

AGREGA SEGREGASYONUNUN ASFALT KARIŞIMLARININ SIKIŞTIRILABİLİRLİĞİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Ayhan Öner YÜCEL^{1*}, Murat GÜLER²

¹Aydın Adnan Menderes University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, 09010, Aydın, Türkiye

²Middle East Technical University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, 06800, Ankara, Türkiye

Özet: Asfalt karışımlarının sıkıştırılabilirliği, karışımların hedef yoğunluğa sıkıştırılmasının ne ölçüde kolay olduğunu tanımlamak için kullanılmaktadır. Asfalt karışımlarının sorunsuz şekilde sıkıştırılması, karışımdan beklenen performansı elde etmek için çok kritiktir. Agregada segregasyonu karışımdaki kaba agregaların belirli alanlarda kümelenmesi olarak tanımlanmakta olup, karışımın iç yapısını etkileyen önemli bir durumdur. Bu çalışmada, agregada segregasyonunun asfalt karışımlarının hacimsel özelliklerine ve sıkıştırılabilirliğine etkileri incelenmiştir. Farklı koşulları simüle etmek için aynı sıkıştırma eforu uygulanarak ve aynı hedef yoğunlukta olmak üzere iki grup numune hazırlanmıştır. Her grup için ön koşulsuz-homojen ve iki seviyede segregasyona uğramış asfalt karışımı numuneleri Superpave yoğunmalı pres kullanılarak üretilmiştir. Segregasyona uğramış numuneler üretmek için tasarım gradasyonundaki kaba ve ince agregalar farklı oranlarda birleştirilerek hazırlanan karışımlar kalıba iki tabaka olarak yerleştirilip sıkıştırılmıştır. Üretilen numunelerin hacimsel özellikleri belirlenmiş ve numunelerin sıkışma eğrileri kullanılarak sıkıştırılabilirlik indeksleri hesaplanmıştır. Sonuçlar, agregada segregasyonunun, asfalt karışımlarının hacimsel özelliklerini ve sıkıştırılabilirliğini önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Artan segregasyon seviyesi ile asfalt karışımlarının sıkıştırılabilirliğinin düştüğü ve aynı hedef yoğunlukta numune üretebilmek için çok daha fazla sıkıştırma eforu harcanması gerektiği belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Asfalt karışımı, Agregada segregasyonu, Sıkıştırılabilirlik, Superpave, Sıkışma enerjisi indeksi


Investigation of the Effects of Aggregate Segregation on Asphalt Mixture Compactability


Abstract: The compactability of asphalt mixtures refers to how easily these mixtures can be compacted to reach the target density. Proper compaction of asphalt mixtures is crucial for achieving the expected performance from the mixture. Aggregate segregation is defined as the concentration of coarse aggregates within the mixture in specific areas, and it is an important factor that affects the internal structure of the mixture. In this study, the effects of aggregate segregation on the volumetric properties and compactability of asphalt mixtures were investigated. To simulate different conditions, two groups of specimens were produced, applying the same compaction effort and targeting the same density. Unbiased-homogenous and segregated specimens at two levels were fabricated for each group using the Superpave gyratory compactor. To produce segregated samples, the mixtures prepared by combining the coarse and fine aggregates in the design gradation in different proportions and then placed in the mold in two layers before compaction. The volumetric properties of the produced samples were determined, and the compactability indices of the samples were calculated using the compaction curves. The results show that aggregate segregation significantly affects the volumetric properties and compactability of asphalt mixtures. It was also observed that the compactability of asphalt mixtures decreases with the increasing segregation level, and much more compaction effort is required to produce samples with the same target density.

Keywords: Asphalt mixture, Aggregate segregation, Compactability, Superpave, Compaction energy index

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Aydın Adnan Menderes University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, 09010, Aydın, Türkiye

E mail: aoyucel@adu.edu.tr (A. Ö. YÜCEL)

Ayhan Öner YÜCEL  <https://orcid.org/0000-0001-5888-2809>

Murat GÜLER  <https://orcid.org/0000-0001-6939-3322>

Gönderi: 31 Ekim 2024

Kabul: 09 Aralık 2024

Yayınlanma: 15 Ocak 2025

Received: October 31, 2024

Accepted: December 9, 2024

Published: January 15, 2025

Cite as: Yücel AÖ, Güler M. 2025. Investigation of the effects of aggregate segregation on asphalt mixture compactability. BŞJ Eng Sci, 8(1): 249-262.

1. Giriş

Asfalt karışımı; agregada, bitüm ve hava boşluğu olmak üzere üç ana bileşenden oluşan heterojen bir malzemedir (Hu vd., 2022). Asfalt karışımlarının performansı birçok parametreye bağlı olmakla birlikte, içyapı özellikleri performansı etkileyen en önemli faktörlerden birisidir (Guo vd., 2022; Jing vd., 2023; Taheri-Shakib ve Al-Mayah, 2023; Yu vd., 2023). İçyapı, karışımı oluşturan bileşenlerin yerleşimi ve birbiriyle fiziksel etkileşimi olarak tanımlanmaktadır (Tashman vd., 2001; Masad ve Button, 2004). Asfalt karışımlarında içyapı, kullanılan malzemelerin özelliklerine, karıştırma-sıkıştırma

sıcaklığına ve uygulanan sıkıştırma enerjine bağlı olarak değişmektedir (Sefidmazgi vd., 2013; Bessa vd. 2015; Zhang vd., 2016; Chen ve Wong, 2017).

Asfalt karışımlarının ağırlık olarak %90'ından fazlası agregalar tarafından oluşmaktadır ve bu yüzden karışımların sıkıştırılabilirliğinde agregaların büyük bir önemi vardır. Uygulanan sıkıştırma enerjisi agregada iskeletini önemli bir şekilde etkilemektedir ve farklı agregada yapısına sahip karışımlar için farklı sıkıştırma enerjisi uygulamak gerekmektedir (Gong vd., 2022; Jin vd., 2023; Selvam vd., 2023). Aynı nominal maksimum tane boyuna sahip olmasına rağmen gradasyonun farklı



olması durumunda tasarım yoğunluğuna ulaşmak için asfalt karışımlarının farklı seviyede sıkıştırılması gerekmektedir (Gao vd., 2014). İyi sıkışma performansı gösteren asfalt karışımları, tasarım yoğunluğuna kolayca sıkıştırılabilmekte ve servis koşullarında tutarlı seviyede stabilite sürdürülebilmektedir (Dubois vd., 2010). Sıcak karışım asfalt karışımlarının sıkıştırılması, hedeflenen kaliteye ulaşmadaki en önemli adımlardan birisidir. Yapılan karışım tasarımı ve kullanılan malzemelerin özelliklerine bakılmaksızın, iyi bir kaplama için asfalt karışımlarının düzgün sıkıştırılması çok önemlidir. Yapılan çalışmalar, esnek kaplamalardaki tekerlek izi, nem hasarı ve sökülme dahil olmak üzere erken dönem bozulmalarının %80'inin yetersiz sıkıştırmadan kaynaklandığını göstermektedir (Mohamed vd., 1993; Liu vd., 2007).

İyi bir agrega iskeleti, asfalt betonundan istenen performansı yakalayabilmek için önemli bir parametre olarak ortaya çıkmaktadır. Karışımdaki iri agregalar iskeleti oluştururken, çok daha ince agregalar ve bitüm birleşimi mastiği oluşturmaktadır (Onifade vd., 2016). Asfalt betonunda yük transferi, agrega iskeletini oluşturan tanecikler arasındaki temas noktaları vasıtasıyla gerçekleşmektedir. Mastik ise kaba agregalar arasında bağlayıcı bir kuvvet oluşturmakta ve aralarındaki boşlukları doldurarak yüksek dayanımlı bir karışım oluşturmaktadır (Cai vd., 2021). Yapılan çalışmalar agreganın karışım içerisindeki yerleşiminin performans ve sıkıştırılabilirlik açısından önemli olduğunu göstermektedir (Sefidmazgi vd., 2012; Dessouky vd., 2013; Jiang vd., 2017; Georgiou ve Plati, 2021).

Agrega segregasyonu, karışımdaki kaba agregaların belirli alanlarda kümelenmesi olarak tanımlanmaktadır. Asfalt karışımı içerisindeki kaba ve ince agregaların homojen olmayan dağılımı durumu laboratuvarda hazırlanan numunelerde ve sahada gerçekleştirilebilmektedir. Segregasyon durumunda, asfalt karışımlarının hacimsel ve mekanik özelliklerinde beklenenin dışında sonuçlarla karşılaşmaktadır. Agregasyonun sonucu olarak genellikle karışımın alt kısımlarında kaba agrega yoğunluğu fazlayken, yüzeye yakın kısımlarda tasarım gradasyonuna göre kaba agrega miktarı azdır (Azari, 2005). Segregasyonun asfalt karışımının sıkıştırılabilirliğine ve hacimsel özelliklerine olumsuz etkileri olacağı bilinmektedir. Asfalt karışımlarının karıştırılması ve sıkıştırılması sırasında meydana gelecek agrega segregasyonunun asfalt betonunun mekanik performansı ve servis ömrü açısından kritik etkileri olduğu daha önceki çalışmalarda ortaya konulmuştur (Khedaywi ve White, 1995; Cross vd., 1998; Stroup-Gardiner ve Brown, 2000). Yapılan çalışmalar, agrega segregasyonunun, asfalt betonunun yorulma dayanımı, çekme dayanımı ve tekerlek izi direnci gibi mekanik performansını düşürdüğünü göstermektedir (Cross ve Brown, 1993; Cross vd., 1998). Segregasyon durumunda kaplamanın bakım-onarım maliyetleri de artmakta ve bu faaliyetlerin daha sık

yürütülmesi gerekliliğini doğurmaktadır. Kaplamada segregasyonun gerçekleştiği bölgelerde bitüm içeriği ve asfalt betonu yoğunluğunun, kaplamanın diğer kısımlarına göre daha düşük olduğu belirlenmiştir (Cross ve Brown, 1993). Buna karşın, ince agregaların yoğunlaştığı kaplama kısımlarında ise hava boşluğunun daha düşük olduğu, bitüm içeriğinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir (Williams vd., 1996).

Asfalt kaplamalarda meydana gelen segregasyona ek olarak, laboratuvarında üretilen ve tasarım için yürütülen hacimsel ve mekanik testlerde kullanılan numunelerde meydana gelen agrega segregasyonu da kritik önem taşımaktadır (Yücel, 2019). Agregasyonun gerçekleşen numuneler üzerinde yapılan testlerde, test sonuçları arasında yüksek sapmalar görülmekte ve tasarım aşamasında problemlere sebep olabilmektedir (Kwon vd., 2019; Huanan vd., 2021; Shi vd., 2023). Segregasyona uğramış numunelerdeki tutarsız sonuçlar, değişen agrega dağılımıyla etkilenen agrega temas yüzeyleri ve sıkışmada elde edilen düşük verimin sonuçları olarak yorumlanabilmektedir. Bu sebeplerle hem sahada hem de laboratuvarında meydana gelen agrega segregasyonu, asfalt karışımlarının sıkıştırılabilirliği ve performans özelliklerini önemli şekilde etkilenmekte ve bu konuyu irdeleme ihtiyacı doğmaktadır. Laboratuvar ortamında asfalt karışımlarının sıkıştırılabilirliği Superpave yoğurmalı pres kullanılarak değerlendirilebilmektedir. Üretilen numunelerin hacimsel sonuçları sıkıştırılabilirlik açısından önemli göstergeler olmakla birlikte birçok araştırmacı tarafından sıkışma indeksleri de geliştirilmiştir (Rand, 1997; Bahia vd., 1998; Mahmoud ve Bahia, 2004; Mallick, 1999). Bahia vd. (1998) Superpave yoğurmalı pres tarafından ölçülen sıkışma eğrilerinin sıkışma indekslerinin hesaplanması için kullanılabileceğini ve bu indekslerin karışımların yapım ve servis sırasındaki performansını temsil ettiğini belirlemişlerdir. Ayrıca yazarlar tarafından asfalt karışımlarının yapım ve servis sırasındaki potansiyel performanslarını değerlendirmek için, sıkışma enerjisi indeksi ve trafik sıkıştırma indeksi belirlenmiştir.

Bu çalışmada, laboratuvar teknikleri kullanılarak ön koşulsuz-homojen ve segregasyona uğramış Superpave yoğurmalı pres numuneleri üretilmiştir. Üretilen farklı segregasyon seviyesindeki numunelerin hacimsel özellikleri değerlendirilmiştir. Farklı segregasyon seviyesinde hazırlanan numunelerin; aynı sıkıştırma eforu uygulanması durumunda hacimsel özellikleri ve aynı yoğunluğa ulaşmaları için uygulanması gereken sıkıştırma enerjileri irdelemiştir. Bu çalışmada, agrega segregasyonunun, asfalt betonu sıkıştırılabilirliğine etkilerinin ortaya konulması hedeflenmiştir. Bu sebeple, Superpave yoğurmalı pres kullanılarak üretilen numunelerinin hacimsel özellikleri ve sıkıştırma parametreleri incelenmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Superpave Karışım Tasarım Metodu

Superpave karışım tasarım yönteminde asfalt karışımlarını sıkıştırmak için Superpave yoğurmalı pres kullanılmaktadır (Şekil 1). Bu ekipman, sıcak karışım asfalt numunelerini sahada elde edilene benzer bir yoğunlukta sıkıştırmak için geliştirilmiştir (Roberts vd., 1996). Bu yöntemle sıkıştırılan numunelerdeki agrega doğrultuları da sahadaki duruma benzerdir (Tashman vd., 2001). Superpave yoğurmalı pres ile numune sıkıştırmak için uygulanan düşey basınç, yoğurma açısı ve sıkıştırma devir hızı gibi parametreler kullanıcı tarafından tanımlanabilmekte ve sıkıştırma enerjisinin kontrol edilmesini sağlamaktadır. Superpave tasarım yönteminde bu parametreler için sabit değerler kullanılmaktadır. Sıkıştırma işlemi için sıkıştırma başlığı tarafından uygulanacak düşey basınç 600 kPa ve sıkıştırma açısı 1.25° olarak belirlenmiştir. Yoğurma işleminin dakikada 30 devir olacak şekilde uygulanması gerekmektedir. Numuneye uygulanacak sıkıştırma devir sayısı ise trafik yüküne göre değişmektedir ve takip edilen standartta (AASHTO R35, 2010) farklı trafik hacimleri için uygulanması gereken devir sayıları belirtilmiştir. Böylelikle saha koşulları daha iyi simüle edilmiş olacaktır. Superpave yoğurmalı pres 100 mm veya 150 mm çapında numune üretmeye uygun olsa da Superpave tasarım şartnameleri 150 mm çapında numune kullanımını gerektirmektedir. Tasarımda uygulanacak sıkıştırma devir sayıları, 20 yıllık tasarım trafik hacmine göre belirlenmektedir. Farklı trafik hacimleri için uygulanması gereken sıkıştırma devir sayısı Tablo 1'de verilmiştir (AASHTO R35, 2010).



Şekil 1. Superpave yoğurmalı pres.

Tablo 1. Superpave yoğurmalı pres devir sayıları (AASHTO R35, 2010)

Tasarım ESAL (milyon)	Sıkıştırma parametreleri		
	N_i	N_d	N_m
<0,3	6	50	75
0,3 to <3	7	75	115
3 to <30	8	100	160
≥30	9	125	205

Bu tabloda; N_i : ilk sıkıştırma devir sayısı, N_d : tasarım sıkıştırma devir sayısı ve N_m : maksimum sıkıştırma devir sayısı olarak tanımlanmaktadır. N_i ve N_m devir sayıları karışımın sıkıştırılabilirliğini değerlendirmek için kullanılırken, N_d devir sayısında sıkıştırılan numuneler optimum bitüm içeriğini belirlemek için kullanılmaktadır. N_d 'nin açılımı N-tasarım olup tasarım trafik hacmi sonrasında sahada gerçekleşmesi beklenen yoğunlukla aynı yoğunlukta numune üretmek için uygulanması gereken yoğurmalı pres devir sayısını göstermektedir. Karışım tasarımında seçilen N_d devir sayısında sıkıştırılan numunelerden %4 hava boşluğunu sağlayan bitüm içeriği optimum değer olarak seçilmektedir. N_i 'nin açılımı N-ilk olup karışım sıkıştırılabilirliğini değerlendirmede kullanılmaktadır. Çok hızlı sıkışan numuneler sahada kolay bütünlüğünü kaybedebilmekte ve trafik yükleri altında stabilitesini koruyamamaktadır (Leiva ve West, 2008). %4 hava boşluğuna göre tasarlanan karışımlarda, N_i devir sayısında sıkıştırılan numunelerde hava boşluğu en az %11 olmalıdır. N_m 'nin açılımı N-maksimum olup laboratuvarında uygulanacak ve sahada asla ulaşılamayacak yoğunlukta numune üretmek için gerekli yoğurma devir sayısıdır. Bu devir sayısında sıkıştırılacak numunelerde hava boşluğunun çok düşük olması trafik yükleri altında çok fazla sıkışıp tekerlek izi gibi problemler yaratacağının göstergesidir. N_m devir sayısı ile sıkıştırılan numunelerde minimum hava boşluğu %2 olmalıdır. Bu çalışmada, tasarım ESAL değerleri 3-30 milyon aralığında kabul edilerek $N_i=8$, $N_d=100$ ve $N_m=160$ sıkıştırma devir sayılarına göre karışım tasarımları yapılmıştır.

2.2. Malzemeler ve Karışım Tasarımı

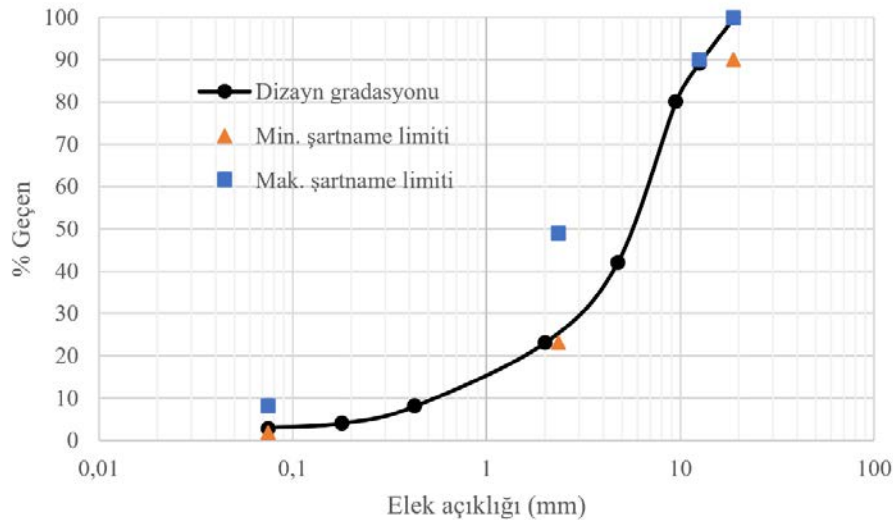
Bu çalışmada, farklı saha koşullarını simüle edebilmek için iki grup numune hazırlanmıştır. İlk gruptaki numuneleri (G1) üretmek için aynı sıkıştırma eforu uygulanmıştır. Bu sıkıştırma devir sayısı, önceki bölümde tartışıldığı gibi 100 devir olarak belirlenmiştir. İkinci gruptaki numuneler (G2) ise %4 hava boşluğuna karşılık gelen yoğunlukta sıkıştırılmıştır. Bu iki grup için farklı kaynaklardan elde edilen kalker agregaları ve 50/70 penetrasyon sınıfında bitüm kullanılmış olup kullanılan agrega ve bitüm özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Agrega ve bitüm özellikleri

Agrega özellikleri	Şartname	G1 Tasarımı	G2 Tasarımı
		Kalker-1	Kalker-2
Kaba agreg	Hacim özgül ağırlık	2,684	2,680
	Zahiri özgül ağırlık	2,711	2,714
	Su emme (%)	0,367	0,473
İnce agreg	Hacim özgül ağırlık	2,664	2,630
	Zahiri özgül ağırlık	2,695	2,669
	Su emme (%)	0,432	0,553
Filler	Zahiri özgül ağırlık	2,704	2,693
Los Angeles aşınma (%)	AASHTO T 96	32	29
Bitüm özellikleri		Bitüm-1	Bitüm-2
Penetrasyon (25°C, 0.1 mm)	AASHTO T 49	54	60
Yumuşama noktası (°C)	AASHTO T 53	50	49,5
Düktilite (cm @ 25°C)	AASHTO T 51	>100	>100
Özgül ağırlık	AASHTO T 228	1,036	1,033

Tasarım aşamasında, sıcak karışım asfalt numuneleri 150 mm çapında ve 115 mm yüksekliğinde olacak şekilde hazırlanmış ve sıkıştırılmıştır. Her bir numune için 4900 gram agreg kullanılmıştır. Tasarımlarda kullanılan agreg gradasyonu Şekil 2’de gösterilmektedir. Tasarım aşamasında her iki tasarım için de 100 devir sıkıştırma uygulanmış ve %4 hava boşluğuna karşı gelen bitüm oranları optimum değerler olarak seçilmiştir. Sıkıştırılmış numuneler hacimsel olarak değerlendirilerek karışım tasarımları yürütülmüştür. N_d sıkıştırma devir sayısına ek olarak N_i ve N_m sıkıştırma devir sayılarında hava boşluğu oranları da kontrol edilmiştir. Tasarımlarda kullanılan bitümler için Brookfield viskozite deneyleri yardımıyla karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları belirlenmiştir. AASHTO T316 standardına göre yürütülen testlerde karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları 0,17 Pa.s±0,02 ve 0,28 Pa.s±0,03 viskozite değerlerine karşılık gelen sıcaklıklar olarak seçilmiştir. G1 tasarımında kullanılan bitüm için

karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları 152°C ve 140°C seçilmişken, G2 dizaynı için kullanılan bitümde 154°C ve 143°C olarak belirlenmiştir. Agreg ve bitüm karışımı hazırlandıktan sonra sıkıştırma öncesi numuneler 2 saat boyunca sıkıştırma sıcaklığında fırında bekletilerek yaşlandırılmıştır. Bu prosedür ile karışımın hazırlanması, taşıma ve serilme safhasındaki yaşlanma durumu simüle edilmektedir. Yaşlandırma işleminin yapılmaması durumunda daha düşük bir optimum bitüm içeriği bulunacak ve kaplamada durabilite kaybına neden olacaktır. Farklı bitüm oranları için üretilen numuneler için sıkıştırılmış özgül ağırlık (G_{mb}) ve sıkıştırılmamış numuneler kullanılarak maksimum özgül ağırlık (G_{mm}) değerleri bulunmuştur. Tasarım için yapılan tüm değerlendirilmelerin sonucunda %4 hava boşluğuna karşı gelen optimum bitüm içerikleri G1 ve G2 tasarımları için sırasıyla %5 ve %4,75 olarak belirlenmiştir.



Şekil 2. Agrega gradasyon eğrisi ve şartname limitleri.

2.3. Laboratuvarda Segregasyona Uğramış Asfalt Karışımlarının Üretimi

Agrega segregasyonunun, asfalt karışımı özelliklerine etkilerini araştırmak amacıyla farklı teknikler kullanılarak laboratuvar ortamında segregasyona uğramış numuneler üretmek mümkündür. Bu tekniklerin en eskilerinden olan yöntemde, tasarım gradasyonunun kaba ve ince kısımları farklı oranlarda karıştırılarak yapay olarak segregasyona uğramış numuneler üretilmiştir (Khedaywi ve White, 1995). Bahsedilen çalışmada üretilen farklı seviyelerdeki segregasyonları temsil eden Marshall numunelerinin agrega gradasyonları tasarım gradasyonundan tamamen farklı olmaktadır ve numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinde büyük farklılıklar olduğu görülmektedir. Bir başka çalışmada ise tasarım gradasyonundan ufak sapmalarla farklı gradasyonlar elde edilmiş ve bu gradasyonlarda numuneler üretilmiştir (Xuelian vd., 2018). Segregasyon derecesi ise orijinal gradasyonun her elek boyu için yüzde geçenden toplam sapma miktarına göre belirlenmektedir. Agregada gradasyonunun korunarak, numunelerde meydana gelecek düşey yöndeki agrega segregasyonunu simüle etmek için de yöntemler geliştirilmiştir. Numune içerisindeki agrega segregasyonunu temsil etmek için geliştirilen yöntemlerde, orijinal gradasyon korunarak kaba agregaların numunelerin alt kısmında yoğunlaşması hedeflenmiştir (Azari, 2005; Yücel, 2019). Bu yöntemle, aynı gradasyona sahip, düşey doğrultuda homojen olmayan agrega dağılımına sahip numuneler üretmek mümkündür. Bu metod, laboratuvarda üretilen numunelerde ve sahada asfalt karışımını yerleştirme sırasında meydana gelen düşey doğrultudaki segregasyonu başarılı şekilde temsil etmektedir. Bu yöntemde, tasarım gradasyonu No.4 (4,75 mm) elekten geçen ve kalan agregalar olarak ikiye ayrılmakta ve farklı oranlarda karıştırılarak kaba agreganın daha yoğun ve daha az yoğun olduğu iki ayrı agrega grubu elde edilmektedir. Bu agregalar ayrı olarak bitümle karıştırılmakta ve kalıba 2 tabaka şeklinde yerleştirilerek sıkıştırılmaktadır. Alt tabakaya kaba agrega yoğunluklu karışım, üst tabakaya ise ince agrega yoğunluklu karışım yerleştirilmektedir. Bu yöntemle, numunedeki toplam agrega miktarı tasarım gradasyonunda olup, farklı seviyelerde düşey agrega segregasyonuna uğramış numuneler elde edilmektedir.

Bu çalışma kapsamında G1 ve G2 grupları için 3 farklı segregasyon seviyesinde numuneler üretilmiştir. Bu segregasyon seviyeleri; homojen-ön koşulsuz (H), orta seviye segregasyon-ön koşullu (O) ve yüksek seviye segregasyon-ön koşullu (Y) olarak sınıflandırılmıştır. Her bir segregasyon seviyesinde 6 numune olmak üzere, toplamda 2 grup için 36 numune üretilip değerlendirilmiştir (Tablo 3).

Tablo 3. Laboratuvarda üretilen numune tipleri

Tasarım	Segregasyon seviyesi	Numune sayısı
G1	H	6
	O	6
	Y	6
G2	H	6
	O	6
	Y	6

Ön koşulsuz numuneler elde etmek için, asfalt karışımlarının hazırlaması ve kalıba yerleştirilmesi esnasında mümkün olduğunca homojen olmaları hedeflenmiştir. Orta ve yüksek seviyede segregasyona uğramış ön koşullu numuneler üretmek için ise asfalt karışımları kalıba iki tabaka olarak yerleştirilmiş ve sıkıştırılmıştır. Agregada segregasyonu gerçekleştiğinde genellikle kaba agregaların karışımın alt kısımlarında kaldığı, yüzeye yakın bölgelerde kaba agrega yoğunluğunun azaldığı bilinmektedir. Bu sebeple, ön koşullu numunelerde alt katmana tasarım gradasyonuna göre daha kaba, üst katmana ise daha ince bir karışım yerleştirilmesi planlanmıştır. Bu katmanlarda kullanılacak agregalar, tasarım gradasyonu temel alınarak belirlenmiştir. Tasarım gradasyonunda agregaların %58'inin 4,75 mm açıklıklı elek üzerinde kaldığı, %42'sinin ise bu elekten geçtiği görülmektedir. Numunenin alt ve üst katmanlarında kullanılacak agregaları seçmek için tasarım gradasyonundaki 4,75 mm açıklıklı elekten geçen ve kalan agregalar farklı oranlarda karıştırılmıştır. Orta seviye segregasyonlu numunelerde alt katmanı oluşturacak kaba kısım için tasarım gradasyonundaki kaba agregaların %68'i, ince agregaların ise %40'ı kullanılmıştır. Numunelerin üst kısmını oluşturacak ince kısım için ise kaba agregaların kalan %32'lik kısmı ve ince agregaların %60'ı kullanılmıştır. Yüksek seviye segregasyonlu numune üretiminde ise numunelerin alt katmanını oluşturacak kaba kısım için tasarım gradasyonundaki kaba agregaların %73'ü, ince agregaların ise %40'ı kullanılmıştır. Numunelerin üst kısmını oluşturacak ince kısım için ise kaba agregaların kalan %27'si ve ince agregaların %60'ı kullanılmıştır. Bu oranların seçilmesine laboratuvar ortamında yapılan deneme dökümleriyle karar verilmiştir. Alt ve üst katmanlarda kullanılan agregaların toplamı, tasarım agrega gradasyonuna eşittir. Tablo 4'te tasarım gradasyonu ile orta ve yüksek seviye segregasyon için hazırlanacak katmanların gradasyonları verilmiştir.

Tablo 4. Tasarım gradasyonu ve katman gradasyonları

Elek açıklığı (mm)	Tasarım gradasyonu	% Geçen			
		Orta seviye segregasyon (O)		Yüksek seviye segregasyon (Y)	
		Kaba kısım	İnce kısım	Kaba kısım	İnce kısım
19	100	100	100	100	100
12,5	89	86,7	92	86,4	92,7
9,5	80	75,8	85,4	75,3	86,8
4,75	42	29,9	57,6	28,4	61,7
2	23	16,4	31,5	15,6	33,8
0,425	8	5,7	11	5,4	11,7
0,18	4	2,8	5,5	2,7	5,9
0,075	3	2,1	4,1	2	4,4

İki katman olarak sıkıştırılan ön koşullu numunelerin kaba ve ince kısımlarında kullanılacak bitüm miktarı asfalt film kalınlıklarına göre belirlenmiştir. İlk olarak G1 ve G2 tasarımları için optimum bitüm içeriğinde asfalt film kalınlıkları hesaplanmıştır. İnce ve kaba kısımlardaki bitüm içeriği ise bu kısımlardaki asfalt film kalınlıklarının tasarım asfalt film kalınlıklarına eşit olacağı varsayımına göre yapılmıştır. Asfalt film kalınlığı eşitlik 1 yardımıyla hesaplanmaktadır (Roberts vd., 1996; Debaio vd., 2013).

$$FT = 1000x \frac{P_{be}}{SAxP_sxG_b} \quad (1)$$

Burada:

FT = Asfalt film kalınlığı (μm)

P_{be} = Efektif bitüm içeriği (karışım ağırlığına göre, %)

P_s = Ağırlık cinsinden agrega yüzdesi (%)

SA = Agrega yüzey alanı (m^2/kg)

G_b = Bitüm özgül ağırlığı

Asfalt film kalınlığı hesaplamalarında tasarım aşamasında belirlenen hacimsel özelliklerin yanında agrega yüzey alanlarının da hesaplanması gerekmektedir. Agrega yüzey alanlarını hesaplamak için belirli eleklerden geçen agrega yüzdesi ile bu elekler için belirlenen katsayılar çarpılmaktadır. G1 ve G2 tasarımlarında aynı agrega gradasyonu kullanıldığından bu tasarımlar için hesaplanan agrega yüzey alanı Tablo 5'te gösterilmiştir.

Tablo 5. Agrega yüzey alanlarının hesaplanması

Elek açıklığı, mm (in)	% Geçen	Yüzey alanı faktörü	Yüzey alanı (m^2/kg)
19 (3/4)	100	0,41	
12,5 (1/2)	89	0,41	0,41x1=0,41
9,5 (3/8)	80	0,41	
4,75 (No.4)	42	0,41	0,41x0,42=0,17
2,36 (No.8)	25,5	0,82	0,82x0,255=0,21
1,18 (No.16)	15,2	1,64	1,64x0,152=0,25
0,6 (No.30)	9,7	2,87	2,87x0,097=0,28
0,3 (No.50)	6	6,14	6,14x0,06=0,37
0,15 (No.100)	3,7	12,29	12,29x0,037=0,45
0,075 (No.200)	3	32,77	32,77x0,03=0,98
Toplam			3,12 m^2/kg

G1 ve G2 tasarımları için yukarıda verilen eşitlik kullanılarak asfalt film kalınlıkları sırasıyla 13,82 μm ve 13,31 μm olarak hesaplanmıştır. G1 ve G2 numuneleri için hesaplanan ince ve kaba gradasyonlu katmanlarda kullanılacak bitüm miktarları Tablo 6'da özetlenmiştir. Bu çalışma kapsamında üretilen numuneler daha sonra tekrarlı sünme testine tabi tutulacağından numune boyutlarının bu teste uygun olması gerekmektedir. Tekrarlı sünme testi için üretilen 150 mm çapında Superpave numunelerinden karot alınarak elde edilen 100 mm çapında numuneler test için kullanılmaktadır. Numune uzunluğu ise üst ve alt noktalardan kesildikten sonra 150 mm olmalıdır. Bu yüzden, kesilmeden önceki numune boyunun 165 mm civarında olması hedeflenmektedir. Bu boyutlarda numune üretmek için her bir numune için 7000 gram agrega kullanılmıştır. Ön koşulsuz numunelerde 7000 gram agrega optimum bitüm içeriğiyle karıştırılarak fırına konulmuş, 2 saatlik yaşlandırma süresinden sonra Superpave numune kalıbına mümkün olduğunca homojen olacak şekilde yerleştirilmiş ve sıkıştırılmıştır. Ön koşullu numunelerde ise kaba ve ince kısımlar ayrı ayrı hazırlanmış ve iki ayrı kapta yaşlanmaları için fırına konulmuştur. 2 saatlik sürenin ardından Superpave numune kalıbına ilk olarak kaba karışım yerleştirilmiş, daha sonra yüzeyi spatula ile düzlenerek ince karışım eklenmiştir. Kalıba yerleştirilen numunelerin alt ve üstüne filtre kağıtları ve çelik plakalar yerleştirilmektedir. Böylelikle karışımın sıkıştırma başlığına veya kalıba yapışması engellenmekte ve düzgün bir karışım hazırlanması sağlanmaktadır. Böylelikle ön koşulsuz numunelerle aynı gradasyonda ve bitüm içeriğinde olan fakat kaba ve ince agrega dağılımı homojen olmayan numunelerin üretimi sağlanmıştır.

Tablo 6. Kaba ve ince gradasyonlu katmanlarda kullanılacak bitüm miktarları

Tasarım	Parametreler	Tasarım gradasyonu	Orta seviye segregasyon		Yüksek seviye segregasyon	
			Kaba kısım	İnce kısım	Kaba kısım	İnce kısım
G1	Agrega Yüzey alanı, m ² /kg	3,12	2,34	4,13	2,25	4,39
	Bitüm içeriği, %	5	3,98	6,28	3,85	6,61
	Agrega ağırlığı, g	7000	3936,8	3063,2	4139,8	2860,2
	Bitüm ağırlığı, g	368,5	163,1	205,4	165,9	202,6
G2	Agrega Yüzey alanı, m ² /kg	3,12	2,34	4,13	2,25	4,39
	Bitüm içeriği, %	4,75	3,76	5,99	3,64	6,31
	Agrega ağırlığı, g	7000	3936,8	3063,2	4139,8	2860,2
	Bitüm ağırlığı, g	349,1	153,9	195,2	156,5	192,6

Superpave yoğurmalı pres ekipmanı bir yazılım vasıtasıyla kontrol edilebilmektedir. Bu yazılımda sıkıştırma uygulanacak devir sayısı tanımlanarak sıkıştırma işlemi yapılabilmektedir. G1 numunelerinin aynı sıkıştırma eforu ile sıkıştırılması hedeflendiğinden tüm numuneler için yazılıma hedef sıkıştırma devir sayısı 100 devir olarak girilmiş ve cihaz bu devir sayısına ulaştığında sıkıştırma işlemini sonlandırmıştır. G2 numunelerinin ise aynı hedef yoğunlukta sıkıştırılması hedeflenmiştir. Bu yazılımda, kalıba yerleştirilen asfalt karışımın ağırlığı girilebilmekte ve numune yükseklikleri her devirde kaydedilmektedir. Kullanılan kalıpların çapı da yazılıma 150 mm olarak tanımlanmıştır. Numune ağırlığı, çapı ve yüksekliği verisini kullanarak, yazılım her sıkıştırma devrinde numunenin yoğunluğunu hesaplayabilmektedir. Bu sayede yazılıma hedef bir yoğunluk tanımlanıp numunelerin hedef yoğunluğa ulaşmaya kadar sıkıştırılması sağlanabilmektedir. Yazılım tarafından hesaplanan yoğunluk değeri, gerçek ölçülen yoğunluk değerinden bir miktar farklıdır. Bunun sebebi numunenin alt, üst ve yan yüzeylerdeki boşlukların fazla olmasıdır (Masad vd., 2002). Numunelerin gerçek yoğunluk değerleri ancak özgül ağırlık deneyi ile bulunabilir. Deneme numuneleri üretilerek hesaplanan ve gerçek yoğunluk değerleri arasındaki ilişki incelenmiş ve düzeltme faktörü belirlenmiştir. G2 numuneleri %4 hava boşluğuna karşılık gelen yoğunlukta sıkıştırılmak istendiğinden, bu hava boşluğu için ulaşılması gereken gerçek yoğunluk değeri belirlenmiş ve düzeltme faktörü kullanılarak yazılıma tanımlanacak yoğunluk değeri belirlenmiştir. G2 numunelerinin sıkıştırılması esnasında hesaplanan yoğunluk değeri yazılıma tanımlanmış ve numuneler bu yoğunluğa ulaşmaya kadar sıkıştırma işlemi devam etmiştir. Sonuçta, G1 numuneleri 100 devir sıkıştırma uygulanarak elde edilmişken, G2 numuneleri %4 hava boşluğuna karşı gelen yoğunluğa ulaşacak şekilde sıkıştırılmıştır. Böylelikle, farklı segregasyon seviyesindeki numunelerin aynı sıkıştırma eforu altındaki hacimsel özellikleri ve aynı yoğunluğa ulaşması için uygulanması gereken sıkıştırma eforunun incelenmesi sağlanmıştır.

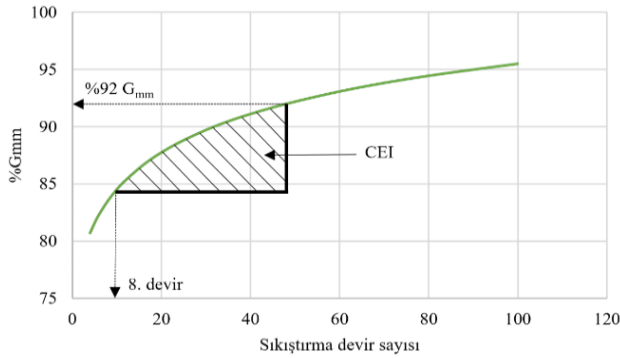
2.4. Sıcak Karışım Asfaltların Sıkıştırılabilirliği

Superpave tasarım yönteminin kullanımının yaygınlaşmasıyla birlikte, asfalt karışımlarının sıkıştırılabilirliğini değerlendirmek için birçok metod geliştirilmiştir. Aynı sıkıştırma eforu altında sıkıştırılan numunelerin hacimsel özellikleri ve aynı hedef yoğunluğa ulaşmak için uygulanması gereken sıkıştırma devir sayıları karışımların sıkıştırılabilirliği bakımından önemli parametrelerdir.

Superpave yoğurmalı pres, sıkıştırma süresince elde edilen yükseklik ve sıkışma yüzdesine ek olarak numunelerin kayma direncini de kaydetmektedir. Kayma direnci parametresi, her sıkıştırma devrinde numunede ölçülen en büyük kayma gerilmesi olup yüksekliğe benzer şekilde sıkıştırma boyunca kaydedilmektedir. Guler vd. (2000) yoğurmalı pres ile sıkıştırma boyunca karışımların kayma direncini ölçmek için bir prosedür geliştirmişlerdir. Bu çalışmada kayma direncinin, gradasyon, bitüm içeriği ve sıcaklığa çok hassas olduğu görülmüştür. Ayrıca, hesaplanacak kayma direncinin karışımların sıkıştırılabilirliği ve tekerlek izi dayanımı için önemli göstergesi olduğu ortaya konulmuştur. Sıkıştırılabilirlik değerlendirilmesi için önerilen parametrelerden ilki %92 G_{mm} 'e ulaşıldığı sıkıştırma devrinde kaydedilen kayma direncidir. Bu değer çok yüksek olması karışımın sıkıştırılabilirliğinin düşük olduğunun göstergesidir. İkinci parametre ise %86 ile %92 G_{mm} arasında, kayma direnci eğrisi altında kalan alanın, G_{mm} (% sıkışma) eğrisi altında kalan alana oranından elde edilen enerji değeridir (E). Bu değer, karışımı %14 hava boşluğundan %8 hava boşluğuna sıkıştırmak için gerekli enerjiyi temsil etmektedir. Sahada karışımlar %92 G_{mm} değerine ulaşmaya kadar sıkıştırıldığından, hesaplanan bu parametre sahadaki sıkışma koşullarını temsil etmektedir.

Bunların yanında Superpave yoğurmalı pres yazılımından elde edilen sıkışma eğrilerini kullanarak hesaplanan indeksler de önemli sıkıştırılabilirlik parametreleridir. Sıkışma enerjisi indeksi (CEI) yaygın olarak kullanılan indekslerdendir (Ma vd., 2020). Superpave yoğurmalı presin kaydettiği verilerle elde edilen sıkışma eğrisinde, sıkıştırma devir sayılarına karşı gelen sıkışma yüzdesi (% G_{mm}) elde edilmektedir (Şekil

3). Sıkıştırma eğrisinin, 8. sıkıştırma devri ve maksimum özgül ağırlığın ($G_{mm,max}$) %92'sine karşılık gelen devir aralığında kalan alan CEI indeksini vermektedir (Mahmoud ve Bahia, 2004). CEI sayısı %92 G_{mm} değerine ulaşmak için sahada sıkıştırıcı silindirler tarafından yapılacak işi temsil etmektedir. Düşük CEI değerleri sahada daha kolay sıkıştırma gerçekleşeceğinin göstergesidir. Daha hızlı sıkıştırma karışımın daha işlenebilir ve sıkıştırılabilir olduğunu gösterdiğinden istenilen bir durumdur. Çok düşük CEI değeri karışımın bütünlüğünü kaybetmeye meyilli olduğunu göstergesidir ve bu durumdan kaçınılmalıdır (Mahmoud ve Bahia, 2004). 8. devirdeki G_{mm} değeri sahada serilen asfalt karışımının sericiden çıktığı durumu temsil etmektedir. %92 G_{mm} değerinin seçilme sebebi ise, yaygın uygulama olarak sıcak karışım asfaltlar silindirlerle bu yoğunluğa sıkıştırılmakta ve sıkıştırma trafik yükleri altında devam etmektedir.



Şekil 3. Sıkıştırma eğrileri kullanarak CEI hesaplanması.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Hacimsel Sonuçlar

Üretilen numuneler için yapılan hacim özgül ağırlık deneyleri ve tasarım aşamasında yapılan agrega özgül ağırlık ve asfalt karışımı maksimum özgül ağırlık deney sonuçları kullanılarak hacimsel özellikler belirlenmiştir. Hava boşluğu, mineral agregalar arası boşluk oranı (VMA) ve bitüm ile dolu boşluk oranı (VFA) önemli

hacimsel özellikler olup karışımların yerleştirilmesi, sıkıştırılması ve servis koşulları altındaki davranışları için önemli parametrelerdir. Sıkıştırılmış numunelerin yükseklikleri de karışımların sıkıştırılabilirliği açısından önemli olup, Superpave yoğunmalı pres cihazı tarafından her numune için kaydedilmiştir. G1 ve G2 tasarımları için 3 ayrı segregasyon seviyesinde üretilen numuneler için hesaplanan hava boşluğu, VMA ve VFA değerleri Tablo 7'de verilmiştir. Bu değerler her bir sınıf için üretilen 6 numunenin sonuçlarının ortalamasıdır.

Farklı segregasyon seviyelerindeki G1 numunelerinin hava boşluğu incelendiğinde, artan segregasyon seviyesi ile hava boşluğu miktarının arttığı görülmüştür. Tablo 7'de görüleceği gibi G1-H, G1-O ve G1-Y numunelerinin ortalama hava boşlukları sırasıyla %4,47, %5,69 ve %6,46 olarak belirlenmiştir. Tasarım numuneleri 4900 gram agrega kullanılarak hazırlanmış ve optimum bitüm içeriği %4 hava boşluğu için hesaplanmıştır. Ancak test numuneleri 7000 gram agrega kullanılarak hazırlandığından aynı oranda bitüm kullanılmasına rağmen artan karışım hacmi, ön koşulsuz G1-H numunelerinin hava boşluğu değerlerinin bir miktar artışına sebep olmuştur. Segregasyona uğramış numunelerde kaba agregaların yoğunlaştığı numunelerin alt bölgelerinde hava boşluklarının oldukça yüksek olduğu gözlemlenmiştir. İnce agregaların yoğun olduğu numunelerin üst bölgelerinde ise hava boşluğu miktarı normal koşullara göre az olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, numunelerin tamamı göz önüne alındığında agrega segregasyonun hava boşluğu miktarını arttırdığı görülmüştür. G1-H ve G1-Y numuneleri arasında %2 civarında bir hava boşluğu farkı bulunmaktadır. Buna paralel olarak VMA değeri artan segregasyon seviyesi ile artmakta iken, VFA değerleri artan segregasyon seviyesi ile azalmaktadır. Bu sonuçlar, agrega segregasyonunun derecesi arttıkça asfalt karışımlarının sıkıştırılabilirliğinin azaldığını göstermektedir. Sıkıştırılabilirlik yanında, bu durumun asfalt karışımının mekanik performansı ve durabilitesini de olumsuz etkileyeceği açıktır.

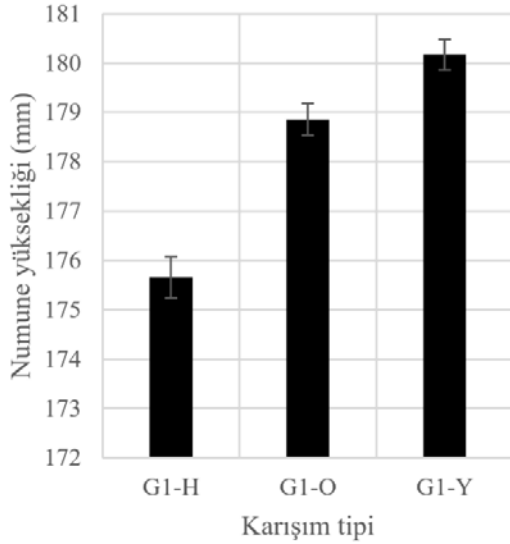
Tablo 7. Farklı segregasyon seviyesindeki numunelerin hacimsel özellikleri

Tasarım	Segregasyon seviyesi	Hava boşluğu (%)		VMA (%)		VFA (%)	
		Ortalama	Standart sapma	Ortalama	Standart sapma	Ortalama	Standart sapma
G1	H	4,47	0,20	14,5	0,18	69,2	1,02
	O	5,69	0,14	15,6	0,12	63,5	0,59
	Y	6,46	0,20	16,3	0,17	60,3	0,78
G2	H	3,94	0,08	13,6	0,07	71,1	0,44
	O	3,94	0,07	13,6	0,07	71,1	0,40
	Y	3,94	0,03	13,6	0,03	71,1	0,19

Yoğunmalı pres ile sıkıştırma esnasında numune yüksekliğinin uygulanan devir sayısına karşı düşüşü karışımın sıkışmaya karşı direncini göstermektedir. Bu veri, karışımların sıkıştırılabilirliğini değerlendirmek için kullanılmaktadır. Aynı sıkıştırma devir sayısı

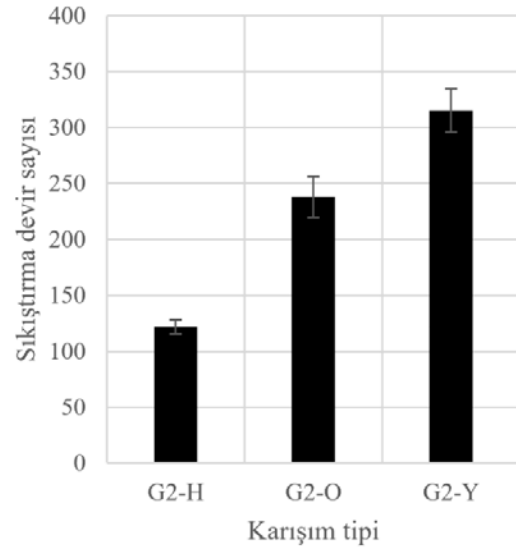
uygulanarak üretilmiş G1 numunelerinin her bir segregasyon seviyesi için ortalama numune yükseklikleri Şekil 4'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi G1-H, G1-O ve G1-Y numunelerinin ortalama yükseklikleri 175,7 mm, 178,9 mm ve 180,2 mm olarak belirlenmiştir. Bu

sonuçlar, agrega segregasyonun aynı sıkıştırma eforu altında numune yüksekliklerini etkilediğini göstermektedir ve agrega segregasyonu sonucu değişen asfalt betonu içyapısının göstergesidir. Homojen karışımlara kıyasla agrega temas noktalarının (toplam temas noktası toplamı, toplam agrega temas uzunluğu vb.) özellikleri de ciddi şekilde etkilenecektir. Asfalt karışımlarının yük taşıma kapasiteleri önemli ölçüde agregalar arası temasla sağlandığından, değişen agrega dağılımının performansı da etkileyeceği öngörülmektedir.



Şekil 4. Aynı sıkıştırma devir sayısı sonucu numune yükseklikleri.

Aynı yoğunlukta sıkıştırılan G2 numunelerinde numune yükseklikleri birbirine çok yakın olup ortalama numune yüksekliği 174,5 mm olarak belirlenmiştir. Farklı segregasyon seviyesindeki numuneleri, aynı hedef yoğunluğa ulaşacak şekilde sıkıştırmak için gerekli ortalama sıkıştırma pres devir sayısı G2-H, G2-O ve G2-Y numuneleri için sırasıyla 122, 238 ve 315 olarak bulunmuştur (Şekil 5). Farklı segregasyon seviyesindeki numunelerin ortalama hava boşlukları eşit olup bu değer %3,94 olarak bulunmuştur. G2-Y numunelerinde hedef yoğunluğa ulaşmak için gerekli sıkıştırma devir sayısı, G2-H için gerekli sayının neredeyse 3 katına yakındır. Bu sonuçlar artan agrega segregasyonunun, aynı hedef yoğunluğa ulaşmak için asfalt karışımlarının sıkıştırılabilirliğini önemli ölçüde zorlaştırdığını açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 5. Aynı yoğunluğa sıkıştırmak için gerekli sıkıştırma devir sayıları.

Asfalt karışımı numuneleri üretildikten sonra farklı performans testleri için numune merkezlerinden 100 mm çapında karotlar alınmış ve 150 mm numune uzunluğu elde etmek için numunelerin alt ve üst uçları testere ile kırılmıştır. Her bir karışım tipi için agrega dağılımının nasıl olduğunu göstermek amacıyla örnek numune resimleri Şekil 6'da verilmiştir.

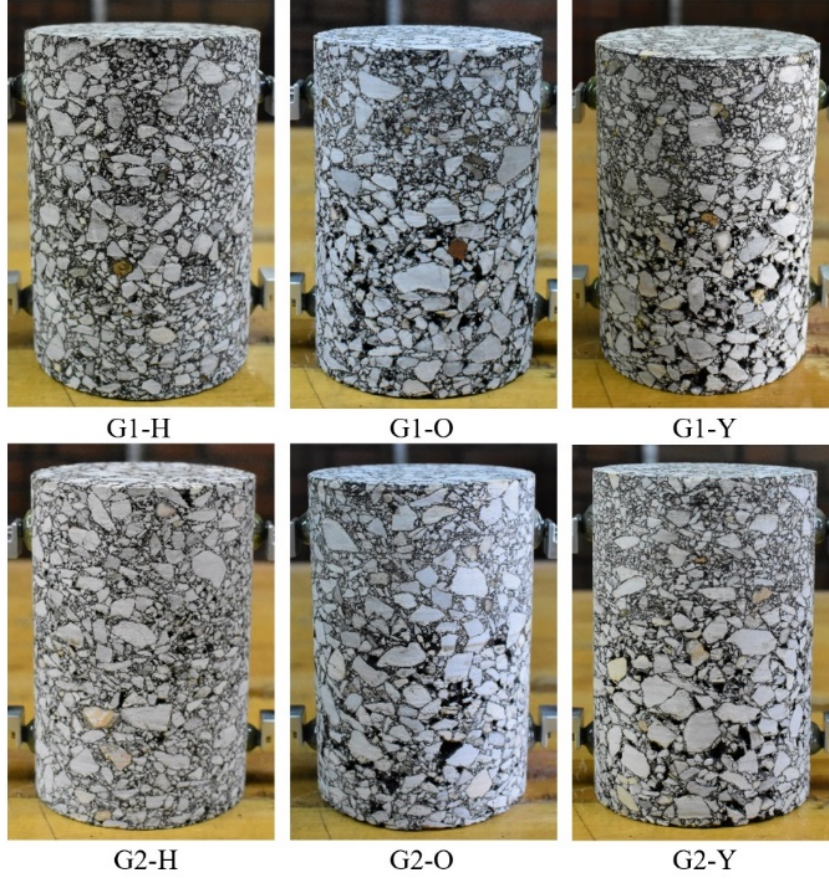
3.2. Karışımların Sıkıştırılabilirlikleri

Sıkışma eğrileri karışımların sıkıştırılabilirliğini değerlendirmek için önemli çıktılar olup, sıkıştırma esnasında Superpave yoğurmalı pres tarafından kaydedilen veriler kullanılarak oluşturulmuştur. Karışımların önceden belirlenen maksimum teorik özgül ağırlıkları (G_{mm}) ve sıkıştırılmış numunelerin hacim özgül ağırlıkları (G_{mb}) kullanılarak hacimsel özellikler belirlenmektedir. Numunelerin her devir sayısındaki yüksekliği yazılım tarafından kaydedildiğinden bu devir sayılarına karşı gelen numune yoğunluğu ($\%G_{mm}$) hesaplanabilmektedir. Bu oran sıkışma yüzdesi olarak da tanımlanmaktadır. G1 ve G2 numunelerinin $\%G_{mm}$ - sıkıştırma devir sayısı ilişkisini temsil eden sıkışma eğrileri Şekil 7 ve Şekil 8'de gösterilmektedir. Bu eğriler, tüm sonuçlar arasından ortalamayı en iyi temsil edenlerden seçilmiştir.

Karışımların bazı önemli sıkıştırma devir sayılarındaki yoğunlukları ve kritik yoğunluklara ulaşması için gerekli sıkıştırma devir sayıları Tablo 8'de verilmiştir. Bu tabloda tüm karışımlar için sırasıyla; N_i devir sayısındaki $\%G_{mm}$, $\%92 G_{mm}$ 'deki devir sayısı, N_d devir sayısındaki $\%G_{mm}$ ve $\%96 G_{mm}$ 'deki devir sayısı verilmiştir. N_i ilk sıkıştırma devir sayısı bu çalışmada 8 devir olup, bu devir sayısındaki $\%G_{mm}$ sıkıştırılabilirlik açısından anlamlı veriler sunmaktadır. Bu devir sayısında $\%G_{mm}$ değeri çok yüksekse karışımın hızlı sıkıştığını gösterir ve sahada uygulama esnasında ve trafik yükleri altında stabil davranış göstermezler. Bu çalışmadaki karışımların N_i devir sayısındaki $\%G_{mm}$ değeri kritik değer olan $\%89$

G_{mm} 'den küçük olup Superpave kriterlerini sağlamaktadır. Bu değerin daha küçük olması segregasyona uğramış karışımların daha zor sıkıştırılacağını göstermektedir. %92 G_{mm} 'e ulaşmak için gerekli devir sayısının verilme sebebi, sahada sıkıştırılan asfalt karışımları %92 G_{mm} 'e (%8 hava boşluğu) ulaşmaya kadar silindirlerle sıkıştırılmakta ve bu

noktada trafiğe açılmaktadır. Trafik yükleri altında kaplama sıkışmaya devam etmektedir. Bu yüzden %92 G_{mm} 'e ulaşmak için gerekli devir sayısı önemli bir sıkıştırılabilirlik göstergesidir. Homojen numunelere göre orta ve yüksek seviyede segregasyon numunelerinde sıkışma devir sayısının oldukça yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 6. Karışım tipleri için örnek numuneler.

Tablo 8. Karışımların sıkışma durumları

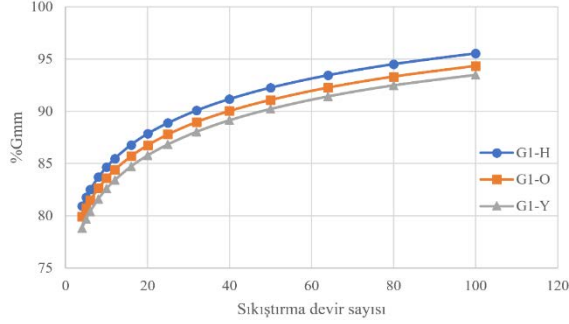
Tasarım	Segregasyon seviyesi	N_i 'de % G_{mm}	%92 G_{mm} 'de N	N_i 'de % G_{mm}	%96 G_{mm} 'de N
G1	H	83,67	48	95,53	-
	O	82,44	61	94,31	-
	Y	81,64	72	93,54	-
G2	H	83,80	46	-	122
	O	81,96	73	-	238
	Y	81,46	83	-	315

G1 numunelerine, tasarım sıkıştırma devir sayısı (N_d) olarak belirlenen 100 devir sıkıştırma uygulanmıştır. Şekil 7'de her bir segregasyon seviyesini temsil eden üç adet eğri gösterilmektedir. G1-H, G1-O ve G1-Y karışımları için 100 devir sıkıştırma sonucunda belirlenen ortalama % G_{mm} değerleri sırasıyla 95,53, 94,31 ve 93,54 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, farklı segregasyon seviyesindeki karışımların aynı sıkıştırma eforu altında farklı davrandığını ortaya koymaktadır. Agrega segregasyonu gerçekleştiğinde, aynı sıkıştırma eforu altında farklı yoğunlukta asfalt betonları elde

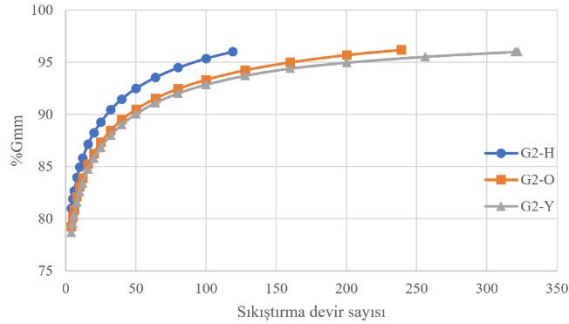
edileceği görülmektedir.

G2 numuneleri %4 hava boşluğuna karşılık gelen %96 G_{mm} değerine ulaşmaya kadar sıkıştırılmıştır. Hedef yoğunluğa ulaşmak için her numuneye uygulanan sıkıştırma devir sayıları farklılıklar göstermiştir. Farklı segregasyon seviyelerini temsil eden G2-H, G2-O ve G2-Y numunelerinin hedef yoğunluğa ulaşmaları için uygulanan ortalama sıkıştırma devir sayıları 122, 238 ve 315 olarak belirlenmiştir. Görüleceği üzere, önkoşulsuz karışımlarla karşılaştırıldığında, aynı yoğunluğa ulaşmak için orta seviyede segregasyon durumunda %95, yüksek

seviye segregasyon durumunda ise %158 daha fazla sıkıştırma devri uygulanması gerektiği görülmektedir. Laboratuvar ortamında düşük sıkıştırılabilirliği olan karışımdan sahada da aynı performans beklenmektedir. Bu tip karışımlarda, hedef yoğunluğa ulaşmak için sahada çok fazla sıkıştırma eforu gerekmekte ve sıkıştırma süresi uzamaktadır.



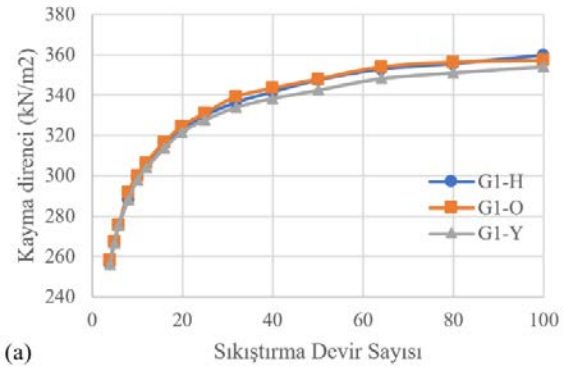
Şekil 7. Aynı devir sayısında sıkıştırılan numunelerin sıkışma eğrileri.



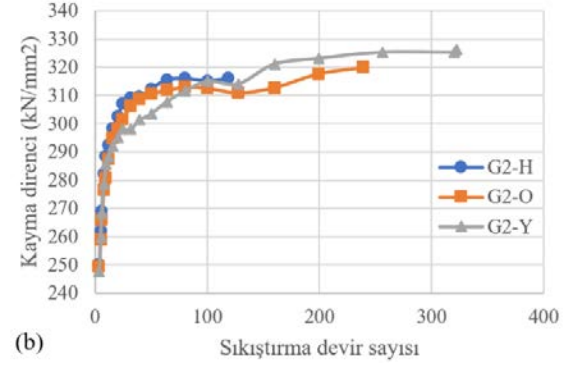
Şekil 8. Aynı hedef yoğunlukta sıkıştırılan numunelerin sıkışma eğrileri.

3.2.1. Kayma Direnci Sonuçları

Superpave yoğurmalı pres tarafından sıkıştırma boyunca kaydedilen her devir için asfalt karışımı numunesinde ölçülen kayma direnci verileri bu bölümde sunulmuştur. Önceki bölümlerle tartışıldığı gibi, kayma direnci verisi kullanılarak karışımların sıkıştırılabilirliğini değerlendirmek için iki adet parametre kullanılmıştır. Bu parametrelerden ilki karışımların %92 G_{mm} değerine ulaştığı devirde ölçülen kayma direncidir. Sahadaki sıkıştırma işlemleri bu sıkışma yüzdesine kadar yapıldığından, bu noktadaki kayma dirençlerinin karşılaştırılması hangi karışımın daha kolay sıkıştığını göstermesi açısından önemlidir. İkinci parametre ise %86 ile %92 G_{mm} arasında, kayma direnci eğrisi altında kalan alanın, G_{mm} (% sıkışma) eğrisi altında kalan alana oranından elde edilen enerji değeridir (E). E değeri %86 sıkışmadan %92 sıkışmaya ulaşmak için gerekli enerjiyi temsil ettiğinden daha düşük parametre daha kolay sıkıştırılabilirlik anlamına gelmektedir. G1 ve G2 karışımları için her bir segregasyon seviyesini temsil eden kayma direnci eğrileri Şekil 9'da verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 9. Farklı segregasyon seviyeleri için kayma direnci eğrileri: a) G1, b) G2.

N_d devir sayısında (100 devir) sıkıştırılan G1 numuneleri için kayma direnci parametreleri hesaplanmış ve Tablo 9'da verilmiştir. Sıkıştırılabilirlik için kullanılan ilk parametre olan %92 G_{mm} 'deki kayma dirençleri incelendiğinde homojen numuneler için $346,5 \text{ kN/mm}^2$ bulunmuşken, orta ve yüksek seviye segregasyon numuneler için sırasıyla $352,9 \text{ kN/mm}^2$ ve $350,0 \text{ kN/mm}^2$ olarak belirlenmiştir. G1-H için bulunan parametre segregasyon numunelere göre küçük olmakla birlikte, G1-O ve G1-Y için hesaplanan parametre birbirine oldukça yakındır. Bu parametrenin küçük olması daha kolay sıkışma anlamına geldiğinden G1-H numuneleri en sıkıştırılabilir karışımlar olarak ortaya çıkmaktadır. E parametresi ise G1-H, G1-O ve G1-Y numuneleri için sırasıyla 3,72, 3,81 ve 3,80 olarak bulunmuştur. Bu parametre numunelerin hava boşluğunu %14'den %8'e indirmek için gerekli enerjiyi temsil ettiğinden düşük E kolay sıkıştırılabilirliği, yüksek E değeri ise daha zor sıkıştırılabilirliği göstermektedir. G1-H numuneleri için bulunan E değeri en küçük olup, homojen numunelerin diğer numunelere göre daha kolay sıkıştırıldığını göstermektedir. E parametresi G1-O ve G1-Y numuneleri için neredeyse eşittir. Kayma direnci eğrileri kullanılarak hesaplanan sıkıştırılabilirlik parametreleri orta ve yüksek seviye segregasyona uğramış numuneler için yakın sonuçlar vermiştir. Kayma direnci ölçümü sırasında her devirde ölçülen en büyük kayma gerilmesi kaydedilmektedir ve bu gerilme birçok parametreye bağlıdır. Agregalar arası temas noktaları ve karışımların stabilitesi gibi etkenler ölçülen kayma mukavemetini etkilediğinden, orta ve yüksek seviye segregasyon olmuş numunelerin kayma direnci parametrelerinde bariz bir farklılık bulunamamıştır.

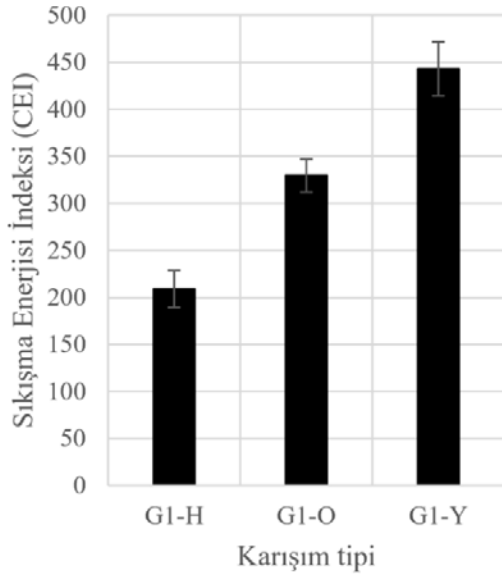
Tablo 9. Na devir sayısında sıkıştırılan karışımların kayma direnci parametreleri

Tasarım	Segregasyon seviyesi	%86 G_{mm} 'de N	%92 G_{mm} 'de N	%86 G_{mm} 'de kayma direnci (kN/mm ²)	%92 G_{mm} 'de kayma direnci (kN/mm ²)	E
G1	H	14	48	312,7	346,5	3,72
	O	18	61	320,7	352,9	3,81
	Y	21	72	323,0	350,0	3,80

3.2.2. Sıkışma Enerjisi İndeksi (CEI) Sonuçları

Sıkışma enerjisi indeksi (CEI) sahadaki sıkıştırma sırasında silindirler tarafından yapılan işi temsil etmektedir. Düşük CEI değerleri karışımların daha sıkıştırılabilir olduğunu göstermektedir ve istenen bir durumdur. CEI değerinin düşük olması durumunda hedeflenen yoğunluğa ulaşmak için daha az enerji gerekli olacaktır. CEI indeksi birimsiz olup göreceli olarak hedef yoğunluğa (%92 G_{mm}) ulaşmak için gerekli enerji miktarı göstergesidir.

100 devir sıkıştırma uygulanan G1 numuneleri için hesaplanan CEI değerleri Şekil 10'da verilmiştir. Verilen CEI değerleri her bir segregasyon seviyesi için hazırlanan 6 numunenin ortalama değerleridir. G1-H, G1-O ve G1-Y segregasyon seviyeleri için hesaplanan ortalama CEI değerleri sırasıyla 209, 330 ve 443 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler artan agrega segregasyonunun, asfalt karışımının sıkıştırılabilirliğini nasıl zorlaştırdığını açık bir şekilde göstermektedir. Yüksek seviyede segrege olmuş numuneler için hesaplanan CEI değerinin, ön koşulsuz homojen numuneler için hesaplanan değerini iki katından fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 10. Farklı segregasyon seviyeleri için CEI değerleri.

Yetersiz sıkıştırmanın, yüksek yaşlanma hızı, tekerlek izi problemleri ve suya karşı daha fazla hassasiyet gibi sonuçları olduğu bilinmektedir. Karışımların sıkıştırılabilirliği; gradasyon, bitüm özellikleri ve miktarı,

agrega yapısı ve sıcaklık gibi pek çok parametreye bağlıdır. Bu çalışmada, agrega segregasyonunun laboratuvar ortamında hazırlanan Superpave numuneleri kullanılarak sıkıştırılabilirliği nasıl etkilediği incelenmiştir. Sonuçlar artan segregasyon seviyesi ile sıkışmanın zorlaştığını ve aynı yoğunlukta asfalt betonu elde etmek için segregasyona uğramış numunelerde çok daha fazla sıkıştırma eforu gerektiğini göstermektedir.

4. Sonuç

Bu çalışmada, agrega segregasyonunun asfalt karışımlarının sıkıştırılabilirliği üzerine etkileri laboratuvar ortamında Superpave yöntemi kullanılarak üretilen numunelerle değerlendirilmiştir. Üretilen asfalt karışımı numunelerinin sıkıştırılabilirlikleri; hacimsel özellikler, sıkışma eğrileri, kayma direnci verisi ve CEI indeksi kullanılarak incelenmiştir. Farklı seviyelerde agrega segregasyonunu laboratuvar ortamında simüle etmek amacıyla tasarım gradasyonu, kaba ve ince agrega yoğunluklu iki kısma ayrılarak karışımlar hazırlanmış ve kalıba iki tabaka olarak yerleştirilip sıkıştırılmıştır. Çalışma kapsamında aynı sıkışma eforu altında sıkıştırılan ve aynı hedef yoğunlukta sıkıştırılan homojen, orta seviye segrege ve yüksek seviye segrege numunelerin özellikleri değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada, aynı sıkıştırma eforu harcanarak üretilen numuneler ve aynı yoğunlukta sıkıştırılan numunelerin hacimsel sonuçları ve sıkışma eğrilerinden elde edilen veriler, agrega segregasyonunun sıkıştırılabilirliği önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Homojen, orta ve yüksek seviye segrege asfalt karışımlarına aynı sıkıştırma eforu uygulandığında, segregasyon seviyesi arttıkça numune yükseklikleri ve hava boşluğu miktarı artmaktadır. Buna paralel olarak, artan segregasyon seviyesi ile karışımların sıkıştırılabilirliğini temsil eden CEI indeksi de artmaktadır. Farklı segregasyon seviyesindeki karışımları aynı hedef yoğunluğa sıkıştırmak için yapılan deneylerde, segregasyon seviyesi arttıkça hedef yoğunluğa ulaşmak için uygulanması gereken sıkıştırma devir sayısının artırılması gerektiği görülmüştür. Yüksek seviye segregasyona uğramış bir numuneyi, %4 hava boşluğuna karşılık gelen hedef yoğunlukta sıkıştırmak için homojen numuneye uygulanan sıkıştırma devir sayısının yaklaşık 3 katı sıkıştırma devri uygulanmıştır. Sonuçlar, agrega segregasyonunun asfalt karışımlarının hacimsel özelliklerini önemli ölçüde etkilediğini ve sıkıştırılabilirliğini düşürdüğünü göstermektedir.

Sonraki çalışmalarda, sahadan alınacak karot numuneleri ve laboratuvarında üretilen numuneler kullanılarak segregasyon seviyesine bağlı olarak asfalt betonu performansının değerlendirilmesi önerilmektedir.

Katkı Oranı Beyanı

Yazarların katkı yüzdeleri aşağıda verilmiştir. Yazarlar makaleyi incelemiş ve onaylamıştır.

	A.Ö.Y	M.G.
K	50	50
T	40	60
Y	30	70
VTI	80	20
VAY	70	30
KT	70	30
YZ	80	20
KI	60	40
GR	80	20

K= kavram, T= tasarım, Y= yönetim, VTI= veri toplama ve/veya işleme, VAY= veri analizi ve/veya yorumlama, KT= kaynak tarama, YZ= Yazım, KI= kritik inceleme, GR= gönderim ve revizyon.

Çatışma Beyanı

Yazarlar bu çalışmada hiçbir çıkar ilişkisi olmadığını beyan etmektedirler.

Etik Onay Beyanı

Bu çalışmada hayvanlar ve insanlar üzerinde herhangi bir çalışma yapılmadığı için etik kurul onayı alınmamıştır.

Destek ve Teşekkür Beyanı

Bu çalışma, Ayhan Öner YÜCEL'in doktora tezinden üretilmiştir.

Kaynaklar

AASHTO R35. 2010. Standard practice for superpave volumetric design for asphalt mixtures, american association of state highway and transportation officials. AASHTO, Washington, DC, USA, pp: 154.

Azari H. 2005. Effect of aggregate inhomogeneity on mechanical properties of asphalt mixtures. PhD thesis, University of Maryland at College Park, Maryland, USA, pp: 1-441.

Bahia HU, Friemel TP, Peterson PA, Russell JS, Poehnel B. 1998. Optimization of constructibility and resistance to traffic: a new design approach for HMA using the superpave compactor. J Assoc Asphalt Paving Technol, 67: 189-232.

Bessa IS, Branco VTFC, Soares JB, Neto JAN. 2015. Aggregate shape properties and their influence on the behavior of hot-mix asphalt. J Mater Civ Eng, 27 (7): 04014212.

Cai X, Wu K, Huang W. 2021. Study on the optimal compaction effort of asphalt mixture based on the distribution of contact points of coarse aggregates. Road Mater Pavement Des, 22 (7): 1594-1615.

Cross SA, Brown ER. 1993. Effect of segregation on performance of hot-mix asphalt. Transp Res Rec, 1417: 117-126.

Cross SA, Hainin MR, Ado-Osei A. 1998. Effects of segregation on

mix properties of hot mix asphalt. K-TRAN: KU-96-6, Kansas, USA, pp: 1-117.

Chen MJ, Wong YD. 2017. Evaluation of the development of aggregate packing in porous asphalt mixture using discrete element method simulation. Road Mater Pavement Des, 18 (1): 64-85.

Debao L, Xiaoming H, Changlu G. 2013. Method to determine asphalt film thickness based on actual measurement. Adv Mater Res, 777-780, 140-143.

Dessouky S, Pothuganti A, Walubita LF, Rand D. 2013. Laboratory evaluation of the workability and compactability of asphaltic materials prior to road construction. J Mater Civ Eng, 25 (6): 810-818.

Dubois V, Roche CD La, Burban O. 2010. Influence of the compaction process on the air void homogeneity of asphalt mixtures samples. Constr Build Mater, 24 (6): 885-897.

Gao Y, Huang X, Yu W. 2014. The compaction characteristics of hot mixed asphalt mixtures. J Wuhan Univ Technol Mater Sci Ed, 29 (5): 956-959.

Georgiou P, Plati C. 2021. Microstructure characterisation of field and laboratory roller compacted asphalt mixtures. Road Mater Pavement Des, 22 (4): 942-953.

Guler M, Bahia HU, Bosscher PJ, Plesha ME. 2000. Device for measuring shear resistance of hot-mix asphalt in gyratory compactor. Transp Res Rec, 1723: 16-24.

Gong M, Xiong Z, Deng C, Peng G, Jiang L, Hong J. 2022. Investigation on the impacts of gradation type and compaction level on the pavement performance of semi-flexible pavement mixture. Constr Build Mater, 324: 126562.

Guo R, Zhou F, Nian T. 2022. Analysis of primary influencing factors and indices distribution law of rutting performance of asphalt mixtures. Case Stud Constr Mater, 16: e01053.

Hu T, Yuan J, Zhou X, Liu lu, Ran M. 2022. A two-dimensional entropy-based method for detecting the degree of segregation in asphalt mixture. Constr Build Mater, 347: 128450.

Huanan Y, Ming Y, Guoping Q, Jun C, Hongyu Z, Xiao F. 2021. Gradation segregation characteristic and its impact on performance of asphalt mixture. J Mater Civ Eng, 33 (3): 04020478.

Jiang J, Ni F, Gao L, Yao L. 2017. Effect of the contact structure characteristics on rutting performance in asphalt mixtures using 2D imaging analysis. Constr Build Mater, 136: 426-435.

Jin C, Jue L, Hengwu H, Junfeng Q, Miao Y. 2023. Numerical investigation of aggregate segregation of superpave gyratory compaction and its influence on mechanical properties of asphalt mixtures. J Mater Civ Eng, 35 (3): 04022453.

Jing H, Liu J, Wang Z, Chen H, Zhang X, Yuan L. 2023. X-ray computed tomography analysis of internal voids in steel slag asphalt mixture under freeze-thaw damage and microwave healing process. Constr Build Mater, 377: 131132.

Khedaywi TS, White TD. 1995. Development and analysis of laboratory techniques for simulating segregation. Transp Res Rec, 1492: 36-45, National Research Council, Washington, D.C.

Kwon O, Choubane B, Hernando D, Allick W. 2019. Evaluation of the impact of asphalt mix segregation on pavement performance. Transp Res Rec, 2673: 310-316.

Leiva F, West RC. 2008. Analysis of hot-mix asphalt lab compactability using lab compaction parameters and mix characteristics. Transp Res Rec, 2057: 89-98.

Liu H, Yin R, Wu S. 2007. Reducing the compaction segregation of hot mix asphalt. J Wuhan Univ Technol Mater Sci Ed, 22: 132-135.

Ma X, Leng Z, Wang L, Zhou P. 2020. Effect of reclaimed asphalt pavement heating temperature on the compactability of recycled hot mix asphalt. Materials, 13 (16): 3621.

- Mahmoud AFF, Bahia H. 2004. Using the gyratory compactor to measure mechanical stability of asphalt mixtures. Wisconsin Highway Research Program 0092-01-02, Wisconsin-Madison, USA, pp: 1-85.
- Mallick RB. 1999. Use of superpave gyratory compactor to characterize hot-mix asphalt. *Transp Res Rec*, 1681: 86-96.
- Masad E, Jandhyala VK, Dasgupta N, Somadevan N, Shashidhar N. 2002. Characterization of air void distribution in asphalt mixes using x-ray computed tomography. *J Mater Civ Eng*, 14 (2): 122-129.
- Masad E, Button J. 2004. Implications of experimental measurements and analyses of the internal structure of hot-mix asphalt. *Transp Res Rec*, 1891: 212-220.
- Mohamed EHH, Abd El Halim AO, Kennepohl GJ. 1993. Assessment of the influence of compaction method on asphalt concrete resistance to moisture damage. *Constr Build Mater*, 7 (3): 149-156.
- Onifade I, Jelagin D, Birgisson B, Kringos N. 2016. Towards asphalt mixture morphology evaluation with the virtual specimen approach. *Road Mater Pavement Des*, 17 (3): 579-999.
- Rand DA. 1997. Comparative analysis of Superpave gyratory compactors and TxDOT gyratory compactors. Master Thesis, University of Texas at Austin, Texas, USA.
- Roberts FL, Kandhal PS, Brown ER, Lee D-Y, Kennedy TW. 1996. Hot mix asphalt materials, mixture design and construction. Lanham, Md.: Napa Education Foundation, 2nd ed., Napa, USA, pp: 1-585.
- Sefidmazgi NR, Tashman L, Bahia H. 2012. Internal structure characterization of asphalt mixtures for rutting performance using imaging analysis. *Road Mater Pavement Des*, 13 (sup1): 21-37.
- Sefidmazgi NR, Teymourpour P, Bahia HU. 2013. Effect of particle mobility on aggregate structure formation in asphalt mixtures. *Road Mater Pavement Des*, 14 (sup2): 16-34.
- Selvam M, NSSP K, Kandasami RK, Singh S. 2023. Assessing the effect of different compaction mechanisms on the internal structure of roller compacted concrete. *Constr Build Mater*, 365: 130072.
- Shi J, Gong H, Cong L, Liang H, Ren M. 2023. Evaluating and quantifying segregation in asphalt pavement construction: A state-of-the-practice survey. *Constr Build Mater*, 383: 131205.
- Stroup-Gardiner M, Brown ER. 2000. Segregation in hot-mix asphalt pavements, Transportation Research Board. Report no: 441, National Research Council, Washington, D.C., USA, pp: 1-95.
- Taheri-Shakib J, Al-Mayah A. 2023. A review of microstructure characterization of asphalt mixtures using computed tomography imaging: Prospects for properties and phase determination. *Constr Build Mater*, 385: 131419.
- Tashman L, Masad E, Peterson B, Saleh H. 2001. Internal structure analysis of asphalt mixes to improve the simulation of Superpave gyratory compaction to field conditions (with discussion). *J Assoc Asphalt Paving Technol*, 2001: 70.
- Williams RC, Duncan Jr G, White TD. 1996. Hot-mix asphalt segregation: Measurement and effects. *Transp Res Rec*, 1543: 97-105.
- Xuelian L, Siyu C, Kuiyuan X, Xueying L. 2018. Gradation segregation analysis of warm mix asphalt mixture. *J Mater Civ Eng*, 30 (4): 04018027.
- Yu H, Zhou S, Qian G, Zhang C, Shi C, Yao D, Ge J. 2023. Evaluation of the microscale structure and performance of asphalt mixtures under different design methods. *Constr Build Mater*, 400: 132810.
- Yücel AÖ. 2019. Investigation of the impact of aggregate segregation on rutting resistance of asphalt concrete. PhD thesis, Middle East Technical University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara, Türkiye, pp: 1-212.
- Zhang C, Wang H, You Z, Yang X. 2016. Compaction characteristics of asphalt mixture with different gradation type through Superpave Gyratory Compaction and X-Ray CT Scanning. *Constr Build Mater*, 129: 243-255.