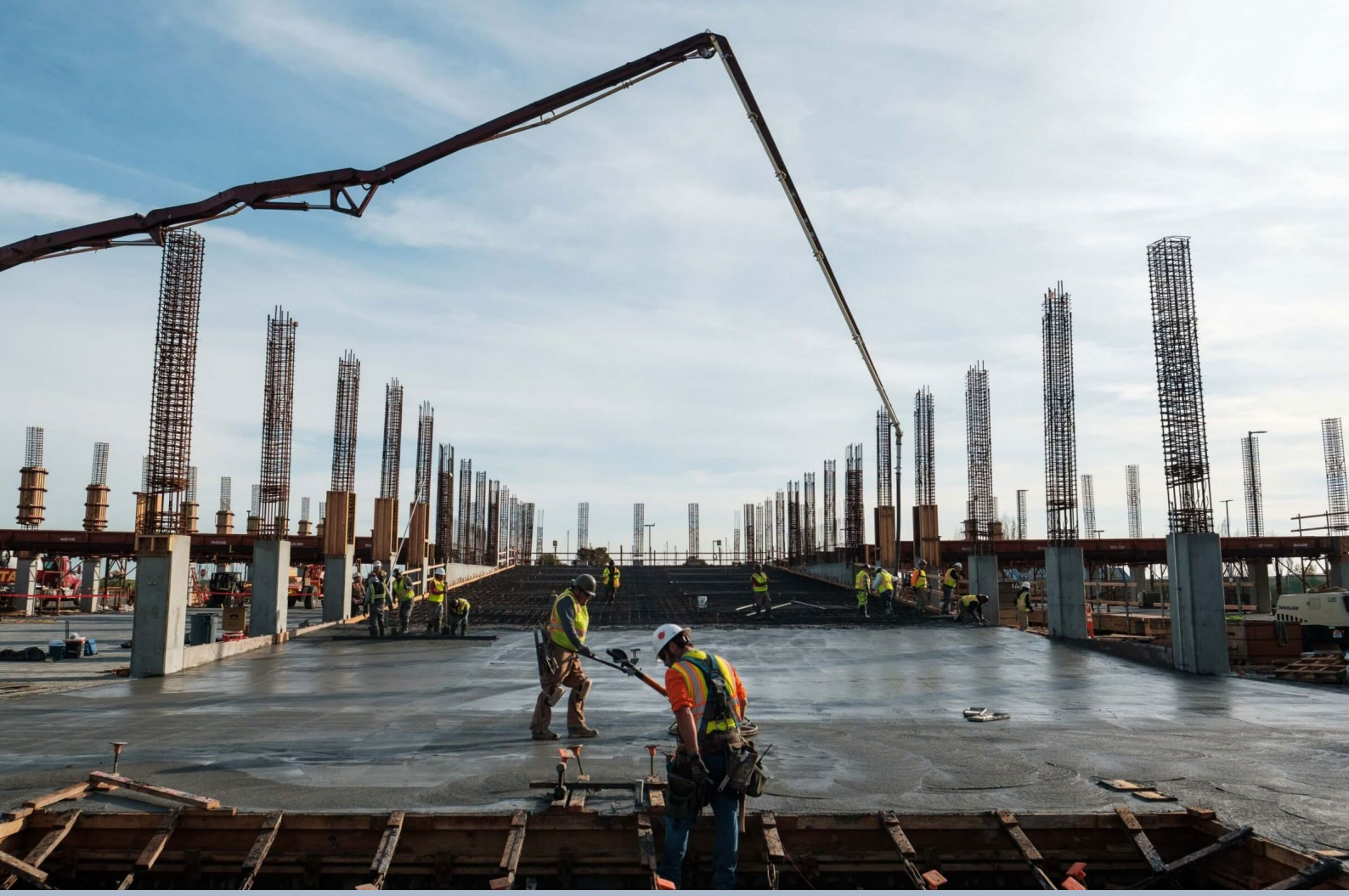


THBB AKADEMİ

TEKNİK BÜLTEN

15

ÖZEL KONU

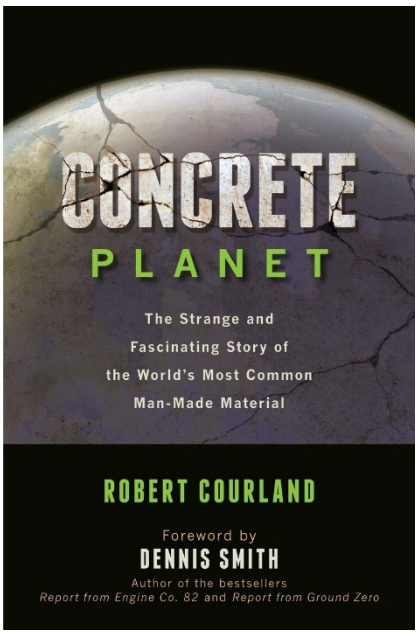
BETONARME: BİR ASRI AŞAN BİRLİKTELİK

TÜRKİYE HAZIR BETON BİRLİĞİ YAYINIDIR.
Mayıs, 2024

BETONARME: BİR ASRI AŞAN BİRLİKTELİK

"İnsanoğlu birdenbire yeryüzünden silinirse varlığımızın son yüzyılının izleri, yüz milyon yıl sonra; gezegenin her yerinde bulunan, parçalanmış ve yeniden kristalleşmiş betondan ve oksidasyon ile kırmızımsı kahverengi bir renk ile kaplanan çelik donatılardan oluşan eşsiz bir pas renkli tortu tabakası şeklinde açıkça görülecektir."

Robert Courland



Robert Courland, "Concrete Planet – The Strange and Fascinating Story of the World's Most Common Man-Made Material" isimli kitabında insanlığın izlerini gösterecek jeolojik tabakayı böyle tanımlıyor [1].

19. yüzyılın ortalarından bu yana üretilen toplam beton kütlesi, çok yakın bir zamanda, bir trilyon metrik tonu veya 10^{15} kg'ı geçmek üzeredir. Bunun yaklaşık dörtte biri çelik donatılarla güçlendirilmiş betondan, yani betonarmeden oluşmaktadır [2]. Bu devasa miktar, birkaç yıl içinde dünyanın kara kütlesinin toplam yüzeyini (~150 × 10^6 km^2) birkaç milimetre kalınlığında bir katmanla kaplamak için yeterli olacaktır.

Betonarmenin yani beton ile çelik donatının birlikte kullanımının ana nedeni betonun *"Aşil topuğu"* olarak da nitelendirilebilecek olan zayıf çekme dayanımıdır. Beton, yapısındaki yoğun tanecikli ağ

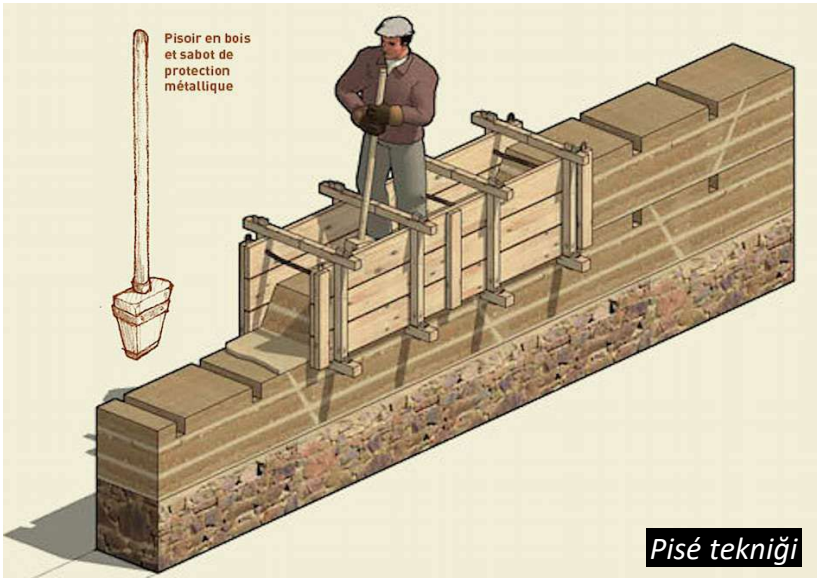
sayesinde çok büyük basınç kuvvetlerine dayanır ancak yine de gözenekli, gevrek ve sayısız boşluk ve ara yüzeyle donatılmış olduğundan dolayı çekme dayanımı performansı oldukça zayıftır. Beton, maksimum deformasyona ulaştığında göçer. Benzer şekilde ham (pişmemiş) toprak aynı zayıflıkla karşı karşıyadır. Betonun bu göreceli zayıf davranışı yine de betonun kullanılmasını engellememiştir.

Dünya kültür mirası listesi; güneşte kurutulmuş kil tuğlalar veya sıkıştırılmış toprakla inşa edilmiş zamana meydan okuyan binlerce yapı içermektedir [3]. Romalılar, puzolanik çimentoyla yapılmış güçlendirilmemiş yani yalın beton kullanarak, dünyanın en zarif kubbelerinden biri olan ve iki bin yıldan fazla bir süre geçse de mükemmel bir şekilde ayakta duran Pantheon'un kubbesini inşa etmiştir.

Sıkıştırılmış toprak (rammed earth) ile yapılmış tarihi yapılar

Pantheon Tapınağı

19. yüzyılın başlarında, 1818 yılında Louis Vicat'ın "Recherches expérimentales sur les chaux de Construction, les bétons et les mortiers ordinaires" adlı eserinin yayımlanmasından kısa bir süre sonra, François-Martin Lebrun geleneksel *"pisé"* tekniğini (hareket eden duvar kalıpları arasında toprak katmanlarını sıkıştırmak) herhangi bir donatı içermeyen agrega, su ve Portland çimentosu karışımı kullanarak uyguladı [4]. 1870'lerin ortalarında, bir başka Fransız girişimci ve sanayici François Coignet, bir patent başvurusunda bulunduğu ve Lebrun'un yöntemi ile aynı olan sıkıştırılmış beton uygulaması üzerine bir inceleme yayınladı [5]. Coignet'in uygulamaları genellikle çok dayanıklı değildi ancak aralarında 1874'te Brooklyn'de inşa edilen ABD'nin ilk beton kullanılarak yapılan kemer köprüsü olan Cleft Ridge Köprüsü'nün de yer aldığı birçok dikkate değer başarılı uygulaması da olmuştur [4]. Coignet, cüruflu çimentoyu ilk kullanan kişi olarak da öne çıkar.



Pisé tekniği

Cleft Ridge Köprüsü

Betonun çekme dayanımına karşı zayıflığının üstesinden gelmek için demir veya çelik donatı kullanma fikri, neredeyse çimento endüstrisinin yükselişiyle ve yalın (donatısız) betonun kullanımına paralel olarak ortaya çıktı. Çimento hamurunun (matris) veya harçların donatı ile güçlendirilmesinin gerçek keşfinin Fransa'nın güneyinde yerleşik bir çiftçi olan Joseph Louis Lambot tarafından yapıldığı bilinmektedir [4,6,7]. 1845 yılında Lambot kendi özel kullanımı için toplam kalınlığı 3-4 cm olan birkaç kat harçla kaplanmış demir tel örgü (hasır) kullanarak kasalar yapıyordu. 1848'de aynı tekniği kullanarak bir kayık yaptı. 1855'te "ahşap yerine demir ve çimento kombinasyonu" için bir patent

başvurusu yaptı. Lambot, aynı yöntemle ikinci bir kayık yaptı ve Paris'teki Universal Fuarı'nda bu icadını gösterdi ancak beklenen başarıyı elde edemedi [8,9].

Lambot tarafından tasarlanan kayık

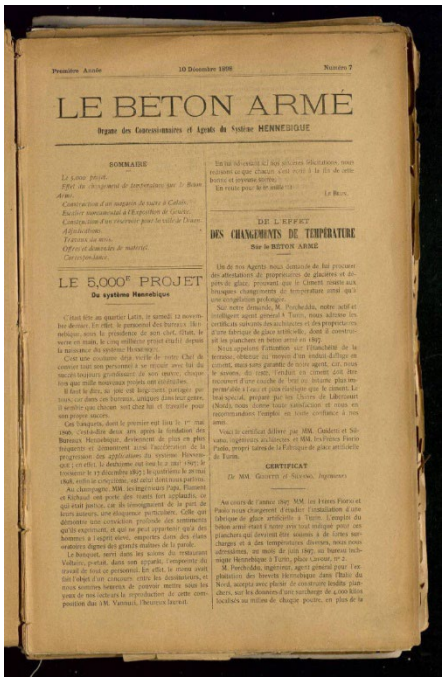
Premier feuillet.
REPUBLIQUE FRANÇAISE.
Liberté, Égalité, Fraternité.
PREFECTURE DE POLICE.
1re DIVISION. — 2e BUREAU. — 2e SECTION.
Jardinier Fleuriste
No 1739
Paris, ce 10 Juin 1851
Le Sr Monier
Joseph
natif d
Quentier
département
Gard
âgé de 28 ans, taille 1 mètre 70 cent.;
cheveux et sourcils chat ; front bombé ;
yeux chat ; nez fort ; bouche moyen ;
menton rond, visage ovale ; teint ordre ;
Signes particuliers
déclarant demeurer à Paris
rue Vaugirard No 3

Başka bir mucit olan Joseph Monier, betonarme alanında daha fazla tanınmaktadır. Monier, çevre düzenleme konusunda tutkulu ve mütevazı bir bahçıvan olarak çalışma hayatına başladı. Ahşap sandıklar ve rezervuarlar oldukça hızlı bir şekilde bozuluyordu ve demir o gün için oldukça pahalıydı. Bir de demirin paslanma sorunu vardı. Bu nedenle, temel olarak Lambot ile aynı mantıkta tel kafes ile güçlendirilmiş çimentolu karışım kullanarak çiçek saksıları, sandıklar, borular ve su depoları üretmek için denemeler yapmıştır. Bu konuda ilk patenti 1867 yılında almıştır. Daha büyük su depoları, merdivenler, çitler, kirişler, zeminler, kanalizasyon boruları ve hatta "hijyenik ve ekonomik, portatif evler" için 1861'den 1891'e kadar çok daha fazla sayıda (on sekiz adet) patent almıştır [8]. 1877 ve 1878 yıllarında su kemerleri, kirişler, yaya köprüleri ve demiryolu traversleri için aldığı patentlerde Monier, "onlara vermek istediğim güce göre, herhangi bir boyut ve kalınlıkta yuvarlak veya kare demir çubuklardan oluşan bir çerçeve" tanımını yapıyordu [8]. Bu tanım, modern donatıya, ilk demir tel örgülerden (kafes) çok daha yakın bir tanımdır. Bununla birlikte, Monier önemli bir başarıya ulaşsa da muhtemelen donatı ile güçlendirme mekanizmasını tam olarak kavrayamamıştır. Örneğin, kiriş veya döşemelerdeki donatı çubuklarının çekme gerilmesi altındaki alt bölgelerde olması gerektiğini anlamamıştır [4].

19. yüzyılın son yirmi yılı ve 20. yüzyılın ilk yıllarında Avrupa ve Amerika Birleşik Devletleri'nde betonarmenin icadının sadece bir kişiye yüklenemeyeceğini gösteren çok sayıda gelişme ve patent bulunmaktaydı [4,6,7,10]. Almanya ve Avusturya'da Conrad Freytag, Rudolph Schuster ve Gustav- Adolf Wayss; Monier'in güçlendirilmiş kirişinin patent haklarını satın aldı. Bu gelişme çok sayıda yan kuruluşu olan ve çok başarılı bir şirket olan Wayss & Freytag'in 1885 yılında kurulmasına yol açtı. Wayss, "MonierBau"yu popülerleştirmek ve geliştirmek için "Das System Monier" üzerine bir kitap yazdı [11].

Binaları güçlendirmek için metal donatıları kullanma fikri aslında tamamen yeni değildi. Gotik ve klasik mimaride taş duvarların yerinden oynamasını önlemek için demir bağ çubukları zaten kullanılıyordu. Ancak, harcı veya betonu metalle güçlendirmek biraz farklı bir mantığa uymaktadır. Betonarmenin özü, "yük taşıyan parçaları yüke dayanan parçalara bağlamaktır" [7]. Farklı elemanlarda (kirişler, döşemeler, kolonlar) nispeten küçük çaplı inşaat demirleri ile bunun nasıl başarılacağını keşfetmek birkaç on yıl aldı. İngiltere'de, William Boutland Wilkinson, 1854 yılında "yangına dayanıklı konutların, depoların ve diğer binaların yapımındaki iyileştirmeler" için bir patent aldı [10]. Gerilme altındaki bölgelere demir donatı veya diğer metal parçaların konulması gerektiğini vurguladı ve bir kulübe inşa ederek bu teknolojiyi gösterdi. Ancak, tıpkı Lambot'unki gibi onun patenti de pek dikkat çekmedi. Yaklaşık yirmi yıl sonra, Amerika Birleşik Devletleri'nde bir makine mühendisi olan William E. Ward, betondan donatıya düzgün yük aktarımını sağlamak için beton ve donatı arasındaki aderansın önemini fark ederek bir adım daha ileri gitti. Kompozit kiriş, ağır yük altındayken çekme kuvvetinin nötr eksen altındaki yüke direnmesi için donatıların kirişin alt kısmına yerleştirilmesi gerektiğini gösteren deneyler yaptı [12]. Ward, demir çubuklarla güçlendirilmiş Portland çimentosu betonu kullanarak oluşturduğu I ve T profil kirişlerle şimdi "Ward'ın kalesi" olarak bilinen büyük bir ev inşa etti [10]. Aynı sıralarda bir başka Amerikalı Thaddeus Hyatt, demir ve betonun ısıl genleşme katsayısının çok yakın olduğunu gösterip betonarme kirişlerin yangın durumunda çökmeyeceğini kanıtlayarak önemli bir katkı sağladı [13]. Fransa'da, alaylı bir inşaatçı olan François Hennebique, bir yıl sonra demir donatıları birbirine bağlayan askılardan oluşan "Hennebique Sistemi" olarak bilinen sistem için 1892 yılında bir patent başvurusunda bulundu. Hennebique, hırslı bir iş adamıydı ve şirketi dikkat çekici bir şekilde hızlıca büyüdü. Yirmi yıldan daha kısa bir sürede, 12'si ABD'de olmak üzere dünya çapında 63 ofis ile küresel bir boyuta ulaştı. Hatta tamamen kendi inşaat sistemine ayrılmış aylık bir teknik dergi olan Le Béton Armé'yi çıkardı [8].

Ward Kalesi



Premiere Année — 10 Décembre 1898 — Numéro 7

LE BÉTON ARMÉ

Organe des Concessionnaires et Agents du Système HENNEBIQUE

SOMMAIRE

LE 5,000E PROJET

Du système Hennebique

DE L'EFFET DES CHANGEMENTS DE TEMPÉRATURE

Sur le BÉTON ARMÉ

CERTIFICAT

İlk gerçek betonarme inşaat mühendisliği işi 1892'de Hennebique'nin şirketi tarafından İsviçre'de inşa edilen köprü olmasına rağmen, o ilk günlerin en ikonik eseri muhtemelen ilk betonarme yüksek bina olan 64 metre yüksekliğindeki Ingalls Binası'dır [10,14]. Cincinnati'de 1904 yılında tamamlanan Ingalls Binası, bir başka alaylı inşaatçının ve muhtemelen bu alandaki üst düzey yenilikçilerin sonuncusu olan Ernest L. Ransome'ın lisansını almış olan Ferro-Beton İnşaat Şirketi tarafından inşa edilmiştir. Ransome, San Francisco'da yaşayan bir İngiliz göçmendi. Diğer birçok buluşun yanı sıra, erken yaştaki rötre (büzülme) çatlaklarını önlemek için beton plakalara genleşme derzlerinin dahil edilmesine dair patent almıştır. Her şeyden önce, modern "inşaat demirinin" mucidi olarak kabul edilebilir [10]. 5 cm kalınlığında kare çubuklarla deneyler yaparak, bunları bükerek yalnızca betonu daha iyi kavramakla kalmayıp aynı zamanda daha yüksek bir çekme dayanımı elde edebileceğini keşfetmiştir. 1884 yılında "soğuk bükümlü" çubukları kullanan bir inşaat sistemi üzerine patent almıştır.

Ingalls Binası

20. yüzyılın ilk çeyreği betonarme kullanımının yaygınlaşmasına tanık oldu. İsviçre'de Robert Maillart, Almanya ve Polonya'da Max Berg, İtalya'da Pier Luigi Nervi ve Fransa'da Eugène Freyssinet gibi mühendisler, sınırlı hesaplama yardımı ve çoğu zaman çok fazla sezgiyle cesur yapılar inşa etmeyi başardılar [4,7,6,10,15]. Freyssinet, tekniği büyük bir başarı ile kullanmasına rağmen; aynı şekilde gerilmeye tepki veren çelik ve beton gibi mekanik olarak farklı malzemeler arasındaki bu uyumun bir şekilde doğaya aykırı olduğunu düşünüyordu [16]. Freyssinet, 1899'da Paris'teki Ecole Polytechnique'den ve hemen ardından Ecole Nationale des Ponts et Chaussées'den mezun oldu. Betonarme gibi çekme yüklerinin çelik donatı tarafından taşındığı bir sistemde donatının çok daha büyük elastisite modülü nedeniyle betonun kaçınılmaz olarak çatlayacağını fark etti. Devrimsel fikri, tüm gerilmelerin (basınç, çekme, kesme) beton tarafından çatlama olmadan tek başına

Eugène Freyssinet

gerçekleştirilebileceği bir sistem tasarlamaktı [16]. Uzun yıllar süren deneylerden sonra, 1928'de çelik tendonlar sayesinde herhangi bir çekme kuvvetinden önce betona yüksek miktarda kalıcı bir basınç yükü uygulanan öngerme ilkesinin patentini aldı [17]. Yüksek mukavemetli (basınçta) beton ve çok yüksek elastik limitli (çekmede) çelik tendonlarla birlikte kullanıldığında öngerme teknolojisi dikkate değer narinlikteki yapıların inşasını mümkün kılmıştır. Freyssinet, başka birçok keşif de yapmıştır [16]. Örneğin, yük altında betonun geri dönüşü olmayan deformasyonu kavramını yani sünmenin keşfini ona borçluyuz. Ayrıca titreşim (vibrasyon) ve kürlemenin tanıtılmasında da öncüydü.

İnşaat demiri ile güçlendirme ve öngerme teknolojisi, yapısal elemanların performansını iyileştirir ancak çimentolu matrise bir etkisi yoktur. Matrisin kendisi hala gevrektir ve darbe direnci zayıftır. Liflerin kullanılması hem çekme dayanımını (orta derecede) hem de kırılma enerjisini (çok önemli ölçüde) iyileştirmenin basit bir yoludur. Lifler, ilerleyen çatlakları köprüleyerek matrisin kırılma gerilmesini artırır. Çok eskiden beri toprak kullanılarak yapılan yapılarda doğal liflerle (saman, sisal, jüt gibi) kerpiç tuğlalar güçlendiriliyordu. 1874'te Kaliforniyalı A. Bernard, çelik tellerin eklenmesiyle betonu güçlendirme fikrinin patentini aldı. Betonda, asbest liflerinin kullanımına ilişkin ilk patent 1902'de alınmıştır. Modern anlamda çelik lifler ve cam lifler (asbestin zararlı olduğunun öğrenilmesi ve alkaliye dayanıklı cam liflerinin geliştirilmesiyle) 1960'lardan sonra kullanılmaya başlamıştır. Hemen ardından da polimer lifler kullanılmaya başlamıştır.

Polimer veya çelik liflerle homojen şekilde takviye edilmiş, iyi gradasyona sahip ve yoğun bir matrise sahip beton; onu neredeyse çelik malzemesine yaklaştıran dayanım, tokluk ve süneklik özelliklerini sahip olmaktadır [18,19]. Bu malzemelerdeki (fiber takviyeli ultra yüksek performanslı beton veya UHPC) basınç ve çekme dayanımlarının geliştirilmesi, artık pasif takviye (donatılar) olmadan oldukça ince köprüler veya ince kabukların inşa edilebilmesini sağlayacak şekildedir.

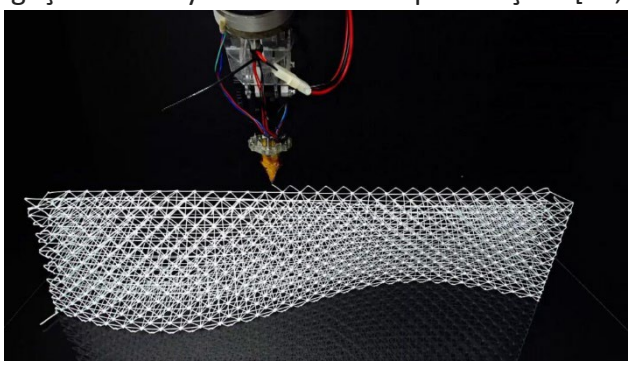
Kanada'daki Shawnessy Hafif Raylı Tren İstasyonunda 2 cm'lik UHPC kabuklar kullanılmıştır.

Joseph Lambot'un "ferro-çimento" teknesini yapmak için kullandığı veya Joseph Monier'in saksıları, boruları ve rezervuarları yapmak için kullandığı ince demir tel örgü sadece üzerine preslenen ince harç katmanlarına eğilme dayanımı kazandırmak için tasarlanmamıştı. Ayrıca, nesnelere çağdaş

mimaride çekici olan şekil ve form da veriyordu. 1943 yılında Pier Luigi Nervi tarafından yeniden keşfedilen ve tanımlanan "ferro-çimento" biraz farklı bir biçimde gelişti. Donatı ve matris arasındaki temas alanını (ara yüzey) artırmak ve daha homojen bir mekanik davranış elde etmek için Nervi, daha büyük çaplı çubuklara sabitlenmiş çoklu çelik örgülerden oluşan bir sistem tasarladı [20]. Harcın yığılmış örgü kalıpların içine dökülmesi ile döküm kalıplarının kullanılması işe yaramaz hale geldi. Bu teknik, ince beton kabuklarla serbest karmaşık şekiller tasarlamasına ve birkaç motorlu tekne ve bir depo inşa etmesine izin verdi [20].

Pier Luigi Nervi tarafından 1915 yılında İtalya'da yapılmış uçak hangarı

2013 yılında Norman Hack ve Willi Lauer, polimer ekstrüder ile donatılmış bir endüstriyel robot kullanarak serbest örgü kalıpların otomatik inşasının fizibilitesini gösterdi [21]. Kısa bir süre sonra, çelik örgüler için otomatik bir robotik tel bükme ve kaynak aleti geliştirildi ve bu sayede gerçek güçlendirme yeteneklerinin kapısını açıldı [22,23]. Örgü kalıbının imalatı bu teknolojideki tek zor adım değildir. Topolojik olarak farklılaştırılmış örgü morfolojilerinin tasarımı için hesaplama araçlarının geliştirilmesi, fabrikasyonun kendisi kadar önemlidir. Kimyasal ve reolojik açıdan, örgü açıklığı ile beton formülasyonu ve reolojisi (parçacık boyutu dağılımı, viskozite, akma gerilimi, tiksotropi, yüzey gerilimi vb.) arasındaki ilişki, uygun bir beton doldurma stratejisi için kritik öneme sahiptir [22,23].



2007 yılında Montreal'de Uluslararası Çimento Kimyası Kongresinin bildiri kitabında, J. Francis Young şu sonuca varmıştır: "Yaklaşımımız muhtemelen optimal olmasa da 50 yıllık veya 100 yıllık hizmet ömrü için yapılar tasarlamak zaten gerçekte yapabildiğimiz bir durumdur." [24]. Young'ın kafasında 100 yıllık hizmet ömrü tasarımının iyi bir sonuç olduğu ancak bunun tüm sorunları çözmediği anlaşılmaktadır. Gerçi oturduğumuz evler ve çalıştığımız ofisler asgari 50 yıllık servis ömrüne göre tasarlanmaktadır.

Gerçekten de altyapımızı yenilemek için her yüzyılda trilyonlarca dolar harcamaya hazır mıyız? Açıkçası, bu sorunun cevabı, hayır. Bunu göze alamayız. 50 hatta 100 yıllık hizmet ömrünü kabul etmek, tek kullanımlık bir üstyapı ve altyapı dünyası inşa etmeye benzer. Öte yandan tüm yapılarımızı Romalıların yaptığı gibi bin veya iki bin yıl veya daha uzun ömürlü inşa etmek de teknolojinin eskimesi ve ihtiyaçların değişmesi nedeniyle bir anlam ifade etmiyor. Örneğin, geleceğin yolları muhtemelen bugün kullandığımız araçlar için uygun olmayacak. Büyük olasılıkla, araçlarla etkileşime girmelerine ve iklim koşullarına uyum sağlamalarına izin veren aktif işlevler içereceklerdir. Bugünün yollarını sonsuza kadar tutmaya çalışmak yanlış bir seçim olabilir. Aksine, birkaç yüzyıl ömrü olan bir ofis veya ticari bina tasarlamak çok daha mantıklı olacaktır.

Betonarme yapıların dayanıklılığı ve hizmet ömrü sorusu da gündeme gelmelidir, çünkü çelik donatının korozyonu betonarme yapılardaki hasarın ana nedenidir. Çelik donatı, normalde Portland çimentosu veya alkali ile aktifleştirilmiş bağlayıcılarla yapılan yüksek alkali içeren ortamda ince bir demir oksit tabakası ile korunur [25,26]. Ancak, iki süreç bu "pasif" katmanın dengesini bozabilir. Biri atmosferik CO_2 kaynaklı karbonatlaşmadır. Diğeri ise klorür iyonlarının ortama penetrasyonudur. Bu nedenle, yapıda çatlakların olmaması ve sistemin difüzyon katsayısının çok düşük olması dayanıklılığın anahtarıdır. Niceliksel olarak, mikro çatlakların yokluğunda, CO_2 veya Cl^- penetrasyon derinliğinin 100 yıllık servis ömrü boyunca 1 cm'den daha küçük olması için difüzyon katsayısının (D) $10^{-17} m^2/s$ mertebesinde olması gerekir [27,28]. Güçlendirilmiş bir yapıdaki korozyonun başlangıcının güvenilir tahmini, yarı sonsuz bir ortamda tek boyutlu bir difüzyon modeli kullanılarak ortalama yer değiştirmenin hesaplanmasından kesinlikle daha karmaşıktır. $10^{-17} m^2/s$ kadar düşük değerlere çok kompakt UHPC tipi matrislerle ulaşılabilir [29], ancak bu tip betonun kullanımı her koşulda uygun değildir. Öte yandan korozyon; çelikten paslanmaz çeliğe geçiş, korozyon önleyicilerin kullanımı, polimer kaplı inşaat demiri ve tendonların kullanımı veya katodik koruma ile aktif kontrol gibi çeşitli yollarla yavaşlatılabilir veya durdurulabilir [25,26,30].

Kaynaklar

1. R. Courland, Concrete Planet: The Strange and Fascinating Story of the World's Most Common Man-Made Material, Prometheus Books, Amherst, N.Y, 2011.
2. K.L. Scrivener, V.M. John, E.M. Gartner, Eco-Efficient Cements: Potential, Economically Viable Solutions for a Low-CO2, Cement-Based Materials Industry, United Nations Environment Program, 2016 (available on), www.unep.org.
3. H. Van Damme, H. Houben, Earth concrete: stablization revisited, Cem. Concr. Res. (2018), http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.035.
4. Peter Collins, Concrete. The Vision of a New Architecture, 2nd ed., McGill-Queen's University Press, Montreal & Kingston, 2004.
5. F. Coignet, Des bétons agglomérés appliqués à l'art de construire, Librairie scientifique, industrielle et agricole E. Lacroix, (1861) (378p).
6. C. Simonnet, Le Béton, Histoire d'un Matériau, Editions Parenthèses, Marseille, (2005).
7. J. Gubler, Histoire du béton: naissance et développement, de 1818 à nos Jours, CIMbéton, Paris, downloadable on www.infociments.fr/telecharger/CT-B90A.pdf.
8. J.-L. Bosc, J.-M. Chauveau, J. Clément, J. Degenne, B. Marrey, M. Paulin, Joseph Monier et la naissance du ciment armé, Editions du Linteau, Paris, (2001).
9. P. Dorveaux, Lambot-Miraval, Monier, et le ciment armé, La Maison Rustique, Paris, extr. From La Revue Agricole, issue 17 and 18, may 1919.
10. R. Courland, Concrete Planet: The Strange and Fascinating Story of the World's Most Common Man-Made Material, Prometheus Books, Amherst, N.Y, 2011.

11. G.A. Wayss, Das system monier, in: G.A. Wayss (Ed.), In Seiner Anwendung auf das Gesamte Bauwesen, Seydel & Cie, Berlin, 1887.
12. W.E. Ward, Beton in combination with iron as a building material, Trans. Am. Soc. Mech. Eng. 4 (1883) 388–404.
13. T. Hyatt, An Account of some Experiments With Portland-Cement-Concrete Combined with Iron, as a Building Material, With Reference to Economy of Metal in Construction, and for Security Against Fire in the Making of Roofs, Floors and Walking Surfaces, Chickwick Press, London, 1877.
14. C.W. Condit, The first reinforced concrete system: the Ingalls building in Cincinnati and its place in structural history, Technol. Cult. 9 (1968) 1–33.
15.M. Wells, Engineers: A History of Engineering and Structural Design, Rouledge, New York, 2010.
16. E. Freyssinet, Un amour sans limite, presentation by H. Lemoine and P. Xercavins, Notes by B. Marrey., Editions du Linteau, Paris, (1993).
17. E. Freyssinet, L'amélioration des constructions en béton armé par l'introduction de deformations élastiques systématiques, Le Génie Civil, 15 sept 1928, pp. 254–257 no. 2405.
18. M. Bohnsdalen Eide, J.-M. Hisdal, Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) – State of the Art, SINTEF Building and Infrastructure, Oslo, 2012.
19. J. Resplendino, F. Toulemonde (Eds.), Designing and Building With UHPFRC, Wiley-ISTE, 2011.
20. C. Greco, The "Ferro-Cemento" of Pier Luigi Nervi. The new material and the first experimental building, Spatial Structures: Heritage, Present and Future, SGD Editorial, Milano, 1995, pp. 309–316.
21. N. Hack, W.V. Lauer, Mesh-Mould: robotically fabricated spatial meshes as reinforced concrete formwork, Archit. Des. 84 (3) (2014) 44–53.
22. N. Hack, W.V. Lauer, F. Gramazio, M. Kohler, Mesh Mould: robotically fabricated metal mashes as concrete formwork and reinforcement, in: W. Brameshuber (Ed.), FERRO-11, Proceedings of the 11th Int. Symp. on Ferrocement and 3rd Int. Conf. on Textile Reinforced Concrete, RILEM Pub. SARL, Aachen, Germany, 2015, pp. 347–359.
23. N. Hack, T. Wangler, J. Mata-Falcon, K. Dörfler, N. Kumar, A.N. Walzer, K. Graser, L. Reiter, H. Richner, J. Buchli, W. Kaufmann, R.J. Flatt, F. Gramazio, M. Kohler, Mesh Mould: an on site, robotically fabricated, functional formwork, in: Hammer Tor Arne (Ed.), Proceedings of the Eleventh High Performance Concrete (11thHPC) and Second Concrete Innovation Conference (2nd CIC), Norwegian Concrete Association/Tecna, Tromso, Norway, 2017(paper no. 19).
24. J.F. Young, Looking ahead from the past: the heritage of cement chemistry, Cem. Concr. Res. 38 (2008) 111–114.
25. J.P. Broomfield, Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation, and Repair, 2nd ed., CRC Press, 2006.
26. L. Bertolini, B. Elsener, P. Pedeferri, R. Polder, Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair, Wiley, Weinheim (Germany), 2004.
27. S. Zofia, Z. Adam, Theoretical model and experimental tests on chloride diffusion and migration processes in concrete, Proc. Eng. 57 (2013) 1121–1130.
28. S.H. Jung, M.K. Lee, B.H. Oh, Measurement device and characteristics of diffusion coefficient of carbon dioxide in concrete, Amer. Concr. Inst. Mater. J. (2011) 589–595 (Nov-Dec 2011, Title no. 108-M62).
29. C.P. Vernet, Ultra-durable concretes: structure at the micro- and nanoscale, Mater. Res. Soc. Bull. 29 (2004) 324–327.
30. G. Gaber, Corrosion Protection of Reinforcing Steel in Concrete, Scholar's Press, 2017.

www.thbb.org

www.thbbakademi.org