

Düşük karbonlu beton*

Düşük karbonlu beton, geleneksel betona kıyasla karbon ayak izi azaltılmış betondur. Betonun karbon ayak izini azaltmak, betonun yaşam döngüsünün her yönünü dikkate alan bütünsel bir yaklaşım gerektirmektedir. Bu da malzeme seçimi, nakliye, üretim, tasarım, satın alma ve inşaat gibi unsurları içermektedir. Düşük karbonlu beton, bu yaklaşımların bir kombinasyonu aracılığıyla emisyonları azaltmayı ve genel gömülü karbon etkisini düşürmeyi amaçlamaktadır.

Düşük karbonlu beton, sürdürülebilir inşaatı desteklemek için malzemeleri ve yöntemleri kullanmaktadır ve tamamen yeni bir malzeme, farklı mekanik özellikler veya ek maliyetler anlamına gelmemektedir. Bunun yerine, benzer veya geliştirilmiş bileşenler ve karışım tasarımları kullanarak geleneksel betonun çevresel etki açısından iyileştirmesini temsil etmektedir. Düşük karbonlu beton, geleneksel betonun dayanıklılığı, dayanımı ve uyum sağlama yeteneği gibi benzer veya daha iyi performans sağlayacak şekilde mevcut en iyi uygulamalar kullanılarak temin edilebilmektedir; çünkü düşük karbonlu beton üretiminde kullanılan en iyi uygulamalar, malzeme verimliliğinin artırılması, doğal kaynakların korunması, maliyetleri düşürmek ve performansı artırmak amacıyla Portland çimentosu içeriğinin azaltılmasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, geleneksel betonun maliyet tasarrufu önlemleri genellikle düşük karbon stratejileriyle uyumludur.

Şu anda "düşük karbonlu beton" teriminin evrensel olarak kabul edilmiş ve yaygınlaşmış niceliksel bir tanımı bulunmamaktadır, ancak bu kapsamda çalışmalar devam etmektedir. Geleneksel betonun karbon ayak izini sürekli olarak düşürmeyi amaçlayan malzeme bilim ve mühendislik teknolojileri hızla gelişmektedir. Bu yenilikler, beton bileşenlerinin üreti-

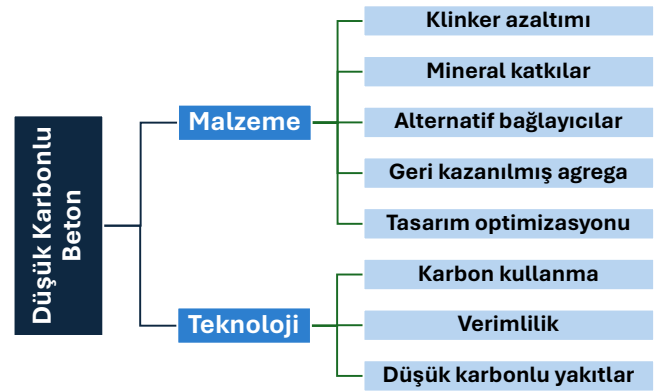
Low-carbon concrete*

Low-carbon concrete is the one with a reduced carbon footprint compared to traditional concrete. Reducing the carbon footprint of concrete requires a holistic approach that takes every aspect of the concrete's life cycle into account. This includes elements such as material selection, transportation, production, design, purchasing, and construction. Through a combination of these approaches, low-carbon concrete aims to reduce emissions and the overall embedded carbon impact.

minden kaynaklanan karbon emisyonlarının azaltılmasından ve optimize edilmiş karışım tasarımlarından, hizmet ömrünün sonunda betonun yeniden kullanılmasına kadar uzanmaktadır.

Beton için gömülü karbon azaltma yöntemleri

Betonda gömülü karbonun azaltılması, verimli ve etkin kaynak yönetimiyle başarılabilmektedir. Karbon azaltımına yönelik stratejilerin çoğu, geleneksel maliyet tasarrufu önlemlerinin optimize edilmiş bir şekilde uygulanmasını içermektedir. Şekil 1'de düşük karbonlu beton üretmek için malzeme ve teknoloji alanındaki yöntemler belirtilmektedir.



Şekil 1. Düşük karbonlu beton üretimi için bazı yöntemler

1) Klinker İçeriğini Azaltma

Daha önce de belirtildiği üzere çimento, betonun ağırlıkça ortalama %12'sini temsil etmektedir; ancak betondaki gömülü karbonun %90'ını oluşturmaktadır [1]. Büyük resme

(*) Türkiye Hazır Beton Birliği, 2024

bakıldığında ise çimento üretiminin küresel karbondioksit emisyonlarının %8'inden sorumlu olduğu görülmektedir [2]. Çimento üretiminde oluşan karbon emisyonu azaltıldıktan sonra, birim beton hacmi başına kullanılan çimento miktarı azaltılarak ilave karbon indirme işlemi yapılabilmektedir. Çimento miktarını, daha doğru bir ifade ile klinker miktarını azaltmak için en etkili yöntemlerden birisi çevresel etkisi daha düşük olan tamamlayıcı malzemeler yani mineral katkıları kullanmaktır. Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu bu anlamda en çok bilinen malzemelerdir. Bu malzemeler kendilerini birçok yönden ispat etmiş ve standartlarda yer almıştır.

Tablo 1, çimento ve diğer çimento malzemelerinin A1-A3 gömülü karbon emisyonlarını, karşılaştırma amacıyla listelemektedir [3,4].

Tablo 1. Çimento ve çeşitli mineral katkılarda gömülü karbon emisyonu

Malzeme	Karbon emisyonu (kg CO ₂ e/ton)
CEM I	818-860
Yüksek fırın cürufu*	42-70
Uçucu kül*	4
Silis dumanı	28
Metakaolin	150-470
Doğal puzolan	<50
Kalsine doğal puzolan	300-500
Öğütülmüş kireç taşı	75
* Ekonomik alokasyon dâhil değildir.	

Türkiye Hazır Beton Birliği (THBB) tarafından yapılan bir araştırma kapsamında Türkiye'de hazır beton üreticilerinin kullandığı çimento cinslerinin kullanım oranları tespit edilmiştir [5]. Hazır beton sektörü tarafından %67 oranında CEM I 42.5, %21,4 oranında CEM II/A 42.5, %6,5 oranında CEM II/B 42.5 ve %5,1 oranında diğer çimento cinsleri kullanılmaktadır.

Low-carbon concrete uses materials and methods to support sustainable construction, and it does not mean an entirely new material, different mechanical properties, or additional costs. Instead, it represents an improvement of traditional concrete in terms of environmental impact by utilizing similar or improved components and mix designs. Low-carbon concrete can be procured using current best practices in a manner that provides similar or better performance than conventional concrete, such as its durability, strength, and adaptability because the best practices used in the production of low-carbon concrete result from reducing the content of Portland cement to increase material efficiency, safeguard natural resources, reduce costs, and improve performance.

Düşük karbonlu beton üretimi için en etkili yöntem klinker oranı düşük çimento kullanımını tercih etmektir. Ülkemizde genel olarak en çok üretilen ve tüketilen çimento cinsi %51'lik oranla CEM I 42.5 R çimentosudur [6]. Oysa AB ülkelerinde en fazla CEM II/A tipi çimento tercih edilmektedir. Bu çimento ortalama %10 daha az klinker içermektedir.

16 Mart 2024 tarihinde Resmî Gazete'de yayımlanan "Kamu İhale Sözleşmelerinde Düşük Karbon Emisyonuna Sahip Yeşil Çimento Kullanımının Yaygınlaştırılmasına İlişkin Tebliğ" ile ülkemizin net sıfır emisyon hedefine ulaşması adına oldukça önemli bir adım atılmıştır. Yayımlanan tebliğ ile 2025-2030 arasında kamu yapım işi sözleşmeleri ve çimento içerikli mal alımı ihalelerinde kullanılacak çimentoda klinker/çimento oranı en

fazla 0,80, 2030 sonrasında ise en fazla 0,75 olarak sınırlandırılmıştır. Yeşil Çimento Tebliği ile klinker/çimento oranının sınırlandırılması, özellikle kamu projelerinde kullanılacak hazır betonlarda CEM I tipi çimentodan CEM II ve CEM IV tipi çimentolara geçişi hızlandıracaktır.

Mineral katkıların üretici ve tüketici tarafından tercih edilmelelerini etkileyen üç ana husus bulunmaktadır:

1. Maliyete etkisi: Konu çevre de olsa sürdürülebilirliğin üç saçı ayağından birisi de ekonomidir. Hem üretici hem de tüketici mevcut bir ürünün maliyetinin artmasını tercih etmez. Mineral katkıları genel olarak çimentodan daha düşük fiyatlıdır. Eş miktarda çimento azaltmasalar bile genel olarak toplam birim maliyeti yükseltmezler. Nakliye önemli bir maliyet kaynağı oluşturduğu için üreticiler yakın kaynakları tercih ederler. Bu da bazen bu ürünlerin kullanımını olumsuz etkilemektedir.

2. Ürün performansına etkisi: Uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı gibi standartlarda yer alan ve teknik performansları ispat edilmiş mineral katkıları bazı projelerde neredeyse zorunlu olarak kullanılmaktadır. Özellikle sadece çimento ile üretilen betonların karşılayamayacağı bazı duraliite (dayanıklılık) koşullarını karşılamaları nedeniyle tercih edilmektedir. Bunun dışında betonda plastik rötremin (yüzeysel çatlak oluşumu) azaltılması, taze beton sıcaklığının düşürülmesi, pompalanabilirliğinin artırılması ve dayanım gelişiminin normalleştirilmesi amacıyla da kullanılmaktadır.

Tablo 2. Mineral katkı içeren düşük klinkerli çimentoların teknik avantajları

Özellik	CEM I	Düşük Klinkerli Çimentolar
Hidratasyon Isısı	Yüksek	Düşük
İşlenebilirlik ve Kıvam Koruma	Mineral katkı cinsi ve miktarına göre değişken olabilmektedir.	
Geçirimsizlik	Yüksek	Düşük
Uzun Dönem Dayanım	Düşük	Yüksek
Büzülme (rötre)	Yüksek	Düşük
Alkali-Agrega Reaksiyonu Direnci	Düşük	Yüksek
Sülfat Atağı Direnci	Düşük	Yüksek
Klorür İyonlarına Direnç	Düşük	Yüksek

3. Çevresel performans: Betondaki karbon ayak izini düşürmeleri ve atık miktarının azaltılması başlıca faydalarıdır. Özellikle yeşil bina projelerinde malzeme kategorisinde avantaj sunmaktadırlar.

Hem üretici hem de tüketici açısından faydası olan bu ürünlerin kullanımında bazı engeller de mevcuttur. Bunlar:

- Kaynaklar sınırlıdır.
- Kaynaklar üretim sahasına uzak olabilmektedir.
- Kullanım miktarları sınırlıdır.
- Bazı kaynaklar stabil ürün sağlayamamaktadır.
- Bazı malzemelere karşı ön yargılar mevcuttur.
- Uçucu kül temin edilen termik santrallerin sayısının giderek azalması beklenmektedir.
- Demir-çelik üretiminde ham madde olarak hurda kullanım oranı giderek artmaktadır.
- Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi malzemelere yurt dışından talepler artmaktadır.

Bu engelleri azaltmak ve önüne geçmek için yapılması gerekenler:

- Üreticiler nakliye açısından kendilerine avantaj sağlayacak mineral katkıları araştırmalıdır. Volkanik kül, volkanik cüruf, kalker tozu, kalsine edilmiş kil vb. alternatif malzemeler de göz önünde bulundurulmalıdır.
- Reçete optimizasyonu ile farklı beton sınıfları ve müşteri talepleri doğrultusunda çeşitli beton karışımları çalışmalıdır.
- Müşterilere ve yapıları denetleyen taraflara mineral kat-

kıların avantajları standartlar çerçevesinde ve akademik çalışmalarla anlatılmalıdır.

- Kaynakların stabil olması için üretici ile temasa geçip gerekli iyileştirmelerin yapılması ve herhangi bir değişiklik durumunda hızlı bir şekilde bilgi alınması sağlanmalıdır.
- Mineral katkıların çimento çeşitleri ve kimyasal katkıları ile uyumu araştırılmalı ve gerekli testler yapılmalıdır.
- Yüksek fırın cürufu gibi erken dayanımdan ziyade geç dayanıma etkisi olumlu olan mineral katkı kullanımı durumunda, 28 günden ziyade 56 gün veya daha ileri yaş dayanımlarının dikkate alınması sağlanmalıdır.

Çimento miktarını standartlar kapsamında kabul edilebilir seviyede azaltmak için alınabilecek diğer aksiyonlar ise:

- Standartlar açısından kullanılabilir nitelikte olsa dahi zayıf, kirli, yassı özelliklerde agrega kullanılmamalıdır.
- Metilen mavisi değeri yüksek olan (dayanımı olumsuz etkileyen kil vb. istenmeyen içerik) ince malzeme kullanımından olabildiğince sakınılmalıdır.
- Performans açısından daha yüksek nitelikte su azaltıcı katkıları tercih edilmelidir.
- Yüksek dayanım sınıflarında küp yerine silindir numune ile kalite kontrol süreçlerinin takip edilmesi sağlanmalıdır. (Bu konuda sadece üretici değil yapıları denetleyen makamların da birlikte çalışması gerekmektedir.)
- Malzemelerin uyumluluğu araştırılmalıdır. Kimyasal katkı - çimento, çimento - mineral katkı uyumu bu anlamda öne çıkmaktadır.
- Beton bileşenlerinin olabildiğince stabil olması ve üretim süreçlerinin de uygun olması ile standart sapmanın düşük değerlerde kalması sağlanmalıdır.
- Agregada gradasyonu optimize edilmelidir. Pompalanabilirlik olumsuz etkilenmeyecek şekilde betonda maksimum doluluk sağlanmalıdır.

Karbon ayak izini azaltmanın etkili bir diğer yolu da betondaki çimento miktarını düşürmektir. Sıklıkla, gereksinimleri karşılamak için gerekenden daha fazla çimento kullanılabilir. Bunun nedeni geleneksel bakış açısı, hızlı dayanım kazanma isteği ve karbona odaklı tasarım bilinçsizliğinden kaynaklanmaktadır. İngiltere’de 90 farklı beton karışımı ile “yapılan bir çalışmada, aynı beton sınıfı için kullanılan çimento miktarının 300 kg/m³ ile 525 kg/m³ arasında değiştiği tespit edilmiştir [7]. Daha fazla çimento kullanmanın çok farklı teknik nedenleri olabilmektedir, ancak bu denli bir varyasyonu açıklamaya yetmeyecektir. Çimento dozajının performansı sağlamak nedeniyle artırılmasının başlıca nedenleri aşağı belirtilmiştir:

- Yanlış veya yetersiz beton tasarımı
- Kirli ince ya da iri agrega kullanımı
- Hatalı agrega gradasyonu
- Yanlış kimyasal katkı seçimi
- Karıştırma ekipmanlarından kaynaklı kusurlar
- Malzemelerin yoğunluklarının yanlış hesaplanması
- Betonun numune alımından dayanım testine kadar olan süreçteki hatalar

Kimyasal katkılar her ne kadar miktarsal olarak en düşük oranda kullanılan beton bileşeni olsa da betonun özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Ayrıca, beton kimyasal katkıları betonun karbon ayak izini azaltmada son derece etkilidir. Bu kapsamda, kimyasal katkıların betonun dekarbonizasyonu ile ilgili potansiyelini detaylıca incelemek gerekmektedir. Modern betonun temel bir bileşeni hâline gelen kimyasal katkılar, benzersiz ve yenilikçi bina tasarımlarına, operasyonel kolaylıklara, uzun süreli dayanıklılığa, geliştirilmiş beton davranış parametrelerine ve genel olarak sürdürülebilir beton karışımlarına olanak tanımaktadır. Katkıların beton karışım tasarımında karbon emisyonuna etkilerinin ihmal edilebilir düzeyde olmasıyla birlikte, özellikle çimento azaltımı sayesinde betonun karbon ayak izi üzerinde olumlu etkisi oldukça yüksektir.

Katkı Üreticileri Birliği (KÜB) tarafından yapılan bir çalışmaya göre, süper akışkanlaştırıcı katkılar 1 metreküp hazır betonun karbon ayak izini, katkısız betona kıyasla, 60-170 kg azaltma potansiyeline sahiptir [8]. Bu da %17-35 oranında azaltım anlamına gelmektedir. Mevcut durumda neredeyse tüm hazır beton üretiminde kimyasal katkıların kullanıldığı düşünülse de daha etkili kimyasallar ile yüksek oranlarda karbon azaltımına ulaşmak mümkün olabilmektedir.

Ülkemizde Katkı Üreticileri Birliği üyeleri, Avrupa Katkı Üreticileri Federasyonu Birliği (EFCA) model Çevresel Ürün Beyanları (EPD) ile ürünlerini arz etmektedir. Bu katkıların beşikten kapağa (A1-A3) süreci kapsamındaki karbon ayak izi Tablo 3'te belirtilmiştir³⁰.

Tablo 3. EFCA EPD'lerde yer alan katkıların karbon ayak izi

Kimyasal Katkılar	A1 - A3 Karbon emisyonu (kg CO ₂ e) / kg
Akışkanlaştırıcı/Süper akışkanlaştırıcı	1,53
Priz hızlandırıcı	1,34
Priz yavaşlatıcı	1,23
Sertleşmeyi hızlandırıcı	1,79
Hava sürükleyici	0,439
Su geçirimsizlik	2,67

2) Klinker/çimento üretiminde enerji verimliliğinin arttırılması

Emisyonların önemli bir kısmı çimento üretimi ve dağıtımıyla ilişkilidir. Bunun yaklaşık %50-60'ı klinkerin kalsinasyon işleminden ve yaklaşık %30-40'ı yakıtın yanmasından kaynaklanmaktadır. Klinker üretimi verimliliğinin artırılması konusunda kayda değer ilerlemeler kaydedilmiştir ancak verimliliğin daha da artırılması olanağı mevcuttur. Alternatif yakıtların yanı sıra karbon yakalama, kullanma ve depolama (CCUS) yöntemlerinin uygulanması, çimento üretimiyle ilgili muhtemelen en önemli emisyon azaltımlarına yol açacaktır. Üretim sürecindeki bu iyileştirmeler, ortaya çıkan betonun performansını olumsuz yönde etkilemeden, betondaki gömülü karbonu önemli ölçüde azaltabilir.

3) Karbon Ayak İzi Düşük Yenilikçi Bağlayıcıların Kullanımı

Alternatif çimentolar bir anlamda çimento dünyasındaki paradigma değişikliğini temsil ederken, gelecekteki çimentonun nasıl olması gerektiğine dair çalışmaların bir sonucudur. Her ne kadar bazı alternatif çimentoların literatüre girişi 50-60 yıl öncesine dayansa da son yıllarda bu çimentolar (bağlayıcılar) özellikle karbon emisyonu açısından faydaları ile öne çıkmış ve daha fazla araştırmaya konu olmuştur. Bunlardan bazıları aşağıda belirtilmiştir.

- **AAFA:** Alkali ile aktive edilmiş uçucu kül / Alkali activated fly ash
- **AAS:** Alkali ile aktive edilmiş cüruf / Alkali activated slag
- **CCSC:** Karbonatlı kalsiyum silikat çimentosu / Carbonated calcium silicate cement
- **CSAC:** Kalsiyum sülfat alüminat çimentosu / Calcium sulfatoaluminate cement
- **MOC:** Magnezyum oksiklorür çimentosu / Magnesium oxychloride cement
- **MPC:** Magnezyum fosfat çimentosu / Magnesium phosphate cement
- **RBC:** Reaktif belit çimentosu / Reactive belite cement

4) Beton tasarımının optimizasyonu

Erken dayanım ihtiyacı için mineral katkı içeriği daha düşük olan karışımlar, erken dayanım ihtiyacı olmayan yapı elemanları için ise daha yüksek oranlarda mineral katkılı karışımlar kullanılabilir. Bunun için de yüksek erken dayanıma ihtiyaç duymayan bina bileşenleri tanımlanmalıdır.

Agregaların sürekli dağılımı ile beton formülasyonunun optimizasyonu, granüler iskeletin nihai gözenekliliğini azaltır. Agregaların doldurmadığı bu boşlukları çimento hamuru (pastası) doldurur. Bu nedenle, granüler yapının optimize

edilmesi, belirli bir basınç dayanımı için gerekli olan çimento miktarını azaltır [9]. Standartlar çok daha azına izin verse de hazır beton üretiminde ortalama 300 kg/m³ çimento kullanılmaktadır [10]. Bu çimentonun bir kısmını ince dolgu maddeleri ile ikame etmek ve işlenebilirlik nedeniyle benzer hacimde hamur fazı tutmak mümkündür.

Karışımı optimize etmede zorluk yaratan ikinci neden, kaliteli agrega teminidir. Agregalar da yerel malzemelerdir. Bu nedenle, yerel taş ocağı iyi bir agrega çeşitliliği sağlayamazsa, optimize edilmiş bir granüler iskelet tasarlamak mümkün olmayabilir ve gerekli dayanım ve işlenebilirlik performansını elde etmek için daha fazla çimento gerekebilir. Agregada kalitesi ve gradasyonu çimento dozajının azaltılmasında oldukça etkili yöntemler olarak öne çıkmaktadır.

Dijitalleşme, betondan kaynaklanan CO₂ emisyonlarını azaltmak için önemli fırsatlar sunmaktadır. Bina bilgi modellemesi (BIM) sayesinde yapıların hem üretim hem işletme hem de kullanım sonrası aşamalarındaki çevresel performansları daha proje başlamadan hesaplanabilmekte ve yapıların yaşam döngüsü analizi dijital ortamda simüle edilebilmektedir. Dijitalleşme ayrıca betonun nakliye sırasında izlenmesine ve doğru şekilde dökülmesine yardımcı olmaktadır. Çimento ve betona ilişkin veriler, karbon ayak izinin belirlenmesini sağlamak, inşaatta kullanılan malzemelerin kaynağını göstermek ve binaların kullanım ömrü boyunca enerji performansını izlemek için müteahhit ve bina kullanıcılarına sunulmaktadır. Dijitalleşme ayrıca beton performansının tahmin edilmesine, agrega performansının belirlenmesine ve katkı maddelerinin optimize edilmesine yardımcı olabilmektedir [11].

5) Projelerde daha yüksek dayanımlı beton tercih edilmesi

Daha yüksek dayanım sınıfında beton elde etmek için genel olarak çimento, daha doğru bir tabir ile bağlayıcı malzeme miktarının artması gerekmektedir. Bu karbon emisyonu açısından olumsuz gibi gözükse de gerçekte kesinliği yoktur. Beton dayanımının artması sonucunda taşıyıcı elemanlarının ebadı ve çelik donatı miktarı azalabilmektedir. Bu nedenle toplam fayda hesaplamasında bu unsurlar da dikkate alınmalıdır.

6) Yapısal tasarım optimizasyonu

Özellikle döşemeler yapıya en fazla yük getiren elemanlar olarak öne çıkmaktadır. Gerekli dayanım şartlarını sağlayan hafif beton kullanımı ile yapının maruz kaldığı yük hafifleyecek ve bu sayede daha az veya daha düşük kesitli taşıyıcı elemanlara ihtiyaç duyulacaktır.

Yapısal optimizasyon, aynı yük taşıma kapasitesini daha az malzeme ile gerçekleştirme imkânı sağlar. Yüksek teknolojik

hazırlık düzeyine sahip örnekler, önerilmeli boşluklu döşemeler veya boşluklu döşemelerdir. Bu sistemlerin uygulanması, orijinal beton hacminin %35'ine kadar tasarruf edilmesini sağlayabilmektedir. Yalnızca gerekli yükü taşımak için gerektiği kadar malzeme kullanan optimize edilmiş (organik) şekilli elemanlar konusunda yeni gelişmeler beklenmektedir [12]. Paslanmayan donatı kullanımı, beton kaplamanın en aza indirilmesine izin verdiği için beton hacimlerini azaltabilen başka bir teknolojidir.

Betonarme bir yapının inşa edilme şekli, ortaya çıkan CO₂ emisyonları üzerinde dolaylı bir etkiye sahiptir. Kalıbın içine pompalanan beton genellikle daha yüksek bir bağlayıcı içeriğine ihtiyaç duyar ve bu nedenle pompalanmadan dökülen betona kıyasla daha yüksek bir CO₂ ayak izine neden olur [13].

Prefabrikasyon gibi daha sanayileşmiş bir süreç, fabrikada daha yüksek hassasiyet ve daha az atık yoluyla daha düşük malzeme talebine yol açabilir. Prensipten olarak, modüler bir üretim, inşaatta daha yüksek bir verimlilik sağlar. Bununla birlikte, özellikle büyük boyutlu elemanlar için nakliye mesafeleri kırsal alanlarda prekast betonu, ekonomik olarak zorlaştırabilir. Eklemeli (3 boyutlu) imalat ve yeni kalıp teknolojileri, malzeme açısından verimli şekiller sağlayabilir [14].

Cambridge Üniversitesi tarafından hazırlanan bir raporda, yapısal elemanların tüm güvenlik faktörleri uygulandıktan sonra tipik olarak kapasitelerinin yalnızca %60-80'ini kullanmak üzere tasarlandığı vurgulanmıştır [15]. Malzemenin performansındaki belirsizlik, beton elemanları ile ilgili olarak bu aşırı tasarımın belki de temel bir nedenidir. Örneklem tutarlılığı, agrega performans varyasyonları, ortam sıcaklığı, operatör etkisi ve ek belirsizlikler göz önüne alındığında, tasarımcıların neden çok dikkatli davrandığı daha iyi anlaşılabilir. Bu nedenle, betonun davranışının gerçek zamanlı olarak daha iyi anlaşılması, kalite güvencesinin geliştirilmesine ve aşırı tasarımın en aza indirilmesine yardımcı olabilir.

Geometri kullanılarak, daha fazla betonun basınç bölgesinde kalması için kalıpları ayarlamak mümkündür. Karmaşık kalıplar gerektiren betonarme yapılar, işçilik maliyetleri ve operasyonel zorluklar nedeniyle tercih edilmemektedir ancak bu sorunlar, günümüzdeki bilgisayar programlarının gücü ve gelişmiş dijital üretim teknikleri ile çözülebilmektedir. ETH Zürih'teki araştırmacılar, gereksiz beton kullanımını önlemek için yenilikçi kalıp teknikleri kullanarak yalnızca basınca dayalı yapıların oluşturulması için hesaplama tasarımının nasıl uygulanacağı üzerinde çalışmaktadır. Bu, görsel olarak çarpıcı ve aynı zamanda malzeme açısından verimli yapılara neden olabilecektir [16].

7) Geri kazanılmış agrega kullanımı

Kentsel çevrede en yaygın malzemeler inşaat malzemeleridir. Ömrünü tamamlayan yapıların yıkılması ile açığa çıkan atıkların çoğu geri dönüştürülebilir, ancak bunların çoğu aşağı geri dönüştürülür (downcycle), yani malzeme değer kaybeder ve genelde ait oldukları sektör dışında kullanılır. Beton atıkları yol dolgularında kullanılabilir, ancak nadiren yeni binalar için bir ham madde olarak değerlendirilir. Aslında bu milyonlarca ton malzemeyi yeni inşaat projeleri için yeniden kullanmanın birçok avantajı vardır. Malzemeler zaten şehirlerde yer almaktadır. Bu nedenle uzun tedarik zincirlerine gerek kalmaz. Döngüsel ekonomi stratejisine sahip tüm şehirler için kent madenciliği, bu malzemelerden mümkün olduğu kadar uzun süre boyunca değer elde edebilir.

Geri kazanılmış agrega içeren betonun özellikleri hem agrega türünden hem de karışımdaki oranından güçlü bir şekilde etkilenir. Geri kazanılmış agrega ikamesi, su emilimini artırarak betonun dayanım ve dayanıklılığını azaltabilir ve dolayısıyla işlenebilirliği korumak için süperakışkanlaştırıcıyı ve su dozajını arttırabilir [17]. Sonuç olarak, geri kazanılmış agrega kullanımı çimento talebini 20-40 kg/m³ artırabilmektedir [18]. Buna karşılık iyi kalitede geri dönüştürülmüş yerel agregalar, nakliye tasarrufları da dâhil olmak üzere genel olarak karbon emisyonu tasarrufu sağlayabilir ancak, kullanımlarını doğal agregalarla karşılaştırmak için ayrıntılı bir sürdürülebilirlik ve karbon değerlendirmesi yapılması gerekmektedir.

Beton atığı hem agrega hem de çimento pastası içermektedir. Çimento pastasının geri kazanılması da son derece etkilidir. Bu ince malzeme, kalsiyum kaynağı olarak klinker üretimi için bir ham madde olarak etkin şekilde kullanılabilir. Bu sayede proses kaynaklı emisyonlar düşürülebilmektedir [19]. Ülkemizde mevcut durumda inşaat ve yıkıntı atıklarına yönelik seçici yıkım mevzuat kapsamında bir koşul olarak belirtiliyor olsa da pratikte uygulanmamaktadır. İnşaat ve yıkıntı atıkları genel olarak atık sahalarında depolanmakta ve çok az sayıda geri kazanım tesisinde geri dönüşüme tabi tutulmaktadır. Buradan elde edilen geri kazanılmış agregalar ise alt temel dolgusu olarak değerlendirilmektedir.

8) 28 gün yerine daha ileri yaş dayanımlarının dikkate alınması

Hem Amerikan ASTM hem de Avrupa EN standartlarında 28 günlük dayanım zorunlu bir parametre değildir. Üretici, kullanıcı ve denetçi arasında önceden alınacak bir kararla 56 veya 90 günlük dayanımlar dikkate alınabilir. Yani 28 günde beton dayanımının standart limitini sağlamasından ziyade ileri yaşlarda sağlaması tercih edilebilir. Bu sayede özellikle sıcak havalarda daha yüksek miktarda mineral katkı kullanımının önü açılabilir.

Tasarım varsayımlarıyla ilgili bir diğer nokta, beton dayanımını değerlendirirken betonun yaşının önemidir. Beton dayanımı genellikle 28 günde test edilir. Bu, sadece Portland çimentosundan yapılmış betonun dayanımının genellikle nihai dayanıma ulaştığı tipik zamandır. Betonda mineral katkılar kullanıldığında, mineral katkılarının reaktifliği Portland çimentosu klinkerinden daha yavaş olduğu için dayanım gelişimi de daha yavaştır. Özellikle, yüksek miktarda mineral katkı içeren beton daha uzun bir kürleme süresine ihtiyaç duymaktadır. Bu sürenin sonunda sadece Portland çimentosundan yapılmış betona benzer bir dayanım performansına sahip olmaktadır [20,21]. Bu nedenle, beton dayanımının 28 günden sonra, örneğin 56 günde değerlendirilmesi daha uygun olmaktadır.

9) Çevresel etki sınıfları

Genel olarak bir proje üzerinde çalışan mühendisler ve tasarımcılar genellikle tek bir çevresel etki sınıfı belirlemekte ve bu sınıf da en baskın etkiye ait olmaktadır ancak bir ev için dış beton ve iç beton aynı kısıtlamalara tabi değildir. Örnek olarak, bir ev XC1 C25/30 çevresel etki sınıfının yeterli olacağı iç mekân betonu ile XC4 C35/45'ten oluşabilen dış hava koşullarına maruz kalan beton arasında bir ayrımla inşa edilirse önemli miktarda karbon tasarrufu yapılabilecektir.

10) Yakın tedarik kaynaklarının tercih edilmesi

Beton hem üretimi hem de ham maddelerin tedariki açısından yerel bir malzemedir. Yine de bu konuda yapılacak iyileşmelerin etkisi oldukça büyük olacaktır. Betonda ağırlıkça en fazla kullanılan malzeme agregadır. 1 m³ beton üretmek için yaklaşık 2 ton iri ve ince agrega kullanılır. Agregadan sonra ise çimento gelmektedir. Bu nedenle başta agrega ve çimentonun üretim tesisine olabildiğince yakın yerlerden tedarik edilmesi, nakliye nedeniyle oluşacak karbon emisyonunu azaltacaktır ancak bu durum her zaman geçerli olmayabilir. Yakın bir kaynağa göre daha uzakta olan bir kaynaktan tedarik edilen agrega ya da çimentonun beton karışımında sağlayacağı avantaj daha yüksek olabilir. Bu yüzden konuya daha geniş bir çerçeveden bakmak faydalı olacaktır. Beton üretimiyle ilgili en büyük CO₂ emisyon kaynaklarından biri, şantiyeye ulaşım ve betonu ihtiyaç duyulan yere pompalamak için gereken enerjidir. 2050 yılına kadar tüm taşımacılığın elektrik, hidrojen veya her ikisinin bir kombinasyonu ile sıfır emisyonlu araçlar tarafından gerçekleştirileceği varsayılmaktadır.

11) Üretimde ve nakliyede enerji verimliliği

Hazır beton üretimi, çimento üretiminin aksine enerji yoğun bir sektör değildir. Üretim tesisinde ham maddelerin taşınması, karıştırılması, gerekli ise soğutma ve ısıtma işlemleri

için enerji tüketilmektedir. Bu süreçlerin dışında ham maddelerin tesise ve ürünün müşteriye nakliyesi esnasında da enerji tüketimi gerçekleşmektedir. THBB tarafından 2023 yılında yapılan araştırmaya göre 1 metreküp hazır beton üretiminde ortalama 2,8 kWh elektrik enerjisi ve 3,6 litre yakıt tüketilmektedir. Enerji tüketimi kaynaklı karbon ayak izi, 1 metreküp hazır betonun toplam karbon ayak izi içinde göreceli olarak düşük bir pay olsa da milyonlarca metreküplük bir üretim düşünüldüğünde bu değer büyük olduğu daha net anlaşılacaktır. Enerji kaynaklı karbon ayak izini azaltmak için üreticiler aşğıdaki aksiyonları almalıdır:

- Tüm transmikser, pompa ve kepçe operatörlerinin ekonomik sürüş açısından eğitilmesi ve operatörlerin performansının izlenmesi
- Hazır beton tesislerinde uygunsa yenilenebilir enerji yatırımları yapılması
- Elektrikle çalışan transmikser ve kamyonların tercih edilmesi
- Betonun karıştırma süresi ile ilgili optimizasyon yapılması
- Rota optimizasyonu yapılarak en ekonomik rotaların belirlenmesi
- Transmikser, pompa ve kepçe gibi tüm iş makinelerinin verimliliğinin takip ve analiz edilmesi
- Sevkiyat süreçlerinin dijitalleştirilmesi

Kaynaklar

1. Hazır Beton Yaşam Döngüsü Rehberi, THBB, 2021
2. Lehne, J., and Preston, F., 2018, Making Concrete Change Innovation in Low-carbon Cement and Concrete, The Royal Institute of International Affairs
3. The Concrete Center, "Whole-Life Carbon and Buildings," MPA The Concrete Centre 2016, 2016.
4. Arup, "Low Carbon Concrete: Practical guidance for Arup engineers," 2019.
5. Hazır Beton Yaşam Döngüsü Rehberi, THBB, 2021
6. Türk Çimento 2023 İstatistikleri
7. <https://industryeurope.com/sectors/construction-engineering/structural-concrete-in-a-zero-carbon-future/>
8. Beton Kimyasal Katkılarının Net Sıfır Karbon Hedefindeki Rolü, KÜB, 2023.
9. Müller, H.S, Haist, M., Vogel, M., "Assessment of The Sustainability Potential of Concrete and Concrete Structures Considering Their Environmental Impact, Performance and Lifetime," *Constr. Build. Mater.* 67 (2014) 321-337. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.01.039.

10. Müller, C., "Use of cement in concrete according to European standard EN 206-1," *HBRC J.* 8 (2012) 1-7. doi:10.1016/j.hbrj.2012.08.001.
11. Cementing the European Green Deal, Cembureau Publication, 2020.
12. Cembureau, Cementing the European Green Deal, Cembureau Publication, 2020.
13. Abebe, J., Lohaus, L., "Effects of The Composition and Amount of Paste on The Pumpability and Pump-Stability of Flowable Concretes," XXII Nordic Concrete Research Symposium, Reykjavik, Iceland, Jan 2014, Publication No. 50-2/2014.
14. Ghaffar, S.H., Corker, J., Fan, M., "Additive Manufacturing Technology and Its Implementation in Construction as an Eco-Innovative Solution," *Automation in Construction*, 93, 2018.
15. Minimising Energy in Construction (MEICON) Survey Report, University of Cambridge, 2018. <https://www.repository.cam.ac.uk/handle/1810/287863>
16. <https://industryeurope.com/sectors/construction-engineering/structural-concrete-in-a-zero-carbon-future/>
17. Robalo, K., Costa, H., Carmo, R., Júlio, E., "Experimental Development of Low Cement Content and Recycled Construction and Demolition Waste Aggregates Concrete," *Construction and Building Materials*, Volume 273, 2021.
18. Knoeri, C., Sanyé-Mengual, E., Althaus, H.J., "Comparative LCA of Recycled and Conventional Concrete For Structural Applications," *Int J Life Cycle Assess* 18, 909-918, 2013. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0544-2>
19. Pellegrino, C., Faleschini, F., "Recycled Aggregates for Concrete Production: State-of-the-Art. In: Sustainability Improvements in the Concrete Industry," *Green Energy and Technology*. Springer, Cham, 2016. https://doi.org/10.1007/978-3-319-28540-5_2.
20. Pellegrino, C., Faleschini, F., "Recycled Aggregates for Concrete Production: State-of-the-Art. In: Sustainability Improvements in the Concrete Industry," *Green Energy and Technology*. Springer, Cham, 2016. https://doi.org/10.1007/978-3-319-28540-5_2.
21. Toutanjia, H., Delatte, N.; Aggoun, S., Duval, R.; Danson, A., "Effect of Supplementary Cementitious Materials on The Compressive Strength and Durability of Short-Term Cured Concrete," *Cement and Concrete Research*, 34, 2004.