



KÜB BÜLTENİ

8

Nisan 2025

İÇİNDEKİLER

- ❑ **BÖLÜM 1 - Sürdürülebilir Beton İçin Yeni Nesil Bağlayıcılar: LC3 Çimentosu** (syf. 1)
- ❑ **BÖLÜM 2 - Ultra Yüksek Performanslı Beton (UYPB) Teknolojisi ve Katkıların Önemi** (syf. 8)
- ❑ **BÖLÜM 3 - Alkali-Silika Reaksiyonu (ASR) ve Önleyici Yaklaşımlar** (syf. 10)
- ❑ **BÖLÜM 4 - Betonarme Yapılarda Korozyon Kontrolü: İnhibitör Katkıların Rolü** (syf. 21)

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





BÖLÜM 1

Sürdürülebilir Beton İçin Yeni Nesil Bağlayıcılar: LC3 Çimentosu

1.1. LC3: Tanım, Bileşenler ve CO₂ Azaltım Potansiyeli

Kireçtaşı Kalsine Kil Çimentosu (Limestone Calcined Clay Cement - LC3), çimento üretiminden kaynaklanan karbondioksit (CO₂) emisyonlarını önemli ölçüde azaltma potansiyeli sunan, düşük karbonlu bir kompoze çimento türüdür. LC3'ün temel bileşenleri Portland çimentosu klinkeri, kalsine edilmiş kil (genellikle kaolinitik killer), öğütülmüş kireçtaşı ve alçıtaşıdır. Tipik bir LC3 formülasyonu, ağırlıkça %50 klinker, %30 kalsine kil, %15 kireçtaşı ve %5 alçıtaşıdan oluşmaktadır.

LC3 teknolojisinin CO₂ azaltımındaki temel mekanizması, üretim süreci oldukça karbon-yoğun olan klinker miktarının ikame edilmesidir. Beton üretimindeki emisyonların yaklaşık %90'ından sorumlu olan klinker, LC3 üretiminde %50 oranında, hatta özel durumlarda %70'e varan oranlarda azaltılabilmektedir. Bu ikame sayesinde, LC3 çimentosu kullanılarak üretilen betonun karbon ayak izi, geleneksel Portland çimentosuna kıyasla %30 ila %40 oranında düşürülebilmektedir. Küresel ölçekte yaygınlaşması durumunda, LC3 teknolojisinin 2030 yılına kadar 500 milyon ton CO₂ emisyonunu önleme potansiyeli bulunmaktadır. Bu durum, çimento endüstrisinin dekarbonizasyonu açısından LC3'ü stratejik bir çözüm haline getirmektedir; zira çimento sektörü küresel CO₂ emisyonlarının yaklaşık %8'inden sorumludur.

LC3'ün önemli bir avantajı da üretiminde klinker üretimi için gerekli yüksek kaliteli kireçtaşlarına kıyasla daha yaygın bulunan düşük kaliteli killerin ve kireçtaşlarının kullanılabilmesidir. Bu durum, özellikle Afrika gibi klinker üretimine uygun kireçtaşı rezervlerinin kısıtlı olduğu, ancak kil kaynaklarının bol bulunduğu bölgeler için büyük bir potansiyel taşımaktadır. LC3 teknolojisi, mevcut çimento üretim altyapılarında küçük ayarlamalarla uygulanabilir olması nedeniyle de dikkat çekicidir. Dünya genelindeki çimento fabrikalarının yaklaşık %75'inin LC3 üretebilecek kapasitede olduğu tahmin edilmektedir. Bu faktörler, LC3'ün sadece çevresel değil, aynı zamanda ekonomik ve bölgesel kalkınma açısından da önemli faydalar sunabileceğini göstermektedir.

1.2. LC3 Üretimi ve Özellikleri

LC3 üretim süreci, klinker üretimine kıyasla önemli enerji tasarrufları sağlamaktadır. Killerin kalsinasyonu için gereken sıcaklık (yaklaşık 700-800°C), klinker üretimi için gereken sıcaklığın (1400-1500°C) oldukça altındadır. Bu durum, üretimde kullanılan yakıt miktarını ve ilişkili emisyonları azaltır. Ayrıca, kalsine edilmiş killerin klinkere göre daha kolay öğütülebilir olması da ek enerji tasarrufu sağlamaktadır.



LC3'ün performansı, bileşenleri arasındaki sinerjik reaksiyonlara dayanmaktadır. Kalsine kil (özellikle içerdiği metakaolin), çimento hidratasyonu sırasında ortaya çıkan kalsiyum hidroksit (portlandit) ile puzolanik reaksiyona girerek ikincil kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jeli oluşturur. Aynı zamanda, kireçtaşı tozu da kalsine kilden gelen alüminat fazlarıyla reaksiyona girerek karboalüminat fazlarının oluşumunu teşvik eder. Bu reaksiyonlar sonucunda, betonun mikro yapısı sıkılaşır ve gözenek yapısı inceler.

Bu gelişmiş mikro yapı, LC3 betonuna önemli avantajlar kazandırır. Mekanik dayanım açısından, LC3 betonları genellikle geleneksel OPC betonlarına benzer veya eşdeğer performans sergilemektedir. Daha da önemlisi, incelmış gözenek yapısı sayesinde LC3 betonları, klorür ve sülfat gibi agresif iyonların girişine karşı daha yüksek direnç gösterir ve su geçirimsizliği daha düşüktür. Bu özellikler, LC3'ü özellikle deniz ortamları gibi zorlu çevre koşullarına maruz kalan yapılar için uygun bir seçenek haline getirir. Dolayısıyla, LC3 sadece CO₂ azaltımı hedefiyle değil, aynı zamanda potansiyel olarak daha dayanıklı ve uzun ömürlü beton üretimi için de değerli bir alternatiftir.

1.3. Kimyasal Katkıların (Süperakışkanlaştırıcılar) LC3 Sistemlerindeki Rolü ve Etkileşimi

Modern beton üretiminde olduğu gibi, LC3 sistemlerinde de istenen performansı elde etmek için kimyasal katkıların, özellikle süperakışkanlaştırıcıların (SA) kullanımı zorunludur. Ancak, LC3 sistemleri katkı teknolojisi açısından bazı özel zorluklar sunmaktadır. Kalsine killerin, özellikle metakaolinin, yüksek yüzey alanı ve reaktivitesi, beton karışımının su ihtiyacını artırabilir ve işlenebilirliğini olumsuz etkileyebilir. Genel olarak mineral katkıların kullanımı, su ihtiyacını artırma ve erken yaş dayanımlarını düşürme eğilimindedir.

Bu noktada, polikarboksilat eter (PCE) esaslı SA'lar başta olmak üzere kimyasal katkıların devreye girer. SA'ların temel görevi, bağlayıcı taneciklerini (klinker, kalsine kil, kireçtaşı) etkin bir şekilde dağıtarak karışımın akışkanlığını artırmak, su ihtiyacını azaltmak ve işlenebilirliği iyileştirmektir. Ancak SA'ların LC3 bileşenleriyle etkileşimi karmaşıktır. PCE molekülleri, bağlayıcı taneciklerinin yüzeyine adsorbe olarak etki gösterir. Kalsine killerin yüksek yüzey alanı, SA'ların daha fazla adsorbe olmasına neden olabilir. Ayrıca, bazı kil minerallerinin katmanlı yapısı, SA moleküllerinin katmanlar arasına girerek (interkalasyon) hapsolmesine ve etkinliklerinin azalmasına yol açabilir. Bu durum, LC3 betonlarında daha yüksek SA dozajı gereksinimine veya daha hızlı kıvam kaybına neden olabilir. Dolayısıyla, LC3 sistemleri için standart SA'ların performansı yeterli olmayabilir ve uyumluluk sorunları dikkatle değerlendirilmelidir.

Bu zorlukların üstesinden gelmek ve LC3 teknolojisinin potansiyelini tam olarak ortaya çıkarmak için kimyasal katkı üreticilerinin rolü kritiktir. Kimyasal katkı üreticileri, LC3 sistemlerinin özel gereksinimlerine uygun, optimize edilmiş SA'lar geliştirmektedir. Bu özel katkıları, LC3 betonlarının su ihtiyacını etkin bir şekilde azaltmayı, işlenebilirlik kaybını kontrol etmeyi, erken yaş dayanımını iyileştirmeyi ve priz süresini ayarlamayı hedefler.



LC3'ün başarılı bir şekilde yaygınlaşması, büyük ölçüde bu özel olarak tasarlanmış kimyasal katkıların geliştirilmesine ve doğru kullanımına bağlıdır. Ayrıca, LC3 karışım tasarımının optimizasyonu üzerine devam eden araştırmalar bulunmaktadır. İstatistiksel modelleme ve çok amaçlı optimizasyon yaklaşımları kullanılarak, basınç dayanımı, maliyet ve CO₂ emisyonu gibi faktörler dengelenerek en uygun karışım oranları belirlenmeye çalışılmaktadır. Bu çalışmalar, geleneksel olarak kabul gören 2:1 kalsine kil/kireçtaşı oranının her zaman optimum olmayabileceğini ve hedeflenen dayanım sınıfına göre bu oranın ayarlanması gerektiğini göstermektedir.

Kaynaklar

1. Yeni Nesil Çimentolar, TÜRKÇİMENTO. <https://ecka.com.tr/ekler/yeni-nesil-cimentolar-1651242120.pdf>
2. Beton Teknolojisinde Yeni Trendler ve Kimyasal Katkıların Rolü, KÜB. <https://kub.org.tr/beton-teknolojisinde-yeni-trendler-ve-kimyasal-katkilarin-rolu-2/>
3. Bhandari, S., et al. (2023). A systematic study on sustainable low carbon cement - Superplasticizer interaction: Fresh, mechanical, microstructural and durability characteristics. *Heliyon*, 9(8), e19176. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19176>
4. Wang, H., et al. (2024). Multi-Objective Optimisation of Limestone-Calcined Clay Cement (LC3) Mortar Mixtures Considering Compressive Strength, Environmental Impact, and Cost. *Buildings*, 14(12), 524. <https://doi.org/10.3390/buildings14120524>
5. Ogunbayo, B. F., et al. (2023). Limestone Calcined Clay Cement (LC3) Concrete: A Review. University of East London Repository. Retrieved from <https://repository.uel.ac.uk/download/a9c3b34911ec9526428c490d9f57bb0df31349d9243ecfa5d85ba5bb99330ca5/2601984/Revised-%20LC3%20Concrete-%20A%20Review.pdf>



BÖLÜM 2

Ultra Yüksek Performanslı Beton (UYPB) Teknolojisi ve Katkıların Önemi

2.1. UYPB: Tanım, Bileşenler ve Üretim Esasları

Ultra Yüksek Performanslı Beton (UYPB), geleneksel betona kıyasla oldukça yüksek basınç dayanımı (genellikle 150 MPa'dan büyük) ve üstün dayanıklılık özelliklerine sahip, ileri düzeyde bir çimentolu kompozit malzemedir. UYPB karışımları, sünek bir davranış sergilemesi ve çekme dayanımını artırması amacıyla genellikle lif (çoğunlukla çelik lif) takviyesi içerir.

UYPB'nin temel bileşenleri şunlardır: Yüksek dozajda Portland çimentosu, çok ince agregası (genellikle 0,15-0,60 mm boyutunda ince kum veya kuvars tozu; iri agregası kullanılmaz), puzolanik mineral katkıları (özellikle silis dumanı), çok düşük oranda su ve yüksek miktarda yüksek oranda su azaltıcı (süperakışkanlaştırıcı - SA) kimyasal katkı. Çekme performansı ve tokluğu artırmak için karışıma genellikle hacimce %2-3 oranında çelik lif eklenir.

UYPB üretiminin temel prensipleri, geleneksel beton tasarımından farklı olarak, malzemenin mikro yapısını optimize etmeye odaklanır. Bu prensipler şunlardır:

- 1. Optimize Edilmiş Tane Boyu Dağılımı:** İri agregası kullanmayıp, çimento, mineral katkı ve çok ince agregaların tane boyutlarını dikkatlice seçerek ve oranlayarak mümkün olan en yüksek paketlenme yoğunluğunu elde etmek. Bu sayede boşluk oranı en aza indirilir.
- 2. Çok Düşük Su/Bağlayıcı (s/b) Oranı:** Paketleme yoğunluğunu artırmak ve boşlukları doldurmak için gereken su miktarını en aza indirmek. Tipik s/b oranları 0,18 ile 0,25 arasındadır.
- 3. Geliştirilmiş Mikro Yapı:** Düşük s/b oranı ve puzolanik reaksiyonlar (özellikle silis dumanı ile) sayesinde çok yoğun ve geçirimsiz bir matris oluşturmak. Bazı eski UYPB türlerinde (örneğin reaktif pudra betonu - RPC) sertleşme sonrası ısı işlem uygulanarak reaksiyonlar hızlandırılmış ve mikro yapı daha da iyileştirilmiştir, ancak günümüzde oda sıcaklığında kürlenmiş UYPB'ler daha yaygındır.
- 4. Lif Takviyesi:** Gevrek olan çimentolu matrise süneklik ve tokluk kazandırmak için yüksek oranda (genellikle çelik) lif kullanmak.

Bu prensipler, UYPB'nin tasarım felsefesinin geleneksel betondan ziyade, malzeme biliminin mikro yapı mühendisliği ilkelerine dayandığını göstermektedir. Paketleme teorisi, reoloji kontrolü ve kompozit malzeme mekaniği gibi kavramlar UYPB tasarımında merkezi bir rol oynar. Bu yaklaşım, UYPB'yi adeta bir seramik veya metal matris kompozit gibi ele almayı gerektirir.



2.2. UYPB'nin Mekanik Özellikleri ve Durabilitesi

UYPB, optimize edilmiş mikro yapısı sayesinde olağanüstü mekanik özellikler sergiler. Basınç dayanımı genellikle 150 MPa'nın üzerindedir ve özel uygulamalarda (Reaktif Pudra Betonu - RPC gibi) 200 MPa ila 800 MPa aralığına ulaşabilir. Çekme dayanımı da geleneksel betona göre oldukça yüksektir, genellikle 7-9 MPa'nın üzerinde olup lif takviyesi ile 10-15 MPa'yı aşabilir. Liflerin varlığı, UYPB'ye çatlak sonrası yük taşıma kapasitesi ve önemli ölçüde artırılmış süneklik (tokluk) kazandırır; bu süneklik yüksek performanslı betonunkinden yüzlerce kat fazla olabilir. Bu özellik, malzemenin gevrek kırılma yerine daha sünek bir şekilde davranmasını sağlar.

Mekanik performansının yanı sıra, UYPB'nin en dikkat çekici özelliklerinden biri de üstün dayanıklılığıdır. Çok yoğun ve düşük boşluklu mikro yapısı, su, klorür iyonları, sülfatlar ve CO₂ gibi zararlı maddelerin betona nüfuz etmesini büyük ölçüde engeller. Bu nedenle UYPB, donma-çözülme döngülerine, kimyasal saldırılara ve aşınmaya karşı son derece dirençlidir. Bu yüksek dayanıklılık, UYPB ile inşa edilen yapıların servis ömrünü önemli ölçüde uzatma ve bakım maliyetlerini azaltma potansiyeli sunar.

UYPB'nin bazı zorlukları da vardır. Çok düşük s/b oranı ve yüksek çimento içeriği nedeniyle, özellikle erken yaşlarda belirgin otojen büzülme gösterebilir ve bu durum çatlama riskini artırır. Bu nedenle büzülmeyi azaltıcı stratejilerin uygulanması gerekebilir. Diğer bir önemli zorluk ise, yüksek kaliteli malzemelerin (özellikle çimento, silis dumanı, SA ve lifler) yüksek oranlarda kullanılmasından kaynaklanan yüksek başlangıç maliyetidir. UYPB'nin çevresel etkisi de yüksek çimento içeriği nedeniyle başlangıçta geleneksel betondan daha yüksek olabilir. Bu nedenle, UYPB uygulamalarında performans, maliyet ve sürdürülebilirlik arasında bir denge kurulması gerekmektedir. Araştırmalar, malzeme optimizasyonu ve mineral katkı kullanımı ile maliyeti ve çevresel etkiyi azaltmaya odaklanmaktadır. Uzun servis ömrü ve azaltılmış bakım ihtiyacı, yaşam döngüsü maliyeti ve çevresel etki analizlerinde UYPB'yi avantajlı konuma getirebilir.

2.3. Süperakışkanlaştırıcıların (PCE) UYPB'deki Kritik Fonksiyonu

Yüksek performanslı süperakışkanlaştırıcılar (SA), özellikle polikarboksilat eter (PCE) esaslı olanlar, UYPB teknolojisinin olmazsa olmaz bir parçasıdır. UYPB'nin karakteristik özelliği olan son derece düşük su/bağlayıcı oranlarında (0,18-0,25), yeterli işlenebilirlik ve akıcılığın sağlanması ancak yüksek dozajda ve yüksek etkinlikte SA kullanımı ile mümkündür.

SA'ların UYPB'deki temel işlevi, bağlayıcı tanecikleri (çimento, silis dumanı vb.) arasındaki çekim kuvvetlerini yenerek taneciklerin topaklanmasını önlemek ve karışımın akışkanlığını sağlamaktır. PCE molekülleri, tanecik yüzeylerine adsorbe olarak elektrostatik itme ve sterik engelleme mekanizmalarıyla bu dağılımı sağlar. Bu sayede, çok az suyla bile UYPB karışımı kendiliğinden yerleşebilen veya kolayca sıkıştırılabilen bir kıvama (tipik yayılma 200-250 mm) ulaşabilir. Yeterli işlenebilirlik, liflerin karışım içinde homojen bir şekilde dağılması ve kalıpların boşluksuz doldurulması için de kritik öneme sahiptir.



UYPB formülasyonlarında genellikle yüksek oranda silis dumanı gibi ince puzolanik malzemeler kullanıldığından, bu malzemelerle uyumlu, özel olarak tasarlanmış SA'ların kullanılması gerekebilir. SA dozajı da dikkatle ayarlanmalıdır; tipik olarak bağlayıcı ağırlığının %2,0-3,5'i gibi yüksek oranlarda kullanılır. Optimum dozaj, yeterli akıcılığı sağlarken ayrışma, terleme veya aşırı priz gecikmesi gibi olumsuz etkilerden kaçınmayı gerektirir.

Sonuç olarak, PCE süperakışkanlaştırıcılar UYPB için sadece bir katkı maddesi değil, adeta bir "anahtar teknoloji"dir. Onların yüksek oranda su azaltma ve dağıtma kapasitesi olmadan, UYPB'nin temelini oluşturan yoğun mikro yapı ve yüksek performansı sağlayan düşük s/b oranlarına ulaşmak pratik olarak mümkün olmazdı. Bu nedenle, UYPB'nin geliştirilmesi ve uygulanması, SA teknolojisindeki ilerlemelerle doğrudan ilişkilidir.

Tablo 1, literatürde yer alan bazı UYPB türleri için tipik karışım oranlarını göstermektedir. Bu oranlar, UYPB'nin yüksek bağlayıcı ve SA içeriği, düşük su miktarı ve iri agrega içermeyen yapısını vurgulamaktadır.

Tablo 1. Tipik UYPB karışım oranları (kg/m³)

Bileşenler (kg/m ³)	RPC 200	RPC 800	BSI	Cemtec	Ductal	Dura	Tipik Aralık
Portland Çimentosu	955	1000	1114	1050	712	911	~1000
Kum (İnce Agrega)	1051	500	1072	514	1020	911	~1000
Silis Dumanı	239	230	169	268	231	225	~200 (Bağlayıcının %20'si)
Öğütülmüş Kuvars	–	390	–	–	211	–	Değişken
Su	162	190	211	180	109	200	<180
Süper akışkanlaştırıcı (SA)	15	19	40	44	30.7	38	Yüksek Dozaj
Çelik Fiber	168	630	234	858	156	173	~156 (Hacimce %2)
Su/Bağlayıcı Oranı (s/b)	~0,14	~0,15	~0,16	~0,14	~0,11	~0,18	<0,18 – 0,25
Basınç Dayanımı (MPa)	170 – 230	490 – 680	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek	>150

*Not: Tablodaki değerler yaklaşıktır ve Spesifik formülasyonlara göre değişiklik gösterebilir. Bağlayıcı miktarı çimento ve silis dumanı toplamı olarak dikkate alınmıştır.



Kaynaklar

1. Engin, Y. (2023, November 20). Ultra Yüksek Performanslı Beton. Beton ve Çimento Dünyası. Retrieved from <https://www.betonvecimento.com/beton-2/ultra-yuksek-performansli-beton>
2. Yoo, D. Y., & Kim, S. (2024). Recent Advances in Ultra-High-Performance Concrete (UHPC): A Comprehensive Review of Materials, Properties, Manufacturing, and Applications. *Materials*, 14(2), 382. <https://doi.org/10.3390/ma14020382>
3. Wang, D., et al. (2024). Design methodologies and performance regulation strategies for ultra-high performance concrete (UHPC): A comprehensive review. *Journal of Building Engineering*, 86, 108897. <https://doi.org/10.1080/21650373.2024.2401932>
4. Ahmad, S., et al. (2022). Ultra-High-Performance Concrete (UHPC): A State-of-the-Art Review. *Materials*, 15(12), 4131. <https://doi.org/10.3390/ma15124131>



BÖLÜM 3

Alkali-Silika Reaksiyonu (ASR) ve Önleyici Yaklaşımlar

3.1. ASR Mekanizması ve Betona Etkileri

Alkali-Silika Reaksiyonu (ASR), beton dayanıklılığını tehdit eden önemli kimyasal bozulma mekanizmalarından biridir. Bu reaksiyon, betondaki agrega içerisinde bulunan belirli reaktif silika formları ile çimento hidratasyonu sonucu oluşan veya dışarıdan betona nüfuz eden alkali hidroksitler (sodyum - Na^+ ve potasyum - K^+ iyonları içeren) arasındaki kimyasal etkileşimdir. Reaksiyonun gerçekleşebilmesi için ortamda yeterli miktarda nem bulunması da gereklidir.

ASR mekanizması iki ana aşamada ilerler:

- 1. Jel Oluşumu:** Alkali iyonları, agreganın reaktif silika bileşenleriyle reaksiyona girerek viskoz, higroskopik (nem çeken) bir alkali-silika jeli oluşturur.
- 2. Genleşme:** Oluşan bu jel, çevresindeki gözenek suyunu emerek şişer. Bu şişme, betonun iç yapısında çekme gerilmeleri oluşturur.

Bu içsel gerilmeler zamanla betonun çekme dayanımını aştığında, betonda çatlaklar meydana gelir. ASR kaynaklı çatlaklar genellikle yüzeyde "harita çatlağı" veya "ağsı çatlak" olarak adlandırılan karakteristik bir desen oluşturur. ASR oldukça yavaş ilerleyen bir reaksiyondur ve belirtilerinin (çatlaklar, genleşme) ortaya çıkması aylar hatta yıllar sürebilir. Bu nedenle bazen "beton kanseri" olarak da adlandırılır.

ASR'nin betona etkileri oldukça ciddidir:

- Oluşan çatlaklar betonun yapısal bütünlüğünü bozar, dayanımını ve taşıma kapasitesini azaltır.
- Çatlaklar, su, klorür, sülfat gibi diğer zararlı maddelerin betona daha kolay nüfuz etmesine yol açarak donma-çözülme hasarı, donatı korozyonu gibi diğer bozulma mekanizmalarını hızlandırır.
- Yapının estetik görünümünü bozar.
- Sonuç olarak, ASR beton yapının servis ömrünü önemli ölçüde kısaltabilir ve pahalı onarım maliyetlerine yol açabilir.

ASR hasarının meydana gelmesi için üç temel koşulun aynı anda mevcut olması gerekir: **(1)** Agregada yeterli miktarda ve reaktivitede silika bulunması, **(2)** Beton boşluk çözeltisinde yeterli konsantrasyonda alkali hidroksit bulunması ve **(3)** Reaksiyonun ve jelin genleşmesinin devamı için yeterli nemin bulunması. ASR'yi önleme stratejileri, bu üç koşuldan en az birini ortadan kaldırmaya veya etkisini sınırlamaya odaklanır.



3.2. ASR Önleme Yöntemleri: Agregas, Çimento Seçimi ve Mineral Katkılar

ASR riskini yönetmek için çeşitli önleyici tedbirler bulunmaktadır. Bu tedbirler genellikle birden fazla stratejinin bir kombinasyonunu içerir:

- **Agrega Seçimi:** En temel ve etkili önlem, reaktif silika içermeyen veya reaktivitesi düşük olan agregaların kullanılmasıdır. Agregaların potansiyel reaktivitesi, standart laboratuvar test yöntemleri (örneğin, ASTM C1260 hızlandırılmış harç çubuğu testi veya ASTM C1293 beton prizma testi) ile belirlenmelidir. Reaktif olduğu bilinen agregaların kullanımından kaçınılmalıdır.
- **Düşük Alkali İçerikli Çimento Kullanımı:** Reaktif agregas kullanımının kaçınılmaz olduğu durumlarda, çimentodan kaynaklanan alkali miktarını sınırlamak önemlidir. Genellikle eşdeğer alkali içeriği ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = \text{Na}_2\text{O} + 0.658 \times \text{K}_2\text{O}$) %0,60'ın altında olan düşük alkali Portland çimentolarının kullanılması tavsiye edilir, ancak alkalilerin sadece çimentodan değil, karışım suyundan, kimyasal katkılardan veya dış çevreden (örneğin deniz suyu, buz çözücü tuzlar) de gelebileceği unutulmamalıdır.
- **Mineral Katkıların Kullanımı:** Uçucu kül (özellikle F sınıfı), yüksek fırın cürufu, silis dumanı gibi puzolanik veya çimentolu özellik gösteren mineral katkıların kullanımı, ASR'yi kontrol etmede oldukça etkilidir. Bu malzemeler ASR'yi birkaç mekanizma ile engeller:
 - Betonun boşluk yapısını incelterek ve geçirimsizliğini azaltarak nem ve alkali iyonlarının hareketini zorlaştırırlar.
 - Puzolanik reaksiyonlar sırasında alkali hidroksitleri tüketerek boşluk çözeltisindeki alkali konsantrasyonunu düşürürler.
 - Çimento yerine ikame edildiklerinde sistemdeki toplam alkali miktarını seyreltirler. Genellikle %20-30 gibi oranlarda mineral katkı kullanımı ASR gelişmesini önemli ölçüde azaltabilir.
- **Nem Kontrolü:** Betonun servis ömrü boyunca suya veya yüksek neme maruz kalmasını sınırlamak ASR riskini azaltır. Bu, düşük su/bağlayıcı oranı kullanarak ve uygun kürlenme yöntemleri uygulayarak betonun geçirimsizliğini en aza indirmekle başlar. Ayrıca, yüksek nemli ortamlarda beton yüzeyine koruyucu kaplamalar veya yalıtım membranları uygulamak da faydalı olabilir.

Etkili bir ASR önleme stratejisi genellikle bu yöntemlerin bir veya birkaçının bir arada kullanılmasını gerektirir. Örneğin, düşük alkali çimento kullanımı tek başına yeterli olmayabilir veya ekonomik olmayabilir; bu durumda mineral katkıların kullanımı daha uygun bir çözüm sunabilir. Benzer şekilde, hafif derecede reaktif agregaların kullanılması durumunda mineral katkıları veya lityum bileşikleri gibi ek önlemler gerekebilir.



3.3. Lityum Esaslı Kimyasal Katkılarla ASR Kontrolü

Geleneksel önleme yöntemlerinin yetersiz kaldığı veya uygulanamadığı durumlarda, lityum bazlı kimyasal katkıları ASR'yi kontrol etmek için oldukça etkili bir çözüm sunar. Bu katkıları arasında lityum nitrat (LiNO_3) özellikle öne çıkmaktadır.

Lityum bileşiklerinin ASR genleşmesini nasıl engellediğine dair kesin mekanizma tam olarak anlaşılmamış olsa da birkaç teori öne sürülmüştür:

- **ASR Jelinin Modifikasyonu:** Lityum iyonları (Li^+), alkali-silika jeli oluşum reaksiyonuna katılarak, sodyum (Na^+) ve potasyum (K^+) iyonlarının oluşturduğu jeli kıyasla daha az genleşen veya hiç genleşmeyen bir lityum-alkali-silikat jeli oluşumunu teşvik edebilir. Bu yeni jel daha az su emebilir veya daha kararlı olabilir.
- **Silika Çözünürlüğünün Azaltılması:** Lityum iyonlarının, reaktif silikanın alkali ortamda çözünme hızını yavaşlattığı düşünülmektedir. Silika çözünmesi ASR jelinin oluşumu için gerekli bir adım olduğundan, bu hızın yavaşlaması genleşmeyi sınırlar.
- **Jel Polimerizasyonunun Engellenmesi:** Lityum iyonlarının silikat yüzeylerine adsorpsiyonu veya çözeltideki etkileşimleri yoluyla, çözünmüş silikanın tekrar birleşerek genleşen bir jel yapısı oluşturmasını (repolimerizasyon) engelleyebileceği öne sürülmüştür.
- **Jel Parçacıkları Arasındaki İtme Kuvvetlerinin Azaltılması:** Bazı teorilere göre, lityum iyonları ASR jelinin kolloidal yapısını etkileyerek parçacıklar arasındaki itme kuvvetlerini azaltabilir ve böylece genleşme basıncını düşürebilir.

Lityum katkılarının etkinliği, doğru dozajın kullanılmasına bağlıdır. Dozaj genellikle, betondaki lityum iyonu miktarının toplam alkali iyonu miktarına (sodyum + potasyum) molar oranı ($\text{Li}:(\text{Na}+\text{K})$) olarak ifade edilir. LiNO_3 için genellikle 0,7 ila 0,8 civarındaki molar oranların çoğu agrega türü için etkili olduğu bildirilmiştir. Ancak, gereken optimum dozaj, agreganın reaktivite derecesine, betonun toplam alkali içeriğine ve mineral katkıların kullanılıp kullanılmadığına göre değişebilir.

Lityum hidroksit (LiOH) gibi diğer lityum bileşikleri de etkili olabilmekle birlikte, düşük dozajlarda kullanıldıklarında betonun boşluk suyu pH'ını artırarak ASR genleşmesini beklenmedik şekilde artırabilen "pessimum etkisi" riski taşırlar. LiNO_3 'ün önemli bir avantajı, boşluk suyu pH'ını önemli ölçüde artırmaması ve dolayısıyla bu pessimum etkisi riskini ortadan kaldırmasıdır. Bu nedenle LiNO_3 , ASR kontrolü için genellikle tercih edilen lityum bileşiğidir.

Lityum katkılarının betonun diğer özellikleri üzerindeki etkileri de araştırılmıştır. LiNO_3 'ün taze betonun işlenebilirliği üzerinde genellikle küçük etkileri olduğu (hafif akışkanlık artışı veya viskozite değişiklikleri) ve priz sürelerini önemli ölçüde etkilemediği bildirilmiştir. Bazı durumlarda, özellikle düşük alkali içerikli çimentolarla kullanıldığında, çimento hidratasyonunu hafifçe hızlandırabileceği gözlemlenmiştir, ancak bu etki genellikle uçucu kül gibi mineral katkıların kullanımıyla dengelenebilmektedir. Tipik kullanım dozajlarında betonun mekanik dayanımı üzerinde genellikle olumsuz bir etkisi rapor edilmemiştir.



Lityum katkıları, ASR mekanizmasına doğrudan kimyasal olarak müdahale eden bir strateji sunar. Bu, onları özellikle reaktif agregaların kullanımının zorunlu olduğu veya yüksek alkali seviyelerinden kaçınılamayan durumlarda değerli bir araç haline getirir. Diğer önleme yöntemleri (düşük geçirimsizlik, düşük alkali çimento, mineral katkı kullanımı) reaktanları veya taşıyıcıyı sınırlamaya odaklanırken, lityum doğrudan reaksiyonun kimyasını değiştirir.

Kaynaklar

1. Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM). (n.d.). Alkali Agregası Reaksiyonu. <https://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionDocuments/KGMdocuments/Baskanliklar/BaskanliklarTeknikArastirma/Yeni%20Klas%C3%B6r/Yay%C4%B1mlar/ALKAL%C4%B0%20AGREGA%20REAKS%C4%B0YONU.pdf>
2. Türkiye Hazır Beton Birliği (THBB) Akademi. (n.d.). Alkali Agregası Reaksiyonu. <https://www.thbbakademi.org/wp-content/uploads/2020/12/B2004.01.pdf>
3. RussTech. Prevent ASR-LN. <https://www.russtech.net.com/admixtures/asr-prevention/prevent-asr-ln>
4. 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. https://www.researchgate.net/publication/362665657_The_ASR_mechanism_in_concrete_and_the_influence_of_lithium_in_mitigating_it_A_critical_review
5. Kurtis, K. E., & Juenger, M. C. G. (2009). Influence of Lithium Nitrate Admixture on Early Age Concrete Behavior. Georgia Institute of Technology. <https://repository.gatech.edu/entities/publication/e6c55a2f-8943-4eff-b2b5-969ac6ba99d4>
6. Federal Highway Administration (FHWA). (2016, March 8). Lithium-Based Admixtures to Mitigate ASR. <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/pccp/03047/03.cfm>



BÖLÜM 4

Betonarme Yapılarda Korozyon Kontrolü: İnhibitör Katkıların Rolü

4.1. Donatı Korozyonu Mekanizması ve Tetikleyiciler

Betonarme, çeliğin yüksek çekme dayanımı ile betonun yüksek basınç dayanımını birleştiren kompozit bir malzemedir. Normal koşullarda beton, içerdiği çelik donatıyı korozyona karşı doğal olarak korur. Çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan yüksek alkalinite ($\text{pH} > 12,5$), çelik yüzeyinde mikroskobik kalınlıkta, yoğun ve stabil bir demir oksit tabakasının (pasif film) oluşmasını sağlar. Bu pasif tabaka, çeliği çevresel etkenlerden koruyarak korozyonu engeller. Bu koruyucu pasif tabaka zamanla iki ana mekanizma tarafından bozulabilir ve korozyon başlayabilir (depasivasyon):

1.Karbonasyon: Atmosferdeki karbondioksit (CO_2), betonun gözeneklerinden içeri sızarak boşluk suyundaki kalsiyum hidroksit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ile reaksiyona girer ve kalsiyum karbonat (CaCO_3) oluşturur. Bu reaksiyon, betonun pH değerini zamanla düşürür. pH değeri pasivasyon için kritik sınır olan yaklaşık 9-11'in altına düştüğünde, pasif tabaka kararlılığını yitirir ve genel korozyon başlayabilir.

2.Klorür Etkisi: Deniz suyu, buz çözücü tuzlar veya kirli agregalar gibi kaynaklardan gelen klorür iyonları (Cl^-), beton içerisine nüfuz ederek donatı yüzeyine ulaşabilir. Klorür konsantrasyonu belirli bir kritik eşik değerini aştığında, yüksek pH koşullarında bile pasif filmi yerel olarak parçalayarak "çukurlanma korozyonu" olarak bilinen hızlı ve tehlikeli bir korozyon türünü başlatır. Korozyonun başlaması için gereken bu kritik klorür eşiği, betonun kalitesine, çimento tipine ve diğer faktörlere bağlı olarak değişir.

Korozyon bir kez başladığında, bir elektrokimyasal hücre gibi çalışır:

- **Anot:** Pasif filmin bozulduğu bölgelerde demir atomları çözünerek elektronlarını serbest bırakır ($\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{++} + 2\text{e}^-$).
- **Katot:** Pasif filmin sağlam kaldığı, ancak oksijen ve suyun bulunduğu başka bölgelerde oksijen indirgenir ($\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$).
- **Elektrolit:** Betonun gözenek suyu, iyonların hareket etmesini sağlayan iletken ortam (elektrolit) görevi görür.

Bu elektrokimyasal reaksiyon sonucunda oluşan demir iyonları (Fe^{++}), hidroksit iyonları (OH^-) ve oksijen ile reaksiyona girerek hacimce orijinal çelikten birkaç kat daha büyük olabilen pas ürünlerini (hidratlanmış demir oksitler) oluşturur. Bu hacim artışı, beton içerisinde büyük içsel çekme gerilmeleri yaratır. Bu gerilmeler zamanla betonun çatlamasına, dökülmesine (spalling), donatı ile beton arasındaki aderansın (kenetlenme) kaybolmasına ve donatının kesit alanının azalmasına yol açar. Sonuç olarak, yapının taşıma kapasitesi ve servis ömrü ciddi şekilde tehlikeye girer. Donatı korozyonu, dünya genelinde betonarme yapıların erken bozulmasının ana nedenlerinden biridir. Korozyonun başlaması ani bir olaydır; yani, pH belirli bir seviyenin altına düşene veya klorür konsantrasyonu kritik eşiği aşana kadar donatı pasif



kalır, ancak bu eşik aşıldığında korozyon süreci başlar. Koruma stratejileri de genellikle bu eşik değerine ulaşılmasını geciktirmeye veya eşik değerini yükseltmeye odaklanır.

4.2. Korozyon İnhibitörlerinin Sınıflandırılması ve Çalışma Prensipleri

Korozyon inhibitörleri, beton içerisine az miktarda katıldığında veya sertleşmiş beton yüzeyine uygulandığında, donatı korozyonunun başlama süresini uzatan veya başladıktan sonra korozyon hızını yavaşlatan kimyasal maddelerdir. Bu katkılar, özellikle klorür iyonlarının yüksek konsantrasyonlarda bulunduğu agresif ortamlarda (deniz yapıları, köprüler, otoparklar vb.) donatıyı korumak için kullanılır. Korozyon inhibitörleri, etki mekanizmalarına veya uygulama yöntemlerine göre sınıflandırılabilir:

- **Etki Mekanizmasına Göre Sınıflandırma:**

- **Anodik İnhibitörler:** Korozyon hücresinin anot reaksiyonuna (demir çözünmesi) müdahale ederler. Genellikle çelik yüzeyindeki pasif filmin onarılmasına veya daha kararlı hale gelmesine yardımcı olurlar. En bilinen örnekleri nitritler (özellikle Kalsiyum Nitrit - $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$) ve nitratlardır (Kalsiyum Nitrat - $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$). Kromatlar ve molibdatlar da anodik inhibitörlerdir ancak kromatların toksisitesi nedeniyle kullanımı sınırlıdır. Anodik inhibitörlerin yetersiz dozajda kullanılması durumunda, pasif filmi tamamen onaramayarak lokalize korozyonu hızlandırma riski taşıdıkları belirtilmektedir.
- **Katodik İnhibitörler:** Katot reaksiyonunu (genellikle oksijen indirgenmesi) yavaşlatırlar veya katodik bölgelerde çökerek elektron akışını engellerler. Çinko tuzları, fosfatlar, bazı polifosfatlar ve arsenik bileşikleri bu gruba örnektir. Genellikle düşük dozajlarda bile korozyonu hızlandırma riski taşımazlar ve daha güvenli kabul edilirler.
- **Karışık (Hibrit/Ambiyodik) İnhibitörler:** Hem anodik hem de katodik reaksiyonları etkileyen inhibitörlerdir. Çoğu organik inhibitör bu sınıfa girer. Genellikle çelik yüzeyine adsorbe olarak koruyucu bir film tabakası oluştururlar ve bu film hem anodik hem de katodik bölgeleri kaplayarak korozyon reaksiyonlarını engeller. Aminler, esterler, alkanolaminler gibi organik bileşikler örnek olarak verilebilir.

- **Uygulama Yöntemine Göre Sınıflandırma:**

- **Karışım Katkısı Olarak Kullanılan İnhibitörler:** Taze betona karışım sırasında eklenirler. Kalsiyum nitrit, kalsiyum nitrat ve bazı organik inhibitörler bu şekilde kullanılır.
- **Yüzeye Uygulanan / Göç Eden Korozyon İnhibitörleri:** Mevcut betonarme yapıların onarımında veya ek koruma sağlamak amacıyla sertleşmiş beton yüzeyine püskürtme veya sürülerek uygulanırlar. Bu inhibitörler, betonun gözeneklerinden içeri doğru nüfuz ederek (göç ederek) donatı yüzeyine ulaşır ve koruma sağlarlar. Genellikle amin ve ester bazlı organik bileşiklerdir.



Kalsiyum Nitrit ($\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$) Mekanizması: En yaygın kullanılan ve etkinliği kanıtlanmış anodik inhibitörlerden biridir. Temel çalışma prensibi, klorür iyonlarının pasif film üzerindeki saldırısına karşı rekabet etmektir. Anodik bölgelerde oluşan kararsız demir (II) iyonları (Fe^{++}) ile klorür iyonları reaksiyona girerek korozyonu ilerletirken, ortamda yeterli konsantrasyonda bulunan nitrit iyonları (NO_2^-) bu Fe^{++} iyonları ile daha hızlı reaksiyona girer. Nitrit, Fe^{++} iyonlarını oksitleyerek kararlı ve koruyucu demir (III) oksit (Fe^{+++}) formuna dönüştürür ve pasif filmi onarır veya güçlendirir. Bu sayede, klorür iyonlarının varlığında bile pasifliğin korunmasına yardımcı olur.

Diğer İnhibitörler: Kalsiyum Nitrat ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$) da benzer bir anodik mekanizma ile çalıştığı öne sürülen, ancak reaksiyon kinetiğinin daha yavaş olduğu belirtilen bir alternatiftir. Daha ucuz, daha az zararlı ve daha kolay bulunabilir olması avantajları olarak gösterilmektedir. Organik inhibitörler ise genellikle çelik yüzeyine adsorbe olarak fiziksel bir bariyer oluşturma prensibiyle çalışır. Bu inhibitörlerin uzun dönem saha performansları hakkında veriler birikmektedir.

Farklı inhibitörlerin farklı kimyasal stratejilerle korozyona karşı mücadele ettiği görülmektedir. Anodik inhibitörler çeliğin doğal savunmasını güçlendirirken, katodik inhibitörler reaksiyonu besleyen süreci yavaşlatır, organik inhibitörler ise genellikle fiziksel bir kalkan oluşturur. İnhibitör seçimi, uygulamanın özel koşullarına, maruz kalınan çevre etkilerine ve hedeflenen koruma düzeyine bağlı olarak yapılmalıdır.

4.3. İnhibitörlerin Beton Performansına Etkileri

Korozyon inhibitörlerinin temel amacı, donatı korozyonunun başlama süresini uzatmak ve/veya korozyon hızını azaltarak betonarme yapıların servis ömrünü artırmaktır. Bu, özellikle klorür riskinin yüksek olduğu deniz kenarı yapılar, köprüler, otoparklar gibi uygulamalarda büyük önem taşır. Ancak inhibitörlerin betonun diğer özellikleri üzerindeki potansiyel etkileri de dikkate alınmalıdır:

- **Kalsiyum Nitrit:** Genellikle betonun basınç dayanımını artırdığı rapor edilmiştir, çünkü aynı zamanda bir priz hızlandırıcı gibi davranabilir. Ancak bazı çalışmalar uzun vadede dayanımda azalma olabileceğini de öne sürmüştür. Priz süresini bir miktar kısaltabilir. Uygun hava sürükleyici katkı ile birlikte kullanıldığında donma-çözülme dayanıklılığını olumsuz etkilemez. Çelik ile beton arasındaki aderansı artırabildiği de belirtilmiştir.
- **Kalsiyum Nitrat:** Kalsiyum nitrite benzer şekilde priz hızlandırıcı etki gösterebilir ancak bu etkinin daha az olabileceği belirtilmiştir. Dayanım üzerindeki etkileri genellikle nötr veya hafif olumlu olarak değerlendirilir.
- **Organik İnhibitörler:** Etkileri türe göre değişiklik gösterir. Bazı organik inhibitörlerin mekanik özellikler üzerinde minimum etkiye sahip olduğu gösterilmiştir. Bazıları priz süresini hafifçe geciktirebilir veya hava sürüklenmesini etkileyebilir, bu nedenle dikkatli bir değerlendirme gerektirirler. Bazı organik inhibitörlerin betonun elektriksel direncini bir miktar artırabildiğine dair bulgular da vardır.



İnhibitörlerin seçimi ve kullanımı sırasında, beton karışımındaki diğer kimyasal katkılarla (örneğin, süperakışkanlaştırıcılar, hava sürükleyiciler) ve kullanılan çimento tipiyle uyumluluğu da göz önünde bulundurulmalıdır.

Korozyon inhibitörleri betonun başlangıç maliyetini artırsa da yapının servis ömrünü önemli ölçüde uzatarak ve gelecekteki pahalı onarım ihtiyacını azaltarak veya geciktirerek yaşam döngüsü maliyeti açısından ekonomik olabilirler.

Sonuç olarak, bir korozyon inhibitörü seçimi yapılırken sadece korozyon önleme etkinliği değil, aynı zamanda taze beton özelliklerine (priz, işlenebilirlik, hava içeriği), sertleşmiş beton özelliklerine (dayanım, dayanıklılık), diğer karışım bileşenleriyle uyumluluğuna ve maliyetine olan potansiyel etkileri de içeren bütünsel bir değerlendirme yapılmalıdır.

Kaynaklar

1. Yiğiter, H., et al. (2022). Kalsiyum Nitrat Esaslı Korozyon İnhibitörünün Betonun Klor Geçirimsiliğine Etkisinin İncelenmesi. *European Journal of Science and Technology*, (39), 350-355. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1147836>,
2. Grace Construction Products. (2003). Korozyon İnhibitörleri. TMH - Türkiye Mühendislik Haberleri, (426), 140-141. <https://www.imo.org.tr/Eklenti/1397,korozyon-inhibitorleripdf.pdf?0>
3. 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. <https://doi.org/10.1007/s40735-021-00610-y>
4. Vishnudevan, M., & Thangavel, K. (2006). Evaluation of organic based corrosion inhibiting admixtures for reinforced concrete. *Pigment & Resin Technology*, 35(1), 28-34. <https://doi.org/10.1108/03699420610642118>
5. Angst, U. M., et al. (2017). Long-Term Field Performance of an Organic Corrosion Inhibitor for Reinforced Concrete. *Materials Performance*, 56(2), 46-50. 32

KÜB YAYINLARI



KÜB ÜYELERİ



kub.org.tr

