

BETON TEKNOLOJİSİNDEKİ YENİ GELİŞMELER

İlker Bekir TOPÇU^{1*}, İsmail HOCAOĞLU²

¹ Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, Türkiye,
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-2075-6361>

² Afyon Kocatepe Üniversitesi, Bolvadin Meslek Yüksek Okulu, İnşaat Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye,
ORCID No : <https://orcid.org/0000-0001-9294-1120>

Anahtar Kelimeler	Öz
3D yazıcı betonlar Ultra yüksek dayanımlı betonlar Ultra hafif betonlar Eko-beton Saydam ve geçirgen betonlar	Beton teknolojisinde her geçen gün gelişen yeniliklerin uygulamaya girmekte olduğu görülmektedir. Bu makalede beton teknolojisinde son zamanlarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmış yeniliklerin bazıları anlatılmıştır. Yeniliklerin bazıları beton üretiminde kullanılan malzemelerle, bazıları ise özellikle gelişen dijital teknolojinin betonlara uygulanmasıyla ilgili olmaktadır. Uygulamada betonların işlenebilirlik, dayanım ve dayanıklılığında oldukça önemli gelişmeler olduğundan bunların ilgilenenlere tanıtılması yararlı olacaktır. Makalede yeni nesil çimento esaslı betonlar başlığı altında sırasıyla, 3D yazıcı ile üretilen betonlar, nano teknolojik ultra yüksek dayanımlı betonlar, kendi kendini ısıtan ve soğutan betonlar, kendi kendini kür eden betonlar, kendi kendini tamir eden betonlar, atık agregalı betonlar, Mars betonu, ultra hafif betonlar, kendini temizleyen betonlar, bükülebilir beton, eko beton (yeşil beton), yarı saydam ve geçirgen beton, nesnelere interneti (RIFID) teknoloji beton ve çimento bulamacı emdirilmiş lifli betonlardaki (SIFCON) konular hakkında yeni gelişmeler literatüre bağlı olarak açıklanmış, bu yeniliklerin getirdiği avantajlar tanıtılmaya çalışılmıştır.

NEW DEVELOPMENTS IN CONCRETE TECHNOLOGY

Keywords	Abstract
3D printed concrete Ultra high strength concretes Ultra-light concretes Eco-concrete Transparent and pervious concretes	It is seen that the innovations that are developing day by day in concrete technology are being put into practice. In this article, some of the innovations that have recently been widely used in concrete technology have been explained. Some of the innovations are related to the materials used in concrete production, and some of them are related to the application of the developing digital technology to concrete. In practice, it would be useful to introduce them to those who are interested, as there are significant developments in the workability, strength and durability. In the article, under the title of new generation cement-based concretes, concretes produced with 3D printers, nano-technology ultra-high strength concretes, self-heating and cooling concretes, self-curing concretes, self-repairing concretes, waste aggregate concretes, mars concrete, ultra-lightweight concretes, self-cleaning concretes, bendable concrete, eco-concrete (green concrete), translucent and pervious concrete and concrete with internet of things (RIFID) technology, cement slurry impregnated fibrous concretes (SIFCON) have been explained based on the literature, and the advantages brought by these innovations have been tried to be introduced.

Derleme Makale

Başvuru Tarihi : 23.08.2023

Kabul Tarihi : 07.12.2023

Review Article

Submission Date : 23.08.2023

Accepted Date : 07.12.2023

* Sorumlu yazar: ilkerbt@ogu.edu.tr

<https://doi.org/10.31796/ogummf.1348428>

1. Giriş

Teknolojinin son derece hızlı gelişimi beton teknolojisini de olumlu yönde etkilemektedir. Çevre dostu karışım yöntemlerinden, kelimenin tam anlamıyla kendi kendini iyileştirebilen betona kadar, yeni beton teknolojisi, inşaatın geleceği için görünüşte sınırsız olanaklar sunmaktadır. Gelişimin ve yeniliklerin bazıları beton üretiminde kullanılan

malzemeler üzerinde olmaktadır. Özellikle beton içindeki boşlukları en aza indirmek için nano malzemelerin kullanıldığı görülmektedir. Yine sismik etkilere karşı hafifletilmiş betonların kullanılması da yaygınlaşmaya başlamıştır. Bununla birlikte betonlara eklenen kimyasallarla betonlara yeni özellikler kazandırılmaya çalışılmıştır. Depremlerden sonra ortaya çıkan yapı enkazlarının değerlendirilerek yeniden betonda agrega olarak kullanılması büyük



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

tasarruflar sağlayabilmektedir. Özel kimyasallarla ve biyolojik materyallerin kullanılması ile betonların kendi kendini tamir etmesi, kendi kendini temizlemesi ve kendi kendine kür etmesi sağlanabilmektedir. Ay ve Marsta yapılması planlanan yapılar için de (susuz beton uygulamalarının) 3D baskılı yazıcılar kullanılabilir. Gevrek bir malzeme olan beton içine katılan lifler yardımıyla sünek bir yapıya dönüşerek bükülebilir hale getirilebilmektedir. Saydam betonlar yardımıyla güneş ısı ve ışığı beton içinden geçirilerek enerji tasarrufu yaptıran betonlar üretilmeye başlanmıştır. Yine geçirimli betonlarla suların toplanması için yeni uygulamalar yapılmaya başlanmıştır. Burada açıklanan yenilikler dışında çok sayıda gelişme olduğu da bilinmektedir. Bu derleme makalesinde beton teknolojisinde yukarıda sayılan yenilikler incelenmeye çalışılmıştır. Bu yeniliklerin insanların sınırsız ihtiyaçları düşünüldüğünde teknolojinin beton üzerinde kullanılması ile sosyo-

kültürel yapıların oluşturulmasında oldukça avantajlı gelişmeler yaratacağı düşünülmektedir.

2. Yeni Nesil Çimento Esaslı Betonlar

Bu çalışmada; 3D yazıcı ile üretilen betonlar, nanoteknolojik ultra yüksek dayanımlı betonlar, kendi kendini ısıtan ve soğutan betonlar, kendi kendini kür eden betonlar, kendi kendini tamir eden betonlar, atık agregalı betonlar, Mars betonu, ultra hafif betonlar, kendini temizleyen betonlar, bükülebilir beton, eko beton (yeşil beton), yarı saydam ve geçirgen beton, nesnelere interneti (RIFID) teknolojiye betonlardaki gelişmeler ve çimento bulamacı emdirilmiş lifli beton (SIFCON) hakkında genel bilgiler verilmiştir (Şekil 1). Günümüzde uygulama esasına ve gereksinimine göre çalışmada bahsi geçen her tipte beton üretilebilmekte ve teknolojik anlamda gelişimi devam etmektedir.



Şekil 1. İnceleme yapılan özel betonlar

2.1. 3D Yazıcı İle Üretilen Betonlar

Beton üretiminde 3D yazıcıların kullanılması, gelecek vaat eden beton yapı teknolojisi planlama aşamasının hemen ardından oluşturulan dijital verilerin şantiye ortamında uygulanmasını sağlarlar (Mechtcherine ve diğ., 2020; Schutter ve diğ., 2018; Mechtcherine ve diğ., 2019; Buswell ve diğ., 2007; Baduge ve diğ., 2021).



Şekil 2. 3D yazıcı ile beton üretimi ve kullanım alanları (a)Büyük ölçekli 3DCP (Anjuma ve diğ., 2017), (b)PERI/COBOD ve Mense-Korte'de iki katlı bir 3DPC evi, (c)2021'in başlarında Hollanda'nın ilk 3DP evi

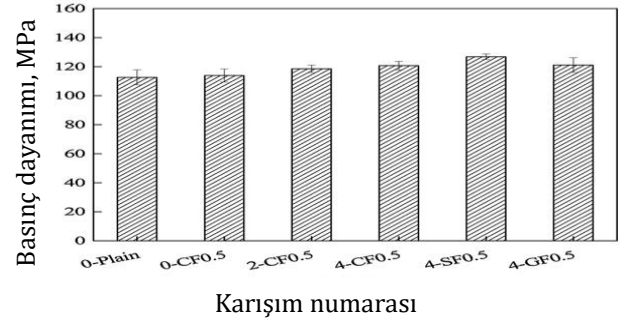
(Kauppila, 2022), (d)Dünyanın en uzun 3DPC Köprüsü, Şangay (edition.cnn.com, 2019).

3D yazıcı kullanılarak üretilen betonun üretim aşamaları ve 3D yazıcı kullanılarak inşa edilmiş bazı yapı örnekleri Şekil 2'de gösterilmiştir. 3D yazıcılar kullanılarak üretilen betonlar hem zamandan kazanç sağlamakta hem de işçilik hatalarını neredeyse yok denecek kadar azaltmaktadır. Maliyet olarak ise toplam inşaat maliyetinin yaklaşık olarak yarısıdır (Weilandt ve diğ., 2009). Le ve diğ. (2012) 3D baskılı beton üretebilmek için en büyük dane çapının 2 mm olması gerektiğini belirlemişlerdir. Baskılı beton aynı zamanda büyük ölçekli imalatlarda tercih edilebilir (Gosselin ve diğ., 2016). Günümüzde 3D yazıcılar kullanarak yaklaşık 20 MPa basınç dayanımına sahip betonlar üretilebilmektedir. Lim ve diğ. (2012) %54 kum, %36 reaktif toz ve su/çimento oranı 0.28 olan 3D baskılı beton üretmeyi başarmışlardır. Gosselin ve diğ. (2016) %35 çimento, %45 silika kristalleri, %10 kireç taşı tozu %10 silis dumanı katkılı 3D baskılı beton üretmişlerdir. Yaptıkları deneysel çalışmalarda 11.7-16.9 MPa arasında basınç dayanımı elde etmişlerdir.

2.2. Nanoteknolojik Ultra Yüksek Dayanımlı Beton

Nanoteknolojinin beton sektöründe kullanılmaya başlaması ile ultra yüksek dayanımlı betonlar

üretilebilmektedir (Sanchez ve Sobolev, 2010). Nano boyutlu malzemeler beton içerisindeki boşlukları yüksek oranda doldurarak betonun kompasitesini arttırmaktadır (Li ve diğ., 2016). Çimentolu kompozit malzemelerde kullanılan başlıca nano malzemeler nano çinko oksit, nano-fiberler, nano-karbon, nano-grafen oksit, nano-titanyum oksit, nano karbon siyahı, nano-silika, nano demir oksit vb.'dir (Nanografi, 2023). Literatürde nano malzemelerin çimentolu sistemlerde kullanılarak harç ve betonların fiziksel ve mekanik dayanımları arttırılmaya çalışılmıştır. Sefien ve diğ., (2022) çimentolu sistemlerde %5 oranında demir oksitin çimento ile yer değiştirilmesi sonucu basınç dayanımının yaklaşık olarak %7.96 oranında arttığını gözlemlemişlerdir. Nik ve Bahari (2011) nano silika katkılı çimento esaslı harçların mikro yapısını ve nano silikanın mekanik dayanım üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Nano silika katkılı harçların mikro yapıyı fark edilebilir derecede iyileştirdiği, mekanik dayanımı da arttırdığını gözlemlemişlerdir. Bazı araştırmalar, çimento bazlı sistemlere grafen oksit nano parçacıkları, nano montmorillonit, çok duvarlı karbon nanotüpler ve nano titanyum dioksit eklenmesinin basınç ve eğilme dayanımlarını artırabileceği sonucuna varmıştır (Mousavi ve diğ., 2021; Hocaoglu, 2022; Mousavi ve diğ., 2022). Noee ve Rajabli (2023) nano silikanın beton basınç dayanımına etkisini araştırmışlardır. 28 gün kür edilen betonlarda çimento yerine %11 oranında nano silika katılması ile referans betona göre basınç dayanımında yaklaşık %300 oranında artış gözlemlemişlerdir. Günümüz teknolojisinde nano boyutlu malzemelerin çimentolu sistemlerde kullanılması ile 120 MPa'nın üzerinde basınç dayanıma sahip beton üretilebilmektedir. Chu ve diğ., (2021) karbon, çelik ve cam nano parçacıklı betonlar üretmişler, nano fiber çelik katkılı betonda en yüksek dayanım elde etmişlerdir (Şekil 3). Şekil 3'te X ekseninde belirtilen simgeler, fiber tipi ve oranlarını temsil etmektedir. Servatme ve Şimşek (2018) farklı oranlarda nano-alüminat, nano-kalsit ve nano-silikat içeren betonların basınç dayanımlarını araştırmışlardır. Çimento yerine %1 nano-alüminat konulduğunda 67.25 MPa basınç dayanımı elde etmişlerdir (Servatme ve Şimşek, 2018). Çimento yerine %2 nano-kalsit konulduğunda 79.46 MPa basınç dayanımı elde etmişlerdir (Servatme ve Şimşek, 2018). Çimento yerine %1 nano-silikat konulduğunda ise 97.86 MPa basınç dayanımına ulaşılmıştır (Servatme ve Şimşek, 2018).



Şekil 3. Nano karbon-çelik-cam katkılı betonlarda basınç dayanımı (Chu ve diğ. 2021)

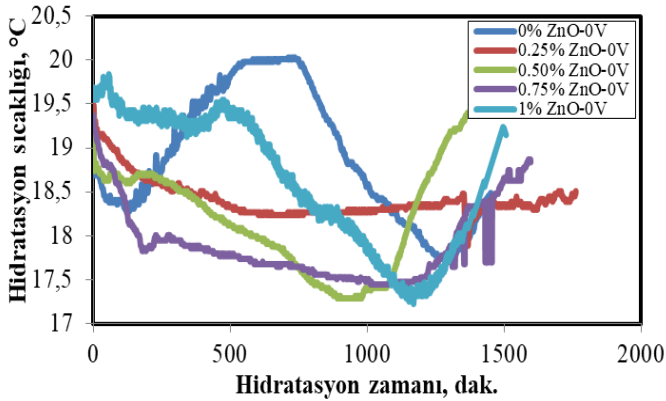
2.3. Kendi Kendini Isıtan ve Soğutan Beton

Beton bileşenlerinden su ile çimento bir araya gelmez hidrasyon reaksiyonları oluşmaktadır. Bu reaksiyonlar ekzotermik (ısı açığa çıkartan) kimyasal tepkimelerdir. Kütle betonları, yüksek metrajlı beton dökümleri, sıcak hava koşullarında dökülmesi gereken betonlar ve soğuk derz oluşma potansiyeli bulunan imalatlarda olduğu durumlarda hidrasyon ısısını düşürmek kritik öneme sahiptir. Soğuk havalarda beton dökümleri ve prefabrik eleman imatları vb. durumlarda ise hidrasyon ısısını yükseltmek büyük öneme sahiptir (Hocaoglu, 2022).

Nano malzemeler beton teknolojisinde kullanılmadan önce, bilim insanları çimento esaslı malzemenin hidrasyon ısısını artırma ya da azaltmada bazı puzolanları (mineral katkı olarak) kullanmayı ve kimyasal katkılar eklemeyi tercih etmişlerdir (Pangdaeng ve diğ. 2014, Mazari ve diğ., 2020). Ancak kullanılan malzemelerle çok yüksek mekanik dayanımlara ulaşamadığı görülmüştür. Önceki araştırmalar karbon bazlı malzemelerin hidrasyon reaksiyonlarına etkisini de araştırmışlardır. Çimento esaslı kompozitlere bazı nano boyutlu malzeme ilave edilmesi sonucu hidrasyon ürünleri olan CSH ve Ca(OH)₂'nin oluşumu hızlandırılabilir. Hocaoglu (2021) farklı s/ç oranlarına sahip harçlarda çimento yerine ağırlıkça %0.25 oranında grafen oksit katarak hidrasyon sıcaklığını bir gün süreyle incelemiştir. Grafen oksitin, hidrasyonun ilk aşamalarında harç iç sıcaklığını artırarak prizin daha kısa sürede gerçekleşebileceği sonucuna ulaşılmıştır. Hocaoglu (2023) grafen oksit katkılı harçlara bir gün süreyle doğru akım uygulamıştır. Grafen oksitin yüksek oranda elektrik iletkenliği nedeniyle priz süresinin yüksek miktarda kısaldığını gözlemlemiştir (Hocaoglu, 2023). Önceki araştırmalarda nano çinko oksit vb. gibi nano boyutlu malzemelerin hidrasyon reaksiyonlarını yavaşlattığı, bu sayede prizi geciktirdiği belirlenmiştir. Gopalakrishnan ve Nithiyantham (2020), %1, %2, %3, %4 ve %5 oranında nano çinko oksit katkılı harçlarda eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve priz süresine etkilerini araştırmışlardır. Nano çinko oksitin çimentolu sistemlerde prizi önemli

ölçüde geciktirdiğini, mekanik dayanımı ise yüksek oranda arttırdığı sonucuna ulaşmışlardır (Gopalakrishnan ve Nithiyantham, 2020).

Hocaoğlu (2022) çimento yerine ağırlıkça %0, %0.25, %0.50, %0.75 ve %1 oranlarında nano çinko oksit konulan harçların hidrasyon sıcaklıklarını bir gün süreyle incelemiştir. Harç içerisindeki nano çinko oksit oranının artması ile hidrasyon sıcaklığının azaldığını ve priz süresinin önemli miktarda geciktiğini gözlemlemiştir (Hocaoğlu, 2022). Bu sayede kendini soğutma özelliğine sahip yeni nesil çimento esaslı malzeme üretilebileceği sonucuna ulaşılmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. Kendiliğinden soğuyabilen harç üretimi (Hocaoğlu, 2022)

2.4. Kendi Kendini Kür Eden Beton

Beton sertleştikten hemen sonra en büyük sorun kürlenme işlemidir (Chand ve diğ., 2016). Özellikle ilk 7 günde hidrasyon reaksiyonlarının ilerleyen günlere kıyasla daha fazla gerçekleşmesi nedeniyle çeşitli önlemlerin alınması gerekmektedir. Çimento bazlı malzemelerin kürlenme süreci genellikle zaman alıcıdır ve ekonomik değildir. Ayrıca küresel ısınma sonucu kısıtlı su kaynakları da her geçen gün tükenmektedir. Bu sorunun üstesinden gelmek için araştırmacılar, daha verimli kürlenme yöntemlerini belirlemeyi amaçlayan kapsamlı çalışmalar yapmışlardır. Umut verici bir çözüm, kürlenme işlemi için gömülü bir su kaynağının hazırlanmasını içerir (Bentz ve Weiss, 2011).

Önceki araştırmalarda çimentolu malzemelerin kendi kendine kürlenebileceği belirlenmiştir. Ghiasvand ve diğ., (2022) sertleşmiş betonda hidrasyon suyu içeriğini arttırmak için çeşitli katkı maddelerinin kullanılabilirliğini belirlemişlerdir. Kendiliğinden sertleşen çimento esaslı kompozit sistemler, polimerler, süper emici, hafif agregalar, ahşap tozları ve büzülme azaltan katkı maddeleri kullanılarak üretilebilirler (Lokeshwari ve diğ., 2021; ACI (308-213) R-13, 2022; Kamal ve diğ., 2018). Jieting ve diğ., (2022), betona süper emici polimer eklendiğinde, kontrol numunelerine göre daha fazla C_2S ve C_3S oluştuğunu gözlemlemiştir. Kendini kürlenen beton, daha etkili bir

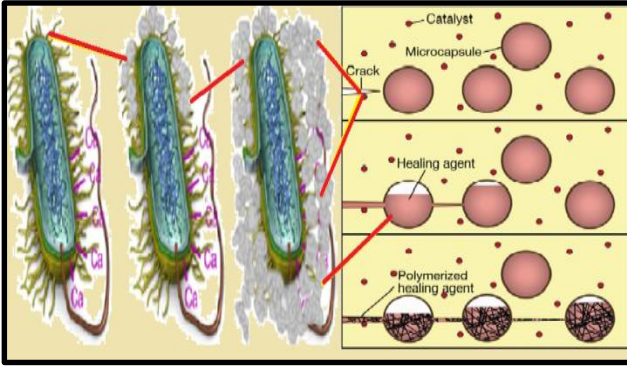
çimento hidrasyonu için çimento esaslı sistemlerde iç nem oranını artırabilecek yeni bir yöntemdir (Bentz ve diğ., 2005; Bilek ve diğ., 2002; El-Dieb ve El-Maaddawy, 2020). Ayrıca; çimento bazlı sistemlerde kendiliğinden kürlenmiş katkıların kullanılması su kaynaklarının korunması açısından da büyük önem taşımaktadır (El-Dieb, 2007). Seongwoo ve diğ. (2022), çimento esaslı kompozitlerde ağırlıkça %0, %0.3, %0.6, %1.2 ve %3 oranında kenaf selüloz mikro elyaflarını ikame etmiştir. Karışım içerisindeki kenaf selüloz mikro elyaf miktarının artması ile rölatif nem oranının da %3-30 arasında arttığını gözlemlemişlerdir. Özellikle beton sertleştikten sonra nem oranının artması çimentolu kompozit malzemenin kendi kendini kürlenme özelliği gösterebilmesi anlamına gelmektedir. Bashandy ve diğ., (2017), kendi kendine kürlenmiş betonların, kürlenmemiş betona göre daha iyi mekanik özellikler gösterdiği sonucuna varmıştır. Ancak geleneksel kür ile kürlenmiş betonlar kadar da iyi mekanik performans gösterememektedir.

2.5. Kendi Kendini Tamir Eden Beton

Betonarme yapılar çatlak oluşum eğilimi yüksek bir malzemedir. Betonlarda çatlak oluşması betonun servis ömrünü kısaltmakta ve tamirati büyük maliyetler gerektirmektedir. Betonda çatlak oluşması ile özellikle deprem gibi sismik hareketlerde yapıların ileri derecede hasar oluşmasına hatta yapının göçmesine neden olabilmektedir (Song ve Saraswathy, 2007; Elsener, 2005). Betonda çatlak oluşumu ilk zamanlarda betona çok büyük zarar vermez, ancak; ileriki yaşlarda betonun dayanıklılığını büyük ölçüde azaltmaktadır (Henk ve diğ., 2010; Chahal ve diğ., 2012; Samani ve Attard, 2014; Pacheco ve Labrincha, 2012).

Betonda çatlak oluşumunu engellemek amacıyla beton içerisine kimyasal katkıları ve polimer malzemeler eklemek gibi çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Ancak; geliştirilen bu yöntemler genellikle kısa vadede etkili olmaktadır. Bu nedenle; çatlak oluşumunu uzun vadede önleyecek yöntemler geliştirilmesine ihtiyaç duyulmuştur (Li ve Habert; 2012). Günümüzde çatlak oluşumunu azaltmak için nanoteknoloji modifiye edilmiş kompozit malzeme kullanımı, kendini tamir eden sistemlerin oluşturulması vb. yöntemler geliştirilmiştir. Betonda kendi kendine tamir etme mekanizması otojen iyileşme (Edvadsen, 1999), malzemenin polimerik kapsül içine alınması ve mikrobiyal $Ca(CO)_3$ üretimi olmak üzere üç şekilde yapılmaktadır (Edvadsen, 1999).

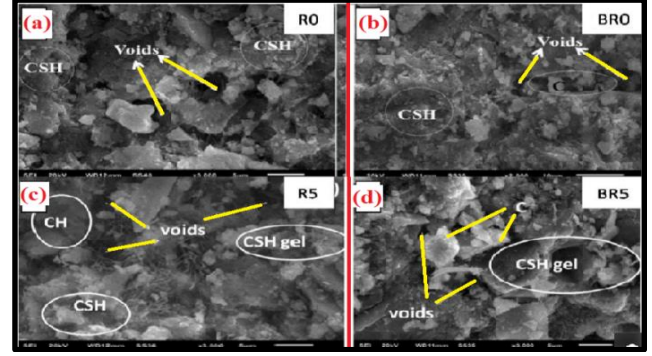
Son yıllarda belki de en tuhaf ama inanılmaz somut yeniliklerden biri, kendi kendini iyileştirebilen betonun geliştirilmesidir. Biyobeton olarak isimlendirilen bu betonlar, çatladığında veya hasar gördüğünde tutkal benzeri bir madde oluşturarak özel bir bakteri yardımıyla çatlakları doldurulabilmektedir (Şekil 5).



Şekil 5. Bakteriler kullanılarak çatlaklı betonun tamiri (Althoeve ve diğ., 2023).

Proteinlerin ve şekerlerin bu salgısı daha sonra betonu güçlendirmek ve boşluğu tamamen kapatmak için sertleştiğinde kireçtaşı veya kalsit oluşturmaktadır. Kendi kendini iyileştiren betonla, bakım ve değiştirme maliyetlerinde büyük miktarda tasarruf sağlayabilir ve ayrıca daha güvenli yapılar üretilebilir.

Feng ve diğ., (2019) Elyaf lif ve PVA lifli bakterilerin betonun kendi kendini iyileştirme üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yaptıkları araştırmada ortama yetiştirilen bakterilerin optik yoğunluğunu elyaf içeren çok işlevli mikro plaka okuyucusu kullanılarak ölçülmüşlerdir. Bu durum PP elyafın ve PVA lifli bakteri konsantrasyonunun azalmasına neden olmuştur (Feng ve diğ., 2019). Bakteriyel elyaf takviyeli betonda, 300-500 µm çatlak genişliği elde edilmiş ve otojen iyileşme performansı değerlendirilmiştir. Sonuç olarak bakteri ve lifli numuneler için çatlak alanının tamir oranının hafif olmasına rağmen sadece bakterilerde olduğundan daha düşük olmakta, su geçirmezlik ve eğilme dayanımı geri kazanma oranı belirgin bir şekilde iyileştiğini gözlemlemişlerdir. Patil ve diğ., (2008) Mikrobiyolojik olarak geliştirilmiş çatlak iyileşmesinin etkinliği ile işlem görmüş harçların basınç dayanımı ile kontrol numunelerinin karşılaştırmasını yaparak değerlendirmişler, çalışmalarında yapılan gözlemlere dayanarak, geliştirilmiş çatlak iyileştirme etkinliğinin küp numunelerin basınç dayanımını %12-13 oranında arttırdığı ve beton çatlakları için sızdırmazlık maddesi olarak kullanılabilirliği sonucuna ulaşmışlardır. Wangap ve diğ., (2014) Kapsüllenmiş sporların canlılığı ve mikro kapsüllerin harç numuneler üzerindeki etkilerini araştırarak, çimento esaslı malzemenin kendi kendini iyileştirme kapasitesini, çatlak iyileşme oranını ve su geçirgenliğini incelemişlerdir. Sonuçta biyokapsüllü numunelerde iyileşme oranının %48-80 daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir. Vijay ve diğ., (2017) bakteri kullanımı ile betonda mikro yapıya etkisini araştırmışlar ve bakteri enjekte edilen betonda boşlukların fark edilir derecede arttığı, CSH jellerinin daha belirgin bir şekilde oluştuğunu gözlemlemişlerdir (Şekil 6).



Şekil 6. Bakteri enjekte edilmiş betonun mikro yapıyı iyileştirmesi (Vijay ve diğ., 2017) (a-referans beton, b-bakterili beton, c-%5 RHA'lı beton, d- %5 RHA'lı bakterili beton)

2.6. Atık Agregalı Beton

Günümüzde enerji maliyetlerinin yüksek olması beton üretim maliyetini de olumsuz etkilemektedir. Ayrıca; dayanıklılık sorunlarından dolayı bir yapının ömrü yaklaşık 50 yıldır (TBDY, 2018). Bu durum bilim insanlarının aklına agregaların yeniden kullanma fikrini getirmiştir. Günümüzde atık agregaların betonda yeniden kullanılabilirliği gösterilmiştir (Yang ve diğ., 2022; Topçu ve Günçan, 1995) (Şekil 7).



Şekil 7. Atık agregaların geri dönüşümü (Ftmmachinery, 2023)

Atık agregaların betonda yeniden kullanılması fikri, çevre dostu bir imalatın oluşmasına öncülük etmektedir (Uygunoğlu ve diğ., 2014). Geri dönüştürülmüş beton tozu için yaygın olarak kullanılan üç ana ön işlem yöntemi bulunmaktadır. Bunlar: mekanik aktivasyon (Sun ve diğ., 2021), ısı aktivasyonu (Zhang ve diğ., 2022) ve karbonasyon (Fang ve diğ., 2021)'dur. Hızlandırılmış karbonasyonun, karbonasyon reaksiyonu yoluyla geri dönüştürülmüş tozun fiziksel aktivitesini iyileştirebileceği ve hızlandırılmış karbonasyon modifikasyonunun düşük maliyetli, basit işlem, kolay uygulama ve karbon absorpsiyonu ve fiksasyonu avantajlarına sahip olduğu belirlenmiştir (Qin ve Gao, 2019).

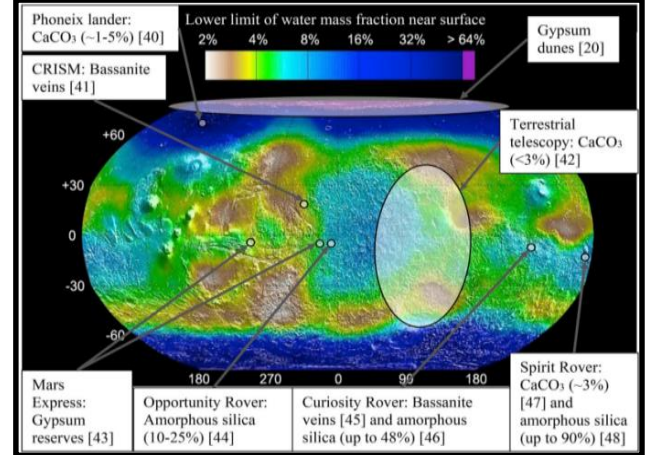
Karbonatlı geri dönüştürülmüş toz, betonun doluluğunu iyileştirmek ve ardından betonun mekanik özelliklerini iyileştirmek için yüksek kaliteli dolgu maddesi olarak betona karıştırılabilir (Tang ve diğ., 2020). Geri dönüştürülmüş agrega ve tozun kullanıma sunulması, betonun hazırlanması ve özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğundan, araştırmacılar, geri dönüştürülmüş betonun özelliklerinin evrimi üzerine birçok araştırma yürütmüştür (Likes ve diğ., 2022; Sasanipour ve diğ., 2020; Kazemian ve diğ., 2019). Genel olarak, geri dönüştürülmüş agrega, betonunun mekanik özelliklerinin (Elansary ve diğ., 2021), uzun vadeli büzülme özelliklerinin (Chinzorigt ve diğ., 2020) ve dayanıklılık özelliklerinin (Kazmi ve diğ., 2020), geri dönüştürülmüş agrega veya geri dönüştürülmüş tozun artan ikame oranıyla kademeli olarak azaldığı ve büyük bir dağılımın olduğu konusunda bilim insanları tarafından fikir birliği bulunmaktadır.

Önceki araştırmalarda atık agregalı betonlarda atık agrega miktarının artması ile betonun basınç dayanımında düşüşe neden olduğu belirlenmiştir (Topçu, 1997; Topçu ve Şengel, 2004). Bunun başlıca nedeni, geri dönüştürülmüş agregaların, daha düşük kaliteli ve düzensiz dağılmış karmaşık özelliklere sahip eski harcı ortaya çıkarması, gözenek yapısını ve betondaki gelişme modelini değiştirmesi (Gonzalez-Corominas ve diğ., 2016; Martinez-Garcia ve diğ., 2022) ve ayrıca betonda çoklu ara yüzey hasarları ortaya çıkarmasıdır (Memon ve diğ., 2022).

Geride dönüştürülmüş tozun kullanılması ise çimento klinkerini azaltarak hidrasyon ürünlerinde azalmaya yol açmaktadır (Duan ve diğ., 2020). Günümüzde bilim insanları bu olumsuz etkinin azaltılması konusunda araştırmalarını sürdürmektedirler. Pacheco ve diğ., (2019) geri dönüştürülmüş kaba agreganın betonun dağılımı üzerindeki etkisini incelemişler ve orta ikame oranlarında geri dönüştürülmüş kaba agregalı betonun dağılımındaki artışın en bariz olduğu sonucuna varmışlardır. Geleneksel verileri bir malzeme bileşimi perspektifinden incelemek ve algoritmaları optimize etmek için girişimlerde bulunulmasına rağmen, yüksek genelleme yetenekleri ile geri dönüştürülmüş agregalı betonun dağılımını karakterize etmek ve düzenlemek için hala bir yöntem eksikliğinin bulunduğu düşünülmektedir.

2.7. Mars Betonu

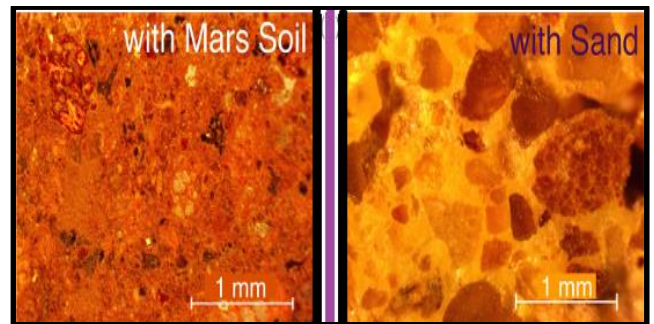
Teknolojinin ilerlemesi ve doğal kaynakların azalması bilim insanlarını Mars'ın sert ortamına dayanabilecek somut yeniliklerin araştırmaya itmiştir (Şekil 8).



Şekil 8. Bağlayıcı için kaynakların seçilmiş gözlemleri üretimi (PoP için bazanit veya alçıtaşı; OPC veya AAC için herhangi bir mineraloji; için amorf silika AAC, GC veya MSBB), bir harita üzerinde Mars yüzeyine yakın su bulunması (NASA, 2008; Reches, 2019)

Kızıl gezegende bolca bulunan malzemeleri kullanarak, Dünya'da geleneksel olarak kullandığımızdan iki kat daha güçlü bir beton türü geliştirilebildiği gözlenmiştir. Örneğin, Mars'ta su sınırlı bir kaynak olduğundan, kükürt, suyun yerini almaktadır. Mars betonu, Dünya'da sıklıkla kullanacağımız bir yenilik olmasa da, insanların Mars'ta bir koloni oluşturmaya çalışması durumunda kritik olabilmektedir. Ayrıca 3D yazıcıların yaygın şekilde kullanılmaya başlanması Mars'ta beton üretimini kolaylaştırabileceği değerlendirilmektedir.

Wan ve diğ., (2016) Mars toprağının beton üretiminde kullanılabileceği sonucuna ulaşmışlardır (Şekil 9). Şekil 9 incelendiğinde Mars toprağı ile üretilen betonun hemen hemen standart kumlu betonla benzer mikroyapı oluşturduğu gözlenmiştir. Ayrıca, en büyük 1 milimetre toplam boyutuna sahip %50 Mars toprağından oluşan karışımın, Mars'ın daha az yoğun atmosferinde bir arada tutulacağını ve uzay boşluğunun neden olacağı Ay'da görülebilecek sorunları ortadan kaldıracığını da bulmuşlardır (Wan ve diğ., 2016).



Şekil 9. Mars toprağı ve standart kum ile üretilen betonun mikro incelemesi (Wan ve diğ., 2016)

2.8. Ultra Hafif Beton

Yapı ölü yüklerini azaltmak deprem mühendisliği için oldukça önemlidir. Hafif betonlar üretim şekilleri ve kullanım alanlarına göre farklı sınıflara ayrılmaktadırlar (Topçu, 1988). Hafif betonların birim ağırlıkları yaklaşık 1800-2000 kg/m³'tür (Topçu ve Işıkdag, 2008). Bilim insanları çok daha düşük birim ağırlığına sahip beton üretmeyi amaçlamışlardır. Bu amaçla beton birim ağırlığının 800 kg/m³'e kadar düşürülmüştür (Spiesz ve Heidelberg, 2017). Üretilen bu özel betona "Ultra Hafif Beton" (UHB) ismi verilmiştir. Ultra hafif betonlar yapı yüklerini yüksek oranda azaltarak deprem güvenliği sağlamaktadır (Topçu ve diğ., 2023). Ayrıca; boşluk oranı yüksek bir beton üretilmesi sayesinde yalıtım malzemesi olarak da tercih edilebilmektedir.

Günümüzde UHB üretimi için genleşmiş cam agregaları ve genleşmiş killer vb. birim ağırlığı düşük malzemeler tercih edilmektedir (Spiesz ve Heidelberg, 2017; Yu vd., 2015). UHB'lerin en büyük dezavantajı, düşük basınç dayanımına (en yüksek 10 MPa) sahip olmasıdır. Bilim insanları UHB'lerde daha yüksek basınç dayanımı elde etmek için araştırmalarını sürdürmektedirler. Topçu ve Uygunoğlu (2007) hafif agregaların oktavlanması ile 28 günlük dayanımının %75 oranında artabileceğini gözlemlemişlerdir.

2.9. Kendini Temizleyen Beton

Genel olarak bina yüzeylerinde zamanla oluşan kirlilik, insan kaynakları ve doğal kaynaklar olarak ikiye ayrılan atmosferik kirlilikten kaynaklanmaktadır (Ünal ve Canbaz, 2022). Nanoteknoloji, betonlarda kendi kendini temizleme konusunda bilim insanlarının yardımına koşturmaktadır. Titanyum dioksit (TiO₂); güçlü oksidasyon kabiliyeti, korozyona karşı uzun süreli direnci ve iyi dağılımı, hidrofobikliği, kimyasal kararlılığı, inert yapısı, toksik olmaması, ucuzluğu ve ışık geçirgenliği nedeniyle çimento esaslı malzemelerin temizlenmesi uygulamalarında en çok çalışılan ve kullanılan malzemedir (He ve diğ., 2019). TiO₂ güneşe maruz kaldığında sertleşmiş betonda aktif hale gelir. Aktivasyon, TiO₂ elektrik yükünü değiştirerek beton ile beton yüzeyindeki kir ve kirleticiler arasında itici bir etkiye neden olur (Precast, 2020). Bir sonraki yağmur, gevşeyen kir parçacıklarını beton yüzeyden yıkarak yapının temiz görünmesini sağlar (Precast, 2020). Betonda kullanılan foto katalitik malzemeler, sıkışık şehirlerde egzoz gibi havadaki kirleticilerin ayrıştırılmasına da yardımcı olma konusunda umut vaat etmektedir (Precast, 2020). Kendini temizleyen beton uygulamalarından bazıları arasında Roma'daki Jubilee Kilisesi, Roissy-Charles de Gaulle Uluslararası Havaalanı, Paris ve Bordeaux'daki Hotel de Police'deki Air France Genel Merkezi bulunmaktadır (Şekil 10).



Şekil 10. Paris'teki Hotel de Police Binası (Precast, 2020)

Kendini temizleyen betonların bazı dezavantajları da bulunmaktadır. İçeriğindeki TiO₂ kendi kendini temizleyen betonun yüzeyinde beyaz noktalar oluşturmaktadır. TiO₂'nin kimyasal reaksiyona girmesi için ışığa ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle iç mekan uygulamalarında kendini temizleyen betonların kullanılması uygun değildir (Topçu ve diğ., 2020).

2.10. Bükülebilir Beton

Beton sünek bir malzeme olmayıp gevrek yapıdadır. Özellikle sismik hareketlerin fazla olduğu alanlarda yapının sünek olması deprem güvenliği anlamına gelmektedir. Bilim insanları süneklik kabiliyeti yüksek beton üretmeyi başarmışlardır (Şekil 11). Bükülebilir betonlar kısa liflerle güçlendirilen çimento esaslı harçlarla üretilmektedirler. Önceki araştırmalarda betonun esnekliğini arttırmak için elyafyla birlikte cam elyafının da kullanılabildiği belirlenmiştir (Neeladharan ve diğ., 2018). Bükülebilir betonlar yol ve köprü inşaatlarında genleşme ve büzülme derzlerinin kullanımını ortadan kaldırırlar (Theconstructor, 2023).



Şekil 11. Bükülebilir betonda eğilme deneyi (Malzeme Bilimi, 2023)

Sünek betonlarla inşa edilen binalar daha fazla çekme gerilmesini karşılama özelliğine sahiptirler. Bu da deprem kuvvetlerinin karşılanmasında oldukça etkilidir (Theconstructor, 2023). Ayrıca sünek betonlar askeri amaçlar için yapılan beton brandaların oldukça sağlam ve dayanıklı olmasını sağlayabilmektedir (Theconstructor, 2023).

2.11. Eko Beton (Yeşil Beton)

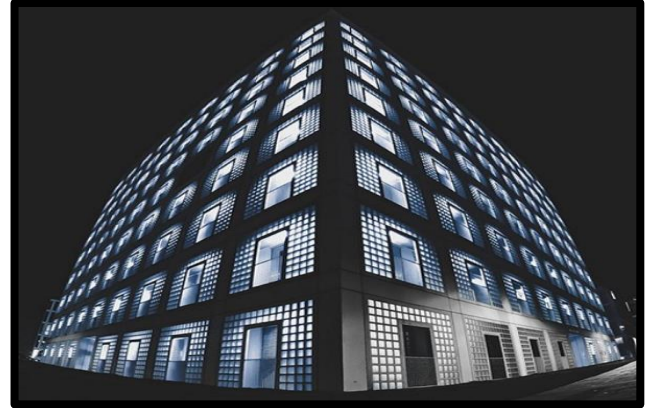
Yeşil beton, bileşenlerinden en az biri olarak atık malzeme kullanılan veya üretim süreci çevresel hasara yol açmayan veya performansı ve yaşam döngüsü sürdürülebilirliği yüksek olan beton olarak tanımlanmaktadır (Suhendro, 2014). Geleneksel betona göre daha az CO₂ üretir, ucuz ve dayanıklılığı daha yüksektir (Specifyconcrete, 2023). Yeşil beton kullanımının amacı, doğal kaynaklar üzerindeki yükü azaltmak ve geri dönüştürülebilir malzemelere bağımlılığı arttırmaktır. Çevre dostu beton yoluyla sürdürülebilirliği sağlamak için kullanılan çoklu stratejiler arasında, su tüketimini azaltmak için yıkama suyunun yeniden kullanılması iyi bir tekniktir (Specifyconcrete, 2023).

Enerji tüketen çimentonun yeniden kullanılabilir malzemelerle kısmen değiştirilmesi, çevre dostu inşaat malzemesi elde etmek için kullanılan en iyi stratejiler arasındadır. Örneğin, çimento uçucu kül, silis dumanı, odun talaşı, kireçtaşı tozu vb. ile değiştirilebilir (Nielsen ve Glavind, 2017). Yeşil betonun bazı avantajları aşağıda maddeler halinde verilmiştir (Nielsen ve Glavind, 2017).

- Beton endüstrisinde CO₂ emisyonunun yaklaşık olarak %30 oranında azaltır. Beton endüstrisinin atık ürün kullanımını yaklaşık %20 oranında artırır.
- Çevre kirliliğini azaltarak, sürdürülebilirliği artırır. Daha az bakım ve onarım gerektirir.
- Konvansiyonel betona göre daha iyi işlenebilirliğe sahiptir. Yüksek ısıl direnç göstermesi sayesinde, yangına karşı dayanıklıdır. Aynı s/ç oranında benzer mekanik (basınç ve eğilme) dayanımına sahiptirler.

2.12. Yarı Saydam ve Geçirgen Beton

Yarı saydam (transparan) betonlar beton iç yüzeylerinin içerisine gömülen ışık geçiren elemanlar sayesinde üretilebilmektedir (Topçu ve Uygunoğlu, 2016). Losonci (2010) beton içerisine optik malzeme koyarak, güneş ışığı altında, ışığın beton içerisinden geçebileceğini gözlemlemiştir. Juerge (2007) 80 MPa dayanıma sahip betona plastik optik fiberler koyarak saydam beton üretmeyi başarmıştır. Transparan betonlar genellikle mimari açıdan estetik bir görüntü elde etmek için kullanılmaktadır. Şekil 12 Almanya' da yarısaydam betondan inşa edilmiş Stuttgart Şehir Kütüphanesinin bir fotoğrafıdır.



Şekil 12. Almanya Stuttgart Şehir Kütüphanesi (Ekoyapı, 2022)

Yarısaydam betonların maliyeti, diğer teknolojik betonlarda olduğu gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak değişebilmektedir. Bu faktörler: cam veya diğer saydam malzeme kalitesi, üretim yöntemi ve süreci, projenin büyüklüğü, talep edilen özellikler, yerel malzeme ve işçilik maliyetleridir. Transparan betonlar ışık geçişine izin vermesi nedeniyle enerji maliyetini düşürmektedir. Ayrıca; bina ölü yükünü azaltarak deprem güvenliği sağlamaktadır. Ancak; yarı saydam beton, geleneksel betondan daha pahalıdır. Çünkü üretiminde daha fazla malzeme ve işçilik gerekmektedir. Ayrıca, yarı saydam betonun doğrudan güneş ışığı altında daha fazla ısı üretmesi nedeniyle, iç mekânlarda kullanılması durumunda klima maliyetlerini artırabilir. Yarı saydam betonun su geçirgenliği daha azdır. Bu nedenle suyun içeri girmesini önlemek için özel önlemler alınması gerekmesi dezavantajları arasındadır (Ekoyapı, 2022).

Geçirimli (poroz) beton ise ince agreganın kullanılmadığı, beton üretiminin yalnızca iri agregadan oluştuğu özel bir beton çeşididir (Şekil 13). Kentsel seller, dünyadaki birçok şehir için büyük bir sorundur. Çünkü beton ve asfalt, suyun emilebileceği yerin altındaki zemine geçmesine izin vermez. Beton ve diğer inşaat malzemelerinin suya karşı yalıtılması gerekir. Bu nedenle su betondaki boşluklara girerse ve donma-çözülme döngüleri oluşturursa, beton çatlamaya ve aşınmaya başlar. Bu sebeple, geçirimli beton henüz her ortamda kullanılabilecek bir çözüm değildir.



Şekil 13. Geçirimli beton (Shah ve diğ., 2017)

Geçirimli beton, taşkınları önlemek ve çevreye daha dost olmak için suyun zemine kadar ıslanmasına izin veren bir tür gözenekli betondur. Ne kadar çok geliştirilirse, soğuk iklimlerde kullanım için çözüme o kadar yakın olabilir. Geçirimli betonlar otoparklarda, bahçe duvarlarında, yüzme havuzu çevrelerinde ve yaya geçitleri vb. yerlerde su birikintilerini önlemede kullanılır (Shah ve diğ., 2017). Bu beton boşluklu bir beton olduğu için basınç dayanımı düşük olduğundan taşıyıcı elemanlarda kullanılması uygun değildir.

2.13. Nesnelerin İnterneti (RIFID) Teknolojili Beton

Teknolojik gelişmeler radyo frekans tanımlama (RIFID) yönteminin kullanılmasına olanak sağlamıştır (Uygunoğlu ve Topçu, 2020; Uygunoğlu ve diğ., 2021; Uygunoğlu ve Topçu, 2021). RIFID teknolojisinin kullanılarak betonun iç nemi, iç sıcaklığı, betonun bulunduğu konum vb. takip edilebilmektedir. Ülkemizde beton denetimi Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından yetkilendirilen kurum ve kuruluşlar tarafından gerçekleştirilmektedir.

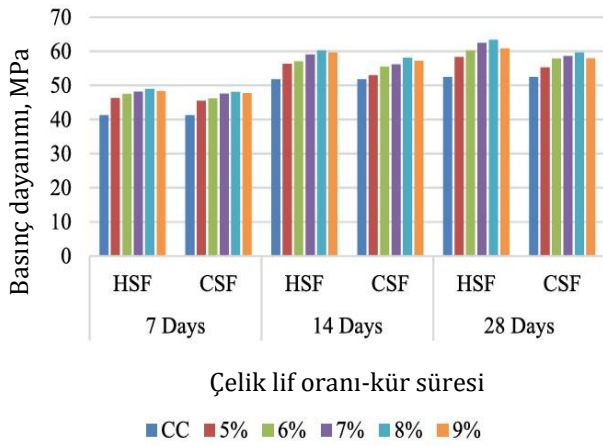
2019' dan itibaren beton imalatı uygulamada devrim niteliğine sahip çipli betona geçilmiştir (4708 sayılı kanun, 2018). Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığında temin edilen çipler taze betonun içerisine gömüldükten sonra, RIFID okuyucu el terminali ile beton içerisindeki çipler sisteme tanıtılmaktadır (Şekil 14). Böylelikle beton döküm aşamasından, test edilip, basınç dayanım raporu hazırlanmasına kadar beton numuneleri takip altına alınabilmektedir. Gelecekteki çalışmalar, daha karmaşık sensörlerin betonda kullanılması ve veri depolama gibi ek işlevlerin birleşimi ile yarı aktif bir sistemin daha da geliştirilmesini ve uygulanmasını hedeflemektedir.



Şekil 14. Betonda RIFID uygulaması (a- betonun kalıplara doldurulması, b- çipin beton içerisine gömülmesi, c- el terminali ile çipin okutulması, d- çipli betonun test edilmesi) (Zekiylıdırım, 2023)

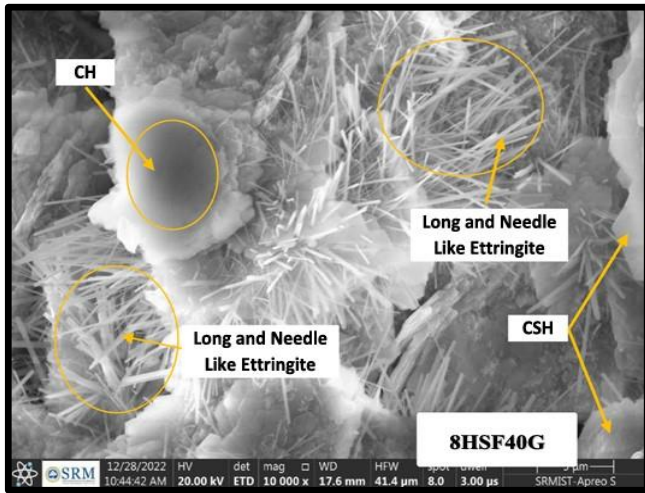
2.15. Çimento bulamacı emdirilmiş lifli betonlar (SIFCON)

Lifli beton olarak üretilen çimento bulamacı emdirilmiş betonlar (SIFCON) yüksek sıcaklığa ve patlama riski bulunan ortamlar için üretilen özel bir beton çeşididir (Canbaz ve Ünüvar, 2016). SIFCON'un başlıca bileşenleri çimento, puzolan, süperakışkanlaştırıcı, silis dumanı, su ve çelik tel'dir (Yalçınkaya ve diğ., 2013). SIFCON çelik tel içermesi nedeniyle yüksek mekanik dayanıma sahiptir. Bazı araştırmacılar SIFCON' a silis dumanı ilavesi ile mekanik dayanımın değişip değişmeyeceğini araştırmıştır (Balaguru ve Kendzulak, 1986). Literatürde SIFCON ile ilgili güncel çalışmaların da yapıldığı görülmüştür. Nachiar ve diğ., (2023) 5%, 6%, 7%, 8% ve 9% çelik fiber katılmış SIFCON'un basınç dayanımı ve mikro yapılarını incelemiştirlerdir (Şekil 15). Şekil 15 incelendiğinde çimento esaslı kompozit içerisinde fiber tel oranının %8 olması ile en yüksek basınç dayanımı elde edilebileceği görülmüştür. Şekil 15'de HSF bağlanmış çelik fiberi CSF ise kıvrımlı çelik fiberi temsil etmektedir.



Şekil 15. SIFCON'da lif oranının ve kür süresinin basınç dayanımına etkisi (Nachiar ve diğ., 2023)

Nachiar ve diğ., (2023) fiberlerle modifiye edilmiş betonların mikro yapılarını incelediğinde iğnemsiz yapı olan etrenjitlerin oluştuğunu gözlemlemişlerdir (Şekil 15). Etrenjitlerin oluşması daha boşluksuz bir mikro yapı oluşması anlamına gelmektedir.



Şekil 16. %8 fiber tellerle güçlendirilmiş SIFCON'un mikro yapısı (Nachiar ve diğ., 2023)

3. Teknolojik Betonların Maliyet Analizi ve Etkiler

Teknolojik betonlar, geleneksel betonlardan farklı özelliklere sahip olan ve daha özel uygulamalara yönelik olarak geliştirilen beton türleridir. Bu betonlar genellikle yüksek dayanıklılık, uzun ömür, özel kimyasal direnç özellikleri, hızlı sertleşme gibi avantajlara sahip olabilirler.

Teknolojik betonlar, özellikle yapısal güç ve dayanıklılığın önemli olduğu projelerde tercih edilmektedirler. Maliyetleri, geleneksel betonlardan daha yüksek olabilir. Çünkü üretim sürecinde özel katkı maddeleri, lifler veya ilave işlemler gerektirebilir. Ayrıca, özel özelliklere sahip olmaları nedeniyle, bazı

teknolojik betonların, geleneksel betonlara göre maliyetleri çok daha yüksek olabilmektedir.

Literatürde teknolojik betonların maliyetlerini inceleyen yayınlanmış kısıtlı sayıda araştırma bulunmaktadır. Bu çalışmada incelenen yeni nesil betonların; teknoloji karmaşıkları, başlangıç maliyetleri, yaşam döngüsü maliyetleri, çevre duyarlılıkları ve beton teknolojisinin gelecekteki etkilerini karşılaştırmak için Tablo 1 oluşturulmuştur. Tablo 1 hazırlanırken Mehta, (1999) tarafından oluşturulan kriterler kullanılmıştır. Tablo 1'de belirtilen gelişmekte olan betonların özellikleri düşük, orta, yüksek ve çok yüksek olarak kategorize edilmiştir.

Tablo 1 incelendiğinde teknolojik betonların genel olarak maliyetlerinin yüksek olduğu, ancak; gelecekteki etkilerinin ve çevreye duyarlılıklarının da yüksek olduğu gözlenmiştir. Doğal kaynakların korunması, sürdürülebilirlik, enerjinin tüketimi ve CO₂ emisyonunun azaltılması dâhil olmak üzere yeni teknoloji tekniklerinin kullanılması beton endüstrisinde sağlanabilir. Bununla birlikte, çimentonun üretim teknolojisine yakından takibi, çimento katkı malzemelerinin kullanımının artırılmasıyla geliştirilebilir. Beton, bileşenlerinin geri dönüştürülmesi ile maliyet düşürülebilir. Bu amaçla betonarme yapı elemanlarının dönüştürülmesinde maliyeti düşürecek yeni yöntemlerin geliştirilmesi büyük önem arz etmektedir. Yapıların servis ömrü, dayanıklı ve etkili yapı malzemeleri ile üretilerek artırılabilir. Beton endüstrisinde gelişen teknolojilerin kullanılması, inşaat endüstrisinin istikrarlı büyümesi için faydalı olacağı aşikârdır. Bu amaçla, yükleniciler performansa dayalı kodları ve şartnameleri kullanmaları gerekmektedir. Müteahhitler, daha düşük ilk maliyetli yaklaşımları değil, yaşam döngüsü maliyetini değerlendirmelidirler. Bu çalışmada incelenen teknolojik betonların tamamı çevreye duyarlı olduğu gözlenmiştir (Tablo 1). Ayrıca gelecekteki sürdürülebilirliklerinin de yüksek olacağı sonucuna varılmıştır. Özellikle yapay zekânın inşaat sektöründe daha fazla kullanılması ile teknolojik betonların geliştirileceği düşünülmektedir.

Tablo 1. Beton teknolojisindeki son gelişmeler için önerilen derecelendirmeler

Gelişen Teknoloji Çeşidi	Teknoloji Karmaşıklığı	Başlangıç Maliyeti	Yaşam Döngüsü Maliyeti	Çevre Duyarlılığı	Gelecekteki Etkisi
3D yazıcı beton (Florida, 2018; Estarque, 2020)	Yüksek	Yüksek	Düşük	Yüksek	Yüksek
Nanoteknolojik yüksek dayanımlı beton (Nanografi, 2023)	Yüksek	Çok yüksek	Düşük	Yüksek	Çok yüksek
Kendi kendini ısıtan-soğutan beton (Hocaoğlu, 2022)	Yüksek	Yüksek	Düşük	Yüksek	Yüksek
Kendini kür eden beton (Lokeshwari ve diğ., 2021)	Orta	Orta	Düşük	Yüksek	Çok yüksek
Kendini tamir eden beton (Lee ve Park, 2018)	Yüksek	Yüksek	Düşük	Yüksek	Çok yüksek
Atık agregalı beton (Ohemeng ve Ekolu, 2020)	Yüksek	Düşük	Düşük	Yüksek	Yüksek
Mars betonu (Wan ve diğ., 2016)	Çok yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek
Ultra hafif beton (Sağlam ve diğ., 2022)	Düşük	Düşük	Düşük	Yüksek	Yüksek
Kendini temizleyen beton (Shen ve diğ., 2015)	Yüksek	Yüksek	Düşük	Yüksek	Yüksek
Bükülebilir beton (Techinside, 2023)	Orta	Orta	Orta	Yüksek	Yüksek
Eko beton (Alqahtani ve diğ., 2021)	Düşük	Düşük	Düşük	Yüksek	Yüksek
Yarısaydam ve geçirgen beton (Ekoyapı, 2022)	Orta	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek
RIFID Teknolojili Beton (Uygunoğlu ve Topçu, 2020)	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek

4. Sonuçlar

Teknolojinin kanıtlanmış bir ticari kaydı bulunmaktadır. Bununla birlikte, malzeme tasarrufu sağlayan yapısal uygulamalar, daha karmaşık ve yeni tasarım yöntemleri gerektirir. Endüstriyel güveni artırmak ve daha yaygın bir şekilde benimsenmesini sağlamak için başarılı projelerin daha fazla geliştirilmesi ve kanıtlanması gerekmektedir. Önemli miktarda araştırma ve yenilik yapılmasına rağmen, bazı önemli sorular hala devam etmektedir. Teknolojik imkânların inşaatın sürdürülebilirliğini geliştirmeye dönüştürücü bir katkı sağlayacaktır. Derleme makale kapsamında, 3D yazıcı ile üretilen betonlar, nano teknolojik ultra yüksek dayanımlı betonlar, kendi kendini ısıtan ve soğutan betonlar (faz değiştiren betonlar), kendi kendini kür eden betonlar, kendi kendini tamir eden betonlar, atık agregalı betonlar, Mars betonu, ultra hafif betonlar, kendini temizleyen betonlar, bükülebilir beton, eko beton (yeşil beton), yarı saydam ve geçirgen beton ile nesnelere interneti (RIFID) teknolojili beton, çimento bulamacı emdirilmiş lifli betonlar (SIFCON) hakkında yeni gelişmeler incelenmiştir. Betonun hangi amaçla kullanılması gerektiği iyi bilinirse, istenilen özelliğe sahip betonların üretilebileceği sonucuna varılmıştır. Bu incelemede

elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

- 3D yazıcıların inşaat sektöründe kullanılması ile zaman ve işçilik masraflarında tasarruf sağlanabilir.
- Günümüz teknolojisinde ultra yüksek performanslı betonlar üretilmektedir.
- Nanoteknoloji ile üretilen nano boyutlu malzemelerin çimento esaslı kompozitlerde kullanılması ile kendini ısıtan ve kendini soğutan beton üretilir. Kendini ısıtan betonlar soğuk havalarda priz süresini hızlandırmak, kendini soğutan betonlar ise sıcak havalarda priz süresini kısaltmada kullanılabilir.
- Biyolojik betonlar üretimi ile betonun servis ömrü uzatılabilir.
- Atık agregaların beton dönüşümünde yeniden kullanılması ile ekonomik ve çevre sağlığına duyarlı yapılar inşa edilebilir.
- Bilim insanlarının çalışmalarında kendini kürleyen betonlar üzerine yoğunlaşması ile şantiye ortamındaki en büyük sorunlardan bir tanesi çözüme kavuşturulabilir.
- Yeni nesil kendini temizleyen betonlar ile gün ışığında betonlarda temiz bir görünüm elde edilebilir.
- Önceki çalışmalar Marsta beton üretilebileceğini göstermiştir.

- UHB' nin basınç dayanımı yaklaşık 10 MPa olduğu gözlenmiştir. Bu nedenle UHB'lerde basınç dayanımlarının artırılmasına yönelik daha çok araştırmaların yapılması önerilmektedir.
- Esnek beton, çok çeşitli beton yapılar oluşturmak için kullanılmış ve heyecan verici yeni yapısal ve mimari olanaklar üretmiştir.
- Transparan betonlar mimarların estetik görünüm açısından vazgeçemediği özel bir beton türüdür.
- Geçirimli beton boşluklu bir beton türü olduğu için basınç dayanımı düşüktür. Bu nedenle taşıyıcı elemanlarda kullanılması uygun değildir.
- Ülkemizde yaşanan depremler, çipli beton uygulamasının doğru bir uygulama olduğunu kanıtlamıştır.

Bu çalışmada beton teknolojisindeki güncel gelişmeler genel hatlarıyla incelenmiştir. İnsanların ihtiyaçlarının sınırsız olduğu bilinmektedir. Bu doğrultuda yeni nesil betonların kullanılması zorunlu duruma gelmektedir. Ancak bu özel betonların da bazı dezavantajlarının bulunduğu gözlenmiştir. Bu nedenle gelişmekte olan bu teknolojik betonlar üzerine daha fazla araştırma yapılması önerilmektedir.

Araştırmacıların Katkısı

Bu makalede; Yazar1 ve Yazar2, literatür araştırması ve makalenin oluşturulmasına katkı sağlamışlardır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

- ACI (308-213) R-13 (2022). Report on Internally Cured Concrete using Pre-Wetted Absorptive Lightweight Aggregate. American Concrete Institute.
- Alqahtani, F.K., Abotaleb, I.S., ElMenshawy, M. (2021). Life cycle cost analysis of lightweight green concrete utilizing recycled plastic aggregates. *Journal of Building Engineering*, 40, 102670. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102670>
- Althoeya, F., Zaidb, O., Arbilic M.M., Martínez-García, R., Alhamamia, A., Shahe, H.A., Yosri, A.M. (2023). Physical, strength, durability and microstructural analysis of self-healing concrete: A systematic review. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01730. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01730>
- Anjuma, T., Dongre, P., Misbah, F., Nanyam, V.P.S.N. (2017). Purview of 3DP in the Indian Built Environment Sector. *Procedia Engineering*, 196, 228-35. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.194>

- Baduge, S.K., Navaratnam, S., Zidan, Y.A., McCormack, T., Nguyen, K., Mendis, P., Zhang, G., Aye, L. (2021). Improving performance of additive manufactured (3D printed) concrete: A review on material mix design, processing, interlayer bonding, and reinforcing methods. *Structures*, 29, 1597-609. doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.12.061>
- Balaguru, P., Kendzulak, J. (1986). Flexural behavior of slurry infiltrated fiber concrete (SIFCON) made using condensed silica fume. *International Concrete*, 91, 1215-1230.
- Bashandy, A.A., Meleka, N.N., Hamad, M.M. (2017). Comparative study on the using of PEG and PAM as curing agents for self-curing concrete. *Challenge Journal of Concrete Research Letters*, 8(1), 1-10. doi: <https://doi.org/10.20528/cjcr.2017.01.001>
- Bentz, D.P., Lura, P. Roberts, J.W. (2005). Mixture proportioning for internal curing. *Reprinted from the Concrete International*, 27(2), 35-40.
- Bentz, D.P., Weiss, W.J. (2011). Internal curing: A 2010 state-of-the-art review, U.S. Department of Commerce, *NISTIR* 7765. doi: <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.7765>
- Bilek, V., Kersner, Z., Schmid, P., Mosler, T. (2002). The possibility of self-curing concrete. *Proceedings of the International Conference of Innovations and Developments in Concrete Materials and Construction*, 51-60.
- Buswell, R., Soar, R., Gibb, A., Thorpe, A. (2007). Freeform construction: mega-scale rapid manufacturing for construction. *Automation in Construction*, 16(2), 224-231. doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2006.05.002>
- Canbaz, M., Ünivar, C. (2015). Lif ve çimento türünün SIFCON özelliklerine etkisi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 22(6), 400-404.
- Chahal, N., Siddique, R., Rajor, A. (2012). Influence of bacteria on the compressive strength, water absorption and rapid chloride permeability of fly ash concrete. *Construction and Building Materials*, 28, 351-356. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.042>
- Chand, M.S.R., Giri, P.S.N.R., Kumar, P.R., Kumar, G.R., Raveena, C. (2016). Effect of self-curing chemicals in self-compacting mortars. *Construction and Building Materials*, 107, 356-364. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.018>
- Chinzorigt, G., Lim, M.K., Yu, M., Lee, H., Enkbold, O., Choi, D. (2020). Strength, shrinkage and creep and durability aspects of concrete including CO₂ treated

- recycled fine aggregate. *Cement and Concrete Research*, 136, 106062. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106062>
- Chu, S.H., Li, L.G., Kwan, A.K.H. (2021). Development of extrudable high strength fiber reinforced concrete incorporating nano calcium carbonate. *Additive Manufacturing*, 37, 101617. doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101617>
- Duan, Z., Singh, A., Xiao, J., Hou, S. (2020). Combined use of recycled powder and recycled coarse aggregate derived from construction and demolition waste in self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 254, 119323. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119323>
- Edvardsen, C. (1999). Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete. *ACI Material of Journal*, 96, 448-454.
- Elansary, A.A., Ashmawy, M.M., Abdalla, H.A. (2021). Effect of recycled coarse aggregate on physical and mechanical properties of concrete. *Advances in Structural Engineering*, 24(3), 583-595. doi: <https://doi.org/10.1177/1369433220963792>
- El-Dieb, A.S. (2007). Self-curing concrete: Water retention, hydration and moisture transport. *Construction and Building Materials*, 21, 1282-1287. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.02.007>
- El-Dieb, A.S., El-Maaddawy, T. A. (2020). Performance of self-curing concrete as affected by different curing regimes. *Advances in Concrete Construction*, 9(1), 33-41. doi: <https://doi.org/10.12989/acc.2020.9.1.033>
- Elsener, B. (2005). Corrosion rate of steel in concrete-measurements beyond the Tafel law. *Corrosion Science*, 47, 3019-3033. doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2005.06.021>
- Estarque, M. (2020). D'eficit habitacional e populaçao de rua crescentes desafiam gestao Bolsonaro. Erişim linki: <https://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2018/11/deficit-habitacional-e-populacao-de-rua-crescentes-desafiam-nova-gestao>.
- Fang, X.L., Xuan, D.X., Zhan, B.J., Li, W.F., Poon, C.S. (2021). A novel upcycling technique of recycled cement paste powder by a two-step carbonation process. *Journal of Cleaner Production*, 290, 125192. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125192>
- Feng, J., Su, Y., Qian, C. (2019). Couple defect of PP fiber, PVA fiber and bacteria on self-healing efficiency of early-age cracks in concrete, *Construction and Building Materials*, 228, 116-810. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116810>
- Florida, R., Schneider, B. (2018). The Global Housing Crisis. Erişim linki: <https://www.citylab.com/equity/2018/04/the-global-housingcrisis/ 557639/>.
- Ghale Noee, A., Nasiri Rajabli, J. (2023). The effect of nano-silica powder on mechanical and non-mechanical characteristics of self-consolidating concrete (SCC) and its impact on environment protection. *Innov. Infrastruct. Solut.*, 8, 166. doi: <https://doi.org/10.1007/s41062-023-01128-3>
- Ghiasvand, H., Bastami, M., Farokhzad, R. (2022). Enhancing the internal curing process of self-compacting concrete containing lightweight aggregate and chemical additives. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 1-19. doi: <https://doi.org/10.1080/19648189.2022.2026824>
- Gonzalez-Corominas, A., Etxeberria, M., Poon, C.S: (2016). Influence of steam curing on the pore structures and mechanical properties of fly-ash high performance concrete prepared with recycled aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 71, 77-84. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.05.010>
- Gopalakrishnan, R., Nithyanantham, S. (2020). Effect of ZnO Nanoparticles on cement mortar for enhancing the physico-chemical, mechanical and related properties. *Advanced Science, Engineering and Medicine*, 12(3), 348-355. doi: <https://doi.org/10.1166/ asem.2020.2505>
- Gosselin, C., Duballet, R., Roux, P. (2016). Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete-a new processing route for architects and builders, *Mater Des.*, 100, 102-109.
- He, B., Gao, Y., Qu, L., Duan, K., Zhou, W., Pei, G. (2019). Characteristics analysis of self-luminescent cement-based composite materials with self-cleaning effect. *Journal of Cleaner Production*, 225, 1169-1183. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.291>
- Henk, M. Jonkers, A. (2010). Bacteria mediated remediation of concrete structures. 2nd International Symposium on Service Life Design for structures, e-ISBN: 978-2-35158-097-4 830-840.
- Hocaoglu, İ. (2022). Investigation of the effect of current in zeolite-graphene oxide additives of mortar and development of a novel method for determining the setting time. *Journal of Building Engineering*, 46, 103803. doi: <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103803>
- Hocaoglu, I. (2021). Self-heating mortars with using graphene oxide and increasing CSH gel formation

- with the direct current application. *Revista de la Construcción. Journal of Construction*, 20(3), 559-575. doi: <https://doi.org/10.7764/RDLC.20.3.559>
- Hocaoğlu, İ. (2023). Grafen oksit katkılı yeni nesil harçlarda dozaj ve doğru akım şiddetinin etkilerinin araştırılması, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 38 (1), 421-434. doi: <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.940271>
- <https://malzemebilimi.net/cimentoicermeyenbukulebilir-beton-uretildi.html>, 27 Temmuz 2023.
- <https://precast.org/2020/08/selfcleaningconcrete/#:~:text=Titanium%20dioxide%20activates%20in%20the,pollutants%20on%20the%20concrete%20surface>
- <https://theconstructor.org/concrete/flexiblebendable-concrete-composition-application/36008/> 28 Temmuz 2023.
- <https://www.ekoyapidergisi.org/alternatif-malzemeler-yari-saydam-beton-transparan-beton>, 9 Şubat 2022.
- <https://www.ftmmachinery.com/blog/how-to-make-recycled-concrete-aggregate-and-what-is-it-usedfor.html>, 1 Ağustos, 2023.
- <https://www.specifyconcrete.org/blog/eco-friendly-alternatives-to-traditional-concrete>, 28 Temmuz 2023.
- <https://www.techinside.com/bukulebilir-beton-gelistirdi/>
- <https://www.zekiyildirim.com.tr/ebis-elektronik-beton-izleme-sistemi-nedir-ciqli-beton-nedir>, 28 Temmuz 2023.
- JiETING, X., Xiao, Q., Zhenying, H., Yongkang, L., Ben, L., Zhengzhuan, X. (2022). Effect of superabsorbent polymer (SAP) internal curing agent on carbonation resistance and hydration performance of cement concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*, 3485373, 1-13. doi: <https://doi.org/10.1155/2022/3485373>
- Johann, S., Strangfeld, C., Müller, M., Mieller, B., Bartholmai, M. (2017). RFID sensor systems embedded in concrete- requirements for long-term operation. *Materials Today: Proceedings*, 4, 5827-5832. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.06.053>
- Juergen, H. (2007). A new system for translucent concrete-Application Potentials. *Proceedings*, 51, 28-29.
- Kamal, M.M., Safan, M.A., Bashandy, A.A., Khalil, A.M. (2018). Experimental investigation on the behavior of normal strength and high strength self-curing self-compacting concrete. *Journal of Building Engineering*, 16, 79-93. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.12.012>
- Kaupilla, I. (2022). 3D concrete printing – The ultimate guide, updated Feb 16, 2022, Erişim adresi: <https://all3dp.com/1/3d-concrete-printing-guide>
- Kazemian, F., Rooholamini, H., Hassani, A. (2019). Mechanical and fracture properties of concrete containing treated and untreated recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 209, 690-700. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.179>
- Kazmi, S.M.S., Munir, M.J., Wu, Y.F., Patnaikuni, I., Zhou, Y.W., Xing, F. (2020). Effect of recycled aggregate treatment techniques on the durability of concrete: A comparative evaluation. *Construction and Building Materials*, 264, 120284. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120284>
- Le, T.T., Austin, S.A., Lim, S., Buswell, R.A. Gibb, A.G.F., Thorpe, T. (2012). Hardened properties of high performance printing concrete, *Cement and Concrete Research*, 42(3), 558-566.
- Lee, Y.S., Park, W. (2018). Current challenges and future directions for bacterial self-healing concrete. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 102, 3059-3070. doi: <https://doi.org/10.1007/s00253-018-8830-y>
- Li, V.C., Herbert, E. (2012). Robust self-healing concrete for sustainable infrastructure. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 10(6), 207-218. doi: <https://doi.org/10.3151/jact.10.207>
- Li, X., Korayem, A.H., Li, C., Liu, Y., He, H., Sanjayan, J.G., Duan, W.H. (2016). Incorporation of graphene oxide and silica fume into cement paste: a study of dispersion and compressive strength, *Construction and Building Materials*, 123, 327-335. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.022>
- Likes, L., Markandeya, A., Haider, M.M., Bollinger, D., McCloy, J.S., Nassiri, S. (2022). Recycled concrete and brick powders as supplements to Portland cement for more sustainable concrete. *Journal of Cleaner Production*, 364, 132651. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132651>
- Lim, S., Buswell, R.A., Le, T.T. (2012). Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Autom Constr.*, 21, 262-268.

- Lokeshwari, M., Pavan, B.R., Bandakli, S.R., Tarun, P., Sachin, Kumar, V. (2021). A review on self-curing concrete. *Materials today: Proceedings*, 43(2), 2259-2264. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.859>
- Losonczy, A. (2010). Translucent building block and a method for manufacturing The same. *US Patent Application Publication*, America.
- Martinez-Garcia, R., Rojas, M.I.S., Jagadesh, P., Lopez-Gayarre, F., Moran-del-Pozo, J.M., Juan-Valdes, A. (2022). Effect of pores on the mechanical and durability properties on high strength recycled fine aggregate mortar. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e01050. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01050>
- Mazari, M., Aval, S.F., Rodriguez-Nikl, T. (2020). Evaluating the use of recycled and sustainable materials in self-consolidating concrete for underground infrastructure applications. University Transportation Center for Underground Transportation Infrastructure. California State University. Erişim adresi: <https://rosap.nrl.bts.gov/view/dot/59164>
- Mechtcherine, V., Bos, F.P., Perrot, A., Leal da Silva, W.R., Nerella, V.N., Fataei, S., Wolfs, R.;J.M., Sonebi, M., Roussel, N. (2020). Extrusion-based additive manufacturing with cement-based materials – Production steps, processes, and their underlying physics: A review. *Cement and Concrete Research*, 132, 106037. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106037>
- Mechtcherine, V., Nerella, V., Will, F., Näther, M., Otto, J., Krause, M. (2019). Large-scale digital concrete construction -CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3Dprinting. *Automation in Construction*, 107, 102933. doi:<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102933>
- Mehta, P.K. (1999). Advancements in concrete technology, *Point of View: Reflections About Technology Choices*, 69-76.
- Memon, S.A., Bekzhanova, Z., Murzakarimova, A. (2022). A Review of improvement of interfacial transition zone and adherent mortar in recycled concrete aggregate, *Buildings*, 12(10), 1600. doi:<https://doi.org/10.3390/buildings12101600>
- Mousavi, M. A., Sadeghi-Nik, A., Bahari, A., Ashour, A., Khayat, K.H. (2022). Cement paste modified by nano-montmorillonite and carbon nanotubes. *ACI Materials Journal*, 119, 173-185. doi:<https://doi.org/10.14359/51734612>
- Mousavi, M.A., Sadeghi-Nik, A., Bahari, A., Jin, C., Ahmed, R., Ozbakkaloglu, T., Brito, J. (2021). Strength optimization of cementitious composites reinforced by carbon nanotubes and titania nanoparticles. *Construction and Building Materials*, 303, 124510. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124510>
- Nachiar, S., Sekar, A., Sarjune, N.A., Kumaresan, M. (2023). Effect of steel fiber in SIFCON using GGBS as binder replacement, *Materials Today: Proceedings*, 93, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.281>
- Nano-particles. (2023). Erişim adresi: <https://nanografi.com/popular-products/>
- Neeladharan, C., Anbarasan, M., Sathish, P. (2018) Experimental investigation on bendable concrete by using admixtures. *Suraj Punj Journal for Multidisciplinary Research*, 8, 11, 69-78.
- Nielsen, C.V., Glavind, M. (2007). Danish experiences with a decade of green concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 5(1), 3-12.
- Nik, A.S., Bahari, A. (2011). Nano-particles in concrete and cement mixtures. *Applied Mechanics and Materials*, (110-116), 3853-3855. doi:<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.110-116.3853>
- Ohemeng, E.A., Ekolu, S.O. (2020). Comparative analysis on costs and benefits of producing natural and recycled concrete aggregates: A South African case study. *Case Studies in Construction Materials*, 13, e00450. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00450>
- Pacheco, J., Brito, J., Chastre, C., Evangelista, L. (2019). Experimental investigation on the variability of the main mechanical properties of concrete produced with coarse recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 201, 110-120. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.200>
- Pacheco-Torgal, F.P., Labrincha, J.A. (2012). The future of construction materials research and the seventh un millennium development goal: A few insights. *Construction and Building Materials*, 40, 729-737. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.007>
- Pangdaeng, S., Phoo-Ngernkham, T., Sata, V., Chindaprasirt, P. (2014). Influence of curing conditions on properties of high calcium fly ash geopolymer containing Portland cement as additive. *Materials and Design*, 53, 269-274. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.018>
- Patil, H.S., Raijiwala, D.B., Prashant, H., Vijay, B. (2008). Bacterial concrete-a self-healing concrete. *International Journal of Applied Engineering Research*, 3(12), 1719.

- Qin, L., Gao, X.J. (2019). Recycling of waste autoclaved aerated concrete powder in Portland cement by accelerated carbonation. *Waste Management*, 89, 254-264. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.04.018>
- Reches, Y. (2019). Concrete on Mars: Options, challenges, and solutions for binder-based construction on the Red Planet. *Cement and Concrete Composites*, 104, 103349. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103349>
- Resmi Gazete, 4708 sayılı yapı denetimi hakkında kanun kapsamında denetimi yürütülen yapılara ait taze betonun numune alınması, deneylerinin yapılması, raporlanması süreçlerinin izlenmesi ve denetlenmesine dair tebliğ, Sayı 30629, Aralık 18, 2018.
- Sağlam, R. N., Ulaş, M. A., Alyamaç, K.E. (2022). Hafif beton üretimi için gerekli olan hafif agrega miktarının yapay sinir ağı ile tahmin edilmesi. *Fırat Üniv. Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 34(2), 889-898. doi: <https://doi.org/10.35234/fumbd.1133877>
- Samani, A.K., Attart, M.M. (2014). Lateral strain model for concrete under compression. *ACI Structural Journal*, 44-453. doi: <https://doi.org/10.14359.51686532>
- Sanchez, F., Sobolev, K. (2010). Nanotechnology in Concrete-A Review. *Construction and Building Materials*, 24, 2060-2071. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.014>
- Sasanipour, H., Aslani, F. (2020). Durability properties evaluation of self-compacting concrete prepared with waste fine and coarse recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 236, 117540. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117540>
- Schutter, G.D., Lesage, K., Mechtcherine, V., Nerella, V.N., Habert, G., Agusti-Juan, I. (2018). Vision of 3D printing with concrete-technical, economic and environmental potentials. *Cement and Concrete Research*, 112, 25-36. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.06.001>
- Seifan, M., Mendoza, S., Berenjian, A. (2022). Effect of nano and micro iron oxide particles on the workability, strength and absorption rate of cement mortar containing fly ash. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26, 3898-3912. <https://doi.org/10.1080/19648189.2020.1824822>
- Servatmand, A., Şimşek O. (2018). Yüksek performanslı harç üretiminde optimum nano malzeme oranlarının belirlenmesi, *Politeknik Dergisi*, 21(2), 327-332.
- Shah, C.R., Jadhav, R.A., Patil, S.S., Agrawal, A.C., Patil, S.N., Sawant, K.P. (2017). Rainwater harvesting and reducing water logging problem by using permeable concrete, *International Journal of Modern Trends in Engineering and Research*, 4, 150-154.
- Shanghai opens world's longest 3D-printed concrete bridge, 2019, Erişim adresi: <https://edition.cnn.com/style/article/shanghai-3d-printed-bridge-scli-intl/index.html>
- Shen, W., Zhang, C., Li, Q., Zhang, W., Cao, L., Ye, J. (2015). Preparation of titanium dioxide nano particle modified photocatalytic self-cleaning concrete. *Journal of Cleaner Production*, 87, 762-765. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.014>
- Song, H.W., Saraswathy, V. (2007). Corrosion monitoring of reinforced concrete structures - a review. *Intern. Journal of Electrochemical Science*, 2: 1-28.
- Spiesz, P.R., Hunger, M. (2017). Structural ultra-lightweight concrete - from laboratory research to field trials. H. Justnes, & H. Braarud (Eds.), *Proceedings of the 11th High Performance Concrete conference, HPC Tromso*, 1-10.
- Spiesz, P.R., Hunger, M. (2017). Structural ultra-lightweight concrete - from laboratory research to field trials. In H. Justnes, & H. Braarud (Eds.), *Proceedings of the 11th High Performance Concrete conference, HPC Tromso 2017*, 1-10.
- Suhendro, B. (2014). Toward green concrete for better sustainable environment, *Procedia Engineering*, 95, 2014, 305-320. doi:<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.190>
- Sun, C., Chen, L.L., Xiao, J.Z., Singh, A., Zeng, J.H. (2021). Compound utilization of construction and industrial waste as cementitious recycled powder in mortar, *Resources, Conservation and Recycling*, 170, 105561. doi:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105561>
- Tang, Q., Ma, Z.M., Wu, H.X., Wang, W. (2020). The utilization of eco-friendly recycled powder from concrete and brick waste in new concrete: A critical review. *Cement and Concrete Composites*, 114, 103807. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103807>
- Topçu, İ.B. (1997). Physical and mechanical properties of concretes produced with waste concrete. *Cement and Concrete Research*, 27(12), 1817-1823. doi:[https://doi.org/10.1016/S00088846\(97\)00190-7](https://doi.org/10.1016/S00088846(97)00190-7)

- Topçu, İ.B. (1998). Hafif Beton Özelliklerinin Kompozit Malzeme Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Mart 1988, İstanbul.
- Topçu, İ.B., Akkan, E., Uygunoğlu, T. (2020). Self-Cleaning Concretes: An Overview. *Cement Based Composites*, 2, 6-11. doi: <https://doi.org/10.36937/cebacom.2020.002.002>
- Topçu, İ.B., Günçan, N.F. (1995). Using waste concrete as aggregates. *Cement and Concrete Research*, 25(7), 1385-1390. doi: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00131-U](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00131-U)
- Topçu, İ.B., Hocaoğlu, İ., Kara, İ. (2023). Ultra Hafif Betonda Güncel Gelişmeler. *International Journal of Engineering Research and Development*, 15 (2), 689-703. doi: <https://doi.org/10.29137/umagd.1286178>
- Topçu, İ.B., Işıkdag, B. (2008). Effect of expanded perlite aggregate on the properties of lightweight concrete, *Journal of Materials Processing Technology*, 204(1-3), 34-38. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.10.052>
- Topçu, İ.B., Şengel, S. (2004). Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. *Cement and Concrete Research*, 34(8), 1307-1312. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.12.019>
- Topçu, İ.B., Uygunoğlu, T. (2007). Properties of autoclaved lightweight aggregate concrete. *Building and Environment*, 42(12), 4108-4116. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.11.024>
- Topçu, İ.B., Uygunoğlu, T. (2016). Saydam Betonların Özellikleri Üzerine Bir İnceleme, *Teknik Dergi*, 7469-7475.
- Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, (2018). 18 Mart 2018 tarihli ve 30364 sayılı mükerrer Resmi Gazete, Afet ve Acil Yönetimi Başkanlığı, Ankara.
- Ünal, S., Canbaz, M. (2022). Effect of industrial wastes on self-cleaning properties of concrete containing anatase-TiO₂. *Revista de la Construcción. Journal of Construction*, 21(2), 493-505. <https://doi.org/10.7764/RDLC.21.3.493>
- Uygunoğlu T., Kılçık F.M., Topçu İ.B. (2021). Nesnelerin internetinin (IoT) inşaat mühendisliğindeki rolü: gömülü sensör kullanım. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 5(3), 390-399. doi: <https://doi.org/10.46519/ij3dptdi.948567>
- Uygunoğlu, T., Topçu, İ.B. (2020). The role of internet of things (IoT) in civil engineering: RFID Applications. *International Journal of 3D Printing Technologies*
- Digital Industry, 4(3), 270-277. Erişim Linki: <https://dergipark.org.tr/en/pub/ij3dptdi/archive>
- Uygunoğlu, T., Topçu, İ.B. (2021). Nesnelerin interneti (IoT) tabanlı kendini kürleyen akıllı beton üretimi. *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 8(1), 245-253. doi: <https://doi.org/10.31202/ecjse.831009>
- Uygunoğlu, T., Topçu, İ.B., Çelik, A.G. (2014). Use of waste marble and recycled aggregates in self-compacting concrete for environmental sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 84, 691-700. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.019>
- Vijay, K., Murmu, M., Deo, S.V. (2017). Bacteria based self healing concrete – A review, *Construction and Building Materials*, 152, 1008-1014. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.040>
- Wan, L., Wendner, R., Cusatis, G. (2016). A novel material for insitu construction on Mars: experiments and numerical simulations. *Construction and Building Materials*, 120, 222-231. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.046>
- Water Mass Map from Neutron Spectrometer, National Aeronautics and Space Administration, 2008.
- Weilandt, A., Grohmann, M., Bollinger, K., Wagner, M. (2009). *Rolex learning center in Lausanne: from conceptual design to execution*, Symp. of the Int. Association for Shell and Spatial Structures (50th. 2009. Valencia). Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures: Proceedings, Italy.
- Yalçinkaya, Ç., Beglarigale, A., Yazıcı, H., Yiğiter. H. (2013). Yüksek sıcaklığın SIFCON'un direncine etkisi, THBB Beton 2013 Hazır Beton Kongresi Bildirileri, İstanbul, Türkiye.
- Yang, F., Yao, Y., Wang, X., Wei, J., Feng, Z. (2022). Preparation of recycled and multi-recycled coarse aggregates concrete with the vibration mixing process. *Buildings*, 12, 1369. doi: <https://doi.org/10.3390/buildings12091369>
- Yu, Q. L., Spiesz, P., Brouwers, H. J. H. (2015). Ultra-lightweight concrete: Conceptual design and performance evaluation. *Cement and Concrete Composites*, 61, 18-28. doi: [10.1016/j.cemconcomp.2015.04.012](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.04.012)
- Zhang, D.S., Zhang, S.X., Huang, B.W., Yang, Q.N., Li, J.B. (2022). Comparison of mechanical, chemical, and thermal activation methods on the utilisation of recycled concrete powder from construction and demolition waste, *Jour. of Building Engineering*, 61, 105295. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2022.105295>