

Superpave Yöntemine Göre Tasarım Agregası Gradasyonu Seçimi

Tacettin GEÇKİL^{*1}, Taner ALATAŞ²

¹Inönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 44280, Malatya

²Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 23119, Elazığ

(Alınış / Received: 15.01.2018, Kabul / Accepted: 15.05.2018, Online Yayınlanma / Published Online: 09.06.2018)

Anahtar Kelimeler

Asfalt,
Agrega,
Kaplama,
Superpave tasarım yöntemi,
Tasarım agregası gradasyonu

Özet: Bu çalışmada, bitümlü sıcak karışımların tasarımı için geliştirilmiş olan Superpave tasarım yöntemine göre, uygulama bölgesi olarak seçilen Elazığ için tasarım agregası gradasyonu seçimi yapılarak uygunluğu değerlendirilmiştir. Bu amaçla, TÜPRAŞ rafinerisinden temin edilen B 70/100 penetrasyon dereceli asfalt seçilerek bağlayıcının fiziksel özellikleri ile karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları tespit edilmiştir. Ayrıca, çalışmada kullanılan kalker agregasından, nominal maksimum tane boyutu 12,5mm olan agregası gradasyonu seçilmiştir. Seçilen agreganın mutabakat ve kaynak özellikleri tespit edilerek uygunluğu belirlenmiştir. Sıcak karışım hazırlamak amacıyla başlangıçta üç deneme agregası karışım gradasyonu seçilmiştir. Bu deneme agregası karışımları ve asfalt bağlayıcı kullanılarak Superpave yoğurtmalı sıkıştırıcı ile bitümlü sıcak karışım numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin fiziksel ve hacimsel özellikleri tespit edilerek Superpave şartname kriterleri ile karşılaştırılmıştır. Yapılan değerlendirme sonucunda kriterleri sağlayan en uygun agregası karışımı tasarım agregası gradasyonu olarak seçilmiştir.

Design Aggregate Gradation Selection According to Superpave Method

Keywords

Asphalt,
Aggregate,
Pavement,
Superpave design method,
Design aggregate gradation

Abstract: In this study, according to the Superpave design method developed for the design of bituminous hot mixes, design aggregate grading was chosen for Elazığ which was chosen as the application region and its suitability was evaluated. For this purpose, B 70/100 penetration grade asphalt obtained from TÜPRAŞ refinery was selected and the physical properties of the binder and the mixing and compaction temperatures were determined. In addition, aggregate grading with a nominal maximum grain size of 12.5 mm was selected for the limestone aggregate used in the study. The consensus and source properties of the selected aggregate were determined and their suitability was determined. In order to prepare the hot mixture, three experimental aggregate mixture gradations were initially selected. Bitumen hot mixture samples were prepared with Superpave kneading compactor using this trial aggregate mixtures and asphalt binder. The physical and volumetric properties of the prepared samples were determined and compared with the Superpave specification criteria. As a result of the evaluation made, the most suitable aggregate mixture that meets the criteria was selected as design aggregate gradation.

1. Giriş

Bitümlü sıcak karışım (BSK) kaplamaların performansı üzerinde önemli bir role sahip olan agregalar, sıcak karışımların en önemli ikinci malzemesidir. Karışımın ağırlıkça %90 ile %95'ini, hacimce %75 ile %85'ini oluşturan mineral agregalar, kaplamanın yük taşıma kapasitesini büyük ölçüde karşılayarak asfalt kaplamanın performansı üzerinde önemli rol oynarlar [1-3]. Agregalar genel olarak dere

malzemesi, kırmataş ve yapay taşlar olarak elde edilir. Yol kaplamalarında kullanılacak en ideal agregalar, püskürük, tortul ve metamorfik olarak sınıflandırılan doğal kayaların kırılması ile elde edilen kırmataş mineral agregalarıdır [3,4]. Kaplamalarda kullanılacak agregaların, trafiğin tekrarlı statik ve dinamik yüklerine karşı koyabilmesi, bitümlü iyi bir aderans sağlaması ve farklı hava şartlarına karşı koyabilme özelliğine sahip olması gerekir [5].

*İlgili yazar: tacettin.geckil@inonu.edu.tr

Agrega malzemesi, kaba, ince ve mineral filler içeren en az üç ayrı dane gurubunun belirli oranlarda karıştırılması ile elde edilmektedir [6]. Bitümlü karışımda %40-50 oranında kullanılan iri agregası, karışımın mekanik direncini arttıran bir iskelet oluşturur ve karışımın akma direncinde önemli bir artış gösterir. Karışımdaki ince agregası, iri agregasının oluşturduğu iskeletin boşluklarını doldurarak daha yoğun bir karışımın elde edilmesini sağlar [7, 8]. Mineral filler; taş tozu, sönmüş kireç, mermer tozu, çimento, uçucu kül veya benzeri mineral maddelerden meydana gelebilir [6,9]. Ancak, toplam agregasının çok küçük yüzdesini oluşturmasına karşın, karışımdaki boşlukları doldurmaya yardımcı olarak agregası tanecikleri arasında daha fazla temas noktası sağlar ve daha yoğun karışımların elde edilmesinde rol oynar [10]. Kaplamalarda yoğun gradasyonlu bir agregası karışımının kullanılması, kaplamanın stabilite, rijitlik, dayanıklılık, yorulma direnci, esneklik, kayma direnci, geçirgenlik, işlenebilirlik özellikleri ve hizmet süresince istenen performansı sağlayabilmesi bakımından oldukça önemlidir [3, 11, 12]. Bu fiziksel ve mekanik özelliklerin tümünü ideal olarak sağlayabilecek BSK'ları elde etmek günümüz şartlarında mümkün olmayabilir, ancak en uygun şartları sağlayan asfalt-agregası karışımların yapılabilmesi için günümüzde Marshall ve Hveem gibi karışım tasarım yöntemleri kullanılmaktadır.

BSK kaplamalarında, öngörülen hizmet seviyesinden önce meydana gelen bozulmalar, farklı hava ve iklim şartları altında kaplamanın gerçek performansını koruyamaması, laboratuvar şartlarının arazi şartlarını tam olarak yansıtamaması, analiz ve uygulama sırasındaki sıkıştırma tekniklerinin farklı olması nedeniyle, gelişmiş birçok ülkeyi yeni tasarım yöntemleri geliştirmeye sevk etmiştir. Bu tasarım yöntemlerinden en önemlisi Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave) olarak isimlendirilen yöntemidir. Superpave yöntemi, Amerika Birleşik Devletlerinde (ABD) faaliyet gösteren Strategic Highway Research Program (SHRP) çerçevesinde geliştirilmiştir. SHRP, 1987 yılında ABD'deki yolların performansı ile durabilitesini arttırmak ve yol kullanıcıları için daha güvenli hale getirmek amacıyla, beş yıllık bir süre için 150 milyon dolarlık bir fonla kurulmuştur. Bu araştırma fonunun 50 milyon doları, laboratuvar analizi ve arazi performansı ile ilgili performans esaslı asfalt şartnamesi çalışmaları için kullanılmıştır. Diğer 100 milyon doları ile de bir deneme yolu yapılarak kaplamanın davranışı incelenmiştir. Araştırma programı sonucunda Superpave tasarım yöntemi geliştirilmiştir [4, 13].

Tasarım yöntemleri bakımından, BSK'lar incelendiğinde; Superpave yönteminin Marshall yöntemine göre daha performansını daha iyi ve gerçekçi olarak yansıttığı görülmektedir. Marshall yönteminde sıkıştırma, numunenin her iki yüzeyine sıkıştırma tokmağı ile belirli sayıda darbeleri olarak yapılmakta ve hazırlanan numune Marshall aletinde deneye tabi tutularak karışımın stabilitesi ve yük

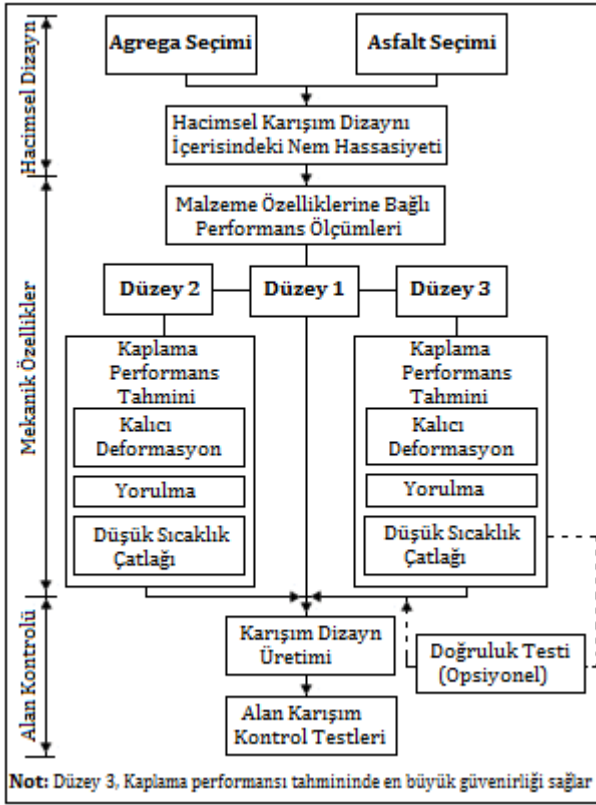
altındaki plastik akması tespit edilmektedir. Superpave yönteminde ise hazırlanan karışım belirli basınç, yağurma açısı ve devir sayısı gibi şartlar altında yağurma yaparak numuneyi arazi şartlarına en yakın şekilde sıkıştıran ve sıkıştırma sırasında karışımın sıkışabilirliği ile ilgili bilgi veren yağurmalı sıkıştırıcılar ile yapılmaktadır. Marshall yönteminde darbeleri tokmaktama ile yapılan sıkıştırma, arazide çelik silindirlerle yapılan sıkıştırmaları tam olarak temsil etmemektedir. Darbe ile sıkıştırmadan dolayı agregası danelerinin kırılması, boşluk oranı ve optimum bağlayıcı oranının doğru olarak saptanamamasına yol açmaktadır. Dolayısıyla bu şekilde tasarlanan kaplamalarda zamanla çeşitli bozulmalar meydana gelmektedir. Ayrıca, Marshall stabilitesi de bitümlü sıcak karışımın kayma mukavemetini tam olarak karşılayamamaktadır. Superpave yönteminde, kalıcı deformasyon, yorulma çatlakları ve düşük sıcaklık çatlaklarına karşı kaplama direncinin belirlenmesi amacıyla kayma ve dolaylı çekme deneyi gibi performans deneylerinden ayrıntılı veriler elde edilerek kaplama performansı tahmin edilmektedir. Böylece Superpave yöntemi, belirli iklim ve yüklem koşulları altında sıkışmayı iyi temsil etmesi ve sıkıştırılmış karışımın performans testleri ile performansını tahmin etmesi sebebiyle Marshall yöntemine göre daha üstün olarak değerlendirilmektedir [14].

Ancak, ülkemiz için Superpave yöntemi ile ilgili yapılan araştırmalarda özellikle tasarım agregası gradasyonu seçimi konusunda bir eksiklik olduğu görülmüştür. Bu çalışma ile Superpave tasarımı çerçevesinde, Superpave yağurmalı sıkıştırıcısı kullanılarak, yerel bir agregası yığınından en iyi performansı gösterecek BSK kaplamayı elde eden en uygun tasarım agregası gradasyonu seçimi konusunda, araştırmacılara uygulamalı olarak izleyecekleri yolu izah etmek ve bu konudaki eksikliği gidermek amaçlanmıştır.

2. Tasarım Agregası Gradasyonu Seçimi

Superpave tasarım yönteminin amacı, servis ömrü boyunca tatmin edici performans özellikleri gösteren bir kaplama tabakasını oluşturan ekonomik bağlayıcı ve agregası karışımlarını elde etmektir [15]. Superpave tasarımına göre üretilen kaplama performansı ve kalitesinin kabul edilebilmesi için yapım sonunda kalıcı deformasyon, yorulma, düşük sıcaklık çatlakları, nem hasarı ve kayma direnci ile durabilite ve işlenebilirlik gibi temel özelliklerin sağlanması gerekir [16].

Superpave karışım tasarım yönteminin genel akış karakteristiği aşağıda Şekil 1'de verilmiştir. Superpave yöntemi düzey 1, 2 ve 3 olmak üzere üç farklı tasarım seviyesi içermektedir. Bu tasarım seviyeleri, kaplamanın hizmet ömrü boyunca maruz kalacağı 80 kN'luk toplam eşdeğer tek dingil yükü (ETDY) trafiği esas alınarak belirlenmektedir. Bunun için önerilen trafik değerleri Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Superpave tasarım yönteminin yapısı [15, 17]

Tablo 1. Önerilen trafik tasarım değerleri [17]

Tasarım seviyesi	Tasarım trafiği (80 kN)
1 (düşük)	$\leq 10^6$
2 (orta)	$\leq 10^7$
3 (yüksek)	$> 10^7$

SHRP araştırmaları süresince yapılan çalışma ve incelemelerde, agrega özelliklerinin bitümlü sıcak karışımların performansı üzerinde çok önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Özellikle de sıcak karışımın kalıcı deformasyona karşı direncini önemli ölçüde etkilediği, buna karşılık yorulma çatlağı ve düşük sıcaklık çatlağı direnci üzerinde daha az etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Superpave yönteminde, yeni agrega deneyleri geliştirilmemiş ancak mevcut deney işlemleri geliştirilerek yöntem uyarlanmış ve kullanılmaktadır. SHRP araştırmaları sonucunda, Superpave yönteminde kullanılacak agrega özellikleri, mutabakat ve kaynak özellikleri olmak üzere iki kategoride tanımlanmıştır. Ayrıca, tasarım agrega gradasyonu olarak isimlendirilen ve yeni bir yöntemle belirlenen agrega gradasyonu geliştirilmiştir [5,14,18,19].

2.1. Agregası mutabakat özellikleri

BSK'ların yüksek performansa sahip olabilmesi için kritik bir önem taşıyan mutabakat özelliklerinin, yüksek trafik düzeylerinde ve ince kaplamalarda dikkatle seçilmesi gerekir. Karışım tasarımından önce, karışımda kullanılacak agregaların bu özellikleri sağlayıp sağlamadığı kontrol edilmelidir [5, 14, 18].

2.1.1. Kaba agrega köşeliliği

Bu özellik, agreganın yüksek içsel sürtünme açısının ve kaplamasının kalıcı deformasyon direncinin artırılması hedeflenmektedir. Kaba agrega köşeliliği 4,75 mm'den daha büyük agregaların bir ya da daha fazla kırılmış yüzeyinin agrega ağırlığına göre yüzdesi olarak tarif edilmektedir [5, 18, 19]. Kırılmışlık durumu, bir yüzünün %25'inden daha fazlasının kırılmış olması ile belirlenir [18, 20]. Kaba agrega köşeliliği şartname kriterleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Kaba agrega köşelilik kriterleri (%) [5, 17, 18]

Trafik, milyon	Yüzeyden derinlik	
	<100 mm	>100 mm
<0,3	55/-	-/-
<1	65/-	-/-
<3	75/	50/-
<10	85/80*	60/-
<30	95/90	80/75
<100	100/100	95/90
≥ 100	100/100	100/100

85/80* anlamı, kaba agreganın en az %85'inin bir yüzeyi kırılmış, en az %80'inin iki yüzeyi kırılmış olması

2.1.2. İnce agrega köşeliliği

Bu özellik, kaba agregada olduğu gibi agreganın içsel sürtünme açısını ve kaplamadaki kalıcı deformasyon direncinin artırılmasını esas almaktadır. AASHTO T304 standardına göre 2,36 mm'lik elekten geçen ince agreganın gevşekçe sıkıştırılmış halde sahip olduğu boşluk yüzdesi kriter olarak belirlenmiştir. Daha yüksek boşluk içeriği daha fazla kırılmışlık anlamına gelmektedir [5, 18,19]. İnce agrega köşeliliği şartname kriterleri, Tablo 3'te görülmektedir.

Tablo 3. İnce agrega köşelilik kriterleri (%) [5, 17, 18]

Trafik, milyon	Yüzeyden derinlik	
	<100 mm	>100 mm
<0,3	-	-
<1	40	-
<3	40	40
<10	45	40
<30	45	40
<100	45	45
≥ 100	45	45

Kriter, gevşek halde sıkışmış ince agreganın hava boşluğu yüzdesine göre hazırlanmıştır.

2.1.3. Yassı ve uzun daneler

Bu özellik, kaba agrega danelerinin en büyük boyutunun en küçük boyutuna oranının beşten büyük olan kısmının ağırlıkça yüzdesi olarak tanımlanmaktadır. Bu tür agregalar, asfalt karışımının serilmesi ve sıkıştırılması aşamasında ve kaplama

trafiğe açıldıktan sonra trafik yükleri altında kırıldıklarından karışımlarda kullanılması sınırlandırılmıştır. Yassı ve uzun danelerin tespiti 4.75 mm'den büyük agregalara uygulanır [5, 15, 18, 21,19].

Karışımlarda ağırlıkça kullanılacak miktarları Tablo 4'de verilmiştir.

2.1.4. Kil içeriği

Kil içeriği, 4,75 mm'lik elekten geçen agregası karışımında bulunan kil malzemesinin yüzdesi olarak tarif edilir ve AASHTO T176 standardına göre "Kum Eşdeğerlik Deneyi" uygulanarak belirlenir. Kum eşdeğerlik değeri Tablo 4'te verilen şartname kriterlerini sağlamalıdır.

Tablo 4. Yassı ve uzun daneler ile kil içeriği kriterleri [5,18]

Trafik, milyon	Yassı ve uzun daneler, maksimum, %	Kum eşdeğerliği, minimum, %
<0,3	-	40
<1	-	40
<3	10	40
<10	10	45
<30	10	45
<100	10	50
≥100	10	50

2.2. Agregası kaynak özellikleri

Bölgesel agregası kaynaklarının nitelendirilmesi için kullanılan kaynak özellikleri, önemli olmasına karşın, kaynağa özel olduğundan kritik değerler olarak tanımlanmamış ve ayrıca araştırmaya gerek görülmemiştir. Ancak, kullanılması tavsiye edilmiştir. Agregası kaynak özellikleri dayanıklılık, sağlamlık ve zararlı maddeler olarak sıralanmaktadır [5,18].

Dayanıklılık; Los Angeles aşınma deneyi süresince bir agregası yığılmasında oluşan kayıp malzemenin yüzdesi olarak belirlenir ve kaba agregasının karıştırma, yapım ve servis süresinde aşınma ve mekanik parçalanmaya karşı direncini ifade eder [3, 5, 7, 17, 18]. SHRP tarafından Tablo 5'te belirtilen limit değerler önerilmiştir.

Sağlamlık; Doymuş sodyum sülfat (Na_2SO_4) veya magnezyum sülfat (MgSO_4) çözeltisine daldırılan agregasının kütlelerinde oluşan kayıp malzemenin yüzdesi olarak belirlenir ve agregaların servis süresince hava etkileriyle donarak ufalanmaya karşı olan direncini ifade eder [5, 7, 17, 18, 22]. Agregalarda donma kaybının en fazla %10-20 olması istenmektedir [5, 18, 21].

Zararlı maddeler; Agregası yığılmasındaki kil toprakları, ufalanabilir parçalar, odun, mika, kömür gibi ağırlıkça yüzdesi olarak tanımlanır. SHRP tarafından en fazla agregası ağırlığının %2'si olarak önerilmiştir [15].

Tablo 5. Önerilen aşınma limitleri [15]

Trafik, milyon	Kaplanmış kaba agregası, maks. %	Kaplanmamış kaba agregası, maks. %
<1	50	50
<10	45	50
<100	40	50
≥100	35	50

2.3. Gradasyonu

Gradasyonu, agregası harmanını oluşturan danelerin boyutlarına göre dağılımını ifade eder ve karışımın stabilite ve işlenebilirlik özelliğini belirler [3]. Bilindiği üzere, geleneksel gradasyonu grafikleri ile düşeyde aritmetik ölçekte % geçen ve yatayda elek boyutu logaritmik ölçekte hazırlanarak, bunun üzerinde agregası karışımının kümülatif tane dağılımı belirlenmektedir.

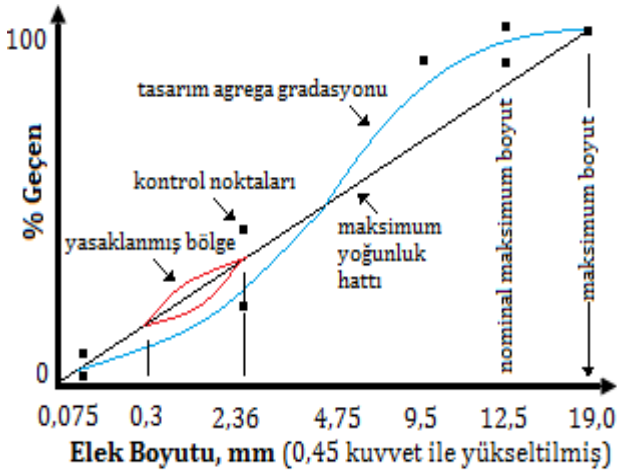
Superpave yönteminde, agregası gradasyonunu belirlemek amacıyla geleneksel yöntemlerden farklı bir gradasyonu grafiği kullanılmaktadır. Bu yöntemde, agregası gradasyonunu belirlemek amacıyla grafiğin düşey ekseninde % geçen, yatay ekseninde ise elek açıklıklarının "mm" olarak 0.45'lik üstel kuvvet ile yükseltilmiş boyutları kullanılmaktadır [5,18]. Superpave gradasyonu grafiğinin önemli bir özelliği de maksimum yoğunluk gradasyonu veya hattıdır. Burada, 0.45 üstel kuvvet eğrisinin en önemli özelliği, maksimum yoğunluktaki gradasyonu elde etmek içindir. Bu yoğunluk ise, grafiğin orijininden maksimum agregası boyutunun %100 geçtiğini gösteren noktaya çizilen doğru ile elde edilmektedir [3, 5, 18]. Ancak maksimum yoğunluk hattına sahip bir gradasyonu yeteri kalınlıkta asfalt film tabakasının oluşmasına izin vermeyecek kadar az boşluğa sahip olduğundan kullanılmasından kaçınılmalıdır [18,23]. Ayrıca bu yöntemde, maksimum ve nominal maksimum agregası boyutu kavramları geliştirilmiştir.

- Nominal maksimum boyut: Agregasının %10'dan fazlasının üstte kaldığı ilk elek boyutudur.
- Maksimum boyut: Nominal maksimum boyuttan bir büyük elek boyutudur.

Yöntemde agregası gradasyonunu belirlemek amacıyla, 0.45 kuvvet eğrisine "kontrol noktaları" ve "yasaklanmış bölge" kavramları getirilmiştir (Şekil 2).

Kontrol noktaları, gradasyonu eğrisinin geçmek zorunda olduğu sınırları belirlemektedir. Bu sınır noktaları nominal maksimum elek, orta elek (2,36 mm) ve en küçük boyutlu elek (0,075)'lerin bulunduğu yerlerde belirlenmiştir. Yasaklanmış bölge ise, band şeklindeki bir bölgeyi temsil eder ve gradasyonu eğrisinin geçmemesi gereken bir bölge olarak tanımlanır.

Yasaklanmış bölge, maksimum yoğunluk hattı üzerinde ve maksimum boyuta bağlı olarak 4,75 mm



Şekil 2. Superpave gradasyon limitleri [5,18,19]

veya 2,36 mm ile 0,3 mm elekler arasında bir band şeklindeki bölgedir. Eğer agregası gradasyonu bu bölgeden geçerse, bünyesinde çok fazla kum veya ince malzeme ihtiva ettiğinden yapım sırasında sıkıştırma zorluğuna ve sonrasında kalıcı deformasyonlara sebep olmaktadır. Yasaklanmış bölge, ince agregası boyutunda gradasyon eğrisinin maksimum yoğunluk hattına yakın ve paralel geçmesini engeller ve bu hattan uzaklaşmayı gerektirir.

Çünkü maksimum yoğunluk gradasyonu, genellikle yetersiz agregalar arasındaki boşluk yüzdesi (VMA) sağladığından ve bu boşluklar içerisine yetersiz miktarda asfalt bağlayıcı gireceğinden karışımın durabilitesi azalacaktır. Ayrıca bu tip gradasyonlar asfalt içeriğine çok duyarlı olup asfalt içeriğindeki çok küçük değişimlerde bile kolayca plastik özellik gösterebilmektedir. Sistem, gradasyonunun yasaklanmış bölgenin altından geçmesini önermekle birlikte herhangi bir mecburiyet getirmemektedir. Ancak, karışımın iyi bir performans göstermesi için gradasyonun özellikle yasaklanmış bölgenin altından geçmesi tavsiye edilmektedir [3, 5, 18, 19, 24].

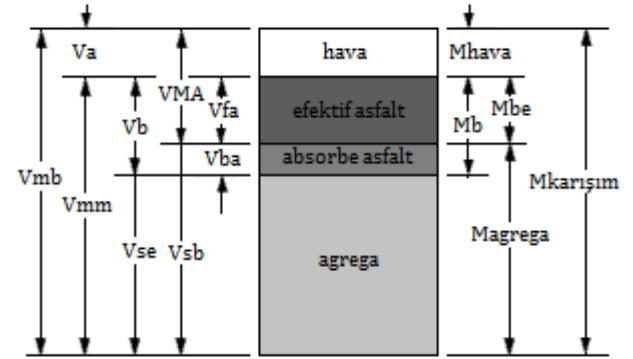
Superpave yönteminde, agregası tane büyüklüklerinin dağılımını tanımlamak amacıyla tasarım agregası gradasyonu terimi kullanılmaktadır. Bu Şekil 2’de görüldüğü gibi yasaklanmış bölgeden geçmeden kontrol noktaları arasından geçen bir eğridir [5, 18, 19, 24]. Superpave yönteminde, BSK için kullanılacak gradasyon limitleri Tablo 6’da görülmektedir.

2.4. Karışımların hacimsel özellikleri

BSK’ların davranışı dikkate alındığında hesaba katılması gereken unsur, asfalt bağlayıcı ve agregası bileşenlerinin hacimsel oranlarıdır. Çoğu karışım tasarım yönteminde önemli rol oynayan BSK’ların hacimsel analizleri, Superpave yönteminde de büyük önem arz etmektedir. Sıkışmış BSK’ların kütle ve hacim özelliklerini tanımlamak için Şekil 3’de verilen model bileşen diyagramı kullanılmaktadır [5,18,25].

Tablo 6. Superpave karışım gradasyon limitleri [21]

Standart Elek, (mm)	Yüzde geçen kriteri (kontrol noktaları)					
	Nominal maksimum elek boyutu					
	9,5	12,5	19,0	25,0	37,5	
50,0						100
37,5				100		90-100
25,0			100			90-100
19,0		100				90-100
12,5	100					90-100
9,5		90-100				
2,36	32-67	28-58	23-49	19-45	15-41	
0,075	2-10	2-10	2-8	1-7	0-6	
Tavsiye edilen yasaklanmış bölge						
4,75				39,5	34,7	
2,36	47,2	39,1	34,6	26,8-30,8	23,3-27,3	
1,18	31,6-37,6	25,6-31,6	22,3-28,3	18,1-24,1	15,5-21,5	
0,6	23,5-27,5	19,1-23,1	16,7-20,7	13,6-17,6	11,7-15,7	
0,3	18,7	15,5	13,7	11,4	10,0	



Şekil 3. BSK numunesinin bileşen diyagramı [18,25,26]

VMA: Mineral agregadaki boşluk hacmi,

Vmb: Sıkışmış karışımın hacmi,

Vmm: Asfalt karışımının boşluksuz hacmi,

Vfa: Asfalt ile dolu boşluk hacmi,

Va: Hava boşluk hacmi,

Vb: Asfalt bağlayıcısının hacmi,

Vba: Absorbe (emilen) asfalt bağlayıcı hacmi,

Vsb: Mineral agregasının hacmi (hacim özgül ağırlığı),

Vse: Mineral agregasının hacmi (efektif özgül ağırlığı),

Mb: Asfalt bağlayıcısının kütlesi,

Mbe: Asfalt bağlayıcısının efektif kütlesi,

Magrega: Agregasının kütlesi,

Mhava: Havanın kütlesi,

Mkarışım: Asfalt karışımının toplam kütlesi.

2.4.1. Agregası karışımının zahiri (Gsa) ve hacim özgül ağırlığı (Gsb)

Kaba, ince ve mineral fillerden oluşan agregası karışımının zahiri ve hacim özgül ağırlık değerleri aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$G_{sa} = G_{sb} = \frac{P1 + P2 + \dots + PN}{\frac{P1}{G1} + \frac{P2}{G2} + \dots + \frac{PN}{GN}} \quad (1)$$

Burada;

G_{sa}: Agregası karışımının zahiri özgül ağırlığı,

G_{sb}: Agregası karışımının hacim özgül ağırlığı,

P1, P2, PN: Her bir agreganın ağırlıkça yüzdesi (kaba, ince ve mineral filler),

G1, G2, GN: Her bir agreganın hacim özgül ağırlığıdır (G_{sb} için hacim, G_{sa} için zahiri özgül ağırlığıdır) [5,25].

2.4.2. Agregası karışımının efektif özgül ağırlığı (G_{se})

$$G_{se} = \frac{P_{mm} - P_b}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}} \quad (2)$$

G_{se}: Agregası karışımının efektif özgül ağırlığı,

P_{mm}: Toplam gevşek karışımın ağırlıkça yüzdesi (P_{mm}= 100),

G_{mm}: Asfalt karışımın (boşluksuz) maksimum özgül ağırlığı,

P_b: Toplam karışımın ağırlıkça yüzdesi olarak asfalt içeriği,

G_b: Asfaltın özgül ağırlığı [5].

2.4.3. Farklı asfalt içeriğindeki karışımların maksimum özgül ağırlığı (G_{mm})

$$G_{mm} = \frac{P_{mm}}{\frac{P_s}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b}} \quad (3)$$

P_s: Toplam karışımın ağırlıkça yüzdesi olarak agregası içeriği [4, 5].

2.4.4. Agreganın asfalt absorpsiyonu (P_{ba})

Asfalt absorpsiyonu, karışımın toplam ağırlığının yüzdesi olarak değil, toplam agregası ağırlığının yüzdesi olarak tarif edilir ve aşağıdaki bağıntı ile tayin edilir [4,5]. Agregası tarafından absorbe edilen asfalt, karışım performansı üzerinde bir etkiye sahip değildir ancak agreganın özgül ağırlığına bağlı olarak değişiklik gösterir [25].

$$P_{ba} = 100 \times \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{se} \times G_{sb}} \times G_b \quad (4)$$

P_{ba}: Agregası ağırlığının yüzdesi olarak absorbe edilen asfalt.

2.4.5. Asfalt karışımın efektif asfalt içeriği (P_{be})

Bir asfalt karışımın efektif asfalt içeriği (P_{be}), agregası taneleri tarafından absorbe edilen asfalt miktarının toplam asfalt içeriğinden çıkarılmasıdır. Etkif asfalt içeriği (P_{be}), aşağıdaki bağıntı ile bulunur [4, 5, 26].

$$P_{be} = P_b - \frac{P_{ba}}{100} \times P_s \quad (5)$$

P_{be}: Toplam karışımın ağırlıkça yüzdesi olarak efektif asfalt içeriği.

2.4.6. Sıkıştırılmış asfalt karışımındaki mineral agregadaki boşluk (VMA) yüzdesi

VMA yüzdesi, karışım ağırlığı ve agregası ağırlığının yüzdesi olarak aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır [5,26].

Eğer karışım bileşimi toplam karışım ağırlığının yüzdesi olarak tespit edilmişse:

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb} \times P_s}{G_{sb}} \quad (6)$$

VMA: Karışımın toplam hacminin yüzdesi olarak mineral agregadaki boşluklar,

G_{mb}: Sıkıştırılmış karışımın hacim özgül ağırlığı (AASHTO T166/ASTM D1188-D2726).

Eğer karışım bileşimi toplam agregası ağırlığının yüzdesi olarak tespit edilmişse:

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb}}{G_{sb}} \times \frac{100}{100 + P_b} \times 100 \quad (7)$$

P_b: Toplam agreganın ağırlıkça yüzdesi olarak asfalt içeriği.

Superpave yönteminde, agregası boyutuna bağlı olarak %4 tasarım hava boşluğunda tavsiye edilen minimum VMA değerleri Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Superpave VMA gereksinimleri [5, 17, 18, 26]

Nominal maksimum agregası boyutu, mm	Minimum VMA, %
9,5	15,0
12,5	14,0
19	13,0
25	12,0
37,5	11,0

2.4.7. Karışımındaki hava boşlukları (V_a) yüzdesi

Sıkıştırılmış asfalt karışımındaki hava boşlukları (V_a), asfalt ile kaplanmış agregası taneleri arasında oluşan küçük hava boşluklarıdır ve bütün trafik düzeyleri için tavsiye edilen tasarım V_a değeri %4'dür [5, 17, 18, 26].

$$V_a = 100 \times \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \quad (8)$$

V_a: Sıkıştırılmış bir karışımında toplam hacmin yüzdesi olarak hava boşlukları.

2.4.8. Karışımdaki asfaltla dolu boşluk (VFA) yüzdesi

VFA, agregada tarafından absorbe edilmiş asfalt hariç aşağıdaki bağıntı ile belirlenir [4, 5, 26].

$$VFA = 100 \times \frac{VMA - Va}{VMA} \quad (9)$$

VFA: VMA'nın yüzdesi olarak asfalt ile dolu boşluklar.

Trafik düzeyine bağlı olarak %4 tasarım hava boşluğunda kabul edilebilir VFA değer aralığı Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. Superpave VFA gereksinimleri [5, 17, 18, 26]

Trafik, milyon	Tasarım VFA, %
<0,3	70-80
0,3-3	65-78
3-10	65-75
10-30	65-75
≥30	65-75

2.5. Superpave karışım tasarımı

Superpave karışım tasarım yöntemi, kendi kriterlerini sağlayan uygun agregada ve asfalt bağlayıcı malzemelerinin seçilmesini içermektedir. Karışım tasarım işlemleri, agregada gradasyon kriterlerini sağlayan farklı agregada deneme karışımlarını hazırlamak, bunları asfalt bağlayıcı ile karıştırmak ve sıkıştırmak, agregada deneme karışımlarının hacimsel özelliklerini analiz ederek en iyi agregada deneme karışımını tasarım agregada gradasyonu olarak seçmek, seçilen tasarım agregada gradasyonu için gerekli olan tasarım asfalt içeriğini belirlemek amacıyla çeşitli asfalt içeriklerinde karışım numuneleri hazırlamaktır. Karışım numunesi hazırlama prosedürleri AASHTO TP4 ve AASHTO PP2 ile belirtilmiştir [5].

2.5.1. Superpave yağurmalı sıkıştırıcısı

Superpave karışım tasarımında kullanılan en önemli araç Superpave yağurmalı sıkıştırıcısı (SGC)'dir. Bu cihaz ile arazi şartlarına en uygun sıkıştırma elde edilmesi, iri taneli agregaların karışımda kullanılabilmesi ve sıkışabilirliğin ölçülmesi gibi hedefler gerçekleştirilmiştir [4, 5, 18, 26].

Superpave yağurmalı sıkıştırıcısı şu bölümlerden oluşmaktadır;

- Reaksiyon çerçevesi, dönen taban ve motor,
- Yükleme sistemi, yükleme kolu ve basınçölçer,
- Yükseklik ölçme ve kaydetme sistemi,
- Kalıp ve taban plakası.

Cihazın şematik görünüşü ve kalıp konfigürasyonu Şekil 4'te gösterilmiştir. Cihaz, yükleme başlığı vasıtasıyla 600±18 kPa (6,12 kg/cm²)'lik sabit bir basınç numune üzerine tatbik ederken numune kalıbı altındaki döner taban 1,25±0,02°'lik açı ile dakikada 30±0,5 dönüş yaparak kalıba bir jirasyon hareketi

vermekte ve numuneyi kesme gerilmeleri altında sıkıştırmaktadır. Ayrıca kontrol cihazı, uygulanan yükü sabit tutarak numunenin yüksekliğini deney boyunca kaydetmektedir. Numune ağırlığı, kalıbın iç çapı ve numune yüksekliği bilindiğinden numunenin sıkıştırma sırasındaki yoğunluğunu hesaplamak mümkündür [3, 5, 15, 18, 26].

SGC ile sıkıştırılmış karışımların analizi, üç sıkıştırma düzeyindeki (Nini, Ndes, Nmaks) teorik maksimum özgül ağırlığın (Gmm) yüzdesi esas alınarak yapılmaktadır. Bu sıkıştırma düzeyleri aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

- Nini; başlangıç yağurma sayısıdır ve yapım sırasında karışımın sıkışabilirliğini ölçmek için kullanılmaktadır.
- Ndes; tasarım yağurma sayısıdır ve belirlenen trafik yüklerinin etkisiyle kaplamada oluşacağı düşünülen yoğunluğun aynısını elde etmek için numune üretiminde esas alınmaktadır.
- Nmaks; maksimum yağurma sayısıdır ve arazide bu değeri hiç geçmeyecek bir laboratuvar yoğunluğu elde etmek için kullanılmaktadır [4,26].

Başlangıç ve maksimum yağurma sayıları ile tasarım yağurma sayısı arasında aşağıdaki gibi ilişkiler mevcuttur [3-5,23].

$$\text{LogNmaks} = 1,10 \times \text{LogNdes} \quad (10)$$

$$\text{LogNini} = 0,45 \times \text{LogNdes} \quad (11)$$

Sıkıştırma düzeylerine bağlı olarak yoğunluk gereksinimleri Tablo 9'da verilmiştir.

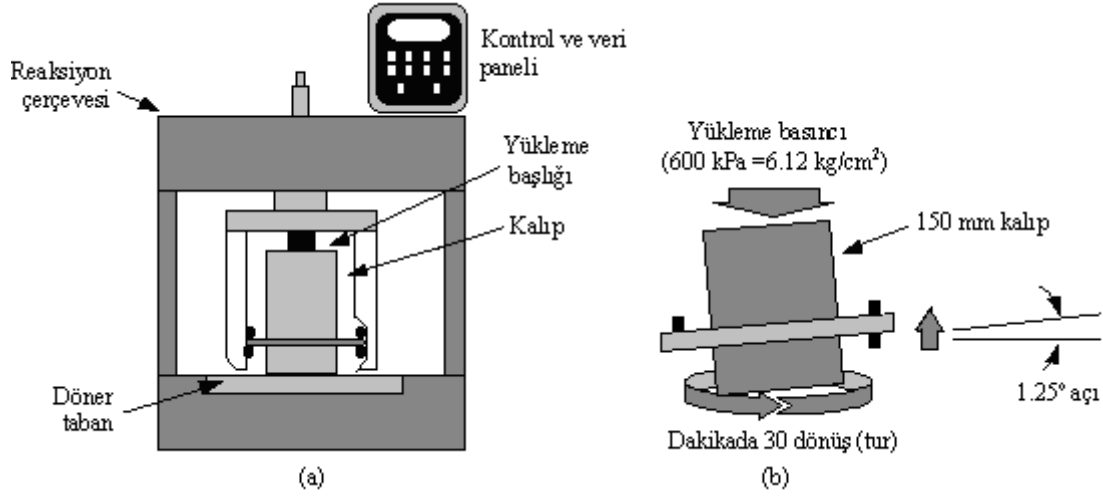
Tablo 9. Superpave sıkıştırma kriterleri [4, 21, 27]

Trafik, milyon	Gerekli Yoğunluk (%Gmm)		
	Nini	Ndes	Nmaks
<0,3	≤91,5		
0,3-3	≤90,5		
3-10		96,0	≤98,0
10-30	≤89,0		
>30			

Sıkıştırma enerjisinin bir fonksiyonu olan yağurma sayısı; trafik sayısı ve yolun sınıfına bağlı olarak AASHTO TP4 standardı ile güncellenmiş şekliyle Tablo 10'da görülmektedir.

Tablo 10. Trafik seviyesine göre sıkıştırma parametreleri [26]

Trafik, milyon	Sıkıştırma parametreleri		
	Nini	Ndes	Nmaks
< 0,3	6	50	75
0,3-3	7	75	115
3-30	8	100	160
> 30	9	125	205



Şekil 4. Superpave yağurmalı sıkıştırıcı (a) ve kalıp konfigürasyonu (b) [3, 5, 15, 18, 25]

2.5.2. Tasarım agrega gradasyonu seçimi

Tasarım agrega gradasyonu seçilmeden önce kullanılacak agrega ve asfalt bağlayıcı malzemelerinin seçilmiş ve onaylanmış olması gerekir. Tasarım agrega gradasyonunu seçmek için bir gradasyon dizisini kapsayan üç deneme karışımı başlangıç olarak yeterli görülmektedir. Deneme karışımları seçildiğinde, karışım agregasının mutabakat ve kaynak özellikleri ile özgül ağırlık özelliklerinin değerlendirilmesi gerekir. Agrega özellikleri değerlendirildikten sonraki adım, her deneme karışımı için hazırlanan asfalt karışım numunelerini sıkıştırmak ve hacimsel özelliklerini belirlemektir. Her deneme karışımı için gereken başlangıç asfalt bağlayıcı içeriği, agrega karışımının efektif özgül ağırlığının (Gse) tespit edilmesi ile belirlenmektedir. Gse, aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$Gse = Gsb + 0,8 \times (Gsa - Gsb) \quad (12)$$

Bu bağıntıdaki 0,8 katsayısı, tasarımcının yorumuna bağlı olarak değiştirilebilir. Absorbsiyonu yüksek olan agregalarda bu katsayı 0,6 veya 0,5'e kadar azaltılabilir [16-18].

Agrega tarafından absorbe edilecek olan asfalt bağlayıcı hacmi (Vba) aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$Vba = \frac{Ps \times (1 - Va)}{\left(\frac{Pb}{Gb} + \frac{Ps}{Gse}\right)} \times \left(\frac{1}{Gsb} - \frac{1}{Gse}\right) \quad (13)$$

Vba: Absorbe edilen bağlayıcı hacmi (karışıma göre, cm^3/cm^3),
Pb: Bağlayıcı yüzdesi (0,05 alınabilir),
Ps: Agrega yüzdesi (0,95 alınabilir),
Gb: Bağlayıcının özgül ağırlığı (1,02 alınabilir),
Va: Hava boşluğu hacmi (karışıma göre, $0,04 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$).

Efektif bağlayıcı hacmi (Vbe) ise aşağıdaki bağıntı ile belirlenmektedir.

$$Vbe = 0,176 - 0,0675 \times \text{Log}(Sn) \quad (14)$$

Vbe: Efektif bağlayıcı hacmi (karışıma göre, cm^3/cm^3),
Sn: Agrega nominal maksimum elek boyutu (mm).

Son olarak, başlangıç asfalt bağlayıcı içeriği (Pbi) aşağıdaki bağıntı ile belirlenir.

$$Pbi = \frac{Gb \times (Vbe + Vba)}{Gb \times (Vbe + Vba) + Ws} \times 100 \quad (15)$$

Pbi: Karışım ağırlığına göre bağlayıcı yüzdesi,
Ws: Agreganın ağırlığı (gr).

$$Ws = \frac{Ps \times (1 - Va)}{\left(\frac{Pb}{Gb} + \frac{Ps}{Gse}\right)} \quad (16)$$

Hazırlanmış olan üç farklı agrega deneme karışımının her bir karışımı için en az iki numune SGC ile sıkıştırılır. Ayrıca her bir deneme karışımının maksimum teorik özgül ağırlığının (Gmm) tespit edilebilmesi için birer numune daha olmak üzere toplam 9 numune hazırlanmalıdır [3, 5, 16-18].

2.5.3. Karışımın hazırlanması ve sıkıştırılması

Asfalt karışımların hazırlanması ve sıkıştırılması için karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları, asfalt bağlayıcının viskozite-sıcaklık diyagramı kullanılarak tespit edilir. Bunun için, asfalt bağlayıcının karıştırma için $0,17 \pm 0,02$ Pa.s, sıkıştırma için $0,28 \pm 0,03$ Pa.s viskozluk olacak şekilde karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları belirlenir [28,29].

Hazırlanan asfalt bağlayıcı ve agrega malzemesi, belirlenen karışım sıcaklığına 2-4 saat erişecek şekilde ısıtılır. Isıtılmış asfalt bağlayıcı ısıtılmış

agrega üzerine belirlenen miktarda dökülerek karıştırılır. Karışım, düz ve yayvan bir tepsiye metrekareye 21-22 kg düşecek kalınlıkta yerleştirilir ve önceden ısıtılmış 135 °C'deki etüve konularak 4 saat boyunca kısa süreli yaşlandırma işlemine tabi tutulur. Kısa süreli yaşlandırma işleminden sonra numune maksimum teorik özgül ağırlığının (Gmm) tayininde kullanılacaksa, AASHTO T209/ASTM D2041 standardına göre devam edilir. Aksi takdirde hazırlanan karışım kalıba yerleştirilerek sıkıştırma işlemine başlanır. Sabit 600 kPa basınç, 1,25°'lik yağurma açısı altında karışım istenen yağurma sayısı tamamlanuncaya kadar sürer. Sıkıştırma işleminden sonra sıkışan numune yaklaşık 5 dakikalık bir bekleme süresi sonunda zarar görmeden kalıptan çıkartılır ve örselenmeden soğumaya bırakılır [5, 18, 30].

2.5.4. Verilerin değerlendirilmesi

Superpave yağurmalı sıkıştırma verileri, istenen her yağurma işlemi için hesaplanmış hacim özgül ağırlık, düzeltilmiş hacim özgül ağırlık ve düzeltilmiş maksimum teorik özgül ağırlık yüzdesi hesaplanarak analiz edilir. Sıkıştırma esnasında numune yüksekliği sürekli olarak her dönüş için yazılım tarafından ölçülür ve kaydedilir. Sıkıştırılmış numunenin hacim özgül ağırlığı (Gmb) ve sıkıştırılmamış (gevşek) numunenin maksimum teorik özgül ağırlığı (Gmm) ölçülür. Herhangi bir yağurma değeri için hesaplanan tahmini hacim özgül ağırlık değeri olan Gmb(tahmini), karışım ağırlığının numunenin hacmine bölünmesi ile elde edilir.

$$Gmb(tahmini) = \frac{(Wm/Vmx)}{\gamma_{su}} \quad (17)$$

Gmb(tahmini) : Numunenin sıkışma sırasındaki hesaplanan tahmini hacim özgül ağırlığı,
Wm: Numunenin ağırlığı (gr),
 γ_{su} : Suyun yoğunluğu (1 gr/cm³),
Vmx: Numunenin (18) bağıntısı ile bulunan hacmi (cm³).

$$Vmx = \frac{\pi d^2 hx}{4} \times 0,001 \quad (18)$$

d: Kalıbın çapı (100 mm veya 150 mm),
hx: Sıkıştırma esnasında numunenin yüksekliği (mm).
Bu hesaplama, numune kenarlarının düzgün ve boşluksuz olduğunu kabul eder ancak gerçekte böyle değildir. Numune yüzeyindeki pürüz ve boşluklar, numune hacminin düzgün kenarlı bir silindirin hacminden daha düşük olmasına sebep olur. Bu sebeple, hesaplanan Gmb(tahmini), ölçülen hacim özgül ağırlığı (Gmb(ölçülen)) ile oranlanarak bir düzeltme faktörü (C) değeri hesaplanır.

$$C = \frac{Gmb(ölçülen)}{Gmb(tahmini)} \quad (19)$$

C: Düzeltme faktörü,

Gmb(ölçülen) : Sıkışmış numunenin ölçülen hacim özgül ağırlığı.

Düzeltilme faktörü kullanılarak, istenen yağurma sayısındaki düzeltilmiş hacim özgül ağırlık (Gmb(düzeltilmiş)) değeri hesaplanır.

$$Gmb(düzeltilmiş) = C \times Gmb(tahmini) \quad (20)$$

Gmb(düzeltilmiş): Herhangi bir yağurma için düzeltilmiş hacim özgül ağırlığı.

Düzeltilmiş maksimum teorik özgül ağırlık (% Gmm) değeri, Gmb(düzeltilmiş), Gmm(ölçülen) oranlanması ile bulunur.

Superpave yönteminde, yağurma düzeyleri olan Nmaks, Ndes ve Nini değerleri, belirli bir proje için tasarım trafik düzeyi ve ortalama yüksek sıcaklık ile belirlenmiştir. Superpave hacimsel tasarım kriterleri olan VMA, VFA ve filler oranı, tasarım yağurma sayısı olan Ndes'de karışımın % 4'lük hava boşluğu içeriğine sahip olması esasına dayanmaktadır. Superpave tasarım yöntemi ayrıca Nmaks, Ndes ve Nini yağurma sayılarında da karışım yoğunluğu için kriterler içermektedir.

Tasarım yağurma sayısındaki (Ndes) hava boşluğu yüzdesi (Va) aşağıdaki bağıntı ile belirlenir.

$$Va = 100 - \%Gmm @ Ndes \quad (21)$$

Va: Toplam hacmin yüzdesi olarak Ndes'deki hava boşluğu, %Gmm@Ndes: Ndes'deki maksimum teorik ağırlık yüzdesi.

Mineral agregadaki boşluk yüzdesi (VMA) ise aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır.

$$\%VMA = 100 - \left(\frac{\%Gmm @ Ndes \times Gmm \times Ps}{Gsb} \right) \quad (22)$$

Karışımın hava boşluğu yüzdesi % 4'e eşit bulunduğu, bu veriler hacimsel şartname kriterleri ile karşılaştırılır ve bu karışımın bir analizi tamamlanmış olur. Tasarım yağurma sayısında (Ndes) bulunan hava boşluğu yüzdesi genellikle % 4'den farklı çıktığından, tasarım yağurma sayısındaki hava boşluğu % 4 olan tahmini bir asfalt içeriği hesaplanarak belirlenir ve hesaplanan tahmini tasarım asfalt içeriğindeki tahmini tasarım özellikleri hesaplanır. Tasarım yağurma sayısında (Ndes) hava boşluğu % 4 olan tahmini asfalt içeriği aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır.

$$Pb(tahmini) = Pbi - (0,4 \times (4 - Va)) \quad (23)$$

Pb(tahmini) : Karışım ağırlığının yüzdesi olarak tahmini asfalt içeriği,
Pbi: Karışım ağırlığının yüzdesi olarak deneme (başlangıç) asfalt içeriği,

Tasarım yağurma sayısındaki (Ndes), hacimsel özellikler olan VMA ve VFA ve başlangıç yağurma sayısı (Nini) ile maksimum yağurma sayısındaki (Nmaks) karışım yoğunlukları bu deneme asfalt içeriği için aşağıdaki (24), (25), (26) ve (27) bağıntıları ile hesaplanır.

$$\%VMA(tahmini) = \%VMA(başlangıç) + C \times (4 - Va) \quad (24)$$

$\%VMA(başlangıç)$: Deneme asfalt içeriğindeki karışımın agrega boşlukları yüzdesi,
C: Sabit katsayı, hava boşluğu yüzdesi % 4'den az ise 0,1; yüksek ise 0,2 alınır.

$$\%VFA(tahmini) = 100 \times \frac{\%VMA(tahmini) - 4,0}{\%VMA(tahmini)} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \%Gmm(tahmini) @ Nini &= \\ \%Gmm(deneme) @ Nini &- (4,0 - Va) \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \%Gmm(tahmini) @ Nmaks &= \\ \%Gmm(deneme) @ Nmaks &- (4,0 - Va) \end{aligned} \quad (27)$$

Son olarak, karışımda kullanılan 0,075 mm'lik elekten geçen malzemenin ağırlıkça yüzdesinin, efektif asfalt bağlayıcı içeriğine oranlanması ile hesaplanan filler oranı hesaplanmaktadır. Bir karışımdaki efektif asfalt bağlayıcı içeriği aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır.

$$Pbe(tahmini) = Pb(tahmini) - (Ps \times Gb) \times \frac{Gse - Gsb}{Gse \times Gsb} \quad (28)$$

Pbe: Toplam karışım ağırlığının yüzdesi olarak efektif asfalt içeriği.

Diğer bir Superpave karışım gereksinimi de, DP ile ifade edilen filler veya toz oranıdır. Bu değer; 0,075 mm'lik elekten geçen filler malzemesinin agrega karışım ağırlığının yüzdesinin ($P_{0,075}$), toplam karışım ağırlığının yüzdesi olarak hesaplanan efektif asfalt içeriğine ($Pbe(tahmini)$) oranı olarak aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmaktadır [5, 18, 26].

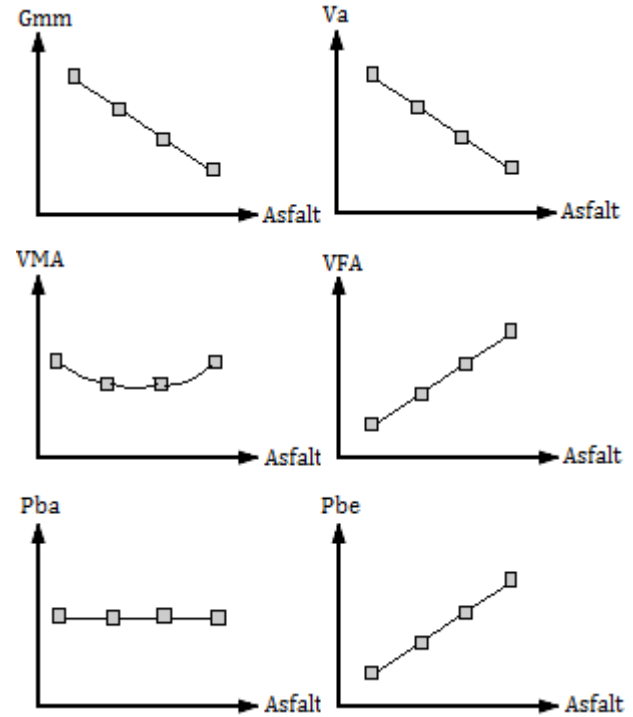
$$DP = \frac{P_{0,075}}{Pbe(tahmini)} \quad (29)$$

Sonuç olarak, başlangıçta değerlendirilmeye alınan üç farklı agrega karışımı için başlangıç asfalt içeriklerinde hazırlanan numunelerin yukarıda ifade edilen tahmini değerleri hesaplandıktan sonra bu değerler şartname kriterleri ile ayrı ayrı karşılaştırılır. Tasarımcı, bu deneme karışımlarından şartname kriterlerini sağlayan en uygun karışımı tespit ederek tasarım agrega gradasyonunu kabul eder veya başka deneme karışımlarının yapılmasına karar verir [5,18].

2.5.5. Tasarım asfalt bağlayıcı içeriği

Hazırlanan deneme karışımlarından tasarım agrega gradasyonu seçildikten sonra, kabul edilen deneme

karışımının tahmini asfalt içeriğinde, $\pm 0,5$ ve $+1,0$ olmak üzere dört ayrı asfalt içeriğinde ve her asfalt içeriği için en az iki numune hazırlanır. Bu dört asfalt içeriği Superpave karışım tasarım yöntemi için minimum gereksinimdir. Ayrıca, en az iki numune tahmini asfalt içeriğinde karışımın maksimum teorik özgül ağırlığının belirlenmesi için hazırlanır [5,18]. Tasarım yağurma sayısındaki (Ndes) Gmb değerleri, $\%Gmm$, Va, VMA, VFA ve filler oranı değerleri her asfalt yüzdesi için hesaplanarak Va, VMA ve VFA grafikleri asfalt yüzdesine bağlı olarak çizilir. Tasarım asfalt bağlayıcı içeriği, karışımın Va yüzdesi % 4 olacak şekilde belirlenir ve diğer tasarım değerleri tasarım asfalt yüzdesine göre tespit edilerek şartname kriterleri ile karşılaştırılır [5, 15, 18, 26]. BSK'ların analizinde hesaplanan hacimsel özelliklerin, karışımda kullanılan asfalt bağlayıcı içeriğine göre değişimi Şekil 5'deki gibi grafiklerle ifade edilebilir.



Şekil 5. Hacimsel özelliklerin asfalt içeriği ile değişimi

Ayrıca son olarak, tespit edilen tasarım asfalt içeriğinde en az iki karışım hazırlanarak maksimum yağurma sayısında (Nmaks) sıkıştırılır ve yoğunluk özellikleri şartname kriterleri ile karşılaştırılır. Superpave hacimsel karışım tasarım yöntemi şartname kriterleri Tablo 11'de verilmiştir.

3. Malzeme ve Deneysel Çalışmalar

Bu çalışmada yapılan deneysel çalışmalar Superpave karışım tasarımı çerçevesinde yapılarak değerlendirilmiştir. Superpave tasarım yöntemi, başlıca dört esas adımdan oluşmaktadır. Bunlar; malzemelerin seçilmesi (asfalt bağlayıcı, agrega), Tasarım agrega yapısının seçilmesi, tasarım asfalt bağlayıcı içeriğinin tespit edilmesi ve karışımının nem hassasiyetinin değerlendirilmesidir [5, 18].

Tablo 11. Superpave hacimsel karışım tasarım kriterleri [21, 27, 31]

Trafik, milyon	Yoğunluk, %Gmm		(VMA), min %					VFA, min %	DP	
	Nini	Ndes	Nmaks	Nominal maksimum agregası boyutu (mm)						
				37,5	25,0	19,0	12,5			9,50
<0,3	≤91,5							70-80		
0,3-3	≤90,5							65-78		
3-10		96,0	≤98,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	0,6-1,2*	
10-30	≤89,0							65-75		
≥30										

* : Agregası gradasyonu yasak bölgenin altından geçiyorsa 0,8-1,6 alınmalıdır.

Tablo 12. Asfalt bağlayıcının fiziksel özellikleri

Özellikler	Deney Standardı	B 70/100	
		Sonuç	Şartname sınırı
Özgül ağırlık (gr/cm ³), 25 °C	TS 1087	1,030	1,0-1,1
Düktilite (cm), 25 °C	TS 119	114	min. 100
Penetrasyon (0,1mm), 100gr, 5sn, 25 °C	EN 1426	94	70-100
Yumuşama noktası (°C)	EN 1427	48,2	43-51
Parlama noktası (°C)	EN 22719	322	min. 230

Tablo 13. Agreganın fiziksel özellikleri

Özellikler	Deney Standardı	Mineral agregası			Şartname sınırı
		Kaba	İnce	Filler	
Dayanıklılık (Los Angeles aşınma kaybı), (%)	ASTM C-131	28	-	-	Maks. 35
Sağlamlık (Na ₂ SO ₄ ile donma kaybı), (%)	ASTM C-88	4,5	-	-	Maks. 10
Kaba agregası köşeliliği, (%)	ASTM D-5821	98/94	-	-	Min. 95/90
İnce agregası köşeliliği, (%)	AASHTO T304	-	52	-	Min. 45
Yassı ve uzun daneler, (%)	ASTM D-4791	2	-	-	Maks. 10
Kil içeriği, (kum eşdeğerlik), (%)	AASHTO T176	-	-	54	Min. 45
Zararlı maddeler, (%)	ASTM C-142	Bulunmamıştır			Maks. 2

3.1. Malzeme seçilmesi

Superpave tasarım yönteminde, malzeme seçimi ve karışım tasarımı yapılırken coğrafi bölge, hava sıcaklıkları, trafik sayısı ve kaplama kalınlığı bilgileri esas alınmaktadır.

Çalışmada, bölgenin 20 yıllık trafik sayısı, tahmini olarak 15 milyon ETDY tekrür sayısı alınmıştır. Bağlayıcı olarak kullanılan B 70/100 penetrasyon dereceli asfalt TÜPRAŞ Rafinerisinden elde edilmiştir. Asfaltın fiziksel özellikleri Tablo 12'de verilmiştir. Ayrıca asfaltın 135 ve 165 °C sıcaklıklardaki viskozite değerleri Dönel Viskozimetre (RV) deneyi ile belirlenerek karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları sırasıyla 156-161°C ve 143-150°C olarak tespit edilmiştir.

Mineral agregası olarak, Elazığ çevresindeki Hanpınarı taş ocağında konkasörle kırılmış halde temin edilen kalker kullanılmıştır. Çalışmada, maksimum tane boyutu 19 mm, nominal maksimum tane boyutu 12,5 mm olan agregası gradasyonu seçilmiştir. Karışımlarda kullanılacak agregası yığınının mutabakat ve kaynak özellikleri tespit edilerek Tablo 13'de verilmiştir.

3.2. Tasarım agregası gradasyonu seçimi

Superpave tasarım yöntemine göre agregası gradasyonunu seçmek amacıyla, çalışma için seçilmiş olan nominal maksimum 12,5 mm büyüklüğündeki agregası boyutu esas alınarak, Tablo 14'de belirtilen

sınırlar içerisinde kalacak şekilde bir gradasyon dizisini kapsayan üç deneme karışımının başlangıç olarak seçilmesi gerekir.

3.2.1. Deneme karışımlarının oluşturulması

Çalışmada kullanılmak üzere, Tablo 14'de belirtilen şartname sınırları içerisinde kalacak şekilde başlangıç üç deneme agregası karışımı (Karışım-1, Karışım-2 ve Karışım-3) seçilerek karışım gradasyonları Tablo 15'de verilmiştir. Seçilen bu deneme agregası karışımlarının gradasyon eğrileri Şekil 6'da gösterilmiştir.

Tablo 14. Nominal karışım için gradasyon kriterleri [18,21]

Elek boyutu, mm	Kontrol noktaları		Yasaklanmış bölge	
	Minimum	Maksimum	Minimum	Maksimum
19,0	100,0	100,0		
12,5	90,0	100,0		
9,5				
4,75				
2,36	28,0	58,0	39,1	39,1
1,18			25,6	31,6
0,600			19,1	23,1
0,300			15,5	15,5
0,150				
0,075	2,0	10,0		

Seçilen deneme karışımlarındaki, kaba ve ince agrega ile fillerin özgül ağırlıkları tespit edilerek, her bir deneme agrega karışımının hacim ve zahiri özgül ağırlığı (1) bağıntısından yararlanılarak hesaplanmış ve bu değerler Tablo 16'da gösterilmiştir.

Tablo 15. Başlangıç deneme karışımları

Elek boyutu, mm	Karışım gradasyonu, % geçen		
	Karışım-1	Karışım-2	Karışım-3
19,0	100	100	100
12,5	95	94	95
9,5	88	84	88
4,75	65	58	62
2,36	39	35	44
1,18	24	22	33
0,600	18	16	25
0,300	14	12	17
0,150	10	8	8
0,075	6	5	4,5
Karışımlardaki agrega yüzdeleri			
Kaba agrega	35	42	38
İnce agrega	59	53	57,5
Filler	6	5	4,5

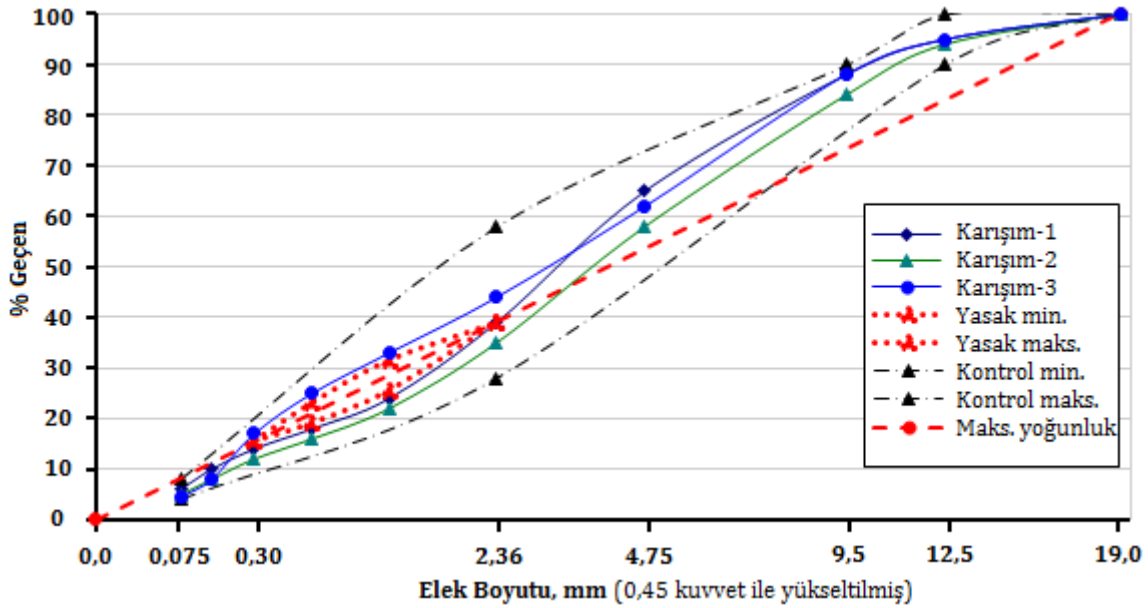
3.2.2. Deneme karışımlarının hazırlanması ve sıkıştırılması

Agrega özellikleri değerlendirildikten ve uygunluğu tespit edildikten sonra her deneme karışımı için asfalt karışım numuneleri hazırlanmış, sıkıştırılmış ve hacimsel özellikleri belirlenmiştir. Bu amaçla, her bir deneme karışımı için başlangıçta gereken asfalt bağlayıcı içeriği (Pbi), agrega karışımının efektif özgül ağırlığının (Gse) tespit edilmesi ile birlikte aşağıdaki işlem sırasına göre belirlenmiştir.

İşlemlerdeki örneklendirmeler Karışım-1 agrega gradasyonuna göre verilmiştir.

➤ Deneme karışımlarının efektif özgül ağırlığı (Gse) bağıntı (12) yardımı ile 2,615 olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamada, su absorpsiyonuna bağlı olarak değişen katsayı değeri 0,8 alınmıştır.

➤ Agregada tarafından absorbe edilecek olan asfalt bağlayıcı hacmi (Vba), bağıntı (13) yardımı ile $0,004 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ olarak hesaplanmıştır. Hesaplamada, Pb değeri 0,05; Ps değeri 0,95 ve Va değeri B 70/100 için $0,04 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ olarak alınmıştır.



Şekil 6. Agrega karışımlarının gradasyon eğrileri

Tablo 16. Deneme karışımlarının özgül ağırlıkları

Özellik	Deney Standardı	Karışım-1		Karışım-2		Karışım-3	
		Kaba	İnce	Kaba	İnce	Kaba	İnce
Hacim özgül ağırlık	ASTM C-127	2,593	2,604	2,590	2,593	2,583	2,591
Zahiri özgül ağırlık	ve	2,610	2,621	2,613	2,618	2,611	2,623
Zahiri özgül ağırlık	ASTM C-128	Filler = 2,635					
Su absorpsiyonu, (%)		0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5
Toplam agrega karışımı							
Karışım hacim özgül ağırlığı, Gsb		2,602		2,594		2,590	
Karışım zahiri özgül ağırlığı, Gsa		2,618		2,617		2,619	

- Her üç deneme karışımının (Karışım 1, 2 ve 3) efektif bağlayıcı hacmi (V_{be}) ise bağıntı (14) yardımı ile $0,102 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ olarak belirlenmiştir.
- Son olarak, başlangıç deneme asfalt bağlayıcı içeriği (P_{bi}), bağıntı (15) yardımı ile %4,7 olarak belirlenmiştir. Bu hesaplamada kullanılan agrega ağırlığı (W_s), bağıntı (16) ile 2,214 gr olarak tespit edilmiştir.

Hazırlanmış olan üç farklı agrega deneme karışımının her biri için iki numune SGC ile sıkıştırılmış ve Gmm tespit edilebilmesi için birer numune fazladan hazırlanmıştır. Hazırlanan karışım numunelerinin sıkıştırılması için 100 mm'lik silindirik kalıp kullanılmış ve bu kalıp için gereken toplam agrega ağırlığı 1200 gr olarak alınmıştır.

- Karışım ağırlığına göre bulunan bağlayıcı yüzdesi (P_{bi}) yardımıyla, toplam agrega ağırlığına göre (1200 gr) alınacak bağlayıcı miktarı (W_b) 59,2 gr olarak hesaplanmıştır.

Çalışmada ilk olarak, karışımların sıkıştırılması amacıyla her bir deneme karışımı için iki olmak üzere toplam 6 adet asfalt karışım numunesi hazırlanmıştır. Bu amaçla; belirlenen karışım sıcaklığına erişmesi için hazırlanan asfalt bağlayıcı 2 saat, agrega ise 3 saat kadar etüvde ısıtılmıştır. Isıtılmış bağlayıcı agrega üzerine dökülerek bir karıştırıcı vasıtasıyla 1,5–2 dakika karıştırılmıştır. Karışım, düz ve yayvan bir tepsiye metrekaareye 21–22kg düşecek kalınlıkta yerleştirilmiş ve önceden ısıtılmış 135°C 'deki etüve konularak 4 saat boyunca kısa süreli yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur. Bu sırada yağurmalı sıkıştırıcının sıkıştırma basıncı (600kPa), açısı ($1,25^\circ$), yağurma hızı (30devir/dak.) ve yağurma sayısı istenilen değerlere ayarlanarak hazırlanmıştır. Çalışmada, kabul edilen 15 milyon trafik sayısına göre sıkıştırma parametreleri $N_{ini}=8$, $N_{des}=100$ ve $N_{maks}=160$ olarak alınmıştır. Deney çalışmalarında kullanılan SGC yağurmalı sıkıştırıcısı Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7. Gyropac yağurmalı sıkıştırıcı

Deney için sıkıştırma sıcaklığına getirilerek hazırlanan karışımlar sıkıştırma işlemine

başlanmıştır. Sıkıştırma işlemi esnasında, karışımların belirli yağurma sayılarındaki yükseklikleri ölçülmüş ve istenen yağurma sayısı ($N_{des}=100$) tamamlanmaya kadar numuneler sıkıştırılmıştır.

Sıkışan numuneler yaklaşık 5 dakikalık bir bekleme süresi sonunda zarar görmeden kalıptan çıkartılarak soğumaya bırakılmıştır. Bu numunelerin hacim özgül ağırlıkları AASHTO T166 [32] standardına göre tespit edilerek ($G_{mb}(\text{ölçülen})$) değerleri Tablo 17'de verilmiştir. Ayrıca fazladan hazırlanıp sıkıştırılmadan soğumaya bırakılan karışım numunelerinin maksimum teorik özgül ağırlıkları (G_{mm}) AASHTO T209 [33] standardına göre tespit edilerek sonuçları aynı tabloda verilmiştir.

Tablo 17. Deneme karışımlarının özgül ağırlıkları

Özgül Ağırlık	Karışım-1		Karışım-2		Karışım-3	
	1	2	1	2	1	2
$G_{mb}(\text{ölçülen})$	2,354	2,364	2,328	2,330	2,348	2,345
Gmm	2,451		2,425		2,442	

3.2.3. Deneme karışımlarının değerlendirilmesi

Her bir karışım numunesinin elde edilen sıkıştırma verileri (h_x , $G_{mb}(\text{ölçülen})$, W_m , G_{mm}) kullanılarak, tasarım yağurma sayısındaki (N_{des}) tahmini hacim özgül ağırlık ($G_{mb}(\text{tah.})$), düzeltme faktörü (C), düzeltilmiş hacim özgül ağırlık ($G_{mb}(\text{düz.})$) ve son olarak maksimum teorik özgül ağırlık yüzdesi ($\%G_{mm}$) hesaplanarak sonuçları analiz edilmiştir.

Karışım-1'in, B 70/100 ana bağlayıcısı ile %4,7 bitüm içeriğinde hazırlanan numunelerine ait sıkıştırma karakteristikleri Tablo 18'de, Karışım-2'nin %4,8 ve Karışım-3'ün %4,9 bitüm içeriğindeki sıkıştırma karakteristikleri ise Tablo 19 ve Tablo 20'de verilmiştir.

Tablo 18'de tasarım yağurma sayısında (N_{des}) 1. Numune için gösterilen hesaplamalarda; numunenin hacmi (V_{mx}) bağıntı (18) ile $547,93 \text{ cm}^3$, numunenin tahmini hacim özgül ağırlığı ($G_{mb}(\text{tah.})$) bağıntı (17) ile 2,285, düzeltme faktörü (C) bağıntı (19) ile 1,030 ve numunenin düzeltilmiş hacim özgül ağırlığı ($G_{mb}(\text{düz.})$) bağıntı (20) ile 2,354 olarak hesaplanmıştır.

Ayrıca, numunenin düzeltilmiş maksimum teorik özgül ağırlık ($\%G_{mm}$) değeri de $G_{mb}(\text{düz.})$ ve $G_{mm}(\text{ölçülen})$ değerleri oranlanarak %96,05 olarak elde edilmiştir. Son olarak, Karışım-1 numunelerinin ortalama $\%G_{mm}$ değeri ise %96,24 olarak hesaplanmıştır.

Sıkıştırılan Karışım-1 numunelerinin farklı yağurma sayılarındaki yoğunluk değerleri ve bu değerlerin ortalaması Şekil 8'de gösterilmiştir. Karışım-2 ve Karışım-3 numunelerinin yoğunluk eğrileri ise Şekil 9 ve Şekil 10'da verilmiştir.

Tablo 18. Karışım-1 numunelerinin %4,7 bitüm içeriğindeki sıkıştırma karakteristikleri

Devir sayısı	Karışım-1 Numunelerinin sıkıştırılması										Ortalama %Gmm
	Numune-1					Numune-2					
	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	Wm = 1252,16gr	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	Wm = 1254,13gr	
8	78,0	2,045	2,107	85,95		78,2	2,043	2,116	86,32		86,14
20	75,0	2,127	2,191	89,39		75,2	2,124	2,200	89,77		89,58
40	72,5	2,200	2,266	92,47		72,6	2,201	2,279	92,98		92,72
60	71,22	2,240	2,308	94,16		71,4	2,238	2,317	94,54		94,35
80	70,4	2,266	2,334	95,23		70,6	2,263	2,344	95,61		95,42
100	69,8	2,285	2,354	96,05		70,0	2,282	2,364	96,43		96,24
Gmb(ölçülen)			2,354			2,364					
Düz. faktörü, (C)			1,030			1,036					
Gmm(ölçülen)			2,451								

Tablo 19. Karışım-2 numunelerinin %4,8 bitüm içeriğindeki sıkıştırma karakteristikleri

Devir sayısı	Karışım-2 Numunelerinin sıkıştırılması										Ortalama %Gmm
	Numune-1					Numune-2					
	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	Wm = 1255,15gr	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	Wm = 1254,95gr	
8	78,5	2,037	2,091	86,23		78,2	2,044	2,094	86,38		86,31
20	75,2	2,126	2,183	90,02		75,8	2,109	2,161	89,12		89,57
40	72,8	2,196	2,255	92,98		73,0	2,190	2,244	92,54		92,76
60	71,5	2,236	2,295	94,67		71,6	2,233	2,288	94,35		94,51
80	70,9	2,255	2,315	95,48		71,0	2,252	2,307	95,14		95,31
100	70,5	2,268	2,328	96,02		70,3	2,274	2,330	96,09		96,05
Gmb(ölçülen)			2,328			2,330					
Düz. faktörü, (C)			1,026			1,025					
Gmm(ölçülen)			2,425								

Tablo 20. Karışım-3 numunelerinin %4,9 bitüm içeriğindeki sıkıştırma karakteristikleri

Devir sayısı	Karışım-3 Numunelerinin sıkıştırılması										Ortalama %Gmm
	Numune-1					Numune-2					
	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	Wm = 1252,34gr	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	Wm = 1253,15gr	
8	78,0	2,045	2,110	86,41		78,2	2,041	2,099	85,94		86,17
20	75,0	2,127	2,195	89,87		75,4	2,117	2,177	89,13		89,50
40	72,5	2,200	2,270	92,97		73,0	2,187	2,248	92,06		92,51
60	71,5	2,231	2,302	94,27		71,8	2,223	2,286	93,60		93,93
80	70,8	2,253	2,325	95,20		70,7	2,258	2,322	95,06		95,13
100	70,1	2,276	2,348	96,15		70,0	2,281	2,345	96,01		96,08
Gmb(ölçülen)			2,348			2,345					
Düz. faktörü, (C)			1,032			1,028					
Gmm(ölçülen)			2,442								

Superpave hacimsel tasarım kriterleri olan VMA, VFA ve filler oranı, tasarım yoğurma sayısı olan Ndes'de, karışımın % 4'lük hava boşluğu içeriğine sahip olması esasına dayanmaktadır. Superpave karışım tasarım yöntemi ayrıca Nmaks, Ndes ve Nini yoğurma sayılarında da karışım yoğunluğu için kriterler içermektedir.

Bu amaçla, deneme karışımlarının özelliklerinin tayin edilebilmesi ve şartname limitleri ile karşılaştırılabilmesi için, hesaplamalar için gerekli olan ortalama %Gmm@Ndes ve %Gmm@Nini

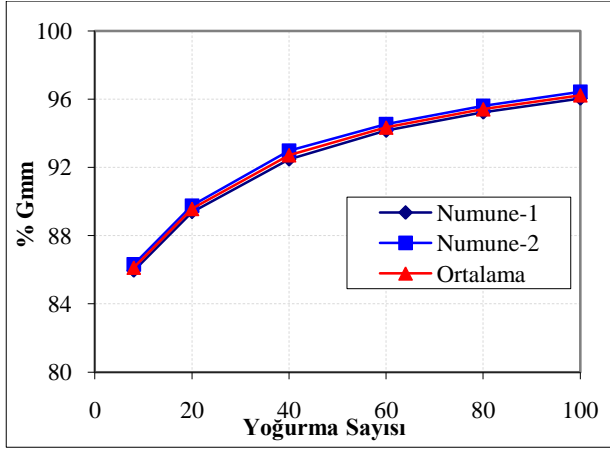
değerleri Tablo 18, Tablo 19 ve Tablo 20'den alınarak aşağıda Tablo 21'de verilmiştir.

Tablo 21. Karışımların Nini ve Ndes'deki %Gmm değerleri

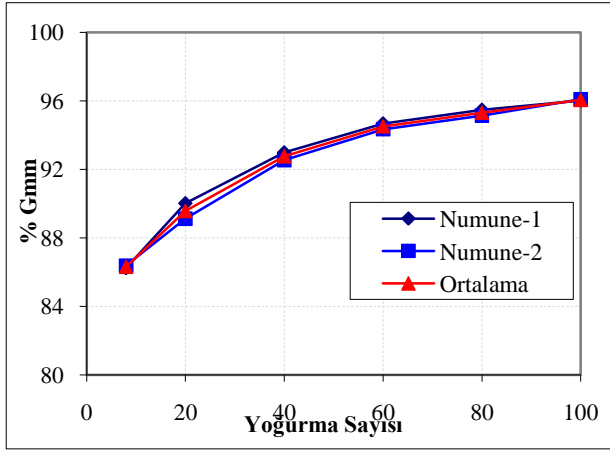
Deneme karışımı	%Gmm@Nini	%Gmm@Ndes
Karışım-1	86,14	96,24
Karışım-2	86,31	96,05
Karışım-3	86,17	96,08

Bu yoğunluklar esas alınarak, her karışımın tasarım yoğurma sayısındaki (Ndes) hava boşluğu yüzdesi (Va) ve mineral agregadaki boşluk yüzdesi (VMA),

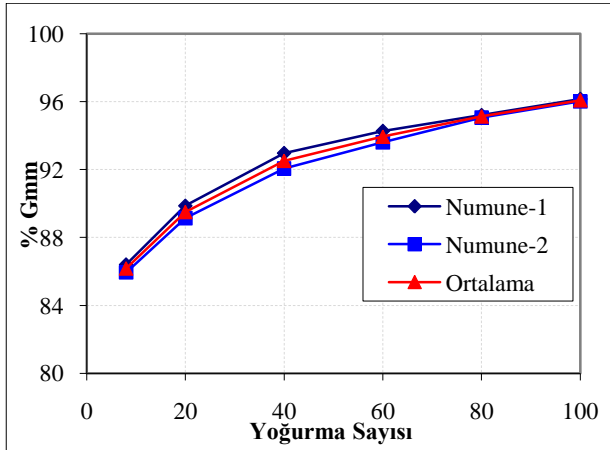
(21) ve (22) bağıntıları ile belirlenerek sonuçları Tablo 22’de verilmiştir.



Şekil 8. Karışım-1 numunelerinin yoğunluk eğrileri



Şekil 9. Karışım-2 numunelerinin yoğunluk eğrileri



Şekil 10. Karışım-3 numunelerinin yoğunluk eğrileri

Tablo 22. Deneme karışımlarının sıkıştırma hesap özeti

Deneme karışımı	%AC	%Gmm@Nini	%Gmm@Ndes	%Va	%VMA
Karışım-1	4,7	86,14	96,24	3,76	13,60
Karışım-2	4,8	86,31	96,05	3,95	14,52
Karışım-3	4,9	86,17	96,08	3,92	13,84

Tablo 22’de verilen sonuçlar için yapılan hesaplamalarda, Karışım-1 agrega gradasyonu için Va ve VMA değerleri sırasıyla %3,76 ve %13,60 olarak belirtilmiştir.

Karışımların hava boşluğu yüzdesi % 4’e eşit bulunduğu, bu veriler hacimsel şartname kriterleri ile karşılaştırılır ve uygun karışımlardan biri tasarım agrega gradasyonu seçilir. Ancak çalışmada, deneme karışımları için tasarım yoğurma sayısında (Ndes) bulunan Va değerleri % 4’den farklı çıktığından, hava boşluğu %4 olan tahmini bir asfalt içeriği hesaplanmıştır. Bu içerikteki tahmini tasarım özellikleri Karışım-1 agrega gradasyonu örnek gösterilerek aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

➤ Dizayn yoğurma sayısında (Ndes) hava boşluğu % 4 olan tahmini asfalt içeriği (Pb(tahmini)) bağıntı (23) yardımı ile %4,6 olarak bulunmuştur.

Dizayn yoğurma sayısındaki (Ndes), hacimsel özellikler olan VMA ve VFA ve başlangıç yoğurma sayısındaki (Nini) karışım yoğunlukları, bu tahmini asfalt içerikleri için (24), (25) ve (26) bağıntıları kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplamalar neticesinde VMA, VFA ve Gmm değerleri sırasıyla %13,62, %70,6 ve %85,9 olarak bulunmuştur. Hesaplamalarda, boşluk yüzdeleri %4’den küçük olduğundan C = 0,1 olarak alınmıştır.

➤ Son olarak, karışımdaki efektif asfalt bağlayıcı içeriği (Pbe(tahmini)) bağıntı (28) ile hesaplanarak %4,46 olarak bulunmuştur. Bu değer yardımı ile bağıntı (29) kullanılarak karışımda kullanılan filler veya toz oranı (DP) 1,35 olarak tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, başlangıçta değerlendirilmeye alınan üç farklı agrega karışımı için, başlangıç asfalt içeriklerinde hazırlanan numunelerin yukarıda ifade edilen tahmini değerleri hesaplandıktan sonra, bu değerler Tablo 23’de gösterilerek şartname kriterleri ile ayrı ayrı karşılaştırılmıştır.

Sıkıştırılan deneme karışımlarının özellikleri şartname kriterleri ile kıyaslandığında, Karışım-1 ve Karışım-3 denemelerinin agregalar arası boşluk (VMA) koşulunu sağlamadığı görülmektedir. Buna karşılık bütün koşulları sağlaması sebebiyle çalışmada, Karışım-2 deneme agrega karışımı, tasarım agrega gradasyonu olarak seçilmiştir.

Tablo 23. Deneme karışımlarının sıkıştırma sonuçları ve şartname kriterleri

Deneme karışımı	Pbi (%)	Pb (%)	Va (%)	VMA (%)	VFA (%)	DP	%Gmm@Nini	%Gmm@Ndes
Karışım-1	4,7	4,6	4,0	13,62	70,6	1,35	85,9	96
Karışım-2	4,8	4,8	4,0	14,52	72,4	1,10	86,3	96
Karışım-3	4,9	4,9	4,0	13,85	71,1	0,98	86,1	96
Şartname kriterleri			4,0	14,0	65-75	0,6-1,2	≤89,0	96

4. Tartışma ve Sonuç

Ülkemizde, Superpave tasarım yöntemine göre tasarım agregası gradasyonu seçimi konusunda görülen eksikliklerin giderilmesini sağlamak amacıyla hazırlanmış olan bu çalışma ile bu konuda gerekli olan temel bilgi ve izlenmesi gereken yol, araştırmacılara uygulamalı olarak en doğru şekilde izah edilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada önemli olan sadece elde edilen bulgular değil, agregası tasarım aşamalarının nasıl yapıldığı ve bu bulguların nasıl elde edilip değerlendirilmesi gerektiği de araştırmacıların dikkatine sunulmuştur.

Karayollarında özellikle yetmişli yıllara kadar Marshall tasarım yöntemi ile tasarlanan BSK kaplamaların ömrü uzun ve performansı tatminkâr olmuştur. Ancak, son yıllarda artan taşıt miktarı ve dingil ağırlıkları ile çevresel faktörler sebebiyle kaplamalarda bozulmaların meydana gelmesi, bu tasarım yönteminin günümüzde yetersiz kalacağını göstermiştir. Bu yöntemle hazırlanan BSK numunelerinin her iki yüzeyine sıkıştırma tokmağı ile belirli sayıda darbeleri yapılan sıkıştırmanın, arazide çelik silindirlerle yapılan sıkıştırılmaları tam olarak temsil etmediği görülmüştür. Darbe ile sıkıştırmadan dolayı agregası danelerinin kırılması, boşluk oranı ve optimum bağlayıcı oranının doğru olarak saptanamamasına yol açmaktadır ve dolayısıyla bu şekilde dizayn edilen kaplamalarda zamanla çeşitli bozulmalar meydana gelmektedir.

Bu yüzden, günümüz trafiği ve her türlü hava şartlarında yolun performansını koruyarak hizmet vermesini sağlayan Superpave yöntemi geliştirilmiştir. Yöntemin en önemli özelliği kaplamanın hizmet vereceği bölgedeki sıcaklıkların ve trafik değerlerinin göz önüne alınarak bağlayıcı ve agregası seçiminin yapılabilmesi olmasıdır. Bu yöntemde bölge şartlarına göre hazırlanan bağlayıcı ve agregası karışımı belirli basınç, yoğurma açısı ve devir sayısı gibi şartlar altında yoğurma yaparak numuneyi arazi şartlarına en yakın şekilde sıkıştıran ve sıkıştırma sırasında karışımın sıkışabilirliği ile ilgili bilgi veren yoğurmalı sıkıştırıcılar ile yapıldığından ve karışımlarda daha iri agregası kullanılabilirdiğinden diğer yöntemlerden daha avantajlı olduğu düşünülmektedir.

Superpave çalışmalarında, agregası özelliklerinin BSK'ların performansı üzerinde, özellikle de kaplamanın kalıcı deformasyona karşı direncini

önemli ölçüde etkilediği tespit edildiğinden agregası gradasyonu seçimine özel önem verilmiştir. Superpave yönteminde agregası gradasyonunu belirlemek amacıyla elek açıklıklarının 0.45'lik üstel kuvvet ile yükseltilmiş boyutları kullanılarak maksimum yoğunluktaki agregası gradasyonu elde edilmektedir. Karışımın çok fazla ince malzeme ihtiva etmesini engellemek, yapım sırasında sıkıştırma zorluğunu ortadan kaldırmak ve sonrasında kalıcı deformasyonlara sebep olmasını önlemek amacıyla gradasyon eğrisinin geçmek zorunda olduğu kontrol noktaları sınırları belirlenmiştir. Ayrıca karışımın çok az boşluğa sahip olmasını sağlayan maksimum yoğunluk hattına yakın geçmesini önlemek ve bu sebeple karışımın durabilitesinin azalmasını önleyecek yasaklanmış bölge kavramı oluşturulmuştur. Bu yaklaşımlar ile en uygun agregası gradasyonu seçimi yapılabilmekte ve karışımların özellikleri belirlenirken, trafik değerlerine göre de sonuçlar değerlendirilmektedir.

Superpave yönteminin agregası ve asfalt seçimi ve karışımın sıkıştırılması konusunda Marshall yöntemine göre saha performansını daha iyi ve gerçekçi olarak yansıttığı bilinmektedir. Bu sebeple, bu çalışmanın araştırmacılara, farklı agregası yığınlarından Superpave yöntemine göre istenen nitelikleri sağlayan tasarım agregası gradasyonunu elde etmede yardımcı olacağı umulmaktadır. Ayrıca, Superpave tasarım yöntemi kullanılarak yapılacak çalışmalarda Türkiye'nin trafik, iklim, çevre ve bölgesel koşullarının göz önüne alınarak malzeme seçiminin değerlendirilmesi ve çalışmaların bu yönde geliştirilmesinin uygun olacağı düşünülmektedir.

Kaynakça

- [1] Kandhall, P.S., Mallick, R.B. 1997. Aggregate Tests for Hot Mix Asphalt: State of Practice. NCAT Report No.97-6, pp.10-15.
- [2] Roberts, F.L., Mohammad, L.N., Wang, L.B. 2002. History of Hot Mix Asphalt Mixture Design in the United States. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 14, No.4, pp.279-293.
- [3] Tunç, A. 2001. Yol Malzemeleri ve Uygulamaları. Atlas Yayınevi, İstanbul, 840s.
- [4] Lavin, P.G. 2003. Asphalt Pavements. Spon Pres, London and New York, 444p.
- [5] The Asphalt Institute. 1996. Superpave Mix Design, Superpave Series No.2 (SP-2), U.S.A., 100p.

- [6] Karayolları Genel Müdürlüğü. 1994. Yollar Fenni Şartnamesi, Ankara, 258-280s.
- [7] İstanbul Büyükşehir Belediyesi. 2001. Asfalt ve Uygulamaları. İSFALT Bilimsel Yayın No:1, İstanbul, 280s.
- [8] Umar, F., Açar, E. 1991. Yol Üstyapısı. İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul, 339s.
- [9] ASTM D 242. 1992. Standard Specification for Mineral Filler for Bituminous Paving Mixtures. Annual Book of ASTM Standards, USA.
- [10] Terzi, S. 2000. Mermer Toz Atıkların Asfalt Betonunda Filler Malzemesi Olarak Kullanılmasının Araştırılması. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 70s, Isparta.
- [11] İstanbul Büyükşehir Belediyesi. 2004. Shell Bitüm El Kitabı. İSFALT Bilimsel Yayın No: 3, İstanbul, 334s.
- [12] İstanbul Büyükşehir Belediyesi. 2002. Asfalt El Kitabı. İSFALT Bilimsel Yayın No:2, İstanbul, 573s.
- [13] Orhan, F. 2000. Asfaltın Geleceği Superpave. 3.Ulusal Asfalt Sempozyumu, K.G.M., Ankara, 146-160.
- [14] Altaş, Ö.Y. 2002. Bitümlü Malzemeler ve Karışım Şartnamelerinin Karşılaştırılması. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 150s, İstanbul.
- [15] Kennedy, T.W., Huber, G.A., Harrigan, E.T., Cominsky, R.J., Hughes, C.S., Quintus, H.V., Moulthrop, J.S. 1994. *Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave): The Product of the SHRP Asphalt Research Program*, SHRP-A-410, National Research Council, Washington, DC, 170p.
- [16] Zaniewski, J.P., Padula, M. 2003. Automation of the Superpave Mix Design Process for the West Virginia Division of Highways. Asphalt Technology Program, West Virginia, 154p.
- [17] Cominsky, R.J., Huber, G.A., Kennedy, T.W., Anderson, M. 1994. The Superpave Mix Design Manuel for New Construction and Overlays, SHRP-A-407, National Research Council, Washington, DC, 184p.
- [18] McGennis, R.B., Anderson, R.M., Kennedy, T.W., Solaimanian, M. 1995. Background of Superpave Asphalt Mixture Design and Analysis, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-SA-95-003, 172p.
- [19] Superpave Mixture Design Guide. 2001. WesTrack Forensic Team Consensus Report, FHWA-RD-01-052, Washington, DC, 23p.
- [20] D'Angelo, J. 2000. Superpave Mix Design Test Methods and Requirements. APWA International Public Works Congress, pp. 103-115.
- [21] Harman, T., D'Angelo, J., Bukowski, J. 2002. Superpave Asphalt Mixture Design Workshop, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, Washington, 78p.
- [22] Keçeciler, A.F., Akkol, G., Gümrükçüoğlu, A., Gökçe, A.F. 1988. Bitümlü Malzemeler Laboratuvar El Kitabı, T.C.K. Araştırma Dairesi Başkanlığı, 156s.
- [23] Dinç, E. 1999. Performans Sınıfı Asfaltlar, Bağlayıcı Özellikleri ve Deneylemleri. T.C.K. 16. Bölge Müdürlüğü, Sivas, 45s.
- [24] Anderson, R.M., Bahia, H.U. 1997. Evaluation and Selection of Aggregate Gradations for Asphalt Mixtures Using Superpave. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1583, pp. 91-97.
- [25] Druta, C. 2006. A Micromechanical Approach for Predicting the Complex Shear Modulus and Accumulated Shear Strain of Asphalt Mixtures from Binder and Mastics. Louisiana State University, Doctor of Philosophy, 250p.
- [26] Alshamsi, K.S. 2006. Development of a Mix Design Methodology for Asphalt Mixtures with Analytically Formulated Aggregate Structures. Louisiana State University, Doctor of Philosophy, United Kingdom, 226p.
- [27] Canadian Strategic Highway Research Program (C-SHRP). 1999. Superpave 2000 - Improved Standards for a New Millennium, Technical Brief #17, Ontario, 8p.
- [28] Zaniewski, J.P., Pumphrey, M.E. 2004. Evaluation of Performance Graded Asphalt Binder Equipment and Testing Protocol, West Virginia University, Morgantown, 109p.
- [29] Yildirim, Y., Solaimanian, M., Kennedy, T.W. 2000. Mixing and Compaction Temperatures for Hot Mix Asphalt Concrete. Report No. 1250-5, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, Austin, 99p.
- [30] Anderson, R.M., McGennis, R.B. 1994. Superpave Asphalt Mixture Design Illustrated Level 1 Lab Methods. National Asphalt Training Center Demonstration Project 101, Publication No. FHWA-SA-95-004, Asphalt Institute, Lexington, KY, 80p.
- [31] Zaniewski, J.P., Kanneganti, V. 2003. Comparison of 19 mm Superpave and Marshall Base II Mixes in West Virginia. West Virginia University, Morgantown, 78p.
- [32] AASHTO T166. 1999. Bulk Specific Gravity of Compacted Bituminous Mixtures Using Saturated Surface-Dry Specimens. FHWA Multi-Regional Asphalt Training and Certification Group, 9p.
- [33] AASHTO T209. 1999. Bulk Specific Gravity of Bituminous Paving Mixtures. FHWA Multi-Regional Asphalt Training and Certification Group, 5p.