



THBB AKADEMİ

TEKNİK BÜLTEN

22

ANTİK MÜHENDİSLİKTE MODERN BETON TEKNOLOJİSİNE DERSLER

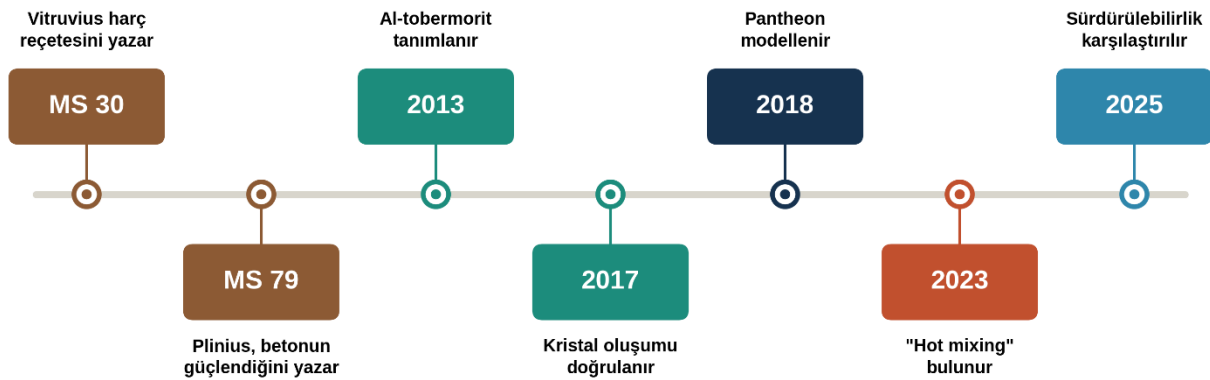
TÜRKİYE HAZIR BETON BİRLİĞİ YAYINIDIR.
Ağustos 2026

1. GİRİŞ

Roma İmparatorluğu'nun beton yapıları – Pantheon'un kubbesi, liman dalgakıranları, su kemerleri – iki bin yılı aşkın süredir ayakta durmaktadır. Buna karşılık, 20. yüzyılda inşa edilen pek çok betonarme yapı, birkaç on yıl içinde ciddi bakım ve onarım ihtiyacı duymaktadır. Bu çelişki, son on yılda malzeme bilimi, jeoloji ve inşaat mühendisliği disiplinlerinin ortak ilgisini çekmiştir. Massachusetts Institute of Technology (MIT), Harvard Üniversitesi, Utah Üniversitesi ve Lawrence Berkeley Ulusal Laboratuvarı gibi kurumlarda yürütülen çalışmalar, Roma betonunun dayanıklılığının arkasındaki mekanizmaları büyük ölçüde aydınlatmıştır.

Bu bülten, Roma betonuna dair popüler anlatıyı bilimsel literatür ışığında sınamayı, hakemli dergilerde yayımlanmış bulguları güncel beton teknolojisi pratiğiyle ilişkilendirmeyi ve okuyucuya hem tarihsel bir merak konusunu hem de düşük karbonlu beton gündemine katkı sağlayabilecek somut çıkarımları bir arada sunmayı amaçlamaktadır.

Son beş yılda yayımlanan dört temel çalışma – kendi kendini onarma mekanizması (2023), deniz suyu mineral büyümesi (2013/2017), Pantheon'un yapısal modellemesi (2018) ve yaşam döngüsü bazlı sürdürülebilirlik değerlendirmesi (2025) – bir araya geldiğinde, Roma betonunu artık yalnızca arkeolojik bir merak konusu değil; dürabilite tasarımı ve düşük karbon gündemiyle doğrudan ilişkili bir araştırma alanı hâline getirmektedir.



Şekil 1. Roma betonu araştırmalarında kilometre taşları

2. OPUS CAEMENTICIUM

Romalıların "opus caementicium" adını verdiği yapı tekniği, MÖ 3. yüzyıldan itibaren gelişmeye başlamış ve İmparatorluk döneminde (MS 1.-2. yüzyıl) olgunluğuna ulaşmıştır. Modern betondan farklı olarak Romalılar, sönmüş veya sönmemiş kireç, volkanik kül (özellikle Napoli Körfezi'ndeki Pozzuoli bölgesinden temin edilen puzolan) ve iri agrega parçalarını (caementa) tabakalar hâlinde elle yerleştirerek harmanlıyorlardı [1]. Bu karışımlarda elbette günümüzdeki gibi klinker esaslı bir bağlayıcı yoktu. Bağlayıcı etkisi, kireç ile volkanik külün oda sıcaklığında (veya sıcak karıştırma durumunda hafif yükseltilmiş sıcaklıkta) gerçekleşen puzolanik reaksiyonundan kaynaklanmaktadır [2, 3].

Dönemin mimarı Vitruvius, MÖ 30 yıllarında kaleme aldığı De Architectura adlı eserinde, kireç ve puzolan karışımının su ile temas ettiğinde nasıl davrandığını ayrıntılı biçimde aktarmıştır [1]. Bir yüzyıl sonra doğa bilimci Plinius, Naturalis Historia adlı ansiklopedik eserinde liman yapılarındaki betonun dalga etkisine nasıl karşılık verdiğini şu sözlerle özetlemiştir: "dalgalara karşı geçirimsiz, tek bir taş kütlesi hâline gelir ve her geçen gün daha da güçlenir" [4]. Bu gözlem, o dönemde tam olarak açıklanamasa da, 2017 yılında Jackson ve ekibinin laboratuvar bulgularıyla bilimsel temele kavuşmuştur [5].

Bugün elimizde Roma dönemine ait üç ana beton yapı kategorisi bulunmaktadır: (i) kara yapıları (Pantheon, hamamlar, su kemerleri), (ii) deniz/liman yapıları (dalgakıranlar, rıhtımlar) ve (iii) altyapı yapıları (yollar, kanalizasyon sistemleri). Bu bültende ele alınan bilimsel bulguların önemli bir kısmı, özellikle deniz yapılarına odaklanan ROMACONS (Roman Maritime Concrete Study) projesinin 2002-2009 yılları arasında Akdeniz kıyı şeridinden aldığı karot örneklerine dayanmaktadır [5, 6].

Proje kapsamında araştırmacılar, İtalya, İsrail ve Yunanistan kıyılarındaki on bir farklı Roma liman yapısından, su altı elmas uçlu matkaplarla silindirik karot örnekleri almıştır. Bu karotlar, yapının farklı derinliklerindeki (deniz yüzeyi, dalgakıran gövdesi, deniz tabanı) malzeme davranışını karşılaştırmalı olarak incelemeyi mümkün kılmıştır.

Elde edilen karotlar, kesilerek ince kesitler hâline getirilmiş; polarize ışık mikroskobu, taramalı elektron mikroskobu (SEM), X-ışını kırınımı (XRD) ve senkrotron tabanlı mikro-difraksiyon yöntemleriyle (Lawrence Berkeley Ulusal Laboratuvarı'nın Advanced Light Source tesisinde) analiz edilmiştir. Bu çok yönlü yaklaşım, hem mineral bileşimin hem de mikro yapının milimetre altı ölçekte haritalanmasına imkân tanımış ve bu bültende ele alınan Al-tobermorit keşfinin temelini oluşturmuştur [5, 6].

3. POPÜLER ALGI VE BİLİMSEL GERÇEKLİK

Roma betonu hakkındaki popüler anlatılar zaman zaman abartılı bir tablo çizmektedir. Bu bölümde ele alınan bilimsel bulgulara geçmeden önce, aşağıdaki karşılaştırma ile bu algının sınırlarını netleştirmek yerinde olacaktır.

X YAYGIN ALGI

Roma betonu her koşulda modern betondan daha dayanıklıdır. Günümüzde kullanılmaması kaybolmuş bir "gizli reçete" olmasındandır.

✓ BİLİMSEL GERÇEKLİK

Roma betonunun reçetesi hiçbir zaman tam anlamıyla kaybolmamıştır. Bugün ayakta kalan yapılar, dönemin en iyi malzeme ve işçilikle inşa edilmiş özenli örnekleridir. Standart dışı üretilen, çok sayıda Roma dönemi yapısı çoktan yıkılmış, sadece en dayanıklı örnekler günümüze ulaşmıştır.

Ayrıca kritik bir yapısal fark gözden kaçırılmamalıdır. Roma betonu donatısızdır ve yalnızca basınç yükü taşıyan kütsel elemanlarda (kemer, kubbe, duvar) kullanılmıştır. Modern betonarme yapılarındaki bozulmanın başlıca nedeni olan donatı korozyonu, Roma yapılarında yapısal olarak söz

konusu bile değildir. Bu nedenle iki malzemeyi doğrudan "dayanım" veya "ömür" bazında kıyaslamak yanıltıcı olabilir.

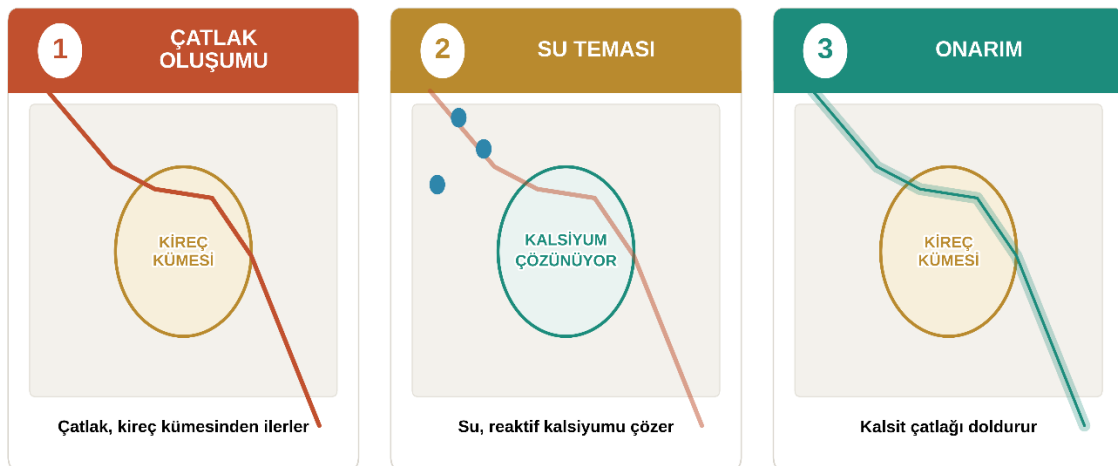
Bir başka gözden kaçan husus da bakım tarihidir. Ayakta kalan Roma yapılarının pek çoğu, yüzyıllar boyunca çeşitli onarım ve müdahalelerden geçmiştir. Pantheon, örneğin, MS 80 yılındaki bir yangın sonrası kısmen yeniden inşa edilmiş, MS 110'da yıldırım sonucu tekrar hasar görmüş ve İmparator Hadrianus döneminde bugünkü hâline kavuşmuştur. "2000 yıldır bakım görmeden ayakta duran yapı" anlatısı, bu nedenle tarihsel olarak da tam doğru değildir.

4. SICAK KARIŞTIRMA (HOT MIXING) VE KENDİ KENDİNİ ONARAN BETON

Roma harcının kesitlerinde sıkça rastlanan, milimetre ölçekli beyaz kireç kümelenmeleri (lime clasts) uzun süre üretim kalitesizliğinin bir göstergesi olarak yorumlanmıştır. 2023 yılında Science Advances dergisinde yayımlanan ve MIT ile Harvard araştırmacılarının yürüttüğü çalışma, bu yorumu tersine çevirmiştir [7].

Seymour ve ekibi, taramalı elektron mikroskobu (SEM-EDS), X-ışını difraksiyonu (XRD) ve konfokal Raman görüntüleme yöntemleriyle inceledikleri örneklerde, kireç kümelerinin sönmemiş kireç (CaO) kullanılarak yapılan "sıcak karıştırma" (hot mixing) tekniğinin bir sonucu olduğunu; bunun kasıtlı ve kontrollü bir üretim yöntemi olduğunu ortaya koymuştur [7]. Sönmemiş kireç ile karıştırma, yüksek sıcaklıkta ekzotermik bir reaksiyon başlatmakta ve bu da hem harcın kürlenme hızını artırmakta hem de kristal yapısı yüksek yüzey alanına sahip, reaktif kireç kümeleri oluşturmaktadır.

Betonda oluşan mikro çatlaklar, çevresindeki yoğun matrisden daha kırılgan olan bu kireç kümelerinden ilerleme eğilimindedir. Çatlak suyla temas ettiğinde, kireç kümesindeki reaktif kalsiyum çözünmekte ve kalsiyum karbonat (kalsit) olarak yeniden çökerek çatlağı adeta bir yapıştırıcı gibi doldurmaktadır [7]. Araştırmacılar bu mekanizmayı laboratuvar ortamında da test etmiş; kireç kümesi içeren modern beton örneklerinde çatlaktan su akışının 30 gün içinde tamamen durduğunu, kireç kümesi içermeyen kontrol örneklerinde ise su akışının kesintisiz devam ettiğini göstermiştir [7].



Şekil 2. Kireç kümesi (lime clast) kaynaklı kendi kendini onarma mekanizması: çatlak oluşumu, suyla temas ve kalsitin yeniden çökmesi [7]

Bu mekanizmanın önemi yalnızca çatlak onarımıyla sınırlı değildir. Sıcak karıştırma sürecinde oluşan yüksek reaktiviteli kireç kümeleri, aynı zamanda betonun ilk kürlenme hızını da artırmaktadır. Bu da Romalıların, nispeten kısa kalıp süreleriyle büyük hacimli yapılar inşa edebilmesini açıklayan bir başka faktördür. Araştırmacılar, bu bulgunun beton üretiminde kullanılan kirecin kalitesi ve karıştırma sıcaklığı arasındaki ilişkiyi yeniden gözden geçirmeyi gerektirdiğini vurgulamaktadır [7].

5. DENİZ SUYUNDA GÜÇLENEN BETON

Modern deniz yapısı betonları, tuzlu su ve dalga etkisiyle genellikle birkaç on yıl içinde belirgin aşınma göstermektedir. Buna karşılık, 2000 yıllık Roma liman ve dalgakıran yapıları bugün, inşa edildikleri döneme kıyasla daha yüksek mekanik bütünlük sergilemektedir. Utah Üniversitesi'nden jeolog Marie Jackson ve ekibinin ROMACONS karot örnekleri üzerinde yürüttüğü çalışmalar, bu durumun nedenini ortaya koymuştur [5, 6].

Araştırmacılar, Roma deniz betonlarının harcında son derece nadir bir mineral olan alüminyumlu tobermorit (Al-tobermorit) tespit etmiştir. Bu mineralin laboratuvar ortamında sentezlenmesi yüksek sıcaklık gerektirmekte ve yalnızca küçük miktarlarda elde edilebilmektedir. Oysa Roma betonunda düşük sıcaklıkta, doğal koşullarda, yüzyıllar içinde kendiliğinden oluşmuştur [5]. Mekanizma şu şekilde işlemektedir: deniz suyu, betondaki mikro çatlaklardan içeri sızmakta; kireç kümeleri ile volkanik kül arasındaki pozolanik reaksiyonu tetiklemekte ve zamanla birbirine kenetlenen, plaka biçimli Al-tobermorit ve filipsit kristalleri büyütmemektedir [5, 6]. Bu kristal yapılar, betonun gevrek kırılmaya karşı direncini artırmakta ve malzemeye zamanla ek bir mekanik bütünlük kazandırmaktadır.



Şekil 3. Deniz suyunun Roma liman betonu içine sızarak Al-tobermorit kristal büyümesini tetiklediği pozolanik reaksiyon şeması [5, 6]

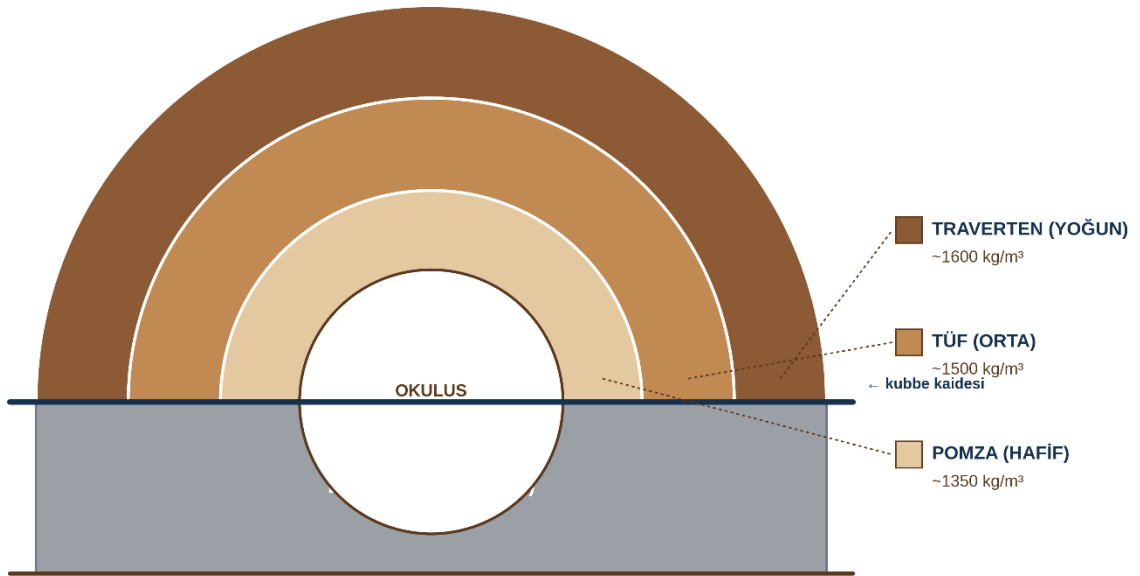
2013 tarihli çalışmada Jackson ve ekibi, bu kristallerin elastik özelliklerini de sentkrotron X-ışını kırınımı ve nanoskala tomografi yöntemleriyle incelemiş; kristal kümelerinin, gözeneklilik oranı yaklaşık %52 olmasına rağmen birbirine iyi kenetlenmiş bir katı yapı oluşturduğunu göstermiştir [6]. Bu, malzemenin görece gözenekli olmasına rağmen mekanik olarak neden bu denli dayanıklı kaldığını açıklayan önemli bir bulgudur.

Bu bulgunun mühendislik açısından önemi iki yönlüdür: birincisi, Al-tobermorit'in katyon değişim (cation exchange) özellikleri sayesinde tehlikeli atık izolasyonu gibi alanlarda potansiyel uygulama alanı taşıması; ikincisi ise, modern deniz yapısı betonlarında volkanik kül veya benzeri doğal puzolan kullanımının, uzun vadeli dayanıklılık açısından yeniden değerlendirilmesi gerektiğidir [5, 6].

6. PANTHEON'UN MÜHENDİSLİK SIRRI

MS 128 yılı civarında tamamlanan Pantheon'un kubbesi, günümüzde hâlâ dünyanın en büyük donatısız beton kubbesi unvanını taşımaktadır. Kubbenin iç çapı 43,3 metredir. Bu ölçekte bir kubbenin donatısız betonla ayakta durabilmesi, malzeme seçimindeki kasıtlı bir mühendislik stratejisiyle mümkün olmuştur: kademeli agrega tasarımı (functionally graded design) [8].

Masi, Stefanou ve Vannucci'nin (2018) Engineering Failure Analysis dergisinde yayımlanan sonlu elemanlar analizine göre, kubbenin tabanında yoğun traverten agregası kullanılırken, yükseldikçe tuf ve tuğla parçalarına, tepe noktasına (okulusa) yaklaştıkça ise çok hafif volkanik pomza taşına geçilmiştir [8]. Bu kademeliendirme sonucunda beton yoğunluğu tabanda yaklaşık 1600 kg/m^3 iken, kubbenin tepesinde yaklaşık 1350 kg/m^3 'e kadar düşmektedir [8]. Duvar kalınlığı da aynı mantıkla, temelden kubbeye doğru azaltılmıştır.



Taban – tepe ekseninde azalan agrega yoğunluğu, kubbe ağırlığını kontrol altında tutan kasıtlı bir mühendislik stratejisidir.

Şekil 4. Pantheon kubbesinde taban-tepe ekseninde azalan agrega yoğunluğu; modern "fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme" kavramının MS 2. yüzyıldaki bir uygulaması [8]

Aynı çalışma, kubbeye günümüzde de gözlemlenebilen meridyensel (dikey) çatlakların büyük olasılıkla yapının erken yaşam evresinde, beton rötresi ve yerçekimi yükünün birleşik etkisiyle oluştuğunu göstermektedir [8]. Bu bulgu, dengeli bir değerlendirme için önemlidir. Pantheon'un kubbesi kusursuz değildir. Kendi rötre çatlaklarıyla iki bin yıldır yaşamaktadır ve bu da betonun rötre davranışının, antik dönemde de bugünkü kadar gerçek bir mühendislik sorunu olduğunu göstermektedir.

Kademeli agrega yaklaşımının bir başka boyutu da kubbenin iç yüzeyindeki kaset (coffering) sistemidir. Beş eşmerkezli halka üzerinde toplam 140 kaseti barındıran bu düzen, hem estetik bir görünüm sağlamakta hem de kubbenin ağırlığını azaltarak yapısal yükü daha verimli dağıtmaktadır. Malzeme yoğunluğundaki kademelendirme ile geometrik ağırlık azaltma stratejisinin bir arada kullanılması, Roma mühendisliğinin nokta atışı bir malzeme-geometri optimizasyonu örneğidir [9].

7. ROMA BETONUNU BUGÜN NEDEN DOĞRUDAN KULLANAMIYORUZ?

Yukarıda özetlenen bulgular heyecan verici olmakla birlikte, Roma betonunun günümüz yapı stoğuna doğrudan aktarılabilir bir alternatif olduğu sonucuna varmak yanıltıcı olur.

Roma betonunun basınç dayanımı genellikle 10-20 MPa mertebesinde. Bu değer, TS EN 206 kapsamındaki günümüz hazır beton dayanım sınıflarının alt sınırının dahi gerisindedir [10]. Ayrıca Roma betonu tamamen donatısız kullanılmıştır. Eğilme ve çekme yükü taşıyan ince kesitli modern yapı elemanlarına (döşeme, kiriş) doğrudan uygulanabilir değildir. Malzeme kaynağı da bölgeye özgüdür. Örneğin, Pozzuoli volkanik külünün kimyasal bileşimi kendine özgüdür ve her coğrafyada aynı puzolanik reaktiviteyi göstermesi beklenemez.

Üretim hızı da göz ardı edilemeyecek bir kısıttır. Roma betonu, düşük su içerikli, elle sıkıştırılan bir harç olarak uygulanıyordu. Bu, büyük yapılarda yıllar süren bir inşaat takvimi anlamına gelmekteydi. Günümüz inşaat sektörünün pompalanabilir, hızlı priz alan, günlük üretim hedefleriyle çalışan hazır beton modeliyle bu üretim biçimi doğrudan bağdaşmamaktadır.

X YAYGIN ALGI

Roma betonu tarifi uygulanırsa modern beton üretiminin karbon ayak izi büyük ölçüde azaltılabilir.

✓ BİLİMSEL BULGU

2025 yılında iScience dergisinde yayımlanan yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) çalışmasına göre, Roma reçetelerinin günümüz teknolojiyle uygulanması, sera gazı emisyonlarında beklenildiği ölçüde bir azalma sağlamamaktadır. Asıl kazanım, hava kirlenici emisyonlarında (NO_x, SO_x) görülen %11-98 aralığındaki azalmadır [11].

Aynı çalışma, servis ömrü faktörünü hesaba kattığında farklı bir tablo ortaya koymaktadır. Kümülatif emisyon açısından modern betonla eşdeğer bir performans elde edebilmek için Roma tipi bir betonun, bina yapılarında en az %41, yol gibi kısa ömürlü yapılarda ise en az %29 daha uzun servis ömrüne sahip olması gerekmektedir [11]. Başka bir deyişle, dayanıklılık tek başına değil, servis ömrü hesabıyla birlikte değerlendirildiğinde sürdürülebilirlik açısından anlam kazanmaktadır. Bu yaklaşım, TS EN 206'nın dürabilite bazlı tasarım felsefesiyle de örtüşmektedir.

8. MODERN KENDİ KENDİNİ ONARAN BETON TEKNOLOJİLERİ

Roma betonunun kireç kümesi mekanizmasından ilham alan modern araştırma alanı, aslında kendi başına birkaç farklı teknolojik yaklaşımı kapsamaktadır. Bakteri bazlı sistemlerde, beton karışımına

eklenen ve mikrokapsüller içinde korunan Bacillus türü bakteri sporları, çatlaktan su sızdığına aktive olmakta ve metabolik faaliyetleri sonucunda kalsiyum karbonat üreterek çatlağı doldurmaktadır. Bu yaklaşımı ilk deneysel olarak ortaya koyan Delft Teknik Üniversitesi'nden Jonkers ve ekibi, laboratuvar ölçeğinde 0,5 mm'ye kadar olan çatlakların başarıyla kapatıldığını raporlamıştır [12].

Mikrokapsül bazlı sistemlerde ise, sıvı hâlde onarım ajanı (örneğin sodyum silikat veya poliüretan öncülleri) içeren kırılğan kapsüller beton matrisine dağıtılmakta; çatlak kapsülleri kırıldığında ajan dışarı akarak reaksiyona girmekte ve çatlağı doldurmaktadır. Van Tittelboom ve ekibinin Gent Üniversitesi'nde yürüttüğü çalışmalar, tübüler kapsüllerin çimento esaslı malzemelerde onarım verimliliğini deneysel olarak göstermiştir [13]. Roma betonundan ilham alan üçüncü yaklaşım ise, reaktif kireç veya kalsiyum bazlı katkı maddelerinin doğrudan karışıma eklenmesidir [7]. Bu yöntem, ek bir kapsülleme veya biyolojik bileşen gerektirmediği için üretim açısından daha basittir, ancak reaktivitenin zaman içinde tükenmemesi için optimum doz ve dağılımın belirlenmesi hâlâ araştırma konusudur.

9. SEKTÖRE DERSLER: DÜŞÜK KARBON VE DAYANIKLILIK TASARIMINDA ANTİK İLHAM

Roma betonu araştırmalarının sektöre aktarılacak dersleri, doğrudan reçete taklidinden çok, tasarım felsefesi düzeyindedir.

Kendi kendini onarma potansiyeli açısından, klinker ikame oranı yüksek modern çimentolarda (uçucu kül, yüksek fırın cürufu, kalsine kil) kalan serbest kireç ve puzolanik reaktivitenin, kontrollü biçimde optimize edilmesi, mikro çatlak toleransını artırabilecek bir araştırma alanıdır. Deniz yapısı betonlarında ise, doğal puzolanların (özellikle yerel volkanik kül kaynaklarının) uzun vadeli reaktivitesi, yalnızca erken yaş dayanımı değil, on yıllar sonrasındaki mineral gelişimi açısından da değerlendirilmelidir. Kademeli agrega/yoğunluk tasarımı ise, özellikle hafif beton ve fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme uygulamalarında, yapı elemanı boyunca değişen yük dağılımına duyarlı bir malzeme optimizasyonu yaklaşımı olarak güncelliğini korumaktadır.

Servis ömrü odaklı düşünme kültürü belki de en az somut, ama en değerli derstir. Romalı mühendisler, bir yapı malzemesini yalnızca ilk uygulanabilirliği veya kısa vadeli dayanımıyla değil, yüzyıllar sonraki davranışıyla tasarlamışlardır. TS EN 206'nın dürabilite sınıfları (XC, XD, XS, XF, XA) ve tasarım servis ömrü kavramı, aslında aynı felsefenin modern, standartlaştırılmış bir versiyonudur [10]. Roma betonu, bu yaklaşımın işe yaradığına dair en uzun soluklu "saha verisini" sunmaktadır.

10. SONUÇ VE GENEL DEĞERLENDİRME

Roma betonu, iki bin yıllık bir mühendislik mirası olarak, modern beton teknolojisine romantik bir nostalji değil, somut bir araştırma gündemi sunmaktadır. Sıcak karıştırma ile oluşan kireç kümelerinin kendi kendini onarma kapasitesi, deniz suyunda büyüyen Al-tobermorit kristallerinin kazandırdığı mekanik bütünlük ve Pantheon'un kademeli agrega tasarımı, hepsi hakemli literatürle doğrulanmış, somut mühendislik stratejileridir.

Bununla birlikte, bu bulguları değerlendirirken hayatta kalma yanlılığını göz ardı etmemek ve Roma betonunun donatısız, düşük dayanımlı, bölgesel malzemeye bağımlı doğasını modern yapı gereksinimleriyle karıştırmamak gerekir. Sektörümüz açısından asıl değerli olan, antik dönemin uzun vadeli düşünme kültürünü – yani bir yapı malzemesini yalnızca ilk 28 günlük dayanımıyla değil, yüzyıllar sonraki davranışıyla da tasarlama yaklaşımını – güncel dürabilite ve düşük karbon gündemimize taşımaktır.

KAYNAKLAR

1. Vitruvius, M.P. De Architectura, Kitap II (MÖ y. 30). Çeviri: Morgan, M.H. (1914). Vitruvius: The Ten Books on Architecture. Harvard University Press, Cambridge, MA.
2. Neville, A.M. (2011). Properties of Concrete, 5th Edition. Pearson Education Limited, Harlow.
3. Mehta, P.K. & Monteiro, P.J.M. (2014). Concrete: Microstructure, Properties, and Materials, 4th Edition. McGraw-Hill Education, New York.
4. Plinius (Yaşlı Plinius). Naturalis Historia, Kitap XXXVI (MS 79).
5. Jackson, M.D., Mulcahy, S.R., Chen, H., Li, Y., Li, Q., Cappelletti, P. & Wenk, H.-R. (2017). Phillipsite and Al-tobermorite mineral cements produced through low-temperature water-rock reactions in Roman marine concrete. *American Mineralogist*, 102(7), 1435-1450.
6. Jackson, M.D., Moon, J., Gotti, E., Taylor, R., Chae, S.R., Kunz, M., Emwas, A.-H., Meral, C., Guttman, P., Levitz, P., Wenk, H.-R. & Monteiro, P.J.M. (2013). Material and Elastic Properties of Al-Tobermorite in Ancient Roman Seawater Concrete. *Journal of the American Ceramic Society*, 96(8), 2598-2606.
7. Seymour, L.M., Maragh, J., Sabatini, P., Di Tommaso, M., Weaver, J.C. & Masic, A. (2023). Hot Mixing: Mechanistic Insights into the Durability of Ancient Roman Concrete. *Science Advances*, 9(1), eadd1602.
8. Masi, F., Stefanou, I. & Vannucci, P. (2018). On the origin of the cracks in the dome of the Pantheon in Rome. *Engineering Failure Analysis*, 92, 587-596.
9. Lancaster, L.C. (2005). Concrete Vaulted Construction in Imperial Rome: Innovations in Context. Cambridge University Press, Cambridge.
10. TS EN 206+A2:2021: Beton – Özellik, Performans, Üretim ve Uygunluk. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
11. Martinez, D.M., Miller, S.A. & Monteiro, P.J.M. (2025). How sustainable was ancient Roman concrete? *iScience*, 28(8), 113052.
12. Jonkers, H.M., Thijssen, A., Muyzer, G., Copuroglu, O. & Schlangen, E. (2010). Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. *Ecological Engineering*, 36(2), 230-235.
13. Van Tittelboom, K., De Belie, N., Van Loo, D. & Jacobs, P. (2011). Self-healing efficiency of cementitious materials containing tubular capsules filled with healing agent. *Cement and Concrete Composites*, 33(4), 497-505.



www.thbb.org

www.thbbakademi.org

