



DÜŞÜK KARBONLU BETON





DÜŞÜK KARBONLU BETON

İLETİŞİM BİLGİLERİ

Rüzgârlıbahçe Mah. Özalp Sok. No.:2K Plaza Kat: 3
Beykoz / İSTANBUL
Tel: +90 216 322 96 70 / Faks: +90 216 413 61 80
www.thbb.org / info@thbb.org

EKİM 2024

Türkiye Hazır Beton Birliği (THBB) yayınıdır.
Tüm yayın hakkı THBB'ye aittir.
Kaynak gösterilerek alıntı yapılabilir.
İzinsiz çoğaltılamaz ve basılamaz.



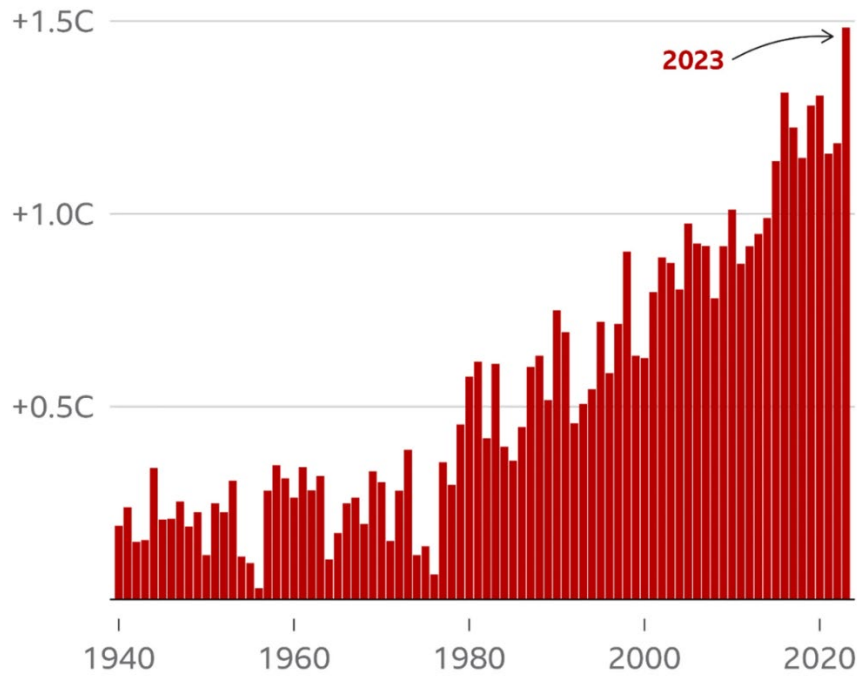
İÇİNDEKİLER

1. İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ.....	1
2. SERA ETKİSİ VE KARBON AYAK İZİ.....	7
2.1. Sera Etkisi.....	7
2.2. Karbon Ayak İzi.....	9
3. KÜRESEL ÖLÇEKTE BETON	10
4. BETONUN ÇEVRESEL ETKİLERİ	12
4.1. Hazır Betonun Sürdürülebilirlik Açısından Faydaları.....	12
4.1.1. Albedo Etkisi	12
4.1.2. Yerel Ürün	13
4.1.3. Termal Kütle	13
4.1.4. Pasif Soğutma.....	15
4.1.5. Karbon Bağlama.....	16
4.1.6. Sağlıklı Binalar	17
4.1.7. Dayanıklılık.....	18
4.1.8. Yangın Direnci	18
4.1.9. Afetlere Dayanıklılık.....	19
4.1.10. Döngüsel Ekonomi	20
4.2. Hazır Beton Üretimi Kaynaklı CO ₂ Emisyonu	21
4.2.1. Ham madde ve nakliye.....	22
4.2.2. Üretim.....	23
4.2.3. Sevkiyat ve Yerleştirme.....	23
4.3. Hazır beton kaynaklı CO ₂ emisyonunu azaltmak için yapılması gerekenler.....	24
5. DÜŞÜK KARBONLU BETON	26
5.1. Beton için gömülü karbon azaltma yöntemleri.....	27
5.1.1. Klinker İçeriğini Azaltma.....	28
5.1.2. Klinker/çimento üretiminde enerji verimliliğinin artırılması	35
5.1.3. Karbon Ayak İzi Düşük Yenilikçi Bağlayıcıların Kullanımı.....	35
5.1.4. Beton tasarımının optimizasyonu	36
5.1.5. Projelerde Daha Yüksek Dayanımlı Beton Tercih Edilmesi.....	37
5.1.6. Yapısal Tasarım Optimizasyonu	38

5.1.7. Geri Kazanılmış Agrega Kullanımı	39
5.1.8. 28 Gün Yerine Daha İleri Yaş Dayanımlarının Dikkate Alınması.....	41
5.1.9. Çevresel Etki Sınıfları	41
5.1.10. Yakın Tedarik Kaynaklarının Tercih Edilmesi.....	42
5.1.11. Üretimde ve Nakliyyede Enerji Verimliliği	42
5.2. Türkiye'de Üretilen Hazır Betonların Genel Özellikleri	44
6. SONUÇ.....	48

1. İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ

İklim değışikliği, Dünya'nın ortalama sıcaklıklarında ve hava koşullarında meydana gelen uzun vadeli değışimin bir sonucudur. Son on yılda küresel sıcaklık, 19. yüzyılın sonlarına kıyasla ortalama 1,2 °C derece artış göstermiştir. Hatta şubat 2023 ile ocak 2024 arasındaki 12 aylık dönemde küresel ısınma 1,5 °C'yi aşmıştır. Bu yüksek artış, 2023 yılının kayıtlardaki en sıcak yıl ilan edilmesine neden olmuştur¹.



Şekil 1. Sanayi öncesi döneme (1850-1900) göre küresel sıcaklık artışı²

Son on yılda görülen 1,2 °C'lik küresel ortalama sıcaklık artışının aşağıda belirtildiği gibi çevre üzerinde çok büyük etkileri olmaktadır:

- ◆ Aşırı sıcak hava dalgaları ve yoğun yağış gibi daha sık ve aşırı hava olayları
- ◆ Buzulların ve buz tabakalarının hızla erimesi ve bunun sonucunda deniz seviyesinin yükselmesi

¹ <https://www.bbc.com/news/science-environment-24021772>
² ERA5, C3S/ECMWF

- ◆ Arktik deniz buzullarında büyük kopmalar
- ◆ Okyanusların ısınması
- ◆ Kuraklık



Şekil 2. İklim değişikliği sonucu meydana gelen aşırı hava olayı

Örneğin Doğu Afrika'nın bazı bölgelerinde son 40 yılın en şiddetli kuraklığı yaşanmaktadır ve 20 milyondan fazla insan açlık riskiyle karşı karşıyadır³. 2022 yılında Avrupa'daki yoğun sıcak hava dalgaları kaynaklı ölümlerde anormal bir artış meydana gelmiştir.

Önümüzdeki yıllarda durumun daha da kötüleşmesi muhtemel gözükse de bilim insanlarına göre acilen harekete geçilmesi, iklim değişikliğinin en kötü etkilerini sınırlayabilecektir. Bunun için de birçok devletin iklim değişikliği ile mücadele kapsamında etkin politikaları oluşturması ve hayata geçirmesi gerekmektedir.

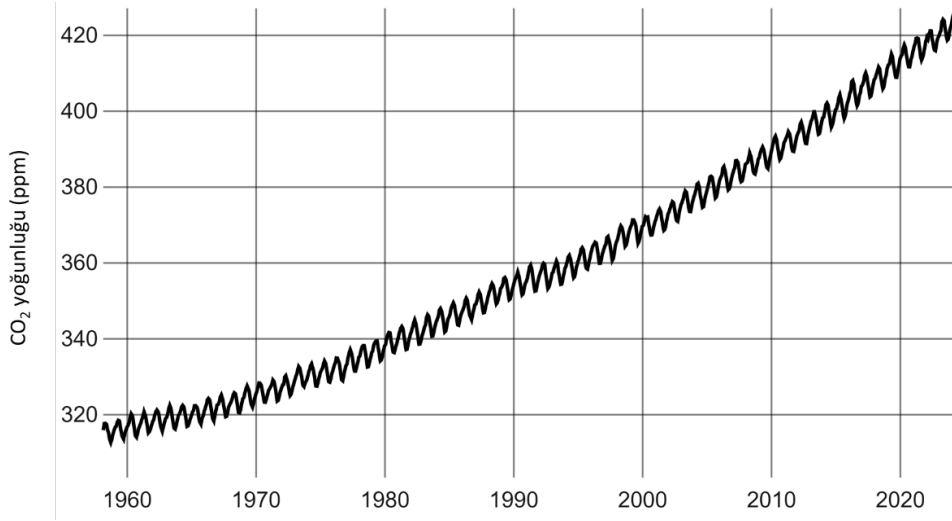
Her ne kadar iklim, Dünya tarihi boyunca çeşitli doğal etkenler sonucu değişmiş olsa da BM'nin iklim kuruluşu Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneline (IPCC) göre, son yüzyılda görülen hızlı ısınmanın doğal nedenlerle açıklanması mümkün değildir. IPCC, uzun vadeli iklim değişikliğinin insan faaliyetlerinden, özellikle de evlerde, fabrikalarda ve ulaşımda

³ <https://sadeceinsan.org.tr/dogu-afrika-son-40-yilin-en-siddetli-kurakligini-yasiyor-tr-1192.html>

yaygın olarak kullanılan fosil yakıtlardan (kömür, petrol ve gaz) kaynaklandığını belirtmektedir⁴.

Fosil yakıtlar yandığında başta karbondioksit (CO₂) olmak üzere çeşitli sera gazları açığa çıkmaktadır. Bu, Dünya yüzeyine yakın atmosferde ekstra enerjiyi hapsetmekte ve gezegenin ısınmasına neden olmaktadır.

Sanayi Devrimi'nin başlangıcından bu yana çok yüksek oranda fosil yakıt kullanılmaya başlanmıştır ve bunun sonucunda günümüzde atmosferdeki CO₂ yoğunluğu sanayi devrimi başlangıcına oranla Şekil 3'te görüleceği üzere yaklaşık %50 oranında artış göstermiştir.



Şekil 3. Atmosferdeki CO₂ yoğunluğu⁵

Dünya Meteoroloji Örgütü'nün (WMO) raporuna göre 2029 yılına kadar, dünyanın sanayi öncesine göre 1,5 °C derece üzerinde ısınması ihtimali %80 oranındadır⁶. IPCC'ye göre uzun vadeli ortalama sıcaklık artışlarının 1,5 °C ile sınırlandırılması hayati önem taşımaktadır. 2015 yılında Paris'te imzalanan çığır açıcı bir anlaşmayla, yaklaşık 200 ülke küresel ısınmayı 1,5 °C artış ile sınırlama sözü vermiştir. Bunun için 2050 yılına kadar "net sıfır" karbon emisyonuna ulaşılması hedeflenmektedir. Net sıfır emisyon, bir ülkenin, şirketin

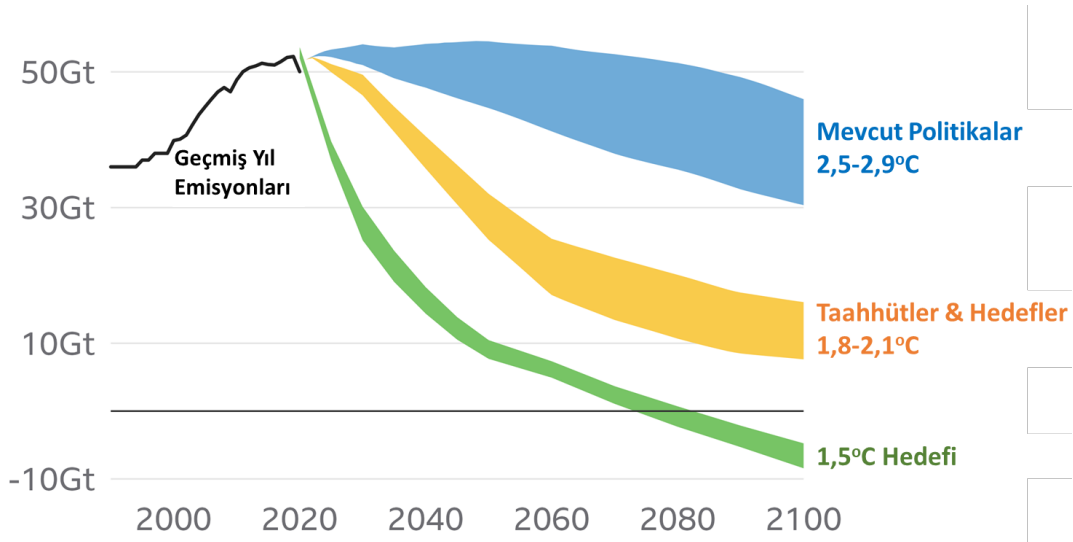
4 <https://www.bbc.com/news/science-environment-24021772>

5 NOAA, Mauna Loa Gözlemevi ölçümleri

6 <https://wmo.int/media/news/global-temperature-likely-exceed-15degc-above-pre-industrial-level-temporarily-next-5-years>

veya bireyin atmosfere saldığı sera gazı emisyonlarının, alınan veya bertaraf edilen emisyonlarla dengelendiği durumu ifade etmektedir.

Şekil 4'te Climate Action Tracker tarafından hazırlanan bir çalışmadaki karbon salımı projeksiyonu görölmektedir. Mevcut politikaların sürdürölmesi sonucunda 2100 yılında küresel sıcaklık artışının 2,5 °C'nin üzerinde olacağı tahmin edilmektedir. Bilinen ve duyurulan taahhütler ile bu artış en az 1,8 °C olabilecektir. Bu da daha etkin taahhütlere ve hedeflere ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir.



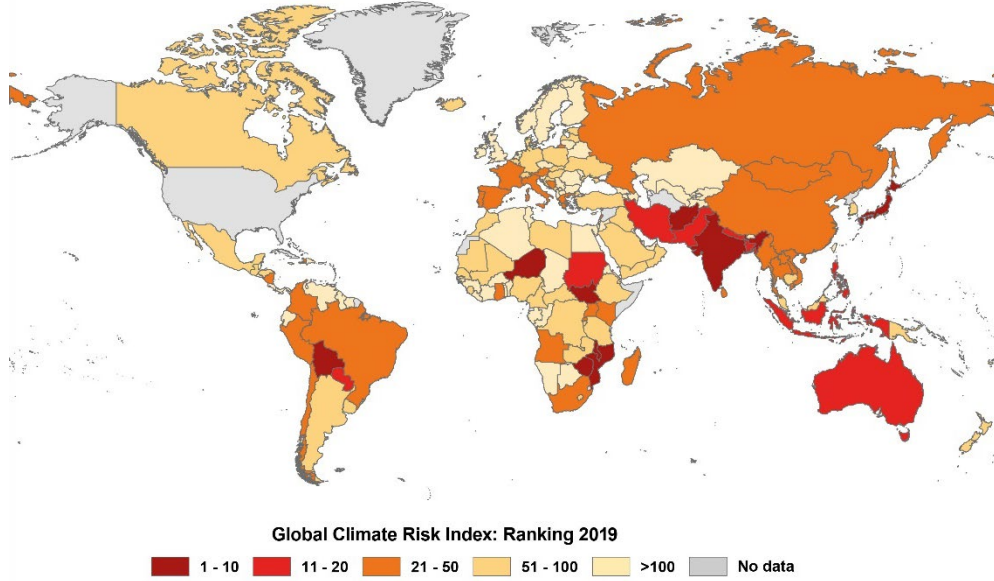
Şekil 4. Senaryolara göre sera gazı emisyonu projeksiyonu⁷

Türkiye bulunduğu coğrafya açısından iklim değişikliğinden etkilenme riski oldukça yüksek ölkelerden birisidir. GermanWatch tarafından yayımlanan Şekil 5'teki risk haritasında ölkelerin riskleri görölmektedir.

2022 tarihli bir doktora tezinde, Türkiye'de 81 ilin iklim riskleri değerlendirilmiştir. Çalışmaya göre şehirlerin üçte birinden fazlası "çok yüksek" veya "yüksek" iklim riski altında bulunmaktadır. En yüksek risk altında olduğu tespit edilen iller, kuzeyde Amasya ve Tokat; güneyde Mersin ve Kahramanmaraş; İç Anadolu'da Kayseri ve doğuda ise Muş ile Ağrı'dır⁸.

⁷ Climate Action Tracker, Aralık 2023

⁸ Bütün, D.G., Development of a climate risk assessment method for the provinces of Türkiye, Doktora Tezi, ODTÜ, 2022.



Şekil 5. Küresel iklim değişikliği risk haritası⁹

İklim Değişikliğinin Türkiye Açısından Olası Etkileri

Bilim adamlarına göre olası bir iklim değişikliğinin ülkemizde neden olabileceği çevresel ve sosyoekonomik sorunlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- ◆ Sıcak ve kurak devrelerin süresindeki ve şiddetindeki artış, kuraklık ve çölleşme ile tuzlanma ve erozyon gibi olayları hızlandıracaktır.
- ◆ İklim kuşaklarının kuzeye kayması sonucu Türkiye, daha sıcak ve kurak iklim koşullarının etkisinde kalabilecektir.
- ◆ Türkiye'nin mevcut su kaynakları sorununa yeni sorunlar eklenecek, içme ve kullanma suyunda büyük sıkıntılar yaşayacaktır.
- ◆ Tarımsal üretim potansiyeli değişebilecektir. (Bu değişiklik bölgesel ve mevsimsel farklılıklarla birlikte, türlere göre bir artış ya da azalış biçiminde olabilir).

⁹ <https://www.germanwatch.org/en/19777>

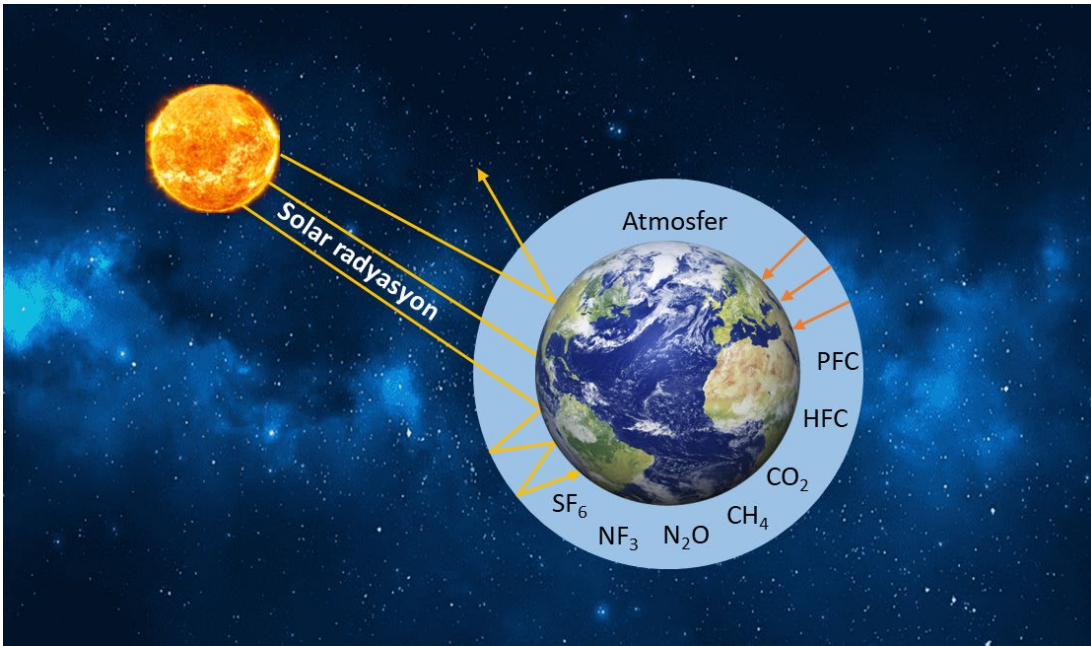
- ◆ Karasal ekosistemler ve tarımsal üretim sistemleri, zararlılardaki ve hastalıklardaki artıştan zarar görebilecektir.
- ◆ Sıcaklıktaki artış insan ve hayvan sağlığı üzerinde olumsuz etkiler yapacak, aşırı sıcaktan kaynaklanan hastalık ve ölüm oranları artacaktır.
- ◆ Deniz seviyesi yükselmesine bağlı olarak Türkiye'nin yoğun yerleşme, turizm ve tarım alanlarının yer aldığı alçak alanları su altında kalacaktır.
- ◆ Mevsimlik kar ve kalıcı kar-buz örtüsünün kapladığı alanlarda, erimelere bağlı olarak kar çığları, sel ve taşkın olaylarında artış olacaktır.
- ◆ Deniz akıntılarındaki değişimler, deniz ekosistemleri üzerinde olumsuz etkiler yaratacak, deniz ürünleri azalacaktır.

2. SERA ETKİSİ VE KARBON AYAK İZİ

2.1. Sera Etkisi

Dünya, üzerine düşen güneş ışınlarından ziyade yüzeyinden yansıyan güneş ışınları nedeniyle ısınmaktadır. Bu yansıyan ışınlar başta karbondioksit, metan ve su buharı olmak üzere atmosferde bulunan gazlar tarafından tutulmakta ve bu da ısınmaya neden olmaktadır. Işınların bu gazlar tarafından tutulmasına sera etkisi denilmektedir. Sera etkisi, aşağıda belirtildiği şekilde meydana gelmektedir:

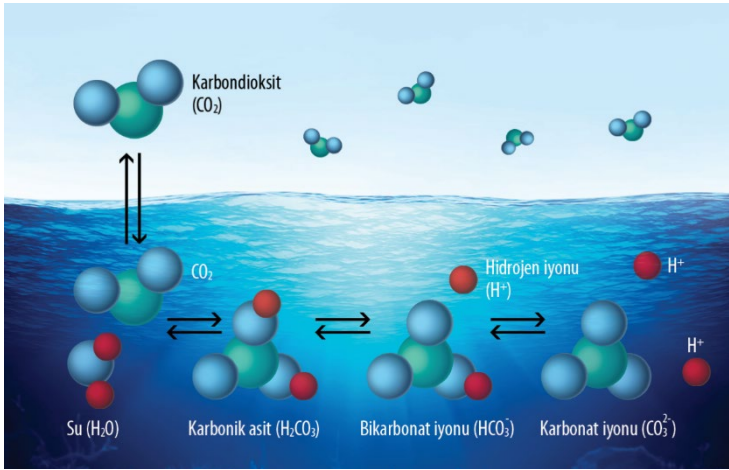
- ◆ Güneşten gelen kısa dalgalı ışınların %51'i yeryüzü tarafından tutulur. Bu enerji ile yeryüzü ısınır ve emilen bu enerjinin bir bölümü atmosfere geri gönderilir.
- ◆ Güneşten gelen enerjinin bir bölümü ise yeryüzüne ulaşmadan atmosferden uzaya geri döner.
- ◆ Isınan yerküredeki bir miktar enerji uzun dalgalı ışınlar hâlinde atmosfere geri yayılır. Bu enerjinin bir kısmı atmosferdeki sera gazları tarafından tutulur. Bu tutulan enerji atmosferin alt katmanlarını ısıtır. Bu ısınma atmosferin sera etkisidir.
- ◆ Sera gazları tarafından tutulan enerjinin bir kısmı yeniden uzaya geri verilir.



Şekil 6. Sera gazı etkisi

Küresel ısınma üzerinde etkili olan sera gazları arasında CO₂'in ayrı bir yeri ve önemi vardır. CO₂, güneşten doğrudan gelen kısa dalgalı ışınları büyük ölçüde geçirirken yerden yansıyan uzun dalgalı ışınları tutmasından dolayı, atmosferin alt katmanlarının ısınmasında çok önemli rol oynayan bir sera gazıdır. Bilindiği üzere atmosferdeki CO₂ miktarı, birinci derecede fosil yakıtların çeşitli alanlarda kullanımı sonucunda hızlı bir biçimde artmaktadır. Bununla birlikte ormansızlaşma ve özellikle de tropikal yağmur ormanlarındaki aşırı tahribat, ayrıca dünyanın diğer bölgelerindeki orman örtülerinin yerini alan yeni bitki örtüsü de bu artışa katkıda bulunmaktadır.

Atmosferin yaklaşık on binde 4'ünü oluşturan CO₂ gazı en yaygın bulunan sera gazıdır ve atmosferdeki ısınmaya neden olan kirliliğin yaklaşık %75'ini oluşturmaktadır. Bu gaz esas olarak petrol, gaz ve kömür üretiminin ve yakmanın bir ürünüdür. CO₂'nin yaklaşık dörtte biri ayrıca kereste veya tarım için temizlenen arazilerden kaynaklanmaktadır¹⁰.



Şekil 7. Karbonik asit oluşumu

Karbondioksitin Dünya sisteminde önemli olmasının bir diğer nedeni de okyanuslara karışmasıdır. Su molekülleriyle reaksiyona girerek karbonik asit (H₂CO₃) oluşturur ve okyanusun pH seviyesini düşürür, yani asitliğini artırır. Sanayi Devrimi'nin başlangıcından bu yana okyanus yüzey sularının pH derecesi 8,21'den 8,10'a düşmüştür. pH'taki bu düşüşe

"okyanus asitlenmesi" denmektedir¹¹. Küresel İzleme Laboratuvarının (NOAA) gözlemlerine göre, 2021 yılında tek başına karbondioksit, tüm insan kaynaklı sera gazlarının toplam ısı oluşturma etkisinin yaklaşık üçte ikisinden sorumludur¹².

¹⁰ <https://www.nationalgeographic.com/environment/article/global-warming-effects>

¹¹ <https://tudav.org/calismalar/iklim-degisikligi/okyanuslarin-asidifikasyonu/>

¹² <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-annual-greenhouse-gas-index>

2.2. Karbon Ayak İzi



Karbon ayak izi, insan faaliyetleri sonucu yayılan sera gazlarını hesaba katan bir göstergedir. Karbon ayak izi, karbondioksit eş değeri (CO₂e) olarak ifade edilmektedir. Sera gazlarının hepsinin farklı bir küresel ısınma potansiyeli (GWP) bulunmaktadır. Bu nedenle bu gösterge, aynı miktarda güneş radyasyonunu tutan CO₂ hacmi olarak ifade edildiğinden, bu etkilerin okunmasını standartlaştırmanın bir yoludur. Karbon ayak izinin önemi aşağıda belirtilen nedenlerden kaynaklanmaktadır:

İklim Değişikliği: Karbon ayak izi, sera gazı emisyonlarının iklim değişikliği üzerindeki etkisinin anlaşılmasına yardımcı olur. Emisyonların azaltılması, küresel ısınmayı yavaşlatmada kritik bir rol oynar.

Farkındalık Oluşturma: Bireyler ve işletmeler, karbon ayak izlerini hesaplayarak çevresel etkilerini daha iyi anlar ve sürdürülebilirlik konusunda daha bilinçli kararlar alabilir.

Politika Geliştirme: Hükûmetler ve kuruluşlar, karbon ayak izini analiz ederek çevre politikalarını ve düzenlemelerini şekillendirebilir, emisyon hedefleri belirleyebilir.

Sürdürülebilir Uygulamalar: Karbon ayak izinin izlenmesi, enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji kullanımı gibi sürdürülebilir uygulamaların benimsenmesine teşvik eder.

Ekonomik Tasarruf: Enerji tüketimini azaltmak ve daha verimli kaynak kullanımı, maliyetleri düşürerek ekonomik tasarruf sağlar.

Toplumsal Etki: Bireylerin ve toplumların daha sürdürülebilir yaşam tarzlarını benimsemesi, çevresel etkileri azaltarak daha sağlıklı bir dünya yaratılmasına katkıda bulunur.

Bu nedenlerle, karbon ayak izinin hesaplanması ve azaltılması, bireyler, işletmeler ve toplumlar için büyük bir önem taşımaktadır.

3. KÜRESEL ÖLÇEKTE BETON

Beton, dünyada en çok tüketilen insan yapımı malzemedir. Dünyada beton üretiminin yıllık kişi başı 1 m³ün üzerinde olduğu tahmin edilmektedir. Küresel hazır beton üretimi hakkında net bir veri bulunmasa da betonun ana ham maddesi çimentonun güncel durumda yıllık küresel üretiminin 4,3 milyar ton olduğu bilinmektedir¹³.

Beton, barajların, yolların, tünellerin ve birçok yapının inşasında kullanılmaktadır. Mekanik özellikleri, dayanıklılığı, kolay üretimi, maliyeti ve kaynakların kolay erişilebilir olması nedeniyle beton, tüm dünyada bina ve altyapı inşaatı için en yaygın yapısal malzeme konumundadır.

Hızla artan kentleşmeye paralel olarak giderek daha çok artan beton tüketimi, dünya çapında daha fazla doğal kaynak kullanımına neden olmaktadır. Sürdürülebilirlik ve maliyet açısından düşünülmesi gereken bu durum, daha çevreci alternatif ham maddelerin ve üretim yöntemlerinin araştırılmasını teşvik etmektedir.

Dünyada kişi başı yıllık beton tüketiminin 1 m³ olduğu varsayıldığında, beton üretimi için gerekli küresel ham madde ihtiyacının yaklaşık 18 milyar ton olduğu ortaya çıkmaktadır. Türkiye'de ise yıllık kişi başı beton tüketimi 2023 yılı itibarıyla 1,35 m³tür¹⁴. Bu değerlerin gelecekte daha da yükseleceği beklenmektedir. 2050 yılına kadar beton üretiminin 1990 yılına göre dört kat daha fazla olacağı tahmin edilmektedir¹⁵.

Birleşmiş Milletler, küresel olarak önümüzdeki 40 yıl içinde 230 milyar m²lik yeni bir alan inşa edileceğini, dünyadaki binaların mevcut taban alanının iki katına çıkacağını tahmin etmektedir¹⁶. Bunun büyük çoğunluğu Afrika ve Asya'da olacaktır, ancak 2060 yılına kadar 25 milyar m² yeni inşaat alanı eklenecek olan Avrupa'da da hâlâ önemli bir büyüme beklenmektedir. Pratik bir alternatifi olmayan beton, yeni bina ve altyapı talebini karşılamada önemli bir rol oynamaktadır ve oynamaya da devam edecektir.

¹³ <https://www.statista.com/statistics/1087115/global-cement-production-volume/>

¹⁴ Türkiye Hazır Beton Sektörü İstatistikleri 2023

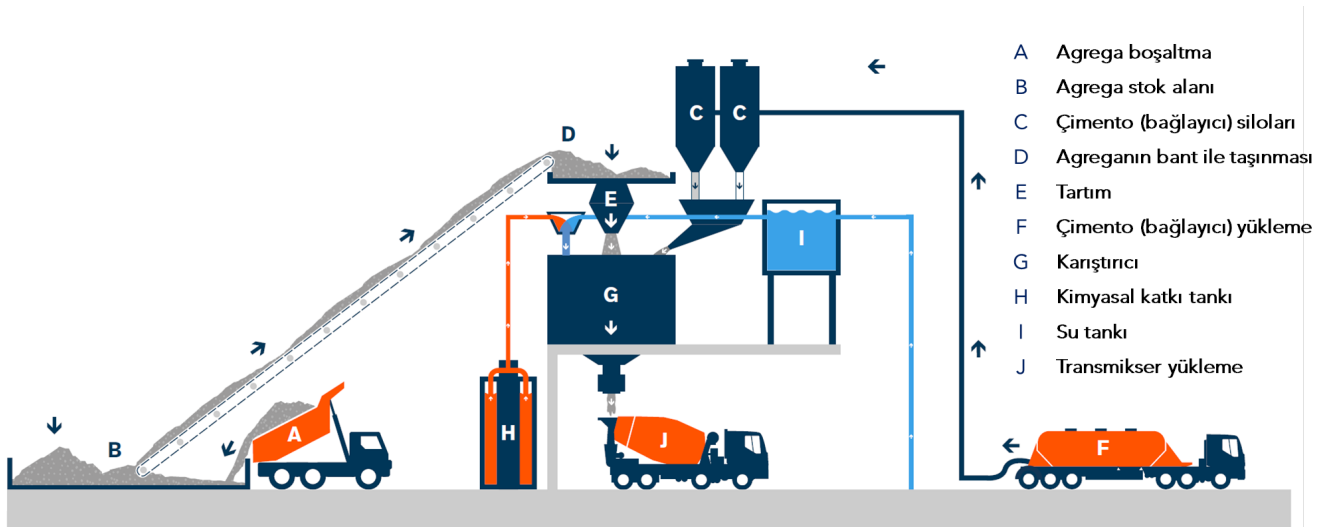
¹⁵ Hazır Beton Yaşam Döngüsü Rehberi, THBB, 2021

¹⁶ Global Status Report 2017, UNEP

Beton, ağırlıkça düşük karbonlu bir malzemedir. Kilogram başına beton, çelikteki gömülü karbonunun sadece %7'sine sahiptir. Bununla birlikte, bir metreküp betonun karbon ayak izi, bileşenlerinin cinsine ve miktarına göre genellikle 200-500 kg arasında değişmektedir.

Beton bileşenleri içinde karbon ayak izi en fazla olan bileşen çimentodur. Çimento, betonun ağırlıkça ortalama %12'sini temsil eder; ancak betondaki gömülü karbonun yaklaşık %90'ını oluşturur. Çimento üretimi, yüksek miktarda enerji tüketimi ve kalsinasyon süreci nedeniyle yüksek CO₂ emisyonuna sahiptir. Çimento endüstrisi şu anda küresel insan kaynaklı CO₂ emisyonlarının yaklaşık %8'sinden sorumludur¹⁷. Toplumların konut ve altyapı gibi sosyal ihtiyaçları ile iklimle mücadele hedeflerini birlikte başarılı bir şekilde yönetmek için odaklanması gereken konulardan birisi de çimento üretimi kaynaklı karbon emisyonunu düşürmektir.

Son 20 yılda beton sektöründeki mevcut gelişmeler, üretim teknolojisi ve betonarme yapıların gelişimi, teknik parametrelerde ve ilgili çevresel etkilerde performans değişikliğine yol açmıştır. Karışım optimizasyonu sayesinde beton, dayanım ve dayanıklılık açısından önemli ölçüde daha iyi özelliklere sahip olmuştur. Bununla birlikte beton giderek çevresel etkiyi azaltma potansiyeli yüksek bir malzemeye dönüşmektedir.



Şekil 8. Hazır beton üretim şeması

¹⁷ Lehne, J., and Preston, F., 2018, Making Concrete Change Innovation in Low-carbon Cement and Concrete, The Royal Institute of International Affairs

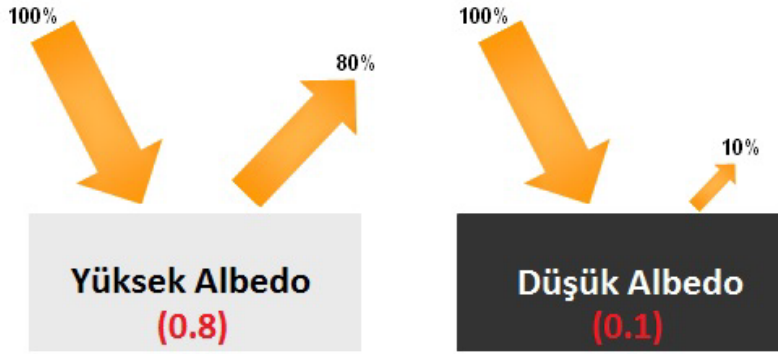
4. BETONUN ÇEVRESEL ETKİLERİ

4.1. Hazır Betonun Sürdürülebilirlik Açısından Faydaları

4.1.1. Albedo Etkisi

Beton, güneş radyasyonunu diğer yapı malzemelerine göre daha fazla yansıtarak, özellikle kentsel alanlarda ısınmayı azaltmaya yardımcı olmaktadır. Beton dâhil yüksek yansıtıcı yüzeylerin seçimi, kentsel alanların beyazlığını ve dolayısıyla yansıtıcılığını artırmaya odaklanan ve güneş radyasyonu yönetimi (SRM) olarak bilinen jeomühendislik sınıfına girmektedir.

Albedo, bir malzemenin yüzeyinden yansıyan güneş radyasyonunun oranıdır. Betonun albedosu 0,4 iken asfaltın albedosu sadece 0,1'dir (değer ne kadar yüksekse yansıtma da o kadar yüksek olur)¹⁸. Bu nedenle beton, dikey (bina cepheleri) ve yatay yüzeylerdeki (çatılar ve kaldırımlar) daha koyu renkli malzemelere oranla daha düşük yüzey sıcaklığına sahiptir. Beton kullanımı, kentsel ısı adalarında yaşanan sıcaklık artışını azaltmaya yardımcı olmaktadır. Binaların etrafındaki dış sıcaklık daha düşük olduğundan, binalarda soğutma sistemlerinin kullanımının sınırlandırılmasına da yardımcı olabilmektedir.



Şekil 9. Açık ve koyu yüzeylerde albedo etkisi

¹⁸ Hazır Beton Yaşam Döngüsü Rehberi, THBB, 2021

4.1.2. Yerel Ürün

Betonun kolay bulunan, yerel ve uygun maliyetli olması hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ekonomiler için sürdürülebilir bir yapı malzemesi olmasına neden olmaktadır. Sürdürülebilir inşaatın temel ilkelerinden biri, gelecek nesiller için bu tür malzemelerin mevcudiyetini korumayı da içeren, ham maddelerin sorumlu kullanımınıdır. Bu hedef, beton ve bileşenlerinde olduğu gibi bol, mevcut ve tamamen geri dönüştürülebilir malzemeler için kolayca elde edilmektedir. Bu yaygın mevcudiyet betonun ve bileşenlerinin yerel tedarikine izin verirken, aynı zamanda onu uygun fiyatlı ve optimum maliyetli bir inşaat malzemesi olması konusunda avantajlı hâle getirmektedir.

Betonun ve bileşenlerinin yerel olarak tedarik edilmesi çeşitli faydalar sağlamaktadır. Örneğin, daha uzak yerlerden veya politik risk bölgelerinden tedarik edilmesi gereken malzemelerin aksine, arz güvenliğini ve kullanılabilirliğini sağlamaktadır. Ayrıca, ulaşımın inşaat sahasına olan mesafesini en aza indirerek ulaşımdan kaynaklanan küresel emisyonların sınırlandırılmasına yardımcı olmaktadır.

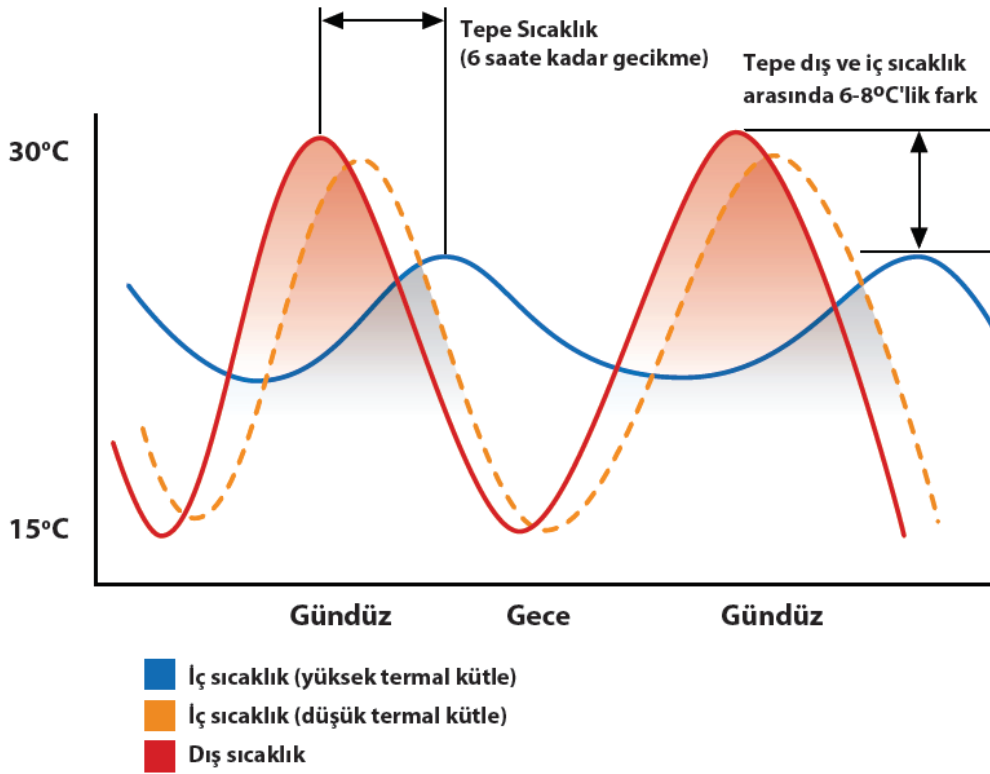
Yerel kaynak kullanımı ayrıca beton ve bileşenlerinin sorumlu bir şekilde tedarik edilmesi kapsamını en üst düzeye çıkararak hem çevresel hem de sosyal etkilerin ve inşaat sürecinin iyi yönetilmesini sağlamaya yardımcı olur. Yerel beton ve agrega tedarikçileri ile iş yapan inşaat şirketleri, yerel standartlara ve düzenlemelere uyulduğundan emin olabilir. Yerel kaynaklı inşaat malzemelerinin kullanımı aynı zamanda, örneğin yerel halkın istihdam edilmesi yoluyla bir inşaat projesinin yürütüldüğü yerel ve bölgesel topluluk için ekonomik ve dolayısıyla sosyal fayda sağlar.

Son olarak, betonun ve bileşenlerinin yaygın olarak bulunabilirliği, arz kısıtlamaları ve kesintilerle (pratik veya politik) karşılaşan diğer ham maddelerin aksine, uygun maliyetli bir ürün olmasına yardımcı olmaktadır.

4.1.3. Termal Kütle

Betonun ısı depolama yeteneği, onu önemli bir enerji depolama çözümü hâline getirebilmektedir.

Termal kütle, beton gibi ağır yapı malzemelerinin enerjiyi depolama ve daha sonra açığa çıkarma yeteneğini göstermektedir. Şekil 10'da görüleceği üzere termal kütle özelliği sayesinde beton, yaz aylarında binalarda aşırı ısınmayı önler, kış aylarında ise ısının korunmasını sağlamaktadır. Termal kütle, binaların enerji verimliliğini artırmak ve sabit bir iç ortam sıcaklığı sağlamak için kullanılmaktadır. Başka bir fayda ise, enerji şebekelerinde esneklik sağlamak için yapı tarafından sunulan termal depolama kapasitesini kullanmak ve böylece yenilenebilir enerji alımını kolaylaştırmaktır¹⁹.



Şekil 10. Termal kütlelerin konfor üzerindeki etkisi

Tablo 1'de görüleceği üzere tuğla, taş ve beton gibi özgül ağırlığı yüksek yapı malzemeleri bu özelliklere sahiptir. Tabii burada spesifik ısı kapasitesi ve iletkenlik özellikleri de önemlidir. Bu üç özelliğin kombinasyonundan termal kütle performansı ortaya çıkmaktadır.

¹⁹ Concrete for energy efficient buildings The benefits of thermal mass, European Concrete Platform ASBL, April 2007.

Tablo 1. Farklı yapı malzemelerinin termal özellikleri²⁰

Malzeme	Spesifik Isı Kapasitesi (J/kg.K)	Özgül Ağırlık (kg/m ³)	Termal İletkenlik (W/m.K)	Termal Kütle Özelliği
Beton	1000	2350	1,75	Yüksek
Çelik	450	7800	50	Düşük
Ahşap	1600	500	0,13	Düşük
Hafif Blok	1000	1400	0,57	Orta-Yüksek
Tuğla	1000	1750	0,77	Yüksek
Kum taşı	1000	2300	1,8	Yüksek

4.1.4. Pasif Soğutma

Isıyı emme ve depolama özelliğinden dolayı beton, binaları pasif olarak soğutmak için kullanılabilir. Bu da iklimler tarafından tüketilen enerjiyi ve/veya aşırı ısınma riskini azaltmaktadır.

Uluslararası Enerji Ajansına (International Energy Agency) göre binaları soğutmak için klima kullanımı, enerjinin en hızlı büyüyen kullanım çeşitlerinden biridir ve enerji verimliliğine yönelik önlem alınmadığı takdirde, 2050 yılına kadar alan soğutması için enerji talebinin üç kattan fazla artması beklenmektedir²¹.

Pasif soğutma sağlamak için betonun termal kütlelerini kullanmak, binalar kaynaklı karbon ayak izi performansını artırmak için kullanılabilir en önemli yollardan biridir. Bir bina içinde açıkta kalan (veya boyanmış) beton, gün boyunca fazla ısıyı emerek sıcaklık dalgalanmalarına karşı termal atalet sağlayarak mekanik soğutma ihtiyacını azaltmakta veya ortadan kaldırmaktadır.

Mekanik soğutma ihtiyacını ortadan kaldırarak veya en aza indirerek gerçekleştirilebilecek CO₂ salımı tasarrufu, projeye ve lokasyona özeldir. Birleşik Krallık'taki

²⁰ Thermal Mass Explained, MPA The Concrete Centre 2019

²¹ <https://www.iea.org/news/air-conditioning-use-emerges-as-one-of-the-key-drivers-of-global-electricity-demand-growth>

The Concrete Center için Arup tarafından yapılan bir araştırmada pasif soğutma kullanılarak elde edilebilecek yıllık CO₂ salımı tasarrufunun, tipik bir ofis binasının beton ve zemin işlerinde oluşan CO₂'yi yaklaşık 50 yılda tamamen dengelemek için yeterli olduğu tespit edilmiştir²². Çalışma, tümüyle klimalı bir çözüm benimsemek yerine binanın tamamen termal kütle kullanılarak soğutulabileceğini varsaymaktadır. Daha yüksek soğutma yüküne sahip, biraz iklimlendirme gerektiren binalarda, betonun termal kütlesine dayalı pasif soğutma kullanımı yine de yıllık emisyonları azaltabilmektedir.

4.1.5. Karbon Bağlama

Beton ömrü boyunca atmosferdeki CO₂'yi bağlama yeteneğine sahiptir. Buna da karbon bağlama ya da yeniden karbonatlaşma (rekarbonasyon) denilmektedir. Betonun temel bileşeni olan çimentonun üretildiği karbon yoğun sürecin bir sonucu olarak, önemli CO₂ emisyonlarından sorumlu olduğu iyi bilinmektedir. Daha az bilinen konu ise betonun yaşam döngüsü boyunca CO₂'yi bağlamasıdır.

Karbonatlaşma, betonun havadaki CO₂ ile reaksiyona girdiğinde meydana gelen doğal bir süreçtir. Karbon bağlama miktarı; direnç sınıfı, maruz kalma koşulları, beton elemanın kalınlığı gibi bir dizi parametreye bağlıdır. Tüm çimento içeren malzemeler (beton, sıva, çimento esaslı yapı elemanları vb.) tarafından sağlanan küresel karbon tutma potansiyeli çimento üretimi sırasında açığa çıkan proses emisyonlarının %30'u kadardır.

Karbon bağlama süreci farklı hızlarda gerçekleşir. Donatısız ürünlerde veya ince/gözenekli uygulamalarda (sıvalar, harçlar, beton bloklar ve mineral köpükler) nispeten hızlı, ancak betonarme ve daha kalın elemanlarda daha yavaş gerçekleşir. Havaya maruz kalan duvar gibi güçlendirilmemiş gözenekli uygulamalar birkaç yıl içinde tamamen yeniden karbonatlaşabilir.

Betonda karbon bağlama, yüzey alanı arttığı ve havaya maruz kalma süreci hızlandığı için betonarme yapılar yıkıldığında da meydana gelmektedir. Beton içeren inşaat

²² <https://gccassociation.org/essential-concrete/passive-cooling-using-thermal-mass/>

atıkları yeniden kullanılmadan (geri dönüşüm) önce atmosferik koşullara maruz bırakıldığında karbon bağlamaları daha da fazladır.

4.1.6. Sağlıklı Binalar

Beton, gürültüye karşı yalıtım sağlar, doğası gereği uçucu organik bileşikler (VOC) yaymayan bir kaynaktır ve insanların yaşaması ve çalışması için daha sağlıklı alanlar yaratarak elektromanyetik radyasyona (EM) karşı korunmaya yardımcı olmaktadır.

Şehirlerde yaşayan ve çalışan insan sayısının yüksek olması, sürdürülebilirlik ve yaşam kalitesi ile ilgili birçok zorluğu gündeme getirmektedir. Beton, daha sağlıklı yaşam alanları yaratan ve milyonlarca insanın refahını artıran, akustik bir yalıtkan ve doğası gereği uçucu organik bileşikler (VOC'ler) yaymayan, yangına, sele ve aşırı rüzgâra karşı dirençli bir malzemedir.

Akustik yalıtım, bir malzemenin duvarlardan geçen ses dalgalarının enerjisini azaltma yeteneğidir ve malzemenin yoğunluğu ve duvarın kalınlığı ile orantılıdır. Yüksek yoğunluğu nedeniyle beton, minimum maliyetle iyi akustik konfor sağlayabilen bir üründür.

Uçucu organik bileşikler; havaya kaçabilen, hastalığa ve alerjik reaksiyonlara neden olabilen ve birçok yaygın yapı malzemesinde bulunan kimyasallardır. Bu emisyonlar, bina sakinlerinin sağlık ve konforunu olumsuz etkileyebilmektedir. Beton, çürümeye, haşere ve yangına dayanıklılık için işlemlere ihtiyaç duyan diğer yapı malzemelerinin aksine, doğası gereği VOC yaymayan bir kaynaktır. Bu nedenle beton kullanımı, hem bu tür malzemeleri işleyen kişilere hem de uzun süreli bina sakinlerine fayda sağlamaktadır.

Kentleşmenin sonucunda telekomünikasyon ve yayıncılık, endüstriyel ekipman ve ev aletlerinde radyo-elektronik cihazların kullanımı artmaktadır ancak bu tür cihazların çokluğu, elektromanyetik dalgaların elektrikli ekipmanın performansını düşürebileceği bir ortam yaratmaktadır. Giderek artan sayıda insan, elektromanyetik radyasyonun sağlık ve yaşam standartları üzerindeki etkisine daha çok dikkat çekmektedir.

Mevcut araştırmalar yalnızca elektronik cihazlar için değil, aynı zamanda bir binanın kullanıcıları için de koruma sağlamak amacıyla binaların elektromanyetik kalkanlama (zırlama) performansını geliştirmeye odaklanmaktadır. Tipik olarak beton, kayda değer ölçüde manyetik veya iletken değildir ancak koruma özellikleri, elektro-iletken veya grafen bazlı malzemeler ile geliştirilebilmektedir.

4.1.7. Dayanıklılık

Dayanıklılık, bir binanın ömrü boyunca tasarlandığı performansı sürdürme yeteneğidir. Yetersiz dayanıklılık, çevresel ve sosyal etkilerin yanı sıra onarım veya yeniden yapılanma nedeniyle beklenmeyen ek maliyetlere neden olabilmektedir. Daha yüksek dayanıklılıkla binaların çevresel etkileri hem daha uzun bir süreye yayılabilir hem de yıllık etkiler azaltılmış olur.

Beton donma-çözülme döngülerine, kimyasallara (örneğin atık su), deniz suyuna ve aşınmaya maruz kaldığında da dayanıklılığını koruyabilmektedir. Beton yapılardaki bozulma genel olarak çelik donatının korozyonundan kaynaklanmaktadır. İyi tasarlanmış, inşa edilmiş ve bakımı yapılmış betonarme yapılar tüm çevresel etkilere karşı yüksek performans göstererek tasarım ömürlerini dahi aşabilir, çünkü betonun doğal alkalinitesi çeliği korozyondan korumak için idealdir.

Sonuç olarak betonarme yapılar, metaller (korozyona karşı direnci zayıf) ve ahşap (çürümeye karşı korunması gereken) gibi diğer yapı malzemelerine göre daha uzun ömürlüdür ve daha az bakım gereksinimlerine sahiptir. Bu arada, bir afet durumunda beton yapılar daha az onarım gerektirir ve daha hızlı bir şekilde tekrar kullanılabilir duruma getirilebilir.

4.1.8. Yangın Direnci

Betonun yangına karşı direnci, yangın olayları sırasında bina sakinlerinin, itfaiye ekibinin ve komşuların güvenliğini artırarak hasarı en aza indirmektedir.

Bir yangın sırasında, dakikada onlarca santigrat derecelik termal gradyanlarla sıcaklıklar çok hızlı bir şekilde 1000 °C'nin üzerine çıkabilmektedir. Bu koşullarda yapı malzemeleri

mekanik özelliklerini kısmen veya tamamen kaybedebilir ve yapının çökmesine neden olabilir. Acil güvenlik endişelerine ek olarak, bu tür tam bir bina çöküşü daha uzun vadeli sosyal ve ekonomik bozulmayı beraberinde getirmektedir.

Sonuç olarak, yangın direnci (yapısal elemanların belirli bir özelliği) ve yangına dayanıklılık (bir binanın yangın sonrasında işlevini sürdürme kapasitesi) birbiriyle bağlantılıdır. Uygun şekilde tasarlandığında beton hem yangına dirençlidir hem de bulunduğu çevrede yangına dayanıklılık sağlayabilir. Betonun bu kapsamda avantajları:

- ◆ Yanmaz, erimez veya zehirli gazlar üretmez.
- ◆ Yangın bariyeri görevi görerek yangının komşu alanlara veya binalara yayılmasını azaltır.
- ◆ Bitişik alanlara ısı transferini azaltan bir yalıtkan görevi görür.
- ◆ Söndürme de dâhil olmak üzere bir yangın sırasında, büyük deformasyonlar geliştirmeden bütünlüğün korur ve yapısal çökme riskini azaltır.
- ◆ Yangında insanlar veya çevre için tehlikeli CO₂ emisyonu veya zararlı madde emisyonu yoktur.
- ◆ Beton doğası gereği yangına dirençli olduğundan, yangın güvenlik önlemlerindeki (yangın kapıları, alarmlar, havalandırma stratejileri, sprinkler) olası hataların oluşturduğu riski azaltır.

4.1.9. Afetlere Dayanıklılık

Beton, afetler karşısında alternatif yapı malzemelerine göre daha dirençlidir, yeniden yapılanma ihtiyacını azaltmakta ve toplumun daha hızlı toparlanmasını sağlamaktadır.

Doğal afetlerin giderek yaygınlaştığı bir dünyada, sel ve şiddetli rüzgâr olaylarına dayanıklı yapılar inşa etmek ekonomik, toplumsal ve çevresel sürdürülebilirliğin kilit bir bileşenidir. Betonun afetlere karşı dirençli olması yeniden yapılanma ihtiyacını, ham madde tüketimini ve atık oluşumunu azaltmaktadır. Bu sayede ilave sera gazı emisyonu oluşumu engellenmektedir. En önemlisi de işletmeler faaliyetlerine ve bina sakinleri

konutlarına daha çabuk dönebildiğinden, sosyal hayatın toparlanmasını hızlandırmaktadır.

Fırtınalar, kasırgalar, hortumlar ve diğer şiddetli rüzgâr olaylarının binalar ve bina sakinleri üzerinde yıkıcı etkileri vardır. Betondan yapılan elemanlar, şiddetli rüzgârlara ve bunun sonucunda oluşacak olumsuzluklara karşı dayanıklıdır. Nitekim okullar, hastaneler gibi birçok beton bina fırtına olaylarında güvenli alan olarak kullanılmaktadır.

Taşkınlar binalar üzerinde büyük bir baskı oluştururken, sel sularının taşıdığı enkaz ve ayrıca suyun dinamik kuvvetleri yapılar üzerinde ek yük oluşturur ancak betonun rijit yapısı ve yoğunluğu, yüksek su basınçlarına dayanmasını sağlar. Şiddetli rüzgâr olaylarında olduğu gibi beton binalar da genellikle barınak imkânı sağlar ve selden kaynaklanan ölümleri önler.

4.1.10. Döngüsel Ekonomi

Döngüsel ekonomi ve endüstriyel ekoloji ilkeleri, diğer endüstrilerin yan ürünlerini, belediye atıkları ve beton yıkım atıkları dâhil olmak üzere çeşitli diğer ikincil malzemeleri kullanan çimento ve beton endüstrisi tarafından onlarca yıldır uygulanmaktadır.

Klinker oranını çimentoda veya doğrudan betonda azaltmak için genellikle kömürle çalışan elektrik santrallerinin atığı uçucu kül ve demir-çelik üretiminden gelen öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel yan ürünlerin kullanılması yaygındır.

Benzer şekilde belediye atıkları da dâhil olmak üzere endüstriyel yan ürünler ve atık maddelerden elde edilen alternatif yakıtlar, çimento fırınında kömür ve petrokok gibi geleneksel fosil yakıtların kısmi ikamesi olarak kullanılmaktadır. Birlikte işleme, daha fazla karbon yoğun yakıtların kullanımını azaltır ve aynı zamanda çöp sahasına gönderilmek üzere olan malzemeleri kullanarak döngüsel ekonomiye katkıda bulunmaktadır. Ek olarak, kullanılmış lastikler gibi bazı alternatif yakıtlar, klinker üretiminde gerekli olan elementleri içerir (hurda lastiklerin içindeki demir teller gibi) ve ham madde tüketimini azaltmaya yardımcı olmaktadır.

Doğal bir kaynak olan agregaların mevcudiyeti ülkeden ülkeye ve bölgeden bölgeye değişmektedir. İyi bir planlama sonucunda mevcut kaynaklar erişilebilir olmaktadır ancak mümkün olduğunca geri dönüştürülmüş malzeme kullanımına odaklanılmalıdır. Ayrıca, gelişmekte olan birçok ülke artan miktarda inşaat ve yıkım atıkları ile karşı karşıyadır. Bu nedenle, geri dönüştürülmüş agregaların kullanımı son yıllarda üzerinde çokça durulan bir konudur.

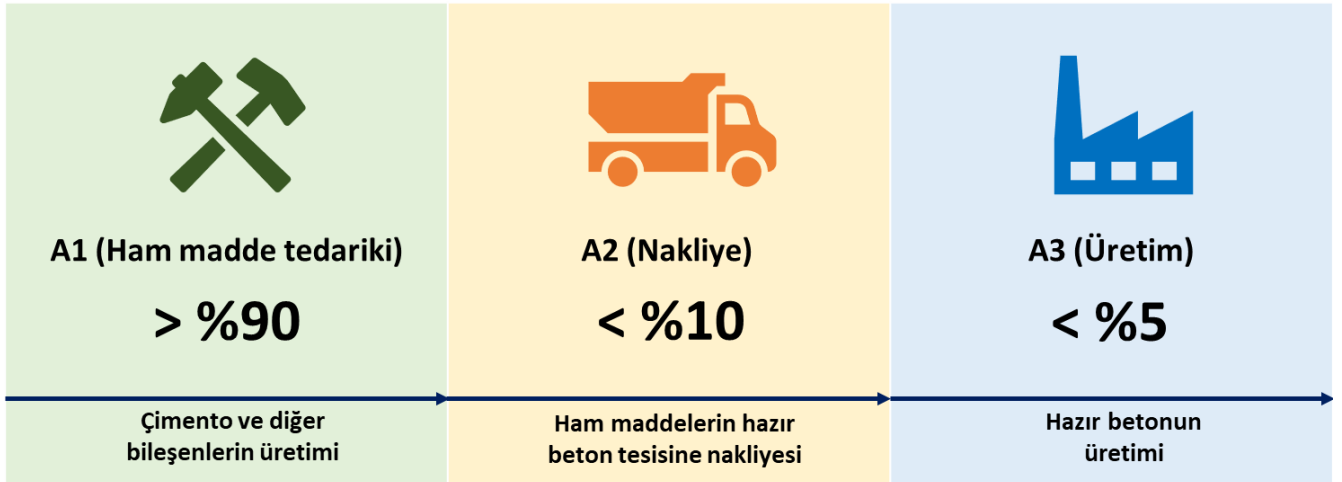
Geri dönüştürülmüş beton agregalarının kullanımı, dögüsel ekonominin açık ve bariz bir örneğidir ve doğal kaynakların kullanımını ve atık depolamayı azaltmayı içeren faydaları vardır. Beton endüstrisinin sürdürülebilirliğe katkıda bulunması için önemli bir fırsat sağlar.

4.2. Hazır Beton Üretimi Kaynaklı CO₂ Emisyonu

Beton yaşam döngüsü boyunca birden fazla noktada karbon emisyonuna neden olmaktadır. Bu emisyonlar iki kategoriye ayrılmaktadır:

Gömülü karbon emisyonları, malzeme kullanılmadan önce ham madde çıkarımı, yukarı akış üretimi, nakliye ve imalat aşamaları sırasında meydana gelen emisyonlardır.

Operasyonel karbon emisyonları, imalat ve inşaat sonrasında malzemenin operasyonel ömrü boyunca meydana gelmektedir.



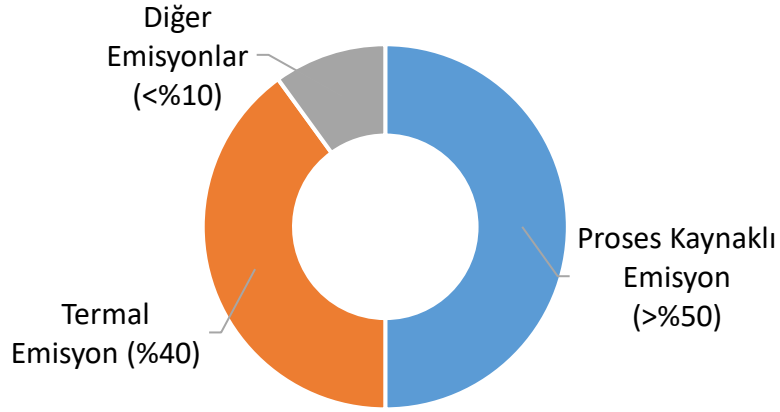
Şekil 11. Betonun beşikten kapıya emisyon aşamaları

4.2.1. Ham madde ve nakliye

Hazır beton üretiminde başlıca girdiler çimento, agrega, su, kimyasal katkı ve bazı durumlarda mineral katkılardır. Bu girdiler içinde en fazla emisyonla neden olan bileşen çimentodur.

Çimento kaynaklı emisyonun dünyadaki insan faaliyetleri kaynaklı emisyonun %8'ine denk geldiği bilinmektedir. Bu oran ülkemizde %12-13 seviyesindedir. Türkiye'nin dünyanın en fazla çimento üreten ilk beş ülkesinden biri olduğu düşünülürse bu göreceli yüksek oran normaldir. Eğer üretimde tamamen fosil yakıt kullanılmışsa ve herhangi iyileştirici bir yöntem uygulanmadıysa genel olarak 1 ton klinker üretimi sonucu neredeyse 1 ton CO₂ emisyonu açığa çıkmaktadır. Küresel karbon ayak izini düşürmek için çimento üreticileri kömür ve petrokok gibi fosil yakıtlar yerine alternatif yakıtlar ve atıklar kullanmakta, ayrıca klinker oranını azaltıp ikincil bağlayıcı malzemeler (mineral katkılar) kullanarak katkı çimentolar üretmektedir, ancak çimento çok geniş bir alana yayılmış uygulamalara yönelik olan, farklı müşteri gruplarına arz edilen ve belirli standartları sağlamak zorunda olan bir üründür. Bu nedenle yapılacak iyileştirmeler de belirli limitler dâhilinde olabilmektedir. Son yıllarda gündemde olan ancak henüz tam olarak genel bir uygulama aşamasına geçmeyen karbon yakalama, depolama ve kullanma teknolojisi bu sorunun çözülmesinde çok daha etkin bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Yine de bunun için bir süre daha beklenmesi gerekecektir.

Çimento üretiminde "Kapsam 1" olarak tanımlanan doğrudan karbon emisyonunun iki kaynağı bulunmaktadır. Bunlardan ilki, Şekil 12'de görüleceği üzere açığa çıkan emisyonun %50'sinden fazlasından sorumlu olan kireç taşının yüksek sıcaklıkta karbon salımına neden olduğu proses emisyonudur. Diğeri ise fırın reaksiyonları için gerekli sıcaklığa ulaşmak için yakılan yakıtlardan kaynaklanan termal emisyonudur. Yarı ürün olan klinker üretimine ait olan bu emisyonlar yaklaşık 800-900 kg CO_{2e}/ton klinker düzeyindedir.



Şekil 12. Çimento üretiminde açığa çıkan karbon emisyonlarının kaynakları

Agrega tarafında ise ocaktan malzemenin çıkarılması ve kırılması işlemlerinden kaynaklanan emisyonlar oluşmaktadır.

Mineral katkıları, çimentoyu belirli bir oranda ikame eden ikincil bağlayıcılardır. Bir prosesin yan ürünü oldukları için emisyona neden olmaz. Sadece yüksek fırın cürufunda olduğu gibi öğütme işleminden kaynaklanan bir emisyon söz konusu olabilir.

Tüm bu girdilerin üretim alanına nakliyesi de CO₂ emisyonuna neden olmaktadır. Özellikle büyük şehirlerde kaynakların uzak olması, nakliye nedeniyle emisyonu artırmaktadır.

4.2.2. Üretim

Betonun üretim aşamasında, fabrika alanında malzeme taşınması (stok alanında) kaynaklı ve üretimin gerçekleştirilmesi için gereken yakıt ve elektrik kaynaklı emisyonlar oluşmaktadır. Birim üretimde bu değer büyük olmasa da Türkiye'nin dünyanın sayılı beton üreticilerinden biri olduğu düşünüldüğünde toplamda kayda değer miktarlara ulaşılmaktadır.

4.2.3. Sevkiyat ve Yerleştirme

Hazır beton, belirli bir süre içinde taşınması gerektiği için sevkiyat mesafesi sınırlıdır. Bu mesafe en fazla 40-50 km civarındadır. Özellikle büyük şehirlerde üretici sayısının fazla olması bu mesafeyi 10-20 km'lere düşürmektedir. Şantiyede ise betonun pompalanması,

sıkıştırılması gibi işlemlerden de bir miktar emisyon açığa çıkmaktadır. Önemli bir parametre de sefer başı taşınan beton miktarıdır. İstiap haddi nedeniyle taşıma yükü sınırlandırılmaktadır.

4.3. Hazır beton kaynaklı CO₂ emisyonunu azaltmak için yapılması gerekenler

- ◆ Beton içerisindeki çimentoyu daha fazla mineral katkı ile yer değiştirmek ya da katkılı çimento kullanmak.
- ◆ Mümkünse alternatif yakıt ve ham madde içeriği yüksek çimento tercih etmek.
- ◆ Beton içerisindeki çimentoyu mineral katkı kombinasyonları ile yer değiştirerek betonun dayanım ve dayanıklılığını iyileştirmek.
- ◆ Su azaltıcı katkı kullanımı ile beton içerisindeki çimento miktarını azaltmak.
- ◆ İstenilen performansı sağlamak için çimentoyu bir miktar ikame edebilecek mineral katkılar ve etkili kimyasal katkılar kullanmak.
- ◆ Üretim yerine yakın kaynaklardan malzeme tedarik etmek.
- ◆ Gerektiğinde yakın bir kaynaktaki reaktif bir agregayı, tasarımda bağlayıcı kombinasyonlarını optimize etme yoluyla daha uzak mesafeden gelecek zararsız bir agregaya tercih etmek,
- ◆ Yakıt tasarrufu sağlamak için periyodik araç bakımlarını zamanında yapmak ve personeli ekonomik ve güvenli sürüş konusunda eğitmek.
- ◆ Sevkiyat süreçlerini planlayarak ve iyi organize ederek şantiyedeki bekleme süresini ve dolayısıyla gereksiz yakıt sarfiyatını engellemek.
- ◆ Özellikle agrega ve su kullanımında en yüksek oranda geri dönüşümden faydalanmak.
- ◆ Betonarme yapı yıkıntılarında elde edilen geri dönüşümlü agrega ile beton üretmek.
- ◆ Daha az bakıma ihtiyaç duyan ve daha uzun servis ömrü olan dayanıklı beton üretmek.

- ◆ Yüksek dayanımlı beton kullanımı ile daha narin betonarme elemanlar yapmak (birim beton hacminde daha fazla çimento kullanılsa da toplam beton hacmi düşük olmaktadır).
- ◆ Betonun ısı kapasitesi sayesinde ofis ve evlerde ısıtma/soğutmada daha az enerji sarfiyatı sağlamak.
- ◆ Klasik donatı yerine fiber donatı kullanmak.
- ◆ Kendiliğinden yerleşen (sıkışan) beton kullanmak.

5. DÜŞÜK KARBONLU BETON



Düşük karbonlu beton, geleneksel betona kıyasla karbon ayak izini ve çevresel etkisini azaltmak üzere tasarlanmaktadır. 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 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.

5.1. Beton için gömülü karbon azaltma yöntemleri

Betonda gömülü karbonun azaltılması verimli ve etkin kaynak yönetimiyle başarılabilir. Karbon azaltımına yönelik stratejilerin çoğu, geleneksel maliyet tasarrufu önlemlerinin optimize edilmiş bir şekilde uygulanmasını içermektedir.

Şekil 13'te düşük karbonlu beton üretmek için malzeme ve teknoloji alanındaki yöntemler belirtilmektedir.



Şekil 13. Düşük karbonlu beton üretimi için bazı yöntemler

5.1.1. Klinker İçeriğini Azaltma

Daha önce de belirtildiği üzere çimento, betonun ağırlıkça ortalama %12'sini temsil etmektedir; ancak betondaki gömülü karbonun %90'ını oluşturmaktadır²³. Büyük resme bakıldığında ise çimento üretiminin küresel karbondioksit emisyonlarının %8'inden sorumlu olduğu görülmektedir²⁴. 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 2, çimento ve diğer çimento malzemelerinin A1-A3 gömülü karbon emisyonlarını, karşılaştırma amacıyla listelemektedir^{25,26}.

Tablo 2. 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.	

23 Hazır Beton Yaşam Döngüsü Rehberi, THBB, 2021

24 Lehne, J., and Preston, F., 2018, Making Concrete Change Innovation in Low-carbon Cement and Concrete, The Royal Institute of International Affairs

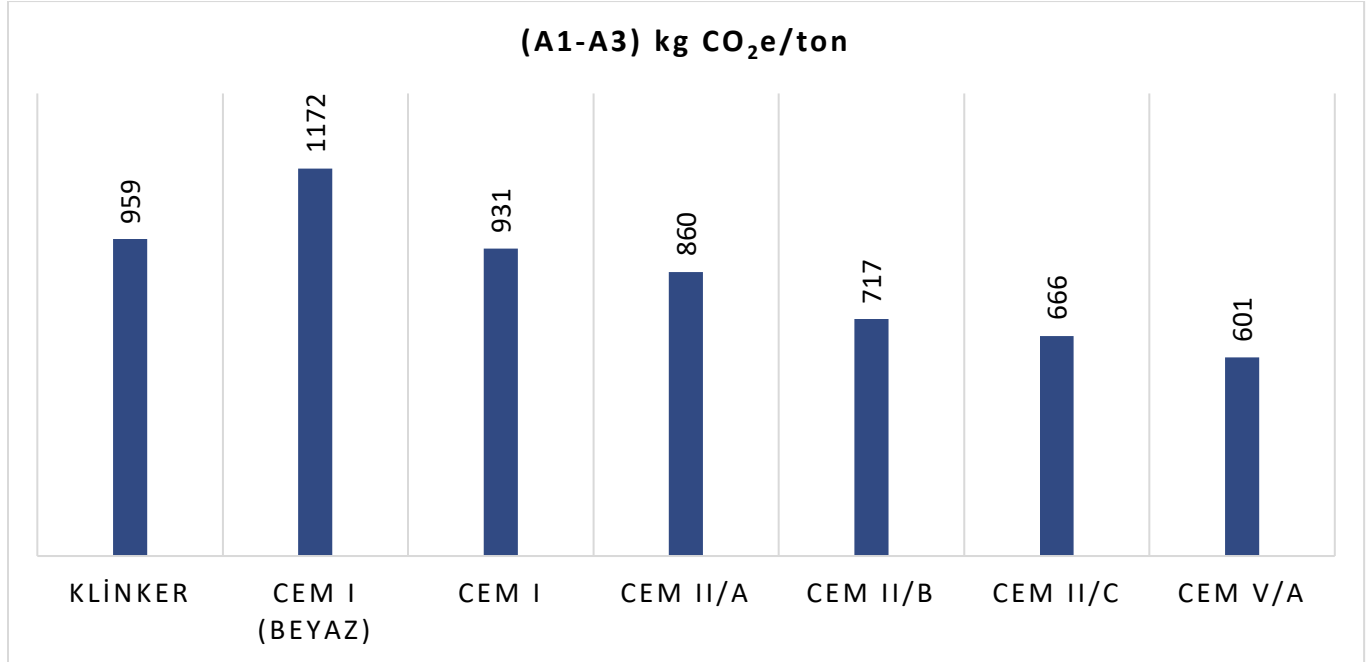
25 The Concrete Center, "Whole-Life Carbon and Buildings," MPA The Concrete Centre 2016, 2016.

26 Arup, "Low Carbon Concrete: Practical guidance for Arup engineers," 2019.

Türkiye Hazır Beton Birliği (THBB) tarafından yapılan bir araştırma kapsamında Türkiye'de hazır beton üreticilerinin kullandığı çimento cinslerinin kullanım oranları tespit edilmiştir²⁷. 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 çimentosudur²⁸. Oysa AB ülkelerinde en fazla CEM II/A tipi çimento tercih edilmektedir. Bu çimento ortalama %10 daha az klinker içermektedir.

Şekil 14'te güncel durumda çeşitli çimento üreticilerinin ürettiği farklı ürünler için yayımladığı çevresel ürün beyanlarında (EPD) belirtilen A1-A3 karbon emisyon değerlerinin ortalamaları görülmektedir. Katkılı çimentoların CEM I tipi çimentoya göre önemli oranda düşük karbonlu olduğu net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 14. Türkiye'de çimento üreticilerinin farklı ürünler için duyurduğu EPD'lerde belirtilen A1-A3 karbon emisyonları

27 Hazır Beton Yaşam Döngüsü Rehberi, THBB, 2021

28 Türk Çimento 2023 İstatistikleri

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 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 katkıları genel olarak çimentodan daha düşük fiyatlıdır. Eş miktarda çimento azaltılması 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 dürabilite (dayanıklılık) koşullarını karşılamaları nedeniyle tercih edilmektedir. Bunun dışında betonda plastik rötrenin (yüzeysel çatlak oluşumu) azaltılması, taze beton sıcaklığının düşürülmesi, pompalanabilirliğinin artırılması ve dayanım gelişiminin normalleştirilmesi amacıyla da kullanılmaktadır.

Tablo 3. 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. Beton kimyasal katkılarıyla ayarlama yapılabilir.	
Geçirimsizlik	Yüksek	Düşük
Uzun Dönem Dayanım	Düşük	Yüksek
Büzülme (rötrel)	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.
- ◆ Müşterilere 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 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.
- ◆ Agrega 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/m^3 ile 525 kg/m^3 arasında değiştiği tespit edilmiştir²⁹. 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 katkıları 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

²⁹ <https://industryeurope.com/sectors/construction-engineering/structural-concrete-in-a-zero-carbon-future/>

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 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 göre³⁰, süperakışkanlaştırıcı katkılar 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 Katkı Üreticileri Birliği 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 4'te belirtilmiştir³⁰.

Tablo 4. EFCA EPD'lerde yer alan katkıların karbon ayak izi

Kimyasal Katkılar	A1 – A3 Karbon emisyonu (kg CO ₂ e) / 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

³⁰ Beton Kimyasal Katkılarının Net Sıfır Karbon Hedefindeki Rolü, KÜB, 2023.

5.1.2. Klinker/çimento üretiminde enerji verimliliğinin artırılması

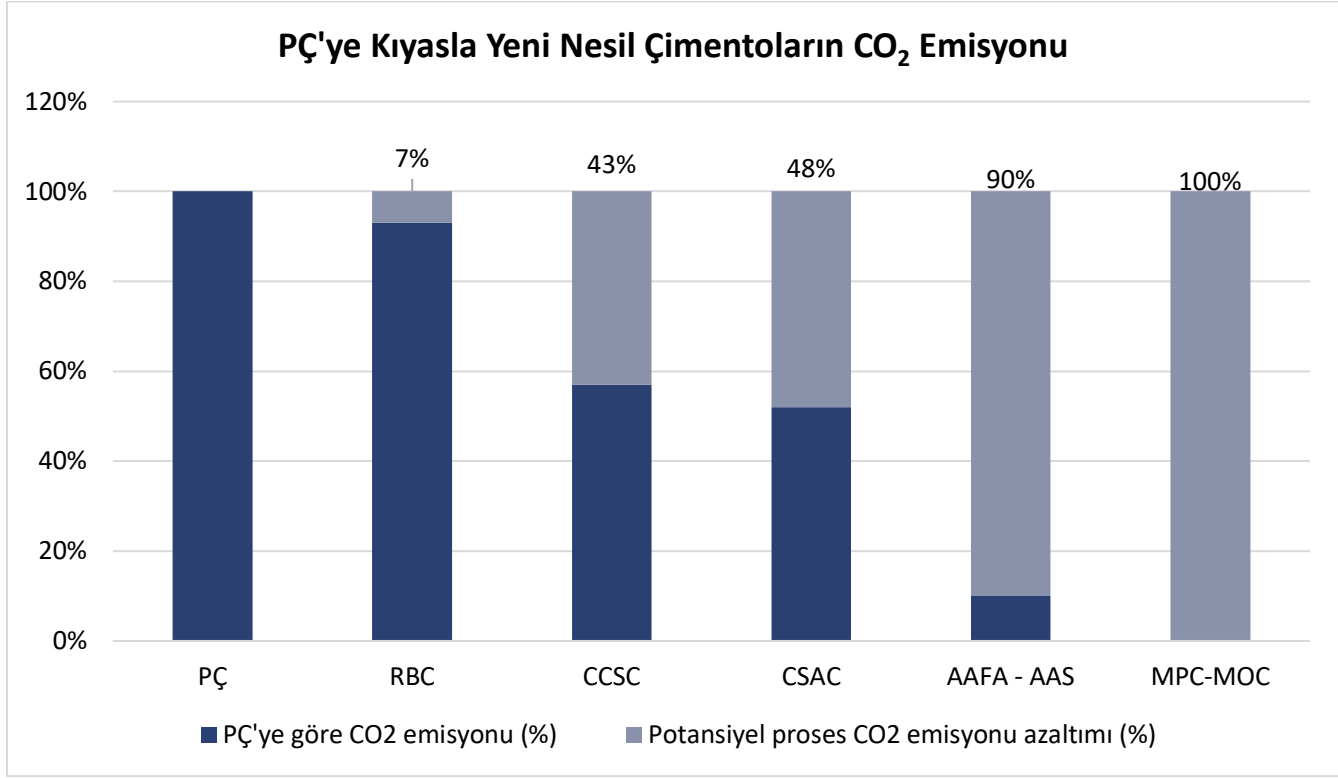
Emisyonların önemli bir kısmı çimento üretimi ve dağıtımıyla ilişkilidir. Bunun yaklaşık %50-60'ı klinkerin kalsinasyon işleminden ve yaklaşık %30-40'ı yakıtın yanmasından kaynaklanmaktadır. Klinker üretimi verimliliğinin artırılması konusunda kayda değer ilerlemeler kaydedilmiştir ancak verimliliğin 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.

5.1.3. 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 / Alkali activated fly ash
- ◆ **AAS:** Alkali ile aktive edilmiş cüruf / Alkali activated slag
- ◆ **CCSC:** Karbonatlı kalsiyum silikat çimentosu / Carbonated calcium silicate cement
- ◆ **CSAC:** Kalsiyum sülföalüminat çimentosu / Calcium sulfoaluminate cement
- ◆ **MOC:** Magnezyum oksiklorür çimentosu / Magnesium oxychloride cement
- ◆ **MPC:** Magnezyum fosfat çimentosu / Magnesium phosphate cement
- ◆ **PÇ:** Portland çimentosu
- ◆ **RBC:** Reaktif belit çimentosu / Reactive belite cement

Şekil 15'te Portland çimentosuna (PÇ) kıyasla alternatif çimentoların karbon emisyonları görülmektedir.



Şekil 15. Portland çimentosuna kıyasla alternatif çimentoların CO₂ emisyonu³¹

5.1.4. 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 katkı 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 dolduramadığı bu boşlukları çimento hamuru (pastası) doldurur. Bu nedenle, granüler yapının optimize edilmesi, belirli bir basınç

³¹ Yeni Nesil Çimentolar, Türk Çimento, 2021.

dayanımı için gerekli olan çimento miktarını azaltır³². Standartlar çok daha azına izin verse de hazır beton üretiminde ortalama 300 kg/m³ çimento kullanılmaktadır³³. 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. Agrega 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 olabilmektedir³⁴.

5.1.5. 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

³² 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.

³³ 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.

³⁴ Cementing the European Green Deal, Cembureau Publication, 2020.

emisiyonu 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.

5.1.6. 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, öngerilmeli 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 beklenmektedir³⁵. 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 olur³⁶.

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

³⁵ Cembureau, Cementing the European Green Deal, Cembureau Publication, 2020.

³⁶ 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.

olarak zorlaştırabilir. Eklemeli (3 boyutlu) imalat ve yeni kalıp teknolojileri, malzeme açısından verimli şekiller sağlayabilir³⁷.

Cambridge Üniversitesi tarafından hazırlanan bir raporda, yapısal elemanların tüm güvenlik faktörleri uygulandıktan sonra tipik olarak kapasitelerinin yalnızca %60-80'ini kullanmak üzere tasarlandığı vurgulanmıştır³⁸. 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 olabilecektir³⁹.

5.1.7. 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

37 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.

38 Minimising Energy in Construction (MEICON) Survey Report, University of Cambridge, 2018.

<https://www.repository.cam.ac.uk/handle/1810/287863>

39 <https://industryeurope.com/sectors/construction-engineering/structural-concrete-in-a-zero-carbon-future/>

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 arttırabilir⁴⁰. Sonuç olarak, geri kazanılmış agrega kullanımı çimento talebini 20-40 kg/m³ arttırabilmektedir⁴¹. 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 düşürülebilmektedir⁴².

40 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.

41 Knoeri, C., Sanyé-Menguai, E., Althaus, HJ., "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>

42 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.

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.

5.1.8. 28 Gün Yerine Daha İleri 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 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 katkıları 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 kürlenme süresine ihtiyaç duymaktadır. Bu sürenin sonunda sadece Portland çimentosundan yapılmış betona benzer bir dayanım performansına sahip olunmaktadır^{43,44}. Bu nedenle, beton dayanımının 28 günden sonra, örneğin 56 günde değerlendirilmesi daha uygun olmaktadır.

5.1.9. 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

43 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.
44 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.

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.

5.1.10. 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 agregada kullanılır. Agregadan sonra ise çimento gelmektedir. Bu nedenle başta agregada 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 agregada 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.

5.1.11. 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 değerın 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

5.2. Türkiye'de Üretilen Hazır Betonların Genel Özellikleri

Türkiye Hazır Beton Birliği tarafından 2023 yılında Türkiye genelini temsil etmesi amacıyla yapılan bir araştırma kapsamında Tablo 5'te görüleceği üzere beş farklı dayanım sınıfına ait ortalama beton reçeteleri tespit edilmiştir. Bu verilerin ağırlıklı ortalaması ile de jenerik bir beton reçetesi temin edilmiştir.

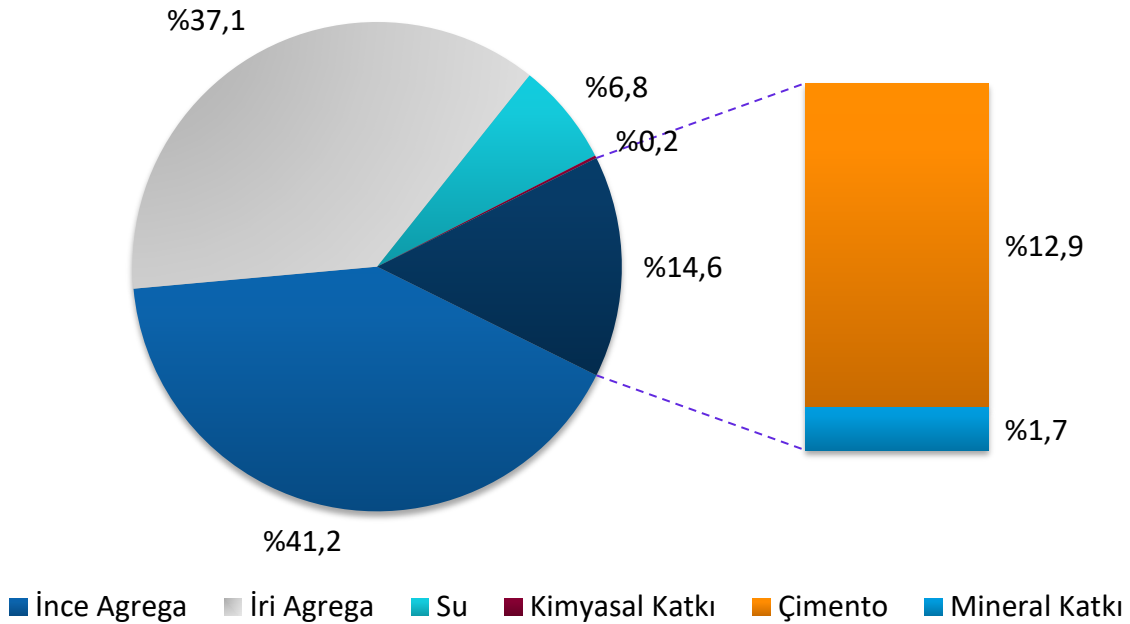
Tablo 5. 2023 yılı Türkiye geneli ortalama beton karışımı

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
Eş değer 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 Agrega Miktarı (kg/m ³)	865,9	880,6	903,0	920,4	941,4	886,4
Ort. İnce Agrega 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.

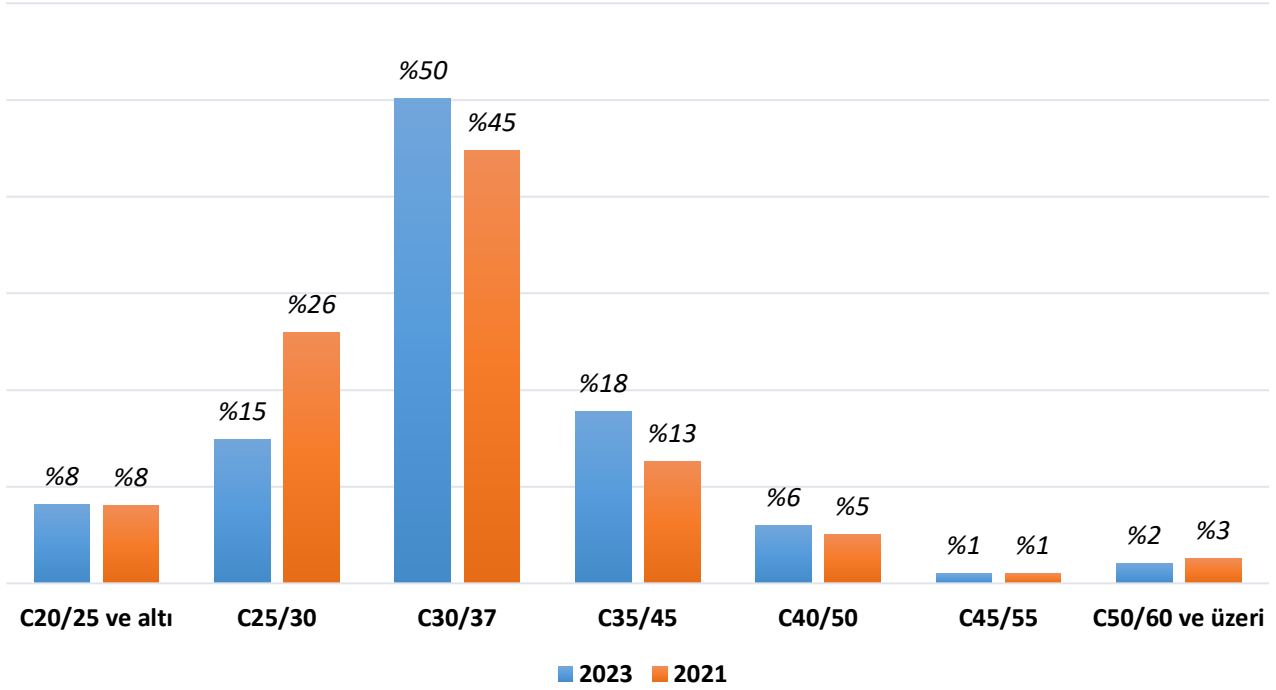
2023 yılında 2021 yılına oranla çimento ve toplam bağlayıcı dozajındaki artışın en önemli nedeni agrega kalitesinde yaşanan sorunlar olmuştur. Standartta uygun olmasına rağmen beton üretimi için ideal olmayan ve kalite dalgalanması görülen kaynaklardan temin edilen agregalar çimento tüketimini olumsuz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



Şekil 16. Ağırlıkça ortalama beton bileşen oranları

Çimento ve bağlayıcı dozajındaki artışın bir diğer nedeni de beton basınç dayanım sınıflarındaki artış olmuştur. Şekil 17'de 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.

Dayanım Sınıfı Bazında Üretim



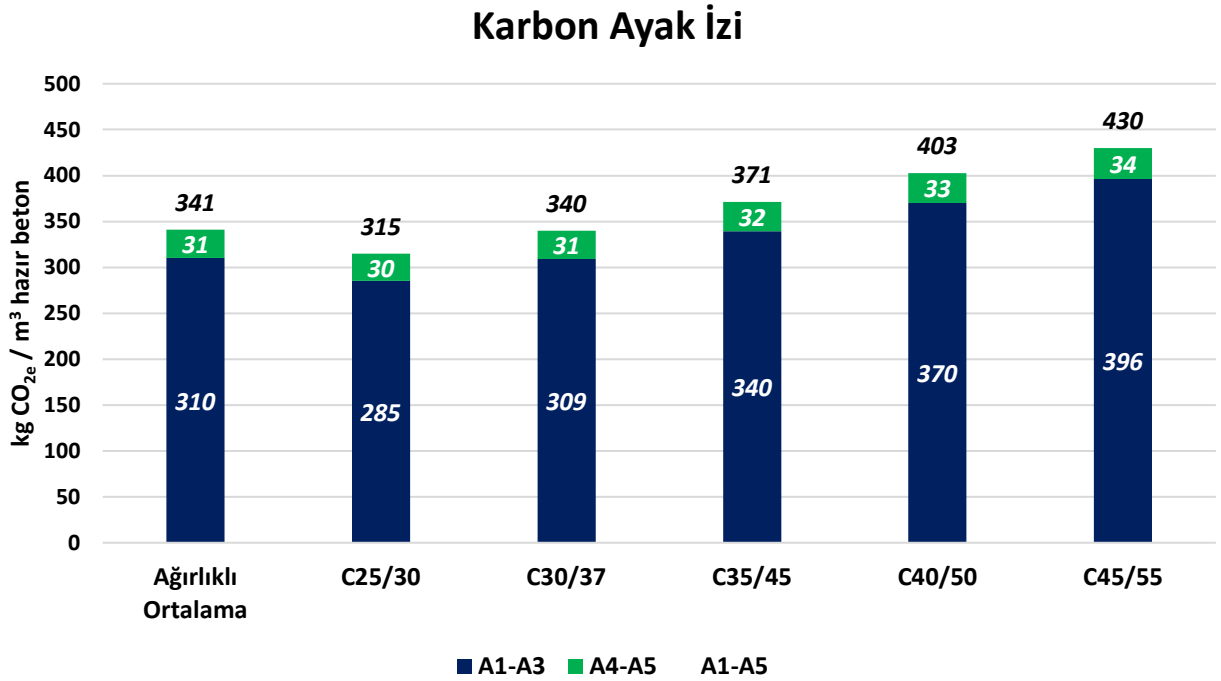
Şekil 17. 2021 ve 2023 yıllarında Türkiye'de ortalama beton basınç dayanım sınıfları

2021 yılında ülkemizdeki hazır betonun ortalama karbon ayak izini (gömülü karbon) hesaplamak için THBB tarafından sektörel bir araştırma yapılmıştır⁴⁵. Beton bileşenlerinin çevresel etkilerini özellikle karbon ayak izini tespit etmek amacıyla, çimento için Türkiye Çimento Sanayicileri Birliğinin (TÜRKÇİMENTO) yayınları ve çimento üreticilerinin faaliyet/sürdürülebilirlik raporlarındaki veriler, 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 6'da ve Şekil 18'te görüldüğü gibi dayanım sınıfı bazında betonun farklı yaşam döngüsü aşamalarına ait karbon ayak izi, Global Cement and Concrete Association (GCCA) EPD hesaplama programı kullanılarak hesaplanmıştır.

45 Hazır Beton Yaşam Döngüsü Rehberi, THBB, 2021

Tablo 6. Dayanım sınıfları bazında 1 m³ hazır betonun karbon ayak izi

		Karbon Ayak İzi (kg CO ₂ e)					Ağırlıklı Ortalama
		C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	
A1-A3	Ham maddeler	285,17	308,96	339,57	370,16	396,43	310,47
A4-A5	İnşaat Süreci	29,93	30,73	31,61	32,63	33,58	30,75
B1	Kullanım	-7,00	-7,64	-8,52	-6,48	-6,98	-7,69
C1-C4	Servis Ömrü Sonu	36,65	36,88	36,86	36,95	37,32	36,82



Şekil 18. Dayanım sınıfları bazında A1-A5 kapsamında hazır beton karbon ayak izi

6. SONUÇ

Bir yapı malzemesi olarak betonun değeri yadsınamaz ancak iklim değışikliği 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 değeri 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 yapılabilmektedir.

Son yıllarda giderek artan düşük karbonlu üretim ve teknoloji yelpazesi, bugün hem yapısal performansı iyileştirmek hem de karbon emisyonunu azaltmak için mevcut süreçlere dâhil edilmektedir. Bunlardan bazıları son derece yenilikçidir. Bir kısmı ise düşük teknolojili ve pratikte zaten uygulanan, ancak çok daha kapsamlı bir şekilde konuşlandırılacak 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 nötrlülüğüne 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 ve akademi üçgeninde yenilikçi malzemelerin araştırılmasına yönelik iş birlikleri kurulması



www.thbb.org