

# Geri Dönüştürülmüş Yapı Malzemeleri İçeren Çimento: TS EN 197-6

Ali O. DEMİRBAŞ<sup>1,2</sup>, Emircan ÖZÇELİKÇİ<sup>3</sup>, Prof. Dr. Mustafa ŞAHMARAN<sup>4</sup>

## ÖZET

Türkiye’de doğal afetler ve artan inşaat faaliyetlerine bağlı olarak ortaya çıkan inşaat ve yıkıntı atıkları, çevresel sorunların önemli bir kaynağı hâline gelmiştir. Bu makale, inşaat ve yıkıntı atıklarının TS EN 197-6 “Çimento - Bölüm 6: Geri Dönüştürülmüş Yapı Malzemeleri İçeren Çimento” Standardı kapsamında çimento üretiminde, klinkere ikame katkı olarak kullanılmasını incelemektedir. Geleneksel çimento üretiminde kullanılan kireç taşı ve kil gibi doğal kaynaklar her geçen yıl tükenmektedir ve bu maddeler klinkerleşme sürecinde yüksek karbondioksit (CO<sub>2</sub>) salımına sebep olmaktadır ancak, inşaat ve yıkıntı atıklarının çimento üretiminde ikame olarak kullanılması, hem doğal kaynak tüketimini azaltacak hem de emisyonların düşmesine neden olacaktır. Ayrıca, atık malzemelerin çimento üretiminde kullanılması, atıkların düzenli depolama alanlarına gitmesini engelleyerek çevresel kirliliği azaltacaktır. Böylece, çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir adım atılmış olacaktır. İnşaat ve yıkıntı atıklarının çimento üretiminde kullanılmasıyla ilgili düzenleme TS EN 197-6 Standardı’yla ele alınmıştır. Bu standardın kullanımı ile atık malzemelerin çimento üretim sürecinde güvenli ve etkili bir şekilde kullanılması teşvik edilmelidir. İnşaat ve yıkıntı atıklarının çimento üretiminde kullanılması hem çimento hem de inşaat sektörü için önemli bir strateji olacaktır. Bu, çev-

## Cement Containing Recycled Building Materials: TS EN 197-6

Construction and demolition waste resulting from natural disasters and increasing construction activities in Turkey has become an important source of environmental problems.

This article examines the use of construction and demolition wastes as a replacement material for clinker in cement production within the scope of the TS EN 197-6 “Cement - Part 6: Cement with recycled building materials” standard. Natural resources such as limestone and clay used in traditional cement production are depleted every year, and these substances cause high carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions during the clinkerization process. However, using construction and demolition waste as a replacement material in cement production will both reduce natural resource consumption and reduce emissions. Additionally, the use of waste materials in cement production will reduce environmental pollution by preventing waste from going to landfills.

resel sürdürülebilirliği artırmak, doğal kaynakları korumak, çimento ve inşaat endüstrisinin gelecekteki ihtiyaçlarına cevap vermek için önemli bir adım olacaktır.

## 1. GİRİŞ

Dünyada sürekli artan nüfus ile birlikte kentsel dönüşüm ve yapıların bakım/ onarım/yıkım gibi inşaat aktivitelerinde yaşanan artış, inşaat ve yıkıntı atıkları oluşumunu her geçen gün artırmaktadır. Dünya genelinde en büyük üç ekonomi olarak kabul edilen Çin, ABD ve AB, aynı zamanda en büyük üç inşaat ve yıkıntı atığı üreticisidir (1). Çin’in 2018 yılında yaklaşık 1704 Mt gibi kayda değer miktarda inşaat ve yıkıntı atığı üretimine sahip olduğu tahmin edilmektedir. Bununla birlikte, Çin’in mevcut inşaat ve yıkıntı atığı geri kazanım oranı %10’dan azdır (2). ABD ve AB daha ge-

lişmiş ve kentleşmiş olduğundan, Çin’e kıyasla sırasıyla 600 Mt ve 372 Mt olmak üzere çok daha az inşaat ve yıkıntı atığı üretmektedir (3). 2020 yılında, AB’de inşaat ve yıkıntı atığı geri kazanım oranı diğer atık akışlarına kıyasla nispeten yüksektir ve üye devletler arasında büyük farklılıklar gözlemlenebilse de AB düzeyinde %89’dur (4). Bununla birlikte, bu nispeten yüksek geri kazanım oranı yanıltıcı olabilir, çünkü tipik olarak inşaat ve yıkıntı atığından yüksek katma değerli malzeme geri kazanımına karşılık gelmemektedir. Genel olarak, geri kazanılan inşaat ve yıkıntı atıkları, dolgu malzemesi

<sup>1</sup>Hacettepe Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara, alidemirbas@hacettepe.edu.tr

<sup>2</sup>TÜRKÇİMENTO AR-GE Enstitüsü, Ankara, alid@turkçimento.org.tr

<sup>3</sup>Hacettepe Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara, eozcelikci@hacettepe.edu.tr

<sup>4</sup>Hacettepe Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara, sahmaran@hacettepe.edu.tr

Anahtar Kelimeler: TS EN 197-6 Standardı, İnşaat ve Yıkıntı Atıkları, Çimento Üretimi

Thus, an important step will be taken in terms of environmental sustainability. The regulation regarding the use of construction and demolition wastes in cement production is covered by the TS EN 197-6 standard. With the use of this standard, the safe and effective utilization of waste materials in the cement production process should be promoted. The use of construction and demolition waste in cement production will be an important strategy for both the cement and construction sectors. This will be an important step to increase environmental sustainability, protect natural resources and respond to the future needs of the cement and construction industry.

olarak yeniden kullanıl- maktadır. Bu tür bir geri kazanım, sonuçta piyasaya giren ikincil malzemenin orijinal malzemeye göre önemli ölçüde daha düşük piyasa değerlerine sahip olması anlamına gelmektedir ve aşağı yönlü dönüşüm olarak adlandırılmaktadır. Dolayısıyla malzeme, karbon ve enerji tasarrufu sağlanması adına yapılması gereken, bu malzemelerin birincil malzeme talebinin ikamesi/yer değiştirmesi olacak şekilde yukarı yönlü geri dönüşümdür.

hasarlı konut sayısı 1.279.727 ve orta hasarlı konut sayısı 131.577 olarak tespit edilmiştir (7). Aynı zamanda söz konusu deprem sonucunda 250 milyon tona yakın inşaat ve yıkıntı atığı oluşumu da öngörülmüştür (8).

**Tablo 2:** T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı 2023 Kahramanmaraş ve Hatay Depremleri Raporuna Göre Hasar Alan Konut Sayıları (7)

İl	Toplam	Orta Hasarlı Konut Sayısı	Az Hasarlı Konut Sayısı
Adana	2.952	11.768	71.072
Adıyaman	56.256	18.715	72.729
Diyarbakır	8.602	11.209	113.223
Elazığ	10.156	15.22	31.151
Gaziantep	29.155	20.251	236.497
Kahramanmaraş	99.326	17.887	161.137
Malatya	71.519	12.801	107.765
Hatay	215.255	25.957	189.317
Kilis	2.514	1.303	27.969
Osmaniye	16.111	4.122	69.466
Şanlıurfa	6.163	6.041	199.401
Bölge Toplamı	518.009	131.577	1.279.727

**Tablo 1:** Eurostat 2021 verilerine göre İnşaat ve Yıkıntı Atıkları Geri Dönüşüm Oranları (5)

Eurostat 2021 yılı inşaat ve yıkıntı atığı geri dönüşüm istatistikleri	Ülkeler
>%90	Hollanda, Lüksemburg, İtalya, İrlanda, Birleşik Krallık, Almanya
%60-100	İzlanda, Fransa, İsveç, Bulgaristan
%60	Belçika, Finlandiya, Yunanistan
<%60	Slovakya, Karadağ, Sırbistan, Kosova

Türkiye’de ise son yıllarda yaşanan doğal afetler yıkıntı atıklarının önemli derecede artışına neden olmuştur. Himalaya, Alp ve Akdeniz deprem kuşağı içerisinde bulunan Türkiye’de son yüzyıl içerisinde çok sayıda deprem meydana gelmiştir. 1927-2020 yılları arasında meydana gelen depremlerden elde edilen verilere göre bu depremlerde toplamda 850 bin civarında bina ağır hasar almış ya da yıkılmıştır (6). Bununla birlikte, 6 Şubat 2023 tarihinde Kahramanmaraş’ta meydana gelen ve 11 ili etkileyen art arda 2 büyük depremden sonra, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından yürütülen hasar tespit çalışmasına göre, 518.009 konut acil yıkılacak, yıkık veya ağır hasarlı kategorilerine girmiştir. Az

Deprem dışında sel ve heyelan gibi doğal afetlerin de sık yaşanması ağır hasar ve yıkıma sebep olabilmektedir. Doğal afetlerin sıklığı ve yapı stoklarının zayıf olması nedeniyle, Türkiye’de kentsel dönüşüm süreci hızlandırılmaktadır. Bu süreç için son yapılan düzenlemenin ardından kentsel dönüşüm oranlarının da artması beklenmektedir. Afetlerin sıklığı ve kentsel dönüşümün hızlandırılması durumları göz önüne alındığında, inşaat ve yıkıntı atıklarının değerlendirilmesi çevre kirliliği başta olmak üzere, doğal kaynakların korunması, karbondioksit salınımının ve malzeme tüketiminin azaltılması konularında çok önemli fayda sağlayacaktır.

2006 yılında, Türkiye’nin de içerisinde bulunduğu ülkeler için gerçekleştirilen çalışmada üretilen atıkların %32’sinin inşaat ve yıkım faaliyetlerinden kaynaklandığı görülmüştür (9). Ayrıca, yapılan araştırmalarda, deprem gibi felaketlerden sonra oluşan atığın yıllık üretilen atık hacmine kıyasla 5-15 kat daha fazla olduğu tespit edilmiştir (10). Yıllık inşaat ve yıkıntı atığı üretimi ile ülkelerin nüfusu, yüz ölçümü ve ekonomiyle ilgili faaliyetleri arasında doğru orantı bulunduğu göz önüne

alındığında ve buna afetlerin yıkıcı etkileri de eklendiğinde, Türkiye'nin dünya genelinde önemli düzeyde inşaat ve yıkıntı atığı üretimi yapan ülkelerden biri olduğu söylenebilir. Buna karşın, sayısal olarak veri bulunmasa da Türkiye'de inşaat ve yıkıntı atıklarının geri dönüşümü yaygınlaştırılmamıştır (11). Hafriyat, inşaat ve yıkıntı atığı yönetimleri çok az ilde uygulanmaktadır (12). Fakat, yeni gelişmelerle birlikte bu atıkların geri dönüşüm oranının önemli düzeyde artırılması daha kolay bir hâle gelmiştir. CEN tarafından 24.04.2023 tarihinde onaylanan ve 21.06.2023 tarihinde yayımlanan TS EN 197-6 "Çimento - Bölüm 6: Geri Dönüştürülmüş Yapı Malzemeleri İçeren Çimento" (13) Standardı 31.12.2023 tarihinde uygulamaya başlamıştır. Türkiye'nin günümüzde, mevcut çimento fabrikaları ve öğütme-paketleme tesisleri ile Avrupa'nın birinci, dünyanın ise beşinci büyük üreticisi konumunda olması (14) göz önüne alındığında, inşaat ve yıkıntı atıklarının çimento sektörü tarafından TS EN 197-6 Standardı'na uygun şekilde kullanımı, dönüştürme oranını yüksek seviyelere çıkarılabilecek ve çimento sektöründe olduğu gibi, atık dönüşüm oranlarında da Türkiye'yi zirveye taşıyabilecektir.

## 2. TS EN 197-6 STANDARDI DEĞERLENDİRMESİ

### 2.1. Türk Çimento Sektörü İçin TS EN 197-6 Standardı'nın Değerlendirmesi

Çimento sektörünün son yıllarda en önemli gündemlerinden biri hâline gelen CO<sub>2</sub> emisyonları düşünüldüğünde, TS EN 197-6 Standardı'nın Türk çimento sektörü için önemli düzeyde katkı sağlayabileceği öngörülmektedir. 2013-2016 yılları arası TÜRKÇİMENTO verilerine göre, Türkiye için klinker/çimento oranı %86 olarak tespit edilmiştir, Avrupa Birliği'nde ise bu oran %75'tir (15). Çimento üretiminde dünyanın önde gelen ülkelerinden biri olan Türkiye için bu oranın düşürülmesi önem arz etmektedir. Klinker/çimento etkisinin %1 düşürülmesi, hem karbon emisyonunun hem de fosil yakıt tüketiminin sırasıyla %1 ve %1,2 oranında düşürülmesini sağlamaktadır (16). 2020 yılında, küresel çimento üretiminden kaynaklanan CO<sub>2</sub> emisyonları, yaklaşık 2.5 GtCO<sub>2</sub> olarak tahmin edilmektedir. Bu, o yılki küresel CO<sub>2</sub> emisyonlarının yaklaşık %7,1'ine denk gelmektedir (17). Emisyon oranının düşürülmesi, Sınırdaki Karbon Düzenlemesi Mekanizması'nın (SKDM) hayata girmesiyle birlikte Türk çimento sektörü için daha kritik hâle gelecektir. SKDM için 1 Ekim 2023-31 Aralık 2025 geçiş dönemi sonrasında, 1 Ocak 2026 itibarıyla raporlamaya ek olarak, SKDM kapsamına giren ürünlerin ithalatına uygulanan bir karbon fiyatı olacaktır ve 2034 yılına kadar

fiyatlar kademeli olarak yükselecektir. Bu durum kaynaklı etkileri hafifletmek adına, ilerleyen süreçte klinker ikamesi ve katkılı çimento kullanımının teşviki konularının gündeme gelmesi kaçınılmaz olacaktır. Bunun dışında doğal kaynakların gün geçtikçe azalması da uzun vadede klinker üretim ve kullanım oranlarının düşmesine yol açacaktır. TS EN 197-6 içerisinde yer alan yeni katkılı çimento türleri bu konular için bir çözüm alternatifi haline gelecek potansiyele sahiptir.

Türkiye için, normal koşullarda 2023 yılında yaklaşık 300 milyon ton inşaat ve yıkıntı atığı oluşması öngörülmüştür (11). Buna ilaveten, Kahramanmaraş depremlerinde ortaya çıkan inşaat ve yıkıntı atığı miktarı, evsel eşyalar, elektronik eşyalar ve hurdalar da dâhil olmak üzere 350-580 milyon ton olarak hesaplanmıştır (18). Buna karşın, TÜRKÇİMENTO verilerine göre 2022 yılında Türkiye'deki tüm fabrikalar için klinker üretim kapasitesi 96,6 milyon ton, çimento üretim kapasitesi ise 147,2 milyon ton olarak tespit edilmiştir (19). Klinker ve çimento için kapasite kullanım oranları sırasıyla %79,33 ve %52,98 oranında gerçekleşmiştir (20). İç satışı gerçekleştirilen çimentoların %48,26'sı, dış satışı gerçekleştirilen çimentoların ise %16,51'i katkılı çimento olarak üretilmiştir (20). Bu durum, 2022 yılında üretilen toplam katkılı çimento miktarının 29,4 milyon olduğunu göstermektedir. Bu verilere göre, hâlihazırda bulunan ve ilerleyen süreçte ortaya çıkacak inşaat ve yıkıntı atığı miktarının Türk çimento sektörü için uzun süre boyunca faydalanılabilecek bir kaynak olduğu görülmektedir. Çimento sektörünün bu durumdan sağlayacağı fayda dışında, inşaat ve yıkıntı atıklarının çimento üretiminde kullanılması ile atık depolama alanlarına olan gereksinim azalacak ve çevre kirliliğinin önlenmesi açısından da önemli bir fayda sağlanacaktır.

### 2.2. TS EN 197-6 Standardı'na Göre İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Kullanımı ve Bileşenler Bakımından Uygunluğu

Standart, ana bileşenleri TS EN 197-1 "Çimento - Bölüm 1: Genel Çimentolar - Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri" (21) Standardı'nda yer alan çimento bileşenleri ve geri dönüştürülmüş yapı malzemeleri olan, kullanım amacı beton, harç, vb. hazırlamak olan çimentoyu tarif etmektedir. Geri dönüştürülmüş yapı malzemeleri bileşeni standartta "F" notasyonu ile tarif edilmekte olup, CEM II için Portland-Geri Dönüştürülmüş Yapı Malzemeleri Çimentosu ve Portland-Kompoze Çimento tiplerinde ve CEM VI için Kompoze Çimento tipinde ana bileşen olarak yer almaktadır. CEM II tipi çimentolar için izin verilen ikame oranı %6-35, CEM VI tipi çimentolar için ise bu aralık %6-20 olarak belirlenmiştir.

**Tablo 3:** TS EN 197-6 Standardına Göre Geri Dönüştürülmüş Yapı Malzemeleri İçeren Çimento Türleri (13)

Ana Tip	Çimento Tipi		Ana Bileşenler (kütlece % olarak) <sup>a</sup>											
			Ana Bileşenler											
			Klinker	Geri Dönüştürülmüş Yapı Malzemeleri	Cüruf	Puzolan		Uçucu Kül		Silissi	Kalkersi	Pişmiş Şist	Kalker	Minör İlave Bileşen
						Silis Dumanı	Doğal	Doğal Kalsine Edilmiş	Kalkersi					
Tip İsmi	Tip Gösterimi	K	F	S	D <sup>b</sup>	P	Q	V	W	T	L <sup>c</sup>	LL <sup>c</sup>		
CEM II	Portland Geri Dönüştürülmüş Yapı Malzemeleri Çimentosu	CEM II/A-F	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-F	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland Kompoze Çimento <sup>d</sup>	CEM II/A-M	80-88	6-14	6-14						0-5			
		CEM II/B-M	65-79	6-29	6-29						0-5			
		CEM II/C-M	50-64	6-20	16-44						0-5			
CEM VI	Kompoze Çimento	CEM VI	35-49	6-20	31-59	-	-	-	-	-	-	-	0-5	

<sup>a</sup> Çizelgedeki değerler ana ve minör ilave bileşenlerin toplamına karşılık gelmektedir.

<sup>b</sup> Silis dumanının oranı %6-10'la sınırlanmaktadır.

<sup>c</sup> Kalker kullanımı durumunda kalker ve geri dönüştürülmüş ince malzeme içeriği (L, LL ve F toplamı) %35'le sınırlanmaktadır.

<sup>d</sup> Klinker dışındaki ana bileşenlerin sayısı iki ile sınırlıdır ve bu ana bileşenler çimentonun adı ile beyan edilmelidir. (Örnek Madde 6'ya bakılmalıdır.) Kompozisyonda hem F hem de (L veya LL) kullanılması durumunda klinker dışındaki ana bileşenlerin sayısı üç ile sınırlanır ve bu ana bileşenler çimento adı ile beyan edilir.

Geri dönüştürülmüş yapı malzemeleri standartta özel olarak seçilmiş ve hazırlanmış mineral malzemeler olarak tanımlanmış ve kaynakları açısından üç sınıfa ayrılmıştır. Bunlardan ilki, kaba, hepsi bir arada ve/veya ince geri dönüştürülmüş beton agregaları üreten tesislerden veya ünitelerden gelenler, ikincisi beton üretim faaliyetlerinden geri kazanılanlar ve sonuncusu ise "TS EN 206+A2 Beton - Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk" (22) Standardı'nın 3.1.2.15 maddesinde, daha önce inşaatta kullanılmamış sertleşmiş betonun kırılması sonucu elde edilen agrega olarak tanımlanmış, geri kazanılmış kırılmış agregalardan gelenlerdir.

Geri dönüştürülmüş yapı malzemeleri içeren çimento türlerinde kullanılacak çimento ikamesi malzemelerin bileşen uygunluğunun tespiti amacıyla kullanılacak olan ve 2010 ocak ayında yürürlüğe giren "Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler-Bölüm 11: Geri Kazanılmış İri Agregata Bileşenleri İçin Sınışandırma Deneyleri" adlı EN 933-11 (23) Standardı, kapsam olarak geri dönüştürülmüş kaba agregaların bileşen malzemelerinin göreceli oranlarının belirlenmesi ve tahmin edilmesi amacıyla oluşturulmuş basit bir yöntemi açıklamaktadır. Geri dönüştürülmüş agrega kullanımının ülkemizde pek yaygın olmaması dolayısıyla, řu ana kadar bilinirliği düşük

olsa da ham madde olarak kullanılacak geri dönüştürülmüş yapı malzemelerinin uygunluğunun belirlenmesi aşamasında kullanılacağı için detaylı olarak incelenmesi gerekmektedir.

Genel itibariyle bu standart geri dönüştürülmüş yapı malzemelerinin mekanik ve basit yöntemlerle ayrıştırılıp bileşenlerinin tespit edilmesini ve buna göre ilgili numune ya da numunelerin uygunluğunun değerlendirilmesini sağlamaktadır. Bileşenler  $FL$ ,  $M_{Rc}$ ,  $M_{Ru}$ ,  $M_{Rb}$ ,  $M_{Ra}$ ,  $M_{Rg}$  ve  $X$  olarak yedi sınıfa ayrılmıştır ve bunlar sırasıyla yüzen malzemeler; beton, beton ürünleri, harç, beton duvar ögelerinin toplam kütlesi; bağlanmamış agregaya, doğal taş, hidrolik bağlı agregaların toplam kütlesi; kil duvar birimleri (tuğla, kiremit, vb.), kalsiyum silikat duvar üniteleri, yüzmeyen gaz/gözenekli betonların toplam kütlesi; bitümlü malzemelerin toplam kütlesi; camların toplam kütlesi ve diğer malzemelerin kütlesidir. Bu sınıftan her biri kütlece yüzde olarak tespit edildikten sonra geri dönüştürülmüş yapı malzemelerinin uygunluk durumu tayin edilir.

**Tablo 4:** TS EN 933-11, Çizelge 2 - Geri dönüştürülmüş iri agregaların yüzmeyen bileşenleri (23)

Bileşen	Tanım
$R_c$	Beton, beton mamulleri, harç, beton duvar birimleri
$R_u$	Bağlanmamış agregaya, doğal taş, hidrolik bağlı agregalar
$R_b$	Kil duvar birimleri (tuğla, kiremit, vb.), kalsiyum silikat duvar üniteleri, yüzmeyen gaz/gözenekli betonların toplam kütlesi
$R_a$	Bitümlü malzemeler
$R_g$	Camların toplam kütlesi
$X$	Diğer: Bağlayıcı (kil ve toprak gibi),
	Muhtelif: Metaller (demirli ve demirsiz), kereste(yüzmeyen), plastik ve lastik
	Alçı sıva

Tablo 4'te iri agregaların yüzmeyen bileşenleri hesap edildikten sonra; kaba, hepsi bir arada ve/veya ince geri dönüştürülmüş beton agregaları üreten tesislerden veya ünitelerden gelen geri dönüştürülmüş yapı malzemelerinin uygunluğunun belirlenmesinde kritik nokta TS 706 EN 12620+A1 "Beton agregaları" standardında yer alan Çizelge 20'ye göre (Tablo 5)  $R_{cu90}$ ,  $R_{b10}$ ,  $R_{a1}$ ,  $FL_{2-}$  ve  $XR_{g1}$  bileşen gerekliliklerini karşılamasıdır. Buna göre, incelenen malzemede kütlece  $\geq$  %90 beton, beton mamülleri, harç, beton duvar birimleri, serbest agregaya, doğal taş, hidrolik bağlı agregaya; kütlece  $\leq$  %10 kil duvar birimleri (tuğla, karo, vb.), kalsiyum silikat duvar birimleri, gazbeton (yüzmeyen); kütlece  $\leq$  %1 bitümlü malzemeler; hacimsel olarak  $\leq 2$  cm<sup>3</sup>/kg yüzen malzeme; kütlece  $\leq$  %1 cam ve diğer malzemeler koşullarının sağlanması beklenmektedir (24).

**Tablo 5:** TS 706 EN 12620+A1, Çizelge 20 - Geri kazanılmış iri agregalardaki bileşenler için kategoriler (24)

Bileşen	Muhteva (Kütlece %)	Kategori
$R_c$	$\geq 90$	$R_{c90}$
	$\geq 80$	$R_{c80}$
	$\geq 70$	$R_{c70}$
	$\geq 50$	$R_{c50}$
	$< 50$	$R_{cBeyan}$
	Serbest	$R_{cNR}$
$R_c + R_u$	$\geq 95$	$R_{cu95}$
	$\geq 90$	$R_{cu90}$
	$\geq 70$	$R_{cu70}$
	$\geq 50$	$R_{cu50}$
	$< 50$	$R_{cuBeyan}$
	Serbest	$R_{cuNR}$
$R_b$	$\leq 10$	$R_{b10}$
	$\leq 30$	$R_{b30}$
	$\leq 50$	$R_{b50}$
	$> 50$	$R_{bBeyan}$
	Serbest	$R_{bNR}$
$R_a$	$\leq 1$	$R_{a1-}$
	$\leq 5$	$R_{a5-}$
	$\leq 10$	$R_{a10-}$
$X + R_g$	$\leq 0,5$	$XR_{g0,5-}$
	$\leq 1$	$XR_{g1-}$
	$\leq 2$	$XR_{g2-}$
$FL$	Muhteva (cm <sup>3</sup> /kg)	
	$\leq 0,2$	$FL_{0,2-}$
	$\leq 2$	$FL_{2-}$
	$\leq 5$	$FL_{5-}$

### 2.3. Geri Dönüştürülmüş Yapı Malzemeleri İçin Gereklilikler

TS EN 197-6 Standardı'na göre geri dönüştürülmüş yapı malzemeleri çoğunlukla reaktif değildir ve hidrasyona uğramamış çimento taneciklerinden gelen reaktivite veya puzolanik reaktivite mümkün olabilir ancak bu durumlar çimento reaktivitesine önemli ölçüde katkıda bulunmamaktadır (13). Fakat, puzolan gibi diğer mineral katkılarla kıyaslandığında, geri dönüştürülmüş yapı malzemelerinin de puzolanik aktivite testlerinde başarılı aktivite oranlarına sahip olduğu görülmüştür. TS EN 197-6 (13) Standardı'ndaki kriterler göz önüne alındığında, özellikle geri dönüştürülmüş beton ve beton

içerikli numunelerin aktiviteleri kritik hâle gelmektedir. Yedi farklı kaynaktan alınan beton atıklarının, çimentoya %20 oranında ikame edilmesiyle yapılan aktivite indeksi analizleri için 7, 28 ve 90 günlük aktivite ortalaması %80,7 olarak belirlenmiştir (25). Buna ek olarak, numuneler özelinde bakıldığında 7, 28 ve 90 günlük sonuçların aktivite indeksi dağılımı sırasıyla %75,6-83,7, %78,6-86,2 ve %74,7-86,4 olarak gerçekleşmiştir (25). Çeşitli fiziksel ve kimyasal aktivasyon yöntemleriyle dayanım başta olmak üzere, diğer mekanik özelliklerde de iyileştirme yapılabildiği de göz önünde bulundurulduğunda, geri dönüştürülmüş yapı malzemelerinin hâlihazırda kullanılmakta olan mineral katkılara benzer performans sergileyebileceği düşünülmektedir.

Geri dönüştürülmüş yapı malzemeleri, TS EN 197-6 Standardı'na göre hangi sınıfta yer alırsa alsın şu üç koşulu sağlamalıdır: TS EN 13639 "Kireçtaşı İçinde Toplam Organik Karbon Tayini" Standardı'na göre analizi yapılan toplam organik karbon (TOC) içeriği kütlece  $\leq$  %0,8 olmalıdır (26), TS EN 196-2 "Çimento Deney Yöntemleri - Bölüm 2: Çimentonun Kimyasal Analizi" Standardı'na göre analiz edilen sülfat içeriği ( $SO_3$  olarak) kütlece  $\leq$  %2,0 olmalıdır (27) ve son olarak TS EN 933-9 "Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler - Bölüm 9: İnce Tanelerin Tayini - Metilen Mavisi Deneyi" Standardı'na uygun olarak metilen mavisi analiziyle belirlenen kil içeriği 1.20 g/100 g'ı aşmamalıdır (28). Bu analiz için geri dönüştürülmüş yapı malzemelerinin, EN 196-6'ya göre belirlenen spesifik yüzey (blaine) değeri yaklaşık olarak 5000  $cm^2/g$  olana kadar öjütülmesi gerekmektedir (13).

#### 2.4. Diğer Çimento Bileşenleri

Geri dönüştürülmüş yapı malzemeleri dışında, bu standardın kapsadığı diğer çimento bileşenleri de, TS EN 197-1, Madde

5'te belirtilen gereklilikleri karşılayacaktır. Bununla birlikte, TS EN 197-1 (21) Standardı'nın 5.2.6 "a)" maddesinin yerine şu gereklilik uygulanacaktır: Kireç taşı (L, LL) ikamesi için kalsiyum oksit içeriğinden hesaplanan kalsiyum karbonat ( $CaCO_3$ ) içeriği kütlece en az %40 olacak, kalsiyum oksit ve magnezyum oksit içeriğinden hesaplanan kalsiyum karbonat ve magnezyum karbonat ( $CaCO_3$  ve  $MgCO_3$ ) içeriğinin toplamı kütlece en az %75 olacaktır (13).

#### 2.5. Geri Dönüştürülmüş Yapı Malzemeleri İçeren Çimentolar İçin Gereklilikler

Bu standart kapsamında üretilecek çimentoların karşılması gereken özelliklerden bazıları sadece geri dönüştürülmüş yapı malzemeleri içeren çimentolar için geçerliken, bir diğer kısmı da TS EN 197-1'e atıfta bulunmaktadır. TS EN 197-1'de yer alan mekanik gereklilikler (Bölüm 7), yani erken ve standart dayanımlar, bu standartta tarif edilen çimentolar için de geçerli olacaktır (21). Ayrıca, yine mekanik gereklilikler içerisinde bulunan ve Tablo-6'da "L" ile gösterilen düşük erken dayanım sınırları da bu tip çimentolar için kullanılabilir. TS EN 197-1, 7.4.1 bölümünde yer alan genel dayanıklılık gereklilikleri kısmı da dikkate alınacaktır (21). Diğer şartlar ise TS EN 197-6 (13) içerisinde yer almaktadır. Tüm dayanım sınırları için, TS EN 196-2'ye göre sülfat miktarı ( $SO_3$  olarak) ve klorür muhtevası analizleri yapılacaktır (27). Burada sülfat için karakteristik değer  $\leq$  4,0 ve tek sonuç limit değeri  $\leq$  4,5 olmalıdır. Ayrıca, T içeriği  $>$  %20 olan çimentolar, tüm dayanım sınırları için %4,5'e kadar sülfat içerebilir. Klorür için ise karakteristik değer  $\leq$  0,10 ve tek sonuç limit değeri  $\leq$  0,10 olmalıdır. Bu sonuçlar, standartta nihai çimentonun kütlece yüzdesi olarak belirtilmiştir.

**Tablo 6:** TS EN 197-1, Tablo 3 - Karakteristik değerler olarak verilen mekanik ve fiziksel gereksinimler (21)

Dayanım Sınıfı	Basınç Dayanımı (MPa)				Priz Başlangıcı (dak.)	Hacim Genleşmesi
	Erken Dayanım		Standart Dayanım			
	2 Günlük	7 Günlük	28 Günlük			
32,5 L <sup>a</sup>	-	$\geq 12,0$	$\geq 32,5$	$\leq 52,5$	$\geq 75$	$\leq 10$
32,5 N	-	$\geq 16,0$				
32,5 R	$\geq 10,0$	-				
42,5 L <sup>a</sup>	-	$\geq 16,0$	$\geq 42,5$	$\leq 62,5$	$\geq 60$	
42,5 N	$\geq 10,0$	-				
42,5 R	$\geq 20,0$	-				
52,5L <sup>a</sup>	$\geq 10,0$	-	$\geq 52,5$	-	$\geq 45$	
52,5 N	$\geq 20,0$	-				
52,5 R	$\geq 30,0$	-				

<sup>a</sup> Dayanım sınıfı sadece CEM III tipi çimentolar için tanımlıdır.

Çimentoların toplam alkali içeriğine ilişkin bilgiler belirli uygulamalar ve koşullar için gerekli olabilir. Bu gibi durumlarda maksimum toplam alkali içeriği TS EN 196-2'ye göre belirlenecektir (27). Beyan edilen değer, iki ondalık basamakla kütle yüzdesi olarak ifade edilecektir. Beyan edilen değer, kullanım yerinde geçerli beton veya harç için uygun standartlar ve/veya yönetmeliklerde farklı bir şekilde belirtilmediği sürece, tek sonuçlar için sınır değer olacaktır (13).

## 2.6. Geri Dönüştürülmüş Yapı Malzemelerinin, Yapı ve Çimento Sektöründe Kullanım Örnekleri

Hafriyat, inşaat ve yıkıntı atıkları gibi geri dönüştürülmüş yapı malzemelerinin çimento için kullanımı standart hâline yakın zamanda getirilmiş olmasına rağmen bu konudaki çalışmalar akademik ve sektörel açıdan bazı ilerlemeler kaydetmiştir. Bu kapsamda yapılan çalışmalarda, geri dönüştürülmüş yapı malzemelerini içeren ürünler geliştirilmiştir. Holcim, 2022 yılı haziran ayında Fransa'da bulunan fabrikasında tamamen geri dönüştürülmüş minerallerden oluşan klinker üretimini gerçekleştirmiştir (29). 2021 yılında Holcim tarafından geri dönüştürülen inşaat ve yıkıntı atığı miktarı 6,6 milyon ton olarak açıklanmıştır ve 2025'e kadar bu miktarın 10 milyon tona çıkarılacağı öngörülmüştür (29). Heidelberg Materials, CIRCO<sub>2</sub>BETON projesi kapsamında Fransa'da atık hâldeki betonu, endüstriyel bir seçici ayırma platformunda işleyerek kum, agrega ve geri dönüştürülmüş beton hamuru gibi bileşenlere ayırmayı ve yüksek kaliteli geri dönüştürülmüş agregaları, yeni betona dâhil etmeyi planlamaktadır. Geri dönüştürülmüş beton hamuru ise Normandiya'daki Ranville çimento fabrikasında karbonatlaştırılarak yeni düşük karbonlu çimento türlerinde kullanılacaktır. Projenin, Ranville çimento fabrikasının CO<sub>2</sub> emisyonlarını %20 oranında azaltma potansiyeline sahip olduğu belirtilmektedir. Projenin inşaatı 2024'te, geri dönüştürülmüş beton hamuru üretimi ise 2025 yılında başlayacaktır. Karbonatlama reaktörü ise 2026 yılında faaliyete geçecektir (30). İsviçreli inşaat şirketi Eberhard, büyük ölçüde geri dönüştürülmüş malzemelerden oluşan, düşük karbonlu, döngüsel bir beton olan Zirkulit'i piyasaya sürmüştür (31). Zirkulit betonundaki agrega malzemesinin yaklaşık %85'i geri dönüştürülmüş ikincil malzemeden oluşmakta ve çakıl taşı ocaklarından birincil malzeme çıkarma ihtiyacını büyük ölçüde azaltmaktadır. Yapılan hesaplamalar, bu teknolojilerin beton üretiminde karbon ayak izini en az %20 azaltma potansiyeline sahip olduğu sonucuna varmıştır. Dünyada yapılan ve yapılmakta olan faaliyetler göz önünde bulundurulduğunda, özellikle Türk çimento sektörünün de bu konuda somut adımlar atması gerektiği görülmektedir.

## 3. SONUÇ VE ÖNERİLER

İnşaat ve yıkıntı atıkları hem dünya hem de Türkiye için her geçen gün önemi artan bir problem hâline gelmektedir. Türkiye

özelinde yaşanan doğal afetler ve kentsel dönüşüm sürecinin hızlandırılması ile ortaya çıkan atıkların miktarı önemli oranda artmıştır ve dolayısıyla atıkların katma değerli ürün olarak geri dönüştürülmesi ve değerlendirilmesi gerekmektedir. Dünya genelinde önemli bir çimento üreticisi olan Türkiye için inşaat ve yıkıntı atıklarının çimento üretiminde değerlendirilmesi hem çimento sektörü hem de çevre kirliliği açısından oldukça verimli bir çözüm olacaktır. Atıkların klinkere ikame edilerek kullanımı, çimento üretimi kaynaklı karbon emisyonlarını düşürecek ve yürürlüğe girecek olan SKDM kapsamında çimento üreticilerine alternatif çözüm yolu sağlayacaktır. Yürürlüğe giren TS EN 197-6 "Çimento - Bölüm 6: Geri Dönüştürülmüş Yapı Malzemeleri İçeren Çimento" Standardı ile yeni çıkarılacak çimento türlerinin ve özelliklerinin de netleştirilmesiyle birlikte, Türk çimento sektöründe de bu konuyla ilgili gelişmeler beklenmektedir. Önümüzdeki süreçte yapılacak çalışmalarda şu hususlar dikkate alınabilir:

- Türkiye'nin de konsorsiyumda bulunduğu 2015 yılında imzalanan Paris antlaşması gereği küresel emisyonları azaltmak adına, bu emisyonların en önemli nedenlerinden birisi olan çimento sektörünün bilinçlendirilmesi ve farkındalığın yaratılması sağlanmalıdır.
- İnşaat ve yıkıntı atıklarının ayrıştırılması için gelişmiş düzeyde tesisler üzerinde çalışmalar yapılmalıdır. Özellikle atıkların depolandığı bölgelerde, atık potansiyellerinin yüksek olduğu bölgelerde ve fabrikaların bulunduğu bölgelerde tesisler kurulması gerekmektedir.
- TS EN 197-6 Standardı'na göre uygun olarak değerlendirilebilecek atıkların tespiti ve çimento tasarımları konusunda süreci kolaylaştırılacak AR-GE çalışmaları yapılmalı ve oluşturulacak bilgi birikimi sektörle paylaşılmalıdır. Bu çalışmalar, atık ikamesinin basınç dayanımı başta olmak üzere, fiziksel ve kimyasal özelliklerinin incelenmesi, enerji tüketiminin tespiti açısından atıkların öğütülebilirliğinin tespit edilmesine odaklanmalı ve optimum koşulların elde edilmesi sağlanmalıdır.

Bu hususların uygulanmasıyla birlikte Türkiye inşaat ve yıkıntı atıklarının kullanımında, çimento üretiminde olduğu gibi dünyanın önde gelen ülkelerinden biri hâline gelecek ve 2053 sıfır emisyon hedefi doğrultusunda önemli bir adım atmış olacaktır.

## KAYNAKLAR

- 1) K. Kabirifar, M. Mojtahedi, C. Wang, V.W. Tam, Construction and demolition waste management contributing factors coupled with reduce, reuse, and recycle strategies for effective waste management: A review, J. Clean. Prod., 263, 2020. 121265.
- 2) B. Huang, X. Wang, H. Kua, Y. Geng, R. Bleischwitz, J. Ren,

Construction and demolition waste management in China through the 3R principle, *Resour. Conserv. Recycl.*, 129, 36-44, 2018.

3) C. Zhang, M. Hu, F. Di Maio, B. Sprecher, X. Yang, A. Tukker, An overview of the waste hierarchy framework for analyzing the circularity in construction and demolition waste management in Europe. *Sci. Total Environ.*, 803, 149892, 2022.

4) R. Williams, I. Artola, A. Beznea, G. Nicholls, *Emerging Challenges of Waste Management in Europe: Limits of Recycling*, Trinomics, 2020.

5) EUROSTAT, 2021b. Generation of waste by waste category, hazardousness and NACE Rev. 2 activity. [https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=env\\_wasgen&lang=en](https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=env_wasgen&lang=en).

6) C. Şenol, A. Gör, M. Üniversitesi, F.E. Fakültesi, C. Bölümü, / Kadıköy, R.A. İstanbul, TÜRKİYE'DE MEYDANA GELEN BÜYÜK DEPREMLERİN YERLEŞME VE DEMOGRAFİK YAPI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ (1927-2020), *Uluslararası Sosyal Bilimler Akademi Dergisi* 2 620-644, 2020.

7) Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2023 KAHRAMANMARAŞ VE HATAY DEPREMLERİ RAPORU, n.d.

8) M. Şahmaran, E. Özçelikci. DEPREM KAYNAKLI ATIKLARIN YÖNETİMİ KAPSAMINDA UYGULANABİLİR ÇÖZÜM ÖNERİLERİ - ÜLKEMİZDE MEVCUT EN İYİ ÇEVRESEL UYGULAMALAR. *Türkiye Bilimler Akademisi Günce Dergisi*, 2023. <https://www.tuba.gov.tr/files/yayinlar/gunce/G%C3%BCnce71.pdf>

9) THE EUROPEAN ENVIRONMENT STATE AND OUTLOOK 2010 SYNTHESIS, n.d. <https://doi.org/10.2800/45773>.

10) D.R. Reinhart, *Disaster Debris Management-Planning Tools*, 1999. <https://www.researchgate.net/publication/237778695> (accessed January 1, 2024).

11) A. Çoruh, Ü. Doğal, A. Uygulama, A. Merkezi, D. Afetler, Ç. Dergisi, C. Buzkan, O. Erman, *Yapısal Atıkların Geri Dönüşüm Sorunu ve Türkiye'deki Durumun Mevzuat Bakımından Değerlendirilmesi*, *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi* 6 (2020) 76-89. <https://doi.org/10.21324/DACD.570141>.

12) Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, *ULUSAL ATIK YÖNETİMİ VE EYLEM PLANI 2023*, n.d. [https://webdosya.csb.gov.tr/db/cygm/haberler/ulusal\\_at\\_k\\_yonet-m--eylem\\_plan--20180328154824.pdf](https://webdosya.csb.gov.tr/db/cygm/haberler/ulusal_at_k_yonet-m--eylem_plan--20180328154824.pdf) (accessed January 1, 2024).

13) TS EN 197-6, Çimento - Bölüm 6: Geri dönüştürülmüş yapı malzemeleri içeren çimento, TSE (2023).

14) *DÜNYA ÇİMENTO ÜRETİMİ VE TÜKETİMİNE İLİŞKİN GENEL DEĞERLENDİRME*, 2014.

15) Türkiye Çimento Sanayicileri Birliği, *Sektörel Öncelikler, Katkılı Çimento*, (n.d.). [https://www.turkcimento.org.tr/tr/sekto-rel\\_öncelikler/katkili-cimento](https://www.turkcimento.org.tr/tr/sekto-rel_öncelikler/katkili-cimento) (accessed January 1, 2024).

16) *DÜŞÜK KARBON HEDEFİNDE DÜŞÜK KLİNKERLİ ÇİMENTOLAR*, n.d.

17) The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete, n.d. <https://gccassociation.org/concretefuture/wp-content/uploads/2021/10/GCCA-Concrete-Future-Roadmap-Document-AW.pdf> (accessed January 1, 2024).

18) B. Dergisi, G. Doğdu, S. Nur Alkan, B. İzzet, B. Üniversitesi, M. Fakültesi, Ç.M. Bölümü, B./ Türkiye, İ.T. Üniversitesi, M. Fakültesi, M. Bölümü, İ./ Türkiye, *Deprem Sonrası Oluşan İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Değerlendirilmesi: 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremleri*, *Artvin Coruh University Journal of Engineering and Sciences* (2023) 38-50.

19) Türkiye Çimento Sanayicileri Birliği, 2022 Kapasite İstatistikleri, (n.d.). <https://www.turkcimento.org.tr/tr/istatistikler/kapasite> (accessed January 1, 2024).

20) Türkiye Çimento Sanayicileri Birliği, 2022 İstatistikleri, (n.d.). <https://www.turkcimento.org.tr/tr/istatistikler/cins> (accessed January 1, 2024).

21) TS EN 197-1, Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, TSE (2012).

22) TS EN 206+A2, Beton - Özellik, performans, imalat ve uygunluk, TSE (2021).

23) TS EN 933-11, Agregaların geometrik özellikleri için deneyler - Bölüm 11: Geri kazanılmış iri agrega bileşenleri için sınılandırma deneyleri, TSE (2010).

24) TS 706 EN 12620+A1, Beton agregaları, TSE (2010).

25) E. Özçelikci, G. Yildirim, H. Siad, M. Lachemi, M. Şahmaran, *Characterization and standardization of different-origin end-of-life building materials toward assessment of circularity performance*, *Magazine of Concrete Research*, 2023.

26) TS EN 13639, Kireçtaşı içinde toplam organik karbon tayini, TSE (2018).

27) TS EN 196-2, Çimento deney yöntemleri - Bölüm 2: Çimentonun kimyasal analizi, TSE (2013).

28) TS EN 933-9, Agregaların geometrik özellikleri için deneyler - Bölüm 9: İnce tanelerin tayini - Metilen mavisi deneyi, TSE (2022).

29) *Recycled clinker for circular construction | Holcim*, (n.d.). <https://www.holcim.com/who-we-are/our-stories/recycled-clinker> (accessed January 1, 2024).

30) *Closing the loop: Heidelberg Materials to produce low-carbon cement from demolished concrete in France | Heidelberg Materials*, (n.d.). <https://www.heidelbergmaterials.com/en/pr-2023-07-12> (accessed January 1, 2024).

31) *Low-Carbon Circular Concrete - Power of Possibility*, (n.d.). <https://overshoot.footprintnetwork.org/portfolio/low-carbon-circular-concrete-eberhard/> (accessed January 1, 2024).