



# THBB AKADEMİ

## TEKNİK BÜLTEN

11

ÖZEL KONU

# *SÜRDÜRÜLEBİLİR HAZIR BETON ÜRETİMİ*

TÜRKİYE HAZIR BETON BİRLİĞİ YAYINIDIR.

Ağustos, 2023

## GİRİŞ

İnsan kaynaklı faaliyetlerin çevreye etkisi küresel ölçekte ilk kez 1972 yılında Stockholm’de gerçekleştirilen BM İnsan Çevresi Konferansı’nda işlenmiştir. Sürdürülebilir kalkınma kavramı ise ilk kez, 1987 yılında Dünya Çevre ve Kalkınma Komisyonu’nca hazırlanan Brundtland Raporu’nda geçmiştir. Sürdürülebilir kalkınma için evrensel olarak kabul edilmiş bir tanım yoktur. Brundtland Raporu’nda “sürdürülebilir kalkınma”, gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılama yeteneğinden ödün vermeden bugünün ihtiyaçlarını karşılayabilen kalkınma olarak tanımlanmıştır [1].

1997 yılında küresel ısınma ve iklim değişikliği konusunda mücadeleyi sağlamaya yönelik uluslararası ilk çerçeve olan Kyoto Protokolü, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi içinde imzalanmıştır. Kyoto Protokolü ile hedeflenen başarıya ulaşılamaması, 1950’lerden 2010’lara kadar atmosferdeki karbon miktarının sürekli artış göstermesi ve bunun sonucunda küresel sıcaklık artışının kritik düzeye ulaşması daha etkili ve yaygın politikaların oluşturulması ihtiyacını doğurmuştur. Bunun üzerine 2020 sonrası iklim değişikliği rejiminin çerçevesini oluşturan Paris Anlaşması, 2015 yılında Paris’te düzenlenen Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi 21. Taraflar Konferansı’nda kabul edilmiştir. 2021 yılı sonunda Türkiye tarafından da imzalanan Paris Anlaşması, çimento ve dolayısıyla hazır beton sektörü başta olmak üzere birçok sanayi sektörünün iklim değişikliği ile mücadele kapsamında dönüşümünü tetikleyen ve hızlandıran bir milat olmuştur. Her ne kadar 2005 yılında Avrupa Birliği’nde Emisyon Ticaret Sistemi (ETS) uygulanmaya başlanmış olsa da küresel ölçekte farkındalık ve duyarlılık 2015 sonrasında oluşmaya başlamıştır. Bunun en iyi örneği ABD, İngiltere, Almanya vb. birçok ülkedeki çimento ve hazır beton sektörlerinin iklim değişikliği ile mücadele kapsamındaki yol haritalarını ilk kez 2021 yılında duyurmuş olmalarıdır.

## BETONUN ÖNEMİ

Beton, dünyada sudan sonra en yaygın kullanılan ikinci malzemedir ve ayrıca açık ara dünyanın en çok kullanılan yapı malzemesidir [2]. Küresel olarak yılda yaklaşık 4 milyar ton çimento tüketilmektedir [3] ve bu çimentonun %80’i ile beton üretildiği varsayılırsa karşımıza 10 milyar m<sup>3</sup> gibi devasa bir beton üretim miktarı çıkmaktadır. Bu neredeyse dünyadaki her insan başına yıllık 1,3 m<sup>3</sup> beton üretimi demektir. Türkiye’de ise 2022 yılında 105 milyon m<sup>3</sup> hazır beton üretimi gerçekleşmiştir [4].

Birleşmiş Milletler, küresel olarak önümüzdeki 40 yıl içinde 230 milyar m<sup>2</sup>'lik yeni bir alan inşa edileceğini, dünya binalarındaki mevcut taban alanının iki katına çıkacağını tahmin etmektedir. Bunun büyük çoğunluğu Afrika ve Asya'da olacaktır, ancak 2060 yılına kadar 25 milyar m<sup>2</sup> yeni inşaat alanı eklenecek olan Avrupa'da da hala önemli bir büyüme beklenmektedir [5]. Pratik bir alternatifi olmayan beton, yeni bina ve altyapı talebini karşılamada önemli bir rol oynamaya devam edecektir.

Üstün fiziksel ve mekanik özellikleri, kolay üretilmesi, sürdürülebilir olması ve diğer alternatif malzemelere göre daha ekonomik olması betonu kelimenin tam anlamıyla modern yapıları çevrenin temel unsuru haline getirmektedir. 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 yapıları çevremizde daha fazla iklim direnci elde etmek için vazgeçilmez olacak olan dayanımı, çok yönlülüğü ve dayanıklılığı gibi birçok özelliği nedeniyle de değerlidir. Ayrıca beton, kimyasal karbonatlaşma süreci boyunca ortamdaki karbonu ömrü boyunca tutma konusunda benzersiz bir kapasiteye sahiptir. Bu açıdan betona "karbon yutağı (carbon sink)" bir malzeme tanımı da yapılabilmektedir [6]. 1930 ile 2019 arasında, tahmini olarak 21 milyar ton ortam karbondioksiti (CO<sub>2</sub>) karbonatlaşma yoluyla beton ve diğer çimentolu ürünler tarafından tutulmuştur [7]. Bununla birlikte, betonun karbon ayak izi, karbonatlaşma ile tutabileceği CO<sub>2</sub>'nin oldukça üzerindedir. Bunun nedeni, betona benzersiz yapısal özelliklerini veren bileşen olan Portland çimentosu üretim sürecinin yüksek derecede emisyon yoğun olmasıdır. Çimento, çoğu uygulamada tipik olarak hacimce betonun %15'inden fazlasını oluşturmazken, malzemenin karbon emisyonunun neredeyse %90'ını oluşturmaktadır. Küresel olarak, Portland çimento endüstrisi, toplam antropojenik CO<sub>2</sub> emisyonlarının %8'inden sorumludur [8] ve bu nedenle beton bir ülke olsaydı, Çin ve ABD'den sonra dünyanın en büyük üçüncü yayıcısı olurdu [9].

Son yıllarda giderek artan düşük karbonlu üretim ve teknoloji yelpazesi, bugün hem yapısal performansı iyileştirmek hem de beton emisyonlarını azaltmak için mevcut süreçlere dahil edilmektedir. Bunlardan bazıları son derece yenilikçidir. Diğerleri ise düşük teknolojili ve pratikte zaten iyi kurulmuş, ancak çok daha kapsamlı bir şekilde konuşlandırılacak niteliktedir.

Betondaki emisyon azaltımları yalnızca tek bir değişiklikle değil, malzemenin tüm yaşam döngüsü boyunca kümülatif olarak elde edilebilmektedir. Buna bileşen seçimi, imalat, nakliye, inşaat süreçleri, inşaat sonrası bakım, onarım, bertaraf ve yeniden kullanım dahildir.

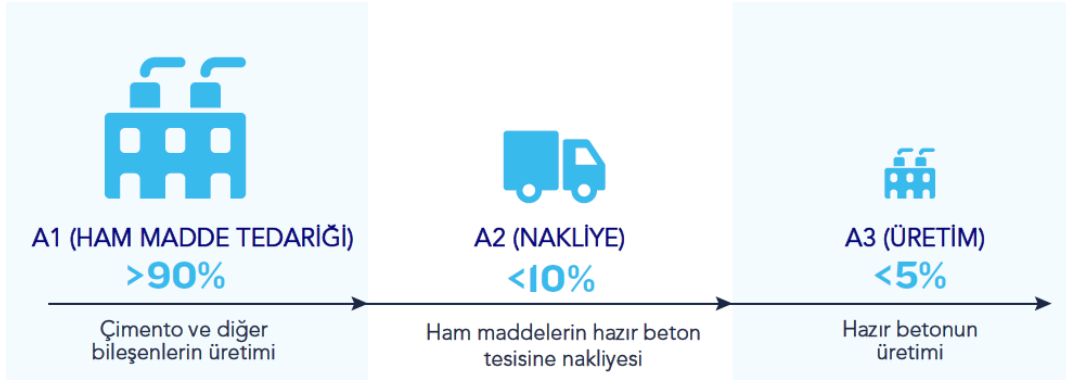
Emisyon azaltımları, aynı beton karışımında veya nihai üründe bireysel azaltma faktörleri birleştirildiğinde en üst düzeye çıkmaktadır. Çoğu emisyon azaltımı, mevcut çimento ve beton üreticileri tarafından uygulanabilir

niteliktedir. Betondaki karbon ayak izini azaltmak, birbirini takip eden ayrı endüstrilerin ve aktörlerin ortaya çıkmasından ziyade, büyük ölçüde yerleşik çimento ve beton üreticilerinin kararlarını ve eylemlerini içermektedir.

Beton gibi üretilen herhangi bir malzemenin kullanım ömrü boyunca birden fazla noktada karbon emisyonları üretilir. Bu emisyonlar iki kategoriye ayrılır [10]:

1. Gömülü karbon emisyonları; malzeme kullanılmadan önce ham madde çıkarımı, yukarı akış üretimi, nakliye ve imalat aşamaları sırasında meydana gelen emisyonlardır.
2. Operasyonel karbon emisyonları, imalat ve inşaat sonrasında malzemenin operasyonel ömrü boyunca meydana gelir.

Şekil 1’de hazır betonun beşikten kapiya kadarki süreçteki emisyon oranları görülmektedir. Hazır betonun gömülü karbon emisyonu toplam emisyonun %90’ından fazlasını kapsamaktadır. Üretim kaynaklı operasyonel emisyon oranı ise %5 seviyesindedir.



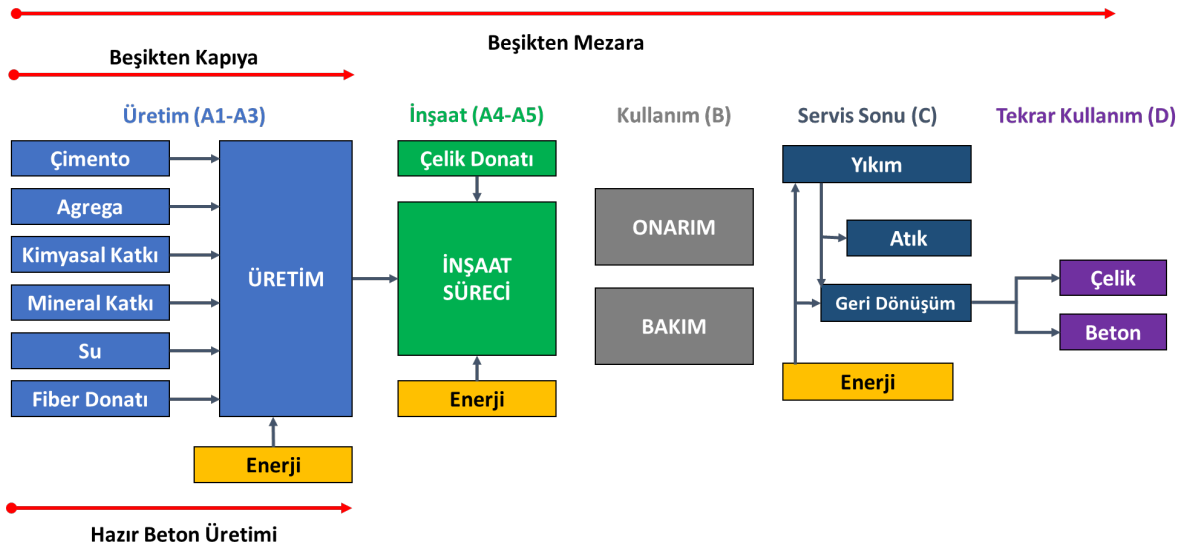
Şekil 1. Hazır betonun beşikten kapiya emisyon aşamaları [11]

Betonun iklim üzerindeki etkisi, büyük ölçüde Portland çimentosu üretim süreciyle ilişkili gömülü karbon emisyonlarının bir işlevidir. Çimento ile ilgili gömülü karbon emisyonları “proses” ve “yanma” emisyonlarına ayrılmaktadır. Çimento üretimindeki emisyonların yaklaşık %60’ı, CO<sub>2</sub>’nin kireçtaşı kalsinasyonunun kimyasal bir yan ürünü olarak salındığı süreç emisyonlarından kaynaklanmaktadır. Kalan emisyonlar, fosil yakıtların (en yaygın olarak kömür) klinker üretimi için gerekli olan 1450 °C sıcaklığa ulaşılması için yakılmasından kaynaklanmaktadır [12].

Bu bilgiler ışığında şu soru sorulabilir: Sadece 2050 yılına kadar karbon emisyonunu net sifıra düşürme gerekliliği ile medeniyetin gelişme ihtiyacını nasıl birlikte sağlayabileceğiz? Bu, betonun karbon emisyonunu azaltmak hatta nötrlemek için beton bileşenlerine ve üretim/taşıma gibi operasyonlara odaklanmayı gerektiren yöntemler ile cevaplanabilecek bir sorudur.

## HAZIR BETONUN YAŞAM DÖNGÜSÜ

Hazır betonun yaşam döngüsü aşamaları Şekil 2’de belirtilmiştir. Üretim aşamasında (A1-A3) beton bileşenlerinin çevresel etkileri (gömülü karbon ve su), bu bileşenlerin nakliyesi, üretim esnasında tüketilen enerji ve açığa çıkan emisyon, tüketilen su ve proses sonucu açığa çıkan atıklar dikkate alınır. İnşaat aşamasında (A4-A5) ise üretilen betonun inşaat sahasına nakliyesi, tüketilen enerji, sahadaki uygulamalar kaynaklı çevresel etkiler incelenir. Kullanım aşamasında (B) ise betonun servis ömrü boyunca ihtiyaç duyacağı onarım ve bakım kaynaklı tüketimlerin oluşturacağı çevresel etkilere ve bu süre içindeki karbonatlaşma potansiyeline bakılır. Beton yapının servis ömrü sonunda (C) yıkılması, atıkların nakliyesi, işlenmesi, depolanması ve tasfiye edilmesi gibi süreçlerden kaynaklanan çevresel etkiler ve en sonunda ise tekrar kullanım (D) aşaması incelenir [13].



Şekil 2. Hazır beton yaşam döngüsü aşamaları [13]

Hazır betonun yaşam döngüsü analizi genellikle üretim (A1-A3) aşaması ya da A1-A5 aşaması kapsamında incelenir. Özellikle hazır beton üreticisinin yaşam döngüsü analizinde karşısına çıkan en önemli sorun kendi sorumluluğu dışındaki süreçlerin verilerine kolay bir şekilde ulaşamamasıdır. Örneğin, beton bileşenlerinden kaynaklanan karbon ve su ayak izinin hazır beton üreticisi tarafından hesaplanması tahminden öteye geçmemektedir. Bu nedenle çimento, agrega ve kimyasal katkı üreticilerinin bu verileri sağlaması gerekmektedir. Bu konuda son yıllarda az sayıda da olsa hesaplama yapılabilen platformlar ve uygulamalar kullanılmaya başlanmıştır.

## Türkiye Hazır Beton Sektöründe Karbon Ayak İzi

Türkiye Hazır Beton Birliği (THBB) tarafından yapılan bir araştırma kapsamında Tablo 1’de görüleceği üzere beş farklı dayanım sınıfına ait ortalama beton reçeteleri tespit edilmiştir. Bu verilerin ağırlıklı ortalaması ile de tek bir beton reçetesi temin edilmiştir [13].

Tablo 1. Türkiye’de üretilen hazır betonların dayanım sınıfı bazında ortalama karışım içerikleri [13]

Basınç Dayanım Sınıfı	Ortalama Beton Reçetesi					Ağırlıklı Ortalama
	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	
Ort. Çimento Miktarı (kg/m <sup>3</sup> )	263,8	288,1	321,1	355,3	382,8	290,5
Ort. Uçucu Kül Miktarı (kg/m <sup>3</sup> )	18,8	23,6	28,2	23,7	24,5	22,7
Ort. Cüruf Miktarı (kg/m <sup>3</sup> )	11,2	14,7	16,8	19,6	27,6	14,6
Ort. İri Agrega Miktarı (kg/m <sup>3</sup> )	871,0	877,3	883,6	898,0	912,6	878,0
Ort. İnce Agrega Miktarı (kg/m <sup>3</sup> )	1019,6	1003,1	957,1	918,9	901,6	995,5
Ort. Su Miktarı (kg/m <sup>3</sup> )	166,9	163,1	160,9	159,1	157,4	163,6
Ort. Kimyasal Katkı Miktarı (kg/m <sup>3</sup> )	3,3	4,0	4,5	5,1	5,4	4,0
Ort. Birim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	2354,6	2374,0	2372,2	2379,7	2411,9	2368,8

THBB tarafından yapılan çalışma kapsamında Türkiye’de üretilen hazır betonun dayanım sınıfı bazında karbon ayak izi Tablo 2’de belirtilmektedir. Beşikten kapıya (A1-A3) süreç dikkate alındığında 1 m<sup>3</sup> hazır betonun karbon ayak izi yaklaşık 310 kg’dır [13].

Tablo 2. Dayanım sınıfları bazında 1 m<sup>3</sup> hazır betonun karbon ayak izi

		Karbon Ayak İzi (kg CO <sub>2</sub> eq.)					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

Tablo 3’te ise Beton Sürdürülebilirlik Konseyi’nin (CSC) sertifikalandırma sürecinde kullandığı farklı basınç dayanım sınıflarına ait karbon ayak izi seviyeleri görülmektedir [14].

Tablo 3. CSC referans ve hedef değerler

Dayanım Sınıfı	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C45/55	C50/60
<b>Karbon ayak izi düşürme seviyeleri [net kgCO<sub>2e</sub> / m<sup>3</sup>]</b>						
Referans	213	237	261	286	312	325
Seviye 1 (≥%30)	149	166	183	200	218	228
Seviye 2 (≥%40)	128	142	157	172	187	195
Seviye 3 (≥%50)	107	119	131	143	156	163
Seviye 4 (≥%60)	85	95	104	114	125	130

C30/37 sınıfına ait referans karbon ayak izi 261 kg'dır. Oysa bu değer ülkemizde 309 kg'dır. Bu farkın ana nedeni Türkiye'de özellikle AB ülkelerine oranla daha az mineral katkı ve düşük klinkerli (katkılı) çimento kullanımımızdır. Tablo 4'te Türkiye'de ve Türkiye'nin içinde yer aldığı CEMBUREAU üyesi ülkelerdeki çimento cinsine göre kullanım oranları belirtilmiştir. CEM I alternatifi olan düşük karbonlu CEM II çimentoları karbon ayak izi açısından oldukça avantajlıdır. Bu açıdan Türk çimento sektöründe mevcut karbon ayak izini düşürmek için ciddi bir fırsat olduğu söylenebilir.

Tablo 4. Türkiye ve CEMBUREAU üyesi ülkelerde çimento cinsine göre kullanım oranları [15, 16]

Çimento Cinsi	Türkiye	CEMBUREAU
CEM I	%59	%39
CEM II	%28	%46
CEM III	%1	%9
CEM IV	%9	%5
CEM V	%2	%1

## SÜRDÜRÜLEBİLİR HAZIR BETON ÜRETİMİ

Çimento üretimi sonucu açığa çıkan CO<sub>2</sub> emisyonu, betonun sürdürülebilirliği kapsamında üzerinde durulması gereken en önemli husustur. Eğer çimento üretiminde ağırlıklı olarak fosil yakıt kullanılmışsa ve herhangi iyileştirici bir yöntem uygulanmadıysa genel olarak 1 ton klinker üretimi sonucu yaklaşık 1 ton CO<sub>2</sub> emisyonu açığa çıkmaktadır.

Küresel karbon ayak izini düşürmek için çimento üreticileri kömür ve petrokok gibi fosil yakıtlar yerine kalorifik değeri yakın ya da denk alternatif yakıtlar ve atıklar kullanmakta, ayrıca klinker oranını azaltıp ikincil bağlayıcı malzemeler (mineral katkıları) kullanarak katkıli 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. Öte yandan beton, performans kriterleri önceden tasarlanmış nihai bir üründür ve uygulamalara bağlı olarak sürdürülebilirlik performansı iyileştirilebilmektedir.

### Daha Az Çimento Kullanımı

Çimento, betonun ağırlıkça ortalama %12'sini temsil eder; ancak betondaki gömülü karbonun %90'ını oluşturur [13]. Büyük resme baktığımızda 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 azaltmak için en etkili yöntemlerden birisi çevresel etkisi daha düşük olan tamamlayıcı malzemeler diğer bir ifade ile 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.

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 azaltımlar bile genel olarak 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.
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 denetçilere 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 katkı 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 dayanımları dikkate alınmalıdır.

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 katkılar tercih edilmelidir.
- Yüksek dayanım sınıflarında küp yerine silindir numune ile kalite kontrol süreçlerinin takip edilmesi sağlanmalıdır. (Bu konuda sadece üretici değil denetçi 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 maksimum doluluk sağlanmalıdır.

Betonu akıllıca kullanmayı öğrendikten sonra, betondaki çimento miktarını da düşürmenin yolları keşfedilmelidir. 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 sınıfından kullanılan çimento miktarının  $300 \text{ kg/m}^3$  ile  $525 \text{ kg/m}^3$  arasında değiştiği tespit edilmiştir [17]. Daha fazla çimento kullanmanın çok farklı teknik nedenleri olabilir, ancak bu denli bir varyasyonu açıklamaya yetmeyecektir. Çimento dozajının performansı sağlamak nedeniyle artmasının başlıca nedenleri aşağı belirtilmiştir:

- Yanlış veya yetersiz beton tasarımı
- Kirli ince ya da iri agregada kullanımı
- Hatalı agregada gradasyonu
- Yanlış kimyasal katkı seçimi
- Karıştırma ekipmanlarından kaynaklı kusurlar
- Malzemelerin yoğunluklarının yanlış hesaplanması
- Betonun dayanım testindeki hatalar

### **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.  $1 \text{ m}^3$  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  $\text{CO}_2$  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.

### Reçete Optimizasyonu ve Dijitalleşme

Erken dayanım ihtiyacı için mineral katkı içeriği daha düşük olan karışımlar, erken dayanım ihtiyacı olmayan yapı elemanları için ise daha yüksek oranlarda mineral katkı kullanılabilir. Bunun için de yüksek erken mukavemete 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 kaplamanın optimize edilmesi, belirli bir basınç dayanımı [18] için gerekli olan çimento miktarını azaltır. Standartlar çok daha azına izin verse de hazır beton üretiminde ortalama 300 kg/m<sup>3</sup> çimento kullanılmaktadır [19]. 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 CO<sub>2</sub> 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 ve ayrıca inşaatla kullanılan malzemelerin kaynağını göstermek ve binaların kullanım ömrü boyunca enerji performansını izlemek için müteahhit ve bina kullanıcılarının kullanımına sunulmaktadır. Bunların yanı sıra dijitalleşme; beton performansının tahmin edilmesine, agrega performansının belirlenmesine ve katkı maddelerinin optimize edilmesine yardımcı olabilmektedir [20].

## 28 Gün Yerine Daha İleri Yaş Dayanımlarına Bakılması

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

Tasarım varsayımlarıyla ilgili bir diğer nokta, beton dayanımını değerlendirirken betonun yaşının önemidir. Beton dayanımı genellikle 28 günde test edilir. Bu, yalnızca Portland çimentosundan yapılmış betonun mukavemetinin genellikle nihai mukavemetine 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 kürlenme süresine ihtiyaç duymaktadır. Bu sürenin sonunda sadece Portland çimentosundan yapılmış betona benzer bir dayanım performansına sahip olunmaktadır [21, 22]. Bu nedenle, beton dayanımının 28 günden sonra, örneğin 56 günde değerlendirilmesi daha uygun olmaktadır.

## Karbon Ayak İzi Düşük Çimento ve Bağlayıcıların Kullanımı

THBB tarafından yapılan bir araştırma kapsamında Türkiye’de hazır beton üreticilerinin kullandığı çimento cinslerinin kullanım oranları tespit edilmiştir [13]. 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.

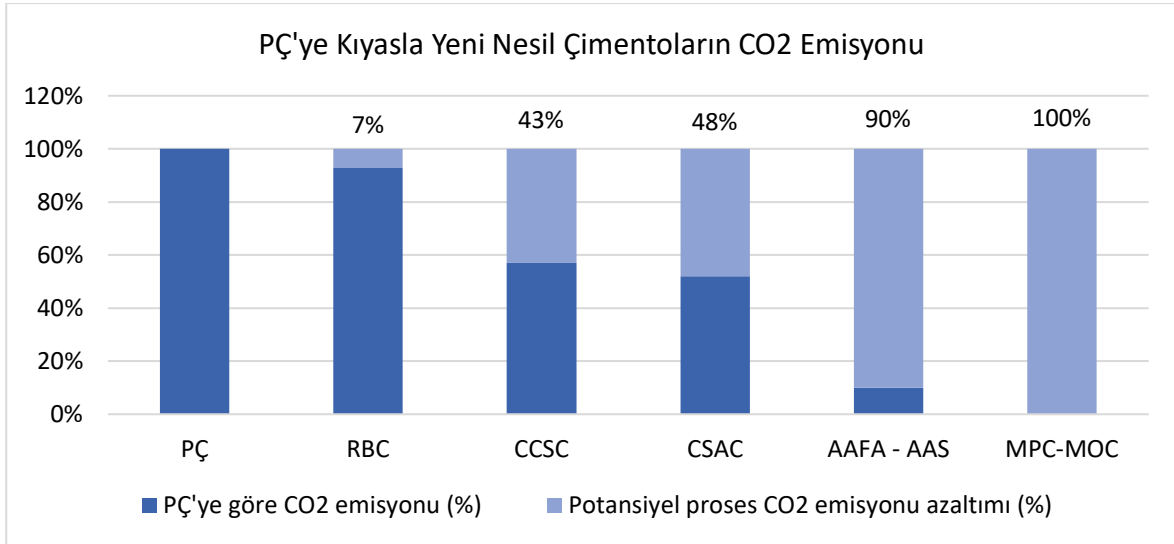
Betonda hatta betonarmede en yüksek gömülü karbona sahip bileşen çimentodur. Bu nedenle hem üretici hem de tüketici daha düşük karbon ayak izi olan çimentoları tercih etmelidir. Ancak, buna karar vermek için farklı kaynaklara ait ürünlerin kıyaslanması gerekir. Bu konuda en güvenilir referans EPD (çevresel ürün beyanı) belgeleridir. Ülkemizde EPD belgeli çimento neredeyse yoktur. Birkaç firmanın dönemsel olarak aldığı belgeler mevcuttur. Ülkemizde EPD belgeli hazır beton bu makalenin yazıldığı tarih itibarıyla yoktur. Sadece bazı firmaların kendi deklarasyonları mevcuttur.

Bunun dışında en etkili yöntem ise klinker oranı düşük çimento kullanımını tercih etmektir. Türk Çimento istatistiklerine göre ülkemizde genel olarak en çok üretilen ve tüketilen çimento cinsi %55’lik oranla CEM I 42.5 R çimentosudur [15]. Oysa AB ülkelerinde en fazla CEM II/A tipi çimento tercih edilmektedir. Bu çimento ortalama %10 daha az klinker içermektedir [16].

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
- RBC: Reaktif belit çimentosu / Reactive belite cement

Şekil 3'te Portland çimentosuna (PÇ) kıyasla alternatif çimentoların karbon emisyonları görülmektedir.



Şekil 3. Portland çimentosuna kıyasla alternatif çimentoların CO<sub>2</sub> emisyonu

### Projelerde Daha Yüksek Dayanımlı Beton Tercih Edilmesi

Tablo 1'de belirtildiği gibi daha yüksek dayanım sınıfında beton elde etmek için genel olarak çimento, daha doğru bir tabir ile bağlayıcı malzeme miktarının artması gerekmektedir. Bu karbon 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.

## Çevresel Etki Sınıfları

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

## 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 taşıyıcı elemana veya daha düşük kesitli 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 [23]. Yalnızca gerekli yükü taşımak için gerektiği kadar malzeme kullanan optimize edilmiş (organik) şekiller konusunda yeni gelişmeler beklenmektedir [23]. 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> ayak izine neden olur [24].

Prefabrikasyon gibi daha sanayileşmiş bir süreç, fabrikada daha yüksek hassasiyet ve daha az atık yoluyla daha düşük malzeme talebine yol açabilir. Prensipte 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 [25, 26].

Cambridge Üniversitesi tarafından hazırlanan bir raporda, yapısal elemanların tüm güvenlik faktörleri uygulandıktan sonra tipik olarak kapasitelerinin yalnızca %60-80'ini kullanmak üzere tasarlandığı vurgulanmıştır [27]. Malzemenin performansındaki belirsizlik, beton elemanları ile ilgili olarak bu aşırı

tasarımın belki de temel bir nedenidir. Örnekle 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 basınç dayalı yapıların oluşturulması için hesaplama tasarımının nasıl uygulanacağı üzerinde çalışmaktadır. Bu, görsel olarak çarpıcı ve aynı zamanda malzeme açısından verimli yapılara neden olabilecektir [17].

### **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 dayanıklılığını azaltabilir ve dolayısıyla işlenebilirliği korumak için süperakışkanlaştırıcıyı ve su dozajını arttırabilir [28]. Sonuç olarak, geri kazanılmış agrega kullanımı çimento talebini 20-40 kg/m<sup>3</sup> arttırabilmektedir [29]. Buna karşılık iyi kalitede geri dönüştürülmüş yerel agregalar, nakliye tasarrufları da dahil olmak üzere genel olarak karbon 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 [30].

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.

---

## SONUÇ

---

Sürdürülebilirlik ve özellikle döngüsel ekonomi açısından hazır beton sektörü birçok potansiyele sahiptir. İklim değişikliği ile mücadelenin ülkelerin ve şirketlerin ajandalarında giderek en önemli madde olarak öne çıkması ve 1,5°C senaryosunun küresel bir hedef haline gelmesi bu potansiyeli daha da görünür hale getirmiştir. Hazır beton sektörünün daha sürdürülebilir bir iş modeline geçmesi sadece üreticilerin değil; politika yapımcıların, müşterilerin, şartname ve standart hazırlayıcıların, tedarikçilerin ve hatta tüm paydaşların birlikte hayata geçirebileceği kolektif bir süreçtir.

**NOT: Bu makale, THBB Teknik Danışmanı İnş.Yük.Müh. Yasin Engin tarafından 9 Kasım 2022 tarihinde Türkiye İnşaat Mühendisliği 18. Teknik Kongre'sinde sunulmuştur.**



## KAYNAKLAR

1. Sürdürülebilir Kalkınma Derneği, 100 Maddede Sürdürülebilirlik Rehberi, Sürdürülebilir Kalkınma Derneği, 2017.
2. Gagg, C. R., "Cement and Concrete as an Engineering Material: An Historic Appraisal and Case Study Analysis," *Engineering Failure Analysis* 40 (May 2014): 114–40.
3. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020-cement.pdf>, Erisim tarihi (10.07.2022)
4. <https://www.thbb.org/sector/istatistikler/>, Erisim tarihi (10.07.2022)
5. [https://www.worldgbc.org/sites/default/files/UNEP%20188\\_GABC\\_en%20%28web%29.pdf](https://www.worldgbc.org/sites/default/files/UNEP%20188_GABC_en%20%28web%29.pdf), Erisim tarihi (10.07.2022)
6. Larson, W., Came, F., "Concrete as a Carbon Sink. Rethinking Carbon Sequestration in the Built Environment," Building Resilience Coalition, 2018.
7. Guo, R., Wang, J., Bing, L., Tong, D., Ciais, P., Davis, S. J., Andrew, R. M., Xi, F., and Liu, Z., "Global CO<sub>2</sub> Uptake By Cement From 1930 to 2019," *Earth Syst. Sci. Data*, 13, 1791–1805, <https://doi.org/10.5194/essd-13-1791-2021>, 2021.
8. Lehne, J., and Preston, F., Making Concrete Change Innovation in Low-carbon Cement and Concrete, The Royal Institute of International Affairs, 2018.
9. <https://www.bbc.com/news/science-environment-46455844>, Erisim tarihi (10.07.2022)
10. <https://spot.ul.com/blog/embodied-vs-operational-carbon/>, Erisim tarihi (10.07.2022)
11. Lewis, M., Huang, M., Waldman, B., Carlisle, S., and Simonen, K., Environmental Product Declaration Requirements in Procurement Policies, Carbon Leadership Forum, University of Washington. Seattle, WA. 2021.
12. International Energy Agency, Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry, IEA, 2018.
13. Türkiye Hazır Beton Birliği, Hazır Beton Yaşam Döngüsü Rehberi, 2021.
14. Mission Impossible Partnership, Low-Carbon Concrete and Construction: A Review Of Green Public Procurement Programmes, 2022.
15. Türk Çimento, 2011-2020 İstatistik Kitabı, Türk Çimento Yayınları, 2021.
16. Türk Çimento, Katkılı Çimentolar EN 197-1 ve EN 197-5 Standartları ve Belgelendirmesi Semineri, <https://www.youtube.com/watch?v=ZPzCak1Nf0w>, Erisim tarihi (10.07.2022)
17. <https://industryeurope.com/sectors/construction-engineering/structural-concrete-in-a-zero-carbon-future/>, Erisim tarihi (10.07.2022)

18. 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.
19. Müller, C., “Use of cement in concrete according to European standard EN 206-1,” *HBRC J.* 8 (2012) 1–7. doi:10.1016/j.hbrcj.2012.08.001.
20. Cembureau, Cementing the European Green Deal, Cembureau Publication, 2020.
21. Khokkar, M., Rozière, E., Turcry, Ph., Grondin, F., Loukili, A., “Mix Design of Concrete With High Content of Mineral Additions: Optimisation to Improve Early Age Strength,” *Cement and Concrete Composites*, 32(5), 2010.
22. 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.
23. VDZ, Decarbonisation Pathways for the Australian Cement and Concrete Sector, Verein Deutscher Zementwerke, 2021.
24. 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.
25. 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.
26. Ngo, T.D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K.T.Q., Hui, D., “Additive Manufacturing (3D Printing): A Review of Materials, Methods, Applications and Challenges,” *Composites Part B: Engineering*, 143, 2018.
27. Minimising Energy in Construction (MEICON) Survey Report, University of Cambridge, 2018. <https://www.repository.cam.ac.uk/handle/1810/287863>, Erişim tarihi (14.07.2022)
28. 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.
29. Knoeri, C., Sanyé-Mengual, 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>
30. 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](https://doi.org/10.1007/978-3-319-28540-5_2).



[www.thbb.org](http://www.thbb.org)

[www.thbbakademi.org](http://www.thbbakademi.org)

