



KÜB BÜLTENİ

9

Haziran 2025

İÇİNDEKİLER

1	Beton Teknolojisinde Yapay Zekâ ve Makine Öğreniminin Rolü: Katkı Optimizasyonu ve Performans Tahmini	<i>Syf. 1</i>
2	Betonarme Yapılarda Ömür Boyu Performansın Artırılması: Akıllı Katkılar ve Kendini Onaran Beton Teknolojileri	<i>Syf. 7</i>
3	Agresif Ortamlara Dirençli Beton Tasarımında Kimyasal Katkıların Rolü: Özel Uygulamalar ve Zorlu Koşullar	<i>Syf. 12</i>
4	Betonun Reolojisi ve Kimyasal Katkılar: İşlenebilirliğin Bilimi ve Kontrolü	<i>Syf. 17</i>

KÜB HAKKINDA

Katkı Üreticileri Birliği'nin misyonu; kimyasal katkı maddelerinin üretiminin evrensel kalite ölçülerine, ulusal ve uluslararası standartlara uygun olarak, kamu ve toplum yararı doğrultusunda gerçekleştirilmesine katkıda bulunmaktır.

Üyelerimiz, Yapı Kimyasalları Sektörü'nün en önemli firmalarındandır. Beton ve çimento katkı sektörünün üreticilerini çatısı altında toplayarak, onların müşterek ihtiyaçlarını göz önünde bulundurarak sorunlarının çözümünde yardımcı olmak üzere, resmi makamlar, mesleki ve özel kuruluşlarla gerekli girişimlerde bulunmaktadır.

Üyesi olduğumuz İMSAD (Türkiye İnşaat Malzemesi Sanayicileri Derneği), YÜF (Yapı Ürünleri Üreticileri Federasyonu) ve EFCA (Avrupa Beton Katkıları Federasyonu) kuruluşlarının yanı sıra inşaat ve beton sektörünün diğer paydaş kuruluşları ve dernekleriyle de aktif bir birliktelik yürütmekteyiz.

İLETİŞİM

Adres: Bağlarbaşı Mah. Atatürk Cad. Sakarya Sok. Plaza No: 38 D:18 Maltepe / İstanbul

Tel: +90 (216) 456 43 24

E-Posta: info@kub.org.tr

Web sitesi: www.kub.org.tr





1

Beton Teknolojisinde Yapay Zekâ ve Makine Öğreniminin Rolü: Katkı Optimizasyonu ve Performans Tahmini



1.1. Geleceğin Betonu: Yapay Zekâ ve Makine Öğrenimi ile Akıllı Tasarım

İnşaat sektöründe sürdürülebilirlik, verimlilik ve yapısal dayanıklılık hedefleri doğrultusunda yenilikçi yaklaşımlara olan ihtiyaç giderek artmaktadır. Bu bağlamda, yapay zekâ (YZ) ve makine öğrenimi (MÖ) teknolojileri, geleneksel beton tasarım ve üretim süreçlerini dönüştürme potansiyeliyle öne çıkmaktadır. Beton, dünyada sudan sonra en çok tüketilen malzeme olup, üretimi sırasında ortaya çıkan karbon emisyonları ve sınırlı doğal kaynakların tüketimi, sektör üzerinde ciddi bir çevresel baskı oluşturmaktadır. Geleneksel beton karışım tasarım yöntemleri genellikle deneme-yanılma prensibine dayanır, bu da zaman alıcı, maliyetli ve her zaman optimal çözümler sunmaktan uzak olabilir. YZ ve MÖ, betonun taze ve sertleşmiş haldeki özelliklerini tahmin etme, karışım oranlarını optimize etme ve özellikle kimyasal katkı maddelerinin performansını maksimuma çıkarma konusunda devrim niteliğinde araçlar sunmaktadır. Bu teknolojiler sayesinde, daha az malzeme israfıyla, daha yüksek performanslı ve çevre dostu beton üretimi mümkün hale gelmektedir.



1.2. Yapay Zekâ ve Makine Öğreniminin Beton Teknolojisindeki Kilit Uygulama Alanları

Yapay zekâ ve makine öğrenimi, betonun tüm yaşam döngüsü boyunca birçok farklı aşamada etkin bir şekilde kullanılabilir:

Malzeme Özelliklerinin Tahmini ve Sınıflandırılması: YZ modelleri, farklı hammadde (çimento, agrega, mineral katkıları, kimyasal katkıları) özelliklerine dayanarak betonun basınç dayanımı, işlenebilirlik (çökme/yayılma), büzülme, geçirimsizlik gibi mekanik ve dayanıklılık özelliklerini yüksek doğrulukla tahmin edebilir. Ayrıca, agregaların reaktivitesi veya çimento türlerinin performansı gibi karmaşık malzeme davranışlarını sınıflandırmak için de kullanılabilirler.

Beton Karışım Optimizasyonu: YZ algoritmaları, belirlenen performans hedeflerine (örneğin, minimum maliyetle belirli bir dayanım, düşük CO₂ emisyonu ile yüksek dayanıklılık) ulaşmak için en uygun beton karışım oranlarını (su/bağlayıcı oranı, çimento miktarı, agrega gradasyonu, katkı dozajları) otomatik olarak belirleyebilir. Bu, binlerce farklı kombinasyonu kısa sürede değerlendirerek geleneksel yöntemlere kıyasla çok daha verimli bir optimizasyon sağlar.

Kimyasal Katkı Optimizasyonu ve Etkileşim Analizi: Kimyasal katkı maddeleri, betonun özelliklerini hassas bir şekilde ayarlamak için vazgeçilmezdir. Ancak, farklı katkı türleri, dozajları ve diğer karışım bileşenleriyle olan karmaşık etkileşimleri, optimal kullanımı zorlaştırır. Makine öğrenimi, bu etkileşimleri analiz ederek ve öğrenerek, istenen taze (işlenebilirlik, priz süresi) ve sertleşmiş (dayanım, dayanıklılık) özelliklere ulaşmak için en uygun katkı dozajlarını ve kombinasyonlarını belirleyebilir. Örneğin, süperakışkanlaştırıcıların farklı çimento ve mineral katkı türleriyle olan uyumluluğunu tahmin etmek hem malzeme israfını azaltır hem de istenen performansı garantiler.

Kalite Kontrol ve Hata Tespiti: Beton üretim tesislerinden ve şantiyelerden toplanan gerçek zamanlı veriler (hammadde analizleri, karıştırma parametreleri, taze beton test sonuçları, kürlenme koşulları) YZ modelleri tarafından analiz edilebilir. Bu, kalite kontrolünde anormalliklerin veya potansiyel sorunların (örneğin, kıvam kaybı, beklenenden düşük dayanım) erken tespiti ve proaktif önlemler alınması için kritik öneme sahiptir.

Sürdürülebilir Beton Tasarımı: YZ, daha düşük çevresel etkiye sahip beton karışımları tasarlamada güçlü bir araçtır. Geri dönüştürülmüş agregaların, endüstriyel yan ürünlerin (uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı) ve yeni nesil düşük karbonlu çimentoların (örneğin, kalsine köller içeren çimentolar) beton performansı üzerindeki etkilerini simüle edebilir ve optimize edebilir. Bu sayede, karbon ayak izini azaltan ve kaynak verimliliğini artıran formülasyonlar geliştirilebilir.

Yapısal Sağlık İzleme ve Performans Tahmini: Sensörler aracılığıyla toplanan verilerle entegre YZ sistemleri, yapısal sağlık izlemesi yapabilir ve beton elemanların uzun vadeli performansını tahmin edebilir. Bu, bakım stratejilerinin optimize edilmesine ve yapısal arızaların önlenmesine yardımcı olur.

1.3. Makine Öğrenimi Modelleri ve Veri Yönetimi

Beton teknolojisinde yaygın olarak kullanılan makine öğrenimi modelleri arasında Yapay Sinir Ağları (YSA), Destek Vektör Makineleri (DVM), Karar Ağaçları, Rastgele Ormanlar, Gradyan Yükseltme Makineleri ve Genetik Algoritmalar bulunmaktadır. Bu modeller, betonun karmaşık, doğrusal olmayan davranışlarını öğrenmek ve tahmin etmek için büyük miktarda yüksek kaliteli veriye ihtiyaç duyarlar.



Veri Toplama ve Ön İşleme: YZ/MÖ projelerinin başarısı, toplanan verinin kalitesine, kapsamına ve doğruluğuna bağlıdır. Beton için veri setleri, laboratuvar deneyleri, saha uygulamaları, hammadde tedarikçisi bilgileri ve çevresel koşullar gibi çeşitli kaynaklardan elde edilir. Bu veriler genellikle şunları içerir:

Giriş Değişkenleri (Özellikler): Çimento tipi ve içeriği, su/bağlayıcı oranı, farklı tip ve büyüklükteki agregaların oranları, mineral katkıların (uçucu kül, cüruf, silis dumanı vb.) tipi ve miktarı, kimyasal katkıların (süperakışkanlaştırıcı, priz geciktirici/hızlandırıcı, hava sürükleyici, büzülme azaltıcı, korozyon inhibitörü vb.) türü ve dozajı, kürlenme sıcaklığı ve süresi, çevresel maruziyet koşulları (sıcaklık, nem, klorür konsantrasyonu).

Çıkış Değişkenleri (Hedefler): Taze beton özellikleri (çökme, yayılma, hava içeriği, yoğunluk), sertleşmiş beton özellikleri (basınç dayanımı farklı yaşlarda, çekme dayanımı, elastisite modülü, büzülme), dayanıklılık özellikleri (klorür nüfuzu, sülfat direnci, donma-çözülme direnci, alkali-silika reaksiyonu genişmesi).

Toplanan verilerin ön işlenmesi (eksik verilerin doldurulması, aykırı değerlerin tespiti ve giderilmesi, verilerin normalleştirilmesi veya ölçeklendirilmesi) modelin doğruluğu için kritik öneme sahiptir. Veri setinin büyüklüğü ve değişkenliği, modelin farklı senaryolara genelleme yapabilme yeteneğini doğrudan etkiler.

Model Seçimi ve Eğitimi: Uygulamanın amacına ve veri setinin yapısına göre uygun MÖ modeli seçilir. Model, geçmiş verilerle eğitilerek giriş ve çıkış parametreleri arasındaki karmaşık ilişkileri öğrenir. Eğitim sonrasında, modelin performansı, daha önce görmediği yeni verilerle test edilerek doğruluk ve genellenebilirlik yeteneği değerlendirilir. Çapraz doğrulama gibi teknikler, modelin aşırı uyumunu önlemek için kullanılır.



1.4. Kimyasal Katkıların Optimizasyonunda YZ ve MÖ'nün Stratejik Rolü

Kimyasal katkıları, betonun taze ve sertleşmiş haldeki özelliklerini, özellikle de sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada kilit rol oynayan performansını iyileştirmek için vazgeçilmezdir. YZ ve MÖ, bu katkıların kullanımını optimize ederek hem teknik performansı artırır hem de maliyet ve çevresel etkiyi minimize eder.

Süperakışkanlaştırıcıların Hassas Ayarı: Süperakışkanlaştırıcılar (özellikle polikarboksilat eter - PCE bazlı olanlar), düşük su/bağlayıcı oranlarında bile yüksek işlenebilirlik sağlarlar.



Ancak, farklı çimento türleri, mineral katkıları (silis dumanı, uçucu kül, kalsine kil gibi) ve agregalarla olan karmaşık etkileşimleri, optimal dozajın belirlenmesini zorlaştırır. YZ modelleri, bu etkileşimleri analiz ederek, istenen işlenebilirlik seviyesini, priz süresini ve dayanım gelişimini sağlamak için en uygun süperakışkanlaştırıcı tipini ve dozajını hassas bir şekilde tahmin edebilir. Bu sayede, hem aşırı dozajdan kaynaklanan maliyet ve performans sorunları önlenir hem de yetersiz dozajdan kaynaklanan işlenebilirlik problemleri giderilir.

Priz Süresi Kontrolü: Priz geciktiriciler ve hızlandırıcılar, betonun priz süresini kontrol etmek için kullanılır. Özellikle büyük hacimli dökümlerde veya sıcak/soğuk hava koşullarında priz süresinin doğru ayarlanması kritik öneme sahiptir. MÖ modelleri, sıcaklık, nem, çimento kimyası ve diğer katkıların priz süresi üzerindeki etkilerini öğrenerek, belirli bir uygulama için en uygun katkı dozajını tahmin edebilir.

Büzülme Azaltıcı Katkılar: Betonun kuruma ve otojen büzülmesi, özellikle yüksek dayanımlı ve düşük su/bağlayıcı oranlı betonlarda çatlak oluşumuna yol açabilen önemli bir dayanıklılık sorunudur. YZ, farklı büzülme azaltıcı katkıların etkinliğini, beton karışımındaki diğer faktörlerle (agrega tipi, çimento içeriği, kürleme) birlikte değerlendirerek, en etkili çözümün bulunmasına ve çatlak riskinin azaltılmasına yardımcı olabilir.

Korozyon İnhibitörleri ve Alkali-Silika Reaksiyonu (ASR) Önleyiciler: Betonarme yapılarda donatı korozyonu ve ASR, yapısal bütünlüğü tehdit eden başlıca dayanıklılık sorunlarından biridir. Korozyon inhibitörleri (nitritler gibi) ve ASR önleyiciler (lityum bileşikler, puzolanik katkıları) bu sorunları engellemek için kullanılır. YZ modelleri, beton bileşimi, çevresel maruziyet ve katkı dozajları arasındaki ilişkileri analiz ederek, belirli bir maruziyet ortamı için en etkili koruma stratejisini ve optimal katkı dozajını belirleyebilir. Bu, özellikle deniz ortamları veya reaktif agrega içeren bölgelerdeki projeler için kritik öneme sahiptir.

Hava Sürükleyici Katkılar: Donma-çözülme döngülerine karşı direnç için hava sürükleyici katkıların doğru dozajı ve hava boşluğu yapısının optimizasyonu önemlidir. YZ, karışım bileşenleri, karıştırma süresi ve sıcaklık gibi faktörlerin sürüklenen hava içeriği ve hava boşluğu sistemi üzerindeki etkisini tahmin ederek, optimal hava sürükleyici dozajını belirleyebilir.

Faydalı Kaynaklar

1. Ahmed, W., Khatab, A., Ahmad, S., & Ahmad, N. (2021). Prediction of compressive strength of concrete using machine learning algorithms: A state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*, 270, 121511.
2. Behnia, A., & Masri, S. F. (2025). Machine learning for structural health monitoring: A review. *Engineering Structures*, 308, 110292.
3. Bilgin, A., & Guney, Y. (2023). Sustainable Concrete Mix Design Using Machine Learning: A Review. *Journal of Cleaner Production*, 138356.
4. Chou, J. S., & Tsai, C. F. (2018). Machine learning for predicting concrete compressive strength: A review. *Journal of Building Engineering*, 16, 163-173.
5. Deng, X., et al. (2022). Prediction of chloride penetration depth in concrete using machine learning. *Cement and Concrete Composites*, 126, 104337.
6. Feng, W., et al. (2020). Optimization of green concrete mixtures using machine learning and multi-objective optimization algorithms. *Journal of Cleaner Production*, 259, 120864.
7. Hoang, T. A., & Pham, T. H. (2019). Application of artificial neural networks for predicting the compressive strength of high-performance concrete with mineral admixtures. *Neural Computing and Applications*, 31(10), 6523-6537.



8. Jayasree, K. A., & George, R. (2023). A review on machine learning approaches for concrete mix design optimization. *Construction and Building Materials*, 371, 130722.
9. Kandiri, M., et al. (2021). Machine learning in cement and concrete industry: A review. *Construction and Building Materials*, 280, 122416.
10. Liu, H., et al. (2023). Machine learning for predicting the rheological properties of fresh concrete containing various admixtures. *Journal of Building Engineering*, 72, 106518.
11. Murad, H., et al. (2024). Machine Learning Approaches for Optimizing Superplasticizer Dosage in Sustainable Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 36(5), 04024097.
12. Omen, S. S., & Ma'aitah, O. N. (2022). Artificial intelligence in quality control of concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 337, 127622.
13. Rashidi, M., et al. (2023). Machine learning for sustainable concrete: A comprehensive review on low-carbon and recycled aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production*, 407, 137021.
14. Shen, L., et al. (2022). A review of machine learning applications in structural health monitoring. *Measurement*, 190, 110682.
15. Singh, A., et al. (2020). Predicting the compressive strength of concrete using ensemble machine learning models. *Cement and Concrete Composites*, 107, 103496.
16. Sun, L., & Li, P. (2020). Machine learning for predicting the strength and durability of concrete. *Automation in Construction*, 111, 103071.
17. Tan, Y., et al. (2022). Data-driven methods for predicting the mechanical properties of concrete: A review. *Cement and Concrete Research*, 151, 106607.
18. Wang, Y., et al. (2021). A comprehensive review on the application of machine learning in concrete engineering. *Advances in Cement Research*, 33(10), 513-535.
19. Xue, W., et al. (2022). Machine learning in predicting the performance of concrete materials: A review. *Materials & Design*, 218, 110646.
20. Yang, H., et al. (2023). Data preprocessing for machine learning in civil engineering: A review. *Engineering with Computers*, 39(1), 381-397.
21. Yu, H., et al. (2021). Machine learning based prediction of mechanical properties of concrete: A critical review. *Construction and Building Materials*, 280, 122415.
22. Zhang, X., et al. (2024). Machine learning for optimizing the use of chemical admixtures in concrete: A review. *Automation in Construction*, 159, 105273.
23. Ghasemi, S., et al. (2020). Machine Learning Models for Predicting the Workability of Self-Compacting Concrete with Various Superplasticizers. *Construction and Building Materials*, 247, 118534.
24. Huang, J., et al. (2021). Predicting the optimum dosage of superplasticizer for concrete using machine learning. *Materials and Structures*, 54(4), 1-15.
25. Kim, J., et al. (2019). Prediction of setting time of concrete with various chemical admixtures using artificial neural networks. *Materials*, 12(11), 1785.
26. Li, J., et al. (2022). Machine Learning for Predicting the Setting Time of Concrete with Different Chemical Admixtures and Curing Conditions. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(10), 04022301.
27. Ma, G., et al. (2023). Machine Learning for Predicting the Shrinkage of Concrete with Shrinkage-Reducing Admixtures. *Polymers*, 15(7), 1645.
28. Al-Sultani, M., et al. (2021). Application of Machine Learning in Prediction of Chloride Penetration and Corrosion Rate in Reinforced Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(12), 04021319.



29. Farhadi, S., et al. (2023). Machine learning for predicting the expansion due to alkali-silica reaction in concrete containing supplementary cementitious materials. *Journal of Building Engineering*, 72, 106489.
30. Zhang, L., et al. (2024). Prediction of air content in concrete using machine learning algorithms: A comprehensive study. *Construction and Building Materials*, 414, 134842.
31. Shahin, M. A., et al. (2019). Machine learning in civil engineering: A comprehensive review of challenges and opportunities. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 86, 1-13.
32. Wu, Y., et al. (2023). Big data in civil engineering: Challenges and opportunities for machine learning. *Computers & Structures*, 287, 107297.
33. Tixier, L., & Hulin, T. (2020). Explainable AI in civil engineering: A review. *Automation in Construction*, 116, 103230.
34. Turk, Z. (2020). Challenges for the digitalization of the construction industry. *Automation in Construction*, 114, 103230.
35. Wuni, I. Y., et al. (2021). Digital transformation in the construction industry: A systematic review of drivers and challenges. *Automation in Construction*, 130, 103848.
36. Li, B., et al. (2022). Cloud-based machine learning for smart construction: A review. *Engineering with Computers*, 38(1), 127-142.
37. Ma, H., et al. (2021). Digital twin and machine learning in smart construction: A review. *Automation in Construction*, 124, 103551.



2

Betonarme Yapılarda Ömür Boyu Performansın Artırılması: Akıllı Katkılar ve Kendini Onaran Beton Teknolojileri



2.1. Betonun Ömrünü Uzatma ve Akıllı Çözümlerin Yükselişi

Betonarme yapılar, modern inşaatın temelini oluştursa da zamanla çevresel etkileşimler, aşırı yüklenmeler veya malzeme yorgunluğu gibi nedenlerle bozulmaya uğrayabilir. Çatlak oluşumu, donatı korozyonu ve diğer degradasyon mekanizmaları, yapıların servis ömrünü kısaltarak yüksek bakım ve onarım maliyetlerine yol açmaktadır. Geleneksel yaklaşımlar genellikle pasif koruma (düşük geçirgenlik, kaplama) veya hasar sonrası onarım üzerine kuruludur. Ancak, günümüz inşaat sektörü, pasif yaklaşımların ötesine geçerek, betonun kendi kendini onarabilme yeteneğine sahip olmasını veya yapısal sağlığını sürekli izleyebilmesini sağlayan "akıllı" ve "kendini onaran" beton teknolojilerine yönelmektedir. Bu yenilikçi çözümler, yapıların ömür boyu performansını artırarak, daha sürdürülebilir, güvenli ve ekonomik bir gelecek inşa etmeyi hedeflemektedir. Bu teknolojiler, betonun içsel zayıflıklarına proaktif çözümler sunarak, yapısal bütünlüğü ve dayanıklılığı önemli ölçüde geliştirmektedir.

2.2. Kendini Onaran Beton Teknolojileri: Doğadan İlham Alan Çözümler

Kendini onaran beton, malzeme içerisinde oluşan çatlakları, dış müdahale olmaksızın kendi kendine iyileştirme yeteneğine sahip olan yenilikçi bir beton türüdür. Bu teknoloji, doğadaki biyolojik iyileşme süreçlerinden ilham alarak geliştirilmiştir. Kendini onaran betonun temel amacı, mikro çatlakların büyümesini ve zararlı maddelerin betona nüfuz etmesini engelleyerek hem yapısal dayanıklılığı artırmak hem de bakım maliyetlerini azaltmaktır. Bu teknolojiler genellikle iki ana kategoriye ayrılır:

2.2.1. Otonom Olmayan (Mineral Bazlı) Kendini Onarma:

Bu yöntem, çatlak oluşumunda betonun kendi içsel mineral bileşenlerinin tepki vermesi prensibine dayanır.



Çimento Hidratasyonunun Yeniden Başlaması: Beton içerisinde oluşan mikro çatlaklar, genellikle su varlığında, hidratlanmamış çimento partiküllerinin veya kalsiyum hidroksit (Ca(OH)_2) gibi hidratasyon ürünlerinin yeniden reaksiyona girerek kalsiyum karbonat (CaCO_3) veya kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jeli oluşturmasıyla kendiliğinden kapanabilir. Özellikle düşük su/çimento oranına sahip betonlarda ve mineral katkı içeren karışımlarda bu mekanizma daha etkilidir. Bu iyileşme genellikle 0,1-0,3 mm genişliğindeki mikro çatlaklar için geçerlidir.

Mineral Katkıların Kullanımı: Uçucu kül, yüksek fırın cürufu veya silis dumanı gibi puzolanik mineral katkıları, betonun boşluk yapısını sıkılaştırarak ve ikincil hidratasyon ürünleri oluşturarak kendini onarma kapasitesini artırabilir. Bu katkıları, çatlak yüzeylerinde ek kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jeli oluşumunu teşvik ederek çatlakları doldurabilir.

2.2.2. Otonom (Kapsül, Bakteri veya Polimer Bazlı) Kendini Onarma:

Bu yöntemler, betona dışarıdan "iyileştirici ajanlar" eklenmesini içerir ve çatlak oluştuğunda bu ajanlar aktive olur.

Bakteri Bazlı Kendini Onaran Beton: Bu yöntem, çatlak oluştuğunda aktive olan ve kalsiyum karbonat (CaCO_3) çökelten özel bakterilerin betona eklenmesini içerir. Bakteriler, çatlaklarda su ve oksijenle temas ettiğinde, kalsiyum laktat gibi bir besin kaynağını tüketerek ve ortamdaki kalsiyum iyonlarıyla reaksiyona girerek kalsiyum karbonat kristalleri üretirler. Bu kristaller çatlağı doldurarak geçirimsizliği geri kazandırır. Bacillus cinsi bakteriler, spor formunda uzun süre hayatta kalabildikleri için bu uygulamalar için sıkça kullanılır.

Kapsül Bazlı Kendini Onaran Beton: Bu yaklaşımda, içerisinde iyileştirici ajan (örneğin, epoksi reçinesi, siyanoakrilat veya puzolanik karışımlar) bulunan mikro kapsüller beton karışımına dahil edilir. Çatlaklar oluştuğunda, kapsüller kırılır ve içerisindeki iyileştirici ajanlar çatlak boşluğuna salınır. Bu ajanlar, hava veya su ile reaksiyona girerek veya polimerize olarak çatlağı doldurur ve bağlar. Kapsüllerin boyutu, duvar kalınlığı ve içerdiği iyileştirici ajanın özellikleri, sistemin etkinliğini belirleyen önemli faktörlerdir.

Vasküler Sistemler: Bu sistemler, betonun içinde ince borular veya kanallar oluşturarak, çatlak oluştuğunda bu kanallardan iyileştirici ajanın akışını sağlar. Borular, çatlakla kesiştiğinde ajanı serbest bırakır ve bu ajan çatlağı doldurur. Bu yöntem, daha büyük çatlakların onarımı için potansiyel sunar ancak uygulama karmaşıklığı daha yüksektir.

Polimer Bazlı Kendini Onaran Beton: Bazı polimerik malzemeler, çatlak oluştuğunda genleşerek veya viskozitelerini değiştirerek çatlağı doldurma yeteneğine sahiptir. Özellikle süper emici polimerler (SAP) gibi malzemeler, suyu emerek şişebilir ve çatlakları tıkayarak su girişini engelleyebilir.

2.3. Akıllı Katkılar ve Yapısal Sağlık İzleme Sistemleri

Kendini onaran beton teknolojileri, hasarı doğrudan ele alırken, "akıllı katkıları" ve yapısal sağlık izleme sistemleri, betonun içsel durumunu izleyerek veya belirli bir tehdide proaktif olarak tepki vererek ömür boyu performansını artıran çözümler sunar.

2.3.1. Sensör Entegre Edilmiş Akıllı Katkılar:

İletken Katkılar: Karbon nanolifler, karbon fiberler veya metalik tozlar gibi iletken malzemelerin betona eklenmesi, betonun elektriksel direncini çevresel değişikliklere (sıcaklık, nem) veya hasara (çatlak oluşumu) karşı duyarlı hale getirebilir. Bu sayede, betonun kendi kendine algılama (self-sensing) yeteneği kazanılır ve çatlakların oluşumu veya gelişimi,



elektriksel dirençteki değişimler aracılığıyla tespit edilebilir. Bu, geleneksel pahalı sensör ağlarına göre daha uygun maliyetli ve entegre bir izleme çözümü sunar.

Optik Fiber Sensörler: Beton içine gömülen optik fiber sensörler, gerinim, sıcaklık veya çatlak oluşumu gibi parametreleri yüksek hassasiyetle ölçebilir. Bu sensörler, uzun ömürlü ve elektromanyetik parazitlere karşı dirençli olmaları nedeniyle köprüler, tüneller veya yüksek binalar gibi kritik altyapılarda yapısal bütünlüğün gerçek zamanlı izlenmesi için kullanılır.

Piezoelektrik Sensörler: Kurşun zirkonat titanat (PZT) gibi piezoelektrik malzemeler, mekanik gerilimi elektriksel sinyale dönüştürebilir ve tersi de geçerlidir. Bu sensörler, beton içerisine entegre edilerek çatlakları algılama, hasar tespiti veya hatta kendini onarma mekanizmalarını tetikleme (örneğin, kapsül kırılmasını akustik olarak tetikleme) potansiyeline sahiptir.

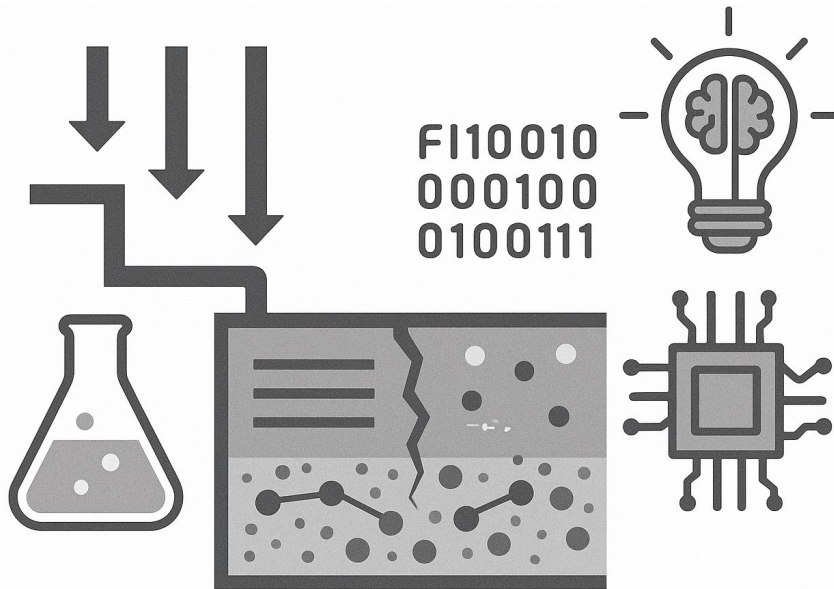
2.3.2. Yapısal Sağlık İzleme (YSİ) Sistemleri:

Akıllı katkılarla entegre edilebilen veya bağımsız olarak uygulanabilen YSİ sistemleri, yapıların servis ömrü boyunca performansını ve durumunu sürekli olarak izler.

Gerçek Zamanlı İzleme: YSİ sistemleri, sensörlerden (gerinim ölçerler, ivmeölçerler, sıcaklık sensörleri, nem sensörleri, korozyon sensörleri) gelen verileri sürekli olarak toplar ve analiz eder. Bu veriler, betonun içsel nemini, klorür içeriğini, pH değerini, çatlak gelişimini veya donatı korozyon hızını izlemek için kullanılabilir.

Veri Analizi ve Hasar Tespiti: Toplanan büyük veri setleri, yapay zekâ ve makine öğrenimi algoritmaları kullanılarak analiz edilir. Bu algoritmalar, normal davranıştan sapmaları (anomaliler) tespit edebilir ve potansiyel hasarları veya bozulma mekanizmalarını erken aşamada teşhis edebilir. Bu sayede, onarım veya bakım müdahaleleri zamanında planlanabilir, büyük yapısal arızaların önüne geçilebilir ve bakım maliyetleri optimize edilebilir.

Ömür Boyu Performans Tahmini: YSİ verileri, betonarme yapıların gelecekteki performansını ve kalan servis ömrünü tahmin etmek için kullanılabilir. Bu tahminler, köprüler, nükleer santraller veya enerji santralleri gibi uzun ömürlü ve kritik altyapıların yönetimi için büyük önem taşır.





2.4. Akıllı Katkıların ve Kendini Onaran Betonun Avantajları ve Zorlukları

Avantajlar:

Uzun Servis Ömrü ve Dayanıklılık: Mikro çatlakların otomatik olarak onarılması ve sürekli izleme, yapıların servis ömrünü önemli ölçüde uzatır ve çevresel etkilere karşı direncini artırır.

Azaltılmış Bakım Maliyetleri: Periyodik onarım ve rehabilitasyon ihtiyacını azaltır veya geciktirir, böylece yaşam döngüsü maliyetlerinde önemli tasarruflar sağlar.

Çevresel Sürdürülebilirlik: Daha uzun ömürlü yapılar, daha az malzeme tüketimi ve atık üretimi anlamına gelir, bu da inşaat sektörünün karbon ayak izini azaltmaya yardımcı olur.

Artırılmış Güvenlik: Yapısal sağlığın sürekli izlenmesi ve otomatik onarım, potansiyel arızaların erken tespiti ve önlenmesiyle yapıların güvenliğini artırır.

Kaynak Verimliliği: Daha az onarım ve daha uzun ömür, doğal kaynakların daha verimli kullanılmasına olanak tanır.

Zorluklar:

Maliyet: Akıllı katkılar ve kendini onaran beton teknolojileri, geleneksel betona kıyasla başlangıç maliyetlerini artırabilir. Ancak, yaşam döngüsü maliyeti analizleri, uzun vadede sağladıkları tasarrufları ortaya koymaktadır.

Uygulama Karmaşıklığı: Bazı kendini onaran beton tekniklerinin (özellikle kapsül veya vasküler sistemler) büyük ölçekli uygulamalarda entegrasyonu ve ölçeklenebilirliği konusunda pratik zorluklar bulunmaktadır.

Uzun Vadeli Performans ve Güvenilirlik: Özellikle biyolojik ve kapsül bazlı sistemlerin uzun vadeli performansları, çevresel koşullara (sıcaklık, nem, pH) ve ajanın raf ömrüne bağlı olarak değişebilir. Daha fazla saha çalışması ve uzun süreli izleme gereklidir.

Standartlaşma ve Düzenlemeler: Yeni nesil beton teknolojilerinin yaygınlaşması için uluslararası standartların ve yerel yönetmeliklerin geliştirilmesi gerekmektedir.

Veri Yönetimi ve Analizi: YSI sistemlerinden gelen büyük veri setlerinin toplanması, depolanması ve anlamlı bilgilere dönüştürülmesi için gelişmiş veri analizi ve yapay zeka yeteneklerine ihtiyaç vardır.

2.5. Sonuç

Betonarme yapılarda ömür boyu performansın artırılması, inşaat sektörünün en önemli hedeflerinden biridir. Akıllı katkılar ve kendini onaran beton teknolojileri, bu hedefe ulaşmada çığır açan çözümler sunmaktadır. Kendi kendini iyileştiren mekanizmalar, betonun içsel dayanıklılığını artırırken, sensör entegre edilmiş katkılar ve yapısal sağlık izleme sistemleri, yapıların durumunu gerçek zamanlı olarak takip ederek proaktif bakım stratejilerine olanak tanır. Her ne kadar bu teknolojilerin yaygınlaşması önünde maliyet, uygulama karmaşıklığı ve standartlaşma gibi zorluklar bulunsada uzun vadede sağlayacakları çevresel, ekonomik ve güvenlik faydaları, Ar-Ge ve uygulama alanındaki yatırımları teşvik etmektedir. Kimyasal katkı üreticileri, bu yenilikçi teknolojilerin geliştirilmesinde ve ticarileşmesinde kilit bir rol oynamakta, böylece geleceğin daha dayanıklı, sürdürülebilir ve akıllı altyapılarının inşasına katkıda bulunmaktadır.

Faydalı Kaynaklar

1. Aktan, A. E., & Catbas, F. N. (2019). *Structural Health Monitoring of Civil Infrastructures: From Sensing to Decision Making*. CRC Press.



2. An, J., et al. (2022). A review of machine learning applications for structural health monitoring of bridges. *Engineering Structures*, 250, 113337.
3. ASTM International. (2023). *Standard Guide for Self-Healing Concrete*. ASTM E3138.
4. De Muynck, W., et al. (2010). Microbial carbonate precipitation in construction materials: A review. *Ecological Engineering*, 36(2), 118-132.
5. Edvardsen, C. (1999). A new approach to autogenous healing. *ACI Materials Journal*, 96(5), 589-593.
6. Ghosh, S. K. (Ed.). (2017). *Self-Healing Concrete: Fundamentals, Challenges, and Perspectives*. Elsevier.
7. Hosseini, A. K., et al. (2022). A review on self-healing concrete: Mechanisms, advantages, and challenges. *Construction and Building Materials*, 324, 126620.
8. Jacobsen, S., & Sellevold, E. J. (1999). Autogenous healing of cracks in concrete. *Cement and Concrete Research*, 29(12), 1883-1888.
9. Jonkers, H. M. (2007). Bacteria-based self-healing concrete. *Heron*, 52(1), 3-12.
10. Kanda, K., & Li, V. C. (2006). Development of self-healing engineered cementitious composites for infrastructure applications. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 4(2), 223-231.
11. Khan, S., et al. (2021). Microbial self-healing concrete: A sustainable approach for crack remediation. *Construction and Building Materials*, 270, 121379.
12. Lee, K. M., et al. (2020). Self-healing concrete: A comprehensive review of recent developments and future trends. *Cement and Concrete Composites*, 113, 103708.
13. Li, V. C., & Yang, E. H. (2007). Self-sensing and self-healing in cementitious composites. *Concrete International*, 29(12), 48-52.
14. Ou, Y., et al. (2018). Optical fiber sensors for civil structural health monitoring: A review. *Sensors*, 18(9), 2919.
15. Pelgrom, J. P. E., et al. (2013). Self-healing concrete with encapsulated healing agents in vascular networks. *Cement and Concrete Composites*, 35(1), 1-10.
16. Siddique, R., & Mehta, P. K. (2019). *Concrete Technology: An Advanced Course*. CRC Press.
17. Termkhajornkit, P., & Nawa, T. (2011). Effect of mineral admixtures on self-healing ability of concrete. *Cement and Concrete Composites*, 33(2), 271-280.
18. Wang, C., et al. (2019). Piezoelectric materials for smart concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 208, 226-237.
19. Wittmann, F. H. (2007). Repair and self-healing of cracks in concrete. *Materials and Structures*, 40(6), 579-583.
20. Wu, H., & Li, V. C. (2000). Self-sensing of bending damage in engineered cementitious composites. *ACI Materials Journal*, 97(6), 666-674.
21. Yang, Y., et al. (2023). A review on machine learning for structural health monitoring and prognosis of concrete structures. *Automation in Construction*, 308, 113708.
22. Zavarous, A., et al. (2020). Autonomous self-healing concrete: A review of recent research. *Journal of Materials Science*, 55(15), 6297-6323.

3

Agresif Ortamlara Dirençli Beton Tasarımında Kimyasal Katkıların Rolü: Özel Uygulamalar ve Zorlu Koşullar**3.1. Giriş: Betonun Zorlu Koşullarla İmtihani ve Dayanıklılığın Önemi**

Beton, dayanıklılığı ve maliyet etkinliği nedeniyle dünya genelinde en yaygın kullanılan yapı malzemesidir. Ancak, birçok betonarme yapı, servis ömrü boyunca kimyasal, fiziksel ve biyolojik saldırılara maruz kalır. Deniz ortamları, endüstriyel tesisler, atık su arıtma sistemleri, yüksek sıcaklık değişimleri veya aşırı soğuk iklimler gibi agresif koşullar, betonun ve donatının bozulmasına yol açarak yapısal bütünlüğü ve servis ömrünü tehlikeye atar. Bu bozulmalar, erken yaşta hasar, performans kaybı ve yüksek onarım maliyetleri anlamına gelir. Geleneksel beton karışımları, bu tür zorlu koşullara karşı her zaman yeterli direnci sağlayamayabilir. Bu nedenle, betonun spesifik çevresel saldırılara karşı direncini artırmak amacıyla kimyasal katkı maddelerinin stratejik kullanımı, modern beton tasarımının vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. Kimyasal katkıları, betonun geçirimsizliğini azaltarak, kimyasal reaksiyonları kontrol ederek veya fiziksel özelliklerini iyileştirerek, agresif ortamlardaki performansını önemli ölçüde artırır.

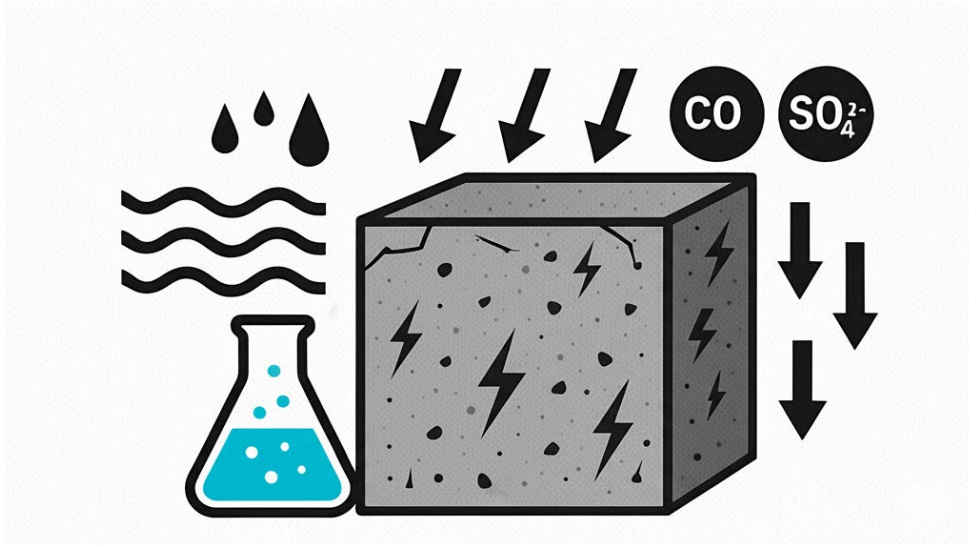
3.2. Agresif Ortamların Beton Üzerindeki Etkileri

Farklı agresif ortamlar, beton üzerinde kendine özgü bozulma mekanizmalarına neden olur:

- **Sülfat Saldırısı:** Toprakta, yeraltı suyunda veya endüstriyel atıklarda bulunan sülfat iyonları (SO_4^{2-}), betondaki kalsiyum alüminat hidratlar (C-A-H) ile reaksiyona girerek genleşmeye neden olan ettringit ve jips (alçıtaşı) oluşturur. Bu genleşme, betonun çatlamasına, pul pul dökülmesine ve dayanım kaybına yol açar. Özellikle atık su arıtma tesisleri, kanalizasyon sistemleri ve sülfatça zengin topraklara maruz kalan temeller risk altındadır.



- **Klorür Saldırısı ve Donatı Korozyonu:** Deniz yapıları, köprüler, otoparklar ve buz çözücü tuz kullanılan yollar, klorür iyonlarının (Cl^-) nüfuz etmesi riskine maruz kalır. Klorür iyonları, betonun koruyucu alkalinitesini bozarak donatı çeliği üzerinde pasif filmi tahrip eder ve çukurlanma korozyonunu başlatır. Korozyon ürünlerinin hacim artışı, betonun çatlamasına ve dökülmesine neden olur, bu da yapısal taşıma kapasitesini ciddi şekilde azaltır.
- **Asit Saldırısı:** Endüstriyel atıklar, asit yağmurları veya bazı tarımsal faaliyetler sonucu oluşan asitler, betondaki kalsiyum hidroksiti ($Ca(OH)_2$) ve kalsiyum silikat hidratı (C-S-H) çözererek beton matrisinin bozulmasına neden olur. pH değeri düştükçe, beton yüzeyi yumuşar, parçalanır ve dayanımını kaybeder. Kanalizasyon sistemlerinde oluşan biyogenik sülfürik asit (H_2SO_4) de benzer yıkıcı etkilere sahiptir.
- **Alkali-Silika Reaksiyonu (ASR):** Agregadaki reaktif silika ile çimentodan ve diğer kaynaklardan gelen alkali hidroksitler arasındaki reaksiyon sonucu oluşan jel, nemi emerek şişer ve betonda içsel gerilmelere ve çatlaklara neden olur. Bu durum, yapısal bütünlüğü tehlikeye atar ve özellikle nemli ortamlarda daha belirginleşir.
- **Donma-Çözülme Etkisi:** Su doygunluğuna ulaşmış betonun donma-çözülme döngülerine maruz kalması, içsel suyun donarak genişmesi nedeniyle betonda mikroskobik çatlakların oluşmasına ve zamanla yüzeyden pul pul dökülmeye yol açar. Özellikle karasal iklimlerde ve yol, köprü gibi açık hava yapılarında önemli bir dayanıklılık sorunudur.
- **Yüksek ve Düşük Sıcaklık Etkileri:** Aşırı yüksek sıcaklıklar (yangın, endüstriyel fırınlar) betonun iç yapısını bozarak dayanımını düşürebilir ve çatlaklara neden olabilir. Düşük sıcaklıklar ise priz süresini uzatabilir ve erken yaş dayanım gelişimini yavaşlatabilir.



3.3. Agresif Ortamlara Dirençli Beton Tasarımında Kimyasal Katkıların Rolü

Kimyasal katkıları, betonun geçirimsizliğini kontrol ederek, kimyasal reaksiyonları engelleyerek veya fiziksel özelliklerini optimize ederek bu agresif etkilere karşı direncini önemli ölçüde artırır:

- **Süperakışkanlaştırıcılar (Yüksek Oranda Su Azaltıcı Katkıları):** Bu katkıları, betonun işlenebilirliğini artırırken su/bağlayıcı oranını önemli ölçüde azaltır. Düşük su/bağlayıcı oranı, betonun daha yoğun ve daha az geçirgen bir matris oluşturmalarını sağlar. Bu sayede, zararlı iyonların (sülfat, klorür) ve sıvıların betona nüfuz etmesi engellenir.



Özellikle polikarboksilat eter (PCE) esaslı süperakışkanlaştırıcılar, yüksek performanslı ve dayanıklı beton üretiminde kilit rol oynar. Deniz yapılarında veya kimyasal tesislerde klorür ve sülfat direncini artırmak için kullanılırlar.

- **Priz Geciktiriciler ve Hızlandırıcılar:** Yüksek sıcaklıkların priz süresini kısaltarak işlenebilirliği azalttığı veya düşük sıcaklıkların priz süresini uzattığı durumlarda, priz geciktirici veya hızlandırıcı katkıları kullanılır. Bu katkıları, betonun optimal priz ve dayanım gelişimi için çevresel koşullara göre ayarlanmasına olanak tanır, özellikle tünellerde veya büyük kütleli beton dökümlerinde sıcaklık kontrolü için önemlidir.
- **Hava Sürükleyici Katkılar:** Bu katkıları, beton içinde homojen, mikroskobik hava boşlukları ağı oluşturarak donma-çözülme döngülerinin neden olduğu zararı önler. Boşluklar, donan suyun genişlemesi için bir rezervuar görevi görür ve içsel gerilmelerin oluşmasını engeller. Özellikle soğuk iklim bölgelerindeki yol kaplamaları, köprüler ve barajlar için kritik öneme sahiptir.
- **Korozyon İnhibitörleri:** Klorür saldırısından kaynaklanan donatı korozyonunu engellemek için kullanılırlar. Kalsiyum nitrit ($\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$) gibi anodik inhibitörler, çelik yüzeyinde koruyucu bir pasif film oluşturarak veya var olan filmi güçlendirerek klorürün saldırısını engeller. Organik inhibitörler ise çelik yüzeyine adsorbe olarak bir bariyer görevi görebilir. Deniz köprüleri, otoparklar ve endüstriyel zeminler gibi klorür riskinin yüksek olduğu uygulamalarda tercih edilir.
- **Büzülme Azaltıcı Katkılar:** Betonun priz alması ve sertleşmesi sırasında oluşan kurumadan ve otojen büzülme azaltarak çatlak riskini minimize ederler. Özellikle düşük su/bağlayıcı oranına sahip yüksek performanslı betonlarda veya geniş yüzey alanına sahip elemanlarda (örn. döşemeler, tünel kaplamaları) büzülme çatlaklarını önlemek için kullanılırlar.
- **Alkali-Silika Reaksiyonu (ASR) İnhibitörleri:** Lityum bileşikler (özellikle lityum nitrat – LiNO_3), ASR jelinin genişlemeyen bir formunu oluşturarak veya reaktif silikanın çözünürlüğünü azaltarak ASR'yi kontrol altına alır. Reaktif agregaların kullanımının kaçınılmaz olduğu durumlarda etkili bir çözümdür.
- **Özel Performans Arttırıcı Katkılar:**
 - **Antibakteriyel Katkılar:** Atık su arıtma tesislerindeki biyogenik sülfürik asit oluşumunu engellemek amacıyla betona eklenen antibakteriyel ajanlar, sülfat direncini artırabilir.
 - **Yangın Direncini Artırıcı Katkılar:** Polipropilen lifler gibi katkıları, yüksek sıcaklıklara maruz kalan betonlarda (tüneller, yüksek binalar) patlama riskini azaltır. Lifler eriyerek buharın kaçması için kanallar oluşturur ve içsel basınç birikimini engeller.
 - **Su Geçirimsizlik Katkıları:** Bu katkıları, betonun gözenek yapısını tıkayarak veya hidrofobik özellikler kazandırarak su ve zararlı kimyasalların nüfuzunu engeller. Özellikle bodrum katları, su depoları ve tünel kaplamaları gibi su teması olan yapılarda kullanılır.

3.4. Özel Uygulama Alanları ve Kimyasal Katkıların Entegrasyonu

Kimyasal katkıları, belirli agresif ortamların gerektirdiği performans hedeflerine ulaşmak için özelleştirilmiş çözümler sunar:



- **Deniz Yapıları:** Klorür saldırısı ve sülfat etkisi nedeniyle yüksek risk altındadır. Süperakışkanlaştırıcılar (düşük geçirgenlik için), korozyon inhibitörleri (donatı koruması için) ve bazen hava sürükleyiciler (donma-çözülme riski olan bölgelerde) kombinasyonu kullanılır.
- **Atık Su Arıtma Tesisleri ve Kanalizasyon Sistemleri:** Biyojenik sülfürik asit saldırısı ve sülfat etkisi hakimdir. Sülfat direncini artıran çimentolar ve bağlayıcılar ile birlikte süperakışkanlaştırıcılar (düşük geçirgenlik için) ve potansiyel olarak antibakteriyel katkılar tercih edilir.
- **Nükleer Santraller:** Yüksek dayanıklılık, düşük geçirimlilik ve radyasyon direnci kritik öneme sahiptir. Süperakışkanlaştırıcılar, yüksek performanslı beton üretimi için temeldir. Bazı durumlarda, termal gerilmeleri azaltıcı katkılar da düşünülebilir.
- **Tüneller:** Nem, yeraltı suyu sızıntıları, donma-çözülme (soğuk iklimlerde) ve yangın riski gibi çoklu agresif etkilere maruz kalabilir. Süperakışkanlaştırıcılar (işlenebilirlik ve düşük geçirgenlik için), priz kontrol ediciler (uzun tünel dökümleri için), büzülme azaltıcılar ve yangın direncini artıran lifler gibi katkılar bir arada kullanılır.
- **Endüstriyel Zeminler:** Kimyasal dökülmeler, aşınma ve yüksek sıcaklık değişimleri görülebilir. Kimyasal direncini artıran özel katkılar (polimer modifiye katkılar), aşınma direncini artıran katkılar ve yüzey sertleştiriciler ile birlikte süperakışkanlaştırıcılar kullanılabilir.

3.5. Sonuç

Agresif ortamlar, betonun ömür boyu performansı için ciddi zorluklar teşkil etmektedir. Ancak, kimyasal katkı endüstrisinin sürekli gelişimi sayesinde, betonun bu zorlu koşullara karşı direncini artırmak mümkündür. Süperakışkanlaştırıcılar, hava sürükleyiciler, korozyon inhibitörleri, ASR önleyiciler ve diğer özel katkılar, betonun geçirimliliğini azaltarak, kimyasal reaksiyonları kontrol ederek ve fiziksel özelliklerini optimize ederek yapıların servis ömrünü uzatır. Bu katkıların doğru seçimi ve dozajı, proje özelindeki çevresel koşulların ve performans beklentilerinin dikkatli bir şekilde değerlendirilmesini gerektirir. Ar-Ge çalışmaları, sürekli olarak yeni ve daha etkili katkı maddeleri geliştirmeye devam etmekte, bu da betonun daha ekstrem ve karmaşık agresif ortamlarda bile üstün performans göstermesini sağlamaktadır. Kimyasal katkılar, sadece maliyetli onarımları geciktirmekle kalmayıp, aynı zamanda daha sürdürülebilir, güvenli ve uzun ömürlü altyapıların inşası için vazgeçilmez bir araç haline gelmiştir. Betonun geleceği, bu akıllı kimyasal çözümlerle şekillenecektir.

Faydalı Kaynaklar

1. Mangat, P. S., & Khatib, J. M. (1995). Influence of cement replacement materials on the properties of concrete. *Cement and Concrete Research*, 25(6), 1121-1130.
2. Bertolini, L., et al. (2013). *Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair*. Wiley-VCH.
3. Tuutti, K. (1982). *Corrosion of Steel in Concrete*. Swedish Cement and Concrete Research Institute.
4. Santha Kumar, A. R. (2017). *Concrete Technology: Theory and Practice*. Oxford University Press.
5. Monteny, F., et al. (2001). Chemical and microbiological degradation of concrete in a sewer environment. *Cement and Concrete Research*, 31(1), 101-108.



6. Shi, C., & Cai, L. (2006). Alkali-silica reaction (ASR) in concrete: A state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*, 20(3), 133-146.
7. Hobbs, D. W. (1900). *Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. Blackwell Publishing.
8. Powers, T. C. (1965). Basic considerations in concrete freezing and thawing. *Journal of the American Concrete Institute*, 62(10), 1143-1163.
9. Rixom, R., & Mailvaganam, N. (1999). *Chemical Admixtures for Concrete*. E & FN Spon.
10. Aitcin, P. C. (2000). *High-Performance Concrete*. E & FN Spon.
11. Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. McGraw-Hill Education.
12. Hewlett, P. (Ed.). (2004). *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. Butterworth-Heinemann.
13. Mather, B. (1990). Freezing and thawing durability of concrete. *ACI Materials Journal*, 87(5), 450-456.
14. Glass, G. K., et al. (2000). The effect of nitrite on the chloride threshold concentration for pitting corrosion of steel in concrete. *Corrosion Science*, 42(8), 1515-1528.
15. Umoren, S. A., & Solomon, M. M. (2022). A Review on Corrosion in Concrete Structure: Inhibiting Admixtures and Their Compatibility in Concrete. *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*, 8(1), 16.
16. Al-Amoudi, O. S. B. (1995). Chloride-induced corrosion of steel in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 9(4), 195-203.
17. Lura, P. (2003). Autogenous deformation and internal curing of concrete. PhD thesis, Delft University of Technology.
18. Thomas, M. D. A., et al. (2022). The ASR mechanism in concrete and the influence of lithium in mitigating it: A critical review. *Construction and Building Materials*, 347, 128506.
19. Feng, X., et al. (2015). A review of lithium compounds as ASR suppressors. *Construction and Building Materials*, 95, 237-248.
20. Hajjaji, M., et al. (2018). Antimicrobial concrete: Current developments and future prospects. *Construction and Building Materials*, 178, 290-302.
21. Kalifa, P., et al. (2000). High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres. *Cement and Concrete Research*, 30(12), 1923-1929.
22. Ramachandran, V. S. (1995). *Concrete Admixtures Handbook: Properties, Science, and Technology*. Noyes Publications.
23. Gjorv, O. E. (2009). Durability of concrete structures in the ocean environment. *Cement and Concrete Research*, 39(12), 1269-127 durable properties of concrete.
24. De Belie, N., et al. (2018). Concrete in aggressive environments: New solutions. *Materials and Structures*, 51(3), 1-13.
25. Mori, Y., et al. (2011). Improvement of sulfuric acid resistance of concrete by adding antimicrobial agent. *Construction and Building Materials*, 25(2), 528-533.
26. Khoury, G. A. (2004). Concrete for nuclear reactors. *Journal of Civil Engineering and Management*, 10(1), 17-30.
27. Ma, J., & Li, V. C. (2015). Durability of engineered cementitious composites (ECC) under various environments. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(11), 04015024.
28. Bentz, D. P., & Garboczi, E. J. (2002). Modelling the interfacial transition zone in concrete: A review. *Cement and Concrete Composites*, 24(2), 241-249.

4

Betonun Reolojisi ve Kimyasal Katkılar: İşlenebilirliğin Bilimi ve Kontrolü**4.1. Taze Betonun Davranışı ve Reolojinin Önemi**

Beton, taze halindeyken akışkan, yerleşebilir ve şekillendirilebilir olması gereken karmaşık bir süspansiyondur. Bu özellikler bütününe "işlenebilirlik" denir. İşlenebilirlik, betonun karıştırma, taşıma, yerleştirme, sıkıştırma ve bitirme işlemlerinin ne kadar kolay veya zor yapılabilirdiğini tanımlar. Yetersiz işlenebilirlik, betonun homojen dağılımını engeller, segregasyona (bileşen ayrışması) ve terlemeye (su yüzeye çıkması) yol açarak sertleşmiş betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerini olumsuz etkiler. Aşırı işlenebilirlik ise yine segregasyon ve terleme riskini artırır. Bu nedenle, taze betonun doğru işlenebilirliğe sahip olması, kaliteli ve uzun ömürlü betonarme yapılar için kritik öneme sahiptir.

Reoloji, malzemelerin deformasyonu ve akışı bilimidir. Taze beton reolojisi, betonun akışkanlık, viskozite ve akma gerilimi gibi özelliklerini nicel olarak tanımlar. Bu bilimsel yaklaşım, betonun sahada nasıl davranacağını öngörmemizi ve kimyasal katkıların aracılığıyla bu davranışı optimize etmemizi sağlar. Kimyasal katkı maddeleri, betonun reolojik özelliklerini hassas bir şekilde modifiye ederek, geleneksel yöntemlerle elde edilemeyecek performans seviyelerine ulaşılmasına olanak tanır.

4.2. Taze Beton Reolojisinin Temel Parametreleri

Taze beton, çoğunlukla Bingham plastik modeliyle tanımlanan, akma gerilimi ve plastik viskozite olmak üzere iki temel reolojik parametreye sahiptir:

- **Akma Gerilimi (τ_0):** Bir malzemenin akmaya başlaması için uygulanması gereken minimum gerilimdir. Taze betonda, akma gerilimi, betonun kendi ağırlığı altında akıp akmayacağını, kalıplara nasıl yerleşeceğini ve eğimli yüzeylerde nasıl duracağını belirler. Yüksek akma gerilimi, betonun daha az akışkan olduğu anlamına gelirken, düşük akma gerilimi daha akışkan bir beton gösterir. Kendiliğinden yerleşen betonlar (KYB) gibi özel beton türlerinde akma gerilimi çok düşüktür.



- **Plastik Viskozite (μ):** Akma gerilimi aşıldıktan sonra malzemenin akışkanlığa karşı gösterdiği dirençtir. Plastik viskozite, betonun pompalanabilirliğini, vibrasyonla sıkıştırılabilirliğini ve segregasyona karşı direncini etkiler. Yüksek viskozite, betonun daha "kalın" ve yapışkan olduğu anlamına gelirken, düşük viskozite daha "ince" ve akışkan bir beton gösterir.

Bu iki parametre, betonun işlenebilirliğini geleneksel çökme (slump) deneyi gibi tek bir değerle tanımlayan yöntemlere göre çok daha kapsamlı bir resim sunar. Farklı uygulama yöntemleri (pompalama, kendiliğinden yerleşme, püskürtme) farklı akma gerilimi ve viskozite kombinasyonları gerektirir.



4.3. Kimyasal Katkılar ve Reolojik Kontrol Mekanizmaları

Kimyasal katkı maddeleri, çimento ve diğer ince taneli malzemelerin parçacıklarının dağılımını ve dolayısıyla su-çimento etkileşimini değiştirerek betonun reolojik özelliklerini modifiye eder. Başlıca kimyasal katkı türleri ve etki mekanizmaları şunlardır:

- **Süperakışkanlaştırıcılar:**
 - **Etki Mekanizması:** En yaygın kullanılan katkı türlerinden biridir. Çimento partiküllerinin yüzeyine adsorbe olarak, parçacıklar arasında elektrostatik itme veya sterik engelleme (polimer zincirlerinin fiziksel ayrımı) yaratırlar. Bu etki, topaklanmış çimento partiküllerinin dağılmasını (dispersiyonunu) sağlar, böylece topakların içinde hapsolmuş suyu serbest bırakır ve daha düşük su/bağlayıcı oranlarında bile yüksek akışkanlık elde edilmesini sağlar.
 - **Reolojik Etki:** Akma gerilimini önemli ölçüde azaltırlar ve aynı zamanda plastik viskoziteyi de düşürebilirler. Bu sayede, betonun daha az suyla daha akışkan hale gelmesi sağlanır, bu da yüksek dayanım ve dayanıklılık için düşük su/bağlayıcı oranlarına ulaşmayı mümkün kılar. Özellikle polikarboksilat eter (PCE) bazlı süperakışkanlaştırıcılar, uzun polimer zincirleri sayesinde sterik engelleme mekanizmasıyla çok etkili dispersiyon sağlarlar ve yaygın olarak kullanılırlar.
- **Viskozite Düzenleyici Katkılar (VMA):**
 - **Etki Mekanizması:** Bu katkılar (genellikle polimer esaslı), betonun su tutma kapasitesini artırarak veya suyun viskozitesini değiştirerek segregasyonu önler ve viskoziteyi dengeler.
 - **Reolojik Etki:** Akma gerilimini nispeten korurken, plastik viskoziteyi artırarak betonun daha "kohezif" (tutarlı) olmasını sağlarlar. Bu, özellikle kendiliğinden



yerleşen betonlarda veya segregasyon riski yüksek karışımlarda agregaların ayrışmasını önlemek için önemlidir. Pompalama performansı ve tünel işlerinde sıklıkla kullanılırlar.

- **Priz Geciktiriciler ve Hızlandırıcılar:**

- **Etki Mekanizması:** Priz geciktiriciler (şekerler, lignosülfonatlar, hidroksikarboksilik asitler) çimento hidratasyonunu yavaşlatarak işlenebilirlik süresini uzatır. Priz hızlandırıcılar (kalsiyum klorür, kalsiyum nitrit) ise hidratasyonu hızlandırarak erken yaş dayanım gelişimini teşvik eder.
- **Reolojik Etki:** İşlenebilirlik süresini ve dolayısıyla taze betonun akışkanlığını belirli bir süre boyunca korumak veya daha kısa sürede sertleşme sağlamak için akma gerilimi ve viskozitenin zaman içindeki değişimini kontrol ederler. Büyük hacimli dökümlerde, uzun mesafeli taşımalarda veya sıcak/soğuk hava koşullarında reolojinin kontrolü için hayati öneme sahiptirler.

- **Hava Sürükleyici Katkılar:**

- **Etki Mekanizması:** Beton içinde mikroskobik, stabilize edilmiş hava boşlukları oluştururlar. Bu boşluklar, donma-çözülme direncini artırmanın yanı sıra, top-yuvar bilye etkisi gibi bir kayganlaştırıcı etki de yaratabilirler.
- **Reolojik Etki:** Genellikle betonun işlenebilirliğini bir miktar artırarak akma gerilimini düşürebilirler, ancak aşırı hava içeriği viskoziteyi olumsuz etkileyebilir. Dozaj ve hava boşluğu yapısı hem dayanıklılık hem de reolojik performans için hassas ayar gerektirir.

4.4. Özel Beton Türlerinde Reolojik Kontrolün Önemi

Kimyasal katkılarla reolojik kontrol, belirli özel beton türlerinin geliştirilmesi ve uygulanması için vazgeçilmezdir:

- **Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB):** KYB, kendi ağırlığı altında, hiçbir sıkıştırma gerektirmeden kalıbı tamamen doldurabilen ve donatı boşluklarından geçebilen yüksek akışkanlıkta bir betondur. Bunun için çok düşük akma gerilimi ve segregasyonu önleyecek uygun viskoziteye sahip olması gerekir. Süperakışkanlaştırıcılar ve viskozite düzenleyici katkıları, KYB'nin üretiminde temel bileşenlerdir.
- **Pompalanabilir Beton:** Betonun uzun mesafelere ve yüksek katlara pompalanabilmesi için akma geriliminin uygun seviyede olması ve pompa içinde segregasyona uğramaması gerekir. Süperakışkanlaştırıcılar, pompalama basıncını azaltarak ve boru içindeki sürtünmeyi düşürerek pompalama performansını optimize eder. Viskozite düzenleyiciler de segregasyonu önleyerek pompalama sırasında tutarlılığı sağlar.
- **Püskürtme Beton (Shotcrete):** Bu beton, yüzeylere yüksek hızda püskürtülerek uygulanır. İyi bir püskürtme performansı için, betonun pompalanabilirliğinin yanı sıra, yüzeye yapışma (geri sıçramayı (rebound) azaltma) ve sarkma direnci gibi reolojik özelliklerin kontrolü hayati öneme sahiptir. Özel priz hızlandırıcılar ve viskozite düzenleyiciler, püskürtme betonun reolojisini bu gereksinimlere göre optimize eder.
- **3 Boyutlu (3B) Yazdırılabilir Beton:** 3B baskı ile üretilen betonun, baskı sırasında akışkan olması (yazdırılabilirlik), ancak katmanlar üst üste eklendiğinde hemen şeklini koruyabilmesi (yeterli erken yaş dayanımı ve akma gerilimi) gerekir. Bu çelişkili



gereksinimleri karşılamak için süperakışkanlaştırıcılar, priz kontrol ediciler ve viskozite düzenleyiciler gibi katkıların hassas kombinasyonları kullanılır.

4.5. Reoloji Ölçüm Yöntemleri ve Gelecek Perspektifleri

Taze beton reolojisini ölçmek için laboratuvarlarda ve sahada farklı cihazlar kullanılmaktadır:

- **Geleneksel Testler:** Çökme (slump) ve yayılma (spread) testleri, işlenebilirlik hakkında hızlı ve pratik bilgi verse de betonun reolojik parametreleri hakkında nicel veri sağlamazlar ve yalnızca tek bir akış noktasını gösterirler.
- **Reometreler:** Beton reometreleri, taze betona farklı hızlarda kesme gerilimi uygulayarak akma gerilimi ve plastik viskozite gibi reolojik parametreleri doğrudan ölçebilirler. Bu cihazlar, bilimsel araştırmalar ve yüksek performanslı betonların tasarımında daha detaylı bilgi sağlar.
- **Gelişmiş Sensörler ve Dijitalleşme:** Günümüzde, beton mikserlerine, pompalarına veya kamyonlarına entegre edilen sensörler, taze betonun reolojik özelliklerini gerçek zamanlı olarak izleyebilmektedir. Bu veriler, yapay zekâ ve makine öğrenimi algoritmalarıyla analiz edilerek, betonun kıvamının veya viskozitesinin sahada otomatik olarak ayarlanmasına olanak tanır. Bu sayede, "akıllı beton" üretimi ve uygulaması daha da yaygınlaşacaktır.

4.6. Sonuç

Taze betonun reolojisi, beton teknolojisinin temelini oluşturan ve başarılı uygulamalar için kritik öneme sahip bir alandır. Kimyasal katkı maddeleri, süperakışkanlaştırıcılar, viskozite düzenleyiciler ve priz kontrol ediciler aracılığıyla betonun akma gerilimi, plastik viskozite ve işlenebilirlik süresi gibi reolojik özelliklerini hassas bir şekilde kontrol etmemizi sağlar. Bu kontrol, sadece betonun kolayca yerleştirilmesini ve sıkıştırılmasını sağlamakla kalmaz, aynı zamanda segregasyonu önleyerek ve homojenliği artırarak sertleşmiş betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerini de doğrudan etkiler.

Özellikle kendiliğinden yerleşen beton, pompalama betonu ve 3B yazdırılabilir beton gibi özel uygulamalarda, kimyasal katkılar olmadan istenen reolojik performanslara ulaşmak neredeyse imkansızdır. Beton ve çimento kimyasal katkı üreticileri, reoloji bilimindeki uzmanlıklarıyla, inşaat sektörüne özel ihtiyaçlara göre optimize edilmiş çözümler sunmaya devam etmektedir. Gelecekte, daha gelişmiş reoloji ölçüm teknikleri ve dijitalleşmenin sağladığı gerçek zamanlı kontrol yetenekleri sayesinde, betonun işlenebilirliği üzerindeki hakimiyetimiz daha da artacak ve bu da daha yüksek kaliteli, sürdürülebilir ve yenilikçi betonarme yapıların inşasına olanak tanıyacaktır.

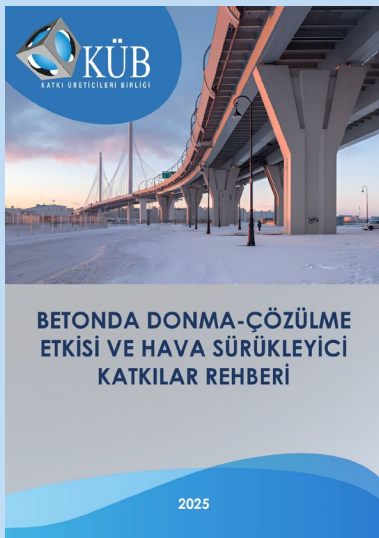
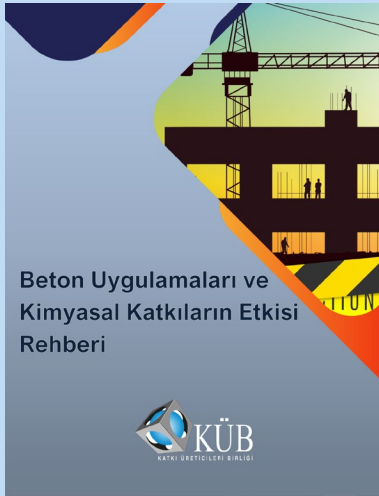
Faydalı Kaynaklar

1. Ferraris, C. F. (1999). Measurement of the rheological properties of high performance concrete: State of the art report. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 104(5), 469-482.
2. Rixom, R., & Mailvaganam, N. (1999). *Chemical Admixtures for Concrete*. E & FN Spon.
3. Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. McGraw-Hill Education.
4. Plank, J., et al. (2015). A review of superplasticizer mechanisms and interactions with cement. *Cement and Concrete Research*, 71, 4-19.
5. Okamura, H., & Ozawa, K. (1995). Mix design for self-compacting concrete. *Concrete Library of JSCE*, 25, 107-120.



6. Billberg, P. (2006). *Concrete Rheology: Rheology of Cement-Based Self-Compacting Concrete*. KTH Royal Institute of Technology.
7. Toutou, Z., et al. (2004). Viscosity modifying admixtures for self-compacting concrete: Influence on rheological properties. *Cement and Concrete Research*, 34(8), 1335-1342.
8. ACI Committee 308. (2016). *Guide to Curing Concrete (ACI 308R-16)*. American Concrete Institute.
9. Ramachandran, V. S. (1995). *Concrete Admixtures Handbook: Properties, Science, and Technology*. Noyes Publications.
10. Tse, H., et al. (2004). Rheological characterization of cement pastes with air-entraining admixtures. *Cement and Concrete Research*, 34(9), 1641-1647.
11. Roussel, N. (2018). *Rheology of Fresh Concrete*. CRC Press.
12. Roussel, N., & Cussat-Blanc, S. (2018). The fresh properties of 3D printable concrete: A review. *Additive Manufacturing*, 22, 59-71.
13. Le, T. T., et al. (2012). 3D printing of cementitious materials: Rheological requirements for extrusion. *Cement and Concrete Research*, 42(7), 969-974.
14. Khayat, K. H., & Yahia, A. (2019). *Self-Consolidating Concrete: Properties, Design, and Applications*. CRC Press.
15. ACI Committee 506. (2005). *Guide to Shotcrete (ACI 506R-05)*. American Concrete Institute.
16. Geiker, M. R., et al. (2002). Rheology of fresh concrete: A review of testing methods and their correlation to slump. *Cement and Concrete Research*, 32(10), 1647-1654.
17. Khayat, K. H., & Assaad, J. J. (2002). Rheological properties of self-consolidating concrete with various chemical admixtures. *ACI Materials Journal*, 99(2), 170-178.
18. Vance, S. M., et al. (2018). Development of a real-time fresh concrete rheometer for quality control. *Construction and Building Materials*, 178, 114-123.
19. Zhang, X., et al. (2024). Machine learning for optimizing the use of chemical admixtures in concrete: A review. *Automation in Construction*, 159, 105273.
20. Roussel, N., et al. (2009). The effect of viscosity modifying admixtures on the rheological properties of cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 39(8), 654-661.

KÜB YAYINLARI



KÜB ÜYELERİ

Akkim

chryso
SAINT-GOBAIN

EGECRETE
A licensee of EUCLID CHEMICAL

FOSROC
BY SCC

LYKSOR
Innovation & Trust

MAPEI
YAPIŞTIRICILAR • MASTİKLER • İNŞAAT KİMYASALLARI

onbironendüstriyel

Polisan
YAPIKİM

Sika®
BUILDING TRUST

YAPICHEM

kub.org.tr

