

Farklı Test Parametreleri için Agregat Tipinin Los Angeles Aşınma Kaybı Üzerine Etkisi

Esra TUĞRUL TUNÇ^{1*}, Kürşat Esat ALYAMAÇ²

¹ İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

² İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

*¹ esratugrul@firat.edu.tr, ² kealyamac@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 23/05/2019);

Kabul/Accepted: 18/01/2020)

Öz: Betonda hacim olarak en fazla agregat bulunduğundan, agreganın özellikleri beton kalitesini ve dayanımını doğrudan etkilemektedir. Bu çalışmada Elazığ ili çevresinde kolay ve düşük maliyetle elde edilebilen, farklı tip agregalar test edilmiştir. Agregaların aşınma özelliği Los Angeles aşınma testi kullanılarak belirlenmiştir. Bu testin en önemli parametreleri devir sayısı, bilye sayısı ve toplam bilye ağırlığıdır. Bu çalışmanın amacı, bu test parametreleri ile agregaların aşınma kaybı üzerindeki etkisinin belirlenmesidir. Bu amaçla 3 farklı agregat tipi için toplam bilye ağırlıkları aynı olmak üzere 12, 48 ve 96 adet bilye ve 500, 1000, 1500 ve 2000 devir/dakika farklı devir sayıları kullanılarak, Los Angeles aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda; bilye sayısı ve devir sayısı arttıkça agregat aşınma kaybının arttığı ancak toplam bilye ağırlığı sabit kalıp, bilye sayısı artırıldığında agregaların aşınma kayıplarının azaldığı gözlemlenmiştir. Deneyler tamamlandıktan sonra aşınma testi parametreleri ve agregaların fiziksel özellikleri Tepki Yüzey Metodu kullanılarak istatistik olarak analiz edilmiştir. Analiz sonucunda, Los Angeles aşınma kaybı değeri ile bilye sayısı, devir sayısı, agreganın yoğunluğu ve su emme oranı arasında önemli bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. Bu ilişkiyi ifade eden bir yöntem geliştirilmiştir. Geliştirilen bu yöntem ile farklı test parametreleri için aşınma değerlerinin; yaklaşık, pratik ve hızlı bir şekilde tahmin edilebileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Los Angeles aşınma testi, demir bilye sayısı, tamburun devir sayısı, beton agregaları, Yüzey Tepki Metodu.

The Effect of Aggregate Type on Los Angeles Abrasion Loss for Different Test Parameters

Abstract: As concrete has the highest aggregate volume, the properties of the aggregate directly affect the concrete quality and strength. In this study, different types of aggregates in Elazığ province have been tested. The abrasion properties of the aggregates were determined using the Los Angeles abrasion test. The most important parameters of this test are number of revolutions, number of balls and total ball weight. The aim of this study is to determine the effect of these test parameters on the abrasion loss of aggregates. For this purpose, Los Angeles abrasion tests were carried out using 12, 48 and 96 balls and 500, 1000, 1500 and 2000 rpm respectively for 3 different aggregate types. As a result of the experiments; it was observed that aggregate abrasion loss increased as the number of balls and the number of revolutions increased, but the total ball weight was fixed and the abrasion loss of the aggregates decreased when the number of balls was increased. After the tests were completed, the abrasion test parameters and the physical properties of the aggregates were analyzed statistically using the Response Surface Method. As a result of the analysis, it was found that there was a significant relationship between Los Angeles abrasion loss value and number of balls, number of revolutions, density of aggregate and water absorption rate. A method for expressing this relationship has been developed. With this method developed for different test parameters, abrasion values; it is concluded that it can be estimated approximately, practical and fast.

Key words: Los Angeles abrasion test, number of iron balls, number of revolutions of the drum, concrete aggregates, Surface Response Method.

1. Giriş

Agregalar, beton yapımında çimento ve su ile birlikte kullanılan, kum, çakıl, kırmataş gibi taneli malzemelerdir. Hacimsel olarak betonun büyük bir çoğunluğunu oluşturan agregat, betonun iskeletini oluşturmakla birlikte betonun kalitesini de doğrudan etkilemektedir. Agreganın dayanımı ve sertliğinin yanı sıra, özellikle beton yüzeyin aşınmaya maruz kalacağı durumlarda (yol ve yüzey betonları gibi), dayanıklı olması gerekmektedir. Agregaların aşınma dayanımları; özgül ağırlık, sertlik, boşluk oranı vb. özelliklerine bağlıdır. İlgili Türk Standartları'na [1] göre agreganın basınç dayanımının 100 MPa'dan az olduğu durumda, agreganın aşınma dayanıklılığı test edilmelidir. Cam yapılu agregalar, şistler, marnlı kalkerler, kaba mineralli taşlar aşınmaya karşı

* Sorumlu yazar: esratugrul@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0001-9071-774X, ² 0000-0002-3226-4073

direnç gösteremediklerinden dolayı, beton üretiminde aşınmaya dayanıklı sert agregaların kullanılması tercih edilmektedir.

Agregası aşınma dayanımından şüphe duyuluyorsa ya da beton yapımında yapay agregası kullanılıyorsa ilgili standarda [1] göre agregası aşınma dayanımı deneyinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Agregası aşınma dayanımını belirlemek için Los Angeles aşınma deneyi [2], micro-Deval aşınma deneyi [3], Nordik Bilye Değirmeni deneyi [4] ve Darbe dayanımı deneyi [2] yapılmaktadır. Bu aşınma testlerinden en yaygın Los Angeles aşınma testidir. Literatürde micro-Deval aşınma testi ile ilgili çalışmalar da mevcuttur [5]. Ancak diğer testlerin uygulamaları oldukça azdır. Los Angeles deneyi uygulaması kolay olduğu için diğer deneylere göre daha avantajlıdır [6].

Literatürde farklı tip agregaların aşınma kayıplarının araştırıldığı çalışmalar mevcuttur. Geri dönüşüm agregaları ve granit agregalarının aşınma kayıpları karşılaştırıldığında, granit agregalarının aşınma kayıplarının daha düşük olduğu görülmüştür [7]. Ancak, granit agregalarının çok farklı aşınma kayıplarına sahip agregası tipleri olduğu belirlenmiştir [8, 9]. Kireçtaşı, dolomitik kireçtaşı, granit ve hafif kaya agregaları içerisinde en düşük LA aşınma kaybına sahip agreganın granit agregası, en yüksek LA aşınma kaybına sahip agreganın ise kireçtaşı agregası olduğu belirlenmiştir [10]. Ancak, aynı agregası tipi farklı özelliklere sahip olabilmektedir. Örneğin literatürde test edilen bazı kireçtaşı agregalarının düşük aşınma kaybına sahip olduğu görülmektedir [11]. Kireçtaşı agregalarının da kalker kireçtaşı, dolomitik kireçtaşı ve kuvarsitik kireçtaşı gibi türleri mevcuttur. Bunların aşınma kayıpları da birbirinden farklı olarak belirlenmiştir. Kuvarsitik kireçtaşı agregasının aşınma kaybı, kalker kireçtaşı agregasının aşınma kaybından yaklaşık % 80 daha az olduğu gözlenmiştir [12]. Agregası tiplerine göre, LA aşınma kaybı değerinin çok farklı olduğu söylenebilir. Traverten, andezit, bazalt ve granit agregaları için LA aşınma testleri uygulanarak % 10 ile % 76 arasında değişen LA aşınma kaybı değerleri elde edilmiştir. Traverten agregalarının LA aşınma kayıplarının; andezit, bazalt ve granit agregalarına göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir [13]. Farklı agregası tipleri için yapılan LA aşınma testleri sonucunda; LA aşınma kayıpları küçükten büyüğe sırasıyla gabro, bazalt, kuvarsit, kireçtaşı ve kumtaşı olarak belirlenmiştir [14]. Geri dönüşüm agregalarının LA aşınma kaybı değerlerinin standart değerlerin altında olduğu ve bu nedenle ilgili agregaların, aşınmaya karşı dirençli olması bakımından, beton üretiminde kullanımının uygun olduğu sonucuna varılmıştır [15, 16]. Atık agregaların beton üretiminde kullanılarak geri dönüşümünün sağlanması, ekonomik ve çevre dostu beton üretmek için oldukça önemlidir [17].

Farklı tip agregaları Los Angeles aşınma testine tabi tutulduktan sonra Los Angeles aşınma kaybının, eksenel basınç dayanımı ile arasındaki ilişkiyi belirlemek için regresyon analizleri yapılmıştır [18]. Aşınma dayanımı ile basınç dayanımı arasında güçlü bir ilişki vardır [19]. LA aşınma kaybı değeri ile aşınma dayanımı arasında da ters orantı vardır. Yani, aşınma dayanımı yüksek agregaların LA değeri düşük, aşınma dayanımı düşük agregaların LA değeri yüksektir [20, 21].

Devir sayısı değiştirilerek gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, devir sayısının artmasıyla aşınma kaybının attığı gözlenmiştir [22, 23, 24, 25]. TS 706 EN 12620+A1'e göre aşınma sınır değerleri 100 devir için % 10 ve 500 devir için ise % 50 olarak belirlenmiştir. Mevcut çalışma sonuçları, bu bakımdan literatür ve ilgili şartname ile uyumludur.

Türkiye'de, jeolojik yapısından dolayı, farklı özelliklerde, kolay ve ekonomik bir şekilde elde edilebilen çok fazla miktarlarda agregası çeşitleri bulunmaktadır. Yüksek kalite ve performansta beton elde etmek için kullanılan agreganın LA aşınma kaybının küçük olması gerekmektedir. Bu nedenle ülkemizdeki agregaların fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırılması büyük önem arz etmektedir. Daha önce yapılan çalışmalar; agregası aşınma kaybının araştırıldığını göstermekte, ancak aşınma deneyi parametrelerinin (bilye sayısı ve devir sayısı) agregası aşınma kaybı değeri üzerindeki etkisini analiz etmede yetersiz kaldığını göstermektedir [26]. Ayrıca, atık agregası kullanımının literatürdeki çalışmalarda oldukça düşük olduğu görülmektedir. Bu nedenle, bu agregaların geri dönüşüm ile değerlendirilebilmesi için dayanım özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu kapsamda yapılacak deneylerin başında aşınma dayanımı deneyi gelmektedir. Aşınma deneyleri içerisinde en yaygın olanı Los Angeles deneyi olmasına rağmen, bu deneyin bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bu deney sırasında; harcanan zaman, aletten çıkan gürültü ve fazla iş gücü gerektirmesi gibi problemler dikkate alındığında deneysel çalışmayı kolaylaştırmak için bir formüle ihtiyaç duyulmaktadır.

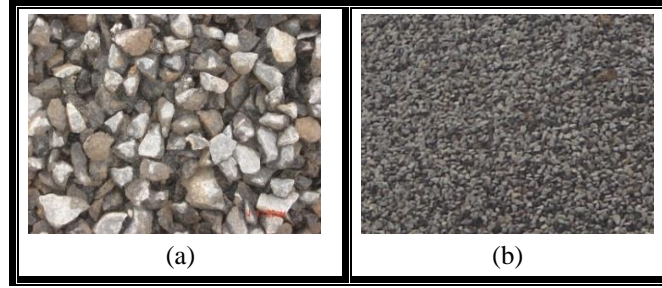
Mevcut çalışmanın amacı, Los Angeles test parametreleri olan bilye sayısı ve devir sayısının agregaların aşınma kaybı üzerindeki etkisinin belirlenmesidir. Bu parametrelerin Los Angeles aşınma kaybına olan etkisini değerlendirebilmek için, deneyde kullanılan bazalt, atık mermer ve kalker agregaları ile aşınma deneyleri ayrı ayrı yapılmıştır. Bu kapsamda artan bilye sayısının ve artan devir sayısının kullanılan agregası tipi ile LA aşınma kaybı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Daha sonra Los Angeles test parametreleri ve agregaların fiziksel özellikleri kullanılarak, Los Angeles aşınma kaybının tespit edilebileceği formül geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla bilye sayısı, devir sayısı, agregaların doygun yüzey-kuru agregası yoğunluğu ve su emme değerleri gibi sayısal

değerler Tepki Yüzey Metodu kullanılarak istatistik bir analiz yapılmıştır. Geliştirilen bu denklem ile farklı test parametreleri için Los Angeles aşınma kaybı değerinin yüksek bir doğruluk ile tahmin edildiği görülmektedir. Ayrıca, bu çalışmada aşınma kaybının ön tahmin metoduyla belirlenmesi sağlanarak zaman, iş gücü ve ekonomik kazanç elde edilmesi amaçlanmaktadır.

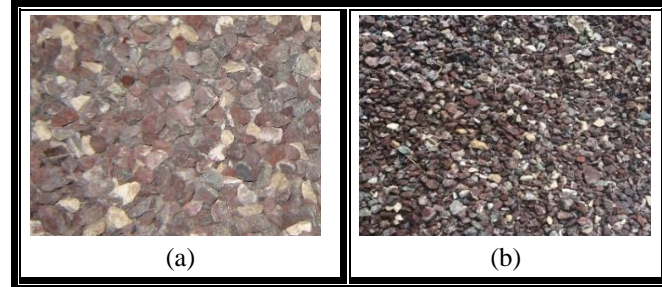
2. Malzemeler ve Yöntemler

2.1. Agregalar

Mevcut deneysel çalışmada; Elazığ ili yöresinden çıkarılan bazalt, atık mermer ve kalker agrega tipleri kullanılmıştır (Şekil 1-3). Bu agrega tiplerinin bir kısmı atık agregalardır. Bu agrega tiplerinin temin edilmesi oldukça kolay ve ucuzdur. Ayrıca, betonda kullanılması uygun görülen agregaların granülometri eğrilerinin TS 802'ye göre A₁₆-B₁₆ standart eğrileri arasında kalması gerekmektedir. Bu agregaların bu bakımdan uygun olduğu da belirlenmiştir. Söz konusu agregalar iki ayrı boyutta sınıflandırılmıştır. Kullanılan agrega sınıflarında orta agrega için 10-12.5 mm ve iri agrega için 12.5-14 mm arasında elenerek agregalar kullanıma hazır hale getirilmiştir.



Şekil 1. Mevcut çalışmada kullanılan bazalt agregası: a) iri, b) orta.



Şekil 2. Mevcut çalışmada kullanılan atık mermer agregası: a) iri, b) orta.



Şekil 3. Mevcut çalışmada kullanılan kalker agregası: a) iri, b) orta.

Mevcut agregaların ilgili standartlara [1] göre; doygun yüzey kuru agrega yoğunlukları ve su emme değerleri belirlenmiştir (Tablo 1). Böylece, bu agregaların fiziksel özellikleri hakkında gerekli bilgi sağlanmıştır. Bu

çalışmada agrega doygun yüzey kuru agrega yoğunlukları ve agrega su emme oranları ile agrega LA aşınma kaybı arasında bir ilişki kurulmaya çalışılmıştır. Böylece, agrega aşınma kaybının tespitinde kolaylık sağlanacağı düşünülmektedir.

Tablo 1. Agregaların fiziksel özellikleri

	Agrega tipleri		
	Bazalt	Atık Mermer	Kalker
ρ_b^{iri}	2.79	2.63	2.60
ρ_b^{orta}	2.78	2.62	2.59
W_a^{iri}	0.75	1.0	1.2
W_a^{orta}	0.8	1.1	1.25

burada; ρ_b^{iri} =iri agrega için doygun yüzey kuru agrega yoğunluğu (g/cm³), ρ_b^{orta} =orta agrega için doygun yüzey kuru agrega yoğunluğu (g/cm³), W_a^{iri} =iri agrega için su emme (%), W_a^{orta} =orta agrega için su emme (%).

2.2. Los Angeles aşınma deneyi

Agregaların aşınma kaybını belirlemek için Şekil 4'te gösterilen Fırat Üniversitesi Yapı Malzemesi Laboratuvarında bulunan Los Angeles aşınma deney aleti (bilyeli tambur) kullanılmıştır. Bu deneysel çalışmada bilye sayısının ve sabit ağırlıklı farklı çaplardaki bilyelerin aşınma kaybı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla bir dizi aşınma deneyi yapılmıştır. Deney için iri malzemeden 2500 g ve orta malzemeden 2500 g olmak üzere toplam 5000 g numune yıkanarak 110 ± 5 °C sıcaklıkta etüvde kurutulup tartılmıştır [1]. Bu işlem numune sabit ağırlığa ulaşana kadar sürdürülmüştür. Sabit bir hız ile dakikada 31-33 devir yapan tambura, bilyeler ve etüvde kurutulmuş agregalar bırakılıp kapak kapatılmış ve 500 devir yaptırılmıştır. Deney sonunda aletin içindeki bilyeler agrega parçacıklarından titizlikle temizlenerek, deneysel hata olmamasına özen gösterilmiştir. Deney sonunda elde edilen agrega parçacıkları 1.6 mm göz açıklıklı elekte elenerek elek üstünde kalan parçacıklar tartılmıştır. Bu işlemlerden sonra LA aşınma kaybını (%) hesaplamak için, Eşitlik (1) kullanılmıştır [2].

$$LA = \frac{5000 - m}{50} \quad (1)$$

burada; LA=Los Angeles katsayısını (%); m=1.6 mm'lik elek üzerinde kalan malzemeyi (g) ifade etmektedir.



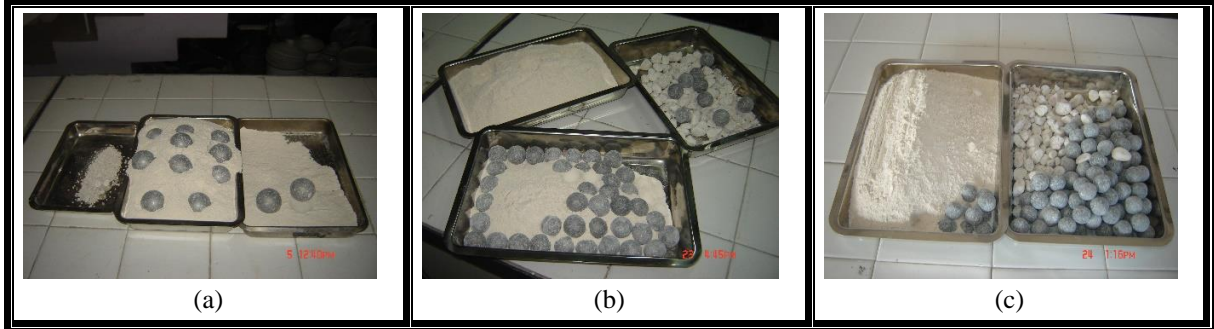
Şekil 4. Los Angeles aşınma deneyi: a) deney aleti; b) aşınan malzeme.

3. Deneysel Çalışmalar

3.1. Deneysel Bulgular

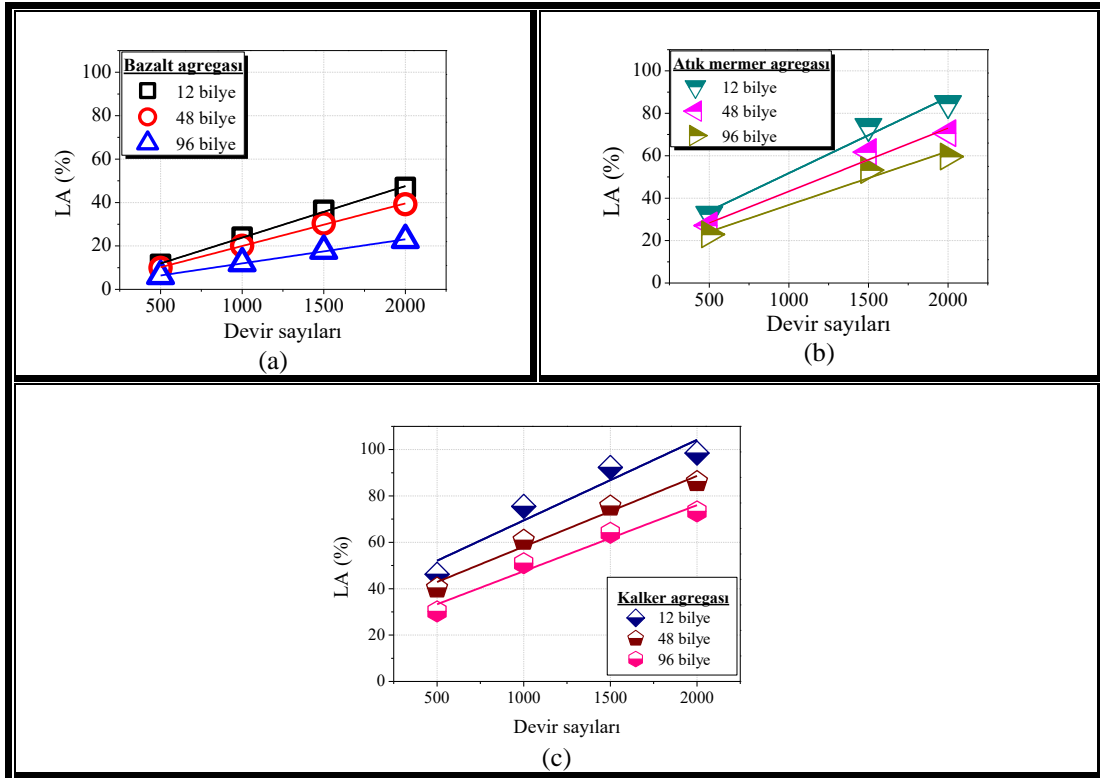
Bu çalışmada toplam bilye ağırlığı sabit tutularak; 12, 48 ve 96 adet bilye için deneyler gerçekleştirilmiştir. Böylece, toplam bilye ağırlığı değişmeden sadece bilye sayısı değişiminin ve devir sayısı değişiminin aşınma

kaybına etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda gerçekleştirilen deneylerde; 12 bilye için her bir bilye çapı 47 ± 1 mm, 48 bilye için her bir bilye çapı 29 ± 1 mm ve 96 bilye için her bir bilye çapı 23 ± 1 mm olarak ölçülmüştür. Bazı deneylerden sonra aşınan agregalar ve deneyde kullanılan bilyeler Şekil 5'te görülmektedir.



Şekil 5. Aşınan agregaların görünümü: a) 12 bilye, b) 48 bilye, c) 96 bilye.

Şekil 6(a-c)'de toplam bilye ağırlığı (5000 g) sabit olan faklı bilye sayıları (12, 48 ve 96) için Los Angeles aşınma kaybı (LA %) değerleri ile farklı devir sayıları (500, 1000, 1500 ve 2000) arasındaki ilişki incelenmiştir. Devir sayısı 500'den 2000'e yükseltildiğinde LA (%) değerinin; 12 bilye için % 11 ile % 93 arasında, 48 bilye için % 9 ile % 82 arasında, 96 bilye için ise % 6 ile % 65 arasında değiştiği görülmektedir. LA (%) değerinin devir sayısı arttıkça arttığı gözlenirken, aynı devir sayısı için bilye sayısındaki artışla LA (%) değerinin azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni, toplam bilye ağırlığı sabit tutulduğundan bilye sayısının artmasıyla bilye çaplarının azalmasıdır. Böylece, bilyelerin agregayı aşındırma etkisi azalmaktadır. En düşük bilye sayısı (12 adet) için yapılan deneylerde en yüksek LA (%) değerleri gözlenirken en yüksek bilye sayısı (96 adet) için yapılan deneylerde en düşük LA (%) değerleri bulunmuştur. Özellikle kalker agregası için bu parametreler ile yapılan deneyde % 95'e yakın bir LA (%) değeri hesaplanmıştır.

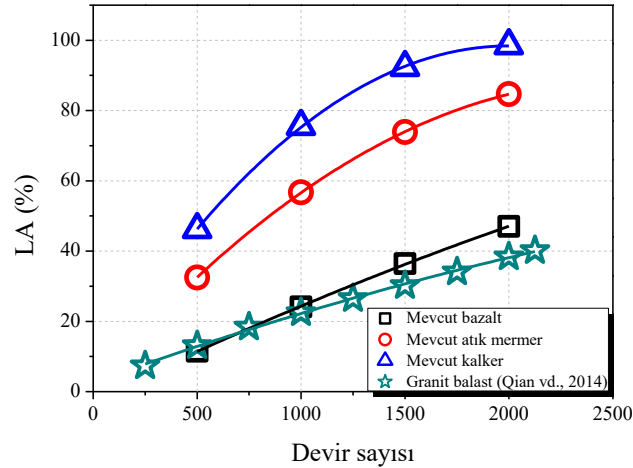


Şekil 6. Artan bilye sayısı ve artan devir sayısı için LA kaybının değişimi: a) bazalt, b) atık mermer, c) kalker.

Devir sayısındaki artışla LA (%) değerinde lineer bir artış gözlenmiştir. 12 bilye sayısı ile 96 bilye sayısı için LA (%) değeri karşılaştırıldığında; bazalt agregasında yaklaşık 50% azalma, atık mermer agregası ve kalker agregasında ise yaklaşık % 30 azalma gözlenmiştir. 500 devir sayısı ile 1500 devir sayısı için LA (%) değeri karşılaştırıldığında; bazalt agregasında yaklaşık 3.1 kat artış, atık mermer agregasında yaklaşık 2.3 kat artış, kalker agregasında ise yaklaşık 1.9 kat artış gözlenmiştir. Böylece bilye sayısındaki artış ile LA (%) değerinde ki maksimum azalma, % 50 oranında bir azalma ile bazalt için gözlenmiştir. Bununla birlikte devir sayısındaki artış ile LA (%) değerinde ki maksimum artış ise, 3.1 kat artış ile yine bazalt agregasında görülmektedir. Böylece toplam bilye ağırlığının sabit tutulup bilye sayısının artırılması ile aynı devir sayısı için, LA (%) aşınma kaybı değerinin azaldığı ve dolayısıyla agregat aşınma direncinin arttığı gözlenmektedir. Devir sayısının artırılması ile aynı bilye sayısı için LA (%) aşınma kaybı değerinin arttığı ve dolayısıyla agregat aşınma direncinin azaldığı gözlenmektedir. Deney sonuçları incelendiğinde, aşınmaya karşı en dayanıklı agreganın bazalt agregası olduğu gözlenirken, kalker agregasının Los Angeles aşınma kaybı çok fazla olmuş ve dolayısıyla aşınmaya karşı direncinin çok az olduğu belirlenmiştir. 12 bilye ve 500 devir için deney sonuçları incelendiğinde, TS EN 1097-2'ye [2] göre bu çalışmada test edilen agregat tipleri aşınma dayanımı açısından sınır değer altındadır. Böylece, bu üç agreganın da kullanımının uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

3.2. Mevcut çalışma bulgularının önceki çalışma bulgularıyla karşılaştırılması

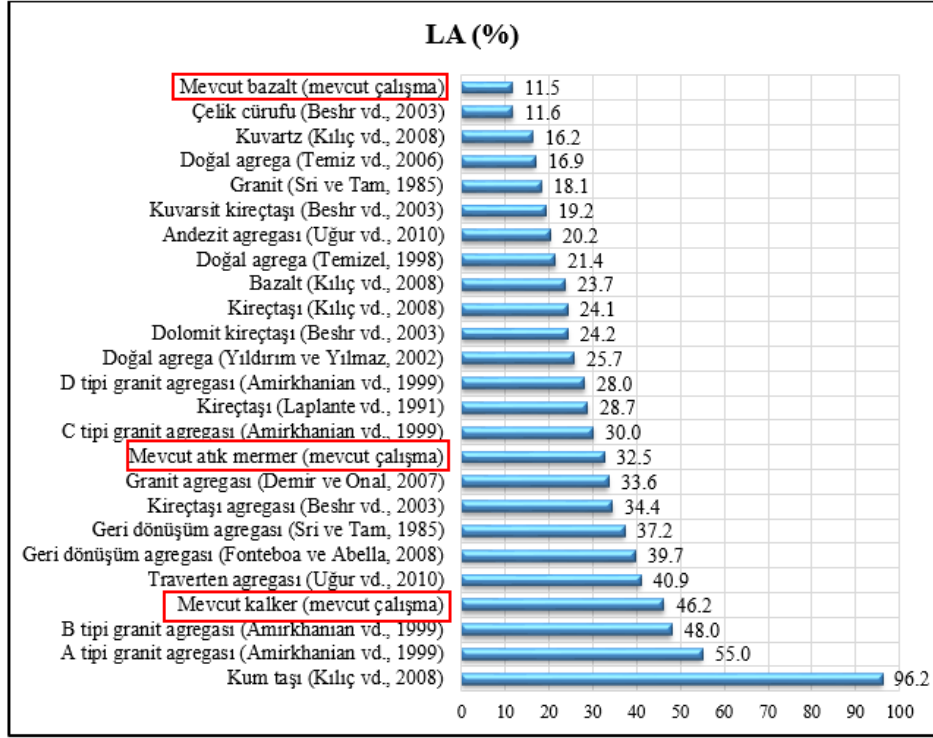
Qian vd. (2014) çalışmalarında; bazalt, granit, siyenit, diyorit, diyabaz, kuvarsit, melafir veya sert kalker gibi agregalardan oluşan bir kırmataş tabakası olan balastın aşınma kaybını araştırmışlardır. Bu kapsamda, 250 ile 2125 devir sayıları arasındaki LA (%) değerlerini gözlemlemişlerdir. Şekil 7'de mevcut çalışmada kullanılan agregalar ve Qian vd. (2014) çalışmasında kullanılan balasta ait devir sayıları ile LA (%) değişimleri sunulmaktadır [27]. Aşınma direnci en yüksek agregaların, bazalt ve balast olduğu görülmektedir. Bazaltın LA (%) kaybı değerlerinin granit balastın LA (%) kaybı değerlerine oldukça yakın olduğu ve aynı eğilimi gösterdiği görülmektedir. Hatta 12 bilye ve 500 devir sayısı (standart) için yapılan deneyde bazalta ait LA kaybı değerinin granit balasttan % 12 daha düşük çıktığı, dolayısıyla aşınma direncinin daha yüksek çıktığı gözlemlenmiştir. Aşınmaya oldukça dirençli olması gereken yol, demiryolu, hava meydanları gibi yerlerde kullanılan balast; mevcut çalışmada kullanılan bazalt ile karşılaştırıldığında bazaltın hem dayanıklılık ve hem de ekonomik açıdan kullanılabilirliğinin daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 7. Qian vd. (2014) [27] ve mevcut çalışma için LA (%) değerlerinin devir sayısı ile değişimi.

Geniş kapsamlı bir literatür taramasından sonra incelenen çalışmalara ait agregat türleri ve mevcut çalışmaya konu olan agregat türleri için elde edilen LA (%) kaybı değerleri Şekil 8'de sunulmaktadır. Şekil 8'deki LA (%) kaybı değerleri, 12 bilye ve 500 devir sayısı (standart) için elde edilmiştir. Buna göre en düşük LA % değeri 11.5 % ile bazalt için gözlenirken, en yüksek LA % değeri ise % 96.2 ile kumtaşı için gözlenmiştir. Bu durum literatür ile karşılaştırıldığında, Los Angeles aşınma kaybı en küçük dolayısıyla aşınmaya en dirençli agreganın bazalt olduğu görülmektedir. Aşınmaya karşı dayanıklı agregaların genel olarak sırasıyla; bazalt, doğal agregat, kalker,

granit, atık mermer, geri dönüşüm agregası ve kumtaşı olduğu sonucuna varılmıştır. Böylece literatürde çalışılmış agregalarla karşılaştırıldığında, bazaltın kullanılabilirliğinin çok uygun olacağı anlaşılmaktadır.



Şekil 8. Farklı agrega tipleri için Los Angeles aşınma kayıpları [7, 8, 9, 10, 12, 14, 15, 22, 23, 24, 25].

4. Analiz ve Tartışmalar

Deneyler sonucunda demir bilye sayısının ve tambur devir sayısının Los Angeles aşınma kaybı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Bunlarla beraber agreganın fiziksel özelliklerinin de aşınma kaybı özelliği üzerinde önemli bir etkisi bulunmaktadır. Dolayısıyla agregaların aşınma kayıpları üzerinde bilye sayısı, devir sayısı, agreganın yoğunluğu ve su emme miktarı parametrelerinin etkisi oldukça önemlidir. Aşınma kaybı üzerindeki bu çoklu etkinin araştırılması için bu çalışmada, tepki yüzey metodu kullanılmıştır.

Tepki Yüzey Metodu (TYM) kullanımının nedeni; bu metodolojinin faktörler ve cevaplar arasındaki ilişkiyi belirlemek için etkili bir araç olmasıdır. TYM'nin avantajlarından bazıları şunlardır: a) az sayıda test verisine sahip güvenilir bir model oluşturmak, b) her bir cevap için modeli tahmin etmedeki etkinliği c) faktörler arasındaki birleşik etkiyi değerlendirmek için etkili olmasıdır. Bu çalışmada, deneysel çalışmalar sonucu elde edilmiş veriler yardımıyla ve TYM kullanılarak bir analiz yapılmıştır. TYM modelini oluşturmak için 30 set noktadaki aşınma testi sonuçları kullanılmıştır. TYM kullanılarak aşınma kaybını elde edebilecek bir yöntem geliştirilmesi için paket bir bilgisayar programından faydalanılmıştır. Değişkenler ve kontrol seviyeleri Tablo 2 de verilmiştir. Değişkenler; demir bilye sayısı (BS), tambur için devir sayısı (DS), ortalama doymuş yüzey-kuru agrega yoğunluğu (DYK) ve ortalama su emme (SE) değerleridir. Bu değişkenlerin seçilme nedenleri, demir bilye sayısının (BS), tambur için devir sayısının (DS), doymuş yüzey kuru agrega yoğunluğu (DYK) ve su emme (SE) değerlerinin Los Angeles aşınma testi üzerinde en etkili parametreler olmasıdır.

Tablo 2. Değişkenler ve değişim miktarları.

Semboller		Değişim aralığı		
Adı	Kodu	-1	0	+1
Bilye sayısı (BS)	A	12	54	96
Devir sayısı (DS)	B	500	1250	2000
Yoğunluk (DYK)	C	2.60	2.695	2.79
Su emme (SE)	D	0.75	1.00	1.25

Bu çalışmada, agregaların Los Angeles aşınma kaybı değerlerinin, nümerik bir model yardımıyla tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, tepki yüzey metodu kullanılarak, birçok farklı model denenmiştir. Analizlerde, Bölüm 3 de verilen deney sonuçları kullanılmıştır. Detaylı analizlerden sonra en uygun modelin doğrusal model olduğuna karar verilmiştir. Daha sonra önemsiz terimler model üzerinde bir t-testi yapılarak kaldırılmıştır.

Son olarak, kalan terimler kullanılarak, Eşitlik (2)'de verilen model oluşturuldu. Modelin yeterliliğini doğrulamak amacıyla p ve F değerini belirlemek için varyans analizi (ANOVA) yapıldı. Geliştirilen model için R^2 değeri 0.97 olarak hesaplanmıştır. Modelin ANOVA sonuçları Tablo 3'de verilmiştir. 294.21 olan F değeri, modelin önemli olduğunu göstermektedir. Bu kadar büyük bir f değerinin ortaya çıkması, modelin sapma ihtimalinin % 0.01'in altında olduğunu göstermektedir. Modelin p-değerlerinin, A ve B terimleri için 0.0001'den, C ve D terimleri için ise 0.05'den küçük olduğu için modelin her teriminin anlamlı olduğu anlaşılmaktadır. Verilerin sayısal değerlerine göre her modelin F-değerleri kendine özgüdür. Ancak p-değerlerinin anlamı her model için aynıdır. P-değeri, 0.0001'den küçük ise model veya terimin (denklemin her terimi için ayrı hesaplanır) mükemmel olduğunu, eğer 0.05'den küçük ise model veya terimin anlamlı ve kullanılabilir olduğunu ifade eder.

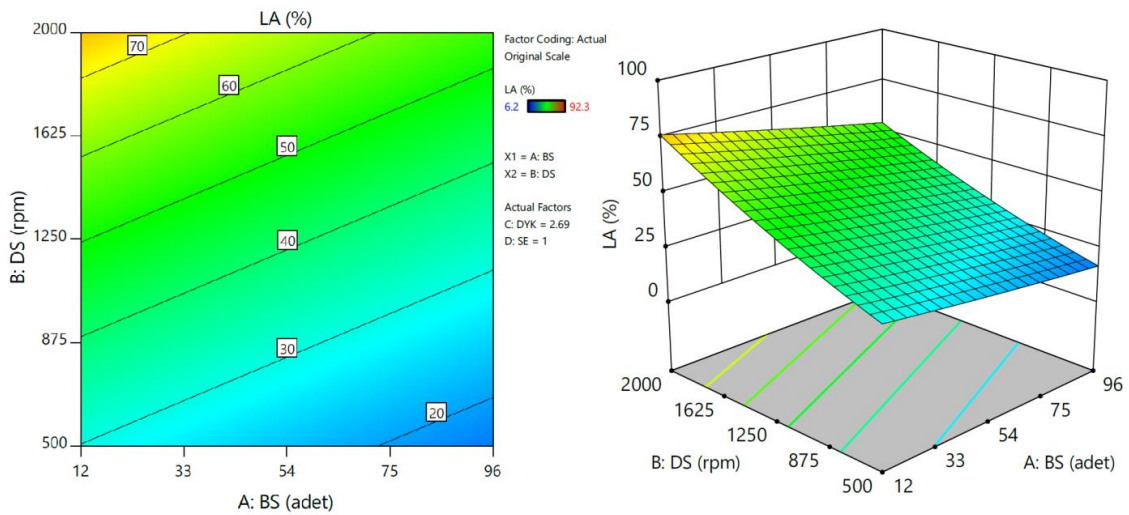
Tablo 3. Model ve terimlerinin varyasyon analizi sonuçları.

Girdi	Anlamlılık	F-değeri	p-değeri
Model	110.03	294.21	< 0.0001
A – BS	9.53	101.91	< 0.0001
B – DS	41.62	445.15	< 0.0001
C – DYK	0.3972	4.25	0.0498
D – SE	1.87	19.96	0.0001

Geliştirilen modele ait denklem, Eşitlik (2)'de verilmiştir. Bu denklem, model terimlerini kapsayan her faktör için verilen yanıtlara ilişkin tahminler yapmak için kullanılabilir. Burada, değerler her faktör için orijinal birimlerde belirtilmelidir. Bu denklem, her bir faktörün göreceli etkisini tanımlamak için kullanılmamalıdır, çünkü katsayılar, her bir faktörün birimlerini barındıracak şekilde ölçeklendirilir ve kesişme, tasarım alanının merkezinde değildir. Bu durum tepki yüzey metodunun bir özelliğidir.

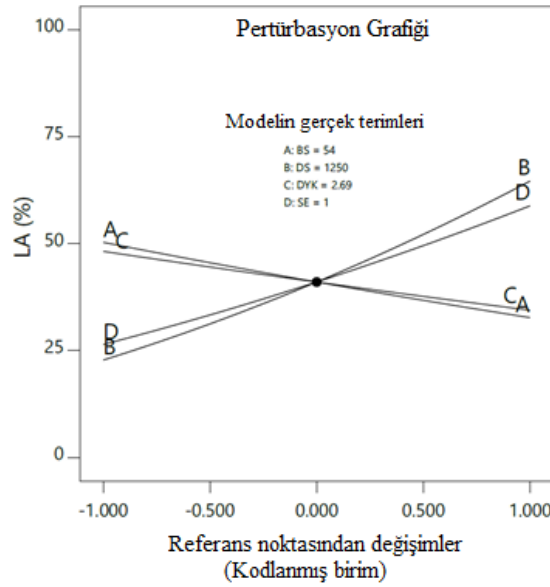
$$LA = (14.71546 - 0.016378 \times BS + 0.002181 \times DS - 5.66014 \times DYK + 5.06998 \times SE)^2 \quad (2)$$

Şekil 9'da belirtildiği gibi, hem demir bilye sayısı hem de devir sayısı, Los Angeles aşınma değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Değişkenler değiştikçe, aşınma kaybının değerleri kolayca 2B çizimden belirlenir (Şekil 9a). Ayrıca, her iki değişkenin de yanıt üzerindeki birleşik etkisi 3B çizimden açıkça anlaşılmaktadır (Şekil 9b). Doygun yüzey kuru agrega yoğunluğu ve su emme miktarı değişkenlerinin etkisi ise sadece pertübrasyon eğrileri incelendiğinde görülebilir.



Şekil 9. Tepki Yüzey Metodu çizimleri a) 2 boyutlu, b) 3 boyutlu.

Tüm değişkenlerin etkisi, Şekil 10'da pertürbasyon grafiği olarak verilmiştir. Modelde kullanılan tüm değişkenlerin, beton agregalarının aşınmasında önemli bir etkiye sahip olduğu açıkça görülmektedir. Her değişkene ait eğrinin eğimi, yanıt üzerindeki (aşınma kaybı) etki derecesini gösterir (Şekil 10). Bu özellikler göz önüne alındığında, A (demir bilye sayısı), B (tambur için devir sayısı), C (doğgun yüzey-kuru agrega yoğunluğu) ve D (su emme) değişkenleri Los Angeles aşınma kaybı üzerinde önemli ve birbirlerine yakın etkilere sahiptirler. Beklendiği gibi, A ve C değişkenleri arttıkça Los Angeles aşınma kaybı azalmış ancak B ve D değişkenleri arttıkça Los Angeles aşınma kaybı artmıştır. Toplan bilye ağırlığı değişmeyip, bilye sayısı arttıkça bilyelerin aşındırma özelliği azalmaktadır. Ancak devir sayısı arttıkça etki süresi arttığından aşınma kaybı artmaktadır. Agreganın yoğunluğu arttıkça boşluk oranı azalmakta ve dayanımı artmaktadır. Dolayısıyla yoğunluğu artan agreganın aşınma kaybının azalması bekleneni desteklemektedir. Benzer olarak, su emme miktarının artması boşluk artışı ile ilgilidir. Dolayısıyla su emme miktarı yüksek olan agreganın aşınma kaybı artmaktadır. Sonuç olarak, Los Angeles aşınma testinin en etkili parametrelerinin bir ön tahmin yöntemi geliştirmek için kullanıldığı görülmektedir ve bunlarla etkili ve pratik bir yöntem geliştirilmiştir.



Şekil 10. Pertürbasyon eğriler.

5. Sonuçlar

Mevcut çalışmada gerçekleştirilen deneyler ile Los Angeles test parametrelerinin (bilye sayısı ve devir sayısı) Los Angeles aşınma kaybı üzerinde önemli bir etkisi olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, agreganın fiziksel özellikleri de aşınma kaybı açısından büyük önem taşımaktadır. Aşınma kaybı üzerindeki bu faktörlerin etkisinin araştırılması için tepki yüzey metodu kullanılmıştır. Söz konusu agregaların Los Angeles aşınma kaybı değerlerinin, deney sonuçları yardımıyla geliştirilen en uygun sayısal bir model ile tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Literatürde agregaların aşınma kaybı değerleri ancak deneysel bir yöntem ve çalışmalar sonucunda elde edilebilmektedir. Bu çalışma da ise aşınma deneyi yapılmadan, agregaların aşınma kaybı değerlerinin yaklaşık tahmin edilebilmesi için bir denklem geliştirilmiş ve böylece aşınma deneyi yapmadan sayısal bir yöntem kullanılarak, agregaların aşınma kaybı değerlerinin tahmin edilmesine imkân sağlanmıştır. Mevcut çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmaktadır:

- Los Angeles aşınma deneyinde, demir bilye sayısının ve tamburun devir sayısının deney sonuçları üzerinde önemli bir etkiye sahip oldukları belirlenmiştir.
- Agregaların aşınma dayanımını sayısal bir metotla tahmin etmek için, aşınma dayanımı üzerinde etkili demir bilye sayısı, tamburun devir sayısı, agreganın özgül ağırlığı ve su emme değerleri, Tepki Yüzey Metodu kullanılarak değerlendirilmiş, yeni ve etkin bir sayısal yöntem geliştirilmiştir.
- Geliştirilen sayısal yöntem ile agregaların Los Angeles aşınma kaybı değerlerinin yüksek doğrulukla, pratik ve kolay bir şekilde hesaplanabileceği ortaya konulmuştur. Ancak geliştirilen yöntem yaklaşık bir yöntemdir.

Yöntemin daha fazla sayıda agregası çeşidini kapsamı için çok sayıda farklı agregası kullanarak deneyler yapılmalı ve kapsamlı verilerin tekrar sayısal bir yöntem haline getirilmesi gerekir.

Kaynaklar

- [1] TS 706 EN 12620+A1. Beton Agregaları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2009.
- [2] TS EN 1097-2. Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler - Bölüm 2: Parçalanma direncinin tayini için metotlar, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2010.
- [3] TS EN 1097-1. Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler - Bölüm 1: Aşınma direncinin tayini (micro-Deval), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2011.
- [4] TS EN 1097-9. Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler - Bölüm 9: Çivili lastiklerden kaynaklanan aşınmaya karşı direncin tayini - Nordik deney, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2001.
- [5] Rangaraju PR, Edlinski J. Comparative evaluation of micro-deval abrasion test with other toughness/abrasion resistance and soundness tests. *Journal of Materials in Civil Engineering* 2008; 20(5): 343-351.
- [6] Jamil MZ, Khan MS. Establishment of correlation between Los Angeles abrasion loss and strength determined through point load index and Schmidt rebound hammer. *Science International (Lahore)* 2014; 26(2): 767-70.
- [7] Sri Ravindrarajah R, Tam CT. Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate. *Magazine of concrete research* 1985; 37(130): 29-38.
- [8] Amirkhani SN, Kaczmarek D, Burati Jr JL. Effects of los angeles abrasion test values on the strengths of laboratory-prepared marshall specimens. *Transportation Research Record* 1991; 1301(77).
- [9] Demir İ, Önal MM. Kırşehir-Kaman Yöresi Granit Agregalarının Mühendislik Özellikleri. *Politeknik Dergisi* 2007; 10(3): 277-285.
- [10] Laplante P, Aitcin PC, Vezina D. Abrasion resistance of concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering* 1991; 3(1): 19-28.
- [11] Poitevin P. Limestone aggregate concrete, usefulness and durability. *Cement and Concrete Composites* 1999; 21(2): 89-97.
- [12] Beshr H, Almusallam AA, Maslehuddin M. Effect of coarse aggregate quality on the mechanical properties of high strength concrete. *Construction and Building Materials* 2003; 17(2): 97-103.
- [13] Kahraman S, Fener M. Predicting the Los Angeles abrasion loss of rock aggregates from the uniaxial compressive strength. *Materials Letters* 2007; 61(26): 4861-4865.
- [14] Kılıç A, Teymen A. Determination of mechanical properties of rocks using simple methods. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 2008; 67(2): 237.
- [15] González-Fonteboa B, Martínez-Abella F. Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume. *Materials and mechanical properties. Building and Environment* 2008; 43(4): 429-437.
- [16] Gaedicke C, Marines A, Miankodila F. Assessing the abrasion resistance of cores in virgin and recycled aggregate pervious concrete. *Construction and Building Materials* 2014; 68: 701-708.
- [17] Tunc ET. Recycling of marble waste: A review based on strength of concrete containing marble waste. *Journal of Environmental Management* 2019; 231: 86-97.
- [18] Shakoor A, Brown CL. Development of a quantitative relationship between unconfined compressive strength and Los Angeles abrasion loss for carbonate rocks. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology* 1996; 53(1): 97-103.
- [19] Li B, Ke G, Zhou M. Influence of manufactured sand characteristics on strength and abrasion resistance of pavement cement concrete. *Construction and Building Materials* 2011; 25(10): 3849-3853.
- [20] Kumar GR, Sharma UK. Abrasion resistance of concrete containing marginal aggregates. *Construction and Building Materials* 2014; 66: 712-722.
- [21] Tunç ET. An Experimental Investigation on the Abrasion Strength of Aggregate: Elazığ Province Calcareous Aggregate. *Bitlis Eren University Journal of Science and Technology* 2018; 8(2): 75-80.
- [22] Temizel KE. Samsun ili Bafra ilçesi Kızılırmak havzasındaki doğal agregası ocaklarından alınan agregaların ve bu agregalardan üretilen betonun bazı özelliklerinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, On Dokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun, Türkiye, 1998.
- [23] Yıldırım M, Yılmaz I. Yıldız ırmağı çökelirinin beton agregası olarak kullanılabilirliklerinin incelenmesi. *Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi* 2002; 19(2): 181-192.
- [24] Temiz H, Binici H, Bodur MN, Kara O. Kahramanmaraş doğal agregalarının mühendislik özellikleri. *Kahramanmaraş Sürçü İmam Üniversitesi Fen ve Mühendislik Dergisi* 2006; 9(2).
- [25] Uğur I, Demirdağ S, Yavuz H. Effect of rock properties on the Los Angeles abrasion and impact test characteristics of the aggregate. *Materials Characterization* 2010; 61: 90-96.
- [26] Tuğrul E. Agregaların aşınma dayanımlarının farklı şartlar altında incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye, 2015.
- [27] Qian Y, Boler H, Moaveni M, Tutumluer E, Hashash Y, Ghaboussi J. Characterizing ballast degradation through Los Angeles abrasion test and image analysis. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2014; (2448): 142-151.