



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



**Agrega gradasyonundaki değişimlerin aşınma tabakasında kullanılan bitümlü sıcak karışımların mekanik özelliklerine olan etkilerinin incelenmesi**

*Investigation of the effects of aggregate gradation variations on the mechanical properties of bituminous hot mixtures used in wearing course*

*Yazar(lar) (Author(s)):* Deniz ARSLAN<sup>1</sup>, Hüseyin KÖSE<sup>2</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0001-9493-2826

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0003-2533-6769

**To cite to this article:** Arslan D., Köse H., “Agrega gradasyonundaki değişimlerin aşınma tabakasında kullanılan bitümlü sıcak karışımların mekanik özelliklerine olan etkilerinin incelenmesi”, *Journal of Polytechnic*, 27(2): 445-453, (2024).

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz:** Arslan D., Köse H., “Agrega gradasyonundaki değişimlerin aşınma tabakasında kullanılan bitümlü sıcak karışımların mekanik özelliklerine olan etkilerinin incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 27(2): 445-453, (2024).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.1133995

# Agrega Gradasyonundaki Değişimlerin Aşınma Tabakasında Kullanılan Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özelliklerine Olan Etkilerinin İncelenmesi

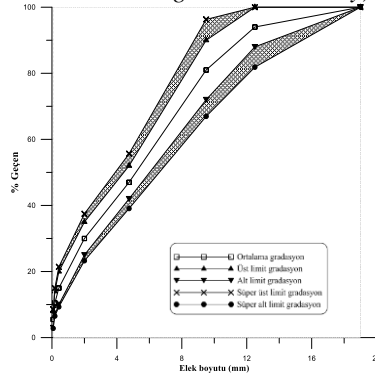
## Investigation of the Effects of Aggregate Gradation Variations on the Mechanical Properties of Bituminous Hot Mixtures Used in Wearing Course

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Bitümlü karışımlarda agrega gradasyonu (Aggregate gradation in bituminous mixtures)
- ❖ Gradasyon zarfı (Gradation envelope)
- ❖ Limit dışı gradasyonun etkileri (Effects of out-of-limit gradations)
- ❖ Gradasyon zarfının genişleme potansiyeli (Potential for expansion of the gradation envelope)

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Çalışmada agrega gradasyonunun bitümlü karışım özelliklerine olan etkileri incelenmiştir (The effects of aggregate gradation on bituminous mixture properties were investigated in the study).



Şekil. KTŞ limitleri ve limit dışı gradasyonlar / Figure. HTS limits and gradations outside the limit

### Amaç (Aim)

Agrega gradasyonu ile bitümlü karışım mekanik özellikleri arasındaki ilişkiyi belirlemek / Determining the relationship between aggregate gradation and mechanical properties of the bituminous mixture

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Farklı gradasyonlarla hazırlanmış bitümlü karışımlara Marshall tasarımları yapılarak birim ağırlık, boşluk ve dayanım özellikleri deneysel olarak belirlenmiştir / Unit weight, void and strength properties were determined experimentally by doing Marshall designs for bituminous mixtures prepared with different gradations.

### Özgünlük (Originality)

Türkiye'deki şartname temelinde agrega gradasyonunun bitümlü karışımlardaki etkilerini araştıran literatür çalışmasına rastlanmamıştır / There is no literature study investigating the effects of aggregate gradation on bituminous mixtures on the basis of Turkey specification

### Bulgular (Findings)

Agrega gradasyonu incelendiğinde karışımın optimum bitüm ihtiyacı artmıştır. Optimum bitüm oranında Vf ve VMA'nın arttığı, Dp'nin azaldığı tespit edilmiştir / As the aggregate gradation got thinner, optimum bitumen requirement of the mixture increased. It was determined that Vf and VMA increased and Dp decreased at the optimum bitumen ratio.

### Sonuç (Conclusion)

Tip-1 için tanımlanan gradasyon zarfının genişleme potansiyelinin olabileceği görülmüştür / It has been observed that the gradation envelope defined for Type-1 may have an expansion potential

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The authors of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Agrega Gradasyonundaki Değişimlerin Aşınma Tabakasında Kullanılan Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özelliklerine Olan Etkilerinin İncelenmesi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Deniz ARSLAN, Hüseyin Köse**

Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 42250, Selçuklu, Konya, Türkiye

(Geliş/Received : 21.06.2022 ; Kabul/Accepted : 18.07.2022 ; Erken Görünüm/Early View : 07.09.2022)

## ÖZ

Türkiye’de bitümlü karışımın kullanılacağı tabakaya göre hangi gradasyon özelliklerine sahip olması gerektiği Karayolu Teknik Şartnamesinde belirtilmiştir. Bu çalışmada, şartnamede aşınma tabakası için tanımlanan Tip-1 gradasyon zarfındaki alt, orta ve üst limit değerlerinin yanı sıra alt ve üst limitlerin belirli oranda ötelenmesiyle oluşturulan beş farklı agrega gradasyonunun bitümlü karışımların mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır. Belirlenen beş gradasyon ile hem gradasyon zarfı dahilindeki değişimlerin etkisi hem de gradasyon zarfının genişleme potansiyeli incelenmiştir. Bu amaç doğrultusunda farklı agrega gradasyonları ile oluşturulan bitümlü karışımlarla Marshall tasarımları yapılmıştır. Test sonuçlarına göre agrega gradasyonu incelendiğinde karışımın optimum bitüm ihtiyacı artmıştır. Gradasyon incelendiğinde, optimum bitüm oranındaki bitümlü dolu boşluk oranının (Vf) ve agregalar arasındaki boşluk yüzdesinin (VMA) arttığı, birim ağırlığın (Dp) azaldığı tespit edilmiştir. Aynı zamanda, Tip-1 için tanımlanan gradasyon zarfının genişleme potansiyelinin olabileceği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Bitümlü karışım, marshall tasarımı, gradasyon, marshall katsayısı, aşınma tabakası.

## Investigation of the Effects of Aggregate Gradation Variations on the Mechanical Properties of Bituminous Hot Mixtures Used in Wearing Course

### ABSTRACT

Gradation properties of the bituminous mixture in Turkey, according to the layer to be used, are specified in the Highway Technical Specification. In this study, it was aimed to investigate the effects of five different aggregate gradations created as lower, middle and upper limits as well as by offsetting the lower and upper limits of the Type-1 gradation envelope defined for wearing course in the specification on the mechanical properties of bituminous mixtures. With the determined five gradations, both the effect of variations in the gradation envelope and the expansion potential of the gradation envelope were investigated. For this purpose, Marshall designs were applied on the bituminous mixtures created with different aggregate gradations. According to the test results, optimum bitumen requirement of the mixture increased as the aggregate gradation got thinner. It has been determined that as the gradation gets thinner, the void filled with bitumen ratio (Vf) and the percentage of voids in mineral aggregate (VMA) increase, while the unit weight (Dp) decreases at the optimum bitumen ratio. At the same time, it was observed that the gradation envelope defined for Type-1 may have an expansion potential.

**Keywords:** Bituminous mixture, Marshall design, gradation, marshall quotient, wearing course.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Agrega, bitümlü karışımların temel bileşenidir. Bitümlü karışımların mekanik özellikleri karışımda kullanılan agreganın orijini, şekli, yüzey yapısı gibi karakteristiklerinden oldukça etkilenir [1-4]. Bitümlü karışımlarda kullanılan agrega, şartnamelerce belirlenen parçalanma direnci, yassılık indeksi, porozite, cilalanma değeri, soyulma mukavemeti, plastisite indeksi gibi özellikler bakımından sınır değerlere uyması gerekir. Agregalarda aranan özellikler ve bunlara ait sınır değerler hem farklı ülkelerde kullanılan şartnamelerde

hem de bitümlü karışımın kullanılacağı tabakalara göre değişkenlik gösterir. Bunlarla birlikte, karışımda dengeli hacimsel ve mekanik özelliklerin uygun bir agrega gradasyonu ile elde edilebileceği unutulmamalıdır [5].

Dünya genelinde birçok kurum tarafından bitümlü karışımlarda kullanılacak agrega gradasyonu için sürekli, tek boyutlu, kesikli yapıda olmak üzere farklı gradasyonlar belirlenmiştir. Geleneksel asfalt betonunda yoğun-sürekli agrega gradasyonu tercih edilir ve bu gradasyon eğrisi tek bir hat olarak değil, alt ve üst limitlere sahip ve “gradasyon zarfı” olarak anılan bir aralık halinde verilir [6-9]. Türkiye’de de Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından aşınma, binder ve bitümlü temel tabakalarında kullanılacak agregalara ait dane

\*Sorumlu Yazar : ( Corresponding Author)  
e-posta : darслан@ktun.edu.tr

büyüklüğü dağılımı, alt ve üst limitlere sahip olan gradasyon zarfı olarak belirlenmiştir [10]. Gerek yurtiçi gerekse yurtdışı çalışmalarda, araştırmacıların gradasyon zarflarındaki orta hattı yani ortalama gradasyon değerlerini tercih ettikleri görülmektedir [2, 11-16]. Agregası, bitüm ve karışımla ilgili diğer özellikler aynı kalsa dahi, agrega gradasyonu olarak zarftaki ortalama değerlerden farklı gradasyon kullanılması ile karışım özelliklerinin değişim göstereceği açıktır. Bu suretle; karışımın aynı trafik ve çevre etkilerine vereceği tepkiler, sahip olacağı değişik mekanik özellikler temelinde farklılık gösterecektir.

Gradasyon zarfında tanımlanan alt-üst limitler ve ortalama değerlerin kullanıldığı bitümlü karışımlarda, gradasyonun üst limitine yaklaştıkça karışımın optimum bitüm ihtiyacında artış meydana geldiği tespit edilmiştir [17-19]. Pratikte elde edilen bu sonuç teorik olarak da beklenen bir durumdur. Şöyle ki, gradasyon zarfında üst limite doğru hareket edildikçe agrega dane boyutu azalır. Daha küçük dane boyutlu agrega grubu ile oluşturulan karışımda, agreganın toplam yüzey alanı daha fazla olacağından bu yüzeyleri kaplamak için daha fazla bitüme ihtiyaç olacaktır. Bunun yanı sıra, çalışmalarda agrega gradasyonunun üst limite yaklaşmasıyla agregalar arası boşluk yüzdesinin (VMA) ve akmanın da artış gösterdiği, ancak bitümle dolu boşluk oranında (Vf) en düşük değer alt limit gradasyonla [17] elde edildiği belirtilirken diğer çalışmada ise [18] en düşük Vf değerinin ortalama gradasyon ile elde edildiği gözlenmiştir. Tüm parametreler bir arada değerlendirildiğinde; genel inanın aksine, en iyi sonuçların ortalama gradasyon ile elde edilmediği yorumu dikkat çekicidir [17]. Bitümlü karışımda kullanılan agregaya ait dane boyutundaki küçülmenin, karışımın VMA değerinde azalma trendine yol açtığı raporlanmıştır [20] ve bu durum önceki çalışma sonuçları [17, 18] ile çelişki oluşturmaktadır. Diğer bir çalışmada, farklı agrega gradasyonlarının karışımın VMA, Vf ve hava boşluğu yüzdesi (Vh) değerlerinde farklı yönlerde değişimler meydana getirdiği rapor edilmiştir [21]. Bitümlü karışımların önemli özelliği olan stabilite bakımından literatür çalışmaları farklı sonuçlardan bahsetmektedir. En yüksek stabiliteye ortalama gradasyon değerleri ile ulaşıldığı gözlenen çalışmaların yanı sıra [17, 18] gradasyon zarfındaki üst limit değerlerin kullanıldığında erişildiğini belirten çalışmalar [22, 23] mevcuttur. Bitümlü karışımların yoğunluklarıyla ilgili de farklı sonuçlarla karşılaşılmaktadır. Agregası gradasyonu incelendiğinde yani gradasyon zarfında üst limite doğru yaklaşıldıkça bitümlü karışımın yoğunluğunun azaldığı bildirilirken [18] aynı değişimin yoğunluk değerini arttırdığı görülmektedir [23]. Farklı agrega türleri kullanılarak (kireçtaşı, dolomit, bazalt) gradasyondaki değişimin bitümlü karışımların fiziksel özellikleri üzerindeki etkisinin incelendiği çalışmada sadece optimum bitüm oranı ve Vf de benzer değişimler elde edilmiş (her ikisi de karışımda kullanılan agrega dane boyutu azaldıkça artış göstermiş); stabilite, yoğunluk, hava boşluğu, akma ve VMA'da ise kullanılan

agrega türüne bağlı olarak birbirleri ile ilişki kurulamayan değişimlerin meydana geldiği görülmüştür [24]. Benzer durum bazalt, riyolit ve kireçtaşı kullanılan farklı bir çalışmada da görülmüştür. Kaba ve ince gradasyonlu karışımlarda bazalt ile elde edilen optimum bitüm oranları neredeyse aynı seviyede bulunmuştur. Riyolit ve kireçtaşı ise ince gradasyonla yüksek, kaba gradasyonla düşük optimum bitüm oranları elde edilmiştir. Bazalt ve kireçtaşı ile ince gradasyonlu karışımda yüksek stabilite elde edilirken, riyolit ile kaba gradasyonlu karışım ile yüksek stabilite elde edilmiştir [4]. Bitümlü karışımların mekanik özellikleri üzerindeki agreganın dane boyutu etkisini değerlendirebilmek için, şartnamelerin gradasyon için belirlediği sınırların dışında meydana gelen değişimler de incelenmiştir. Şartname gradasyon sınırlarının aşılması durumunda dahi başarılı fiziksel özelliklerin elde edilebileceği; bu suretle, şartname gradasyon zarfının genişletilebileceği yorumlanmıştır [23].

Bu çalışmada, bitümlü karışımların mekanik özellikleri üzerinde agreganın sahip olduğu gradasyon etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Farklı agrega gradasyonları için 2013 yılı Karayolu Teknik Şartnamesinde (KTŞ) aşınma tabakası için belirtilen Tip-1 gradasyon zarfı esas alınmıştır. Bu zarfa ait ortalama değerler, alt ve üst limit değerler kullanılarak şartname sınırları dahilindeki gradasyon değişimlerinin etkisi tespit edilmeye çalışılmıştır. Bununla birlikte, gradasyon zarfındaki alt limit değerlerinin % 7 oranında azaltılmasıyla ve üst limit değerlerinin % 7 oranında arttırılmasıyla elde edilen iki farklı gradasyon daha incelemeye dahil edilmiştir. Bu suretle, gradasyon zarfının genişleme potansiyeli ve/veya gradasyonda limitlerin dışına çıkıldığında bitümlü karışımlarda meydana gelebilecek değişimlerin öngörülmesi amaçlanmıştır. Beş farklı agrega gradasyonu ile hazırlanan bitümlü karışımlar ile Marshall tasarımları yapılmıştır. Bitümlü karışımlardaki agrega gradasyon etkisi; stabilite, akma, birim ağırlık (Dp), boşluk oranı (Vh), bitümle dolu boşluk oranı (Vf), agregalar arasındaki boşluk oranı (VMA), Marshall katsayısı sonuçlarına göre değerlendirilmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL and METHOD)

### 2.1. Materyal (Material)

Bitümlü karışımlarda agrega olarak kireçtaşı kullanılmıştır. Özgül ağırlık değerleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çalışmada 50/70 penetrasyon dereceli bitüm kullanılmıştır. Özellikleri Çizelge 2'de sunulmuştur.

**Çizelge 1.** Kireçtaşına ait özgül ağırlık değerleri (Specific gravity values of limestone)

Agrega grubu	Hacim özgül ağırlık	Zahiri özgül ağırlık
Kaba agreg	2,759	2,781
İnce agreg	2,727	2,76
Filler	-	2,764

**Çizelge 2.** 50/70 penetrasyon dereceli bitüme ait özellikler (Properties of 50/70 penetration bitumen)

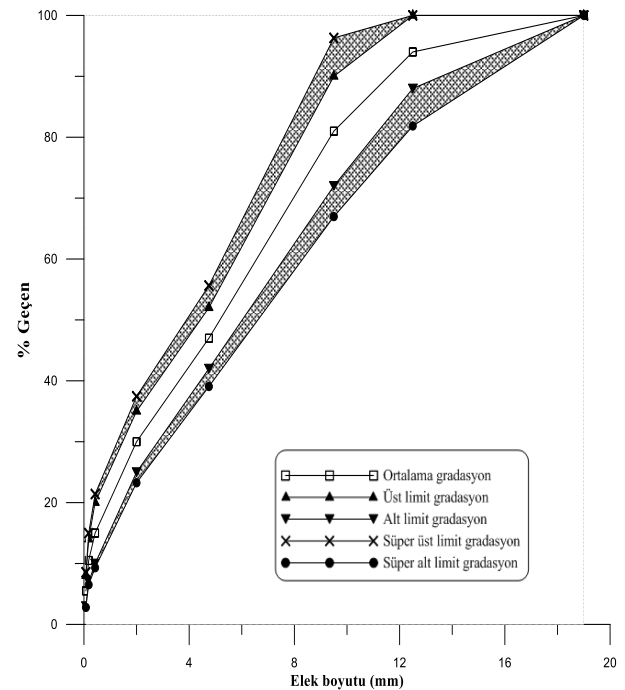
Özellik	Değer	Standart
Penetrasyon (25°C, 100 g, 5 s), 0,1 mm	55,3	ASTM D5
Yumuşama noktası, °C	51,8	ASTM D36
Parlama noktası, °C	283	BS EN 22592
Özgül ağırlık, 25°C	1,01	ASTM D70
Viskozite (135°C), Pa.s	0,295	ASTM D4402
Viskozite (150°C), Pa.s	0,184	ASTM D4402

## 2.2. Metot (Method)

Agrega gradasyonundaki değişimin bitümlü karışımların mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemek üzere Marshall tasarım yöntemi (TS EN 12697-34) kullanılmıştır. Agreg gradasyonu olarak 2013 Karayolu Teknik Şartnamesinde aşınma tabakası için tanımlanan Tip-1 gradasyon zarfı temel alınmıştır. Tip-1 zarfının sınırları içinde kalan üç farklı agreg gradasyonu kullanılmıştır. Bunlara ilave olarak, zarf sınırları dışında bulunan iki gradasyon daha çalışmaya dahil edilerek toplamda beş farklı gradasyon etkisi incelenmiştir. Bu suretle, Tip-1 gradasyon zarfının genişleme potansiyelinin ve limit dışı gradasyon kullanılması durumunda kaplamada meydana gelebilecek olumlu/olumsuz değişimlerin de öngörülmesi hedeflenmiştir. Çalışmada kullanılan agreg gradasyonları Şekil 1’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere zarftaki ortalama değerlerin, üst limit değerlerinin ve alt limit değerlerinin kullanıldığı gradasyonlar sırasıyla “ortalama gradasyon”, “üst limit gradasyon” ve “alt limit gradasyon” olarak isimlendirilmiştir. Zarfa ait üst limit değerlerinin % 7 oranında arttırılmasıyla oluşturulan gradasyona “süper üst limit gradasyon” ismi verilmiştir. “süper alt limit gradasyon” ise zarfa ait alt limit değerlerinin % 7 oranında azaltılmasıyla elde edilmiştir. Şeklin ortasında bulunan ve taralı olmayan alan teknik şartnamenin izin verdiği sınırları göstermektedir. Şekildeki taralı alanlar ile bu çalışma kapsamında incelenen limit dışındaki gradasyonların teknik şartnamedeki sınır değerlerden ne kadar farklılaştığı görülmektedir.

Marshall briketlerinde kullanılan bitüm oranları agreg ağırlığının yüzdesi olmak üzere % 4, % 4,5, % 5 ve % 5,5’tur. Briketlerde 1150 gr agreg kullanılmıştır. Her bir bitüm içeriği için üç adet briket imal edilmiştir. Sonuçlar, aynı bitüm içeriğine sahip üç brikete ait değerlerin ortalaması olarak verilmiştir. Agreg ile bitümün karıştırma işlemi 2-3 dakikada tamamlanmıştır.

Karıştırma sıcaklığı  $150 \pm 5^\circ\text{C}$ ’dir. Karıştırmanın hemen ardından sıkıştırma işlemi için 4” çapındaki kalıplara koyulmuşlardır. Sıkıştırma, Marshall tokmağı ile numunenin her bir yüzüne 75 darbe vurularak yapılmıştır. Sıkıştırma sonrasında kalıplardan çıkarılan briketler bir gün bekleldikten sonra Marshall deneyine tabii tutulmuşlardır. Briketlerin deney öncesinde havada, suda ve doymun yüzey kuru ağırlıkları ölçülmüştür.  $60^\circ\text{C}$ ’deki su banyosunda 30 dakika bekletilen briketlere 2 inç/dakika hızla yükleme yapılarak stabilite ve akma değerleri ölçülmüştür.



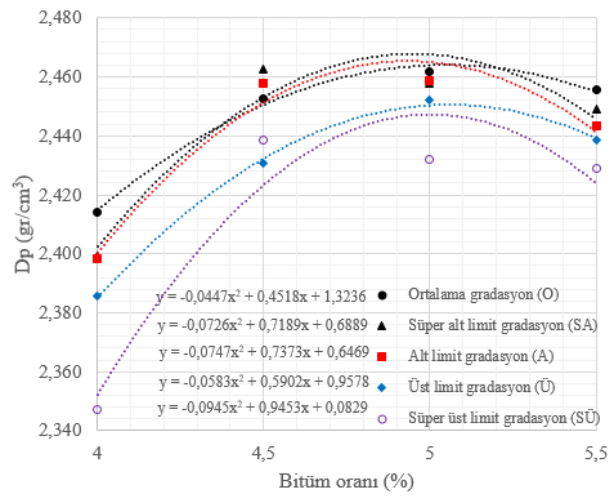
**Şekil 1.** Karayolu Teknik Şartnamesi (KTS) limitleri ve limit dışı gradasyonlar (Highway Technical Specification (HTS) limits and gradations outside the limit)

### 3. TEST SONUÇLARI VE TARTIŞMA (TEST RESULTS AND DISCUSSION)

Bitümlü karışımlar agrega, bitüm ve boşluktan meydana gelir. Bu üç bileşenin birbirlerini hacimsel olarak nasıl etkilediklerinin belirlenmesi gerekir. Bitümlü karışımlarda agrega gradasyonunun etkisiyle meydana gelen değişimler aşağıda başlıklar halinde incelenmiştir.

#### 3.1. Agrega Gradasyonunun Birim Ağırlık (Dp) Üzerindeki Etkisi (Effect of Aggregate Gradation on Unit Weight (Dp))

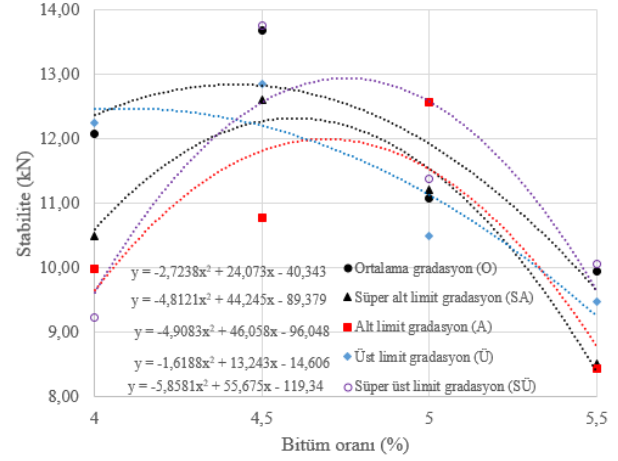
Çalışmada kullanılan farklı agrega gradasyonları için Marshall tasarımlarından elde edilen birim ağırlıktaki değişimler ve ilişkili yaklaşım (regresyon) fonksiyonları Şekil 2’de verilmiştir. Çalışmada kullanılan tüm farklı agrega gradasyonlarında, briketlerdeki bitüm oranı arttıkça birim ağırlık değerleri beklendiği üzere önce artmış sonrasında azalmıştır. Dp değerleri 2,347 ile 2,463 arasında değişim göstermiştir. % 4,5 hariç diğer tüm bitüm oranlarında en yüksek Dp değerleri ortalama gradasyonun kullanıldığı briketlerde elde edilmiştir. Agrega gradasyonu olarak alt, orta ve üst sınırların kullanıldığı çalışmalarda en yüksek Dp değerlerinin ortalama gradasyon ile elde edildiği ile ilgili literatür çalışmaları mevcuttur [24, 25]. Bununla birlikte, briketlerde kullanılan agrega gradasyonunun incelenmesiyle daha yüksek ve/veya düşük Dp değerlerinin elde edildiği de raporlanmıştır [4, 24]. Şekil 2 incelendiğinde ortalama gradasyona kıyasla daha küçük dane boyutlarına sahip agrega kullanılmasıyla (Ü ve SÜ gradasyonları) Dp değerlerinde azalma yönünde daha fazla değişimin meydana geldiği görülmektedir. Bununla birlikte, daha büyük dane boyutuna sahip agrega granülometresi kullanılması durumunda ise (A ve SA gradasyonları) Dp’de oluşan değişimin küçük olduğu, yani ortalama gradasyondan elde edilen Dp değerlerine yakın değerler elde edildiği tespit edilmiştir.



Şekil 2. Agrega gradasyonunun Dp üzerindeki etkisi (Effect of aggregate gradation on Dp)

#### 3.2. Agrega Gradasyonunun Stabilité Üzerindeki Etkisi (Effect of Aggregate Gradation on Stability)

Bitümlü karışımların deformasyonlara karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanan stabilite değeri üzerinde agrega gradasyonunun etkisi Şekil 3’te sunulmuştur.



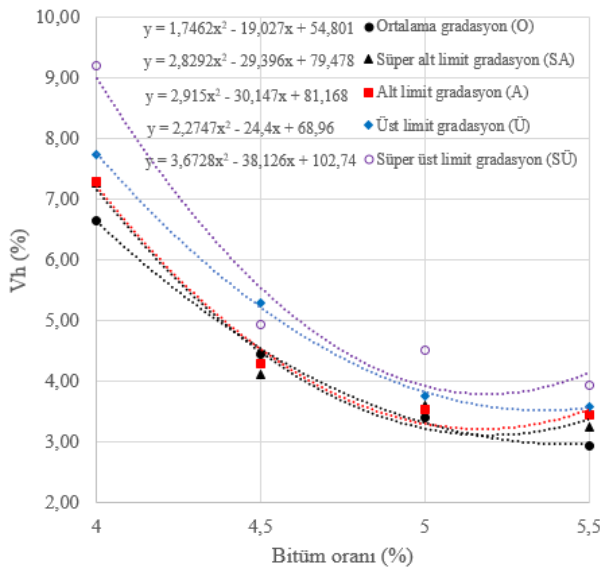
Şekil 3. Agrega gradasyonunun stabilite üzerindeki etkisi (Effect of aggregate gradation on stability)

Şekil 3’te tüm agrega gradasyonları için oluşturulan ve stabilite değişimlerini gösteren grafiklerde birer tepe noktasının oluştuğu görülmektedir. Yani, bitüm oranı arttıkça stabilite değerleri önce artmış sonrasında azalmıştır. En yüksek stabilite değeri % 4,5 bitüm içeriğinde 13,77 kN olarak süper üst limit agrega gradasyonu ile elde edilmiştir. Literatürde en yüksek stabilite değerinin gradasyon zarfındaki üst limit değerlerin kullanıldığı briketlerde elde edildiği belirtilmiştir [23]. En düşük stabilite değeri ise alt limit gradasyonundaki %5,5 bitüm oranında 8,45 kN (861,4 kg) olarak elde edilmiş olup bu değer dahi Karayolu Teknik Şartnamesinde [10] aşınma tabakası için optimum bitüm içeriğinde sağlanması gereken minimum şart olan 900 kg (8,83 kN) değerine oldukça yakındır. Aynı zamanda, alt limit gradasyon ile 12-13 kN’luk (1223-1459 kg) stabilite değerlerinin elde edildiği Şekil 3’te görülmektedir. Bu suretle, çalışmada kullanılan bütün agrega gradasyonlarının KTS’de stabilite ile ilgili verilen minimum şartı sağlayacağı öngörülmektedir. Maharjan ve Tamrakar tarafından yapılan çalışmada da en düşük stabilite değeri alt limit gradasyonda elde edilmiştir [23]. Alt limit gradasyon hariç diğer gradasyonlarda en yüksek stabilite değeri % 4,5 bitüm oranında elde edilmiştir. Alt limit gradasyon için en yüksek stabilite değeri olan 12,57 kN ise %5 bitüm içeriğinde meydana gelmiştir. Yapılan çalışmada ortalama gradasyon ile süper üst limit gradasyonun % 4,5, % 5 ve % 5,5 bitüm içeriklerinde oldukça yakın stabilite değerleri sağladığı tespit edilmiştir. Bu iki gradasyon için % 4,5 ve % 5,5 bitüm içeriklerinde elde edilen stabilite değerlerinin en yüksek değerler olduğu da görülmektedir. Stabilité üzerinde gradasyon etkisinin

incelendiği çalışmalarda farklı bulguların ortaya konulduğu tespit edilmiştir. Şöyle ki, en yüksek stabilitenin ortalama gradasyon ile elde edildiği belirtilen çalışmanın [18] yanı sıra diğer çalışmalarda [22, 25] en yüksek stabiliteye daha küçük agrega dane boyu dağılımı ile yani üst limit gradasyon ile ulaşılmıştır. Beş farklı agrega gradasyonunun incelendiği diğer bir çalışmada ise bazalt ve kireçtaşının ayrı ayrı kullanıldığı briketlerde en yüksek stabilite değerleri görece en ince agrega gradasyonu ile elde edildiği belirlenmiştir [4]. Aynı çalışmada [4], riyolit ile en yüksek stabilitenin en kaba agrega gradasyonu ile elde edilmesi de dikkat çekicidir.

### 3.3. Agrega Gradasyonunun Boşluk Oranı (Vh) Üzerindeki Etkisi (Effect of Aggregate Gradation on Air Void Ratio (Va))

Şekil 4'te farklı gradasyonların briketlerin boşluk oranı değerlerinde meydana getirdiği değişimler sunulmuştur.

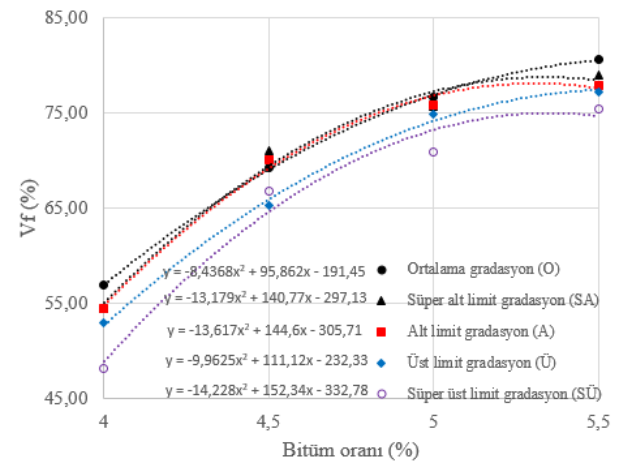


Şekil 4. Agrega gradasyonunun Vh üzerindeki etkisi (Effect of aggregate gradation on Va)

Grafikler incelendiğinde bitüm içeriği arttıkça boşluk oranlarının azaldığı görülmektedir. Grafiklerdeki bu trend Marshall tasarımında boşluk oranı için beklenen durumdur. En düşük boşluk oranları % 4,5 bitüm oranı hariç olmak üzere ortalama gradasyon ile elde edilmiştir (6,6-2,95% arasında değişim meydana gelmiştir). En yüksek boşluk değerleri süper üst limit gradasyonun kullanıldığı briketlerde gözlenmiştir. Birim ağırlık ve boşluk değişkenlerinin birbirleriyle ilişkili olmasından dolayı Dp değişimindeki benzer durum boşluk oranı için de elde edilmiştir. Şöyle ki; ortalama gradasyona kıyasla daha küçük boyutlu agrega kullanılmasıyla (Ü ve SÜ gradasyonları) briketlerde daha fazla boşluk oluşmuştur. Briketlerde ortalama gradasyona kıyasla daha büyük boyutlu agrega gradasyonu kullanıldığı durumlarda ise (A ve SA gradasyonları) boşluk oranları artsa da, meydana gelen artışın Ü ve SÜ gradasyonlarına kıyasla daha düşük olduğu görülmüştür (Şekil 4). Deneysel

sonuçlarına göre agrega gradasyonu ile boşluk oranı değişimi arasında doğrudan bir ilişki kurulamasa da (dane boyutu küçüldükçe/büyüdüğü boşluk oranı azalır/artar gibi), Dp ve Vh üzerinde Ü ve SÜ gradasyonların daha büyük değişim oluşturdukları yani daha etkili oldukları belirlenmiştir. Literatür çalışmalarında agrega dane büyüklüğü ile boşluk oranı arasında kabul gören net bir ilişki kurulamamıştır. Farklı gradasyonların boşluk oranı üzerinde karmaşık değişimler meydana getirdiği tespit edilmiştir [21, 23, 24].

### 3.4. Agrega Gradasyonunun Bitümlü Dolu Boşluk Oranı (Vf) Üzerindeki Etkisi (Effect of Aggregate Gradation on Void Filled with Bitumen Ratio (Vf))



Şekil 5. Agrega gradasyonunun Vf üzerindeki etkisi (Effect of aggregate gradation on Vf)

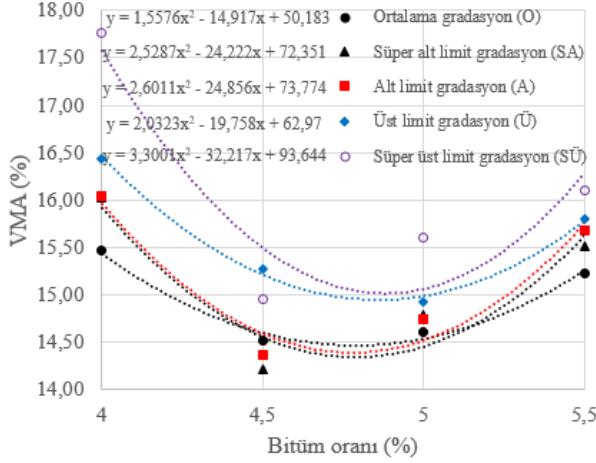
Bitümlü dolu boşluk oranı (Vf) değerlerinin agrega gradasyonlarına bağlı değişimleri Şekil 5'te görülmektedir. Tüm agrega gradasyonlarında briketlerdeki bitüm içeriği arttıkça Vf de artış göstermiştir. Alt limit ve süper alt limit gradasyonlarına sahip briketlerde elde edilen Vf değerleri ortalama gradasyonun kullanıldığı briketlere oldukça yakındır. En düşük Vf değerleri süper üst limit gradasyon ile hazırlanan briketlerde görülmüştür. Bitümlü dolu boşluk oranı, sıkıştırılmış bitümlü karışımda agrega daneleri arasındaki boşluğun yüzde kaçının bitümlü dolu olduğunu ifade eder. Buna göre, ortalama gradasyonun kullanıldığı briketlerde agrega daneleri arasındaki boşluğun bitümlü dolu olan yüzdesi diğer gradasyonların kullanıldığı briketlere kıyasla daha fazladır. Boşluksuz bir yapı hem daha yüksek dayanım hem de bitümün daha az yaşlanmaya maruz kalması bakımından arzu edilir. Ancak hiç boşluk olmaması durumunda, özellikle sıcak havalarda üstyapıda kasma problemleri meydana gelerek trafik güvenliği bakımından olumsuz sonuçlara yol açabilir. Bu yüzden kaplama tabakasında bir miktar boşluk kalması istenen ve aynı zamanda KTŞ (2013)'te sağlanması gereken kriter olarak belirtilmiştir. Şekil 4 ve Şekil 5 bir arada incelendiğinde ortalama gradasyonun



kullanıldığı briketlerdeki bitümle dolu boşluk oranı yüksek olsa da KTS'nin belirlemiş olduğu boşluk kriteri bakımından problem oluşmayacağı anlaşılmaktadır.

### 3.5. Agregra Gradasyonunun Agregalar Arasındaki Boşluk Oranı (VMA) Üzerindeki Etkisi (Effect of Aggregate Gradation on Voids in Mineral Aggregate Ratio (VMA))

Sıkıştırılmış bitümlü karışımlarda agregra daneleri arasındaki boşluk yüzdesinin (VMA) agregra gradasyonuna bağlı değişimleri Şekil 6'da sunulmuştur.

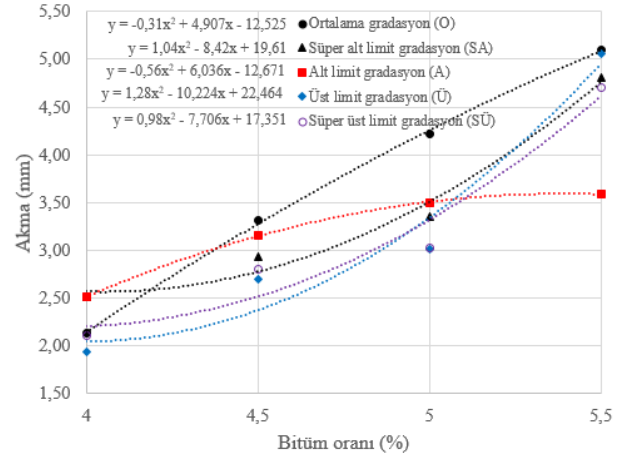


Şekil 6. Agregra gradasyonunun VMA üzerindeki etkisi (Effect of aggregate gradation on VMA)

Sıkıştırılmış bitümlü karışımlarda uygun bitüm film kalınlığının elde edilebilmesi için VMA'nın belirli bir minimum değerden az olmaması istenir. Bu suretle, kaplamada yeterli durabilite elde edilebilir. VMA'nın minimum değerden daha az olması agregra danelerinin yüzeylerinde ince bitüm filmi kalınlığına öncülük eder. Bu da, kaplama tabakasının düşük durabiliteye sahip olmasına yol açacaktır. Bu durum, kaplamanın zaman içinde trafik ve çevresel etkilere yeterli direnci gösteremeyip beklenenden daha önce hizmet ömrünün sonuna gelmesiyle sonuçlanacaktır. KTS (2013)'te aşınma tabakası için optimum bitüm içeriğinde VMA'nın % 14-16 arasında olması şart koşulmuştur. VMA'nın % 16'yı aşması durumunda agregralar arasındaki içsel sürtünme olumsuz etkilenecek stabilite azalmasına yol açacaktır. Şekil 6 incelendiğinde % 14'ten küçük herhangi bir değer olmadığı görülür. % 16'dan büyük VMA değerleri % 4 bitüm oranında elde edilmiştir. Şekil 6'da agregra gradasyonu incelendiğinde VMA değerlerinin artması yönünde bir eğilim mevcuttur. Literatür çalışmalarında da daha ince agregra gradasyonu kullanılan briketlerde daha yüksek VMA değerleri elde edilmiştir [17, 18].

### 3.6. Agregra Gradasyonunun Akma Üzerindeki Etkisi (Effect of Aggregate Gradation on Flow)

Marshall testinde yük uygulanıp kırılmanın olduğu anda briketlerde düşey yönde meydana gelen deformasyon olarak tanımlanan akmanın farklı gradasyonlar etkisindeki değişimi Şekil 7'de verilmiştir. Bu testte, diğer değişkenlere kıyasla, akma değerlerinin değişim trendi sahip olduğu sofistike yapıya bağlı olarak daha karmaşık yapıdadır. Ancak, genel olarak bitüm içeriği arttıkça akma değerlerinin artış göstermesi beklenir.

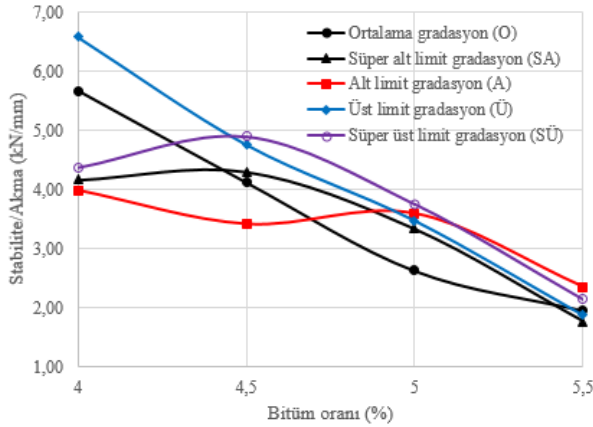


Şekil 7. Agregra gradasyonunun akma üzerindeki etkisi (Effect of aggregate gradation on flow)

Şekil 7'de de görüldüğü üzere çalışmada kullanılan tüm agregra gradasyonları için beklenen durum gerçekleşmiş olup briketlerde kullanılan bitüm oranı arttıkça akma değerlerinin artış gösterdiği tespit edilmiştir. Agregra gradasyonuna bağlı olarak akma değerlerinin tutarlı bir değişim göstermediği literatürde ifade edilmiştir. Gradasyonun incelenmesiyle akma değerlerinin arttığı ifade edilirken, bu yorumu desteklemeyen çalışmalar da mevcuttur [18, 22, 23].

Bitümlü karışıma ait stabilite değerinin yüksek olmasının yanı sıra akma değerinin de düşük olması, kaplamada yüksek deformasyon direnci sağlanması bakımından arzu edilir. Bu amaçla, Marshall katsayısı olarak adlandırılan ve stabilitenin akma oranı olarak hesaplanan bir katsayı (Marshall katsayısı) bazı çalışmalarda kullanılmıştır [26, 27]. Daha yüksek Marshall katsayısı, briketin daha yüksek deformasyon direncine sahip olduğu ile ilişkilendirilmiştir. Şekil 8'de Marshall testlerinden elde edilen stabilite ve akma değerlerini kullanarak "stabilite/akma" olarak Marshall katsayıları hesaplanmıştır. Özellikle % 4,5-% 5 bitüm aralığında Ü ve SÜ gradasyonları ile yüksek Marshall katsayıları elde edilmiştir.





Şekil 8. Marshall katsayıları (Marshall quotients)

beklenen bir durumdur. Literatür çalışmalarında da daha ince dane boyutuna sahip agregaların kullanıldığı bitümlü karışımlarda optimum bitüm oranının daha fazla olduğu ifade edilmiştir [17-19].

Çalışmada incelenen tüm farklı agrega gradasyonları için optimum bitüm oranlarına karşılık gelen Marshall parametrelerine ait değerler, ilgili yaklaşım fonksiyonları ile hesaplanarak Çizelge 4'te toplu halde sunulmuştur.

Çizelge 4'teki tüm değerler 2013 KTŞ'de belirtilen sınır değerleri sağlamaktadır. Gradasyon incelidikçe briketlerin birim ağırlığında azalma, VMA'da artma ve Vf değerlerinde genel olarak bir artma meydana gelmiştir. En düşük stabilite değeri 11,39 kN olarak elde edilmiş olup şartname limiti olan 8,8 kN'un (900 kg) üzerindedir. En yüksek akma değeri ortalama gradasyon

Çizelge 3. Optimum bitüm oranları (Optimum bitumen ratios)

Gradasyon türü	Yaklaşım fonksiyonu	Optimum bitüm oranı (%)
O	$y = 1,7462x^2 - 19,027x + 54,801$	4,68
SA	$y = 2,8292x^2 - 29,396x + 79,478$	4,64
A	$y = 2,915x^2 - 30,147x + 81,168$	4,65
Ü	$y = 2,2747x^2 - 24,4x + 68,96$	4,91
SÜ	$y = 3,6728x^2 - 38,126x + 102,74$	4,96

Çizelge 4. Gradasyonlar için belirlenen optimum bitüm oranlarındaki Marshall parametreleri (Marshall parameters at the optimum bitumen ratios determined for the gradations)

Marshall parametresi	Gradasyon türü				
	O	SA	A	Ü	SÜ
Optimum bitüm oranı (%)	4,68	4,64	4,65	4,91	4,96
Vh (%)	4	4	4	4	4
Dp (gr/cm <sup>3</sup> )	2,459	2,462	2,46	2,45	2,447
Stabilite (kN)	12,66	12,32	11,99	11,39	12,69
Vf (%)	72,40	72,30	72,25	73,09	72,79
VMA (%)	14,49	14,4	14,44	14,95	15,04
Akma (mm)	3,65	2,93	3,29	3,12	3,24
Stabilite/Akma (kN/mm)	3,65	4,10	3,40	3,75	3,90

Optimum bitüm oranı, % 4 hava boşluğuna karşılık gelen bitüm yüzdesi olarak hesaplanmıştır. Farklı agrega gradasyonları için optimum bitüm oranları Şekil 4'teki grafiklere ait yaklaşım fonksiyonlarına göre hesaplanarak Çizelge 3'te sunulmuştur.

Çizelge 3'te görüldüğü üzere optimum bitüm oranı agrega gradasyonu incelidikçe artış göstermiştir. En düşük optimum bitüm oranı % 4,64 olarak süper alt limit gradasyonda, en yüksek optimum bitüm oranı % 4,96 olarak süper üst limit gradasyonda elde edilmiştir. Gradasyon zarfında süper üst limit gradasyona doğru ilerledikçe dane boyutunun azalmasına bağlı olarak toplam agrega yüzey alanı artar. Daha fazla yüzey alanını kaplamak için daha fazla bitüm gerekeceğinden agrega gradasyonu incelidikçe optimum bitüm oranının artması

ile edilmiştir. Marshall tasarımlarında akma ölçümleri arasındaki tutarlılık diğer ölçümlere kıyasla daha düşüktür. KTŞ'de bulunmasa da, Marshall katsayısı bakımından alt limit gradasyon hariç ortalama gradasyona kıyasla daha yüksek değerler elde edilmiştir. Bu bulguda ortalama gradasyon ile elde edilen yüksek akma değerinin etkisi büyüktür.

#### 4. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ (CONCLUSION)

Bu çalışma kapsamında farklı agrega gradasyonlarının bitümlü karışımların mekanik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. KTŞ (2013)'te aşınma tabakası için verilen Tip 1 gradasyon zarfına ait ortalama, alt limit ve üst limit gradasyonlarının yanı sıra alt ve üst limitlerin

% 7 oranında ötelenmesiyle oluşturulan gradasyonlar olmak üzere toplamda beş farklı gradasyon etkisi Marshall tasarım sonuçları kapsamında incelenmiş ve aşağıdaki bulgular elde edilmiştir;

- Briketlerde kullanılan agrega gradasyonu incelendiğinde (SÜ gradasyonuna yaklaşıldıkça) optimum bitüm oranı artış göstermiştir.
- Dp, Vh, Vf ve VMA'da agrega gradasyonunun değişmesiyle elde edilen değerler arasında büyük değişimler görülmemiştir. Ortalama gradasyon eğrisinin kullanıldığı briketlerden elde edilen değerlere göre kıyaslama yapıldığında Ü ve SÜ gradasyonlarıyla oluşan değişimlerin A ve SA gradasyonlarıyla oluşan değişimlerden daha fazla olduğu belirlenmiştir.
- Optimum bitüm oranındaki değerler incelendiğinde agrega gradasyonunun incelenmesiyle Vf ve VMA'nın arttığı, Dp'nin azaldığı tespit edilmiştir. En yüksek stabilite değerleri ise ortalama ve SÜ gradasyonlarıyla elde edilmiştir.
- Çalışmada kullanılan tüm agrega gradasyonlarıyla optimum bitüm oranlarında elde edilen Marshall parametrelerinin KTŞ (2013)'nin ilgili kriterlerini sağladığı tespit edilmiştir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçların genelleştirilebilmesi için deney sayısının artırılmasına ihtiyaç vardır. Ancak, çalışma özelinde KTŞ (2013)'te aşınma tabakası Tip 1 için tanımlanan gradasyon zarfının genişleme potansiyelinin olabileceği görülmüştür.

#### SİMGELER VE KISALTMALAR (SYMBOLS AND ABBREVIATIONS)

KTŞ	Karayolu Teknik Şartnamesi
Dp	Birim ağırlık
Vh	Hava boşluğu oranı
Vf	Bitümle dolu boşluk oranı
VMA	Agregalar arasındaki boşluk oranı

#### ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

#### YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

**Deniz ARSLAN:** Deneylerin uygulanması, elde edilen sonuçların yorumlanması ve makalenin hazırlanması.

**Hüseyin KÖSE:** Deneylerin uygulanması, elde edilen sonuçların yorumlanması ve makalenin hazırlanması.

#### ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Namlı R., Görgülü M., "Değişik Tipteki Agrega ve Bağlayıcının Sıcak Karışım Asfaltın Mekanik Özelliklerine Etkisi", *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, Özel Sayı 32: 1054-1065, (2021).
- [2] Morova N., Terzi S., "Kolemanit atıkların sıcak karışım asfalt betonda agrega olarak değerlendirilmesi", *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 19(2): 8-15, (2015).
- [3] Bessa I.S., Branco V.T.F.C., Soares J.B., Neto J.A.N., "Aggregate Shape Properties and Their Influence on the Behavior of Hot-Mix Asphalt", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 0401421, (2014).
- [4] Tessema G.T., Ponnurangam P., "Investigation the Effect of Aggregates on Hot Mix Asphalt (HMA) Performance - A Case Study", *International Journal Of Engineering Research And Development*, 15(1): 31-40, (2019).
- [5] Garcia V.M., Barros L., Garibay J., Abdallah I., "Effect of Aggregate Gradation on Performance of Asphalt Concrete Mixtures", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 04020102, (2020).
- [6] Wu J., Niu Z., Chen H., "Effect of aging on low-temperature crack resistance and water stability of polyester fiber asphalt mixture", *Materials Research Express*, 9: 015101, (2022).
- [7] Sahebzamani H., Alavi M.Z., Farzaneh O., Moniri A., "Laboratory and field investigation of the effect of polymerized pellets on the fatigue and low-temperature performance of asphalt mixtures", *Construction and Building Materials*, 323:126527, (2022).
- [8] Fakhri M., Javadi S., Sassani A., Torabi-Dizaji M., "Zinc Slag as a Partial or Total Replacement for Mineral Filler in Warm Mix Asphalt and Its Effects on Self-Healing Capacity and Performance Characteristics", *Materials*, 15, 736, (2022).
- [9] Slebi-Acevedo C.J., Lastra-González P., Castro-Fresno D., Vega-Zamanillo A., "Experimental evaluation and recyclability potential of asphalt concrete mixtures with polyacrylonitrile fibers", *Construction and Building Materials*, 317:125829, (2022).
- [10] *Karayolları Genel Müdürlüğü*, "Karayolu Teknik Şartnamesi", (2013).
- [11] Arslan D., Gürü M., Çubuk M.K., "Preventing of rutting and crackings in the bituminous mixtures by monoethylene and diethylene glycol based synthetic polyboron compounds", *Construction and Building Materials*, 50: 102-107, (2014).
- [12] Naveed M., Raza M.A., Mehmood R., "Performance analyses of conventional hot mix asphalt with waste additives", *Case Studies in Construction Materials*, 16: e00850, (2022).

- [13] Fu L., Jiao Y., Chen X., “Reinforcement evaluation of different fibers on fracture resistance of asphalt mixture based on acoustic emission technique”, *Construction and Building Materials*, 314: 125606, (2022).
- [14] Ghafari S., Nejad F.M., “Crack propagation characterization of crumb rubber modified asphalt concrete using J-R curves”, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 117: 103156, (2022).
- [15] Zarei M., Kordani A.A., Ghamarimaj Z., Khajehzadeh M., Khanjari M., Zahedi M., “Evaluation of fracture resistance of asphalt concrete involving Calcium Lignosulfonate and Polyester fiber under freeze-thaw damage”, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 117: 103168, (2022).
- [16] Jain M.G., Esmaili N., Hamed G.H., “Investigating the Effect of Curing and Thermal Equilibrium Time on Rutting Potential of Hot Mix Asphalt”, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 65(3): 691-701, (2021).
- [17] Sangsefidi E., Ziari H., Sangsefidi M., “The Effect of Aggregate Gradation Limits Consideration on Performance Properties and Mixture Design Parameters of Hot Mix Asphalt”, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20 (1): 385-392, (2016).
- [18] Banerji A.K., Das A., Mondal A., Biswas R., Obaidullah M., “Influence of Variation in the Aggregate Gradation Range on Mix Design Properties of Bituminous Concrete (BC) Mixes used as Wearing Course”, *International Journal of Engineering Research & Technology*, 3(9): 1258-1262, (2014).
- [19] Husain N.M., Karim M.R., Mahmud H.B., Koting S., “Effects of Aggregate Gradation on the Physical Properties of Semiflexible Pavement”, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014, 529305 (2014).
- [20] Cao W., Liu S., Li Y., Xue Z., “Effect of Aggregate Gradation on Volumetric Parameters and the High Temperature Performance of Asphalt Mixtures”, Fourth Geo-China International Conference, Shandong, China, 42-50, (2016).
- [21] Liu S., Zu L., Zhang H., Liu T., Ji P., Cao W., “Effect of radation Variability on Volume Parameter and Key Performances of HMA”, *Frontiers in Materials*, 7, 611409, (2021).
- [22] Elliott R.P., Ford M.C., Ghanim M., Tu Y.F., “Effect of Aggregate Gradation Variation on Asphalt Concrete Mix Properties”, *Transportation Research Record*, 1317: 52-60, (1991). <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1991/1317/1317-006.pdf>.
- [23] Maharjan R., Tamrakar G.B.S., “ Effect of Aggregate Gradation Variation on the Marshall Mix Properties of Asphalt Concrete”, *Proceedings of IOE Graduate Conference*, Nepal 213-219, (2017).
- [24] Afaf A.H.M., “Effect Of Aggregate Gradation And Type On Hot Asphalt Concrete Mix Properties”, *Journal of Engineering Sciences Assiut University Faculty of Engineering*, 42(3): 567-574, (2014).
- [25] Golalipour A., Jamshidi E., Niazi Y., Afsharikia Z., Khadem M., “Effect of Aggregate Gradation on Rutting of Asphalt Pavements”, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 53: 440-449, (2012).
- [26] Morova N., Serin S., Terzi S., Saltan M., Küçükçapraz D.O., Karahançer S.S., Erişkin E., “Utility of polyparaphenylene terephthalamide fiber in hot mix asphalt as a fiber”, *Construction and Building Materials*, 107: 87-94, (2016).
- [27] Arslan D., Bayırtepe H., “Bitümlü sıcak karışımlara ait akma değerinin regresyon modelleri ile tahmini”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım Ve Teknoloji*, 6(1): 45-53, (2018)