tüm yaşam döngüsünü daha akıllı, daha verimli, daha güvenli ve daha sürdürülebilir hâle getirme vaadi taşımaktadır. Gelecekte, YZ/MÖ'nün, malzeme bilimindeki temel anlayışımızı derinleştirilmesi, tamamen yeni ve üstün özelliklere sahip betonların keşfedilmesini sağlaması, otonom inşaat süreçlerini yönlendirmesi ve yapıların kendi kendilerini izleyip onarabilen "akıllı" sistemlere dönüşmesine katkıda bulunması beklenmektedir, ancak bu heyecan verici potansiyelin tam olarak gerçekleştirilebilmesi için, mevcut zorlukların üstesinden gelinmesi ve belirlenen önerilerin hayata geçirilmesi gerekmektedir. Bu, sadece daha gelişmiş algoritmalar ve daha güçlü hesaplama kaynakları geliştirmekle sınırlı kalmamalı; aynı zamanda veri altyapılarının iyileştirilmesi, açıklanabilir ve güvenilir YZ sistemlerinin tasarlanması, endüstriyel standartların ve etik kuralların oluşturulması, multidisipliner iş birliklerinin güçlendirilmesi ve en önemlisi insan kaynağının bu yeni teknoloji çağına hazırlanması gibi çok boyutlu çabaları içermelidir.

Sonuç olarak, beton teknolojisinde yapay zekâ ve makine öğreniminin rolü giderek artacak ve bu alandaki inovasyonun temel itici güçlerinden biri olmaya devam edecektir. Teknolojinin sorumlu, etik ve insan odaklı bir yaklaşımla benimsenmesi ve geliştirilmesi, beton endüstrisinin gelecekteki zorluklara daha etkin bir şekilde yanıt vermesini ve toplum için daha değerli, dayanıklı ve sürdürülebilir yapılar inşa etmesini sağlayacaktır. Bu yolda devam eden araştırma, geliştirme, eğitim ve iş birliği çabaları, YZ/MÖ'nün sunduğu fırsatları en üst düzeye çıkarmak için hayati öneme sahiptir.

Kaynaklar

1. Ahmed, H. Q., Umm E. H., Muhammed, A. S., Koç, M., & Mosbeh, R. K. (2023). Machine learning in concrete technology: A review of current researches, trends, and applications. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/368575926_Machine_learning_in_concrete_technology_A_review_of_current_researches_trends_and_applications
2. Azuaje, Francisco & Witten, Ian & E, Frank. (2006). Witten IH, Frank E: Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques. Biomedical Engineering Online - BIOMED ENG ONLINE. 5. 1-2.
3. Nikoopayan Tak, M. S., Feng, Y., & Mahgoub, M. (2025). Advanced Machine Learning Techniques for Predicting Concrete Compressive Strength. Infrastructures, 10(2), 26. <https://doi.org/10.3390/infrastructures10020026>

4. Datta, Shuvo & Islam, Mobasshira & Sobuz, Md. Habibur & Ahmed, Shakil & Kar, Moumita. (2024). Artificial intelligence and machine learning applications in the project lifecycle of the construction industry: A comprehensive review. *Heliyon*. 10.1016/j.heliyon.2024.e26888.
5. Hadi Salehi, Rigoberto Burgueño, Emerging artificial intelligence methods in structural engineering, *Engineering Structures*, Volume 171, 2018, Pages 170-189, ISSN 0141-0296, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.084>.
6. A. Adadi and M. Berrada, "Peeking Inside the Black-Box: A Survey on Explainable Artificial Intelligence (XAI)," in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 52138-52160, 2018, doi:10.1109/ACCESS.2018.2870052.
7. Li, F., Rana, M.S. & Qurashi, M.A. Advanced machine learning techniques for predicting concrete mechanical properties: a comprehensive review of models and methodologies. *Multiscale and Multidiscip. Model. Exp. and Des.* 8, 110 (2025). <https://doi.org/10.1007/s41939-024-00672-4>
8. Marchewka A, Ziolkowski P, García Galán S. Real-time prediction of early concrete compressive strength using AI and hydration monitoring. *Sci Rep.* 2025 May 2;15(1):15463. doi: 10.1038/s41598-025-97060-w. PMID: 40316640; PMCID: PMC12048722.
9. Kaustav Sarkar, Amit Shiuly, Krishna Gopal Dhal, Revolutionizing concrete analysis: An in-depth survey of AI-powered insights with image-centric approaches on comprehensive quality control, advanced crack detection and concrete property exploration, *Construction and Building Materials*, Volume 411, 2024, 134212, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134212>.
10. Alkhraisha, M., Al-Bodour, W., Al-Qadi, M., Alazaizah, M., & Al-Mistarehi, B. (2024). Drexel Researchers Propose AI-Guided System for Robotic Inspection of Buildings, Roads and Bridges. *Drexel University News*. <https://drexel.edu/news/archive/2024/January/AI-robotic-crack-detection-monitoring>
11. FPrimeC Solutions Inc. (2025). 5 ways AI is revolutionizing the NDT of Concrete. <https://fprimec.com/5-ways-ai-is-revolutionizing-the-ndt-of-concrete/>
12. Saleem, H., & Kim, Y. (2023). "A state-of-the-art review on the prediction of concrete durability and service life using artificial intelligence". *Construction and Building Materials*, 366, 130248.
13. North American Academic Research. (2025). Integration of AI-Driven Predictive Maintenance in Smart Concrete Structures to Enhance Sustainability and Lifecycle Efficiency. *Zenodo*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14840495>
14. Basetwo AI. (2024). Efficient and High-Quality Cement Manufacturing with AI. <https://www.basetwo.ai/blogs/cement-manufacturing-improved-with-ai>
15. EROAD USA. (2025). 5 Ways AI is Reshaping How Ready-Mix Fleets Operate. <https://www.eroad.com/blog/5-ways-ai-is-reshaping-how-ready-mix-fleets-operate/>
16. BFT International. (2024, February 20). Unlocking the Future of Precast Concrete Manufacturing with AI. <https://www.bft-international.com/en/news/unlocking-the-future-of-precast-concrete-manufacturing-with-ai-4061087.html>
17. <https://trea.com/information/techniques-for-monitoring-slump-characteristic-of-concrete-in-a-rotating-contain/patentgrant/b7437d97-180a-4aa3-9a26-651b91a3f687>
18. Agarwal, Vivek, Miele, Sarah, Karave, Pranav, & Mahadevan, Sankaran (2020). Concrete Structure Health Monitoring Using Vibro-acoustic Testing and Machine Learning, U.S. Department of Energy Office of Nuclear Energy, 2020. <https://doi.org/10.2172/2448466>
19. <https://www.mtrlab.com.hk/en/news/enabling-predictive-maintenance-with-acoustic-ai/>
20. <https://tr.rheonics.com/solutions-item/mixing-vessels-monitoring-and-controlling-the-mixing-efficiency/>
21. Masatoshi Kudo, Predicting the Slump of Concrete Using an Artificial Intelligence System, https://www.jsce.or.jp/committee/concrete/e/newsletter/newsletter73/Newsletter%2073_files/2.pdf
22. Chen, H., Yang, J., Fang, H., Wu, S., & Lin, B. (2024). Prediction of concrete slump by RGB-D image feature fusion. *Computers and Concrete*, 34(5), 535-546. <https://doi.org/10.12989/CAC.2024.34.5.535>
23. Adeoye, Yetunde & Onotole, Erumusele & Ogunyankinnu, Tunde & Aipoh, Godwin & Osunkanmibi, Akintunde & Egbemhenghe, Joseph. (2025). Artificial Intelligence in Logistics and Distribution: The function of AI in dynamic route planning for transportation, including self-driving trucks and drone delivery systems. *World Journal of Advanced Research and Reviews*. 25. 155-167. 10.30574/wjarr.2025.25.2.0214.
24. S. Barbhuiya and M. S. Sharif, "Artificial Intelligence in Concrete Mix Design: Advances, Applications and Challenges," 2023 International Conference on Innovation and Intelligence for Informatics, Computing, and Technologies (3ICT), Sakheer, Bahrain, 2023, pp. 32-37, doi: 10.1109/3ICT60104.2023.10391485.
25. Kalasampath, Khushi & KN, Spoorthi & Sajeew, Sreeparvathy & Kuppa, Sahil & Ajay, Kavya & Angulakshmi, M. (2025). A Literature Review on Applications of Explainable Artificial Intelligence (XAI). *IEEE Access*. PP. 1-1. 10.1109/ACCESS.2025.3546681.