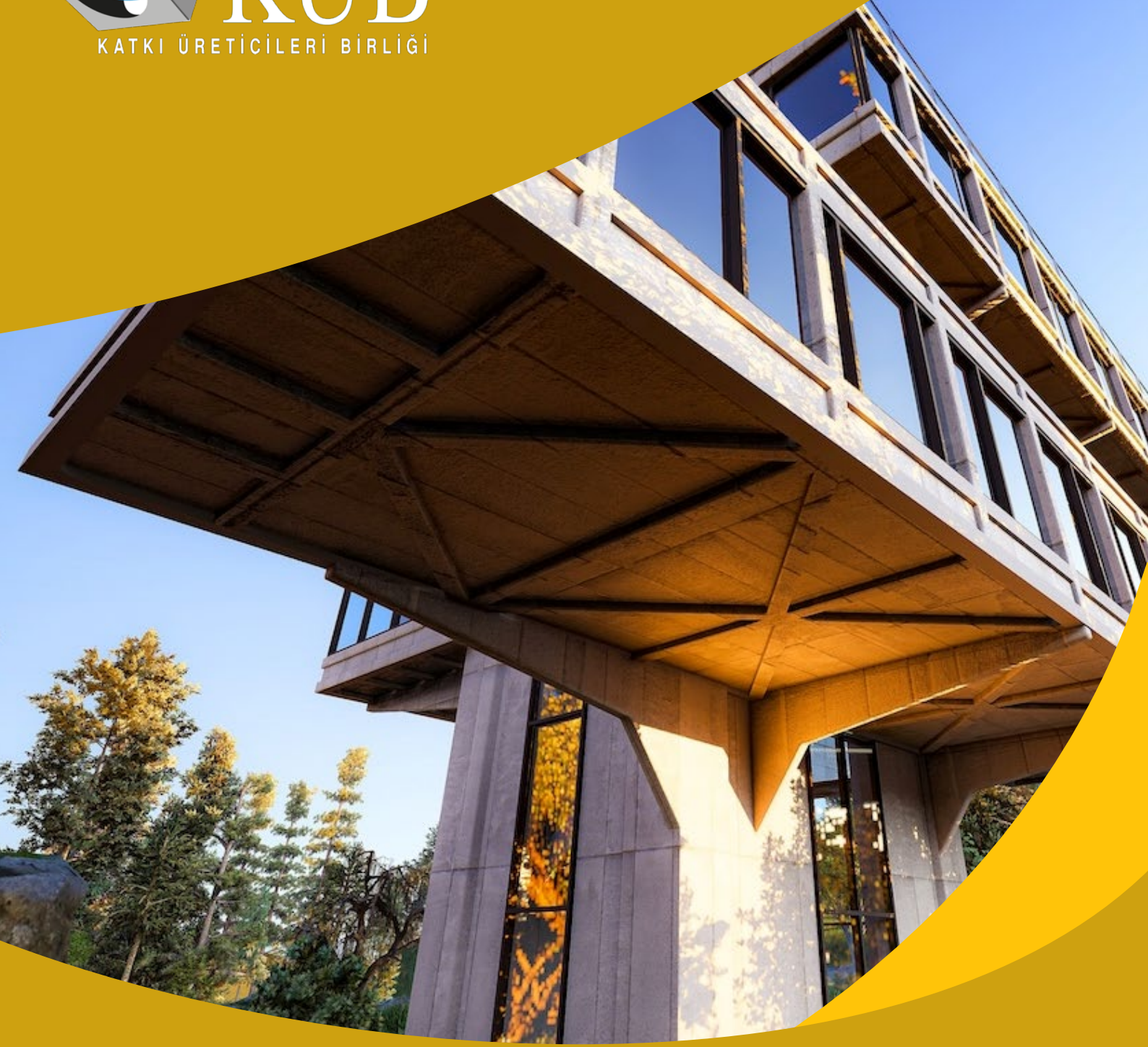




KÜB BÜLTENİ

10

Eylül 2025

İÇİNDEKİLER

1	Düşük Karbonlu Teknolojiler ve Kimyasal Katkıların Stratejik Rolü	Syf. 1
2	İleri Beton Teknolojileri ve Vazgeçilmez Bileşen Olarak Kimyasal Katkılar	Syf. 4
3	Zorlu Çevre Koşullarında Beton Dayanıklılığını Artıran Kimyasal Katkı Çözümleri	Syf. 7
4	Geri Dönüştürülmüş Agregalı Betonlarda Performans Optimizasyonu	Syf. 10

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

Düşük Karbonlu Teknolojiler ve Kimyasal Katkıların Stratejik Rolü



1.1. Çimento Sektörünün Karbon Ayak İzi ve Sürdürülebilirlik Baskısı

İnşaat sektörünün temel yapı taşı olan beton, aynı zamanda küresel karbon emisyonlarının önemli bir kaynağıdır. Bu emisyonların büyük bir kısmı, betonun bağlayıcı bileşeni olan Portland çimentosunun üretiminden kaynaklanmaktadır. Çimento üretimi, dünya genelindeki insan kaynaklı karbondioksit (CO₂) emisyonlarının yaklaşık %5 ila %8'inden sorumludur. Bir ton klinker üretiminin, iyileştirici önlemler alınmadığı takdirde yaklaşık bir ton CO₂ salımına yol açtığı kabul edilmektedir. Bu çevresel baskı, inşaat ve çimento sektörlerini daha yenilikçi, verimli ve sürdürülebilir üretim yöntemleri geliştirmeye zorlayan ana itici güç haline gelmiştir.

Sürdürülebilir beton üretimi hedefine ulaşmak için endüstri tarafından benimsenen temel stratejiler şunlardır:

1. Beton içindeki çimento miktarını, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi ikincil bağlayıcı malzemelerle (mineral katkıları) ikame etmek.
2. Su azaltıcı kimyasal katkıları kullanarak, hedeflenen dayanım ve işlenebilirlik için gereken çimento miktarını optimize etmek ve azaltmak.
3. Lojistik kaynaklı emisyonları düşürmek amacıyla yerel ve yakın kaynaklı agregaların kullanımını mümkün kılmak.
4. Kaynak verimliliğini artırmak ve atık miktarını azaltmak için geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanımını teşvik etmek.



Bu stratejilerin merkezinde, düşük karbonlu beton teknolojilerinin performansını mümkün kılan ve optimize eden kimyasal katkılar yer almaktadır.

1.2. Düşük Klinkerli Çimentolar ve Mineral Katkılarının Yükselişi

Betonun karbon ayak izini azaltmanın en etkili yolu, çimento içerisindeki klinker oranını düşürmektir. Bu amaçla, standartlar kapsamında tanımlanan ve mineral katkı içeren çimento türlerinin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. TS EN 197-1 ve TS EN 197-5 standartları, bu doğrultuda çeşitli çimento tiplerini tanımlamaktadır.

- **Portland Kompozit Çimento (CEM II):** Klinker, puzolan, uçucu kül, cüruf veya kireçtaşı gibi bir veya daha fazla mineral katkının belirli oranlarda birlikte öğütülmesiyle elde edilir. CEM II/C gibi yeni alt tipler, daha düşük klinker kullanımına olanak tanımaktadır.
- **Yüksek Fırın Cürufllu Çimento (CEM III):** Demir-çelik endüstrisinin bir yan ürünü olan öğütülmüş yüksek fırın cürufunun (ÖYFC) yüksek oranlarda (%95'e kadar) kullanıldığı bu çimento türü, klinker oranını önemli ölçüde düşürür. Düşük hidratasyon ısı ve yüksek sülfat direnci gibi ek performans avantajları sunar.
- **Puzolanik Çimento (CEM IV):** Uçucu kül, volkanik tüf (tras) gibi doğal veya yapay puzolanların kullanıldığı bu çimentolar, kimyasal direnci artırarak özellikle deniz yapıları ve barajlar gibi agresif çevre koşullarına maruz kalan projeler için idealdir.
- **Kompoze Çimento (CEM VI):** TS EN 197-5 standardı ile tanımlanan bu yeni çimento tipi, birden fazla mineral katkının bir arada kullanılmasına imkân tanıyarak esnek ve çevre dostu formülasyonlar geliştirilmesini sağlar.

Türkiye'de hazır beton sektöründe en yaygın kullanılan çimento sınıfı CEM I 42,5 olmasına rağmen, katkılı çimentoların kullanımı son yıllarda giderek artmaktadır.

1.3. Kalsine Kil Çimentosu (LC³) ve Diğer Teknolojik Atılımlar

Geleneksel mineral katkıların ötesinde, çimento teknolojisindeki radikal inovasyonlar, karbonsuzlaşma hedeflerine ulaşmada yeni ufuklar açmaktadır.

- **Kalsine Kil Çimentosu (Limestone Calcined Clay Cement - LC³):** Kalsine edilmiş killerin kireçtaşı ile birlikte kullanıldığı bu teknoloji, klinker ikame oranını %70'lere kadar çıkarabilme potansiyeli sunmaktadır. Küresel ölçekte mevcudiyeti en yüksek mineral katkı olan killerin bu şekilde değerlendirilmesi, LC³'ü geleceğin en umut verici düşük karbonlu bağlayıcılarından biri yapmaktadır.
- **Eco-Cement (Reaktif Magnezyum Tabanlı):** Düşük sıcaklıklarda ($\approx 750^{\circ}\text{C}$) üretilen ve atmosferden CO₂ emerek sertleşebilen bu çimento türü hem enerji tüketimini hem de emisyonları önemli ölçüde azaltır.
- **Alkali Füzyon Teknolojisi:** Yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel atıkları alkali ile aktive ederek klinker kullanımını neredeyse tamamen ortadan kaldırabilen bu yöntem, karbon emisyonlarını %85'e kadar düşürme potansiyeline sahiptir.
- **CO₂ Enjeksiyonuyla Kirlenen Betonlar:** Taze betona sıvılaştırılmış CO₂ enjekte edilerek kalsiyum karbonat mineralizasyonu sağlanır. Bu yöntem, hem betonda kalıcı olarak karbon depolanmasını sağlar hem de sertleşme sürecini hızlandırarak erken dayanımı artırır.



Bu yenilikçi teknolojiler, betonun çevresel etkisini azaltmada devrim niteliğinde adımlar vaat etmektedir; ancak bu teknolojilerin yaygınlaşması, beraberinde getirdikleri teknik zorlukların aşılmasına bağlıdır.

1.4. Kimyasal Katkıların Etkinleştirici Rolü: Düşük Karbonlu Betonun Performans Açıklarını Kapatmak

Düşük klinkerli ve mineral katkılı betonların sürdürülebilirlik açısından sunduğu avantajlar, taze ve sertleşmiş haldeki performanslarında bazı zorlukları da beraberinde getirir. Mineral katkıların yüksek yüzey alanı ve farklı reaktivite özellikleri, betonun su ihtiyacını artırabilir ve erken yaş dayanım gelişimini yavaşlatabilir. Bu noktada kimyasal katkıları, bu performans açıklarını kapatarak düşük karbonlu beton üretimini teknik ve ekonomik olarak mümkün kılan bir etkinleştirici teknoloji rolünü üstlenir.

- **Su/Bağlayıcı Oranının Optimizasyonu:** Polikarboksilat Eter (PCE) esaslı yeni nesil süperakışkanlaştırıcılar, mineral katkılı sistemlerin artan su ihtiyacını karşılamada kritik bir rol oynar. Bu katkıları, elektrostatik itme ve sterik engelleme mekanizmaları sayesinde çimento ve mineral katkı taneciklerini etkin bir şekilde dağıtarak daha az su ile yüksek işlenebilirlik elde edilmesini sağlar. Su/bağlayıcı oranının düşürülmesi, sadece çimento tasarrufu sağlamakla kalmaz, aynı zamanda betonun kapiler boşluk yapısını sıkılaştırarak geçirimsizliğini ve dolayısıyla çevresel etkilere karşı dayanıklılığını artırır.
- **Erken Dayanım Sorununun Çözümü:** Mineral katkıların yavaş pozolanik reaksiyonu, özellikle soğuk hava koşullarında veya hızlı kalıp sökümü gerektiren prekast üretiminde bir dezavantaj olan düşük erken dayanım gelişimine neden olur. Priz hızlandırıcı ve sertleşme hızlandırıcı kimyasal katkıları, çimentonun hidrasyon sürecini ilk saatlerde ve günlerde ivmelendirerek bu sorunu çözer. Bu sayede, mineral katkıların yüksek oranlarda kullanımının önündeki en büyük engellerden biri ortadan kalkar. Ayrıca, prekast üretiminde buhar küre gibi enerji yoğun yöntemlere olan ihtiyacı azaltarak ek bir çevresel ve ekonomik fayda sağlarlar.

Sonuç olarak, beton sektörünün net sıfır karbon hedefine giden yolculuğu, klinker faktörünü düşürmekten geçmektedir. Bu düşüşü sağlayan mineral katkıların ve yeni nesil bağlayıcıların getirdiği performans zorlukları ise ancak hedefe yönelik tasarlanmış kimyasal katkılarıyla aşılabilmektedir. Bu nedenle kimyasal katkıları, artık sadece betonun özelliklerini iyileştiren bir bileşen değil, sürdürülebilir beton üretim paradigmasının temel taşı ve vazgeçilmez bir teknoloji ortağıdır.

Tavsiye Edilen Kaynaklar

[Çimento Katkılarının Net Sıfır Karbon Hedefindeki Rolü - KÜB](#)

[Beton Kimyasal Katkılarının Net Sıfır Karbon Hedefindeki Rolü - KÜB](#)

[Düşük Karbonlu Beton - THBB](#)

[Düşük Karbon Hedefinde Düşük Klinkerli Çimentolar - TÜRKÇİMENTO](#)



2

İleri Beton Teknolojileri ve Vazgeçilmez Bileşen Olarak Kimyasal Katkılar



2.1. 3D Beton Baskı Teknolojisi

3D beton baskı, katmanlı üretim yöntemiyle kalıba ihtiyaç duymadan, daha hızlı, daha az atıkla ve geometrik olarak karmaşık yapıların inşasına olanak tanıyan devrimci bir teknolojidir. Bu teknolojinin başarısı, tamamen reoloji kontrolü olarak bilinen hassas bir dengeye dayanmaktadır. Basılacak betonun, bir yandan yazıcı başlığından sorunsuzca akabilecek kadar akışkan (ekstrüde edilebilirlik) olması, diğer yandan da serildikten sonra kendi şeklini koruyup üzerine gelecek yeni katmanların ağırlığı altında ezilmeyecek kadar viskoz ve sağlam (inşa edilebilirlik) olması gerekir.

Bu zıt özelliklerin bir arada sağlanması, ancak farklı kimyasal katkıların sinerjik kullanımıyla mümkündür:

- **Süperakışkanlaştırıcılar:** Karışımın su ihtiyacını azaltarak ve tanecikleri dağıtarak pompalanabilirlik ve ekstrüde edilebilirlik için gerekli akışkanlığı sağlarlar.
- **Viskozite Düzenleyici Katkılar:** Karışımın içsel kohezyonunu artırarak serilen katmanların yayılmasını ve çökmesini engeller, böylece inşa edilebilirliği temin ederler.
- **Priz Hızlandırıcılar:** Alt katmanların hızla priz alıp yeterli dayanımı kazanmasını sağlayarak, üst katmanların inşasına devam edilmesine olanak tanır ve yapısal stabiliteyi güvence altına alırlar.

Bu katkıların dozajlarının ve türlerinin hassas bir şekilde ayarlanması, 3D baskı teknolojisinin temelini oluşturur ve kimyasal katkı endüstrisinin bu alandaki rolünü vazgeçilmez kılar.



2.2. Kendiliğinden İyileşen (Self-Healing) Betonlar

Beton yapılarıdaki çatlaklar, yapıların servis ömrünü kısaltan ve maliyetli onarımlar gerektiren en önemli sorunlardan biridir. Kendiliğinden iyileşen beton teknolojisi, bu soruna biyolojik ve kimyasal sistemlerden ilham alan çözümler sunarak yapıların ömrünü uzatmayı ve bakım maliyetlerini önemli ölçüde azaltmayı hedefler.

İyileşme mekanizmaları temel olarak ikiye ayrılır:

- **Otojen İyileşme:** Bu mekanizma, beton matrisi içinde henüz reaksiyona girmemiş çimento taneciklerinin veya yavaş reaksiyon veren mineral katkıların (cüruf, uçucu kül), çatlaklardan sızan su ile temasa geçerek yeniden hidrate olması ve oluşan yeni ürünlerin çatlağı doldurması prensibine dayanır.
- **Otonom İyileşme:** Bu daha ileri teknoloji yaklaşımında, iyileştirici ajanlar (örneğin, sodyum silikat gibi kimyasallar veya kalsit üreten özel bakteriler ve besinleri) polimer mikrokapsüller veya içi boş fiberler içinde beton karışımına eklenir. Bir çatlak oluştuğunda, bu kapsüller kırılarak içlerindeki ajanı serbest bırakır ve çatlağın kimyasal bir reaksiyonla onarılmasını sağlar.

Bu süreçlerin etkinliği, özel kimyasal katkılarla artırılmaktadır. Örneğin, süper emici polimerler (SAP), çatlak oluştuğunda ortama su salarak otojen iyileşme için gerekli nemi temin ederken, genişleyen ajanlar ve kristal oluşturan katkılar çatlak içinde hacim artışı sağlayarak daha etkili bir dolgu oluşturur.

2.3. Ultra Yüksek Performanslı Beton (UHPC)

Ultra Yüksek Performanslı Beton (UHPC), 150 MPa'ı aşan basınç dayanımı, çelik benzeri süneklik (lif takviyesi ile) ve olağanüstü düşük geçirimsizliği ile geleneksel betonun sınırlarını aşan bir malzemedir. UHPC'nin bu üstün özelliklerinin sırrı, maksimum yoğunluk prensibinde yatmaktadır. Karışımdaki tüm bileşenlerin (çimento, silis dumanı, kuvars unu, ince kum) tane boyutları, boşlukları en aza indirecek şekilde optimize edilir.

Bu ultra yoğun matrisin oluşturulabilmesi için su/bağlayıcı oranının 0,20'nin altına düşürülmesi zorunludur. Bu kadar düşük bir su oranında işlenebilir bir karışım elde etmek, geleneksel akışkanlaştırıcılarla imkansızdır. Bu noktada, Polikarboksilat Eter (PCE) esaslı yeni nesil süperakışkanlaştırıcılar devreye girer. Bu katkılar, tanecikleri son derece etkin bir şekilde dağıtarak, çok düşük su içeriğine rağmen karışımın kendiliğinden yerleşebilecek kadar akışkan olmasını sağlar. Dolayısıyla, süperakışkanlaştırıcılar UHPC için sadece bir "iyileştirici" değil, üretimi "mümkün kılan" temel bir bileşendir.

2.4. Akıllı Beton Sistemleri ve Nanoteknoloji Entegrasyonu

Kimyasal katkılar, betona sadece mekanik özellikler kazandırmakla kalmaz, aynı zamanda ona aktif fonksiyonlar yükleyerek akıllı bir malzemeye dönüştürür.

- **Kendini Temizleyen (Fotokatalitik) Beton:** Beton karışımına eklenen nano boyuttaki titanyum dioksit (TiO_2) gibi fotokatalitik katkılar, güneş ışığı (UV radyasyon) varlığında yüzeyde güçlü bir oksidasyon reaksiyonu başlatır. Bu reaksiyon, yüzeydeki organik kirleticileri (is, kurum, azot oksitler) parçalar ve yağmur suyu ile kolayca temizlenmesini sağlar. Bu teknoloji, özellikle şehirlerdeki hava kirliliğini azaltma ve binaların estetik görünümünü koruma potansiyeli sunar.
- **Kristalize Su Yalıtım Katkıları:** Bu akıllı katkılar, çimento hidratasyonu sırasında oluşan



yan ürünlerle reaksiyona girerek betonun kapiler boşlukları ve gözenekleri içinde çözünmeyen, iğne benzeri kristallerden oluşan bir ağ yapısı oluşturur. Bu kristal ağ, suyun ve suda çözünmüş kimyasalların geçişini engeller. En önemli özelliği ise, gelecekte su ile temas ettiğinde reaksiyonun yeniden aktive olup yeni oluşan çatlakları (0,5 mm'ye kadar) kendi kendine onarabilmesidir. Bu sayede, yapının ömrü boyunca devam eden proaktif bir su yalıtımı sağlarlar.

- **Nanoteknoloji Entegrasyonu:** Malzeme bilimindeki gelişmeler, nano boyuttaki parçacıkların betonda kullanımını mümkün kılmıştır. Nano-silika, nano-demir oksit ve karbon nanotüpler gibi malzemeler, devasa yüzey alanları sayesinde çimento hidratasyonu için birer çekirdeklenme noktası görevi görür. Bu, daha yoğun, daha homojen ve daha az kusurlu bir C-S-H jeli oluşumunu tetikler. Sonuç olarak, betonun basınç ve eğilme dayanımı gibi mekanik özellikleri ve dayanıklılığı dramatik bir şekilde artar.

Bu teknolojik atılımlar, kimyasal katkıların betonun fonksiyonunu nasıl dönüştürdüğünü açıkça göstermektedir. Geleneksel olarak betonun temel işlevlerini (işlenebilirlik, priz) iyileştiren katkılar, artık betona hassas reolojik profiller (3D baskı), kendi kendine yanıt verme yeteneği (kendiliğinden iyileşme) ve aktif fonksiyonlar (kendini temizleme, su yalıtımı) kazandırmaktadır. Bu durum, kimyasal katkı endüstrisinin, bir inşaat malzemesi tedarikçisi olmaktan çıkıp, yapılara yeni yetenekler kazandıran bir yüksek teknoloji sektörüne dönüştüğünün en net kanıtıdır.

Tavsiye Edilen Kaynaklar

[Beton Kimyasal Katkılarının Net Sıfır Karbon Hedefindeki Rolü - KÜB](#)

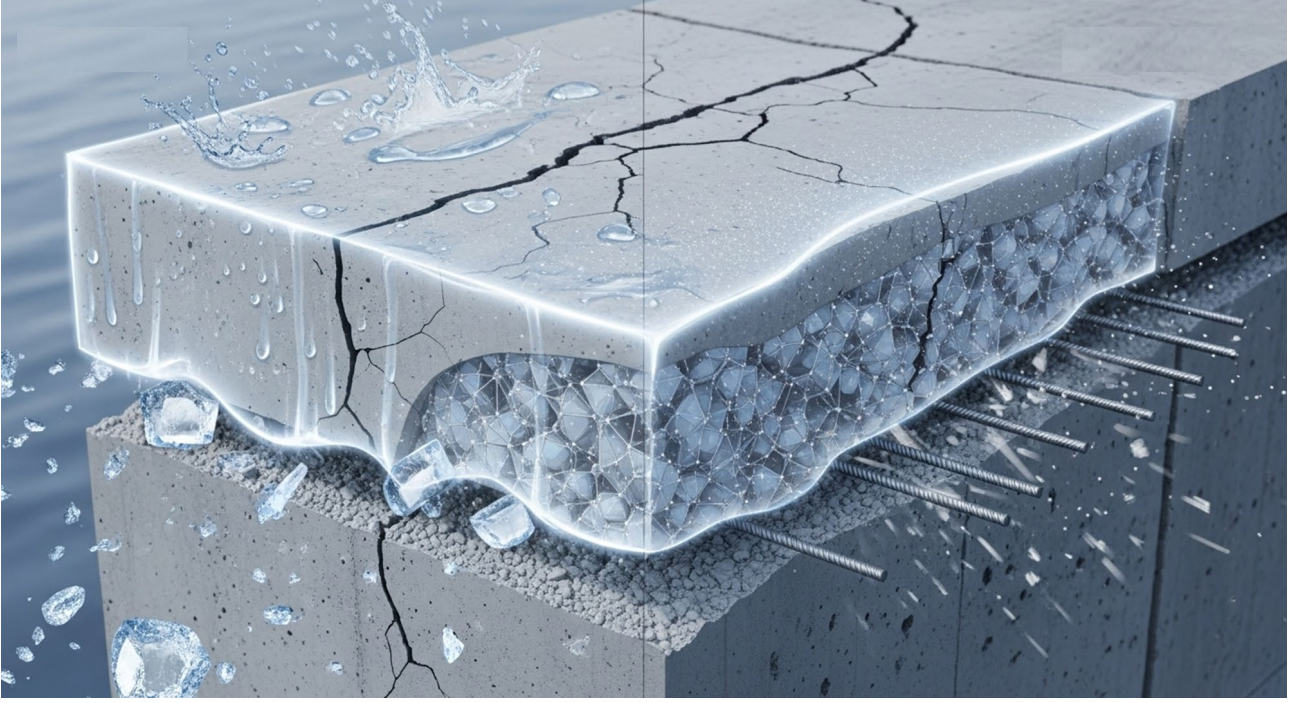
[Ultra Yüksek Performanslı Beton - THBB](#)

[Kendini Onaran Beton - TUBİTAK](#)

[Nanoteknolojinin Betonun Geleceğindeki Rolü](#)

[Betonda Nanoteknoloji](#)

3

Zorlu Çevre Koşullarında Beton Dayanıklılığını Artıran Kimyasal Katkı Çözümleri

Bir betonarme yapının servis ömrünü ve güvenliğini belirleyen en kritik faktör, sadece basınç dayanımı değil, maruz kaldığı agresif çevre koşullarına karşı zamanla özelliklerini koruyabilme yeteneği, yani dayanıklılığıdır. Korozyon, donma-çözülme döngüleri ve kimyasal saldırılar gibi yıpratıcı etkiler, yapısal bütünlüğü erken yaşlarda tehdit edebilir. Kimyasal katkıları, betonun mikro yapısını ve kimyasal direncini iyileştirerek bu tehditlere karşı bir kalkan görevi görür ve yapıların planlanan servis ömrüne ulaşmasını sağlar. TS EN 206 standardı, bu riskleri çevresel etki sınıfları (örneğin XC, XD, XS, XF, XA) altında sınıflandırarak, her bir koşul için özel beton tasarımı gereklilikleri ortaya koymaktadır.

3.1. Deniz Yapıları ve Kıyı Bölgeleri: Klorür ve Korozyon Tehdidi

Deniz suyu, buz çözücü tuzlar veya endüstriyel atıklar gibi kaynaklardan gelen klorür iyonları (Cl^-), betonarme yapılar için en büyük tehditlerden biridir. Klorür iyonları, betona kapiler emilim veya difüzyon yoluyla nüfuz ederek donatı çeliğine ulaşır. Normalde, betonun yüksek alkali ortamı ($pH > 12,5$) çelik yüzeyinde pasif bir oksit tabakası oluşturarak onu korozyona karşı korur. Ancak, klorür iyonları bu pasif tabakayı bozarak donatının hızla paslanmasına neden olan elektrokimyasal bir reaksiyonu tetikler. Oluşan pas, orijinal çeliğin hacminin 2 ila 7 katı kadar genleşerek betonda içsel gerilmelere, çatlamalara ve dökülmelere yol açar.

Kimyasal katkıları, bu yıkıcı sürece karşı çok katmanlı bir savunma stratejisi sunar:

- **Geçirimsizliğin Artırılması:** Klorür saldırısına karşı en temel ve etkili savunma, iyonların betona girişini yavaşlatmaktır. Süperakışkanlaştırıcılar, su/bağlayıcı oranını (s/b) önemli ölçüde düşürerek daha sıkı ve daha az geçirimli bir beton matrisi oluşturur. Bu, klorür difüzyon katsayısını azaltarak korozyonun başlama süresini yıllarca geciktirebilir.



- **Korozyon İnhibitörleri (Önleyicileri):** Bu özel katkılar, beton karışımına eklenerek donatı yüzeyine ulaşır ve proaktif bir koruma sağlar. Anodik inhibitörler (örn. kalsiyum nitrit), çelik yüzeyinde pasif tabakayı güçlendirirken, katodik veya karma inhibitörler korozyon reaksiyonunu kimyasal olarak yavaşlatır. Bu katkılar, korozyonun başlaması için gereken klorür konsantrasyon eşikini yükseltirler.
- **Su Geçirimsizlik Katkıları:** Kapiler emilimi azaltan hidrofofik (su itici) ve boşlukları dolduran kristalize katkılar, klorür iyonlarının taşınımını zorlaştırarak ek bir koruma katmanı oluşturur.

3.2. Soğuk İklim Bölgeleri: Donma-Çözülme Döngülerinin Yıkıcı Etkisi

Soğuk iklimlerde, suya doymuş betonun donma ve çözülme döngülerine maruz kalması ciddi hasarlara yol açabilir. Su, betonun kapiler boşluklarında donduğunda hacmi yaklaşık %9 oranında artar. Bu genleşme, betonun iç yapısında hidrolik ve ozmotik basınçlar oluşturarak mikro çatlaklara, yüzeyde ise pullanma ve dökülmelere neden olur.

Bu mekanik hasara karşı en etkili çözüm, hava sürükleyici kimyasal katkıların kullanılmasıdır. Bu katkılar, yüzey aktif maddeler içerir ve beton karıştırılırken milyonlarca mikroskobik (10-500 mikron), stabil ve birbirinden bağımsız hava kabarcığının oluşmasını sağlar. Bu hava kabarcıkları, sertleşmiş betonun içinde kalıcı bir boşluk sistemi oluşturur. Su donduğunda oluşan buz, bu boşluklara doğru genleşerek yarattığı basıncı sönümler. Bu mekanizma, betonun içsel gerilmeler olmadan donma-çözülme döngülerini hasarsız atlattırmasını sağlar. Hedeflenen hava içeriği genellikle beton hacminin %4-8'i arasındadır ve bu, ASTM C666 gibi standart testlerle 300'den fazla döngüye dayanıklılık sağlayabilir. Hava sürüklenme, betonun dayanımını bir miktar düşürebilse de bu etki süperakışkanlaştırıcılarla s/b oranının düşürülmesiyle kolayca telafi edilebilir.

3.3. Agresif Zeminler ve Endüstriyel Ortamlar

Beton, maruz kaldığı kimyasal ortamlara bağlı olarak da bozulabilir. İki yaygın kimyasal saldırı türü sülfat atağı ve alkali-silika reaksiyonudur.

- **Sülfat Atağı:** Yeraltı suları, endüstriyel atıklar veya deniz suyunda bulunan sülfat iyonları (SO_4^{2-}), betonun içine sızarak çimento hamurundaki kalsiyum hidroksit ve kalsiyum alüminat hidratlarla reaksiyona girer. Bu reaksiyonlar sonucunda jips ve etrenjit gibi hacmi orijinal bileşiklerden çok daha büyük olan yeni mineraller oluşur. Bu hacim artışı, betonda içsel genleşmelere, çatlamalara ve sonuçta bozulmaya yol açar. Sülfat atağına karşı direnç, düşük C_3A içerikli çimentolar (örn. sülfata dayanıklı çimento) ve yüksek fırın cürufu gibi mineral katkılarla artırılabilir. Kimyasal katkılar ise, süperakışkanlaştırıcılar ve su geçirimsizlik katkıları aracılığıyla betonun geçirimsizliğini artırarak sülfat iyonlarının girişini yavaşlatır ve hasarı sınırlar.
- **Alkali-Silika Reaksiyonu (ASR):** Bazı agregalar, opal, çakmaktaşı gibi reaktif silis mineralleri içerir. Bu mineraller, çimentodan gelen yüksek alkali (Na_2O ve K_2O) içeren boşluk suyu ile reaksiyona girerek alkali-silika jeli adı verilen, su emerek şişen bir madde oluşturur. Bu jelin genleşmesi, betonda harita şeklinde yaygın çatlaklara ve yapısal hasara neden olur. ASR riskini yönetmek için reaktif olmayan agregalar seçmek, düşük alkalili çimentolar kullanmak ve uçucu kül gibi puzolanik katkılarla boşluk suyu alkalinitesini düşürmek gibi önlemler alınır. Bununla birlikte, bu önlemlerin yetersiz kaldığı durumlarda, lityum nitrat gibi ASR azaltıcı özel kimyasal katkılar kullanılır. Bu katkılar, genleşen jelin oluşumunu kimyasal olarak engelleyerek veya değiştirerek



reaksiyonu kontrol altına alır.

Tablo 1, farklı çevresel etkilere karşı kimyasal katkıların rolünü özetlemektedir.

Tablo 1. Çevresel etkilere karşı kimyasal katkı çözümleri matrisi

Katkı Türü	Karbonatlaşma (XC)	Klorür Atağı (XD/XS)	Sülfat Atağı (XA)	Donma-Çözülme (XF)	Alkali-Silika (XW)
Süper akışkanlaştırıcı	Geçirimsizliği artırır, CO ₂ girişini yavaşlatır.	Geçirimsizliği artırır, klorür difüzyonunu yavaşlatır.	Geçirimsizliği artırır, sülfat girişini yavaşlatır.	Su/bağlayıcı oranını düşürerek su emmeyi azaltır.	Geçirimsizliği artırır, alkali girişini sınırlar.
Hava Sürükleyici	-	Buz çözücü tuzların pullanma etkisini azaltır.	-	Donan su için genleşme boşlukları oluşturur.	Jel genleşmesi için kısmi boşluk sağlar.
Korozyon İnhibitörü	-	Donatı yüzeyinde koruyucu film oluşturur/ klorür eşliğini yükseltir.	-	-	-
Su Geçirimsizlik Katkısı	Su emmeyi azaltır.	Kapiler su emme ile klorür girişini azaltır.	Su emmeyi azaltır.	Su emmeyi azaltır.	Su emmeyi azaltır.
ASR Azaltıcı Katkı	-	-	-	-	Genleşen alkali-silika jeli oluşumunu engeller.

Tavsiye Edilen Kaynaklar

[Betonda Donma-Çözülme Etkisi ve Hava Sürükleyici Katkılar Rehberi – KÜB](#)

[Betonun Dayanıklılığı ve Kimyasal Katkıların Etkisi Rehberi - KÜB](#)

[Sıcak Havada Beton Uygulamalarında Kimyasal Katkıların Rolü - KÜB](#)

[Soğuk Hava Koşullarının Betona Etkisi - KÜB](#)

4

Geri Dönüştürülmüş Agregalı Betonlarda Performans Optimizasyonu

İnşaat ve yıkıntı atıklarının yönetimi, sürdürülebilir kalkınmanın en önemli zorluklarından biridir. Bu atıkların büyük bir kısmını oluşturan eski betonun kırılarak yeniden agregat olarak kullanılması, yani geri dönüştürülmüş agregat (GDA) kullanımı, döngüsel ekonomi prensiplerinin inşaat sektörüne entegrasyonu için büyük bir potansiyel taşımaktadır. GDA kullanımı, doğal agregat kaynaklarının tüketilmesini önler, atık depolama sahalarına olan ihtiyacı azaltır ve inşaat sektörünün çevresel ayak izini küçültür. Ancak bu çevresel avantajların hayata geçirilmesi, GDA'nın getirdiği teknik zorlukların aşılmasına bağlıdır.

4.1. GDA Kullanımının Potansiyeli ve Teknik Zorlukları

GDA, doğal agregattan önemli farklılıklar gösterir. Bu farkların temel nedeni, kırma işlemi sırasında orijinal agregat tanelerinin yüzeyinden tamamen ayrılmayan eski çimento harcı tabakasıdır. Bu harç tabakası, GDA'ya aşağıdaki olumsuz özellikleri kazandırır:

- **Yüksek ve Değişken Su Emme:** Eski harç tabakasının gözenekli yapısı, GDA'nın su emme kapasitesini doğal agregata kıyasla önemli ölçüde artırır (%2-6 aralığına karşılık %0,5-1). Bu durum, beton karışım suyunun bir kısmının agregatlar tarafından hızla emilmesine, işlenebilirlik kaybına ve etkili su/bağlayıcı oranının kontrolsüz bir şekilde değişmesine neden olur.
- **Düşük Yoğunluk ve Yüksek Porozite:** GDA, doğal agregata göre daha düşük birim hacim ağırlığına ve daha yüksek poroziteye sahiptir. Bu durum, GDA içeren betonların mekanik performansını olumsuz etkiler.
- **Düşük Dayanım ve Zayıf Aderans:** Yüzeydeki eski harç tabakası, yeni çimento hamuru



ile GDA arasında daha zayıf bir aderans bölgesi oluşturur. Bu da GDA içeren betonların basınç ve çekme dayanımlarının, aynı tasarıma sahip doğal agregalı betonlara göre ortalama %20 oranında daha düşük olmasına yol açabilir.

- **Artan Büzülme ve Sünme:** GDA'nın daha düşük elastisite modülü ve daha yüksek su içeriği, betonun kuruma büzülmesi ve sünme gibi zamana bağlı deformasyonlarını artırır.

Bu teknik zorluklar, GDA'nın özellikle taşıyıcı yapı elemanlarında kullanımını sınırlamakta ve beton üreticileri için bir risk unsuru oluşturmaktadır.

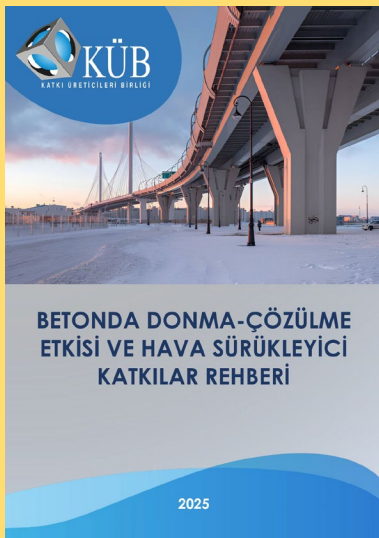
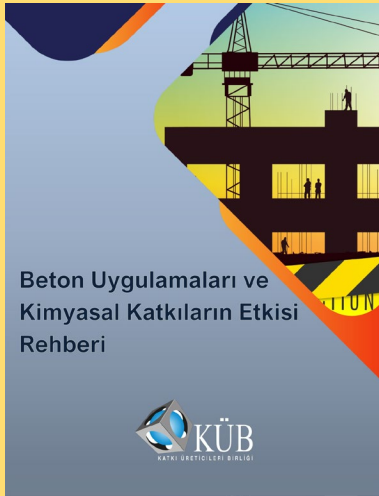
4.2. Kimyasal Katkılarla GDA'lı Betonun Performansının İyileştirilmesi

Kimyasal katkı teknolojisi, GDA'nın yukarıda belirtilen olumsuz özelliklerini telafi ederek, bu malzemeyi sorunlu bir atık olmaktan çıkarıp değerli bir kaynağa dönüştüren anahtar rolü oynamaktadır.

- **İşlenebilirlik ve Su İhtiyacının Kontrolü:** GDA'nın yüksek su emme sorununu yönetmek için en etkili yöntem, polikarboksilat esaslı (PCE) süperakışkanlaştırıcıların kullanılmasıdır. Bu katkılar, GDA'nın emeceği ek su ihtiyacını karşılarken, karışımın hedeflenen işlenebilirliğini (çökme/yayılma) korumasını sağlar. Böylece, su/bağlayıcı oranında istenmeyen bir artışın önüne geçilir ve betonun dayanım potansiyeli korunur. Son yıllarda, özellikle kil gibi safsızlıklar içeren veya yüksek su emmeli agregalar için özel olarak tasarlanmış, bu olumsuz etkilere karşı daha dirençli PCE polimerleri geliştirilmiştir. Bu katkılar, GDA'nın değişken özelliklerini "normalize ederek" onu öngörülebilir ve kontrol edilebilir bir beton bileşenine dönüştürür.
- **Mekanik Performans ve Dayanıklılığın Artırılması:** GDA'lı betonların performansını doğal agregalı beton seviyesine yaklaştırmak için kimyasal ve mineral katkıların bir arada kullanıldığı bütünsel bir yaklaşım gereklidir.
 - **Süperakışkanlaştırıcılar:** s/b oranını mümkün olan en düşük seviyede tutarak, hem GDA'nın kendisinden kaynaklanan dayanım düşüşünü hem de eski ve yeni harç arasındaki zayıf arayüz bölgesini telafi eden daha yoğun ve dayanıklı bir çimento matrisi oluştururlar.
 - **Mineral Katkılar (Uçucu Kül, Silis Dumanı vb.):** Bu puzolanik malzemeler, GDA'lı betonun mikro yapısını iyileştirmede çok etkilidir. İnce taneleri sayesinde boşlukları doldurarak (filler etkisi) ve puzolanik reaksiyonla ek C-S-H jeli üreterek hem matrisin hem de agrega-hamur arayüzünün dayanımını ve yoğunluğunu artırır. Bu sayede, GDA'lı betonların basınç dayanımı, klorür iyonu geçirimsizliği ve donma-çözülme direnci gibi kritik dürabilite özellikleri önemli ölçüde iyileştirilir.

Sonuç olarak, kimyasal ve mineral katkılar, geri dönüştürülmüş agregaların kullanımının önündeki teknik engelleri ortadan kaldıran temel teknolojilerdir. Bu katkılar sayesinde, inşaat ve yıkıntı atıkları güvenli ve yüksek performanslı beton üretiminde yeniden değerlendirilebilir, bu da inşaat sektöründe döngüsel ekonominin hayata geçirilmesi için somut bir adım anlamına gelir.

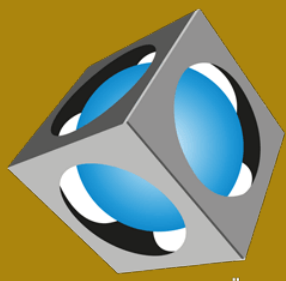
KÜB YAYINLARI



KÜB ÜYELERİ



kub.org.tr



KÜB

KATKI ÜRETİCİLERİ BİRLİĞİ



YAPI ÜRÜNLERİ
ÜRETİCİLERİ
FEDERASYONU



TÜRKİYE
İMSAD
İNŞAAT MALZEMESİ SANAYİCİLERİ DERNEĞİ
ASSOCIATION OF TURKISH BUILDING MATERIALS PRODUCERS

