



# THBB AKADEMİ

## TEKNİK BÜLTEN

16

### *BETON: ANTİK SIRLAR VE GELECEĞİN SINIRLARI*

TÜRKİYE HAZIR BETON BİRLİĞİ YAYINIDIR.  
Nisan, 2025

## BETON: ANTİK SIRLAR VE GELECEĞİN SINIRLARI

### I. Giriş: Dünyamızın Görünmez Temeli

Her gün yürüdüğümüz kaldırımlardan yaşadığımız binalara, şehirleri birbirine bağlayan köprülerden devasa barajlara kadar beton, modern dünyamızın adeta görünmez temelidir. O kadar yaygındır ki, dünya üzerinde en çok tüketilen yapı malzemesidir ancak bu yaygınlığı, onun sıradan ve basit bir malzeme olduğu yanılgısını doğurmamalıdır. Betonun ardında, binlerce yıllık bir tarih, karmaşık bir bilim ve sürekli gelişen bir teknoloji yatmaktadır. Antik medeniyetlerin mühendislik harikalarından günümüzün mega yapılarına kadar beton, insanlığın çevresini şekillendirmesinde merkezi bir rol oynamıştır.

En temel hâliyle beton; çimento, agrega (kum, çakıl, kırma taş gibi dolgu malzemeleri) ve suyun homojen bir karışımıdır. Bu bileşenlerin her biri önemli olsa da malzemenin "sihri" büyük ölçüde çimentonun su ile girdiği kimyasal reaksiyonlarda (hidratasyon) ve bu bileşenlerin hassas oranlarda karıştırılmasında yatmaktadır. Elbette son yüzyılda bu karışıma kimyasal katkıların da eklendiği unutulmamalıdır. Çimento, agrega tanelerini birbirine bağlayan yapıştırıcı görevi görürken, su/çimento oranı betonun nihai dayanımını ve dayanıklılığını belirleyen en kritik faktörlerden biri durumundadır. Betona gereğinden fazla su katılması, ona verilebilecek en büyük zararlardan biridir.

Bu rapor, betonun büyüleyici dünyasına bir yolculuk yapmayı amaçlamaktadır. Antik Roma'nın zamanın yıpratıcı etkilerine meydan okuyan betonarme sırlarını açığa çıkaracak, modern malzeme biliminin betonun sınırlarını nasıl zorladığını keşfedecek ve son olarak sürdürülebilir altyapılardan dünya dışı yapılaşmaya uzanan gelecek vizyonunu ortaya koyacaktır.

### II. Roma Betonunun Kalıcı Gizemi: Antik Çağlardan Alınacak Dersler

#### Taşla Örülmüş Bir Miras

Antik Roma mühendisliğinin en etkileyici miraslarından biri, şüphesiz ki kullandıkları betondur. Neredeyse iki bin yıl önce inşa edilen ve hâlâ dünyanın en büyük donatısız beton kubbesine sahip olan Roma'daki Panteon veya günümüzde bile Roma'ya su taşıyan bazı antik su kemerleri, bu malzemenin olağanüstü dayanıklılığının canlı kanıtlarıdır. Bu yapılar, modern Portland çimentosu bazlı betonarme yapıların on yıllar içinde bozulabildiği günümüz koşullarında, daha da dikkat çekicidir. Roma İmparatorluğu genelinde, duvarlar, temeller, su kemerleri, yollar ve köprüler gibi sayısız mimari ve altyapı projesinde bu özel beton türü kullanılmıştır.

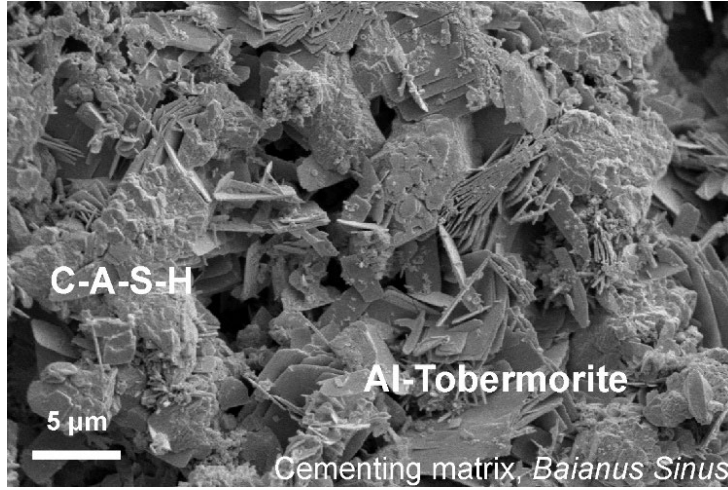
#### Antik Tarif: Taştan ve Sudan Daha Fazlası

Roma betonunun sırrı, modern betondan farklı olan bileşenlerinde ve bu bileşenlerin etkileşiminde yatmaktadır. Temel bağlayıcılar, kireç ve puzolanik malzemelerdir; özellikle de Napoli Körfezi'ndeki



Pozzuoli bölgesinden getirilen volkanik küllerdir. Bu özel küller, imparatorluğun dört bir yanına taşınmış ve dönemin mimarları tarafından betonun kritik bir bileşeni olarak tanımlanmıştır.

Roma betonunun, özellikle deniz yapılarındaki uzun ömrünün ardındaki asıl sır, çevresiyle olan etkileşiminde gizliydi. Modern betonarme yapılar deniz suyunda korozyon nedeniyle bozulma eğilimindeyken, Roma deniz betonu tam tersine zamanla daha da güçleniyordu. Deniz suyu, betonun içine sızarak volkanik külü yavaşça çözüyor ve bu sayede alüminyumlu tobermorit (Al-tobermorit) ve fillipsit gibi nadir, dayanıklı ve birbirine kenetlenen minerallerin büyümesi için alan yaratıyordu. Bu reaksiyon, betonu adeta "canlı" bir kayaç hâline getirerek binlerce yıl boyunca dalgaların aşındırıcı etkisine karşı koymasını sağlıyordu [1].



Şekil 1. Bu mikroskopik görüntü, volkanik küllerin, kalsiyum oksidin ve deniz suyunun karıştığına oluşan blok şeklindeki kalsiyum-alüminyum-silikat-hidrat (C-A-S-H) bağlayıcı malzemeyi göstermektedir. C-A-S-H matrisinin arasında Al-tobermorite düzlemsel kristalleri büyümüştür.

### Kendi Kendini İyileştiren Sır Açığa Çıkıyor

Roma betonunun dayanıklılığının bir diğer önemli unsuru ise gizemi yakın zamanda çözülen kendi kendini iyileştirme yeteneğiydi. Araştırmacılar uzun süre betonun içindeki beyaz, milimetrik kireç parçacıklarını kötü karıştırmanın bir işareti olarak görmüşlerdi ancak son çalışmalar, bu kireç kırıntılarının aslında bir kusur değil, malzemenin kendini onarma mekanizmasının anahtarı olduğunu ortaya koydu. Bu mekanizmanın kökeninde, Romalıların muhtemelen kullandığı "sıcak karıştırma" (hot mixing) tekniği yatmaktadır. Bu teknikte, sönmüş kireç yerine veya sönmüş kireçle birlikte daha reaktif olan sönmemiş kireç (kalsiyum oksit, CaO) kullanılıyordu. Sönmemiş kirecin suyla reaksiyonu (söndürme) ekzotermiktir, yani ısı açığa çıkarır. Bu yüksek sıcaklıklar altında karışım yapıldığında, kireç kırıntıları karakteristik, kırılğan, nano-parçacıklı bir yapıda oluşuyordu. Bu özel yapı, kireç kırıntılarını kolayca kırılabilen ve oldukça reaktif bir kalsiyum kaynağı hâline getiriyordu. Betonda mikro çatlaklar oluştuğunda ve içeri su sızdığında, bu kırılğan kireç kırıntıları kolayca parçalanarak reaktif iç yüzeylerini suya maruz bırakıyordu. Su ile temas eden kalsiyum oksit, kalsiyumca doymun bir çözelti oluşturuyordu. Bu çözelti daha sonra iki yolla çatlakları onarıyordu [2]:

1. **Kalsiyum Karbonat Olarak Yeniden Kristalleşme:** Kalsiyumca doymun çözelti, havadaki veya sudaki karbondioksit ile reaksiyona girerek kalsiyum karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) hâlinde çöküyor ve çatlağı dolduruyordu.
2. **Puzolanik Malzemelerle Reaksiyon:** Kalsiyumca zengin çözelti, betondaki puzolanik malzemelerle (volkanik kül gibi) reaksiyona girerek kompozit malzemeyi daha da güçlendiriyor ve iyileşme sürecine katkıda bulunuyordu.

Bu mekanizmayı doğrulamak için yapılan deneylerde, sıcak karıştırma yöntemiyle hazırlanan antik ve modern formülasyonlu beton numuneleri kasıtlı olarak çatlatıldı ve üzerlerinden su akıtıldı. İki hafta içinde, sıcak karıştırılmış numunelerdeki çatlaklar tamamen iyileşti ve su akışı durdu. Sönmemiş kireç olmadan hazırlanan kontrol numunesi ise iyileşmedi ve su akışı devam etti [2].

### Alınacak Dersler

Roma betonunun bu kalıcı mirası, modern beton teknolojisi için önemli dersler barındırmaktadır. Romalıların başarısı, büyük ölçüde ampirik gözlemlere ve mevcut kaynakları akıllıca kullanmalarına dayanıyordu. Bu yaklaşım, belirli ortamlar için olağanüstü dayanıklılığa sahip malzemeler üretmelerini sağladı ve bu malzemeler, bazen hızlı dayanım kazanımı için bilimsel olarak optimize edilmiş modern malzemeleri bile geride bıraktı. Modern beton tasarımı, detaylı kimyasal ve fiziksel anlayışa dayanır ve genellikle inşaat programlarına uyum sağlamak için hızlı ve öngörülebilir dayanım gelişimini önceler. Roma betonu ise kireç ve puzolanlarla farklı bir dayanım gelişim süreci izlemiş ve deniz suyuyla etkileşim veya kendi kendini iyileştiren kireç kırıntıları gibi, Romalılar tarafından tam olarak anlaşılmasa bile uzun vadeli dayanıklılığa katkıda bulunan mekanizmaları bünyesinde barındırmıştır. Bu durum, modern uygulamalarda kısa vadeli performans kriterleri (örneğin 28 günlük dayanım) ile nihai uzun vadeli dayanıklılık ve kendi kendine bakım yeteneği arasında potansiyel bir denge olduğunu düşündürmektedir.



*Şekil 2. Toskana'da, 2000 yılı aşkın bir süre önce inşa edilen Portus Cosanus'daki deniz yapısında sondaj çalışması*

Roma betonunun reaktif inklüzyonlar ve çevresel etkileşim yoluyla kendi kendini onarma mekanizması, modern kendi kendini iyileştiren malzemeler için adeta bir prototip sunmaktadır. Bu, bakım ihtiyacını azaltma ve altyapı ömrünü uzatma potansiyeli taşıyan biyomimikri (doğadan ilham

alan tasarım) anlayışıyla örtüşmektedir. Günümüzdeki kendi kendini iyileştiren beton araştırmaları, benzer otonom onarım mekanizmalarını (örneğin, bakteri kullanarak veya mikro kapsüllerle) hedeflemektedir [3]. Roma örneği, bu tür konseptlerin ne kadar etkili ve kalıcı olabileceğini göstererek modern mühendislik çabalarına ilham vermektedir.

Son olarak, Romalıların betonu yerel malzemelerle (belirli volkanik küller gibi) ve belirli ortam koşullarına (örneğin deniz yapıları) uyarlaması dikkat çekicidir. Bu, modern Portland çimentosunun küresel standardizasyonundan farklı bir yaklaşımdır. Modern beton genellikle küresel olarak standartlaştırılmış Portland çimentosuna ve lokasyondan bağımsız olarak tutarlı özellikler hedefleyen karışım tasarımlarına dayanır; bu da bazen adaptasyon için karmaşık kimyasal katkı maddeleri gerektirir. Roma yaklaşımı, artan sürdürülebilirlik ve performans için bölgesel kaynakları ve çevreye özgü beton formülasyonlarını keşfetmenin potansiyel faydalarını ortaya koymaktadır.

Tablo 1, Roma betonu ile modern Portland çimentosu bazlı beton arasındaki temel farkları özetlemektedir:

Tablo 1. Roma betonu ve modern Portland çimentosu betonunun karşılaştırılması

| Özellik                                    | Roma Betonu  | Modern Portland Çimentosu Betonu   |
|--|--|--|
| <b>Ana Bağlayıcı</b>                       | Kireç + Puzolanlar (Volkanik Kül)                                      | Portland Çimentosu (Klinker bazlı)                                       |
| <b>Temel Reaksiyon</b>                     | Puzolanik reaksiyon, Hidratasyon, Karbonatlaşma, Deniz suyu etkileşimi | Çimento fazlarının hidratasyonu (C <sub>3</sub> S, C <sub>2</sub> S vb.) |
| <b>Tipik Dayanım Gelişimi</b>              | Yavaş, uzun vadeli kazanım   | Hızlı erken dayanım, öngörülebilir kazanım                               |
| <b>Dayanıklılık Mekanizması</b>            | Mineral büyümesi (Al-tobermorit) ile güçlenir.                         | Klorür girişi, çelik korozyonu nedeniyle bozulabilir.                    |
| <b>Kendi Kendini İyileştirme</b>           | Kireç kırıntıları/sıcak karıştırma ile doğal                           | Sınırlı doğal; katkı/bakterilerle tasarlanmış                            |
| <b>CO<sub>2</sub> Ayak İzi (Bağlayıcı)</b> | Daha düşük (kireç kalsinasyonu, yüksek sıcaklıkta klinker yok)         | Daha yüksek (klinker üretimi ~1450°C)                                    |

Bu karşılaştırma, Roma betonunun benzersiz özelliklerini açıklayan temel farklılıkları vurgulamaktadır. Bağlayıcı kimyasındaki (kireç/puzolan vs. Portland çimentosu klinkeri) fark, reaksiyon mekanizmalarındaki ve çevresel ayak izindeki farklılıkların temel nedenidir. Dayanım gelişim profilleri, Roma yapılarının neden zamana meydan okuduğunu, modern betonun ise inşaat hızını önceliklendirdiğini açıklar. Özellikle agresif ortamlardaki dayanıklılık mekanizmalarının karşılaştırılması, antik malzemenin şaşırtıcı avantajını gösterir.

### III. Modern Beton: Geleceği Şekillendiren Yenilikler

Antik Roma'nın mirası ilham verici olsa da modern beton teknolojisi de durmaksızın gelişmekte ve malzemenin sınırlarını zorlamaktadır. Günümüz mühendisleri ve bilim insanları betonu daha güçlü, daha dayanıklı, daha akıllı ve hatta kendi kendini onarabilen bir malzemeye dönüştürmek için çeşitli yenilikçi yaklaşımlar geliştirmektedir.

#### Üstün Performans Arayışı

- **Ultra Yüksek Performanslı Beton (UYPB):** Beton teknolojisindeki en önemli gelişmelerden biri UYPB'dir. Genellikle 150 MPa'ı aşan basınç dayanımlarına sahip olan bu malzeme, optimize edilmiş parçacık paketlenmesi, çok düşük su/bağlayıcı oranları ve genellikle çelik veya sentetik lifler ile nano malzemeler gibi gelişmiş katkı maddelerinin kullanımıyla elde edilir. Bu olağanüstü dayanım ve dayanıklılık, köprüler için daha ince ve daha hafif elemanlar, dayanıklı kaplamalar ve özel yapısal uygulamalar gibi alanlarda kullanımını mümkün kılar. Daha ince kesitler sayesinde malzeme tasarrufu sağlansa da UYPB'nin daha yüksek malzeme maliyeti ve özel üretim/yerleştirme teknikleri gerektirmesi, yaygınlaşmasının önündeki engellerden biridir.

#### Düşünen ve İyileşen Beton

- **Kendi Kendini İyileştiren Beton:** Roma betonundan ilham alan modern araştırmacılar, betonun çatlakları otonom olarak onarma yeteneğini geliştirmeye odaklanmıştır. Başlıca yaklaşımlar şunlardır [4,5,6,7]:
  - **Bakteriyel İyileşme (Biyo-Beton):** Bu yöntemde, betona özel bakteri sporları (genellikle *Bacillus cinsi* veya *Sporosarcina pasteurii* gibi) ve besin maddeleri (örneğin kalsiyum laktat veya üre) eklenir. Çatlak oluşup içeri su sızdığı anda, uyku hâlindeki bakteri sporları "uyanır" ve besinleri metabolize ederek kalsiyum karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) üretirler. Bu kalsiyum karbonat çökerek çatlakları doldurur ve sızdırmaz hâle getirir. Bu teknoloji ile yaklaşık 1 mm genişliğe kadar çatlakların onarılabilirdiği rapor edilmiştir. Bakterilerin betonun alkali ortamında ve karıştırma sırasında korunması için kil pelletleri veya mikro kapsüller gibi kapsülleme yöntemleri kullanılır. Bu sayede bakterilerin beton içinde 200 yıla kadar canlı kalabileceği öngörülmektedir. Mevcut zorluklar arasında üretim maliyetinin düşürülmesi, bakterilerin uzun vadeli canlılığının garantilenmesi ve besin maddelerinin etkin bir şekilde çatlak bölgesine ulaştırılması yer almaktadır.
  - **Kapsüllenmiş Polimerler:** Alternatif bir yaklaşım, çatlama anında kırılarak polimerik iyileştirici ajanları serbest bırakan mikro kapsüllerin betona eklenmesidir.
- **Akıllı Beton (Sensör Entegrasyonu):** Betonun içine sensörler yerleştirilerek yapıların sağlık durumunu sürekli olarak izlemek mümkündür [8,9,10].
  - **İşlevsellik:** Bu sensörler sıcaklık, nem, deformasyon, titreşim, korozyon ve gerilme gibi parametreleri gerçek zamanlı olarak ölçülebilir.
  - **Teknolojiler:** Kablosuz sensörler (örneğin, sıcaklık/olgunluk/dayanım için SmartRock), fiber optik sensörler (FOS), piezoelektrik sensörler, MEMS (Mikro-Elektro-Mekanik Sistemler) ve RFID etiketleri gibi çeşitli teknolojiler kullanılmaktadır.
  - **Faydalar:** Bu teknoloji, önleyici bakımı mümkün kılar, hasarın erken tespit edilmesini sağlar,

kürlenme sırasında kalite kontrolünü artırır, güvenliği yükseltir, manuel denetimlere olan bağımlılığı azaltır ve altyapı yönetimini optimize eder. Nesnelerin İnterneti (IoT) ve Yapay Zekâ (AI) entegrasyonu ile veri analizi ve tahmin yetenekleri daha da geliştirilmektedir.

### İnşaatta Devrim: 3D Beton Yazdırma (Eklemeli İmalat)

Dijitalleşmenin inşaat sektörüne yansımaları olan 3D beton yazdırma, yapıların katman katman özel beton karışımları kullanılarak inşa edilmesini sağlar. Bu teknoloji, geleneksel yöntemlere göre birçok avantaj sunmaktadır [11,12,13,14,15]:

- **Hız ve Verimlilik:** İnşaat sürelerini önemli ölçüde kısaltır. Örneğin, bazı konut projeleri 24 ila 48 saat gibi kısa sürelerde tamamlanabilmiştir.
- **Maliyet Tasarrufu:** İşçilik maliyetlerini düşürür ve malzeme israfını en aza indirir, çünkü malzeme sadece ihtiyaç duyulan yere hassas bir şekilde yerleştirilir.
- **Tasarım Özgürlüğü:** Geleneksel kalıp sistemleriyle mümkün olmayan karmaşık geometrik şekillerin, eğrisel formların ve benzersiz mimari tasarımların üretilmesine olanak tanır.
- **Sürdürülebilirlik:** Malzeme verimliliği sayesinde atık miktarını azaltır, optimize edilmiş veya geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanımına imkân tanır ve potansiyel olarak daha az enerji tüketir.
- **Doğruluk:** Dijital modellere dayalı üretim, manuel inşaatla kıyasla hata payını azaltır.

3D yazdırma teknolojisi, konutlardan köprülere kadar geniş bir uygulama alanına sahiptir ve C50/60 gibi yüksek dayanım sınıflarına ulaşabilen betonların üretilmesini mümkün kılmaktadır. Malzeme kıvamının ve katmanlar arası yapışmanın kontrolü, donatı entegrasyonu, büyük ölçekli uygulamalar ve yasal düzenlemeler gibi konularda hâlâ geliştirme çalışmaları devam etmektedir.

### Fotokatalitik Betonlar

Fotokatalitik betonlar, beton yüzeyinde bulunan fotokatalizör katkıları sayesinde hava kirleticilerini ayrıştıran özelliğe sahiptir. Beton harcına eklenen genellikle titanyum dioksit ( $TiO_2$ ) veya çinko oksit ( $ZnO$ ), güneş ışığı altında  $NO_x$ ,  $SO_2$  gibi zararlı gazları parçalayarak nitrik/sülfürik asit gibi nötr bileşiklere dönüştürür. Bu reaksiyon sonucunda kirleticiler yağmurla kolayca yıkanıp ortamdaki uzaklaşır; böylece beton hem kendini temiz tutar hem de hava kalitesine katkıda bulunur. Örneğin bir  $TiO_2$  katkılı beton yüzey, normal betona göre  $NO_2$  seviyelerini gözle görülür şekilde düşürebilmektedir. Yeni araştırmalar  $ZnO$  veya  $Al_2O_3$  gibi alternatif fotokatalizörlerin daha ucuz ve geniş spektrumlu etkinlik sunduğunu göstermektedir [16].

Dünyanın çeşitli kentlerinde fotokatalitik beton kullanılarak hava ve yüzey kirliliği azaltılmaya çalışılmıştır. Fransa'daki Cité de la Musique (Chambéry) ve Bordeaux Polis Merkezi, Almanya'daki MSV Arena stadyumu tribünleri, Monako'daki Monte-Carlo Bay Oteli cepheleri, Meksika'daki Manuel de Gonzales Hastanesi ve Türkiye'de Kocaeli TÜPRAŞ rafinerisi bu teknolojiyle inşa edilen yapılar arasındadır. Bu uygulamalarda beton ürünleri yol kaplaması, dış duvar ve çatı kaplaması gibi alanlarda kullanılmış hem kendini temizleme işlevi hem de estetik temiz görünüm elde edilmiştir ancak fotokatalitik betonun yüksek maliyeti ve büyük yüzeylerde etkinlik kaybı gibi zorluklar hâlâ araştırma konusudur [16].



## Enerji Depolayan Betonlar

Enerji depolama amaçlı beton araştırmaları ya termal ya da elektriksel enerji saklayabilen yeni kompozitler geliştirmeye yöneliktir. Termal depolama için beton içerisine parafin gibi faz değiştiren malzemeler (PCM) enjekte edilebilir; bu sayede beton kütlesi güneş enerjisini emerken eritici (ergime) ısıyı depolar, gece bu enerjiyi geri verir ve bina içi sıcaklık dalgalanmalarını azaltır. Böylece ısıtma/soğutma ihtiyacı ve enerji tüketimi düşer.

Öte yandan elektrokimyasal enerji depolama da mümkündür. MIT araştırmacıları, beton karışımına karbon siyahı ilave ederek içinden elektrolit geçen bir süperkapasitör malzeme tasarlamışlardır. Su hidrasyonu sırasında içinde oluşan gözenekli yapıya karbon, dallanan bir iletken aę olarak yerleşir ve çok büyük bir yüzey alanı oluşturur. Daha sonra standart bir elektrolit solüsyon kullanılarak iki plaka hâlinde bağlanan bu malzeme, şarj edilebilir süperkapasitör işlevi görmektedir. MIT ekibi, bu beton bazlı süperkapasitörün örneğin bir evin temelinde bir günlük elektriği depolayabileceğini ve elektrikli araçları hareket hâlindeyken kablosuz şarj edebileceğini bildirmiştir [17].

Bu alandaki diğer yaklaşımlar arasında betonun bir elektrot olarak kullanıldığı lityum iyon (li-ion) pil benzeri tasarımlar ve karbon nano-malzemelerin gözenekli beton yüzeylere kaplanması bulunur. Enerji depolayan betonlar henüz deneysel düzeydedir, ancak şebeke destekli akıllı altyapı ve binalarda yapısal elemanları aynı zamanda enerji depolayıcı aygıtlara dönüştürme vizyonuna yönelik önemli adımlardır [18].

## Değerlendirme

Modern beton teknolojisindeki bu gelişmeler, önemli eğilimleri ve çıkarımları beraberinde getirmektedir. Öncelikle, bu yeniliklerin büyük bir kısmı, mikrobiyoloji (biyo-beton), elektronik/loT (akıllı beton), robotik/dijital üretim (3D yazdırma) ve malzeme bilimi (nanoteknoloji, polimerler) gibi diğer alanlardaki ilerlemelerin betona entegre edilmesiyle mümkün olmaktadır. Biyo-beton, akıllı sensörler, 3D yazdırma süreçleri ve lifler veya nanoparçacıklar gibi gelişmiş malzemelerin tanımları, geleneksel inşaat mühendisliği dışındaki uzmanlık ve teknolojilere olan bağımlılığı açıkça göstermektedir. Bu yakınsama, modern uygulamaların talep ettiği ek işlevleri (iyileşme, algılama, karmaşık şekiller) ve gelişmiş özellikleri (ultra yüksek dayanım, süneklik) elde etmek için gereklidir. Beton, giderek farklı teknolojileri entegre eden bir platform hâline gelmektedir.

Bu durum, betonun rolünde temel bir değişime işaret etmektedir. Geleneksel olarak pasif bir yük taşıyıcı malzeme olan beton, artık çevresine tepki verebilen (kendi kendini iyileştiren), durumu hakkında bilgi verebilen (akıllı algılama), yeni yollarla şekillendirilebilen (3D yazdırma) ve ek işlevler yerine getirebilen aktif bir malzemeye dönüşmektedir. Kendi kendini iyileştirme, akıllı sensörler ve kendi kendini temizleme gibi tartışılan yeniliklerin tümü, betona aktif yetenekler katmaktadır. Bu, malzemenin kavranışı ve uygulanmasında temel bir kaymayı temsil eder ancak bu heyecan verici yeniliklerin potansiyeli ile pratik uygulamaları arasında hâlâ bir denge kurulması gerekmektedir. Maliyet, ölçeklenebilirlik, standardizasyon eksikliği, uzun vadeli performansın doğrulanması ve iş gücünün yeni teknolojilere adaptasyonu gibi zorluklar, bu yeniliklerin yaygınlaşmasının önündeki engellerdir. Birçok gelişmiş beton teknolojisi için laboratuvar potansiyeli ile yaygın, uygun maliyetli saha uygulaması arasında tekrarlayan bir boşluk olduğu görülmektedir.



Tablo 2, modern beton teknolojilerinin manzarasını, potansiyelini ve mevcut durumunu anlamaya yardımcı olmaktadır. Her teknoloji için temel prensibi (mekanizma), geliştirilmesini sağlayan ana faydaları (avantajlar), benimsenmesinin önündeki pratik engelleri (zorluklar) ve hedeflenen kullanım alanlarını (uygulamalar) özetlemektedir.

Tablo 2. Modern beton yeniliklerine genel bakış

| Teknoloji                              | Temel Mekanizma  | Ana Avantajlar   | Temel Zorluklar/Sınırlamalar  | Örnek Uygulamalar  |
|--|--|--|---|--|
| <b>Ultra Yüksek Performanslı Beton</b> | Optimize edilmiş parçacık paketlemesi, düşük s/b, lifler   | Çok yüksek dayanım (>150 MPa), dayanıklılık  | Yüksek maliyet, özel karıştırma/yerleştirme   | Köprü elemanları, kaplamalar, narin yapılar  |
| <b>Kendi Kendini İyileştiren Beton</b> | Bakteriyel CaCO <sub>3</sub> çökmesi ile çatlak dolgusu  | Otonom onarım, artan ömür, azalan bakım  | Maliyet, uzun vadeli canlılık, besin iletimi, standardizasyon                             | Çatlamaya maruz kalan altyapılar (köprü, tünel), erişimi zor alanlar                                 |
| <b>3D Yazdırma</b>                     | Beton karışımının katmanlı ekstrüzyonu   | Hız, tasarım özgürlüğü, azalan atık ve işçilik maliyeti  | Malzeme tutarlılığı, donatı entegrasyonu, ölçekleme, regülasyon                           | Konutlar, mimari elemanlar, potansiyel altyapı   |
| <b>Akıllı Beton</b>                    | Gömülü sensörler (kablosuz, FOS, piezo vb.)  | Gerçek zamanlı izleme, önleyici bakım, kalite kontrolü   | Sensör dayanıklılığı, veri yönetimi, maliyet, entegrasyon                                 | Köprüler, binalar, tüneller, kritik altyapı izleme   |
| <b>Enerji Depolayan Beton</b>          | Termal veya elektriksel enerjiyi depolama (örn: özel agrega/katkılar, süperkapasitör prensipleri)                      | Enerji verimliliği, ısıtma/soğutma yükünü azaltma, yenilenebilir enerji entegrasyonu                       | Geliştirme aşamasında, maliyet, depolama kapasitesi sınırlamaları, uzun vadeli performans | Binaların temel ve duvarları (termal depolama), potansiyel olarak yollar (elektriksel depolama/şarj) |
| <b>Fotokatalitik Beton</b>             | Genellikle TiO <sub>2</sub> gibi fotokatalizörlerin güneş ışığı (UV) ile reaksiyona girerek kirleticileri ayrıştırması | Hava temizleme (NO <sub>x</sub> , VOC vb.), kendi kendini temizleme yüzeyleri, estetik görünümün korunması | Maliyet, etkinliğin güneş ışığına bağımlılığı, fotokatalizörün performansı ve ömrü        | Bina cepheleri, tünel iç yüzeyleri, kentsel alanlardaki dış mekân yüzeyleri                          |

## IV. Betonun Geleceği: Nano Ölçekten Uzaya

Betonun evrimi, sadece daha güçlü veya daha yeşil olmakla sınırlı kalmıyor. Malzeme bilimi ve mühendislikteki ilerlemeler, betona daha önce hayal bile edilemeyen yetenekler kazandırarak ve onu tamamen yeni uygulama alanlarına taşıyarak geleceğini şekillendiriyor.

### Daha Derine İnmek: Nano Mühendislik Betonu

Nanoteknoloji, malzemeleri atomik ve moleküler düzeyde manipüle etme bilimi, betonun özelliklerini temelden iyileştirmek için heyecan verici olanaklar sunmaktadır [19]. Nano boyutlu parçacıklar (örneğin, nano-silika ( $nSiO_2$ ), nano-titanyum dioksit ( $nTiO_2$ ), nano-alümina ( $nAl_2O_3$ ), karbon nanotüpler/nanolifler) beton karışımına eklendiğinde, geleneksel yöntemlerle ulaşılamayan iyileştirmeler sağlayabilmektedir [20].

Bu nanoparçacıklar, çimento hamuru içindeki mikro boşlukları doldurarak daha yoğun bir yapı oluşturur, çimento taneleri için ek çekirdeklenme bölgeleri sağlayarak hidrasyon sürecini hızlandırır, gözenek yapısını inceltir ve agrega ile çimento hamuru arasındaki kritik arayüzey geçiş bölgesini (ITZ) güçlendirir. Sonuç olarak, nano mühendislik betonu daha yüksek basınç ve eğilme dayanımı, daha düşük geçirgenlik sayesinde artırılmış kimyasal saldırılara ve korozyona karşı dayanıklılık gibi gelişmiş mekanik özellikler ve dayanıklılık sergileyebilmektedir. Ayrıca, bazı nanoparçacıklar yeni işlevler de katabilir; örneğin, nano-TiO<sub>2</sub> fotokatalitik özelliği sayesinde kendi kendini temizleme yeteneği kazandırırken, bazıları 3D yazdırma için gereken tiksotropik (akışkanlık) davranışını iyileştirebilmektedir [19,20,21].

Nanoteknolojinin betonda yaygınlaşmasının önünde engeller de bulunmaktadır. Nanomalzemelerin yüksek maliyeti, beton karışımı içinde homojen bir şekilde dağılmalarını sağlamanın zorluğu (topaklanma eğilimi), üretim ve kullanım sırasında potansiyel sağlık ve çevresel riskler ve bu malzemelerin uzun vadeli davranışları ve dayanıklılıkları hakkındaki bilgi eksikliği bu zorluklardan bazılarıdır. Bu nedenle, nanoteknoloji, betonun özelliklerini temelden geliştirme potansiyeli sunarken, geleneksel karışım tasarımı optimizasyonunun ötesine geçerek malzemenin yapısını en küçük ölçeklerde mühendislikle şekillendirme yolunu açmaktadır. Bu nano ölçekli mühendislik, dayanım, dayanıklılık ve hatta yeni işlevlerin eklenmesinde hedeflenen iyileştirmeleri mümkün kılarak, beton performansının nasıl ilerletilebileceği konusunda önemli bir paradigma kaymasını temsil etmektedir.

### Çalışan Beton: Enerji Hasadı

Betonun sadece yük taşıyan pasif bir eleman olmaktan çıkıp aktif bir rol üstlenebileceği bir diğer alan da enerji hasadıdır. Piezoelektrik enerji hasadı (PEH) konsepti, yapıların maruz kaldığı mekanik titreşimlerden elektrik enerjisi üretmeyi amaçlar. Piezoelektrik etki, belirli malzemelerin (örneğin kurşun zirkonat titanat - PZT seramikleri) mekanik stres veya titreşime maruz kaldığında elektrik yükü üretmesi prensibine dayanır (37). Bu malzemeler beton elemanlarına (yollar, köprüler, binalar) entegre edildiğinde, trafik, rüzgâr, insan adımları gibi ortam titreşimlerinden enerji hasat edilebilir [22,23,24].

Bu teknoloji ile üretilen enerji miktarı şu anda düşük seviyelerde olsa da yapı sağlığı izlemesi için kullanılan düşük güç tüketimli sensörleri, trafik izleme sistemlerini veya yapıya entegre edilmiş küçük elektronik cihazları çalıştırma potansiyeli taşımaktadır. Betonun üretiminin enerji tüketmesine rağmen, enerji hasadı yapan beton araştırmaları, özellikle gömülü sistemleri çalıştırmak için potansiyel olarak (küçük ölçekli de olsa) bir enerji kaynağı olabileceğini ve daha akıllı, kendi kendine yeterli altyapılara katkıda bulunabileceğini göstermektedir. Bu potansiyel ikili işlev (yapısal destek + enerji üretimi), yapı malzemelerine ve sürdürülebilir sistemlerdeki rollerine bakış açımızı değiştirmekte, malzeme bilimini doğrudan enerji teknolojisiyle ilişkilendirmektedir.

PEH teknolojisinin yaygınlaşması için düşük enerji dönüşüm verimliliği, büyük ölçekli uygulamalar için ölçeklenebilirlik sorunları, piezoelektrik elemanların beton içindeki uzun vadeli dayanıklılığı, maliyet etkinliği ve üretilen enerjinin depolanması gibi önemli zorlukların aşılması gerekmektedir.

### **Dünya'nın Ötesi: Uzay Keşfi İçin Beton**

İnsanlığın uzaydaki hedefleri büyüdükçe, Ay veya Mars gibi gök cisimlerinde kalıcı üsler ve altyapılar inşa etme ihtiyacı ortaya çıkmaktadır). Bu yapıları Dünya'dan taşımak yerine, yerel kaynakları kullanarak inşa etmek, maliyetleri düşürmek için kritik öneme sahiptir. Beton, potansiyel radyasyon kalkanı özellikleri ve yapısal gücü nedeniyle bu görev için umut vadeden bir malzemedir [25,26].

Bu nedenle NASA ve ESA gibi uzay ajansları, Uluslararası Uzay İstasyonunda (ISS) çimento hidratasyonunu ve betonun mikro yerçekimi ortamında nasıl katılaştığını incelemek için deneyler (örneğin, MICS, MVP Cell-05) yürütmektedir. Bu deneylerden elde edilen ilk bulgular, mikro yerçekiminin betonun mikro yapısını etkilediğini göstermektedir: Kaldırma kuvvetinin olmaması nedeniyle hava kabarcıkları hapsolmakta ve bu da gözenekliliği artırmaktadır; kristal büyümesi daha fazla olabilirken, sedimentasyon (çökeltme) daha az olmakta, bu da daha homojen bir dağılım anlamına gelmektedir. Bu değişikliklerin betonun nihai dayanımını nasıl etkilediği (artan gözeneklilik dayanımı azaltabilirken, artan homojenlik veya kristalleşme artırabilir) hâlâ araştırılmaktadır [25,26].

Dünya dışı beton konseptleri arasında, agrega olarak Ay veya Mars toprağı (regolit) simülanlarının kullanılması, Mars'taki su kıtlığı nedeniyle kükürt gibi alternatif bağlayıcıların araştırılması veya yerel regolite dayalı geopolimerlerin geliştirilmesi yer almaktadır. Ayrıca, uzaydaki inşaatlar için 3D yazdırma teknolojisinin kilit bir rol oynaması beklenmektedir. Uzayda inşaat yapmanın zorlukları (mikro yerçekimi, kaynak kısıtlamaları, radyasyon), mühendisleri betonu temelden yeniden düşünmeye zorlamaktadır. Bu aşırı tasarım zorluklarını çözmek, Dünya'daki uygulamalar için, özellikle kaynakların sınırlı olduğu veya zorlu ortamlarda, daha kaynak verimli, uyarlanabilir ve potansiyel olarak daha yüksek performanslı beton çözümlerine ilham verebilir.

## V. Sonuç: Kalıcı ve Gelişen Malzeme

Bu bülten boyunca yaptığımız yolculuk, betonun sadece basit bir yapı malzemesi olmadığını, aksine zengin bir tarihe, karmaşık bir bilime ve sürekli evrilen bir geleceğe sahip dinamik bir malzeme olduğunu ortaya koymuştur. Antik Roma'nın, ampirik bilgi ve yerel kaynak kullanımıyla elde ettiği, zamanın ötesinde bir dayanıklılığa sahip, hatta kendi kendini iyileştirebilen betonarme yapıları, modern bilimin optimize ettiği malzemelere bile meydan okumaktadır.

Günümüzde ise beton teknolojisi, ultra yüksek performanstan kendi kendini iyileştirmeye, şeffaflıktan 3D yazdırmaya kadar uzanan baş döndürücü bir inovasyon dalgasıyla yeniden şekillenmektedir. Bu yenilikler, betonun sadece pasif bir yük taşıyıcı olmaktan çıkıp, çevresine tepki veren, durumunu bildiren ve yeni işlevler üstlenen aktif bir malzemeye dönüşümünü müjdelmektedir. Bu dönüşüm, büyük ölçüde mikrobiyoloji, elektronik, robotik ve nanoteknoloji gibi farklı disiplinlerden gelen ilerlemelerin betona entegrasyonu ile mümkün olmaktadır.

Bu ilerlemelerin yanı sıra, betonun karşı karşıya olduğu en büyük zorluk çevresel ayak izidir. Çimento üretiminin neden olduğu yüksek CO<sub>2</sub> emisyonları, sürdürülebilirliği beton araştırmalarının merkezine yerleştirmiştir. İkincil bağlayıcı malzemelerin (uçucu kül, cüruf vb.) kullanımı, LC3 ve geopolimerler gibi alternatif bağlayıcıların geliştirilmesi ve yaşam döngüsü değerlendirmesi gibi yaklaşımlar, bu zorluğun üstesinden gelmek için atılan önemli adımlardır. Endüstriyel yan ürünlerin değerli kaynaklara dönüştürülmesi, dögüsel ekonomi ve endüstriyel simbiyoz potansiyelini de beraberinde getirmektedir.

Geleceğe baktığımızda, nano mühendislik ile malzemenin temel özelliklerini geliştirme, piezoelektrik malzemelerle enerji hasadı yapma ve hatta uzayda inşaat için yeni beton türleri geliştirme gibi ufuk açıcı olasılıklar görmekteyiz. Betonun nano ölçekten gezegenler arası ölçeğe uzanan bu evrimi, onun uyum sağlama ve yenilenme kapasitesini göstermektedir.

Sonuç olarak beton, antik çağlardan beri medeniyetimizin temel taşı olmuş ve görünüşe göre gelecekte de bu rolünü sürdürecektir. Kendi kendini iyileştirme, akıllı algılama, sürdürülebilir üretim pratikleri ve hatta dünya dışı kullanım potansiyeli gibi yeteneklerle donatılan bu kadim malzeme, önümüzdeki zorlukları ve fırsatları karşılamak için sürekli olarak kendini yeniden icat etmektedir. Bu potansiyelin tam olarak gerçekleştirilmesi ise devam eden araştırma, standardizasyon çabaları ve endüstri ile akademi arasındaki iş birliğine bağlı olacaktır. Betonun hikâyesi henüz bitmedi; aksine, yeni ve heyecan verici bölümlerle yazılmaya devam ediyor.



## Kaynaklar

1. Marie D. Jackson, Sean R. Mulcahy, Heng Chen, Yao Li, Qinfei Li, Piergiulio Cappelletti, Hans-Rudolf Wenk; Phillipsite and Al-tobermorite mineral cements produced through low-temperature water-rock reactions in Roman marine concrete. *American Mineralogist* 2017; 102 (7): 1435–1450. doi: <https://doi.org/10.2138/am-2017-5993CCBY>
2. Linda M. Seymour, Janille Maragh, Paolo Sabatini, Michel Di Tommaso, James C. Weaver, and Admir Masic. 2023. Hot mixing: Mechanistic insights into the durability of ancient Roman concrete. *Science Advances*.
3. Topçu, İ. B., Hocaoğlu, İ. (2024, 17 Kasım). Beton Teknolojisindeki Yeni Gelişmeler. ResearchGate. Erişim tarihi: 28 Nisan 2025, ([https://www.researchgate.net/publication/376391677\\_Beton\\_Teknolojisindeki\\_Yeni\\_Gelis\\_meler](https://www.researchgate.net/publication/376391677_Beton_Teknolojisindeki_Yeni_Gelis_meler))
4. Bacteria Based Self-Healing Concrete: A Review. ResearchGate. Erişim tarihi: 28 Nisan 2025, ([https://www.researchgate.net/publication/357787349\\_BACTERIA\\_BASED\\_SELF-HEALING\\_CONCRETE\\_A\\_REVIEW](https://www.researchgate.net/publication/357787349_BACTERIA_BASED_SELF-HEALING_CONCRETE_A_REVIEW))
5. Bio-Self-Healing Concrete: A Review on Bacterial Selection, Encapsulation Methods, and Crack Healing Efficiency. (2024, 19 Aralık). PMC NCBI. Erişim tarihi: 28 Nisan 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11730074/>
6. The enormous potential of self-healing bio-concrete. TU Delft. Erişim tarihi: 28 Nisan 2025, <https://www.tudelft.nl/en/innovation-impact/pioneering-tech/articles/the-enormous-potential-of-self-healing-bio-concrete>
7. Self-healing concrete. (2015, 2 Mayıs). Max Planck Institute for Marine Microbiology. Erişim tarihi: 28 Nisan 2025, (<https://www.mpi-bremen.de/en/Self-healing-concrete.html>)
8. The Future of Concrete: Smart Sensors and IoT Integration. American Rock Products. Erişim tarihi: 28 Nisan 2025, <https://americanrockproducts.com/insights/the-future-of-concrete-smart-sensors-and-iot-integration/>
9. SmartRock® Wireless Concrete Maturity Sensor. Giatec Scientific Inc. Erişim tarihi: 28 Nisan 2025, <https://www.giatecscientific.com/products/concrete-sensors/smartrock-maturity-meter/>
10. Smart Sensors for Structural Health Monitoring in Civil Infrastructure: A Bibliometric Analysis. (2024, 19 Aralık). PMC NCBI. Erişim tarihi: 28 Nisan 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11678993/>
11. Geleneksel ve Modern 3D Beton Baskının İnşaat Sektöründeki Yeri. Confabric. Erişim tarihi: 28 Nisan 2025, <https://www.confabric.com/tr/geleneksel-ve-modern-3d-beton-baskinin-insaat-sektorundeki-yeri>
12. Blueprint for Building the Future: Eco-Friendly 3D Concrete Printing. University of Virginia School of Engineering and Applied Science. Erişim tarihi: 28 Nisan 2025, <https://engineering.virginia.edu/news-events/news/blueprint-building-future-eco-friendly-3d-concrete-printing>
13. 10 examples of largest 3D printed houses around the world. Parametric Architecture. Erişim tarihi: 28 Nisan 2025, <https://parametric-architecture.com/10-examples-of-largest-3d->

- printed-houses-around-the-world/
14. Best Examples of 3D Printed Houses Around the World: Pushing the Boundaries of Modern Architecture. Foyr. Erişim tarihi: 28 Nisan 2025, <https://foyr.com/learn/best-examples-of-3d-printed-houses-around-the-world>
  15. 3D Printed Houses | The Future of Construction. (2022, 11 Ocak). YouTube. Erişim tarihi: 28 Nisan 2025, <https://www.youtube.com/watch?v=5lxVPpkkWXI&pp=0gcJCdgAo7VqN5tD>
  16. Putri, Julieta Eka & Pratama, M. Mirza Abdillah. (2023). Photocatalytic Concrete Using ZnO and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - A Review. E3S Web of Conferences. 445. 10.1051/e3sconf/202344501028.
  17. <https://news.mit.edu/2023/mit-engineers-create-supercapacitor-ancient-materials-0731>
  18. Ulm, F.-J., Masic, A., Horn, Y.-S., Kutterer, R., Reda, A., & Ameli, Z. (2023). *Carbon–cement supercapacitors as a scalable bulk energy storage system*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 120(35), e2304318120. <https://doi.org/10.1073/pnas.2304318120>
  19. Advancements in nano-engineering of cement and concrete: a comprehensive review. (2025, 30 Ocak). ResearchGate. Erişim tarihi: 28 Nisan 2025, [https://www.researchgate.net/publication/388442113\\_Advancements\\_in\\_nano-engineering\\_of\\_cement\\_and\\_concrete\\_a\\_comprehensive\\_review](https://www.researchgate.net/publication/388442113_Advancements_in_nano-engineering_of_cement_and_concrete_a_comprehensive_review)
  20. A Review on the Use of Nanomaterials in Concrete. (2023, Şubat). International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science. Erişim tarihi: 28 Nisan 2025, [https://www.irjmets.com/uploadedfiles/paper//issue\\_2\\_february\\_2023/33504/final/fin\\_irjmets1676386916.pdf](https://www.irjmets.com/uploadedfiles/paper//issue_2_february_2023/33504/final/fin_irjmets1676386916.pdf)
  21. Effect of Nanotechnology on construction. (2018, Ağustos). SAS Publishers. Erişim tarihi: 28 Nisan 2025, <https://www.saspublishers.com/article/11369/download/>
  22. Piezoelectric Energy Harvesting for Civil Engineering Applications. (2024, 23 Kasım). ResearchGate. Erişim tarihi: 28 Nisan 2025, [https://www.researchgate.net/publication/384578374\\_Piezoelectric\\_Energy\\_Harvesting\\_for\\_Civil\\_Engineering\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/384578374_Piezoelectric_Energy_Harvesting_for_Civil_Engineering_Applications)
  23. Erturk, A., & Inman, D. J. (2011). Piezoelectric Energy Harvesting. Wiley. Erişim tarihi: 28 Nisan 2025, <https://www.amazon.com/Piezoelectric-Energy-Harvesting-Alper-Erturk/dp/047068254X>
  24. Piezoelectric Energy Harvesting for Civil Engineering Applications. (2024, 23 Kasım). ResearchGate. Erişim tarihi: 28 Nisan 2025, [https://www.researchgate.net/publication/384578374\\_Piezoelectric\\_Energy\\_Harvesting\\_for\\_Civil\\_Engineering\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/384578374_Piezoelectric_Energy_Harvesting_for_Civil_Engineering_Applications)
  25. Astronauts on ISS practice moon base cement-mixing tech in microgravity. (2024, 25 Ağustos). One Giant Leap Australia. Erişim tarihi: 28 Nisan 2025, <https://onegiantleapaustralia.com/2024/08/25/astronauts-on-iss-practice-moon-base-cement-mixing-tech-in-microgravity/>
  26. Astronauts Try Mixing Concrete in Space. Universe Today. Erişim tarihi: 28 Nisan 2025, <https://www.universetoday.com/143359/astronauts-try-mixing-concrete-in-space/amp/>



[www.thbb.org](http://www.thbb.org)

[www.thbbakademi.org](http://www.thbbakademi.org)

