

Makale Gönderim Tarihi: 01.11.2022

Yayına Kabul Tarihi: 05.01.2023

Maden Atıklarının Betonda Kullanımının İncelenmesi Üzerine Bir Derleme *A Review on the Investigation of the Use Industrial Waste in Concrete Mixes*

Songül CAN^{1,*}, Ali SARIŞIK²

^{1,2}Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa

* Sorumlu Yazar: songul_537@hotmail.com

Özet

İnşaat sektöründe kullanılan yapı malzemelerinin, yüksek oranlarda kullanılarak tükenmesi sonucu daha ekonomik çözümler sunabilmek için alternatif yapı malzeme arayışları ortaya çıkmıştır. Atık kullanımı ile hem atık saha depolarının boşaltılması hem de enerji tasarrufu sağlanmaktadır. Optimum atık miktarları belirlenerek kontrol numuneye (atık içermeyen) yakın özellikler sağlanması amacıyla atıkların beton üretiminde agrega ya da çimento yerine ikame edilmesi ile tükenmekte olan doğal kaynaklara alternatif çözümler bulunurken aynı zamanda daha ekonomik, dayanım ve dayanıklılık açısından sürdürülebilir betonlar üretilebilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Atıklar, Beton, Dayanım, Dayanıklılık, Sürdürülebilirlik

Abstract

As a result of excessive consumption of the materials used in the construction industry and desire to produce more economical solutions, lots of studies are conducted to find alternative materials. By using waste materials, both the emptying of the fields of wastes and energy conservation are provided. Optimum amount of waste is determined by providing properties close to the control sample (waste - free) by replacing the wastes with aggregate or cement in order to find alternative solutions to not deplete natural resources while at the same time producing more economical and durable concrete.

Keywords: *Wastes, Concrete, Strength, Durability, Sustainability*

1.GİRİŐ

Dünyada inşaat sektöründe en çok kullanılan yapı malzemelerinden biri betondur (Gürer ve ark.,2004; Dabbaghi ve ark.,2021; 2021a). Betonda çimento ve agreganın çok fazla kullanımı doğal kaynakların gittikçe tükenmesine neden olmuş ve bu durum betonda alternatif malzeme arayışlarına yöneltmiştir. Bu bağlamda, betonda atık kullanımı önem kazanmıştır. Günümüzde atıkların geri dönüşümü ile ilgili çalışmalar hızla artmaktadır. Geri dönüşümde asıl amaç; kaynakların gereksiz kullanılmasının önüne geçmek ve kaynağından ayrıştırılan atıkların; sahadaki atık çöp oranının azaltılması yoluna gitmektir. Kurşun, plastik, demir, bakır, çelik, cam, kâğıt, kauçuk, elektronik atıklar gibi maddelerin geri dönüşümü ve tekrar kullanım sürecine dâhil edilmesi doğal kaynakların tükenmesini önleyecektir. Dünyada atık miktarı her geçen gün artmakta bu durum çevresel kirliliğe ve atık depo hacimlerinin dolmasına yol açmaktadır. Atıkların çimento yerine kullanımı CO₂ emisyonunu azaltmakta, hava kirliliğini önlemekte ve enerji tasarrufu sağlamaktadır. Atıkların madencilik sektöründe ticari bir değeri yoktur (Jawadand ve Kirtikumar, 2021). Sürdürülebilir bir faaliyet olan atıklar üzerinde fizibilite çalışmaları yapılarak, inşaat sektöründe düşük maliyet ile konutlar inşa etmek mümkün olacaktır (Colangelo ve ark., 2018; Lebre ve ark., 2017). Bu çalışmada, çeşitli maden atıklarının beton üretiminde kullanım performansları incelenerek mühendislik özellikleri araştırılmıştır.

1.1. Türkiye Beton Sektörü İstatistikleri

Ülkemizde 5 milyon ton evsel atığın çöpe gittiği yapılan araştırmalar ile ortaya çıkmıştır. Sürdürülebilir bir yaşam için atıkların bertaraf edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle atıkların geri dönüşümü geri kazanılması yoluna gidilmiştir. Özellikle işletmelerde açığa çıkan atıkların tümü geri dönüşüme katılmamaktadır. Üretilen atıklar ve geri dönüşüme katılan atık miktarları (Türkiye Hazır Beton Sektörü İstatistikleri Raporu, 2016.), Çizelge 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Türkiye'de üretilen ve geri kazanılan atık miktarları (Türkiye Hazır Beton Birliği, 2016)

Atık Cinsi	Üretilen Ambalaj (ton)	Piyasaya Sürülen (ton)	Geri Kazanılan (ton)	Gerçek Geri Kazanım Oranı (%)
Plastik	315, 000. 0	915,301	497,089	54
Metal	373,519	142,482	811.46	57
Kompozit	300,519	963, 89	554.10	57
Kağıt Karton	275,784. 8	160,483	125,812. 8	78
Cam	133,126. 5	845,615	193,563	23
Ahşap	719,741	523,261	113,509	22
Toplam	863,305. 5	412,787	219,884. 5	53

Geri dönüşüm çalışmaları tüm dünyada devam etmektedir. Geçmişten bugüne ithal edilen atık miktarları çok yüksek oranlara ulaşmıştır. Bu nedenle atık miktarlarının azalması için çok büyük bir paya sahip olan inşaat sektöründe beton üretiminde değerlendirilmesi yoluna gidilmiştir (<http://www.haliccevre.com/images/sempozyum/38.pdf>). Beton üretiminde endüstriyel atıklar, tarımsal atıkları, evsel atıklar ve maden atıkları kullanılmıştır. Bunun yanı sıra diatomit, kömür, bakır, alüminyum, bor, krom ve manyezit atıkları gibi maden atıkları agrega veya çimento yerine kullanılarak mekanik özellikler iyileştirilmeye çalışılmış hemde maliyetten tasarruf sağlanmıştır. Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü, 2006 raporuna göre maden atıkları inert atıklar, tehlikeli atıklar ve tehlikeli olmayan atıklar olarak 3 farklı kategoride sınıflandırılmıştır. İntert

atık; her hangi bir kimyasal, fiziksel ve biyolojik değişime uğramayan atıklar, tehlikeli atıklar; patlayıcı, oksitleyici ve kanserojen etkisi olan atıklar, tehlikeli olmayan atıklar ise fiziksel olarak kararlı ancak kimyasal olarak kararlı olmayan atıklar olarak tanımlanmaktadır.

2. BETONDA KULLANILAN ATIKLAR

Bu çalışma kapsamında özellikle endüstriyel gelişimle beraber ortaya çıkan atık miktarlarındaki artış nedeniyle maden atıkları üzerine bir inceleme yapılmıştır. Maden atıkları ile ilgili çalışmalar Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 2. Betonda kullanılan maden atıkları

Atık cinsi	Beton türü	Atığın ikame edildiği malzeme	İkame oranı (%)	Su/bağlayıcı oranı (%)	Kür yaşı (gün)	Uygulanan Deneyle	Referans
Kömür atığı	Silindirle Sıkıştırılmış	Çimento	5, 10, 20	0.40, 0.42, 0.45	28, 90	Basınç dayanımı, eğilme dayanımı,	(Hesami ve ark., 2016)
	Geleneksel beton	Çimento	5, 10, 15, 20	0.60	28, 90	Schmidt test çekici, ultrases,geçiş hızı, basınç dayanımı, slump	(Kara, 2018)
	Yeşil beton	Agrega	5, 10, 15, 20, 25	0.55	7, 14, 28	Slump,basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı, elastisite modülü, su emme	(Karimaei ve ark., 2020)
	Geleneksel beton	Çimento	5, 25,7.5, 3, 0.75, 9.75	0.45, 0.48, 0.50, 0.53, 0.555	7, 28	Eğilme dayanımı	(Kahataei ve Nasrollahi, 2020)
Mermer tozu	Gözenekli Beton	Çimento	5, 10, 15, 20	0.33	7, 14, 28, 50, 91, 181	Slump testi, su emme, MgSO ₄ ve H ₂ SO ₄ çözeltisi, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı	(Zhang ve ark., 2020)
	Kendiliğinden yerleşen beton	-	200 kg	Çimento= 150kg Su=180.9, 180.1, 175.1,190.180.2	600 gün	Na ₂ SO ₄ , MgSO ₄ , NaCl, MgCl ₂ , dinamik elastisite modülü	(Tennich ve ark., 2017)
	Çelik fiber donatılı beton	Agrega	25, 50, 75, 100	0.5	28	Basınç dayanımı, taşıma kapasitesi	(Venkataramana ve Babu, 2018)

	Kendiliğinden yerleşen yüksek dayanımlı beton	Çimento	10, 20, 30	0.33	7, 28, 90, 180, 365	Korozyon testi, hızlandırılmış karbonatlaşma direnci, kuruma büzülmesi, klorür penetrasyonu, basınç dayanımı, su geçirimsizlik testi	(Chouthary ve ark., 2021)
Diatomit tozu+ Mermer tozu	Normal Beton	Çimento	5, 5.7, 10, 1.5, 7.5, 10	0.50	7, 28, 90	Basınç dayanımı, eğilme dayanımı	(Ergün, 2011)
Ferro krom cürufu	Normal Beton	Agrega	25, 50, 75	0.5	28	Basınç dayanımı, eğilme dayanımı	(Al- Jabri, 2018)
Kolemanit	Normal Beton	Agrega	10, 20, 30, 40, 50	0.42	7, 28	Slump, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, ultrases geçiş hızı, schmidt test çekici, donma-çözünme dayanımı	(Gencel ve ark., 2018)
Bor atığı	Asfalt betonu	Mineral dolgu malzemesi	4, 5, 6, 7, 8	3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5	-	Marshall stabilite testi, donma-çözülme dayanımı	(Gürer ve Selman, 2016)
Perlit tozu	Kendiliğinden yerleşen beton	Metakaolin ve silis dumanı	10	0.45	28	Donma-çözünme dayanımı, basınç dayanımı, permabilite, slump, V hunisi, porozite	El-Mir ve ark., 2020)
Alüminyum atığı	KYB	Çimento	5, 10, 20, 30, 40	0.39	3, 7, 28, 60, 90	Basınç dayanımı, eğilme dayanımı	(Elinwa ve Mbadike, 2011)
	KYB	Çimento	25, 50, 75, 100	0.38, 0.45	3, 7, 14, 28, 91	Çökme-yayıma, V hunisi, J halkası testi basınç dayanımı, ultrases geçiş hızı	(Sua-Iam ve Makul, 2013)
Bakır curufu	Normal beton	Agrega	10, 40, 60, 80, 100	0.36	7, 14, 28, 90	Eğilme dayanımı, yarmada çekme dayanımı, basınç dayanımı,	(Manjunatha ve ark., 2021)
	Cüruf çimentolu beton	Agrega	20, 40, 60, 80, 100	0.485	3, 7, 28	Basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, sülfat saldırısı, asit saldırısı, su emme, boşluk oranı	(Panda ve ark., 2021)

	Bakır cüruf agregalı beton	Agrega	20, 40, 60, 80, 100	0.42	7, 28, 56, 91	Aşınma direnci, slake durabilite testi, slump, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı	(Chakrawarthy ve ark., 2021)
	Polipropilen elyaf takviyeli alkali aktifleştirilmiş cürufllu beton	Agrega	20, 40, 60, 80, 100	0.40	7, 14, 28	Basınç dayanımı, eğilme dayanımı	(Sridharan ve Madhavi, 2021)
	Bakır cürufllu fiber donatılı beton	Agrega	20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100	0.41	7, 28	Slump, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yarmada çekme dayanımı, ultrasonic geçiş hızı, Schmidt test çekici	(Chakrawarthy ve ark., 2022)
Magnezya	Magnezya çimentolu beton	-	20, 30, 40	0.45, 0.46, 0.52, 0.53, 0.60	7, 14, 28	İzotermal kalorimetre, karbon ayak izi	(Ruan ve ark., 2021)
	Magnezya çimentolu beton	-	20, 30, 40	0.45, 0.46, 0.52, 0.53, 0.60	7, 14, 28	Basınç dayanımı, porozite, kılcal su emme, termal iletkenlik	(Ruan ve Unluer, 2017)
	Normal beton	Çimento	5	0.4	3, 7, 14, 28, 56, 84	Basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, büzülme, donma-çözülme dayanımı, klor iyon geçirgenliği	(Tian ve ark., 2022)
	Magnezya alüminalı silikatlı beton	-	0.40, 0.45, 0.50, 0.57, 0.69	0.752	7, 28, 91	Basınç dayanımı, eğilme dayanımı, porozite, elastisite modülü	Dhakal ve ark., 2022)

2.1. İner t Maden Atıkları

2.1.1. Mermer atığı

Mermer atıklarının betonda kullanımı ile ilgili çalışmalar literatür de geniş yer kaplamaktadır. Geleneksel betonda ince ve kaba agrega yerine ikame edilerek ya da eklenerek, kendiliğinden yerleşen betonda ise mineral katkı olarak kullanılmıştır. Atık mermerler betonun su emmesini ve kılcal geçirimsizliği azalmakta ayrıca betonu klorür ve sülfat saldırılarına karşı dirençli kılmaktadır (Zhang ve ark., 2020).

Gözenekli betonda silis dumanı ve mermer toz atıklarının, dayanım ve dayanıklılık özellikleri incelenmiştir. Silis dumanı (%0, %2.5, %5 ve %10) ve atık mermer tozu (%0, %5, %10, %15 ve %20) çimento yerine ikame edilerek kullanılmıştır. M_2SO_4 ve H_2SO_4 etkisine maruz kalan betonun basınç, eğilme, yarmada çekme dayanımları incelenmiştir. Silis dumanı %10 ve mermer tozu ise %5-%20 kullanımı ile dayanım-dayanıklılık özelliklerinde iyileşme gözlemlenmiştir. Silis dumanı %10 ve mermer tozu %5 oranında kullanıldığında, sülfat etkisine maruz bırakılan betonun kontrol numuneye göre daha dirençli olduğu sonucuna varılmıştır (Tennich ve ark., 2017).

Mermer ve fabrikalardan çıkan fayans atıkları agrega yerine kullanılarak, kendiliğinden yerleşen betonda sülfat etkisi incelenmiştir. Mermer atıkları ve çakıl kullanılarak üretilen beton, 60 gün boyunca sülfat etkisine maruz bırakılmıştır. Mermer atıklarının sodyum sülfat saldırısına karşı dirençli olduğu gözlemlenmiştir (Venkataramana ve Babu, 2018).

Siyah mermer taş atıkları kullanılarak üretilen, çelik elyaf takviyeli betonun taşıma kapasitesine olan etkisi incelenmiştir. Mermer atıkları doğal agrega ile ikame edilerek kullanılmıştır (%25, %50, 8 %75 ve %100). Beton performansı açısından, mermer atıklarının %50 oranında doğal agrega yerine kullanım önerilebilir (Chouthary ve ark., 2021).

2.1.2. Perlit tozu

Gözenekli, hafif ve köpük yapılu uyumlu bir agrega kullanmak için geliştirilmiş perlit çalışmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Ahmed ve Abouzeid, 2011; Sunil ve ark., 2015). Genel olarak, genişletilmiş perlit, 900 ile 1200°C sıcaklıklara maruz kaldığında genişleme eğiliminde olan silisli bir volkanik malzemedir (Amrani ve ark., 2019). Yaklaşık 240 kg/m³ gibi düşük bir yoğunluğa ve genellikle %30 ila %40 arasında değişen bir su emme özelliğine sahip olan geliştirilmiş perlit, genişmiş şeyl , arduvaz ve hatta pomzadan daha düşük bir yoğunluğa sahiptir ve farklı uygulamalar için yaygın olarak kullanılan hafif bir malzemedir. Kimyasal olarak inert olması ve iyi ısı yalıtımı nedeniyle tercih edilmektedir (Yellishetty ve ark., 2008; Argene ve ark., 2016).

Bir başka çalışmada, kendiliğinden yerleşen betonda atık perlit tozu kullanılmıştır. Hazırlanan 550 kg/ m³ karışımlarda filler malzeme olarak kireçtaşı, metakaolin ve silis dumanı kullanılarak dayanıklılık özellikleri incelenmiştir. Perlit konsantrasyonu 220kg/m³'den 260kg/m³'e ulaştığı zaman su geçirgenliği, karbonatlaşma ve klor iyonu saldırılarında azalma gözlemlenmiştir. Puzolanik aktivitesi ve perlit atığındaki doğal gözenekler don saldırılarında iyileşme sağlamıştır (El-Mir ve ark., 2020).

2.1.3. Diatomit tozu

Yüksek silika içeriği, gözenekli yapısı ve geniş yüzey alanı dahil olmak üzere birçok ayırt edici özelliğe sahip olması nedeniyle, diatomit çimentoya bol ve ucuz bir mineral katkı maddesi olarak

girmiştir (Wang ve ark., 2016; Benayache ve ark., 2018; Zhang ve ark.,2019). Diyatomit hakkındaki mevcut literatürün çoğu, elde edilen betonun mekanik özelliklerinin geliştirilmesine özel önem vermektedir. Bunun yanı sıra, diyatomitin yüzey alanı ve partikül boyutunun beton mukavemetine önemli etkisi olduğu belirtilmiştir (Fragoulis ve ark., 2005). Diyatomitin yüzey alanı $5000 \text{ cm}^2 / \text{gr}'\text{yi}$ aştığında, numunelerin basınç dayanımı olumlu yönde etkilenmiştir. Son zamanlarda, diyatomit içeren betonun basınç ve eğilme dayanımları, donma ve çözülme direnci incelenmiştir (Sun ve ark., 2020). Sonuçlar, diyatomit ilavesinin betonun gözenek yapısını iyileştirdiğinden dolayı mekanik özellikleri geliştirdiğini göstermiştir. Ayrıca amorf silika içeren diyatomit , betonun mukavemetinden sorumlu olan kalsiyum silikat hidrat (CSH) jeli oluşturmak için $\text{Ca}(\text{OH})_2$ tüketir. Diyatomitin puzolanik reaksiyon yoluyla CSH jelleri oluşturarak betonun eğilme mukavemetini arttırdığı doğrulanmıştır (Sun ve ark., 2020). Diyatomitin betona dahil edilmesi, diyatomitin parçacık boyutuna bağlı olan bir dolgu etkisi ile sonuçlanmıştır (Kang ve ark., 2019). Uygun miktarda ince diyatomitin dahil edilmesi, betonun gözenek yapısını küçültür ve kompaktlığını artırarak mekanik özelliklerini iyileştirir (Li ve ark., 2019).

Ek olarak, diyatomitin gözenekli yapısı yüksek su emilimine neden olmakta ve karışım suyunun bir kısmı diyatomit tarafından emilerek betonun gözenekliliğini azaltmaktadır. Emilen su, betonun hidrasyon sürecini desteklemek için serbest bırakılabilir. Daha önceki bir çalışmada bildirildiği gibi, puzolanik aktiviteye sahip diyatomit, yüksek amorf SiO_2 ve yüzey alanı nedeniyle betonun hidrasyonuna katkı sağlamıştır (Ahmadi ve ark., 2018). Ayrıca, CSH jelinin oluşmasına katkı sağlayan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'nin azalması, gözenekliliğin düşmesine neden olmaktadır (Majhi ve Nayak, 2019).

Diyatomit tozu %10 oranında çimento ile ikame edildiğinde dayanımı artırırken %10'dan fazla ilave edilmesi halinde dayanımda düşüş gözlemlenmiştir. Dayanımdaki artış diyatomitin puzolanik aktivitesinin yüksek olması ve hidrasyon sırasında reaksiyona girmesine bağlıdır. Diyatomitin filler etkisi, seyreltme etkisi, diyatomitin $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile reaksiyonu ve su azaltıcı katkı ile dayanıma olan etkisi artmıştır (Ergün, 2011).

2.1.4. Manyezit atığı

İnert atıklardan olan mermer tozu betonda su emilimini azaltırken, gözenekli yapısı ile diyatomit tozu ve perlit atığı ise betonda su emilimini arttırmaktadır. Diğer bir inert malzeme olan manyezit atığı ise betonda su emilimini arttırmıştır. Ancak, bu malzemelerin betonda kullanım oranları, malzemelerin yüzey alanı ve partikül boyutlarının su emmede etkili olduğu unutulmamalıdır.

Araştırmalarda, manyezitli çimento portlant çimento ile karşılaştırıldığında, kılcal yolla su emme katsayısında artış görülmüştür. Ancak, uçucu kül ile birlikte kullanımında su emmesinde düşüş görülmüştür. Manyezit içeriği arttıkça basınç dayanımında azalış rapor edilmiştir (Ruan ve Unluer, 2017).

Manyezit içeriği arttıkça dayanımda azalma olmasının sebebi manyezitin 50nm'den daha büyük olan boşlukları arttırmasına bağlanmıştır. Manyezit atığı su kürüne maruz bırakıldığında, 28 günden önce dayanımın azalması boşlukların artmasına bağlı olarak gerçekleşirken, 28 günden sonra dayanımın artması $\text{Mg}(\text{OH})_2$ oluşumunun yavaş yavaş büyümesine atfedilmiştir. Manyezit kullanımı ile 50nm'den küçük gözenekler kapandığı için betonun büzülmesi önemli ölçüde azalmakta ve betonun klorür direnci artmaktadır. Manyezitin aktivitesi ne kadar düşükse donma-çözülme ve sülfat saldırılarına karşı olumsuz etkisinin olduğu bildirilmiştir (Tian ve ark., 2022).

2.1.5. Kuvars tozu

Kuvars minerali beton veya harç yapımında kullanılmaktadır (Tolstoy ve ark., 2020). Yüksek performanslı beton yapımında boyut küçülmesi yapılarak ince agrega yerine kullanılabilir. İloh ve ark., 2019). Kuvars tozu beton yapımında iri agrega yerine kullanıldığında kireçtaşına kıyasla maliyeti azalttığı, basınç dayanımını arttırdığı ve su emmesinin düşük olduğu belirlenmiştir (de Carvalho ve ark., 2021).

İnert malzemeler betonda boşlukları doldurmakta ve dayanımın artmasını sağlamaktadır. Mermer tozu ve kuvars tozu betonda su emilimini azaltmış ancak diğer atıklar betonda su emiliminin artmasına neden olmuştur. Manyezit atığı ise uçucu kül ile beraber kullanıldığında su emilimini azalttığı görülmüştür.

2.2. Telikli Maden Atıkları

2.2.1. Kömür atığı

Son zamanlarda, birkaç araştırmacı, beton üretiminde kum, çakıl ve Portland çimentosu fraksiyonu yerine uçucu kül ve kömür atığı gibi geri dönüştürülmüş atıkları kullanma olasılığını incelemiştir (Modarres ve ark., 2018). Kömür atıklarının silindirle sıkıştırılmış betonda kaplama olarak kullanılmasının uygulanabilirliği değerlendirilmiştir. Çimentonun %5, 10 ve %20'si kömür atığı ile ikame edilerek üretilen betonlarda, %5'lik kömür atığı ikamesinin en iyi etkiye sahip olduğu ve 90 gün sonra basınç dayanımını yaklaşık %10 arttırdığı sonucuna varılmıştır (Karimaei ve ark., 2020).

İşlenmemiş kömür atığı içeren betonun mekanik özelliklerininin araştırıldığı başka bir çalışmada ise basınç dayanımı, elastisite modülü ve su emme özellikleri incelenmiştir. Kum ve çakılın %5'ini işlenmemiş kömür atığıyla değiştirerek betonun basınç dayanımının yaklaşık %6 arttığı ve su emiliminin yaklaşık %8 azaldığı rapor edilmiştir. İşlenmemiş kömür atığı %10'a kadar ikame edildiğinde betonun basınç dayanımı azalmıştır (Karimaei ve ark., 2020; 2021).

İşlenmemiş kömür atığı kaba agrega yerine (%0-%30) kullanıldığında basınç dayanımı açısından %5 ikamenin optimal oran olduğu sonucuna varılmıştır (Karimipour ve Edati, 2020). Kömür atığı %6'nın üzerinde çimento yerine ikame edildiğinde eğilme dayanımını azaltmıştır. Ancak, düşük oranda kömür atığı betonda gözenekliliği azaltarak mikro dolgu etkisi gösterdiğinden eğilme dayanımını arttırmıştır (Dabbahgi ve ark., 2021).

Silindirle sıkıştırılmış betonda atık kömür külü (CWA) ve atık kömür tozu (CWP), kireçtaşı tozu (LS) kullanılmıştır. Kullanılan atıklar %5,%10 ve %20 oranında çimento ile ikame edilerek karışımlar hazırlanmıştır. Atık kullanımı, su/çimento oranının artmasına sebep olmuştur. Kömür atığı %5 oranında kullanıldığında, kontrol numune ile eşdeğer performans gösterirken, kömür atığının %20 oranında kullanılması ile bütün yaşlarda dayanım ve elastisite modülünü azalttığı sonucuna varılmıştır. Kömür atığının % 10'a kadar kullanımı kontrol numune ile benzer özellikleri sergilemiştir (Hesami ve ark., 2016).

Karışımlarda çimentonun bir kısmı hidrasyon sürecinde reaksiyona katılmamaktadır. Reaksiyona girmeyen bu kısım filler malzeme olarak davranmaktadır. Çimentodaki bu filler malzeme çimento tanecikleri ve katı malzemeler arasındaki kenetlenmeyi iyileştirerek mekanik özellikler üzerinde yararlı etkiye sahip olmaktadır. Çimentonun hidrasyonu sırasında ortaya çıkan $Ca(OH)_2$ ile fazla olan atıkların reaksiyona girmemesi sonucu bu malzemeler puzolanik özellik göstermez ve inert malzeme davranışı sergileyerek mekanik özellikleri azaltmaktadırlar.

Atık kömür külü ile yapılan bir başka çalışmada ise, çimento yerine kullanılan atık kömür külü ilavesi arttıkça slump değerlerinde, basınç dayanımında ve işlenebilirlikte azalma gözlemlenmiştir. En yüksek basınç dayanımı 7 günlük kür süresi sonunda ve %5 atık ile ikame edilen betonda görülmüştür. Kömür atığı ile üretilen ve 28 gün kür etkisine maruz bırakılan numunelerde ise atık miktarı arttıkça dayanımda azalma gözlemlenmiştir (Kara, 2018). İşlenmemiş kömür atığı kullanılarak üretilen yeşil beton çalışmaların da, kum ve çakıl yerine %5 oranında atık kullanımı mekanik özellikleri arttırmıştır. Basınç ve eğilme dayanımı yaklaşık olarak %3-%7 ve %5-%8 arasında değişmektedir. Kömür atığının %5 oranında kullanılması ile basınç dayanımı %6 oranında artmıştır. Bunun nedeni, betonun fiziksel ve kimyasal yapısının hidrasyon süreci ile gelişmesidir. Daha fazla atık kullanımı basınç dayanımını azaltacaktır çünkü porozitesi yüksek olan bu agregalar daha zayıf bir çimento agrega ara yüzeyine (ITZ) neden olacaktır (Karimaei ve ark., 2020).

Bir başka araştırmada, kömür atığı çimento yerine %0.5-%9.75 oranlarında ikame edilmiştir. Çekme dayanımı açısından en uygun karışımın; s/ç oranı 0.45, çimento dozajı 340kg/m³ ve kömür atığının %7.5 olarak kullanılması ile elde edildiği belirtilmiştir (Kahataei ve Nasrollahi, 2020).

2.2.2. Ferro krom atığı

Diğer madencilik atıklarında olduğu gibi, kromit madeni atıklarının da ciddi çevresel kirlenmeye neden olma potansiyeli vardır (Coetzee ve ark., 2020). Üretim tesislerinde zenginleştirme tesisine giren geri kazanılan cevherin %10'u konsantre cevher, %90'ı mineral zenginleştirme atığı olarak ayrıştırılmaktadır (Kılınçarslan ve Kaya, 2017). Bu nedenle atıklar düzenli depolama sahasında geniş bir alanı kaplamakta ve büyük bir bölümü geri dönüştürülemez olduğundan önemli çevre sorunları yaratmaktadır (Andreola ve ark., 2012). Krom atıklarının betonda kullanımı ile çok az çalışma mevcuttur. Yapılan bir çalışmada, Ferro krom atıklarının betonda kireçtaşı yerine %0, %5, %10, %15, %20 oranında ikame edilmesi betona olan etkisi araştırılmıştır. Krom atığı ile üretilen beton numunelerde 3, 7 ve 28 günlük kür süresi sonucunda, atık miktarı artışına bağlı olarak basınç dayanımı, eğilme dayanımı, termal iletkenlik değerlerinde artış; kuruma büzülmesinde azalış meydana gelmiştir (Al- Jabri, 2018).

Ferro krom atığı yüksek miktarda MgO içermektedir. Çimento yerine kullanıldığında hidrasyonu geciktirdiği için %10'dan fazla kullanılması önerilmemektedir.

2.2.3. Alüminyum atığı

Alüminyum, dünyada çelikten sonra yıllık 88 milyon ton tüketimi ile açık ara en yaygın kullanılan metaldir (Ministry of Mines Government of India, Strategy on resources efficiency in aluminum sector; 2019. <http://www.eu-rei.com>). Çok sayıda çalışmada alüminyum atığının çimento veya kum yerine kullanılması rapor edilmiştir (Mailar ve ark., 2016; Alzubaidi, 2017; Liu ve ark., 2017; Hay ve Ostertag, 2018).

Alüminyum atığı çimento yerine %25 oranında ikame edildiğinde, alüminyum ve çimento arasındaki kimyasal reaksiyon sonucu oluşan hidrojen gazı, betonda basınç dayanımı, eğilme dayanımı, işlenebilirlik ve yoğunlukta düşüşe neden olmuştur (Alzubaidi, 2017).

Alüminyum atığının %20 oranında kullanımı betonun mukavemet gelişimini sağlarken, priz süresini geciktirdiği rapor edilmiştir (Mailar ve ark., 2016). Alüminyum atığı çimento yerine kullanıldığında optimum oran % 10 ile sınırlandırılmalıdır. Alüminyum içeriği arttıkça su

ihtiyacı artmaktadır. Alüminyum miktarı arttıkça çimento hidrasyon süreci uzamaktadır (Elinwa ve Mbadike, 2011).

Alüminyum atığı ince agreganın ağırlıkça %75 oranına kadar kullanılabilir. Alüminyum miktarı arttıkça mukavemet artmaktadır. Kendiliğinden yerleşen betonda alüminyum atık miktarı arttıkça doldurma ve geçiş kabiliyeti azalmaktadır (Sua-Iam ve Makul, 2013).

Alüminyum atığı %20 oranında çimento yerine ikame edildiğinde betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerini iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Alüminyum atıkları betonun priz başlangıç ve bitiş sürelerini 30 dakika kadar uzatmaktadır. Bu durum sıcak havada beton dökümü için uygundur (Mailer ve ark., 2016).

2.2.4. Bakır cürufu

Bakır üretim sürecinin bir yan ürünü olarak oluşan endüstriyel bir atık maddedir. Bakır cürufu, düşük CaO seviyesinin yanı sıra Al_2O_3 , SiO_2 ve Fe_2O_3 gibi diğer oksitlerin varlığından dolayı puzolanik özelliklere sahiptir. Bazı çalışmalar bakır cürufunun puzolanik aktiviteye sahip olduğunu keşfetmiş olsa da, aktivitesi oldukça düşüktür ve bakır cürufunun betonda bir mineral katkı maddesi olarak kullanımını sınırlamaktadır (Murari ve ark., 2015; Liu ve ark., 2019).

Çimento yerine cüruf kullanıldığında, hidrasyon bileşeni $Ca(OH)_2$ konsantrasyonu azalırken, küçük mineral karışımı parçacıkları çimento parçacıkları arasındaki boşlukları doldurur, çimento harcı daha yoğun hale gelir ve arayüzey alanı güçlenir (Kwon ve ark., 2017). Bakır cürufu nehir kumu yerine kullanıldığında betonun akışkanlık özelliklerini iyileştirir. Bakır cürufu %60 oranında ince agrega olarak kullanıldığında, dolgu etkisine bağlı olarak betonun mekanik özelliklerinde iyileştirme sağlamıştır (Manjunatha ve ark., 2021).

Dolgu malzemeleri ile betonun su emmesi, betondaki boşlukların mikro dolgusu nedeniyle azalır. Daha kompakt bir kütleyle yol açar ve dolayısıyla su emilimi azalır. Bununla birlikte, dolgu malzemelerinin akışkanlığının olmaması nedeniyle, dolgu malzemelerinin daha büyük bir dozajı su emiliminin artmasına neden olabilir (Ahmad ve ark., 2021; Ahmad ve ark., 2022).

Doğal kumun bakır cürufu ile %80 oranında yer değiştirmesi sonucu mekanik özelliklerde iyileştirme görülmüştür. Kumun cüruf ile yer değiştirmesi aşınma dayanımında iyileştirme sağlamıştır (Panda ve ark., 2021). Bakır cürufu işlenebilirliği ve darbe dayanımını iyileştirmektedir. Su emmesi düşüktür ve bakır cürufunun %80 oranında kum ile yer değiştirmesi sonucunda mekanik özellikleri iyileştirdiği bildirilmiştir (Chakrawartha ve ark., 2021).

Bakır cürufu arttıkça işlenebilirlikte artış görülmüştür ve %40 oranında bakır cürufunun agrega ile yer değiştirmesi ile mekanik özelliklerde iyileştirme sağlanmıştır (Sridharan ve Madhavi, 2021).

Tehlikeli atıkların betonda kullanılması ile betonun mekanik özelliklerinde iyileştirme sağladığı görülmüştür. Bu atıkların yüksek oranda kullanılması ile su emme oranları artsa da, betondaki boşlukları dolduru etkisi olduğundan mekanik özelliklerde iyileştirme sağladığı görülmüştür. Ancak, bu atıkların içerdikleri kimyasal özellikler nedeni ile betondaki kullanım oranları sınırlandırılmıştır.

2.3. Tehlikeli olmayan Atıklar

2.3.1. Bor atığı

Artan sanayileşme ile birlikte, atık geri dönüşümü bor madenciliği endüstrisi için kritik bir endişe haline gelmiştir. Yerkabuğundaki B_2O_3 içeren kaynakların arz-talep dengesinin korunması ve sürdürülmesi ile bor atıklarından kaynaklanan çevresel ve ekonomik kayıpların önlenmesi için araştırılan çalışma alanlarından biri de ekonomik olarak daha fazla kullanılmasıdır (Karadağlı ve Çiçek, 2020).

Bor atıkları; çimento, harç ve betonda, su ve gaz geçirgenliği sağlamakta (Meydan, 2019), dayanıklılığı artırmakta (Topçu ve Boğa, 2010) ve priz geciktirici (Kılıçarslan ve ark., 2013; Boncukcuoğlu ve ark., 2002) olarak kullanılmaktadır. Spesifik olarak, ana kalsiyum boratların büyük ölçekli üretimi için kullanılan kolemanit mineralinden elde edilen bor atıkları, büzülme azaltmakta (Korkut ve Korkut, 2011), mekanik ve radyoaktivite kalkanını iyileştirmek için çimento ve harçta bir katkı maddesi olarak dahil olmak üzere çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır (Binici ve ark., 2014).

Yapılan bir araştırmada, bor atığı çeşitlerinden biri olan kolemanitin betonda maksimum %10 oranında kullanılması önerilmiştir. Bu çalışmada %10, %20, %30, %40 ve %50 oranında kolemanit agrega yerine ikame edilerek kullanılmıştır. Kolemanit oranı arttıkça hava içeriği artmakta, çökme değeri azalmakta ve %30'dan fazla kolemanit kullanımı topaklaşmaya neden olmaktadır. Ayrıca, bor çimentoda yüksek hidrasyon kaynaklı çatlaklara ve dayanımın azalmasına neden olmaktadır. Dayanımdaki azalmanın sebebi çimento pastası ve kolemanit agregası arasındaki zayıf adezyondan kaynaklanmaktadır. Bu etkileşim kolemanit agregasının, kireçtaşı agregasına göre daha derin ve geniş çatlaklara ulaşmasına neden olmaktadır (Gencil ve ark., 2018) .

Bor atığı asfalt betonunda filler malzemesi olarak kullanılmıştır. Orta ve düşük trafiğe sahip asfalt beton kaplamalarında kullanılabileceği sonucuna varılmıştır (Gürer ve Selman, 2016).

2.3.2. Fosfat madeni atık kayalardan çıkan çakmaktaşı kullanımı

Cevher çıkarma ve mineral işleme sırasında oluşan madencilik atıkları (atık kayalar ve tortular) genellikle maden sahalarında veya yakınında biriktirilir. Bu maden atık yönetimi, çeşitli çevresel sorunlara ve arazi kaybına neden olabilir. Madencilik sektörü dünyanın en büyük atık akışı üreticilerinden biri olduğu için (Turita-Barna ve ark., 2007), madencilik atıklarının değerlendirilmesi için yönetim stratejileri uyarlanmalı ve aynı zamanda döngüsel atıkların geliştirilmesine katkıda bulunulmalıdır (Parbhakar-Fox ve Lottermoser, 2011). Betonda kullanılan diğer bir maden atağında fosfat madeni atık kayalarında elde edilen çakmaktaşıdır. Fas fosfat rezervleri, dünya rezervlerinin yaklaşık %71'ini oluşturmaktadır (Loutou ve ark., 2019). Fosfat atık kayaçları, toprak, yüzey ve yeraltı suları için herhangi bir kirlilik arz etmezler, ancak ekilebilir arazileri, topografyayı ve peyzajları etkiledikleri için bazı çevre sorunlarına neden olabilirler (Hakkou ve ark., 2016). Ayrıca bu atıklar, inşaat alanında kullanılan hammaddelerle benzer özellikler gösterebileceğinden, inşaat mühendisliği endüstrisinde kullanılacak alternatif malzemeler olarak düşünülmelidir (Taha ve ark., 2016). Nüfus artışı ve hızlı kentsel gelişme ile birlikte, her yıl yaklaşık 25 milyar ton olduğu tahmin edilen beton tüketimini karşılamak için inşaat sektöründe doğal kayaların kullanımı halen artmaktadır (Loutou ve ark., 2019). Ayrıca, kaba agregalar, agregalara olan talebin yüksek olmasına neden olan önemli miktarda beton hacmi sunmaktadır (Zareei ve ark., 2019).

Beton karışımındaki kaba doğal agregaların yerine elek üstü fosfat atıklarının kullanılmasına odaklanan bir çalışma, bu atığın 240 kg/cm^2 (yaklaşık $23,5 \text{ MPa}$) beton üretmek için kullanılabilceğini doğrulamıştır (Ahmed ve Abouzeid, 2011).

Fosfat madeni atığı olarak agrega yerine kullanılan çakmaktaşı referans betona kıyasla daha düşük çökme-yayıma değeri göstermiştir. Bunun nedeni, Fosfat madenin atığı agregalarının daha köşeli şekline bağlanmıştır. Basınç dayanımı açısından düşük performan sergileyen bu atık, eğilme dayanımı açısından yüksek ve yarmada çekme dayanımı açısından ise kontrol betona kıyasla benzer davranışlar sergilemiştir (Butler ve ark., 2020; Machi ve ark., 2021).

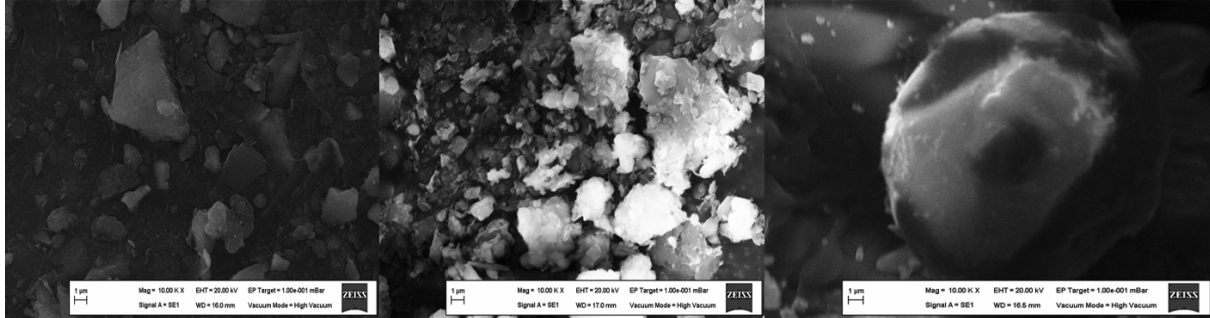
3. KROM, BOR VE MANYEZİT ATIğI ÜZERİNE ÖN BİR ALIşMA

Literatür alışmaları sonrası bor üretimi sonucu ortaya çıkan tinkal atığının kendiliğinden yerleşen betonda kullanılması üzerine denemeler gerçekleştirilmiştir. Kendiliğinden yerleşen betonda, 0.40 su/bağlayıcı ile üretilen karışımlarda, imento dozajı 400 kg/m^3 , uçucu kül 100 kg/m^3 , hiper akışkanlaştırıcı bağlayıcının $\%1.7$ 'si oranında kullanılmıştır. Karışım hesapları ve atıklar üzerine ayrıntılı bilgiler Can ve ark., (2022) tarafından rapor edilmiştir. Kendiliğinden yerleşen beton karışımları $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}$ boyutlarında küp kalıplara yerleştirilmiş ve 28 günlük su kürüne tabii tutulmuştur. Tinkal atığı $\%1$ ve $\%2$ oranında imento yerine ikame edildiğinde kendiliğinden yerleşen taze betonun özelliklerini karşılayamamıştır. Tinkal atığı $\%2$ oranında imento yerine ikame edildiğinde, 28 günlük su kürü sonrası beton numunelerde dağılma ve parçalanmalar gözlemlenmiştir. Kontrol betonun 28 günlük basınç dayanımı 66 MPa olarak ölçülmüştür. Krom atığı ise $\%2$ oranında imento yerine ikame edildiğinde 28 günlük su kürü sonrası basınç dayanımı 74 MPa olarak ölçülmüştür. Manyezit atığı $\%88$ oranında MgO içermektedir ve bu atığın $\%2$ oranında imento ile ikame edilmesi sonucunda 28 günlük basınç dayanımı 73 MPa olarak ölçülmüştür.

Tinkal atığı betonun priz alma süresini geciktirmektedir. Krom atığı kalıplara yerleştirildikten 24 saat sonra sertleşirken, tinkal atığında bu süre 3 gün olarak gözlemlenmiştir. Tinkal atığında B_2O_3 miktarı $\% 10.95$, MgO miktarı $\%10.95$ ve SiO_2 içeriği $\%15.26$ olarak analiz edilmiştir. Tinkal atığında bulunan B_2O_3 ve MgO betonun hidrasyonunu geciktirmektedir. Krom atığında MgO $\% 33$, SiO_2 $\% 35$ olarak rapor edilmiştir. Atıklarda bulunan SiO_2 miktarının betonun bağlayıcılık özelliğini arttırdığı görülmüştür. MgO içeriği krom ve manyezit atığında yüksek olduğundan betonda hacim genleşmesine neden olmaktadır. Atıkların değerlendirilmesi söz konusu olduğunda tinkal atığının ikinci bir malzeme ile birlikte kullanılarak iyileştirilebileceği daha önce yapılan çalışma ile desteklenmiştir (Can ve ark., 2022). Krom ve bor atığının beraber kullanılması taze beton özelliklerinde iyileştirme sağlarken, basınç dayanımında artışa yol açmıştır (Can ve ark., 2022).

MgO içeriği yüksek olan atıkların betonda değerlendirilmesinde betonda oluşturabileceği genleşme ve buna bağlı olarak meydana gelecek çatlamalar sonucunda beton dayanımında düşüş olabileceği göz ardı edilmemelidir. Harran Üniversitesi HÜBTAM merkezinde gerçekleştirilen SEM görüntülerine şekilde 1'de yer verilmiştir. Krom ve tinkal atığında 1.00 kX büyütmede birçok irili ufaklı düzensiz parçalar görülmektedir. Bu atıklar betondaki boşlukları doldurduğundan dolayı dayanımda iyileştirme sağladığı düşünölmektedir. SEM görüntüleri incelendiğinde bu atıkların yapı olarak birbirinden çok farklı olduğu görülmektedir. En önemli özellikleri MgO içeriklerinin yüksek olmasıdır. Bu atıkların betonda değerlendirilmesi için öncelikle hacim genleşme testine tabii tutulması ve ona göre optimum oranının saptanması gerekir. Bor eşitleri olan tinkal, kolemanit, borojips gibi malzemeler beton yapımında kullanılmış ve genel olarak

betonun priz alma süresini geciktirdiğinden dolayı düşük miktarlarda kullanılması önerilmektedir. Tinkal atığı taze betonun özelliklerini sağlayamadığından tek başına kullanımı yerine diğer atıklarla kombine edilerek kullanımı önerilmektedir. Ancak, bu durumda bile tinkal atığı içinde bulunan B_2O_3 miktarı çok baskın olarak kendini göstermekte ve betonun sertleşmesini geciktirmektedir.



Şekil 1.SEM görüntüleri; (a) krom, (b) tinkal, (c) manyezit

4. DEĞERLENDİRME

Dünyada yapılan atık yönetim çalışmaları önemli ölçüde atık miktarlarını azaltacaktır. Öncelikle tehlikeli ve tehlikesiz atıklar ayrılarak geri dönüşüm planı oluşturulmalıdır. Cam atıkları, kömür atıkları, inşaat yıkıntı atıkları, atık lastik parçacıkları, seramik atıkları, demir çürufu, çinko çürufu, bakır çürufu gibi endüstriyel atıkların yanında tekstil atıkları, evsel atıklar, tarım atıkları da beton üretiminde değerlendirilmiştir. Bu atıklar puzolanik özelliğinin olup olmaması durumuna göre çimento ya da agrega yerine ikame edilerek kullanılır. Atıkların geri dönüşümü ülkelere kazanç sağlayacaktır. Örneğin; camın geri dönüşümü ile: hava kirliliğinde, maden atıklarında ve enerji tüketiminde azalma gözlemlenirken, alüminyumun geri dönüşümü ile ise; hava kirliliğinde, enerji tüketiminde, baca gazı kirletici emisyonun da azalma sağlanmış ve boksit cevherinden korunmuş olmaktadır. Alüminyum geri kazanıldığında; CO_2 ve SO_2 emisyonu daha az oluşmaktadır.

Atıkların betonda olumlu performans sergileyebilmesi için optimum değerlerin saptanması gerekir. Kullanılan atıkların farklı beton çeşitlerinde, farklı özellikler sergileyebileceği düşünülmektedir. Dünyadaki hammaddelerin azalması hali hazırda önceden kullanılmış agregaların da betonda değerlendirilebileceği sonucuna varılmıştır. Özellikle son yıllarda Karayolu çalışmalarında beton yollara olan ilgi ve silindirle sıkıştırılmış betonda atık kullanımı son derece önem kazanmaktadır. Uygun agrega seçimi, optimum değerlerin saptanması ve hangi malzemenin yerine ikame edilmesi gerektiği sonuçlarının doğru saptanması halinde betonun performans özelliklerini iyileştirici rol oynayacağı düşünülmektedir. Betonda yaygın olarak kullanılan atık miktarları ve atık çeşitleri Şekil 1'de verilmiştir. Son yıllarda en çok kullanılan atıklar arasında; plastik atıkları, cam tozu atıkları ve çelik atıkları ilk sıralarda yer almaktadır. Bu atıkların en önemli nitelikleri; bağlayıcılık özelliklerinin yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Atıkların optimum oranları belirlenerek, atıkların karakterizasyonuna bağlı olarak betonda kullanım yerleri (agrega, çimento v.b) belirlenmelidir. Atıkların betona ilave edilmesi yöntemleri karşılaştırılarak, atıkların performanslarının iyileştirilebilir. Atıkların ikili veya üçlü kombinasyonlarla birleştirilip kullanılması ile betona pozitif nitelik kazandırabilir. Atıkların fiziksel ve kimyasal özellikleri, partikül boyuları, yüzey alanı, betonda çimento veya agrega yerine kullanımı, beton türü gibi özellikler dayanım ve dayanıklılık performansını etkilemektedir.

5. SONUÇ

Geri dönüşüme katkı sağlamak amacı ile betonda maden atıklarının kullanımı incelenmiştir. Atıklar puzolanik özellik gösterip göstermemesine göre beton üretiminde agrega veya çimento yerine ikame edilirler. Bu çalışmayı özetlemek gerekirse;

- Alüminyum ve bor atıkları prizi geciktirdiği için sıcak hava koşullarında beton dökümü için tercih edilebilir.
- Malzeme içerisindeki Na₂O ve CaO oranlarının yüksek olması betonda ek çatlaklara neden olabilmektedir.
- MgO miktarı yüksek olan atıkların hacim genleşme miktarı belirlenmeli ve optimum orana bu şekilde karar verilmelidir. MgO miktarı yükseldikçe betonda genleşmeler ve çatlamlar meydana gelecektir.
- Atıkların betonda kullanılması önerilmesine rağmen, yüksek miktarda atık kullanımı betonun performansını olumsuz etkileyeceğinden, atıkların betonda kullanımı sınırlandırılmalıdır.
- Betonda atık kullanımı çeşitli hususları ortaya çıkarmıştır. Bu hususlar şu şekilde özetlenebilir:
 - o Atıkların stoklama maliyeti azalacaktır.
 - o Çevre kirliliği seviyesi en aza inecektir.
 - o Hazırda bulunan stoklar ülke ekonomisine kazandırılacaktır.
 - o Atıkların atıldıkları alanların yapımı için işletmelerin ödeyeceği meblağlar azalacaktır.

KAYNAKLAR

Ahmed, A. A., & ABOUZEID, A. Z. (2011). An environmental solution for phosphate coarse waste reject-using them as concrete mix aggregates. JES. Journal of Engineering Sciences, 39(1), 207-218.

Andreola, F., Barbieri, L., & Bondioli, F. (2012). Agricultural waste in the synthesis of coral ceramic pigment. Dyes and pigments, 94(2), 207-211.

Argane, R., El Adnani, M., Benzaazoua, M., Bouzahzah, H., Khalil, A., Hakkou, R., & Taha, Y. (2016). Geochemical behavior and environmental risks related to the use of abandoned base-metal tailings as construction material in the upper-Moulouya district, Morocco. Environmental Science and Pollution Research, 23(1), 598-611.

Alzubaidi, R. (2017). Recycling of Aluminum Byproduct waste in concrete production. Jordan Journal of civil engineering, 11(1).

Ahmadi, Z., Esmaili, J., Kasaei, J., & Hajialioghli, R. (2018). Properties of sustainable cement mortars containing high volume of raw diatomite. Sustainable Materials and Technologies, 16, 47-53.

Al-Jabri KS., (2018). Research on the use of Ferro-Chrome slag in civil engineering applications. In MATEC Web of 5 Conferences, 149, 010170.

Amrani, M., Taha, Y., Kchikach, A., Benzaazoua, M., & Hakkou, R. (2019). Valorization of phosphate mine waste rocks as materials for road construction. *Minerals*, 9(4), 237.

Ahmad, J., Aslam, F., Zaid, O., Alyousef, R., & Alabduljabbar, H. (2021). Mechanical and durability characteristics of sustainable concrete modified with partial substitution of waste foundry sand. *Structural Concrete*, 22(5), 2775-2790.

Ahmad, J., Majdi, A., Deifalla, A. F., Isleem, H. F., & Rahmawati, C. (2022). Concrete made with partially substitutions of copper slag (CPS): State of the art review. *Materials*, 15(15), 5196.

Boncukcuoğlu, R., Yılmaz, M. T., Kocakerim, M. M., & Tosunoğlu, V. (2002). Utilization of borogypsum as set retarder in Portland cement production. *Cement and Concrete Research*, 32(3), 471-475.

Butler, L., West, J. S., & Tighe, S. L. (2011, January). Quantification of recycled concrete aggregate (RCA) properties for usage in bridges and pavements: An Ontario case study. In presentation at the Innovative Developments in Sustainable Pavements Session of the 2011 Annual Conf. of the Transport, Assoc. of Canada, Edmonton, Alberta.

Binici, H., Aksogan, O., Sevinc, A. H., & Kucukonder, A. (2014). Mechanical and radioactivity shielding performances of mortars made with colemanite, barite, ground basaltic pumice and ground blast furnace slag. *Construction and Building Materials*, 50, 177-183.

Benayache, S., Alleg, S., Mebrek, A., & Suñol, J. J. (2018). Thermal and microstructural properties of paraffin/diatomite composite. *Vacuum*, 157, 136-144.

Colangelo, F., Forcina, A., Farina, I., & Petrillo, A. (2018). Life cycle assessment (LCA) of different kinds of concrete containing waste for sustainable construction. *Buildings*, 8(5), 70.

Coetzee, J. J., Bansal, N., & Chirwa, E. (2020). Chromium in environment, its toxic effect from chromite-mining and ferrochrome industries, and its possible bioremediation. *Exposure and health*, 12(1), 51-62.

Choudhary, R., Gupta, R., Alomayri, T., Jain, A., & Nagar, R., 2021. Permeation, corrosion, and drying shrinkage assessment of self-compacting high strength concrete comprising waste marble slurry and fly ash, with silica fume. In *Structures* (Vol. 33, pp. 971-985).

Chakrawarthy, V., Avudaiappan, S., Amran, M., Dharmar, B., Raj Jesuarulraj, L., Fediuk, R., & Saavedra Flores, E., 2021. Impact Resistance of Polypropylene Fibre-Reinforced Alkali-Activated Copper Slag Concrete. *Materials*, 14(24), 7735.

Can, S., Sariışık, A., & Uygunoğlu, T., 2022. Effect of adding Na₂SO₄-MgSO₄ solution on compressive strength of self-compacting concrete subjected to extreme conditions. *Innovative Infrastructure Solutions*, 7(4), 1-14.

Chakrawarthy, V., Dharmar, B., Avudaiappan, S., Amran, M., Flores, E. S., Alam, M. A., ... & Rashid, R. S., 2022. Destructive and non-destructive testing of the performance of copper slag fiber-reinforced concrete. *Materials*, 15(13), 4536.

Dabbaghi, F., Rashidi, M., Nehdi, M. L., Sadeghi, H., Karimaei, M., Rasekh, H., & Qaderi, F. (2021). Experimental and informational modeling study on flexural strength of eco-friendly concrete incorporating coal waste. *Sustainability*, 13(13), 7506.

Dabbaghi, F.; Dehestani, M.; Yousefpour, H.; Rasekh, H.; Navaratnam, S. Residual. (2021). Compressive stress–strain relationship of lightweight aggregate concrete after exposure to elevated temperatures. *Constr. Build. Mater*, 298, 123890.

Dabbaghi, F.; Nasrollahpour, S.; Dehestani, M.; Yousefpour, H. (2021). Optimization of Concrete Mixtures Containing Lightweight Expanded Clay Aggregates Based on Mechanical, Economical, Fire-Resistance, and Environmental Considerations. *ASCE J. Mater. Civ. Eng.*

de Carvalho, F. A., Nobre, J. N., Cambraia, R. P., Silva, A. C., Fabris, J. D., dos Reis, A. B., & Prat, B. V. (2021). Quartz Mining Waste for Concrete Production: Environment and Public Health. *Sustainability*, 14(1), 389.

Dhakal, M., Scott, A. N., Dhakal, R. P., & Clucas, D., 2022. Structural and durability properties for magnesia alumina silicate concrete. *Construction and Building Materials*, 340, 127725.

Ergün, A., 2011. Effects of the usage of diatomite and waste marble powder as partial replacement of cement on the mechanical properties of concrete. *Construction and building materials*, 25(2), 806-812.

Elinwa, A. U., & Mbadike, E., 2011. The use of aluminum waste for concrete production. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 10(1), 217-220.

El Mir, A., Nehme, S. G., & Assaad, J. J., 2020. Durability of self-consolidating concrete containing natural waste perlite powders. *Heliyon*, 6(1), e03165.

El Machi, A., Mabroum, S., Taha, Y., Tagnit-Hamou, A., Benzaazoua, M., & Hakkou, R. (2021). Use of flint from phosphate mine waste rocks as an alternative aggregates for concrete. *Construction and Building Materials*, 271, 121886.

Fragoulis, D., Stamatakis, M. G., Papageorgiou, D., & Chaniotakis, E. (2005). The physical and mechanical properties of composite cements manufactured with calcareous and clayey Greek diatomite mixtures. *Cement and Concrete Composites*, 27(2), 205-209.

Gürer, C., Akbulut, H., & Kürklü, G. (2004). Nehdi, M.L.; Yassine, A. Mitigating Portland Cement CO2 Emissions Using Alkali-Activated Materials: System Dynamics Model. *Materials* 2020, 13, 4685.

Gencil, O., Brostow, W., & Ozel, C., 2010. An investigation on the concrete properties containing colemanite. *International Journal of Physical Sciences*, 5(3), 216-225.

García Giménez, R., Vigil de la Villa, R., & Frías, M. (2016). From coal-mining waste to construction material: a study of its mineral phases. *Environmental Earth Sciences*, 75(6), 1-8.

Gürer, C., & Selman, G. Ş., 2016. Investigation of properties of asphalt concrete containing boron waste as mineral filler. *Materials Science*, 22(1), 118-125.

Haibin, L., & Zhenling, L. (2010). Recycling utilization patterns of coal mining waste in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(12), 1331-1340.

Hakkou, R., Benzaazoua, M., & Bussière, B. (2016). Valorization of phosphate waste rocks and sludge from the Moroccan phosphate mines: challenges and perspectives. *Procedia Engineering*, 138, 110-118.

Hesami, S., Modarres, A., Soltaninejad, M., & Madani, H., 2016. Mechanical properties of roller compacted concrete pavement containing coal waste and limestone powder as partial replacements of cement. *Construction and Building Materials*, 111, 625-636.

Hay, R., & Ostertag, C. P. (2019). On utilization and mechanisms of waste aluminium in mitigating alkali-silica reaction (ASR) in concrete. *Journal of Cleaner Production*, 212, 864-879.

Iloh, P., Fanourakis, G., & Ogra, A. (2019). Evaluation of physical and chemical properties of South African waste foundry sand (WFS) for concrete use. *Sustainability*, 11(1), 193.

Jawadand, S., & Randive, K. (2021). A Sustainable approach to transforming mining waste into value-added products. In *Innovations in Sustainable Mining* (pp. 1-20). Springer, Cham.

Kwon, Y. H., Kang, S. H., Hong, S. G., & Moon, J. (2017). Acceleration of intended pozzolanic reaction under initial thermal treatment for developing cementless fly ash based mortar. *Materials*, 10(3), 225.

Kilinçarslan, Ş., & Kaya, Z. R. (2018). Usage of chromite wastes as aggregate in foam concrete production. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(18), 1-5.

Kara, C., 2018. Endüstriyel Atıkların Beton Dayanımı Etkisi Üzerine Bir Çalışma Çay Fabrikası Kömür Külü Örneği. *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, 7(2), 75-85.

Kang, S. H., Hong, S. G., & Moon, J. (2019). The use of rice husk ash as reactive filler in ultra-high performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 115, 389-400.

Karadagli, E., & Cicek, B. (2020). Boron mining and enrichment waste: A promising raw material for porcelain tile production. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 17(2), 563-572.

Karimaei, M., Dabbaghi, F., Sadeghi-Nik, A., & Dehestani, M. (2020). Mechanical performance of green concrete produced with untreated coal waste aggregates. *Construction and Building Materials*, 233, 117264.

Karimipour, A., & Edalati, M. (2020). Influence of untreated coal and recycled aggregates on the mechanical properties of green concrete. *Journal of Cleaner Production*, 276, 124291.

Khataei, B., & Nasrollahi, M., 2020. Optimizing the tensile strength of concrete containing coal waste considering the cost. *Sn Applied Sciences*, 2(1), 1-13.

Karimaei, M., Dabbaghi, F., Dehestani, M., & Rashidi, M. (2021). Estimating compressive strength of concrete containing untreated coal waste aggregates using ultrasonic pulse velocity. *Materials*, 14(3), 647.

Liu, Y., Leong, B. S., Hu, Z. T., & Yang, E. H. (2017). Autoclaved aerated concrete incorporating waste aluminum dust as foaming agent. *Construction and Building Materials*, 148, 140-147.

Lèbre, É., Corder, G. D., & Golev, A. (2017). Sustainable practices in the management of mining waste: A focus on the mineral resource. *Minerals Engineering*, 107, 34-42.

Li, J., Zhang, W., Li, C., & Monteiro, P. J. (2019). Green concrete containing diatomaceous earth and limestone: Workability, mechanical properties, and life-cycle assessment. *Journal of cleaner production*, 223, 662-679.

Liu, J., Guo, R., Shi, P., & Huang, L. (2019). Hydration mechanisms of composite binders containing copper slag at different temperatures. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 137(6), 1919-1928.

Loutou, M., Misrar, W., Koudad, M., Mansori, M., Grase, L., Favotto, C., ... & Hakkou, R. (2019). Phosphate mine tailing recycling in membrane filter manufacturing: Microstructure and filtration suitability. *Minerals*, 9(5), 318.

Loutou, M., Taha, Y., Benzaazoua, M., Daafi, Y., & Hakkou, R. (2019). Valorization of clay by-product from moroccan phosphate mines for the production of fired bricks. *Journal of Cleaner Production*, 229, 169-179.

Murari, K., Siddique, R., & Jain, K. K. (2015). Use of waste copper slag, a sustainable material. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 17(1), 13-26.

Mailar, G., Sreedhara, B. M., Manu, D. S., Hiremath, P., & Jayakesh, K. (2016). Investigation of concrete produced using recycled aluminium dross for hot weather concreting conditions. *Resource-Efficient Technologies*, 2(2), 68-80.

Modarres, A., Hesami, S., Soltaninejad, M., & Madani, H. (2018). Application of coal waste in sustainable roller compacted concrete pavement-environmental and technical assessment. *International Journal of Pavement Engineering*, 19(8), 748-761.

Meydan E. (2019). Boron compounds with magnetic properties and their application areas in industry. *Journal of Scientific Perspectives*, 3(1), 11-20.

Ministry of Mines Government of India, Strategy on resources efficiency in aluminum sector; 2019. <http://www.eu-rei.com>.

Majhi, R. K., & Nayak, A. N. (2019). Bond, durability and microstructural characteristics of ground granulated blast furnace slag based recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 212, 578-595.

Manjunatha, M., Reshma, T. V., Balaji, K. V. G. D., Bharath, A., & Tangadagi, R. B., 2021. The sustainable use of waste copper slag in concrete: An experimental research. *Materials Today: Proceedings*, 47, 3645-3653.

Parbhakar-Fox, A., & Lottermoser, B. (2011). Predictive environmental indicators in mining.

Panda, S., Sarkar, P., & Davis, R., 2021. Abrasion resistance and slake durability of copper slag aggregate concrete. *Journal of Building Engineering*, 35, 101987.

Ruan, S., & Unluer, C., 2017. Influence of supplementary cementitious materials on the performance and environmental impacts of reactive magnesia cement concrete. *Journal of Cleaner Production*, 159, 62-73.

Ruan, S., Wang, T., Guo, R., & Unluer, C., 2021. Assessment of the properties and environmental impact of carbonated reactive magnesia containing industrial waste. *Thermochimica Acta*, 706, 179051.

Sunil, B. M., Manjunatha, L. S., Ravi, L., & Yaragal, S. C. (2015). Potential use of mine tailings and fly ash in concrete. *Advances in concrete construction*, 3(1), 055.

Sun, M., Zou, C., & Xin, D. (2020). Pore structure evolution mechanism of cement mortar containing diatomite subjected to freeze-thaw cycles by multifractal analysis. *Cement and Concrete Composites*, 114, 103731.

Sridharan, M., & Madhavi, T. C., 2021. Investigating the influence of copper slag on the mechanical behaviour of concrete. *Materials Today: Proceedings*, 46, 3225-3232.

Tiruta-Barna, L., Benetto, E., & Perrodin, Y. (2007). Environmental impact and risk assessment of mineral wastes reuse strategies: Review and critical analysis of approaches and applications. *Resources, Conservation and Recycling*, 50(4), 351-379.

Topçu, İ. B., & Boğa, A. R. (2010). Effect of boron waste on the properties of mortar and concrete. *Waste management & research*, 28(7), 626-633.

Türkiye Hazır Beton Sektörü İstatistikleri Raporu. 2016.

Taha, Y., Benzaazoua, M., Hakkou, R., & Mansori, M. (2016). Natural clay substitution by calamine processing wastes to manufacture fired bricks. *Journal of Cleaner Production*, 135, 847-858.

Tennich, M., Ouezdou, M. B., & Kallel, A., 2017. Behavior of self-compacting concrete made with marble and tile wastes exposed to external sulfate attack. *Construction and Building Materials*, 135, 335-342.

Tolstoy, A., Lesovik, V., Fediuk, R., Amran, M., Gunasekaran, M., Vatin, N., & Vasilev, Y. (2020). Production of greener high-strength concrete using russian quartz sandstone mine waste aggregates. *Materials*, 13(23), 5575.

Tian, L., Jiao, M., Fu, H., Wang, P., Zhao, H., & Zuo, W., 2022. Effect of magnesia expansion agent with different activity on mechanical property, autogenous shrinkage and durability of concrete. *Construction and Building Materials*, 335, 127506.

Ulubeyli, G. C., Bilir, T., & Artir, R., 2016. Durability properties of concrete produced by marble waste as aggregate or mineral additives. *Procedia engineering*, 161, 543-548.

Venkataramana, N., & Babu, U. R., 2018. Bearing strength of steel fibre reinforced black marble stone waste aggregate concrete. *Materials Today: Proceedings*, 5(1), 1201-1210.

Wang, J., Liu, D. H., Wang, Y. Y., Hou, B. H., Zhang, J. P., Wang, R. S., & Wu, X. L. (2016). Dual-carbon enhanced silicon-based composite as superior anode material for lithium ion batteries. *Journal of Power Sources*, 307, 738-745.

Yellishetty, M., Karpe, V., Reddy, E. H., Subhash, K. N., & Ranjith, P. G. (2008). Reuse of iron ore mineral wastes in civil engineering constructions: A case study. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(11), 1283-1289.

Zareei, S. A., Ameri, F., Bahrami, N., Shoaee, P., Musaei, H. R., & Nurian, F. (2019). Green high strength concrete containing recycled waste ceramic aggregates and waste carpet fibers: Mechanical, durability, and microstructural properties. *Journal of Building Engineering*, 26, 100914.

Zhang, C., Wang, J., & Song, S. (2019). Preparation of a novel type of flame retardant diatomite and its application in silicone rubber composites. *Advanced Powder Technology*, 30(8), 1567-1575.

Zhang, S., Cao, K., Wang, C., Wang, X., Wang, J., & Sun, B., 2020. Effect of silica fume and waste marble powder on the mechanical and durability properties of cellular concrete. *Construction and Building Materials*, 241, 117980.