



THBB AKADEMİ

TEKNİK BÜLTEN

19

DÜŞÜK KARBONLU BETON VE TÜRKİYE'DE MEVCUT DURUM

TÜRKİYE HAZIR BETON BİRLİĞİ YAYINIDIR.
Aralık, 2025

DÜŞÜK KARBONLU BETON VE TÜRKİYE’DE MEVCUT DURUM*

1. Giriş

İnşaat sektörü, küresel sera gazı emisyonlarının yaklaşık %8’inden sorumlu olan çimento üretimi nedeniyle çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük bir etkiye sahiptir [1]. Çimento üretiminde klinker kullanımı, yüksek sıcaklıkta kalsinasyon sürecini gerektirdiğinden, doğrudan karbon salımına neden olmakta ve karbon ayak izini artırmaktadır [2]. Bu durum, düşük karbonlu beton alternatiflerinin geliştirilmesini ve kullanımını teşvik etmektedir.

Düşük karbonlu betonlar, klinker içeriğinin azaltılması, alternatif bağlayıcı malzemelerin kullanımı ve üretim süreçlerinin optimize edilmesi yoluyla çevresel etkileri minimize eden yenilikçi beton türleridir [3]. Bu kapsamda, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve kalker gibi mineral katkı maddeleri, geleneksel Portland çimentosunun yerine kısmi bağlayıcı olarak kullanılarak hem karbon salımının düşürülmesi hem de döngüsel ekonomi prensiplerine katkı sağlanması hedeflenmektedir [4].

Türkiye’de düşük karbonlu beton kullanımı hem çimento üreticilerinin sürdürülebilirlik stratejileri hem de ulusal mevzuat ve uluslararası çevresel taahhütler çerçevesinde giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Avrupa Yeşil Mutabakatı ve uluslararası karbon azaltım politikaları, Türkiye’deki inşaat sektörünün düşük klinkerli çimentolar ve alternatif bağlayıcı sistemlere yönelimini hızlandırmaktadır [5]. Bununla birlikte, teknik standartlar, maliyet faktörleri ve uygulama zorlukları, düşük karbonlu betonların yaygınlaşmasını sınırlayan başlıca etmenler arasında yer almaktadır [6].

Bu bildiri, düşük karbonlu betonun tanımı, özellikleri, avantajları ve Türkiye’deki mevcut durumunu ele alarak, sektördeki gelişmelerin yanı sıra karşılaşılan zorlukları ve potansiyel çözüm önerilerini tartışmayı amaçlamaktadır.

2.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 gömülü karbon etkisini düşürmeyi amaçlamaktadır.

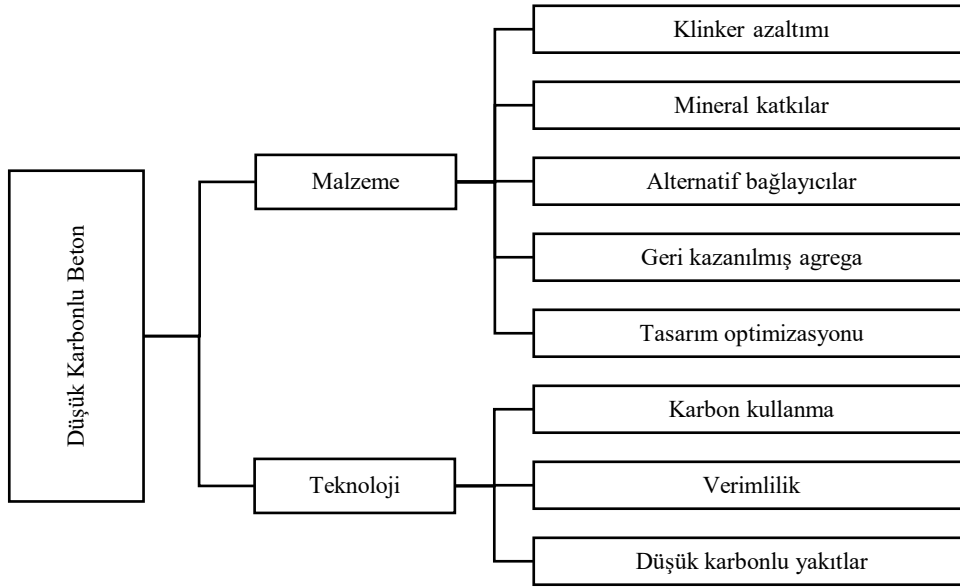
Düşük karbonlu beton, sürdürülebilir inşaatı desteklemek için malzemeleri ve yöntemleri kullanmaktadır ve tamamen yeni bir malzeme, farklı mekanik özellikler veya ek maliyetler anlamına gelmemektedir. Bunun yerine, benzer veya geliştirilmiş bileşenler ve karışım tasarımları kullanarak geleneksel betonun 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.

* İMO 11. Ulusal Beton Kongresi’nde sunulmuştur.

Güncel durumda "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 üretiminden kaynaklanan karbon emisyonlarının azaltılmasından ve optimize edilmiş karışım tasarımlarından, hizmet ömrünün sonunda betonun yeniden kullanılmasına kadar uzanmaktadır.

2.1.Beton İçin 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

2.1.1.Klinker İçeriğini Azaltma

Çimento, betonun ağırlıkça ortalama %12'sini temsil etmektedir; ancak betondaki gömülü karbonun %90'ını oluşturmaktadır [7]. Büyük resme bakıldığında ise çimento üretiminin küresel karbondioksit emisyonlarının %8'inden sorumlu olduğu görülmektedir [8]. Çimento üretiminde oluşan karbon emisyonu azaltıldıktan sonra, birim beton hacmi başına kullanılan çimento miktarı azaltılarak ilave karbon indirgeme işlemi yapılabilir. 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'de çimento ve diğer çimentomsu malzemelerin A1-A3 kapsamı (beşikten kapiya olan süreç) gömülü karbon emisyonları kıyaslanmaktadır [9,10].

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

Türkiye Hazır Beton Birliği (THBB) tarafından yapılan bir araştırma kapsamında Türkiye’de hazır beton üreticilerinin kullandığı çimento cinslerinin kullanım oranları tespit edilmiştir [7]. 2021 yılı kapsamında 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.

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 [5]. 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. Ayrıca 2021 yılında yayımlanan TS EN 197-5 Standardında yer alan daha düşük klinker içeriğine sahip CEM II/C-M ve CEM VI cinsi çimentolar da önümüzdeki dönemde önem kazanacaktır.

Mineral katkıların üretici ve tüketici tarafından tercih edilmelerini 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 katkılar genel olarak çimentodan daha düşük fiyatlıdır. Eş miktarda çimento azaltımlar 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 katkılar bazı projelerde neredeyse zorunlu olarak kullanılmaktadır. Özellikle sadece çimento ile üretilen betonların karşılayamayacağı bazı dürabilite (dayanıklılık) koşullarını karşılamaları nedeniyle tercih edilmektedir. Bunun dışında betonda plastik rötre (yüzeysel çatlak oluşumu) azaltılması, taze beton sıcaklığının düşürülmesi, pompalanabilirliğin 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 çalışılmalıdır.
- Beton kullanıcılarına ve yapıları denetleyen taraflara mineral katkıların 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:

- 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 katkılar tercih edilmelidir.
- Yüksek dayanım sınıflarında kalite kontrol süreçlerinin küp yerine silindir numune ile 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 [11]. 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 agregada 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, yenilikçi bina tasarımlarına, operasyonel kolaylıklara, uzun süreli dayanıklılığa, geliştirilmiş beton davranış parametrelerine ve genel olarak sürdürülebilir beton

karışım tasarımlarına 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 [12], süperakışkanlaştırıcı katkıları 1 metreküp hazır betonun karbon ayak izini, katkısız betona kıyasla, 60–170 kg azaltma potansiyeline sahiptir. 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 KÜB üyeleri, Avrupa Katkı Üreticileri Federasyonu Birliği (EFCA) model Çevresel Ürün Beyanları (EPD) ile ürünlerini arz etmektedir. Bu katkıların beşikten kapıya (A1-A3) süreci kapsamındaki karbon ayak izi Tablo 3'te belirtilmiştir.

Tablo 3. EFCA tarafından yayımlanan EPD'lerde yer alan katkıların karbon ayak izi [12]

Kimyasal Katkılar	A1 – A3 Karbon emisyonu (kg CO _{2e}) / kg
Akışkanlaştırıcı/Süperakışkanlaştırıcı	1,53
Priz hızlandırıcı	1,34
Priz yavaşlatıcı	1,23
Sertleşmeyi hızlandırıcı	1,79
Hava sürükleyici	0,439
Su geçirimsizlik	2,67

2.1.2.Klinker/çimento üretiminde enerji verimliliğinin artırılması

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.

2.1.3.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
- **AAS:** Alkali ile aktive edilmiş cüruf
- **CCSC:** Karbonatlı kalsiyum silikat çimentosu
- **CSAC:** Kalsiyum sülfoalüminat çimentosu
- **MOC:** Magnezyum oksiklorür çimentosu
- **MPC:** Magnezyum fosfat çimentosu
- **RBC:** Reaktif belit çimentosu

2.1.4.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 [13]. Standartlar çok daha azına izin verse de hazır beton üretiminde ortalama 300 kg/m³ çimento kullanılmaktadır [14]. 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 agreganın teminidir. Agregalar da yerel malzemelerdir. Bu nedenle, yerel taş ocağı iyi bir agreganın çeşitliliği sağlayamazsa, optimize edilmiş bir granüler iskelet tasarlamak mümkün olmayabilir ve gerekli dayanım ve işlenebilirlik performansını elde etmek için daha fazla çimento gerekebilir. Agreganın 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, agreganın performansının belirlenmesine ve katkı maddelerinin optimize edilmesine yardımcı olabilmektedir [15].

2.1.5.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.

2.1.6.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, öngörülmesi 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 [15]. 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 [16].

Prefabrikasyon gibi daha sanayileşmiş bir süreç, fabrikada daha yüksek hassasiyet ve daha az atık yoluyla daha düşük malzeme talebine yol açabilir. Prensip 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 [17].

Cambridge Üniversitesi tarafından hazırlanan bir raporda, yapısal elemanların tüm güvenlik faktörleri uygulandıktan sonra tipik olarak kapasitelerinin yalnızca %60-80'ini kullanmak üzere tasarlandığı vurgulanmıştır [18]. 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 anlaşılmaktadır. 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 [19].

2.1.7. 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 [20]. Sonuç olarak, geri kazanılmış agrega kullanımı çimento ihtiyacını 20-40 kg/m³ arttırabilmektedir [21]. 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 [22].

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.

2.1.8.28 Gün Yerine Daha İleri Yaş Dayanımlarının Dikkate Alınması

Hem 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 daha yüksek miktarda mineral katkı kullanımının önü açılabilmektedir.

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 katkıların 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 olunmaktadır [22,23]. Bu nedenle, beton dayanımının 28 günden sonra, örneğin 56 günde değerlendirilmesi daha uygun olmaktadır.

2.1.9.Çevresel Etki Sınıfları

Genel olarak bir proje üzerinde çalışan mühendisler ve tasarımcılar çoğunlukla tek bir çevresel etki sınıfı belirlemekte ve bu sınıf da en baskın etkiye ait olmaktadır ancak bir bina için dış koşullara maruz kalan beton ve iç mekândaki 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

2.1.10.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 agregalar kullanılır. Agregadan sonra ise çimento gelmektedir. Bu nedenle başta agregalar 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 agregalar 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.

2.1.11.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 değerin büyüklüğü daha net anlaşılacaktır. Enerji kaynaklı karbon ayak izini azaltmak için üreticiler aşağıdaki 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

3.Türkiye’de Betonun Karbon Ayak İzi

Türkiye Hazır Beton Birliği tarafından 2023 yılında Türkiye genelini temsil etmesi amacıyla yapılan bir araştırma kapsamında Tablo 4’te görüleceği üzere beş farklı dayanım sınıfına ait Türkiye ortalamasını temsil eden beton reçeteleri tespit edilmiştir. Bu verilerin ağırlıklı ortalaması ile de jenerik bir beton reçetesi temin edilmiştir.

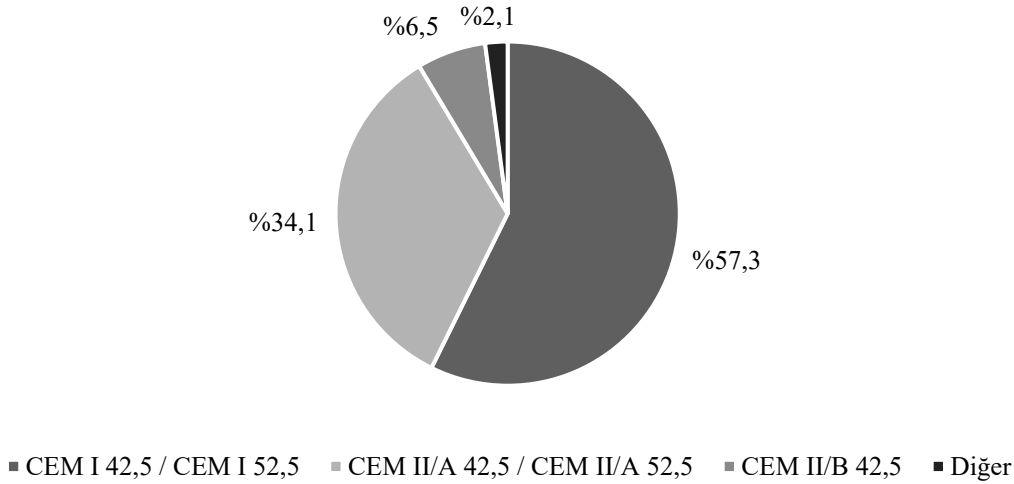
Tablo 4. 2023 yılı Türkiye geneli ortalama beton karışımı

Bileşen	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	Ağırlıklı Ortalama
Ort. Çimento Miktarı (kg/m ³)	266,4	301,7	336,4	368,3	404,8	309,1
Ort. Uçucu Kül Miktarı (kg/m ³)	36,3	36,9	40,4	45,5	41,5	38,2
Ort. Y.F. Cürufu Miktarı (kg/m ³)	1,4	2,1	2,2	5,8	7,2	2,3
Ort. Bağlayıcı Miktarı (kg/m ³)	304,1	340,6	378,9	419,7	453,5	349,5
Eşdeğer Bağlayıcı Miktarı (kg/m ³)	282,0	318,1	354,3	391,2	427,2	326,2
Efektif Bağlayıcı Miktarı (kg/MPa)	11,3	10,6	10,1	9,8	9,5	10,5
Ort. İri Agregat Miktarı (kg/m ³)	865,9	880,6	903,0	920,4	941,4	886,4
Ort. İnce Agregat Miktarı (kg/m ³)	1037,1	997,3	947,0	891,6	848,9	984,1
Ort. Su Miktarı (kg/m ³)	162,5	162,0	161,4	162,5	162,0	162,0
Geri Dönüşüm Suyu Kullanım Oranı (%)	23,6	22,1	21,5	19,8	17,3	22,0
Ort. Kimyasal Katkı Miktarı (kg/m ³)	3,7	4,2	4,8	5,2	5,6	4,3
Ort. Birim Ağırlık (kg/m ³)	2373,3	2384,6	2395,2	2399,4	2411,4	2386,3

2023 yılında yapılan bu araştırmaya göre ortalama toplam bağlayıcı miktarı 2021 yılındaki benzer araştırma sonuçlarına oranla 21,6 kg/m³, eş değer bağlayıcı miktarı ise 15 kg/m³ artış göstermiştir. Bu artış her ne kadar çimento miktarının artması nedeniyle betonun karbon ayak izinde bir artışa neden olacağı şeklinde değerlendirilebilse de önemli olan bir husus da çimentonun klinker içeriğine bağlı olarak karbon ayak izidir. Zira 2023 yılında 2021 yılına oranla hazır beton sektöründe CEM I

dışında daha düşük klinker içeriğine sahip olan CEM II/A ve CEM II/B cinsi çimentoların kullanımında önemli bir artış olmuştur. Bu kapsamda hem hazır beton sektöründeki güncel kullanımlar araştırılarak hem de Türk Çimento tarafından yayımlanan “çimento cinsi” verileri dikkate alınarak hazır beton sektöründe kullanılan çimento cinslerinin kırılımı tahmin edilmiştir.

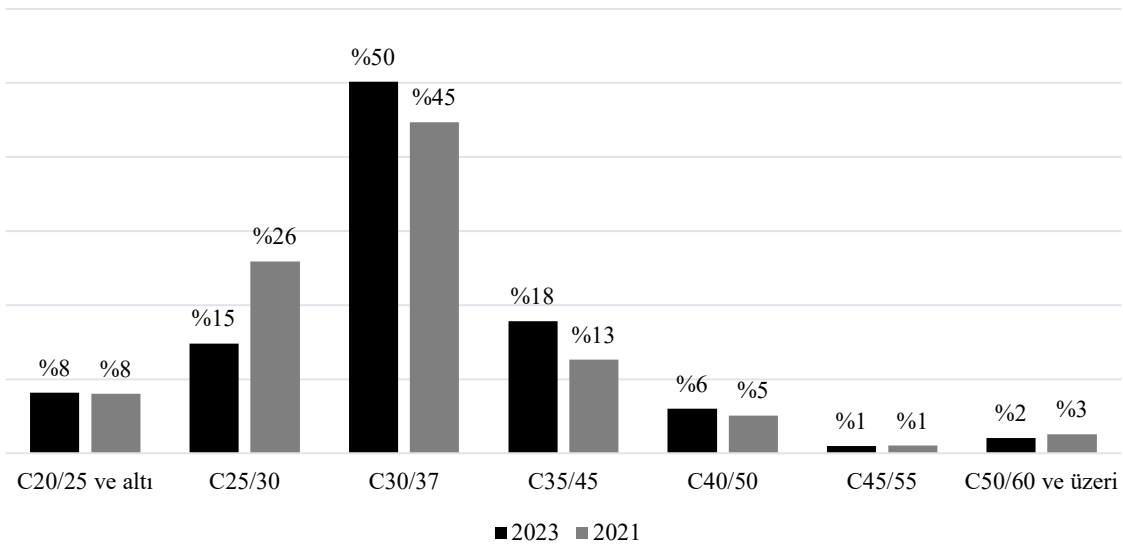
Şekil 2’de görüleceği üzere hazır beton sektöründe %57’lik oranla en fazla CEM I cinsi çimentolar kullanılmaktadır. CEM II/A cinsi çimentoların oranı %34, CEM II/B’nin ise %6’dır.



Şekil 2. Hazır beton sektöründe kullanılan çimento cinslerinin dağılımı

2023 yılında 2021 yılına oranla çimento ve toplam bağlayıcı dozajındaki artışın en önemli nedeni agrega kalitesinde yaşanan sorunlar olmuştur. Standartta uygun olmasına rağmen beton üretimi için ideal olmayan ve kalite dalgalanması görülen kaynaklardan temin edilen agregalar çimento tüketimini olumsuz etkilemiştir. Bu sorun hem Türkiye’de hem de dünyada önümüzdeki yıllarda da kendini göstermeye devam edecektir.

Çimento ve bağlayıcı dozajındaki artışın bir diğer nedeni de beton basınç dayanım sınıflarındaki artış olmuştur. Şekil 3’te görüleceği üzere 2 yıl içinde Türkiye genelinde C30/37 üretimi %45’ten %50’ye yükselmiştir. C30/37 altı sınıf betonlar ise %34’ten %23’e gerilemiştir.



Şekil 3. 2021 ve 2023 yıllarında Türkiye’de ortalama beton basınç dayanım sınıfları

2023 yılında ülkemizdeki hazır betonun ortalama karbon ayak izini (gömülü karbon) hesaplamak için THBB tarafından sektörel bir araştırma yapılmıştır. Betonun karbon ayak izini tespit etmek amacıyla, çimento için Türkiye Çimento Sanayicileri Birliğinin (TÜRKÇİMENTO) yayınları ve çimento üreticilerinin faaliyet/sürdürülebilirlik/EPD raporlarındaki veriler ve çeşitli uluslararası kabuller dikkate alınmıştır. Agrega için Agrega Üreticileri Birliği (AGÜB) verileri ve kimyasal katkı için Katkı Üreticileri Birliği (KÜB) verilerinden faydalanılmıştır. Ayrıca, bu konuda literatür çalışmalarına da başvurulmuştur. Tüm veriler ışığında Tablo 5’te görüldüğü gibi dayanım sınıfı bazında betonun beşikten kapağa (A1-A3) aşamasına ait karbon ayak izi, “The Inventory of Carbon and Energy (ICE) Cement, Mortar and Concrete Model - V1.2” hesaplama aracı kullanılarak hesaplanmıştır. Tablo 5’te ayrıca 2021 yılında Global Cement and Concrete Association (GCCA) EPD hesaplama programı kullanılarak hesaplanan değerler de kıyaslama yapılması için yer almaktadır. Bu tablo düşük klinkerli çimento kullanımının artmasının ve sektördeki verimlilik çalışmalarının etkisini net bir şekilde göstermektedir.

Tablo 5. Dayanım sınıfları bazında 1 m³ hazır betonun karbon ayak izi

A1-A3 Kapsamında Hazır Betonun Karbon Ayak İzi (kg CO _{2e} /m ³)					
Yıl	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55
2021	285	309	340	370	396
2023	269	301	332	361	394

4. Sonuç

Bir yapı malzemesi olarak betonun değeri yadsınamaz ancak iklim değişikliği ile mücadele, betonun ve beton bileşenlerinin sorgulanabilir olmasına da neden olmaktadır. İnşaatın temel unsurlarından biri olan beton, gelecek yıllarda yapı çevremizde daha fazla iklim direnci elde etmek için vazgeçilmez olacak olan dayanımı, çok yönlülüğü ve dayanıklılığı gibi birçok özelliği nedeniyle de değerli olmaya devam edecektir. Ayrıca beton, karbonatlaşma reaksiyonu sonucu tüm ömrü boyunca ortamdaki karbonu kalıcı olarak tutma/bağlama konusunda benzersiz bir kapasiteye sahiptir. Bu açıdan betona “karbon yutağı” bir malzeme tanımı da yapılabilir.

Son yıllarda giderek artan düşük karbonlu üretim ve teknoloji çözümleri, bugün hem yapısal performansı iyileştirmek hem de karbon emisyonunu azaltmak için mevcut süreçlere dâhil edilmektedir. Bunlardan bazıları son derece yenilikçidir. Bir kısmı ise düşük teknoloji ve pratikte zaten uygulanan, ancak çok daha kapsamlı bir şekilde konuşlandırılabilir niteliktedir. Başlıca emisyon azaltım stratejileri arasında çimentoda klinker miktarının azaltılması, mineral katkı kullanımı, tasarım optimizasyonu, enerji verimliliği ve geri kazanılmış malzeme kullanımı yer almaktadır.

Düşük ve sıfır karbonlu teknolojiler üzerine mevcut çalışmalar öncelikle teknolojik gelişmelere odaklanmış durumdadır, ancak her teknolojinin çimento ve beton endüstrilerinde karbon nötrlüğüne gerçek katkısını belirlemek için hala koordineli araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Çeşitli atık kaynaklarının değerlendirilmesi yoluyla çimento ve beton teknolojilerinde döngüsel ekonomiden yararlanmak, ortaya çıkan teknolojilerin karbon tasarrufu potansiyelini iyileştirmek için son derece önemlidir. Özellikle karbon yakalama ve kullanma teknolojilerini geri dönüştürülmüş atık betonla birleştirmek, çimento ve beton endüstrilerinde karbon tasarrufunu daha da artırabilir.

Düşük karbonlu beton elde etmek zaman içinde sürekli bir ikame, modifikasyon ve optimizasyon süreci gerektirecektir. Önümüzdeki yıllarda beton endüstrisinde inovasyon ve değişimin meydana gelme hızı, pazar dinamiklerinden, karbon fiyatlandırmasından ve regülasyonlardan büyük ölçüde etkilenecektir.

Ülkemizde "düşük karbonlu beton" üretiminin ve talebinin gecikmeden hayata geçmesi ve bunun sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesi için bazı önemli adımların atılması gerekmektedir. Bunlar:

1. Düşük karbonlu beton tanımının, özelliklerinin ve sınıflandırılmasının belirlenmesi ve bunların standartlarda, şartnamelerde, satın alma sözleşmelerinde yer alması
2. Hazır betonun karbon ayak izinin güvenilir, şeffaf ve uluslararası normlara uygun bir şekilde ölçülmesi ve takip edilmesi
3. Hazır betonda yaşam döngüsü analizinin doğru ve istikrarlı bir şekilde yapılabilmesi için ham madde tedarikçilerinin gerekli verileri sağlaması
4. Ürünlerin karbon ayak izlerinin yer aldığı ve kullanıcıların kıyaslama yapma imkânı bulacağı kamuya açık veri tabanı oluşturulması
5. Kamu ve özel ihale şartnamelerinde "düşük karbonlu beton" satın alımına yönelik zorlayıcı maddelerin yer alması
6. Düşük karbon teknolojilerinin yerel ölçekte geliştirilmesi
7. Düşük karbon teknolojilerine yatırım yapan üreticilerin teşvik ve fonlardan yararlanmasının sağlanması
8. İnşaat mühendisliği ve mimarlık alanında eğitim veren bölümlerde yapı malzemesi ve yapı tasarımı derslerinde "düşük karbon" yaklaşımına yönelik içeriklerin oluşturulması
9. Klinker ikamesinde kullanılan mevcut ve yeni mineral katkıları için stratejik yol haritalarının belirlenmesi ve özellikle yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi stratejik malzemelerin ihracatının sınırlandırılması
10. Kamu, özel sektör ve akademi üçgeninde yenilikçi malzemelerin araştırılmasına yönelik iş birlikleri kurulması

Kaynaklar

1. Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M., 2018. Eco-efficient cements: Potential, economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry, United Nations Environment Programme (UNEP) Report.
2. Gartner, E., & Sui, T., 2018. Alternative cement clinkers. Cement and Concrete Research, 114, 27-39. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.002>.
3. Habert, G., Miller, S. A., John, V. M., Provis, J. L., Favier, A., Horvath, A., & Scrivener, K. L., 2020. Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. Nature Reviews Earth & Environment, 1(11), 559-573. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0093-3>
4. Miller, S. A., John, V. M., Pacca, S. A., & Horvath, A., 2021. Carbon dioxide reduction potential in the global cement industry by 2050. Cement and Concrete Research, 140, 106338. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106338>
5. Türkiye Çimento Sektör Raporu 2023, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği (TÇMB), 2024.
6. Yılmaz, M., Kaya, A., & Çelik, T., 2022. Türkiye’de düşük karbonlu çimento ve beton üretimi: Mevcut durum, zorluklar ve fırsatlar. İnşaat Mühendisliği Dergisi, 37(2), 85-102.
7. Hazır Beton Yaşam Döngüsü Rehberi, Türkiye Hazır Beton Birliği, 2021.
8. Lehne, J., and Preston, F., 2018. Making Concrete Change Innovation in Low-carbon Cement and Concrete, The Royal Institute of International Affairs
9. Whole-Life Carbon and Buildings, MPA The Concrete Centre, 2016.
10. Low Carbon Concrete: Practical guidance for Arup engineers, Arup, 2019.
11. <https://industry europe.com/sectors/construction-engineering/structural-concrete-in-a-zero-carbon-future/>
12. Beton Kimyasal Katkılarının Net Sıfır Karbon Hedefindeki Rolü, Katkı Üreticileri Birliği, 2023.
13. 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.
14. Müller, C., 2012. Use of cement in concrete according to European standard EN 206-1, HBRC J. 8 1–7. doi:10.1016/j.hbrcj.2012.08.001.
15. Cementing the European Green Deal, Cembureau Publication, 2020.
16. Abebe, J., Lohaus, L., 2014. 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.
17. Ghaffar, S.H., Corker, J., Fan, M., 2018. Additive Manufacturing Technology and Its Implementation in Construction as an Eco-Innovative Solution, Automation in Construction, 93.
18. Minimising Energy in Construction (MEICON) Survey Report, University of Cambridge, 2018. <https://www.repository.cam.ac.uk/handle/1810/287863>
19. <https://industry europe.com/sectors/construction-engineering/structural-concrete-in-a-zero-carbon-future/>

20. Robalo, K., Costa, H., Carmo, R., Júlio, E., 2021. Experimental Development of Low Cement Content and Recycled Construction and Demolition Waste Aggregates Concrete, *Construction and Building Materials*, Volume 273.
21. Knoeri, C., Sanyé-Mengual, E., Althaus, HJ., 2013. Comparative LCA of Recycled and Conventional Concrete for Structural Applications, *Int J Life Cycle Assess* 18, 909–918. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0544-2>
22. Pellegrino, C., Faleschini, F., 2016. Recycled Aggregates for Concrete Production: State-of-the-Art. In: *Sustainability Improvements in the Concrete Industry, Green Energy and Technology*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-28540-5_2.
23. Toutanjia, H., Delatte, N.; Aggoun, S., Duval, R.; Danson, A., 2004. Effect of Supplementary Cementitious Materials on The Compressive Strength and Durability of Short-Term Cured Concrete,” *Cement and Concrete Research*, 34.



www.thbb.org

www.thbbakademi.org

