



Makale / Research Paper

Afyonkarahisar Bölgesi Mermer Parça Atıklarının Beton Agregası Olarak Değerlendirilebilirliğinin Araştırılması

Zeyni ARSOY^{1*}, Hakan ÇİFTÇİ¹, Bahri ERSOY¹, Tayfun UYGUNOĞLU², Bekir ARSLAN¹

¹Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 03200 Afyonkarahisar/TÜRKİYE

²Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 03200 Afyonkarahisar/TÜRKİYE
zeyniarsoy@gmail.com

Received/Geliş: 16.04.2019

Accepted/Kabul: 17.06.2019

Öz: Bu çalışmada, Afyonkarahisar organize sanayi bölgesinden temin edilen parça mermer atıklarının “TS 706 EN 12620 + A1 “Beton Agregaları” standardına uygunluğu araştırılmıştır. Atık sahasından alınan parça numuneler standartlarda belirtilen boyutlara getirilerek fiziksel, kimyasal ve yaşlandırma testlere tabi tutuldular. Yapılan testler sonucunda mermer parça atıklarından elde edilen agregaların “TS 706 EN 12620 + A1 “Beton Agregaları” standartlarında aranan alt ve üst sınırlar içinde olduğu ve atıklardan elde edilen agregaların hazır betonda beton agregası olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Mermer atıkları, geri dönüşüm, agrega, beton.

Investigation of Evaluability of Marble Wastes as a Concrete Aggregate in Afyonkarahisar Zone

Abstract: In this study, it was investigated the compliance of “TS 706 EN 12620 + A1 Concrete Aggregates obtained from Afyonkarahisar Organized Industrial Zone. The samples taken from the waste site were brought to the dimensions stated in the standards and subjected to physical, chemical and aging tests. As a result of the tests performed, it is concluded that the aggregates obtained from the marble pieces waste are in the upper and lower limits required by the TS 706 EN 12620 + A1 “Concrete Aggregates standards” and the aggregates obtained from the wastes can be used as concrete aggregates in the ready-mixed concrete.

Keywords: Marble wastes, recycling, aggregate, concrete.

1. Giriş

Doğaltaşlar tarih boyunca insanoğlu tarafından, tapınaklarda, saraylarda, anıtlar vb. birçok görkemli yapılarda dayanıklılığı ve görsel güzelliği nedeniyle kullanılmıştır [1,2]. Özellikle prestij projelerinde, otellerde iş merkezlerinde ve meskenlerin kaplamalarında doğaltaşların kullanılması her geçen gün artmaktadır. Bu artan doğaltaş talebini karşılayabilmek için doğaltaş üretimi de aynı trendle artış göstermektedir. Ancak üretilen doğaltaşların önemli bir kısmı (% 40 - 60) atık olarak ortaya çıkmaktadır [3]. Türkiye'nin en önemli mermer endüstri merkezlerinden biri olan Afyonkarahisar'da yaklaşık 500 mermer işleme tesisi ve 60 - 70 faal mermer ocağı bulunmaktadır. Afyonkarahisar bölgesindeki tüm bu üretim faaliyetlerinin bir sonucu olarak, doğaltaş ocaklarından yılda yaklaşık 8 milyon 640 bin ton pasa ve fabrikalarından ise yılda yaklaşık 1 milyon ton parça paledyen atık ve 3 milyon ton çamur atık ortaya çıkmaktadır. Bir yılda ortaya çıkan toplam doğaltaş

Bu makaleye atıf yapmak için

Arsoy Z., Çiftçi H., Ersoy B., Uygunoğlu T. ve Arslan B., “Afyonkarahisar Bölgesi Mermer Parça Atıklarının Beton Agregası Olarak Değerlendirilebilirliğinin Araştırılması” El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi 2019, 6(3); 503-516.

How to cite this article

Arsoy Z., Çiftçi H., Ersoy B., Uygunoğlu T. ve Arslan B., “Investigation of Evaluability of Marble Wastes as a Concrete Aggregate in Afyonkarahisar Zone” El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2019, 6(3); 503-516.

atık miktarı ise yaklaşık 12 milyon 640 bin ton civarındadır [4]. Çevre bilincinin ön plana çıktığı günümüzde, bu mermer atıklarının çevreye geliş güzel atılması ve bu atık sahalarının gün geçtikçe büyümesi kamuoyunu olumsuz yönde etkilemektedir. Gerek ocak işletmeciliğinde gerekse tesislerde mermer üretimi devam ettiği sürece bu atıkların giderek çoğalması kaçınılmaz bir gerçektir. Ortaya çıkan iri (parça, paledyen) (Şekil 1) ve toz halindeki bu doğaltaş atıklarının değerlendirilmesi ile ilgili olarak bulunabilecek alternatifler ülke ekonomisine katkı sağlayacağı yanı sıra çevresel açıdan da bir sorunun ortadan kaldırmış olacaktır [4,5].

Bunun yanında hızla büyüyen inşaat sektörünün agrega talebi her geçen gün artmaktadır. Ülkemizde 2007 yılında kişi başına yaklaşık 4 ton/yıl agrega düşerken Avrupa da bu rakam yaklaşık 7 ton/yıl olarak hesaplanmıştır [6]. Yaşam kalitesinin artmasına bağlı olarak alt yapı ve barınma ihtiyaçlarında artacaktır. Artan alt yapı ve barınma alanları betonarme yapılarla karşılanmaktadır. Betonarme yapılarda kullanılan betonların yaklaşık % 60 - 75'ini agregalar oluşturmaktadır. Bu yapıların artması doğal olarak agrega ihtiyacını da artıracaktır. Bu ihtiyacın giderilmesi için alternatif kaynak olarak mermer parça atıklarının kullanılması inşaat sektörünün ihtiyaçlarına cevap verirken doğaltaş sektörü için önemli bir problem olan atıkları ortadan kaldırmış olacaktır.

Litaretürde mermer atıklarının değerlendirilmesi ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır yapılan çalışmalar incelendiğinde çalışmaların çoğunluğunun mermer toz atıklarının değerlendirilmesi ile ilgili olduğu [7-19] mermer parça atıkları ile ilgili çok fazla çalışma olmadığı parça atıklarla ilgili çalışmaların ise standardında belirtilen beton agregalarına uygulanacak (TS 706 EN 12620 + A1 "Beton Agregaları") testlerin çoğunun uygulanmadığı anlaşılmıştır [1,20-26].

Bu çalışmada, Afyonkarahisar- Organize sanayi bölgesi parça mermer atıklarının karakterizasyonu (XRF, özgül kütle ve petrografik yapısı) yapıldıktan sonra agregaların fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonrasında elde edilen değerler, TS 706 EN 12620 + A1 "Beton Agregaları" [1] standardına göre değerlendirilerek mermer parça atıklarının beton agregası olarak değerlendirilmesinin uygunluğu araştırılmıştır.

2. Deneysel Çalışmalar

2.1. Kullanılan agregalar

Bu çalışmada kullanılan mermer parça atıkları Afyonkarahisar organize sanayi bölgesinde faaliyet gösteren Say Yapı Taahhüt Haf. Nak. Ltd. Şti. firmasına ait stok sahasından farklı bölgelerden alınmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Atık mermer stoğu.

Alınan örnekler homojen bir şekilde karıştırılarak çeneli kırıcı kullanılarak uygulanacak deneyler için standartlarda belirtilen agrega boyutlarına getirilmiştir.

2.2. Yapılan deneyler

Standarda uygun olarak parça atık sahasından alınan numuneler çeneli kırıcı ile boyut küçültme ve numune azaltma işlemine tabi tutulduktan sonra yapılacak deneyler için standartlarda belirtilen eleklerden geçirilerek deneyler için hazır hale getirilmiştir. Tablo 1’de agregalara uygulanan test/analiz listesi ve standartları verilmiştir.

Tablo 1. Mermer atıklarına uygulanan test/analiz listesi ve standartları.

Test/Analiz	Uygulanan Standart	Deneylerde Kullanılan Agregaya Boyutu (mm)
Ön Hazırlık		
Numune alma	TS 707 [27]	-
Numune azaltma	TS EN 932-2 [28]	-
Karakterizasyon Analizleri		
Basitleştirilmiş Petrografik Tanımlama İçin İşlem ve Terminoloji	TS EN 932-3 ve Ek A1 [29]	50
Kimyasal Analiz (XRF)	TS EN 15309 [30]	0,100
Özgül kütle tayini (Gaz piknometresi ile)	ASTM 5550-06 [31]	0,125
Agrega Deneyleri		
Tane Şekli Tayini - Yassılık Endeksi	TS EN 933-3 [32]	4/25
Tane Şekli Tayini - Şekil Endeksi	TS EN 933-4 [33]	4/25
Metilen Mavisi	TS EN 933-9 + A1 [34]	0-2
Kum eşdeğer deneyi	TS EN 933-8: 2012 + A1 [35]	0-2
Parçalanmaya Karşı Direncin Tayini (Los Angeles Metodu)	TS EN 1097-2 [36]	10/14
Çivili Lastiklerden Kaynaklanan Aşınmaya Karşı Direnç (Nordik Deneyi)	TS EN 1097-9 [37]	14/16
Aşınma Direncinin Tayini (Mikro-Deval)	TS EN 1097-1 [38]	10/14

3. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

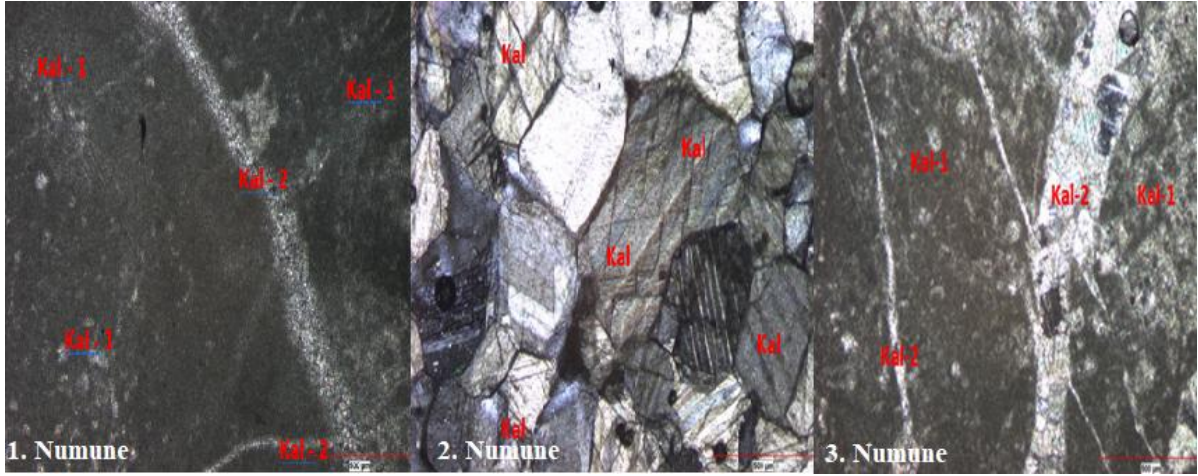
3.1. Karakterizasyon Çalışmaları

3.1.1. Mineralojik/Petrografik İncelemeler

Petrografik tanımlama için yığılda bulunan numuneler gözle muayene edilerek içinden farklı yapılara renk ve yapıya sahip numunelerden ince kesit hazırlanmış ve polarizan mikroskop altında mineral tanımlamaları yapılmıştır (Şekil 2) [29]. Yapılan incelemelerde, atıkların CaCO₃ içerikli sedimanter ve metamorfik kökenli kayalardan oluştuğu belirlenmiştir. Kesitlerden elde edilen veriler Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Mermer atıklarının petrografik özellikleri.

		1. Numune	2. Numune	3. Numune
Köken		Sedimanter	Metamorfik	Sedimanter
1. Mineral		Kalsit	Kalsit	Kalsit
2. Mineral		Kalsit	-	Kalsit
Kristal boyutu (µm)	Minimum	1,9	145,4	1,9
	Maksimum	9,6	859,5	39,7
	Ortalama	3,5	303,4	9,6
Kristal boyutu (µm)	Minimum	2,8	-	4,3
	Maksimum	693,7	-	65,6
	Ortalama	248,5	-	22,8
Çatlak (µm)	Minimum	7,4	-	14,0
	Maksimum	2497,9	-	673,6
	Ortalama	247,7	-	238,0



Şekil 2. Mermer atıklarının ince kesit görünüşleri (Çift nikol) (Kal: Birincil kalsit mineralleri, Kal-2: İkincil kalsit mineralleri).

3.1.2. Kimyasal Analiz

Mermer atıklarının içeriğini belirlemek için kimyasal analiz yapılmıştır (Tablo 3). Yapılan analiz sonucunda mermer atıklarının %54,200 CaO içeriğine sahip olduğu ve kızdırma kaybı değerinin ise %44,16 olduğu saptanmıştır. XRF analizi [30] incelendiğinde atığın CaCO₃ kökenli kayalardan olduğu anlaşılmaktadır. Elde edilen bu sonuç mineralojik ve petrografik analizi desteklemektedir.

Tablo 3. Mermer atığının Kimyasal Analiz Sonucu, Ana Element Oksit Dağılımı.

İçerik	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	SrO	K.K*
Miktar (%)	0,014	1,040	0,147	0,360	0,044	0,010	54,200	0,024	44,160

*K.K.: Kızdırma kaybı.

3.2. Agrega Deneyleri

3.2.1. Tane Şekli Tayini - Yassılık Endeksi

Kırmataştan elde edilen ve betonlarda kullanılan iri agregalar şekilsel olarak üç gruba ayırmak mümkündür. Bunlar, köşeli agregalar, yassı agregalar ve uzun agregalardır. Köşeli agregalar yüzeyleri pürüzlüdür ve şekilsel olarak düzgün ve küresele yakındır. Yassı agregalar, bir boyutu diğer iki boyutuna göre çok daha kısa olan (paraya benzer) bir şekle sahiptirler. Uzun agregalar ise iki boyutu dar fakat yüksekliği fazla (kaleme benzer) olan agregalar olarak tanımlanırlar. Yassı ve uzun agregalar kusurlu taneler olarak ifade edilirler. Bu taneler çimento ile kolaylıkla bağ oluşturabilirler ancak tanelerin kontakları daha kolay aşınmaktadır. Beton karışımına konulan yassı taneler, karışım içerisinde köprü oluşturarak beton içinde bölgesel boşluklar oluşturabilirler oluşan bu boşluklar betonda zayıf zonların oluşmasına sebep olurlar. Ayrıca yassı tanelerin fazlalığı çimento ihtiyacını da artırmaktadır. Bu nedenlerden dolayı iri agregalarda, yassılık endeksinin %50'den daha az olması istenmektedir [1,39]. Bulunan yassılık endeksi katsayısı (FI) değerinin küçük olması yığın içinde olan yassı tanelerin azlığını, büyük olması ise yığın içindeki yassı tanelerin çokluğunu ifade etmektedir. Bu bağlamda artık deposundan alınan parça mermer numuneleri çeneli kırıcıda boyut küçültme işlemi sonrasında, 4 – 25 mm boyutundaki numunelerin yassılık endeksleri TS EN 933-3 standardına uygun şekilde eşitlik 1 kullanılarak belirlenmiştir [32]. Elde edilen değerler Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4. Agregaların yassılık indeks değeri.

Tane büyüklüğü aralığı (d _i /D _i), mm	d _i /D _i , g	Çubuklu elekte aralık genişliği, mm	Numune miktarı, g	Yassılık Endeksi (FI _i), %
20/25	58,00	12,50	49,50	85,34
16/20	99,00	10,00	93,00	93,94
12,5/16	965,00	8,00	234,00	24,25
10/12,5	767,00	6,30	100,00	13,04
8/11	1598,00	5,00	189,00	11,83
6,3/8	1225,50	4,00	234,50	19,14
5/6,3	925,00	3,15	394,00	42,59
4/5	607,50	2,50	264,00	43,46
Toplam miktar, g	6245,00		1558,00	
Ortalama Yassılık Endeksi (FI), %			24,95 ≈ 25	

$$FI_i = \left(\frac{m_i}{R_i} \right) \times 100 \quad (1)$$

burada;

FI_i : Yassılık Endeksi, %

m_i : Çubuklu elekten geçen malzeme miktarı, g

R_i : Toplam malzeme miktarı, g

Tablo 5. Yassılık indeks değerlerine göre kategoriler [1].

Yassılık Endeksi	Kategori, FI
≤ 15	FI ₁₅
≤ 20	FI ₂₀
≤ 35	FI₃₅
≤ 50	FI ₅₀
> 50	FI _{Beyan}
Serbest	FI_{NR}

Organize sanayi bölgesinden alınan parça artıklar üzerinde yapılan yassılık endeksi deneyleri sonucunda ortalama FI 24,95 ≈ 25 olarak bulunmuştur ve bu değer FI 35 kategorisindedir (Tablo 5). Bulunan yassılık endeks değeri %50'den küçük olduğu için beton agregası olarak değerlendirilebilir olduğunu göstermektedir.

3.2.2. Tane Şekli Tayini - Şekil Endeksi

Şekil endeksi deneyi genellikle kırmataşlarda elde edilen iri agregalara uygulanan bir deney yöntemidir. Bu deney yönteminde iki boyutu dar fakat yüksekliği fazla (kaleme benzer) olan agregaların bütünde dağılımına göre oranlaması ile toplam şekil endeksi değeri (SI) bulunur. Tanelerin uzunluğun kenarın kısa kenara oranı en az 3 olan taneler her fraksiyon için ayrı ayrı bütün içindeki yüzde miktarı bulunur. Ölçümlerde verniyeli kumpas kullanılır (Şekil 3). Bu kumpas, standart kumpastan farklı olarak tanenin en kalın noktasının ölçülebilmesi için kumpasa bir aparat eklenmiştir. Uzun agregalar beton içerisinde kontak noktaları daha kolay aşınmakta ve çimento ihtiyacını artırmaktadır. Ayrıca bu taneler betonun içinde boşluk zonlarına neden oldukları için betonun dayanımını düşürdüğü bilinmektedir. Bu nedenlerden dolayı SI değerinin %50'den daha az olması istenmektedir [1]. Şekil indeksinin küçük olması yığın içinde bulunan tanelerin uzun tanelerin azlığını ifade etmektedir. 4 – 25 mm boyutundaki numunelerin şekil indeksleri TS EN 933-4 standartına uygun şekilde yapılarak elde edilen değerler Tablo 6'da verilmiştir [33].



Şekil 3. Verniyeli kumpas.

Tablo 6. Agregaların şekil indeksi değerleri.

Tane büyüklüğü aralığı (di/Di), mm	M ₁ , g	M ₂ , g	V, %	Şekil indeksi % SI = (M ₂ /M ₁) x 100
20/22,4	9,00	0,00	0,74	0,00
16/20	25,50	0,00	2,09	0,00
11,2/16	237,50	95,60	19,47	40,25
10/11,2	81,50	35,40	6,68	43,44
8/11	284,00	86,20	23,28	30,35
5,6/8	338,00	55,90	27,70	16,54
4/5,6	244,50	45,10	20,04	18,45
Toplam	1220,00	318,20	100,00	
Toplam Şekil Endeksi (SI)				26,08 ≈ 26

$$SI = \left(\frac{M_2}{M_1} \right) \times 100 \quad (2)$$

burada;

SI : Şekil Endeksi, %

M₁ : Deney numunesi kısmının kütlesi, g

M₂ : Kübik olmayan tanelerin kütlesi, g

Tablo 7. Şekil indeksi değerlerine göre kategoriler [1].

Şekil indeksi	Kategori, SI
<15	SI ₅
<20	SI ₂₀
<40	SI ₄₀
<55	SI ₅₀
>55	^Beyan
Serbest	SI _{NR}

Organize sanayi bölgesinden alınan parça artıklar üzerinde yapılan yassılık indeksi deneyleri sonucunda ortalama SI 26,08 ≈ 26 olarak bulunmuştur ve bu değer SI 40 kategorisindedir (Tablo 7). Bulunan toplam SI değeri %50'den küçük olduğu için beton agregası olarak değerlendirilebilir kanaatine verilmiştir.

3.2.3. Metilen Mavisi (MB) Değerinin Belirlenmesi

Beton üretiminde kullanılacak ince agregaların içinde kil tanelerinin bulunması betonun basınç dayanımını olumsuz yönde (betonda kuruma ile çatlama, kıvam kaybı, dayanım kaybı ve gereken su miktarının fazlalaşması) etkilediği bilinmektedir [40]. İnce agregaların içerisinde bulunan kil miktarı metilen mavisi boyası kullanılarak belirlenmektedir. *Metilen mavisi boyası*, suda yüksek çözünürlüğe sahip ve kil minerallerinin negatif yüklü yüzeylerine adsorblanan geniş polarlı organik bir moleküldür [41]. Metilen mavisi solüsyonu 1000 ml deiyonize suyun içerisine 10 g (%98,5 <saflığa sahip) metilen mavisi tozu eklenerek hazırlanmaktadır [1].

Metilen mavisi deneyi, ince veya gruplanmış (0-2mm boyutunda) agregalara uygulanmaktadır. Bu deneyde beher kilogramı başına tüketilen boyanın gram cinsinden ifadesi olan metilen mavisi değeri (MB) [1], Eşitlik 3 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$MB = \frac{V_1}{M_1} \times 100 \quad (3)$$

bu eşitlikte MB : Metilen mavisi değeri (%)
 V_1 : İlave edilen boya çözeltisinin toplam hacmi (ml)
 M_1 : Numune miktarı (g)

Metilen mavisi deneyi, 0-2 mm boyutundaki agreganın 110 °C lik etüvde sabit kütleye gelinceye kadar kurutulur. Daha sonra sabit kütleye gelen agrega numunesinden homojen bir şekilde 200 g numune alınır. Alınan numune behere eklenir ve numune üzerine 500 g deiyonize su eklenir. Daha sonra mekanik karıştırıcı ile en az 5 dakika 600 devir/dakika hızla karıştırılır. Süspansiyon iyice karıştırıldıktan sonra karıştırma hızı 400 devir/dakika'ya indirilir. En az 1 dakika 400 devir /dakika karıştırıldıktan sonra süspansiyona 5 ml metilen mavisi çözeltisi eklenir, çözelti eklendikten sonra süspansiyon en az 1 dakika karıştırılır. Karıştırma işleminden sonra 10mm çapındaki cam baget vasıtasıyla süspansiyondan bir miktar solüsyon alınarak filtre kağıdına damlatılır ve filtre kağıdında hale oluşumuna bakılır hale oluşmamışsa, süspansiyona 5 ml metilen mavisi çözeltisi eklenir ve 400 devir/dakika hızla süspansiyon karıştırılmaya devam edilir, hale oluşuncaya (Şekil 4) kadar ortama 5 ml lik metilen mavisi çözeltisi eklenmeye devam edilir. MB değeri eşitlik 3 kullanılarak hesaplanır.



Şekil 4. Metilen mavisi deneyinde hale oluşumu.

Metilen mavisi (MB) değeri yüzde olarak ifade edilmektedir. Bu değer oldukça düşük olması istenmektedir. Değerin yüksek olması ince agregaların içinde kil miktarının fazla olduğunu ifade etmektedir.

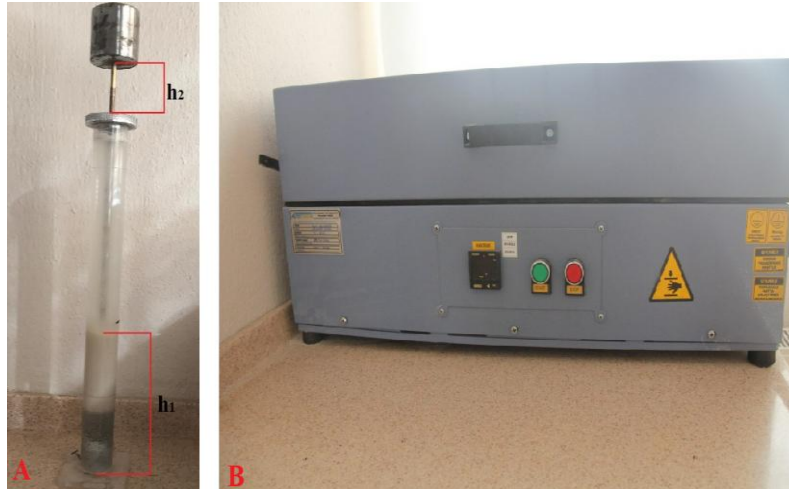
Tablo 8. Agregada numunelerinin MB değerleri.

	1. Numune	2. Numune
M₁, g	200,12	200,01
V₁, mL	20,01	20,00
MB, %	1,00	1,00
Ortalama MB değeri, %	1,00	

Mermer artıklarına TS EN 933-9 + A1 [34] standardına uygun bir şekilde yapılan metilen mavisi deneyinde MB değeri %1,0 bulunmuştur (Tablo 8). Bulunan değer TS 706 EN 12620 + A1 standardında belirtilen (%3) değerden düşük olduğu ve mermer atıklarından elde edilen ince agregaların kil içeriğinin betonun dayanım özelliklerini olumsuz etkileyecek oranlarda olmadığı saptanmıştır.

3.2.4. Kum eşdeğer deneyi

Kum eşdeğerliği deneyi, 0 – 2 mm boyutundaki ince agregalara uygulanır. Bu deneyin amacı ince agregadaki kil, silt oranı belirlemektir. Bu deneyde 0-2 mm aralığındaki kuru deney numunesinin silindir bir tüp içinde tabandan 100 mm yüksekliğe kadar doldurulur doldurma işlemi sırasında taneler arasında hava kabarcığı kalmamasına dikkat edilmelidir, numune doldurulduktan sonra yıkama solüsyonu (CaCl₂.6H₂O veya 111 CaCl₂+ 480 g gliserin + 12,5 g formaldehit + 1000 ml tamamlayacak kadar damıtık su) ile silindir tüpe ilave edilir ancak solüsyon belirli bir seviyesine kadar doldurulur. Yıkama solüsyonu eklendikten sonra silindir tüpün ağzı tıpa vasıtasıyla kapatıldıktan sonra dakikada 180 devir yapan cihaza yerleştirilerek 30 saniye (90 devir) çalkalanmaya bırakılır (Şekil 5B). Çalkalama işlemi bittikten sonra silindir alınarak düz bir yüzeye yerleştirilir daha sonra tabandan 380 mm yüksekliğine kadar yıkama solüsyonu ile doldurulur. Solüsyon ilavesi sırasında silindirin kenarlarına yapışan ince tanelerin solüsyon yardımıyla aşağı indirilir. Bu işlem sonrasında silindirler dışardan müdahale ve titreşim olmaksızın 20 dakika süreyle çökelmeye bırakılır. Çökme süresi dolduktan sonra standartta belirtildiği gibi, ölçümler alınarak (Şekil 5A) numunenin kum eş değeri hesaplanır [35].



Şekil 5. Kum eşdeğer deneyinde kullanılan çalkalayıcı (B) ve deney sonrası yapılan ölçümler (A).

$$SE = 100x \left(\frac{h_2}{h_1} \right) \quad (4)$$

burada;

SE : Kum eş değeri

h₂ : kumun yüksekliği

h₁ : kum + askıda kalan ince malzeme yüksekliği

Yükseklik ölçümlerinde kum yüksekliğinin (h_1) / kum + askıda kalan ince malzeme yüksekliğine (h_2) oranı bize kum eşdeğerliği sonucunu vermektedir. Kum eşdeğerliği deney sonucu sayısal bir değer olarak aşağıdaki denklemle hesaplanır (Eşit 4).

Tablo 9. Agrega numunelerinin SE değerleri.

	1. Numune	2. Numune
h_1 , mm	98,40	100,10
h_2 , mm	68,90	69,10
Kum Eş değeri (SE)	70	69
Ortalama Kum Eş değeri (SE)	70	

Mermer artıklarına TS EN 933-8 + A1 [35] standardına uygun bir şekilde yapılan Kum eş değer deneyinde SE değeri %70 bulunmuştur (Tablo 9). SE değeri arttıkça malzeme içindeki kil ve silt miktarı azalmakta, SE değeri azaldıkça kil ve silt miktarı artmaktadır [42].

3.2.5. Parçalanmaya Karşı Direncin Tayini (Los Angeles metodu)

Bu testte agreganın darbeye karşı dayanımını saptamak amacıyla yapılır. Özellikle trafiğin ve basıncın yüksek olduğu yaya kaldırımları, havaalanı pistleri ve karayolu kaplamaları gibi dinamik baskıların yüksek olduğu alanlarda beton agregası olarak kullanılacak betonun aşınması açısından büyük önem taşımaktadır. Bu alanlarda beton yüzeyi aşınma kuvvetlerine maruz kalacağı için, betonun üretildiği agregaların dayanımının yüksek olması istenir. Agregaların darbeye karşı dayanımı ve aşınabilirliğini belirlemek amacıyla TS EN 1097-2'ye göre "Los Angeles Aşınma Deneyi" yapılır [36]. Los Angeles deneyi, 14 mm elekten geçen ve 10 mm eleğin üzerinde kalan numuneler için uygulanan bir deney yöntemidir. Deneylerde kullanılacak agregaların %60 ila %70'inin 12,5 mm'lik veya %30 ila %40'nun 11,2 mm'lik elek altına geçmesi gerekmektedir. Tambur içine agrega ve bilyalar yerleştirildikten sonra cihaz 31-33 d/d sabit dönme hızında 500 devir döndürüldükten sonra, 1,6 mm açıklıklı elekte elenir ve elek üstünde kalan numune üzerinde toz kalmayacak şekilde iyice yıkanıp 110 °C'de kurutulur. Numune sabit tartıma geldikten sonra elek üstünde kalan malzeme miktarı bulunur ve eşitlik 5 kullanılarak agreganın LA kat sayısı hesaplanır (Tablo 10). Bu değer TS 706 EN 12620 + A1 standardına göre değerlendirilerek agrega sınıfı belirlenir [1].

$$LA (\%) = \left(\frac{M_0 - M_1}{M_0} \right) \times 100 \quad (5)$$

burada;

LA: Los Angeles aşınma katsayısı (%),

M0: Deneye tabii tutulan numune miktarı (g),

M1: Deney sonrası +1,6 mm elek üzerinde kalan numune miktarı (g)

Tablo 10. Los Angeles deneyi ile parçalanmaya karşı direncin tayini.

	1. Numune	2. Numune	3. Numune
M0, g	5000	5001	5000
M1, g	3784	3775	3809
LA, %	24,32~24	24,52~25	23,82~24
Ortalama LA, %	24,27~24		

Agregalarda darbeye karşı dayanımı tespiti için yapılan Los Angeles deneyi sonucundaki parçalanma değeri, agreganın sağlamlığı hakkında bilgi vermektedir. Deney sonucunda agregaların %50'den az kısmının 1,6 mm eleğin altına geçmesi istenmektedir.

Tablo 11. Los Angeles deneyi ile parçalanmaya karşı direncin tayini [1].

Los Angeles katsayısı	Kategori, LA
< 15	LA15
< 20	LA20
< 25	LA25
< 30	LA30
< 35	LA35
< 40	LA40
< 50	LA50
>50	^Bevan
Serbest	LAnr

Aksi taktirde agreganın dayanımının düşük olduğu ve beton kullanımı için uygun olmadığı kanaatine varılır. Darbeye karşı parçalanma değeri ne kadar düşüğe agreganın dinamik etkilere karşı dayanımın yüksek olduğu kabul edilir [1]. Mermer parça atıkları üzerinde yapılan Los Angeles Deneyi sonucunda ortalama LA katsayısı 24 olarak bulunmuştur. Bulunan LA değeri agreganın elek altına geçen % miktarı ifade etmektedir.

Mermer atıklarından elde edilen agregaların TS 706 EN 12620 + A1 standartına göre LA25 kategorisinde (Tablo 11) olduğu saptanmıştır. Bu değer sınır değerinin altında olduğu için agregaların beton agregası standartına uygun olduğu söylenebilir [1].

3.2.6. Çivili Lastiklerden Kaynaklanan Aşınmaya Karşı Direnç (Nordik Deneyi)

Nordik aşınma deneyi, iri agregaların bir miktar su ilave edilerek tamburda aşındırıcı (çelik bilyeler) ile sürtünme ve darbe sonucu, 2 mm açıklıklı elekte kalan malzemenin yüzde miktarını belirlemek için kullanılan bir deney yöntemidir [37]. Bu deney yönteminde, tambur içerisinde bulunan agregalar ile aşındırıcı malzeme arasındaki sürtünmenin yanı sıra tamburun kenarlarında bulunan kanatçıkların oluşturduğu darbe sonucunda agregalarda meydana gelen aşınma ve parçalanma miktarı belirlenir. Nordik deneyinde kullanılacak numune miktarı eşitlik 6 kullanılarak hesaplanır.

$$M1 = \frac{1000 \delta_p}{2,65} \quad (6)$$

burada;

- M1 : Deneyde kullanılması gereken agrega kütlesi (g),
- δ_p : Deneyde kullanılan agreganın gerçek yoğunluğu (Mg/m³)

Nordik deneyinde tamburun içine, kütlesi hesaplanan numune, aşındırıcı (12 mm çapında çelik bilya) ve 2,0 litre su ilave edilerek tamburlarda su kaybını engellemek için iyice sızdırmazlık sağlandıktan sonra kapağı kapatılır. Kapağı kapatılan tambur cihaza yerleştirilir. Cihaz 90 d/d sabit hızla 5400 devir döndürülür. Daha sonra tamburlar iyice yıkanır ve agrega 2 mm açıklıklı elekte elenir ve elek üstünde kalan numune üzerinde ince daneler kalmayacak şekilde iyice yıkanıp 110 °C'de kurutulur. Numune sabit tartıma geldikten sonra elek üstünde kalan malzeme miktarı bulunur (Tablo 12) ve eşitlik 7 kullanılarak agreganın A_N kat sayısı hesaplanır. Elde edilen değer TS 706 EN 12620 + A1 standardına (Tablo 13) bakılarak agrega sınıfı belirlenir [1]. Agreganın nordik aşınma değerinin maksimum %30 olması istenmektedir.

$$A_N (\%) = \left(\frac{M_1 - M_2}{M_1} \right) \times 100 \quad (7)$$

bu eşitlikte;

A_N: Nordik Aşınma Değeri (%),

M_1 : Deneye tabii tutulan numune miktarı (g),

M_2 : Deney sonrası +2 mm elek üzerinde kalan numune miktarı (g).

Tablo 12. Mermer parça atıklarının nordik aşınma değerleri.

	Numunenin Yoğunluğu (g/cm ³)	M_1 , g	M_2 , g	A_N (%)	Ortalama A_N (%)
1. Numune		1031,74	900,50	12,72	
2. Numune	2,7338	1030,24	898,95	12,74	12,70
3. Numune		1028,64	898,63	12,64	

Tablo 13. Nordik kategorileri [1].

Nordik aşınma değeri	Kategori, A_N
< 7	A_N 7
< 10	A_N 10
< 14	A_N 14
< 19	A_N 19
< 30	A_N 30
Ara değerler ve 30'dan büyük değerler	A_N Bevan
Serbest	A_m NR

Agregaların *Çivili lastiklerden kaynaklanan aşınmaya karşı direncin* tayinini belirlemek için yapılan nordik deneyinde ortalama nordik aşınma katsayısı (A_N) %12,70 bulunmuştur. Bulunan bu değer TS 706 EN 12620 + A1 beton standardına A_N 14 kategorisindedir [1]. Bulunan değer standart değerlerin aralığında bulunması mermer atıklarının beton agregasına uygun olduğunu göstermektedir.

3.2.7 Aşınma Direncinin Tayini (Mikro-Deval)

Mikro-Deval aşınma deneyi, iri agregaların aşınmaya karşı dayanımını belirlemek için iri agregalar üzerinde uygulanan deney yöntemidir. Bu deney yönteminde, tambur içerisinde bulunan agregalar ile aşındırıcı malzeme arasındaki sürtünmenin neden olduğu agregalardaki tahribat miktarı yüzde olarak belirlenmektedir. Mikro – Deval deneyinde her bir tambura yaklaşık 500 gram numune, aşındırıcı (10 mm çapında çelik bilya) ve 2,5 litre su ilave edilerek tamburlarda su kaybını engellemek için iyice sızdırmazlık sağlandıktan sonra kapağı kapatılır. Kapağı kapatılan tamburlar cihaza yerleştirilir. Cihaz 100 d/d sabit hızla 12000 devir döndürülür. Daha sonra tamburlar iyice yıkanır ve agrega 1,6 mm açıklıklı elekte elenir, elek üstünde kalan numune üzerinde ince daneler kalmayacak şekilde iyice yıkanıp 110 °C'de kurutulur. Numune sabit tartıma geldikten sonra elek üstünde kalan malzeme miktarı bulunur ve eşitlik 8 kullanılarak agreganın M_{DE} kat sayısı hesaplanır (Tablo 14) [38]. Elde edilen değer TS 706 EN 12620 + A1 standardına (Tablo 15) bakılarak agrega sınıfı belirlenir. İlgili standartta, agreganın mikro-deval aşınma değerinin maksimum %35 olması istenmektedir.

$$M_{DE} (\%) = \left(\frac{M_0 - M_1}{M_0} \right) \times 100 \quad (8)$$

eşitlikte;

M_{DE} : Mikro - Deval Katsayısı (%),

- M_0 : Deneye tabii tutulan numune miktarı (g),
 M_1 : Deney sonrası +1,6 mm elek üzerinde kalan numune miktarı (g)

Tablo 14. Mermer parça atıklarının mikro-deval aşınma değerleri.

	1. Numune	2. Numune	3. Numune	4. Numune
M_0 , g	500,12	501,25	500,36	500,50
M_1 , g	453,22	455,10	452,55	451,30
M_{DE} , %	9,38	9,23	9,56	9,84
Ortalama M_{DE}, %	9,50			

Tablo 15. Micro - deval kategorileri [1].

Mikro-Deval katsayısı	Kategori M_{DE}
< 10	$M_{DE}10$
< 15	$M_{DE} 15$
< 20	$M_{DE} 20$
< 25	$M_{DE} 25$
< 35	$M_{DE} 35$
> 35	MnfBeyan
Serbest	$M_{DE} NR$

Agregaların aşınmaya karşı direncini belirlemek için yapılan Mikro deval deneyi sonrasında belirlenen aşınma katsayısı M_{DE} %9,50 olarak bulunmuştur. Mikro-Deval aşınma kat sayısı $M_{DE} 10$ kategorisine uygundur. Bulunan değer mermer atıklarından elde edilen agregaların Mikro - Deval sınır değerleri altında yer almakta ve beton agregası olarak kullanılabilir olduğunu göstermektedir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, Afyonkarahisar Organize Sanayi Bölgesi mermer atık sahasından alınan ve kırılarak agregaya boyutuna getirilen parça mermer atığının ilgili standartlar çerçevesinde beton agregası olarak değerlendirilebilirliğinin analizi yapılmıştır. Elde edilen bulgular sonucunda, mermer atıklarının agregaya haline getirilmesi durumunda, standartlarda istenen özelliklere sahip olduğu ve dolayısıyla beton agregası olarak kullanılabilme imkânı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Dolayısıyla, mermer atıklarının agregaya haline getirilerek beton üretiminde kırmataş olarak değerlendirilmesiyle, ülkemizdeki hammadde kaynaklarının etkin kullanımı ve atıkların geri dönüşümüyle agregalarda sürdürülebilirlik konusunda önemli bir katkı sağlanacaktır. Bu çalışmanın diğer bölgelerdeki mermer atıkları için de yapılarak olumlu sonuçlar alınması durumunda daha fazla atığın geri dönüşümü sağlanabilecek ve ülke ekonomisine önemi katkı sağlayacaktır.

Kaynaklar

- [1] TS 706 EN 12620+A1, “Beton agregaları”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2009.
[2] Karaca, Z., Öztank, N., Gökçe, M.V., Elçi, H. ve Pekin, A., Mimaride Taş Kaplamaların Kullanım Ömrünü Etkileyen Faktörler, 8. Uluslararası Mermer ve Doğaltaş Kongresi “MERSEM 2012”, 721-726, 2012, Afyonkarahisar, Türkiye.
[3] Ceylan, H. ve Mança, S., “Mermer Parça Atıklarının Beton Agregası Olarak Değerlendirilmesi”, Süleyman Demirel Üniversitesi Teknik Bilimler Dergisi, 2013, 3(2), 21- 25.
[4] Ersoy, B., Sayın, Z. E., Arsoy, Z., Sayın Ü., “Yeterince Farkında Olmadığımız Atıl Kaynağımız: Doğaltaş Ocak ve Fabrika Atıkları”, Maden Ocak Teknolojileri, 2015, 27,

92- 100.

- [5] Arsoy, Z., Ersoy., B., Sert, M., Çiftçi, H., Çelik, M.Y., Evcin, A. ve Yentürk, F., Afyonkarahisar Organize Sanayii Bölgesi Mermer Atıklarının Beton Agregası Olarak Dayanım Özelliklerinin Belirlenmesi, International Engineering And Technology Symposium, 03–05 Mayıs 2018, 1020-1025, Batman, Türkiye.
- [6] Öztürk Ö., Çelikkol M., Erkan, M.,” Türkiye Agrega Sektör Raporu”, Hazır Beton Dergisi, Kasım-Aralık2007, 100, 52-56.
- [7] Uğur İ. ve Gündüz, L., ”Mermer Atıklarının Değerlendirilebilirliği”, Türkiye I. Mermer Sempozyumu Kitabı, 1995, 61–67, Ankara.
- [8] Yıldız Ö., Eskikaya Ş. ”Afyon Mermeri Toz Atıklarının Değerlendirilmesi”, Türkiye I. Mermer Sempozyumu Kitabı, 1995, 45–52.
- [9] Özkan C., ”Mermer Tozları-Kırka Boraks Atıklarından Kaliteli Yapı Malzemesi Üretiminin Araştırılması”, Doğal Yapı ve Kaplama Taşı Mermer Teknolojisi Dergisi, 1996, Sayı: (3), 15-18.
- [10] Tosun İ.Y., ”Mermer Toz Atıklarının Temizlenmesi”, Doğal Yapı ve Kaplama Taşı Mermer Teknolojisi Dergisi, 1996, Sayı: 1, 15–18.
- [11] Büyüksağış İ.S., “Mermer İşleme Tesisleri Atık Sularının Arıtım Yöntemleri ve Ekonomikliklerinin İncelenmesi”, Türkiye I. Mermer Sempozyumu Kitabı, 1995, 69–76,
- [12] Gündüz, L., ”Mermer Atık Değerlendirme”, Türkiye Taş Dünyası, Sayı: 1, Eylül-Ekim 1998, sf. 94–97.
- [13] Ceylan H., “Mermer Fabrikalarındaki Mermer Toz Atıklarının Ekonomik Olarak Değerlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, 2000, Isparta.
- [14] Ceylan H., Saraç S., Özkahraman T., “Mermer Toz Atıklarının Derz Dolgu malzemesi (Fuga) Üretiminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması”, Türkiye III. Mermer Sempozyumu (Mersem 2001) Bildiriler Kitabı, 3-5 Mayıs 2001, Afyon.
- [15] Ünal O., Kibici Y., ”Mermer Tozu Atıklarının Beton Üretiminde Kullanılmasının Araştırılması”, Türkiye III. Mermer Sempozyumu (Mersem 2001) Bildiriler Kitabı, 3-5 Mayıs 2001, Afyon.
- [16] Zorluer İ., Usta M., “Zeminlerin Atık Mermer Tozu İle İyileştirilmesi”, Türkiye IV. Mermer Sempozyumu (Mersem-2003) Bildiriler Kitabı, 18-19 Aralık 2003.
- [17] Demir İ., Başpınar M.S., ”Mermer Tozu Atıklarının (Havuz Çözeltisi) Hafif Yapı Blokları Üretiminde Kullanılması”, Türkiye IV. Mermer Sempozyum (Mersem 2003) Bildiriler Kitabı, 18-19 Aralık2003.
- [18] Akbulut H., ve Gürer C., “Atık Mermerlerin Asfalt Kaplamalarda Agrega Olarak Değerlendirilmesi”, İMO Teknik Dergi, 2006, 3943– 3960, Yazı 261, Afyonkarahisar.
- [19] Yıldız H.A., ”Mermer Toz Atıklarının Yol İnşaatında Değerlendirilmesi”, Doktora Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 2008, Isparta.
- [20] Topçu B.İ., Uygunoğlu T., ”Mermer Agregası ve Uçucu Külün Kilit Parke Taşı Üretiminde Kullanılması”, Beton Fabrikasyon, Nisan, 2001, Sayı: 98.
- [21] Gencel O., Özel C., Köksal F., Erdoğan E., Barrera G. M., Brostow W. “ Properties of Concrete Paving Blocks Made with Waste Marble”, Journal of Cleaner Production, 2012, 21, 62-70.
- [22] Binici H., Shah T., Aksoğan O., Kaplan H., “Durability of Concrete Made with Grorite and Marble as Recycle Aggregates”, Journal of Materials Processing Technology, 2008, 208, 299-308.
- [23] Ceylan H. ve Mança, S., “Mermer Parça Atıklarının Beton Agregası Olarak

- Değerlendirilmesi” Teknik Bilimler Dergisi 2013, 3 (2) 21-25.
- [24] Elçi, H., Türk, N., İşintek, İ., Limestone dimension stone quarry waste properties for concrete in Western Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*, 2015.
- [25] Adom-Asamoah, M., Afrifa, R. O., A study of concrete properties using phyllite as coarse aggregates. *Materials and Design*, 2010, 31, 4561–4566.
- [26] Çobanoğlu, İ., Çelik, S.B., Çam, O., Etiz, H. ve Kurşun. M., Denizli Bölgesi Traverten Artıklarının Beton Agregası Olarak Kullanılabilirliğinin İncelenmesi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2014, Cilt 20, Sayı 3, 92-99.
- [27] TS 707, Türk Standartları, “Beton agregalarında numune alma ve deney numunesi hazırlama yöntemi”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1980.
- [28] TS EN 932- 2, “Agregaların genel özellikleri için deneyler Bölüm 2: laboratuvar numunelerin azaltılması metodu”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1999.
- [29] TS EN 932-3, “Agregaların Genel Özellikleri için Deneyler – Basitleştirilmiş Petrografik Tanımlama İçin İşlem ve Terminoloji”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1999.
- [30] TS EN 15309:2008 “X Işını Floresans Yöntemiyle Elementel Bileşimin Tayini” Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2008.
- [31] ASTM D 550 – 06, Standard Test Method For Specific Gravity Of Soil Solids by Gas Pycnometer, USA, 2009.
- [32] TS EN 933 - 3, “Agregaların geometrik özellikleri için deneyler - Bölüm 3: Tane şekli tayini - Yassılık endeksi” Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2012.
- [33] TS EN 933 - 4, “Agregaların geometrik özellikleri için deneyler - Bölüm 4: Tane şeklinin tayini - Şekil endeksi” Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2009.
- [34] TS EN 933 – 9 + A1, “Agregaların geometrik özellikleri için deneyler - Bölüm 9: İnce malzeme tayini - Metilen mavisi deneyi” Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2013.
- [35] TS EN 933 – 8:2012 + A1, “Agregaların geometrik özellikleri için deneyler - Bölüm 8: İnce tanelerin tayini- Kum eşdeğeri tayini” Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2015.
- [36] TS EN 1097-2, Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler-Parçalanma Direncinin Tayini için Metotlar, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2000.
- [37] TS EN 1097-9, Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri için Deneyler – Çivili Lastiklerden Kaynaklanan Aşınmaya Karşı Direncin Tayini (Nordik), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2001.
- [38] TS EN 1097-1, Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler- Aşınma direncinin tayini (Mikro-Deval), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2011.
- [39] Postacıoğlu, B., Beton, Bağlayıcı Maddeler, Agregalar, Beton, Cilt 2, Teknik Kitaplar Yayınevi, 1987, İstanbul, 404 s.
- [40] Higgs, N.B., “Preliminary Studies of Methylen Blue Adsorption As a Method of Evaluating Degradable Smectite-Bearing Concrete Aggregate Sands”, *Cement and Concrete Research*, 1986, Vol. 16, pp. 525-534.
- [41] Yitik, H. “İnce Tanelerdeki Kil İçeriğinin Metilen Mavisi Deneyi ile Belirlenmesi”, Osmangazi Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir, 2006.
- [42] Özbek, H. ve Açık, H., İnce Agregalarda Yapılan Metilen Mavisi ve Kum Eşdeğerliği Deney Sonuçlarının Beton Özelliklerine ve Maliyetine Etkisi, *Hazır Beton Dergisi*, Eylül – Ekim 2012, 84-92.