

Investigating the effects of aggregate gradation on Marshall Parameters of bituminous hot mixtures

Deniz ARSLAN^{1*}  Hüseyin KÖSE² 

¹Konya Technical University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Civil Engineering Department, 42250, Selçuklu/KONYA

²Konya Technical University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Civil Engineering Department, 42250, Selçuklu/KONYA

Article Info

Research article
Received: 20/12/2022
Revision: 10/01/2023
Accepted: 17/01/2023

Keywords

Binder Course
Aggregate Gradation
Marshall Design
Marshall Parameters

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 20/12/2022
Düzeltilme: 10/01/2023
Kabul: 17/01/2023

Anahtar Kelimeler

Binder Tabakası
Agrega Gradasyonu
Marshall Tasarımı
Marshall Parametreleri

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, the effects of aggregate gradation on bituminous hot mixture properties were investigated. Five different aggregate gradations were determined and Marshall design was performed with each of them. / Bu çalışmada, agrega gradasyonunun bitümlü sıcak karışım özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Beş farklı agrega gradasyonu belirlenmiş ve herbiri ile Marshall tasarımı yapılmıştır.

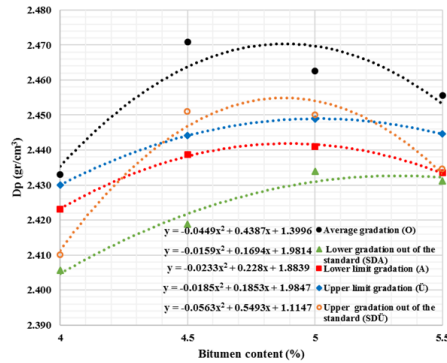


Figure A: Unit weight-gradation relationship / Şekil A: Birim ağırlık-gradasyon ilişkisi

Highlights (Önemli noktalar)

- Aggregate gradation envelope for binder course / Binder tabakası için agrega gradasyon zarfı
- In/Out of limit gradations / Limit içi/dışı gradasyonlar
- Effects of gradation on bituminous mixture properties / Bitümlü karışım özellikleri üzerinde gradasyon etkileri

Aim (Amaç): It was aimed to examine the effects of aggregate gradation on the physical properties of the bituminous hot mixtures. / Bitümlü sıcak karışımların fiziksel özellikleri üzerinde agrega gradasyonunun etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Originality (Özgünlük): Bituminous hot mixture performance – aggregate gradation relationship and the effects of the gradation envelope defined for binder course on that relationship were experimentally analyzed. / Bitümlü sıcak karışım performansı - agrega gradasyonu ilişkisi ve binder tabakası için tanımlanan gradasyon zarfının bu ilişki üzerindeki etkileri deneysel olarak analiz edilmiştir.

Results (Bulgular): The increase or decrease of aggregate particle size compared to the average gradation decreased D_p and V_f values while increased VMA and V_a values of the Marshall samples. / Agregada tane boyutunun ortalama gradasyona göre artması veya azalması Marshall numunelerinin D_p ve V_f değerlerini azaltırken VMA ve V_a değerlerini arttırmıştır.

Conclusion (Sonuç): The upward separation from the average values of the gradation envelope that is defined for the binder layer has the potential to increase the stability. A downward separation from the average values can be said to cause negative effects in terms of flow, VMA and stability property of the bituminous mixtures. / Binder tabakası için tanımlanmış gradasyon zarfında ortalama değerlere kıyasla yukarı doğru ayrılmanın stabiliteyi artırma potansiyeli mevcuttur. Ortalama değerlerden aşağı doğru bir ayrılmanın bitümlü karışımların akma, VMA ve stabilite özellikleri bakımından olumsuz etkilere neden olduğu söylenebilir.



Agrega Gradasyonunun Bitümlü Sıcak Karışımların Marshall Parametreleri Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması

Deniz ARSLAN^{1*} Hüseyin KÖSE²

¹Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 42250, Selçuklu/KONYA

²Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 42250, Selçuklu/KONYA

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 20/12/2022
Düzeltilme: 10/01/2023
Kabul: 17/01/2023

Anahtar Kelimeler

Binder Tabakası
Agrega Gradasyonu
Marshall Tasarımı
Marshall Parametreleri

Öz

Bu çalışmada, agrega gradasyonunun bitümlü sıcak karışımların fiziksel özellikleri üzerindeki etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, 2013 yılı Türkiye Karayolu Teknik Şartnamesinde binder tabakası için tanımlanan gradasyon sınırları esas alınmıştır. Gradasyon sınırlarına ait ortalama, alt limit, üst limit değerleri ile birlikte alt ve üst limitlerin % 7 oranında ötelenmesiyle elde edilen beş farklı agrega gradasyonu oluşturulmuş ve her biri için ayrı ayrı Marshall tasarımları yapılmıştır. Gradasyon sınırları dışındaki değerler, çalışma esnasında oluşabilecek gradasyon hatalarının bitümlü karışımda meydana getirebileceği performans değişimlerinin öngörülebilmesi amacıyla çalışmaya dahil edilmiştir. Elde edilen test verilerine göre agrega gradasyonunun bitümlü sıcak karışımların stabilite, akma, birim ağırlık (Dp), hava boşluğu oranı (Vh), bitümlü dolu boşluk oranı (Vf), agregalar arasındaki boşluk oranı (VMA) ve Marshall oranı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Agregada boyutunun ortalama gradasyona kıyasla artmasının veya azalmasının Dp ve Vf değerlerinde azalma, VMA ve Vh değerlerinde artış meydana getirdiği belirlenmiştir. Bununla birlikte, gradasyonun üst limitine doğru stabilite değerlerinin arttığı görülmüştür.

Investigating the effects of aggregate gradation on Marshall Parameters of bituminous hot mixtures

Article Info

Research article
Received: 20/12/2022
Revision: 10/01/2023
Accepted: 17/01/2023

Keywords

Binder Course
Aggregate Gradation
Marshall Design
Marshall Parameters

Abstract

In this study, it was aimed to investigate the effects of aggregate gradation on the physical properties of bituminous hot mixtures. Accordingly, the gradation limits defined for the binder course in 2013 Highway Technical Specification of Turkey was taken as basis. Five different aggregate gradations were generated as the average, the lower limit, and the upper limit values of the gradation limits together with shifting the lower and upper limits by 7%, and Marshall designs were applied on each of them. Values outside the gradation limits were included in the study in order to predict the performance changes in bituminous mixture due to the gradation errors that may occur during operation process. The effects of aggregate gradation on the stability, flow, unit weight (Dp), air void ratio (Vh), void filled with bitumen ratio (Vf), voids in mineral aggregate ratio (VMA) and Marshall quotient of bituminous hot mixtures were evaluated according to the test data obtained. It was determined that the increase or decrease in aggregate size compared to the average gradation generated a decrease in Dp and Vf values, and an increase in VMA and Vh values. Also, stability values were observed to be increased towards the upper limit of the gradation.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Aşınma, binder ve gerekli hallerde kullanılan bitümlü temel tabakaları, karayolu ulaşımını sağlayan yüksek standartlı esnek üstyapılarda kaplama tabakalarını oluştururlar. Her üç tabaka da bitümlü sıcak karışımlar ile inşa edilirler. Bitümlü

sıcak karışımlar, agregada ve bitümün plentte yüksek sıcaklıkta karıştırılmasıyla hazırlanır. Karışımın ağırlıkça yaklaşık olarak % 95'i agregadır. Agreganın fiziksel özelliklerinin yanı sıra dane büyüklüğü dağılımı olarak tanımlanan gradasyonu, kaplama tabakasının özelliklerini yakından etkiler. Agregada grubunun sağlaması gereken gradasyon

özellikleri şartnamelerde kullanılacağı tabaka özelinde tanımlanmıştır. Farklı ülkelerde farklı tanımlamalar yapılmakla beraber çoğundaki ortak nokta, sağlanması gereken gradasyon özelliklerinin alt ve üst limitleri bulunan gradasyon aralığı halinde verilmiş olmasıdır. Agreganın bu aralığa uyum göstermesi şartname bakımından yeterlidir. Ancak, gradasyonun değişmesiyle bitümlü karışımın performans özelliklerinin de değişim göstereceği açıktır. Bu hususta yapılmış çalışmalar incelendiğinde; esnek üstyapılarda önemli bir bozulma türü olan tekerlek izi oluşumuna karşı direncin agrega gradasyonuna bağlı olarak farklılaşabileceği görülmüştür. Laboratuvar testlerine göre, Superpave agrega gradasyonunda kısıtlı bölgenin üstünde kalan gradasyon ile daha yüksek tekerlek izi direnci elde edilebileceği ifade edilirken prototip ölçekli hızlandırılmış kaplama testlerinde bu sonucun elde edilemediği belirtilmiştir [1]. Diğer bir çalışmada, şartname limitlerindeki üst sınıra daha yakın agrega gradasyonuna sahip bitümlü karışımların tekerlek izine karşı daha dirençli oldukları ve bu durumun daha yüksek yoğunluğa sahip olmalarından ileri geldiği yorumlanmıştır [2]. Ancak; Superpave agrega gradasyonunun temel alındığı çalışmada, kaba ve ince gradasyonlu agrega ile hazırlanan bitümlü karışımlar arasında tekerlek izi direnci bakımından istatistiksel olarak anlamlı bir farklılaşmanın oluşmadığı belirtilmiştir [3] ve kaba gradasyona sahip karışımların tekerlek izi direnci bakımından agrega özelliklerine daha duyarlı oldukları ifade edilmiştir [4].

Bitümlü karışımlardaki agregalar için tanımlanmış farklı gradasyon türleri mevcuttur ve bunlar önemli performans farklarına sebep olabilmektedirler. Açık gradasyona sahip agrega ile hazırlanan bitümlü karışımlarda yoğun gradasyona kıyasla daha fazla boşluk ve daha düşük stabilite elde edildiği belirlenmiştir [5]. Gradasyon aralığındaki ortalama, alt limit ve üst limit değerlerin kullanıldığı çalışmada, en yüksek stabilite değerleri alt limit gradasyonla elde edilmiştir. Bununla birlikte; suyla koşullandırma sonrasındaki stabilite kaybı incelendiğinde, üst limit gradasyona sahip agrega içeren bitümlü karışımların suyun zararlı etkilerine karşı daha dayanıklı oldukları görülmüştür [6]. Diğer bir çalışmada ise, sudan en fazla zarar gören bitümlü karışımın üst gradasyona (daha ince) sahip agrega grubu ile hazırlanmış olması dikkat çekicidir [7]. Ancak; farklı bir çalışmada, suya maruz kalan üst limit agrega gradasyonuna sahip bitümlü karışımların hem stabilite hem de çekme dayanımı bakımından diğer agrega gradasyonlarına (ortalama ve alt limit) kıyasla daha iyi sonuçlar sağladığı ve bu suretle daha ince agrega gradasyonu ile su

etkilerine karşı daha fazla direnç elde edilebileceği belirtilmiştir [8]. Gradasyonun stabilite üzerindeki etkisi ile ilgili literatür çalışmaları farklılıklar içermektedir. En yüksek stabilitenin ortalama gradasyon ile elde edildiği belirtilirken [9] agrega dane boyutunun küçülmesi ile (gradasyon aralığında üst tarafa doğru ilerledikçe) stabilitenin arttığı da görülmektedir [10-12]. Agregada gradasyonunda incelenen agregalar arasındaki boşluk yüzdesini (VMA) ve akmayı arttırdığı çalışmada, en yüksek stabilite değeri ortalama gradasyon ile edilmiştir. Ancak, aynı çalışma tarafından bitümlü karışımlar için en iyi sonuçların ortalama gradasyon ile elde edilmediği de belirtilmiştir [13]. Agregada türü olarak kireçtaşı, dolomit ve bazaltın, agrega gradasyonu olarak ince, orta ve kaba gradasyonların kullanıldığı çalışmada üst (ince) gradasyona sahip dolomit ve bazalt ile hazırlanan karışımlarda daha yüksek stabilite elde edilmiştir. Kireçtaşında ise yüksek stabilite alt (kaba) gradasyon ile sağlanmıştır [14]. Daha ince agrega gradasyonu ile daha iyi yorulma performansı elde edilebilmektedir [15]. Sıkışmış karışımda agregalar arası boşluk yüzdesinin ve akmanın agrega gradasyonu inceldikçe arttığı görülmüştür [9, 16]. Bu çalışmalarda bitümle dolu boşluk oranı (Vf) bakımından farklı sonuçlar elde edilmiştir. Gradasyonun incelenmesiyle Vf'nin arttığı belirtilirken [16] diğer çalışmada [9] bunu desteklemeyen sonuçlar görülmüştür. Literatürde agrega gradasyonu ile VMA arasında daha önce belirtilen ilişkinin aksine gradasyonun incelenmesiyle VMA'da azalma meydana geldiği belirtilmiştir [17]. Bununla birlikte; agreganın nominal maksimum boyutunda azalmanın, karışımın VMA'sını arttırdığı, Vf'sini ise azalttığı da raporlanmıştır [18]. Kireçtaşı ve bazalt ile ayrı ayrı yapılan çalışmada, agrega gradasyonunun incelenmesiyle bitümlü karışımın birim ağırlığı (Dp) azalmış, boşluk oranı (Vh) ise artmıştır. Ancak, dolomit kullanıldığı aynı çalışmada Dp ve Vh için aynı değişimlerin elde edilmediği görülmüştür [14]. Bununla birlikte, agrega gradasyonundaki incelenen bitümlü karışımdaki boşlukları azaltabildiği belirtilmiştir [19]. Farklı bir çalışmada ise; en yüksek Dp ve en düşük Vh değerleri ortalama gradasyon ile elde edilirken gradasyonun incelenmesi (üst limit) veya kabalaşması (alt limit) Dp değerinde azalmalar, Vh değerinde ise artışlar meydana getirmiştir [10]. Agregada gradasyonundaki incelenmeyle Dp değerlerinde artış meydana geldiği de görülmüştür [18].

Bu çalışmada, bitümlü karışımların mekanik ve fiziksel özellikleri üzerinde agreganın sahip olduğu gradasyon etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, 2013 yılı Karayolu Teknik

Şartnamesinde binder tabakası için belirtilen gradasyon sınırları esas alınarak ortalama, alt limit, üst limit değerleri ile birlikte alt ve üst limitlerin % 7 oranında ötelenmesiyle elde edilen beş farklı agrega gradasyonu belirlenmiştir. % 7'lik limit dışı gradasyonlar, çalışma esnasında oluşabilecek gradasyon hatalarının bitümlü karışımda yol açabileceği performans değişimlerinin öngörülebilmesi amacıyla çalışmaya dahil edilmiştir. Her bir gradasyon ile Marshall tasarımı yapılmıştır. Bitümlü karışımlardaki agrega gradasyonunun etkisi; stabilite, akma, Dp, Vh, Vf, VMA ve Marshall oranı sonuçlarına göre değerlendirilmiştir.

2. MATERYAL VE METOT (MATERIALS AND METHODS)

2.1. Malzeme (Material)

Marshall tasarımlarında 50/70 penetrasyon dereceli bitüm kullanılmıştır. Özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Marshall briketlerinde kireçtaşı kullanılmıştır. Kireçtaşına ait özgül ağırlık değerleri Çizelge 2'de verilmiştir.

2.2. Metot (Method)

Farklı agrega gradasyonlarının bitümlü karışımların fiziksel özellikleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi amacıyla Marshall tasarım yöntemi [20] uygulanmıştır. Marshall tasarımlarında Şekil 1'de görülen beş farklı agrega gradasyonu kullanılmıştır.

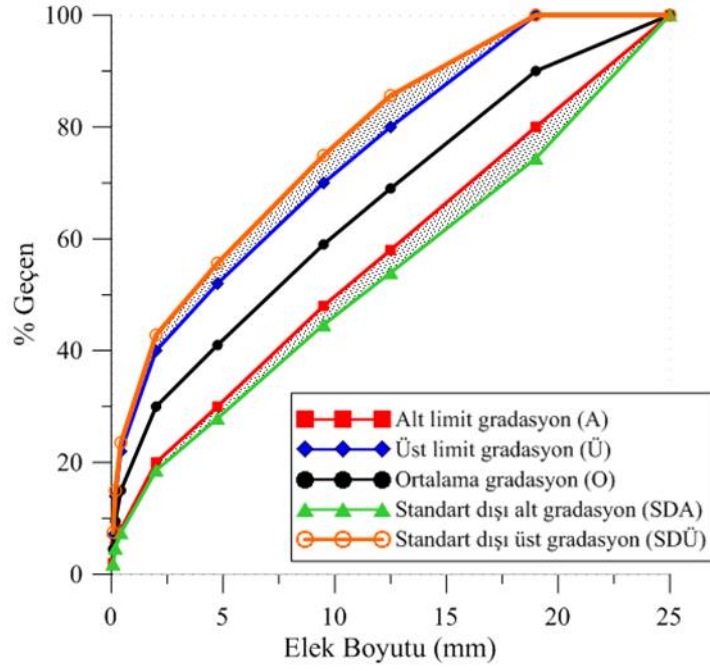
Gradasyonlarda, Karayolu Teknik Şartnamesinde (2013) binder tabakası için verilen agrega gradasyon aralığı temel alınmıştır. Gradasyon aralığının ortalama (O), alt limit (A), üst limit (Ü) değerleri ile birlikte, alt ve üst limitlerin % 7 oranında ötelenmesiyle elde edilen standart dışı alt (SDA) gradasyon, ve standart dışı üst (SDÜ) gradasyon Şekil 1'de verilmiştir. Şekil 1'in orta kısmında görülen taralı olmayan alan binder tabakası için şartnamede tanımlanan gradasyon aralığını (sınırlarını) göstermektedir. Alt ve üst kısımlarda bulunan taralı alanlar ise şartname limitlerinin çalışma dahilinde ne kadar aşıldığını ifade etmektedir. Çalışmada limit dışı gradasyon kullanılmasıyla gradasyon aralığına uyulamaması durumunda bitümlü karışım özelliklerinin ne yönde değişim gösterdiğinin incelenmesi amaçlanmıştır. Marshall briketleri, Şekil 1'de verilen agrega gradasyonları kullanılarak Çizelge 3'te belirtilen koşullarda üretilmiştir. Üretilen briketler oda koşullarında bir gün bekletildikten sonra Marshall testine tabii tutulmuşlardır. Test öncesinde her bir brikete ait havada, suda ve doygun yüzey kuru ağırlık ölçümleri yapılmıştır. 60°C'deki su banyosunda 30 dakika bekletilen briketlerin stabilite ve akma değerleri belirlenmiştir. Ölçümler ve hesaplamalar neticesinde elde edilen değerlerle farklı bitüm içeriklerindeki Dp, Vh, Vf, VMA, Stabilite, akma ve Marshall oranı grafikleri hazırlanmıştır. Hazırlanan grafikler incelenerek agrega gradasyonunun bitümlü karışımların mekanik ve fiziksel özellikleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

Çizelge 1. 50/70 penetrasyon dereceli bitümün özellikleri (Properties of the 50/70 penetration grade 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

Çizelge 2. Kireçtaşına ait özgül ağırlık değerleri (Specific gravity values of limestone)

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



Şekil 1. Marshall tasarımlarında kullanılan agrega gradasyonları (Aggregate gradations used in Marshall Designs)

Çizelge 3. Marshall briketleri üretim koşulları (Marshall briquettes fabrication parameters)

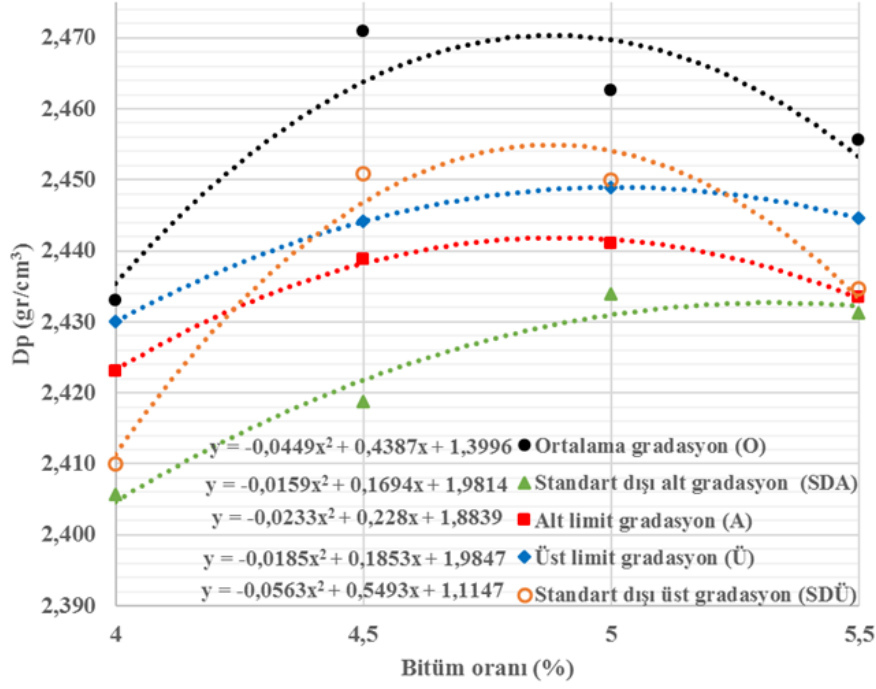
Parametre	Uygulamada kullanılan değer
Her bir brikette bulunan agrega miktarı	1150 gr
Tasarımda kullanılan bitüm içerikleri	4; 4,5; 5; 5,5 (agrega ağırlığının %'si olarak)
Her bir bitüm içeriği için üretilen briket sayısı	3
Agrega-bitüm karıştırma sıcaklığı	150±5°C
Agrega-bitüm karıştırma süresi	2-3 dakika
Sıkıştırma koşulları	Her bir yüze 75 Marshall tokmak darbesi

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

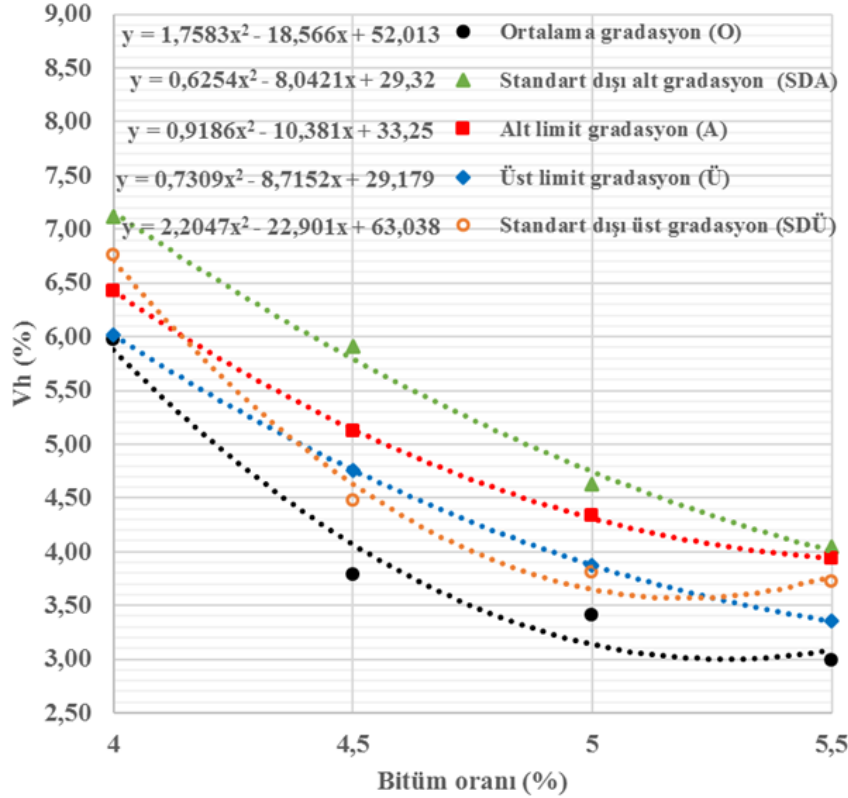
3.1. Agrega Gradasyonunun Birim Ağırlık (Dp) ve Boşluk Oranı (Vh) Üzerindeki Etkileri (Effects of Aggregate Gradation on Unit Weight (Dp) and Air Void Ratio (Vh))

Agrega gradasyonunun Dp ve Vh üzerinde meydana getirdiği değişimler ve ilgili yaklaşım (regresyon) fonksiyonları Şekil 2 ve Şekil 3'te verilmiştir. Şekil 2'de görüldüğü üzere tüm tasarımlardaki Dp yaklaşım grafiklerinde birer tepe noktası oluşmuştur. En yüksek Dp değerleri ortalama gradasyona, en düşük değerler ise SDA gradasyona sahip agrega grubu ile elde edilmiştir. Agrega dane boyutunun artması veya azalması ortalama gradasyona kıyasla Dp sonuçlarını azaltıcı yönde etkilemiştir. Agrega grubundaki dane boyutu büyüdükçe bitümlü karışımı sıkıştırmak zorlaşır. Bu

yüzden, diğer gradasyonlara göre ince malzemenin daha az olduğu alt limit ve SDA gradasyonlara sahip agrega ile imal edilen bitümlü karışımların sıkışmaya karşı gösterdiği direnç daha yüksektir. Tüm briketler aynı sıkıştırma enerjisi ile sıkıştırıldığından daha fazla kaba agrega içeren briketlerde oluşan boşluk oranı daha fazla olacaktır. Boşluk oranının daha yüksek olması Dp değerinin daha düşük olmasıyla sonuçlanacaktır. Test sonuçlarında da bu durum gözlenmiş olup en düşük Dp değerleri SDA gradasyona sahip briketlerde gözlenmiştir. Diğer taraftan, ince malzemenin artması bitümlü karışımın daha kolay sıkıştırılmasına imkan verir. Ancak, ince daneler arasındaki çok sayıda küçük boşluklar sebebiyle, toplamda meydana gelen daha yüksek boşluk oranına bağlı olarak briketlerde daha düşük Dp değerleri oluşacaktır.



Şekil 2. Agrega gradasyonunun Dp üzerinde meydana getirdiği değişimler (Variations caused by aggregate gradation on Dp)



Şekil 3. Agrega gradasyonunun Vh üzerinde meydana getirdiği değişimler (Variations caused by aggregate gradation on Vh)

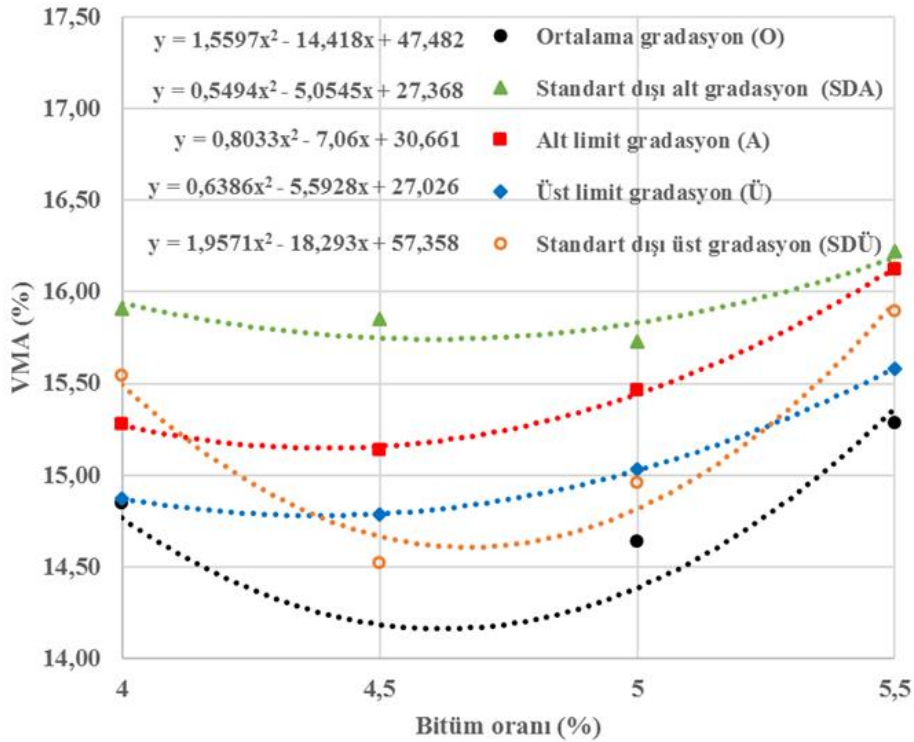
Şekil 3'te görüldüğü üzere bitümlü karışımlardaki boşluk oranı agrega gradasyonunun ortalama değerden farklılaşmasıyla artış göstermiştir. En yüksek boşluk oranları, en düşük Dp değerlerine sahip olan SDA gradasyon ile elde edilmiştir. En düşük boşluk değerleri ise ortalama gradasyon ile sağlanmıştır. Tüm farklı agrega gradasyonları için, bitüm oranının artması ile briketlerde oluşan boşluk miktarlarında beklendiği üzere azalmalar görülmüştür. Şekil 2 ve 3 birlikte incelendiğinde; % 4,5 ve % 5 bitüm oranları için agrega gradasyonunun ortalama değerlerden aşağı yönde ayrılma göstermesi (A ve SDA gradasyonları) yukarı yönde ayrılma göstermesine kıyasla (Ü ve SDÜ gradasyonları) Dp ve Vh değerlerinde daha fazla değişim meydana getirmiştir. Bu suretle, gradasyondaki kabalaşmanın Dp ve Vh üzerinde daha etkili olduğu söylenebilir. Agrega gradasyonunun Dp ve Vh üzerindeki etkilerinin incelendiği literatür çalışmalarında da benzer sonuçlarla karşılaşılabilmektedir. Bitümlü karışımlara ait mekanik özellikler üzerinde gradasyonun etkilerinin incelendiği çalışmada; ortalama gradasyona kıyasla gradasyonun hem incilmesi hem de kabalaşmasıyla (gradasyonun ortalama değerden uzaklaşmasıyla) Dp'nin azaldığı, Vh'nin arttığı tespit edilmiştir [10]. Benzer şekilde; bitümlü karışımda kullanılan kaba agrega daha da kabalaştıkça [21] veya kaba agrega oransal olarak fazlalaştıkça [17] Vh değerleri artış göstermiştir.

3.2. Agrega Gradasyonunun Agregalar Arasındaki Boşluk Oranı (VMA) ve Bitümle Dolu Boşluk Oranı (Vf) Üzerindeki Etkileri (Effects of Aggregate Gradation on Voids in Mineral Aggregate Ratio (VMA) and Voids Filled With Bitumen Ratio (Vf))

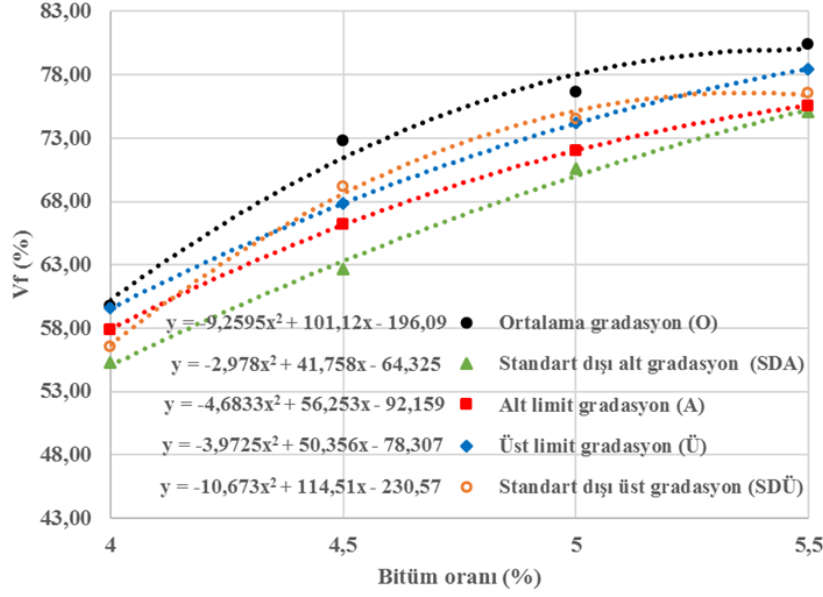
Bitümlü karışımların VMA ve Vf değerlerinin agrega gradasyonuna bağlı olarak gösterdikleri değişimler Şekil 4 ve Şekil 5'te sunulmuştur.

VMA, sıkıştırılmış bitümlü karışımda agregalar arasındaki boşluk yüzdesi olarak tanımlanır. 2013 Karayolu Teknik Şartnamesine göre binder tabakasında kullanılacak bitümlü karışıma ait VMA'nın % 13-15 arasında olması istenir [22]. Bitümün, agregalar arasında belirli bir film kalınlığı oluşturabilmesi için VMA'nın minimum değerden daha az olmaması gerekir. Aksi halde, agrega danelerinin yüzeylerinde oluşacak bitüm filmindeki incelik sebebiyle bitümlü karışımın durabilitesi düşük olacaktır.

Şekil 4'te görüldüğü üzere en düşük VMA değerleri ortalama gradasyon ile elde edilmiştir. Agrega gradasyonu ile VMA ilişkisinin incelendiği bazı literatür çalışmalarında da en düşük VMA ortalama gradasyon ile elde edilmiştir [10, 14, 17]. Test sonuçları kapsamında yapılan hesaplamalara göre gradasyonun hem incilmesi hem de kabalaşması VMA'nın artmasına sebep olmuştur.



Şekil 4. Agrega gradasyonunun VMA üzerinde meydana getirdiği değişimler (Variations caused by aggregate gradation on VMA)



Şekil 5. Agrega gradasyonunun Vf üzerinde meydana getirdiği değişimler (Variations caused by aggregate gradation on Vf)

Özellikle alt limit ve SDA gradasyonlarına ait grafikler incelendiğinde, VMA değerlerinin tüm farklı bitüm içeriklerinde şartname üst sınırı olan % 15'ten fazla olduğu görülür. Bununla beraber; alt limit ve SDA gradasyonlarına ait VMA grafikleri, gradasyonun daha kaba hale gelmesinin VMA'yı daha da arttırabileceğini düşündürmektedir. Üst limit ve SDÜ gradasyonlarının ise % 4,5-5 bitüm oranı aralığında ve civarında üst sınıra yakın olmakla beraber VMA ile ilgili şartı sağlayabileceği görülmektedir.

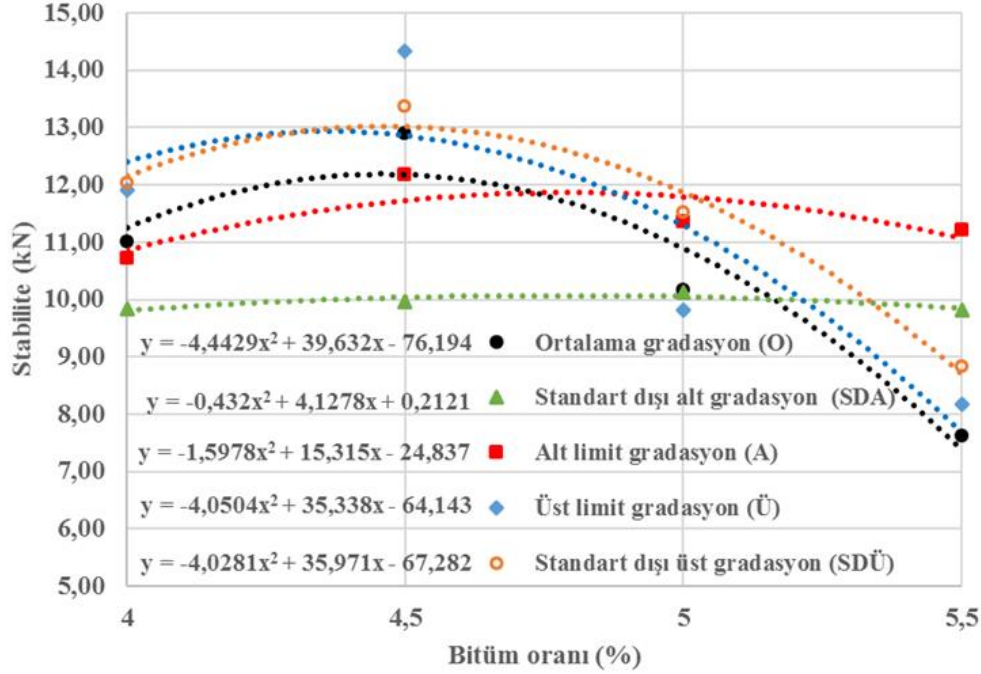
Vf, VMA'nın ne kadarının bitüm ile dolu olduğunu ifade eder ve şartnameye göre [22] % 60-75 arasında olması gerekir. Şekil 5'te görüldüğü üzere en yüksek Vf değerleri ortalama gradasyon ile elde edilmiştir. Diğer gradasyonlar (A, SDA, Ü, SDÜ) kullanıldığında ise Vf değerinde azalmalar meydana gelmiştir. Agrega gradasyonunun Vf üzerinde farklı değişimler oluşturduğunu [21], en düşük Vf'nin kaba gradasyonla [16, 23, 24] veya ortalama gradasyonla [9, 25] elde edildiğini belirten çalışmalar mevcuttur. Bitümlü karışımda ortalama gradasyona kıyasla daha büyük dane boyutuna sahip agrega kullanılması (A ve SDA) Vf üzerinde azalma yönünde daha fazla değişim meydana getirmiştir. Benzer durum daha önce bahsedilen Dp, Vh ve VMA değişkenleri için de geçerlidir. A ve SDA gradasyonları, Ü ve SDÜ gradasyonlarına kıyasla Marshall değişkenleri üzerinde daha etkili değişimler meydana getirmişlerdir. Test sonuçlarına göre tüm agrega gradasyonları için % 4,5 ve civarındaki bitüm oranının, binder tabakasında kullanılacak bitümlü karışım için tanımlanan Vf sınır şartlarını sağlayacağı tespit edilmiştir.

3.3. Agrega Gradasyonunun Stabilite ve Akma Üzerindeki Etkileri (Effects of Aggregate Gradation on Stability and Flow)

Stabilite değeri, Marshall parametreleri arasında araştırmacıların özellikle incelediği ve yorumladığı bir değişkendir. Daha yüksek Marshall stabilitesine sahip bitümlü karışımların kalıcı deformasyonlara karşı dirençleri daha yüksek olacaktır. Bu suretle, kaplamada bölgesel çökme, ondülasyon ve tekerlek izi oluşumları gibi deformasyon türü bozulmalar daha az oluşacaktır [26, 27]. Malzeme kalitesi ve üretim koşullarının yanında, agrega gradasyonu ve karışımda kullanılan bitüm oranı Marshall stabilitesinde etkilidir. Şekil 6'da agrega gradasyonunun stabilite üzerinde oluşturduğu değişimler sunulmuştur. Şekilde görüldüğü üzere bitüm oranındaki değişimlerin stabilite üzerindeki etkileri alt limit ve SDA gradasyonlarında oldukça düşük seviyededir. Her iki gradasyon için stabilite yaklaşım grafikleri küçük değişimler içerse de oldukça yatay seyredirler. Ancak, yaklaşım fonksiyonları incelendiğinde (Şekil 6) stabilite grafiklerinde beklenen tepe noktalarının oluştuğu anlaşılmaktadır. En yüksek stabilite % 4,5 bitüm oranında üst limit gradasyonda elde edilmiştir. Fakat aynı gradasyon için % 5 bitüm oranında elde edilen en düşük stabilite değeri, üst limit gradasyonun bitüm içeriğine karşı hassas olduğunu göstermektedir. Ortalama gradasyona kıyasla, üst limit ve SDÜ agrega gradasyonları ile daha yüksek stabilite elde edilmiştir. Literatürde de ortalama gradasyona göre daha ince gradasyona sahip agrega ile hazırlanan bitümlü karışımlarda daha yüksek stabilite elde edilebildiği raporlanmıştır [11, 28, 29].

Bunun yanında, en yüksek stabilite değerlerinin ortalama gradasyon ile meydana geldiğini belirten çalışmalar da mevcuttur [9, 16]. Binder tabakası için şartnamede [22] tanımlanan en düşük stabilite olan 7,36 kN'luk (750 kg) büyüklüğün farklı agrega gradasyonları ve bitüm içeriklerinin hepsinde sağlandığı Şekil 6'dan anlaşılabilir.

A ve SDA gradasyonları için % 4 ve % 4,5 bitüm oranlarındaki stabilite düşüklüğü, bitüm oranı daha fazla olduğunda ortadan kalkmaktadır. Ü ve SDÜ gradasyonlarında ise ortalama gradasyona kıyasla genel olarak daha yüksek stabilite elde edilmiştir.



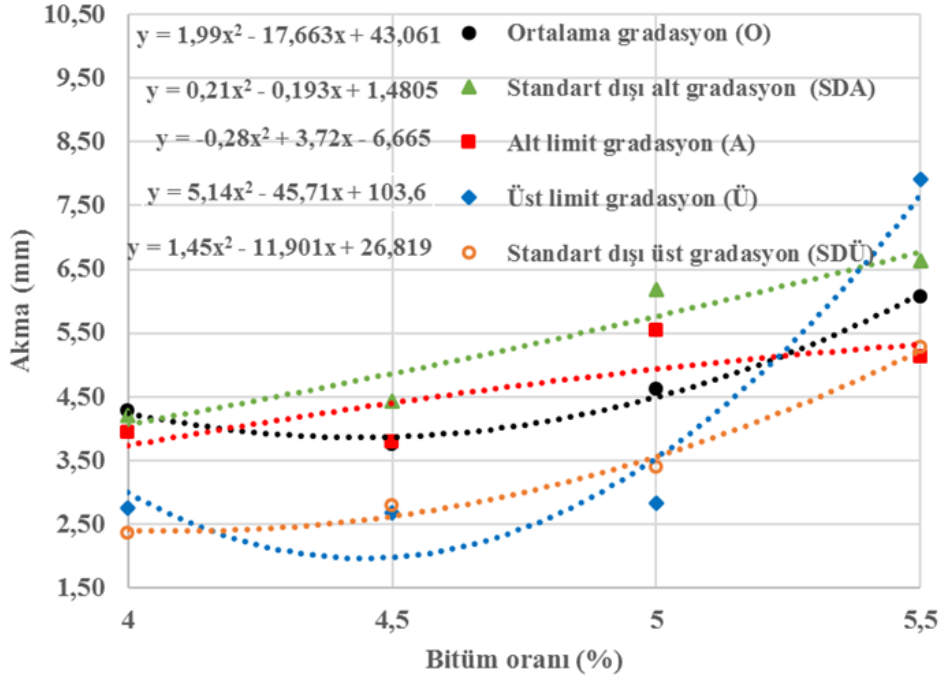
Şekil 6. Agrega gradasyonunun stabilite üzerinde meydana getirdiği değişimler (Variations caused by aggregate gradation on stability)

Çizelge 4. Optimum bitüm oranları (Optimum bitumen ratios)

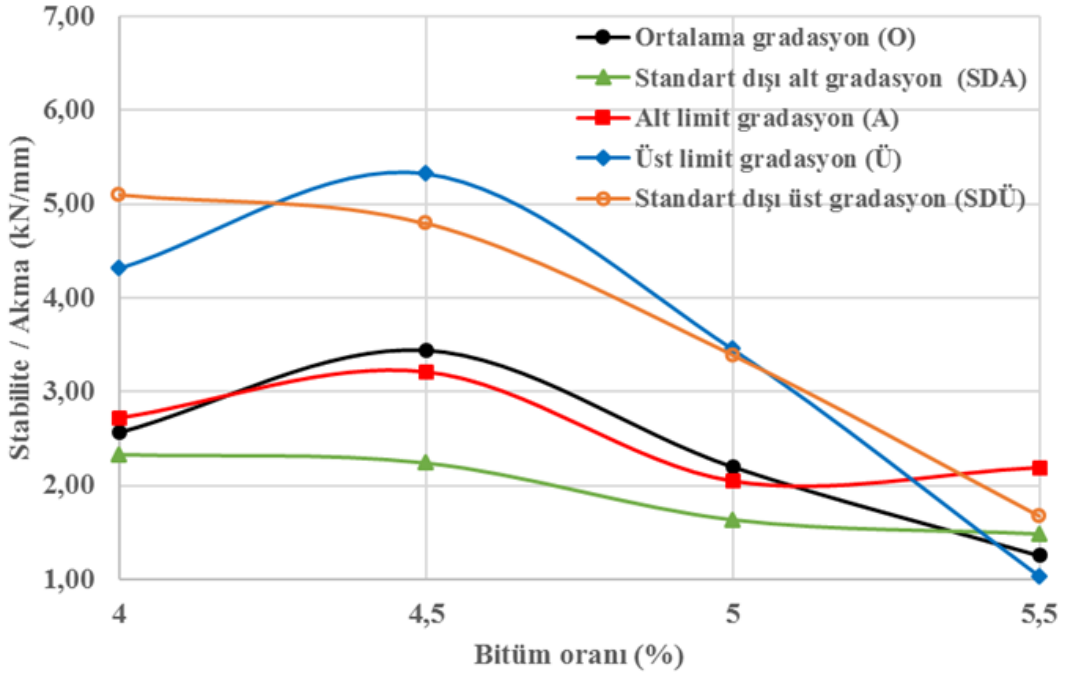
Gradasyon türü	Dp	Stabilite	Vh	Vf	Optimum bitüm oranı (%)
O	4,89	4,46	4,21	4,3	4,47
SDA	5,33	4,78	4,86	4,8	4,94
A	4,89	4,79	4,57	4,6	4,71
Ü	5,01	4,36	4,39	4,48	4,56
SDÜ	4,88	4,47	4,39	4,44	4,55

Çizelge 5. Optimum bitüm oranlarına karşılık gelen VMA ve akma değerleri (VMA and flow values corresponding to the optimum bitumen ratios)

Gradasyon türü	Optimum bitüm oranı (%)	Optimum bitüm oranındaki VMA (%)	Optimum bitüm oranındaki akma (mm)	Optimum bitüm oranı için uygunluk kontrolü
O	4,47	14,2	3,87	Uygun
SDA	4,94	15,81	5,65	Uygun değil
A	4,71	15,23	4,64	Uygun değil
Ü	4,56	14,8	2,04	Uygun
SDÜ	4,55	14,64	2,69	Uygun



Şekil 7. Agrega gradasyonunun akma üzerinde meydana getirdiği değişimler (Variations caused by aggregate gradation on flow)



Şekil 8. Marshall oranları (Marshall quotients)

Farklı agrega gradasyonları için optimum bitüm oranları; maksimum D_p , maksimum stabilite, şartname ortalama V_h ve şartname ortalama V_f değerlerine göre Şekil 2-3-5-6'da verilen yaklaşım fonksiyonları kullanılarak Çizelge 4'te gösterildiği gibi dört değer ortalaması olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4'te hesaplanan optimum bitüm oranlarının uygun olup olmadıkları Şekil 4 ve 7'de verilen VMA ve akma grafiklerine ait yaklaşım fonksiyonları ile kontrol edilmiştir. Her bir optimum bitüm oranının uygun olabilmesi için şartnamede VMA ve akma için verilen limitleri

sağlaması gerekir. Optimum bitüm oranlarına karşılık gelen VMA ve akma değerleri Çizelge 5'te verilmiştir.

Binder tabakasında kullanılacak bitümlü karışımın VMA değeri % 13-15 arasında, akma değeri 2-4 mm arasında olması gerekir. Çizelge 5'te görüldüğü üzere O, Ü ve SÜ gradasyonlarda her iki şart sağlandığından hesaplanan optimum bitüm oranının kullanılması uygundur. A ve SDA gradasyonlarında ise optimum bitüm oranında hem VMA hem de akma değerleri şartname sınır değerlerinin üzerindedir.

Agrega gradasyonunun bitümlü karışımların Marshall oranları üzerindeki etkisi Şekil 8'de sunulmuştur.

Bitümlü karışımlarda kalıcı deformasyonlara karşı direncin yüksek olması için stabilitenin yüksek, akmanın düşük olması tercih edilir. Bu iki değişkenin birbirine oranlanmasıyla elde edilen Marshall oranı (Stabilite/akma) bu amaç için kullanılabilir [30-33]. Farklı agrega gradasyonları ile yapılan tasarımlarda elde edilen Marshall oranları Şekil 8'de görülmektedir. Buna göre, ortalama gradasyona kıyasla daha küçük dane boyutuna sahip agrega ile (Ü ve SDÜ gradasyonları) Marshall oranında önemli artışlar elde edilmiştir. Ü ve SDÜ gradasyonları ile bitümlü karışımın rijit davranış özelliği artarak deformasyonlara karşı direnci yükselmiştir.

4. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, karayolu esnek üstyapısının binder tabakasında kullanılan bitümlü karışımlardaki agrega gradasyonunun karışıma ait fiziksel ve mekanik özellikler üzerindeki etkileri incelenmiştir. 2013 Karayolu Teknik Şartnamesinde binder tabakasında kullanılacak agrega için tanımlanmış olan gradasyon aralığının ortalama, alt ve üst değerlerinin yanı sıra aralığın dışında bulunan iki gradasyonla birlikte olmak üzere toplamda beş farklı agrega gradasyonu ile yapılan Marshall tasarımları sonunda aşağıda özetlenen sonuçlara ulaşılmıştır;

- Agregada dane boyutunun ortalama gradasyona kıyasla artması veya azalması (Ü, SDÜ, A ve SDA gradasyonları) briketlerin Dp ve Vf değerlerini azaltmış, VMA ve Vh değerlerini arttırmıştır. Bu değişimlerde gradasyondaki kabalaşmanın (A ve SDA) daha etkili olduğu tespit edilmiştir.
- Ü ve SDÜ ile ortalama gradasyona kıyasla genel olarak daha yüksek stabiliteler elde edilmiştir. A

ve SDA gradasyonlarında ise % 4 ve % 4,5 bitüm oranlarındaki stabilite düşüklüğü, bitüm oranı fazlalığında ortadan kalkmıştır.

- Stabilite ve akmanın birlikte değerlendirildiği Marshall oranı bakımından ortalama gradasyona kıyasla Ü ve SDÜ ile daha yüksek değerler elde edilmiştir. A ve SDA gradasyonlarında ise farklı sonuçlar oluşmuştur. Özellikle SDA gradasyonu ile Marshall oranı azalmıştır.
- O, Ü ve SDÜ'de bitümlü karışım için gereken mekanik özellikler her bir gradasyon için belirlenen optimum bitüm içeriğinde sağlanmaktadır. A ve SDA gradasyonlarında optimum bitüm oranlarındaki VMA ve akma değerleri şartname sınır değerlerine yakın olmakla beraber istenen şartları sağlamamıştır.

Yukarıda özetlenen sonuçlar ışığında; binder tabakasında kullanılacak agrega için belirlenen gradasyon aralığında ortalama değerlerden yukarı yönde ayrılmanın stabilite bakımından artış sağlama potansiyelinin olduğu, ortalama değerlerden aşağı yönde ayrılmanın ise bitümlü karışımlarda akma, VMA ve stabilite bakımından olumsuzluklar meydana getirebileceği söylenebilir.

5. SİMGELER VE KISALTMALAR (SYMBOLS AND ABBREVIATIONS)

A	Alt limit gradasyon
Dp	Birim ağırlık
O	Ortalama gradasyon
SDA	Standart dışı alt gradasyon
SDÜ	Standart dışı üst gradasyon
Ü	Üst limit gradasyon
Vf	Bitümle dolu boşluk oranı
Vh	Hava boşluğu oranı
VMA	Agregalar arası boşluk oranı

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Yazarlar, laboratuvar imkanları için Konya Teknik Üniversitesi'ne teşekkür eder.

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.

The authors of this article declare that the materials and methods used in their study do not require ethics committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Her iki yazar deneylerin yapılması, sonuçların analiz edilmesi ve makalenin yazılmasında beraber çalışmıştır.

Both authors worked together to conduct the experiments, analyze the results and write the paper.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Hand A.J., Stiadly J.L., White T.D., Noureldin A.S., Galal K., Gradation effects on hot-mix asphalt performance, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1767 (1), 152-157, (2001).
- [2] Naji A., Abed A.H., Effect of aggregate gradation and filler content on the rutting resistance of modified colored hot mix asphalt, *Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences*, 24 (2), 137-143, (2021).
- [3] Kandhal P.S., Cooley L.A., Coarse-versus fine-graded superpave mixtures: comparative evaluation of resistance to rutting, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1789 (1), 216-224, (2002).
- [4] Zhang J., Cooley L.A., Hurley G., Parker F., Effect of Superpave Defined Restricted Zone on Hot-Mix Asphalt Performance, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1891 (1), 103-111, (2004).
- [5] Kalaitzaki E., Kollaros G., Athanasopoulou A., Influence of aggregate gradation on hma mixes stability, *Romanian Journal of Transport Infrastructure*, 4, 13-22, (2015).
- [6] Aodah H.H., Kareem Y.N.A., Chandra S., Effect of aggregate gradation on moisture susceptibility and creep in hma, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 72, 56-61, (2012).
- [7] Sangsefidi E., Ziari H., Mansourkhaki A., The effect of aggregate gradation on creep and moisture susceptibility performance of warm mix asphalt, *International Journal of Pavement Engineering*, 15 (2), 133-141, (2014).
- [8] Habeeb H., Chandra S., Nashaat Y., Estimation of Moisture Damage and Permanent Deformation in Asphalt Mixture from Aggregate Gradation, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18 (6), 1655-1663, (2014).
- [9] 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).
- [10] 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).
- [11] 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).
- [12] Khairandish M.I., Chopra A., Singh S., Chohan J.S., Kumar R., Effect of Gradation and Morphological Characteristics of Aggregates on Mechanical Properties of Bituminous Concrete and Dense Bituminous Macadam, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 46: 293-307 (2022).
- [13] 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).
- [14] 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).
- [15] Sousa J.B., Pais J.C., Prates M., Barros Rui, Langlois P., Leclerc A., Effect of Aggregate Gradation on Fatigue Life of Asphalt Concrete Mixes, *Transportation Research Record*, 1630 (1), 62-68, (1998).
- [16] 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)
- [17] 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).

- [18] Tayh S.A., Alghrery H.S.J., Evaluation of The Effect of Gradation on Mechanical properties of Stone Mastic Asphalt Mixtures, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Baghdad, Iraq, 1105, 012087, (2021).
- [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, 529305, (2014).
- [20] TS EN 12697-34, Bitümlü karışımlar-Test yöntemleri-Bölüm 34: Marshall testi.
- [21] Liu S., Zhu L., Zhang H., Liu T., Ji P., Cao W., Effect of Gradation Variability on Volume Parameter and Key Performances of HMA, Frontiers in Materials, 7, 611409, (2021)
- [22] Karayolları Genel Müdürlüğü, Karayolu Teknik Şartnamesi, (2013).
- [23] 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, 32 (5), 04020102, (2020).
- [24] Setiawan A., Suparma L.B., Mulyono A.T., Modelling Effect of Aggregate Gradation and Bitumen Content on Marshall Properties of Asphalt Concrete, International Journal on Advanced Science Engineering and Information Technology, 7 (2), 359-365, (2017).
- [25] 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).
- [26] Arslan D., Gürü M., Çubuk M.K., Çubuk M., Farshbafian F.K., Investigation of rheological and mechanical properties of kaolin-clay modified bitumen, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35 (3), 1409-1419, (2020).
- [27] Arslan D., Gürü M., Çubuk, M.K., Improvement of bitumen and bituminous mixtures performance properties with organic based zincphosphate compound, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 27 (2), 459-466, (2012).
- [28] 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>
- [29] Ahmed M.A., Attia M.I.E., Impact of Aggregate Gradation and Type on Hot Mix Asphalt Rutting In Egypt, International Journal of Engineering Research and Applications, 3 (4), 2249-2258, (2013).
- [30] 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).
- [31] 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).
- [32] Karakas A.S., Sayın B., Kuloğlu N., The changes in the mechanical properties of neat and SBS-modified HMA pavements due to traffic loads and environmental effects over a one-year period, Construction and Building Materials, 71, 406-415, (2014).
- [33] Haddadi S., Ghorbel E., Laradi N., Effects of the manufacturing process on the performances of the bituminous binders modified with EVA, Construction and Building Materials, 22, 1212-1219, (2008).