

Araştırma Makalesi/Research Article

Serpantinın asfalt betonunda filler olarak kullanımı

Bektaş Sümen¹, Nihat Morova²

¹ Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 32200, Isparta, Türkiye

² Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 32200, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Bitümlü sıcak karışım (BSK)
Serpantin
Aşınma tabakası
Mineral filler
Marshall stabilite-akma deneyi

Makale geçmişi:

Geliş Tarihi: 27.07.2022

Kabul Tarihi: 28.11.2022

Öz: Ülkemizde bulunan doğal kaynakların verimli, etkin ve daha uzun süre kullanılabilmesi için alternatif malzemelerin araştırılıp bulunması her geçen gün daha önemli bir hal almaktadır. Her alanda olduğu gibi atık malzemelerin bitümlü sıcak karışımlarda (BSK) kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Bu çalışmada atık serpantin toz atıklarının BSK'da filler olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Çalışmada, serpantin'in asfalt beton kaplamalarda filler olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla kireçtaşı agrega ve kırmataş tozu filler kullanılarak %3.5-4.0-4.5-5.0-5.5-6.0 bitüm oranlarında Marshall briketleri hazırlanmıştır. Hazırlanan bu numunelere Marshall stabilite ve akma deney prosedürü uygulanarak stabilite, akma, pratik özgül ağırlık (Dp), boşluk yüzdesi (Vh) asfaltla dolu boşluk yüzdesi (Vfa), agregalar arası boşluk yüzdesi (VMA) değerleri bulunmuştur. Kireçtaşı numune sonuçlarından ilgili grafikler çizilerek optimum bitüm miktarı belirlenmiştir. Belirlenen optimum bitüm miktarı esas alınarak ve aynı gradasyon kullanılarak kireçtaşı filler ile serpantin filler malzemesi %0-25-50-75-100 oranlarında yer değiştirilerek serpantin ikameli asfalt beton numuneler üretilmiştir. Serpantin filler ikameli briketlerin stabilite, akma, Dp, Vh, Vfa, VMA değerleri tespit edilerek deney sonuçları değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda en yüksek stabilite değeri %50 serpantin ikameli numunelerden elde edilmiştir.

Atıf için/To Cite:

Sümen B. Morova N. Serpantinın asfalt betonunda filler olarak kullanımı. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 14(2), 75-86, 2022.

Using serpentine as filler in asphalt concrete

Keywords

Bituminous hot mixes
Serpentine
wearing course
Mineral filler
Marshall stability and flow tests

Article history:

Received: 27.07.2022

Accepted: 28.11.2022

Abstract: In order to use the natural resources in our country efficiently, effectively and for a longer time, it is becoming more important to research and find alternative materials. As in every field, the use of waste materials in bituminous hot mixes is increasing day by day. In this study, the usability of waste serpentine dust wastes as fillers in HMA was investigated. In the study, the usability of serpentine as filler in asphalt concrete pavements was investigated. For this purpose, Marshall briquettes were prepared with bitumen ratios of 3.5-4.0-4.5-5.0-5.5-6.0% by using limestone aggregate and crushed stone dust filler. By applying Marshall stability and flow test procedure to these prepared samples, stability, flow value, bulk specific gravity (Dp), void volume values (Vh), Void filled with asphalt (Vfa), voids in mineral aggregate (VMA) values were found. Optimum amount of bitumen was determined by drawing related graphs from the limestone sample results. Based on the optimum amount of bitumen determined and using the same gradation, limestone filler and serpentine filler material were replaced at the rate of 0-25-50-75-100%, and serpentine-substituted asphalt concrete samples were produced. The stability, yield, Dp, Vh, Vfa, VMA values of the serpentine filler substituted briquettes were determined and the test results were evaluated. As a result of the study, the highest stability value was obtained from the samples with %50 serpentine content.

1. Giriş

Bitümlü sıcak karışım (BSK) agrega ve asfalt çimentosunun kombinasyonundan oluşmaktadır. Asfalt betonunda agrega yapısal iskelet görevi görürken bitüm bağlayıcılık görevini üstlenir. Esnek kaplamalarda kullanılan kaba, ince agrega ve mineral filler hacmin yaklaşık %90'ını oluşturmaktadır. Asfalt kaplamaların performansı üretiminde kullanılan agreganın özelliklerine bağlıdır [1].

Asfalt betonu, sahip olduğu özellikler nedeniyle üst yapılarda en çok kullanılan malzemelerdir. Stabilitate, dayanıklılık, sürüş konforu ve suya dayanıklılık sağlamada üstün hizmet performansına sahiptir [2].

Karayollarının inşaa maliyeti oldukça pahalı yapılardır. Esnek kaplamalı yollar 20 yıllığına projelendirilir ve bu süre zarfında konforlu, güvenli bir şekilde bozulmadan hizmet vermesi beklenmektedir. Bu sebeplerden dolayı kaplama yapımında kullanılacak malzemelerin standartlara uygun olmasının yanında yapısal olarak iyi tasarlanmaları gerekmektedir. Günümüzde kaplama performansını ve ömrünü arttırmak amacıyla farklı katkı malzemeleri kullanılmaktadır [3].

Esnek kaplamaların maruz kaldığı trafik hacmi ve dingil yükleri gün geçtikçe artmaktadır. Bunun yanında kaplama dizaynında yapılan hatalar, uygulama eksiklikleri, bakım ve onarımın zamanında ve gerektiği şekilde yapılmaması, iklim koşulları gibi nedenlerle kaplamalarda tekerlek izinde oluklanma, kırılma, yorulma ve neme karşı hassasiyet gibi bozulmalar meydana gelmekte buda üstyapının seyir konforunu azaltmanın yanında kaplamanın ömrünü azaltmaktadır. Bu durum, mevcut asfalt karışımların özelliklerini artırmanın gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Asfalt beton kaplamaların imalatında agrega, filler ve asfalt çimentosu kullanılmaktadır. Asfalt karışımlardaki boşlukları doldurmak, stabiliteyi arttırmak amacıyla belirli miktarda filler kullanılması arzu edilmektedir [4].

Esnek kaplamalarda meydana gelen tekerlek izi ve bozulmalara karşı asfalt karışımların durabilite ve stabilitesini arttırmak amacıyla filler konusunda çalışmalar yapılmıştır. Esnek üstyapılarda fillerin üstlendiği önemli rolün farkına ilk olarak varan Clifford Richardson, filler ve toz terimlerini kullanarak fillerin önemini vurgulamıştır.

Belirli mineral filler malzemelerinin kullanımı, asfalt betonundaki tekerlek izi derinliği, rijitlik ve gerilme artışı üzerinde olumlu bir değer artışı sağlar. Ayrıca kalıcı deformasyon, yorulma çatlağı ve nem hasarına karşı olumlu bir etkiye sahiptir [4].

Mineral fillerin iki ana görevi vardır. İlki karışımda oluşan boşlukları doldurmaktır. Bu sayede daha yoğun ve daha sert tabakalar oluşturulur. İkincisi ise daneler arası temas noktası sağlamaktır. Genellikle BSK'da kırmataş tozu, mineral filler olarak kullanılmaktadır [5].

Serpantin yüksek oranda Mg, Fe ve olivin (Mg_2SiO_4), piroksen ($XYSi_2O_6$) gibi mafik mineraller içeren kayaç ve silikat mineralleri ultramafik kayaç adını almaktadır (gabro, bazalt, peridotit gibi). %45'ten azı silika olan kayaçlara ise ultramafik kayaçlar adı verilmektedir. Serpantin, peridotit ve piroksenitin hidratasyonu nedeniyle değişikliğe uğrayarak oluşmuş bir kayaç tipidir ve ultramafik kayaların aşınması ile oluşmaktadır. Bu magmatik veya metamorfik kayaların en az %70'i ferromagnezyen veya mafik (Magnezyum + ferrik = mafik) minerallerden oluşmaktadır [6].

Dünyanın birçok yerindeki serpantin kaynağı dünyanın mantosuna dayanmaktadır. Pürüzsüz ve zeytin-yeşili renkte, alacalı, pullu olması 7 nedeniyle latince yılan anlamına gelen "serpentinus" tan adını almıştır. Serpantin kayalar faylar ve makaslama zonlarında genellikle büyük masifler ve kemerler halinde yayılmaktadır [6].

Dünya yüzeyinin %1'nden daha az bölümünü kaplayan ultramorfik (serpantin) kayalar, dünya genelinde yamalar halinde yayılış gösterir. Serpantin oluşumunun edafik faktörleri fiziksel, kimyasal ve biyotik bileşenleri içerecek şekilde çok yönlüdür [6].

Ultramafik kayaçlar ülkemizin geneline yayılı halde bulunur. Genellikle doğu ile güneydoğu bölgelerindeki iller Antalya, Kütahya, Balıkesir, Adana, Hatay, Doğu Toroslar çevrelerinde rastlanmaktadır. Ankara ve Çanakkale civarlarında ise lokal olarak rastlanmaktadır [7].

BSK kaplamalarda filler kullanımının üstyapılardaki performans ve dayanıklılığı artırılmasına yönelik birçok çalışma yapılmıştır.

Mermer toz atıklarının esnek kaplamalarda filler olarak kullanımının incelendiği çalışmada gradasyon sabit tutularak kırma taş tozu ve atık mermer tozu filler malzemesi olarak kullanılmıştır. Mermer ve kireçtaşı fillerli Marshall briketleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelere Marshall stabilitesi prosedürü uygulanmıştır. Çalışma sonucunda mermer tozunun esnek üstyapılarda filler olarak kullanılabileceği belirlenmiştir [8].

Yanmış fındık kabuğu külü ve Eti Krom tesislerinde kromit cevheri zenginleştirmesi sırasında ortaya çıkan atık geri kazan külü malzemelerinin esnek üst yapı kaplamalarında filler materyali olarak

kullanılabilirliğinin araştırıldığı çalışmada öncelikle kalker filler ile sabit filler oranı kullanılmış (%4.7) ve ideal asfalt çimentosu yüzdesi Marshall stabilite deneyleri ile belirlenmiştir (%4.6). İkinci ve üçüncü aşamalarda ise kalker filler malzemesini farklı oranlarda fındık kabuğu külü ve atık geri kazan külü ile karıştırarak (%25-75, %50-50, %25-75, %100) oluşturulan deney numunelerine stabilite, pratik özgül ağırlık, asfalt dolu boşluk oranı, boşluk yüzdesi değişimi, akma değişimi ve agregalar arası boşluk değişimi deneyleri uygulanarak deney sonuçları yorumlanmıştır. Çalışmada atık geri kazan külünün fındık kabuğu külüne göre daha iyi bir alternatif olduğu belirtilmiştir [9].

Grafit'in asfalt üstyapılarda filler olarak kullanılmasının araştırıldığı çalışmada, grafit'in BSK'daki etkisi %5.5, 6, 6.5 ve 7 bitüm oranıyla hazırlanan numuneler Marshall stabilite deneyine tabii tutulmuş olup optimum bitüm %6.1 olduğu tespit edilmiştir. Optimum bitümlü grafit yüzdesi %6, 10 ve 15 olacak şekilde ayarlanan numuneler Marshall deneyine tabii tutularak çıkan sonuçlar incelendiğinde; Grafit ilaveli taş mastik asfalt karışımı grafit ilavesiz taş mastik asfalt karışımlarına göre grafit miktarı arttıkça hacim özgül ağırlık, asfalt dolu boşluk, stabilite ve akma değerlerinde azalma boşluk miktarı ve VMA'da artma olduğundan, BSK'da grafit malzemesini performansı olumsuz etkilediği tespit edilmiştir [10].

Carboniferous-Triassic (mor filler) kayaç tozlarının esnek üstyapılarda filler olarak kullanılabilirliğinin araştırıldığı çalışmada bağlayıcı oranı %3.5, 4.0, 4.5 ve 5.0 ve %4, 6 ve 8 filler oranında hazırlanmış numuneler Marshall stabilite deneyine tabii tutularak optimum bitüm ile optimum filler oranları belirlenmiştir. Ardından her bir bağlayıcı ve filler oranı için 4'er tane numune hazırlanmış. Filler olarak kırılmış Kireç ve Carboniferous-Triassic kayaç tozları kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlardan sonra carboniferous-triassic kayaç tozlarının kireç taşı yerine kullanılabileceği tavsiyesinde bulunulmuştur [11].

Bu çalışmada ülkemizin sahip olduğu kaynakların etkili ve doğru kullanımı ile atık malzemelerin asfalt beton üretiminde kullanılabilirliği amaçlanmıştır. Bu amaçla atık serpantin asfalt betonunda mineral filler malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Ülkemizin çeşitli bölgelerinden çıkarılan bu kayacın mekanik ve fiziksel özellikleri dikkate alınarak karayollarında dayanımın artırılması ve doğal kaynakların tüketiminde daha tasarruflu olunabilmesi için filler malzemesi yerine kullanılabilirliği amaçlanmıştır.

Çalışmada ön deneyler yapılarak optimum filler miktarı olarak %4.8 olarak belirlenmiştir. Belirlenen optimum

filler oranında, kaba, ince ve filler malzemesi kireçtaşı olan numuneler hazırlanmıştır. Çalışmada %3.5- 4.0- 4.5- 5.0- 5.5-6.0 bitüm içeriklerinde hazırlanan Marshall numunelerine ait stabilite, akma, Dp, Vh, Vfa ve VMA grafikleri çizilerek bu grafiklerden optimum bitüm miktarı %4.85 olarak hesaplanmıştır. Belirlenen optimum bitüm içeriğinde (%4.85) kireçtaşı filler ile serpantin filler %0-25-50-75-100 oranlarında yer değiştirilerek her oranda 3 adet olmak üzere toplam 15 numune dökülerek serpantin ikameli briketlere ait stabilite, akma, Dp, Vh, Vfa ve VMA değerleri bulunmuştur. Deney sonuçları değerlendirilerek serpantin BSK'da filler malzemesi olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

2. Materyal

Bu çalışmada, Isparta yöresindeki karayollarının yapımında kullanılan ve Göltaş Taş Ocağı'nda üretimi gerçekleştirilen kırmataş kireçtaşı (Kalker) agregası mineral filler olarak da kireçtaşı tozu (taş tozu, kırmataş tozu) ve serpantin toz atıklar kullanılmıştır. Kırmataş tozu, Kireçtaşı kökenli malzemenin konkasörlerde kırılmasıyla oluşan ve No:200 (0.075 mm açıklıklı) elekten geçen agrega tozudur. Çalışma kapsamında taştuzu olarak Isparta yöresinde faaliyet gösteren özel bir inşaat firmasından temin edilen ve Göltaş Taş Ocağı'nda üretilen kireçtaşı 200 numaralı elekten geçirilerek filler malzemesi olarak kullanılmıştır.

Çalışmada kullanılan iri ve ince agregalara ait fiziksel ve mekanik özellikler KTS'de belirtilen standartlara uygun olarak belirlenmiştir. Agregalara ait özgül ağırlık ve su emme deney sonuçları Tablo 1'de verilmiştir.

Serpantin toz atığı ise Eti Krom'dan temin edilmiş ve 200 nolu elekten elenerek çalışmada kullanılmıştır. Bitümlü sıcak karışım üretiminde kırmataş tozu ile yer değiştirilerek (ikame) kullanılmıştır. Şekil 1'de çalışmada kullanılan serpantin görülmektedir.



Şekil 1. Filler olarak kullanılan serpantin

Çalışmada kullanılan optimum filler oranı (%4.8) ön deney çalışmaları ile belirlenmiştir. Ön deneylerde maksimum stabiliteyi veren filler oranı optimum filler

oranı olarak seçilmiştir. Serpantin kireçtaşı filler ile yer değiştirilerek (ikame) üretilen serpantin ikameli asfalt beton numunelerin hazırlanmasında filler oranı olarak %4.8 toplam filler oranı kullanılmıştır.

%0, %25, %50, %75, %100 serpantin ikameli (kalker filler ile yer değiştirilen) asfalt beton numuneler hazırlanmış ve Marshall testine tabi tutulmuştur. Çalışmada kullanılan serpantin özgül ağırlık değeri Tablo 1.'de verilmiştir.

Tablo 1. İri ve ince agregaya ait özgül ağırlık ve su emme deney sonuçları

Deney	Sonuç	Standart
İri agregaya zahiri özgül ağırlık (gr/cm ³)	2.714	ASTM C 127 [12].
İri agregaya hacim özgül ağırlık (gr/cm ³)	2.686	ASTM C 127
İri agregaya su absorpsiyonu	%0.4	ASTM C 127
İnce agregaya zahiri özgül ağırlık (gr/cm ³)	2.716	ASTM C 128 [13].
İnce agregaya hacim özgül ağırlık (gr/cm ³)	2.674	ASTM C 128
İnce agregaya su absorpsiyonu	%0.6	ASTM C 128
Filler Cinsi	Özgül Ağırlık Değeri (gr/cm ³)	Standart
Kırmataş filler (Taş tozu)	2.729	ASTM C 854 [14].
Serpantin fillerleri	2.730	ASTM C 854

Çalışmada kullanılan iri ve ince agregalara ait fiziksel ve mekanik özellikler KTŞ'de belirtilen standartlara uygun olarak belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan agregaya fiziksel ve mekanik özelliklerini gösteren deney sonuçları sırasıyla Tablo 2'de verilmiştir.

Bağlayıcı asfalt çimentosu olarak Aliğa rafinerisinde üretilmiş olan bitüm kullanılmıştır. BSK numunelerin üretiminde kullanılan bitüm Isparta Belediyesi Asfalt Şantiyesinden alınmıştır. Çalışmada kullanılan bitüm B 50-70 penetrasyon sınıfındadır.

Çalışmada, bağlayıcı asfalt çimentosu olarak kullanılan bitüm, Aliğa rafinerisinde üretilmiştir. BSK numunelerin üretiminde kullanılan bitüm Isparta Belediyesi asfalt şantiyesinden alınmıştır. Asfalt çimentosu B 50-70 penetrasyon sınıfındadır. Özgül ağırlığı 1.037 gr/cm³ olan bitüm kullanılmıştır. Tablo 3'te asfalt çimentosunun özellikleri verilmiştir. Bitüm

üzerinde yapılan deney çalışmaları sonucundan kullanılan bitümün KTŞ standartlarına uygun olduğu belirlenmiştir.

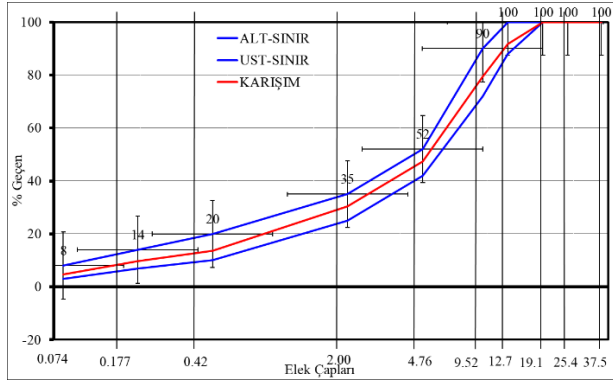
Tablo 2. Agregaların fiziksel ve mekanik özellikleri

Agrega Deneyleri	Sonuç	Standart	
Karışımın Efektif Özgül Ağırlığı (Deneyle)	2.699	ASTM D-2041 [15].	
Karışımın Efektif Özgül Ağırlığı (Hesapla)	2.699	-	
Agrega Deneyleri	Sonuç	KTŞ Değerleri (Aşınma tabakası için)	Standart
Los Angeles Aşınma Kaybı, (%)	22	≤27	TS EN 1097-2 [16].
Aşınma Direnci (Mikro-Deval)	9.1		TS EN 1097-1 [17].
Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık, (%)	2.4	16	TS EN 1097-1
Yassılık İndeksi, (%)	19.3	≤20	BS 812 [18].
Soyulma Mukavemeti, (%)	65	≥60	TS EN12697-11 [19].
Metilen mavisi, (g/kg)	0,55	≤1,5	TS EN 933-10 [20].

Tablo 3. 50/70 Penetrasyon sınıfındaki bitümün özellikleri

Deney Adı	Deney Sonucu	Şartname Değerleri (KTŞ 2013)	Standart
Penetrasyon Deneyi, (25°C)0,1mm	58	50-70	TS EN 1426 [21].
Yumuşama Noktası, (°C)	51	46-54	TS EN 1427 [22].
Parlama Noktası, (°C)	247	≥230	TS EN ISO 2592 [23].

Deneylerde kullanılan agrega gradasyonunu Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Deneylerde kullanılan agrega gradasyonu grafiği

3. Metot

3.1. Marshall stabilite ve Akma Deneyi

Marshall tasarımı Bruce Marshall tarafından 1939 yılında geliştirilip formülize edilmiştir. 1943'te Amerikan Ordusu Mühendisler Birliği gradasyon ve trafik koşulları fonksiyonlarına dayanarak optimum bitüm miktarı tayininde kullanılmak üzere Marshall metodunu kabul etmiştir. Marshall metodu istenilen yoğunluk, stabilite ve akma değerlerine sağlama kriteri ile optimum bitüm oranı tayininde kullanılmaktadır. Marshall tasarım metodunun Türk standartlarındaki karşılığı TS3720'de verilmiştir [24].

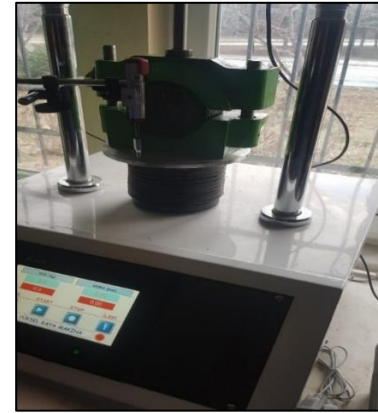
Bitümlü karışım tasarım yöntemlerinden en yaygın kullanılan yöntemdir. Marshall stabilitesi bir esnek kaplamanın yapısal durumu hakkında bilgi vermektedir. Üstyapının yapısal durumu denildiği zaman genellikle akla kaplamanın stabilitesi gelir. Stabilite, BSK'nın yapısal durumunu ifade eder. Bu yapısal durum karışım içeriğindeki asfalt çimentosunun özellikleri ve miktarı, kaplamanın imalatında kullanılan agreganın fiziksel ve mekanik özellikleri ile agrega gradasyonuna bağlıdır.

Marshall stabilite ve akma deneyinde, çelik kalıplar ve sıkıştırıcı kompaktörler (Şekil 3) yardımıyla 101 mm çapında ve 63.5 mm yüksekliğe sahip silindirik numuneler üretilir. Marshall deney cihazı (Şekil 4) ile 50 mm/dk'lık sabit bir hızda ve uygun sıcaklıkta (60 °C sıcaklık altında) numunelere yükleme yapılarak stabilite (deformasyona karşı dirençleri) ve akma değerleri belirlenmektedir [25].

Marshall stabilite ve akma deneyinde numunenin kırılmadan taşıyabileceği maksimum yük Marshall stabilitesi ve kırılma anına kadar oluşan deformasyon miktarı ise Marshall akması olarak isimlendirilir.



Şekil 3. Marshall sıkıştırma cihazı



Şekil 4. Marshall stabilite ve akma cihazı

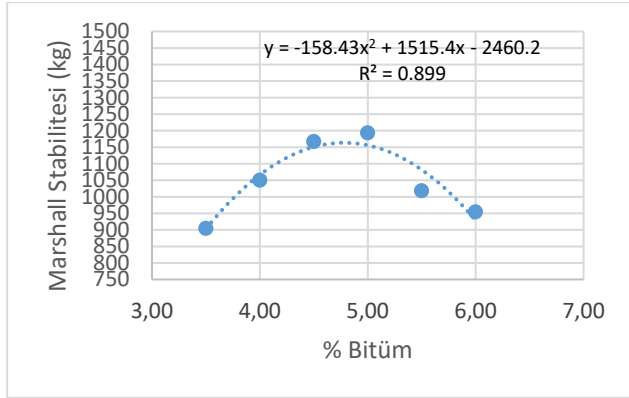
4. Bulgular ve Tartışma

4.1. Kireç taşının filler olarak kullanıldığı numunelere ait Marshall stabilite ile akma deneyi sonuçları ve grafikleri

Kireçtaşı tozunun filler olarak kullanıldığı numunelere ait bitüm oranı-stabilite, bitüm oranı-akma, bitüm oranı- Dp, bitüm oranı-Vfa yüzdesi, bitüm oranı- Vh, bitüm oranı- VMA yüzdesi grafikleri sırasıyla Şekil 5, 6, 7, 8, 9 ve 10'da verilmiştir.

Marshall stabilitesi bir esnek kaplamanın yapısal durumu hakkında bilgi vermektedir. Üstyapının yapısal durumu denildiği zaman genellikle akla kaplamanın stabilitesi gelir. Stabilite, BSK'nın yapısal durumunu ifade eder. Bu yapısal durum karışım içeriğindeki asfalt çimentosunun özellikleri ve miktarı, kaplamanın imalatında kullanılan agreganın fiziksel ve mekanik özellikleri ile agrega gradasyonuna bağlıdır.

Şekil 5'deki stabilite grafiği incelendiğinde stabilite değeri bitüm miktarına bağlı olarak yükselmekte, bitüm oranı arttıkça stabilite yükselmekte ancak belirli bir noktadan sonra bitüm içeriği artmasına rağmen stabilite düşmektedir. Başka bir ifadeyle bitüm oranı arttıkça stabilite yükselmekte ve maksimum değerini aldıktan sonra bitüm oranı artmasına rağmen stabilite değeri düşmektedir. Bunun nedeni sıkıştırılmış numunede agregalar arası boşluğun asfalt ile dolmasıdır. Agregalar arasındaki bitüm miktarı arttıkça stabilite düşmektedir. Stabilite ve bitüm oranı grafiği incelendiğinde %5.00 bitüm oranında hazırlanan numunenin en yüksek stabilite değeri olan 1193 kg değerine ulaştığı görülmektedir.



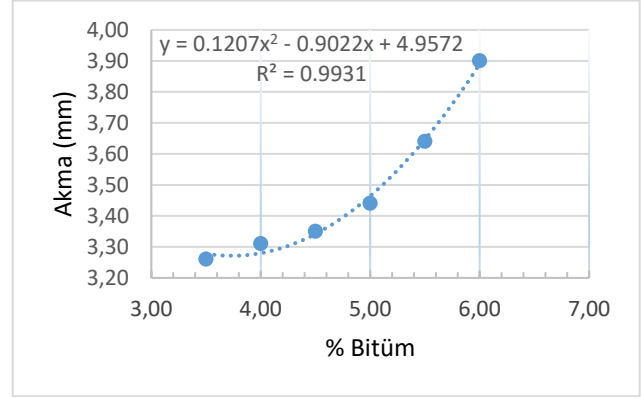
Şekil 5. Kırmataş tozu kullanılan biriketlerin Marshall stabilitesinin bitüm yüzdesi ile değişimi

Şekil 6 incelendiğinde bitüm oranı arttıkça akmanın da artış gösterdiği görülmektedir. KTŞ'ye göre asfalt beton kaplamalarda akma sınır değerleri 2-4 mm olarak verilmiştir. Grafik incelendiğinde tüm numunelerin akma değerlerinin şartnameye uygun olduğu görülmektedir.

Esnek kaplamalar ağır trafik yüklerine maruz kalmaktadır. BSK'da akma değeri BSK'nın plastiklik özellikleri hakkında bilgi vermektedir. KTŞ' de aşınma tabakası için akma değerlerinin 2-4mm olması istenmektedir. Burada aşınma tabakasında oluşmasına izin verilen maksimum akma değeri karışımda kullanılacak bitüm miktarını kontrol etmektedir. Şartnamede izin verilen sınır alt değer ise BSK'nın gevrekliğini ve mukavemetini kontrol etmektedir. Sıkıştırılmış Marshall numunelerinin deformasyona uğrayarak kırılmasına neden olan yüke tekabül eden akma değeri bitümlü karışımlarda iç sürtünmenin göstergesidir. Akma ve iç sürtünme değerleri arasında ters ve doğrusal bir korelasyon vardır. Marshall metodunda akma değeri numunenin deformasyonunu temsil etmektedir. Marshall cihazına yerleştirilen numunenin kırılma işlemi sonucunda okunan stabilite değerine denk gelen akma değeri içsel sürtünmenin bir

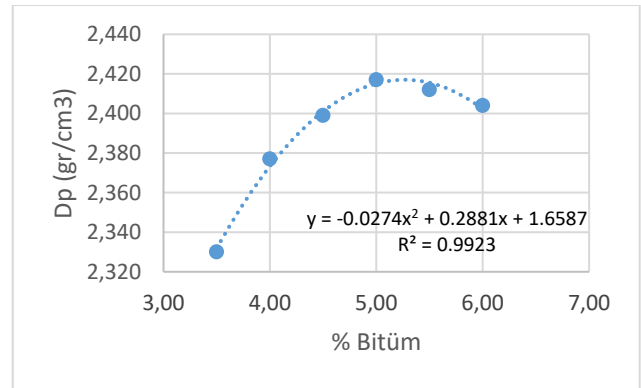
göstergesidir. İçsel sürtünme ve akma arasında ters bir ilişki söz konusudur [26].

Akma ve bitüm oranı grafiğinde bitüm miktarı ile akma arasında doğru orantı olduğu görülmektedir. Bitüm miktarının artmasıyla agregalar arasındaki asfalt film takası içsel sürtünmeyi etkilemekte ve akma değeri yükselirken stabilite düşmektedir.



Şekil 6. Kırmataş tozu kullanılan biriketlerin akma değerinin bitüm yüzdesi ile değişimi

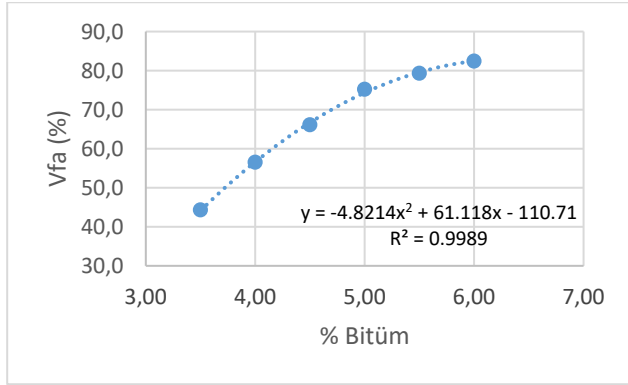
Şekil 7'de görüldüğü üzere Dp değeri belirli bir noktaya kadar bitüm oranının artmasıyla birlikte artış göstermiştir. Bitüm oranının %5.20 olduğu noktada Dp değeri maksimum değerine ulaşmış ve bu noktadan sonra düşmeye başlamıştır. Dp arttıkça daha az boşluklu bir numuneye ulaşma düzeyi artacağından, Vfa oranı artmakta, Vfa değerinin artmasıyla da agregalar arası boşluğun asfaltla daha fazla dolması da boşluk miktarının azalmasına neden olmaktadır.



Şekil 7. Kırmataş tozu kullanılan biriketlerin Dp değerinin bitüm yüzdesi ile değişimi

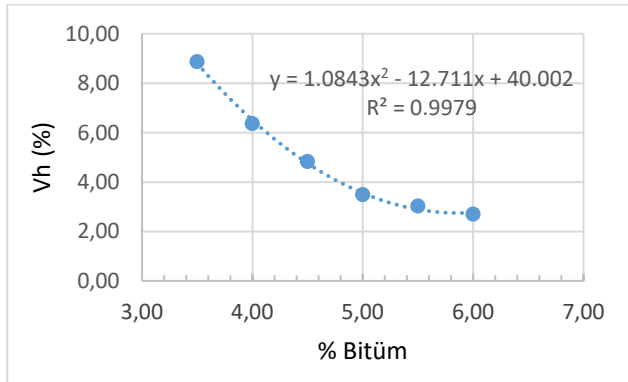
Çalışmada %3.5- 4.0- 4.5- 5.0- 5.5-6.0 bitüm içeriklerinde hazırlanan Marshall numunelerine ait Vfa grafiği incelendiğinde (Şekil 8) bitüm miktarı arttıkça VMA'nın bitümlü daha fazla dolduğu, vfa değerinin bitüm miktarı arttıkça arttığı gözlenmiştir. KTŞ'ye göre aşınma tabakası için sınır değerler 65-75 (%) olarak belirlenmiştir. Vfa yüzdesi, bitüm oranı %4.5

olduğunda alt sınır değerine (%65), bitüm oranı %5.0 olduğunda ise şartname üst sınırına (%75) ulaşmıştır.



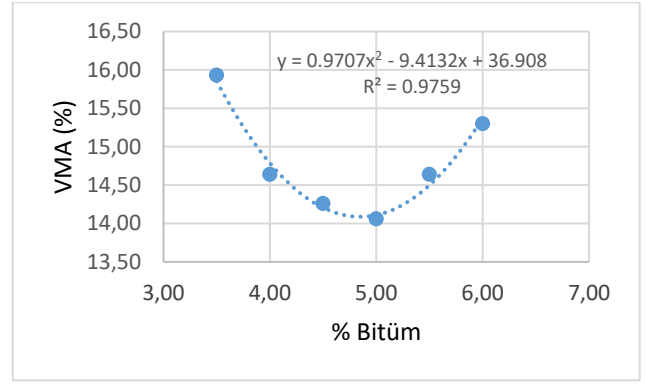
Şekil 8. Kırmataş tozu kullanılan biriketlerin Vfa değerinin bitüm yüzdesi ile değişimi

KTŞ'ye göre aşınma tabakası Marshall tasarım kriterlerinde izin verilen boşluk sınır değerleri %3-5'tir. Asfalt beton kaplamalarda optimum bitüm miktarının belirlenmesinde Vh olarak %4.0 değerine karşılık gelen bitüm oranıdır. BSK yollarda aşınma tabakası için istenen Vh değeri %4'tür. Bu orana tekabül eden bitüm oranı grafikte (Şekil 9) görüldüğü üzere %4.78'lik bitüm yüzdesidir.



Şekil 9. Kırmataş Vh değerinin bitüm yüzdesi ile değişimi

VMA yüzdesi sıkıştırılmış kaplama içindeki boşluk miktarının agregalara göre hacimce oranıdır. Vfa oranı ile VMA değeri arasında zıt bir ilişki bulunmaktadır. KTŞ'ye göre VMA değerinin %14'ten büyük olması istenmektedir. Özellikle sıcaklığın yüksek olduğu zamanlarda agregalar arasında yeterli boşluk olmaması durumunda asfalt beton kaplamalarda kuma meydana gelmektedir. VMA'yı sıkıştırılmış Marshall briketlerinin içindeki boşlukların ve bitümün toplu hacmi teşkil eder. Şekil 10'da VMA değerleri incelendiğinde maksimum değer %16, minimum VMA değerinin ise %14 üzerinde olduğu görülmektedir.



Şekil 10. Kırmataş tozu kullanılan briketlerin VMA değerinin bitüm yüzdesi ile değişimi

4.2. Marshall stabilite ve akma deneyi ile optimum bitüm oranlarının belirlenmesi

Kırmataş filleri %0-25-50-75-100 oranlarında serpantin ile yer değiştirilerek belirtilen her bir serpantin ikame yüzdesinde üçer adet olmak üzere numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelere Marshall sıcak karışım tasarım yöntemi prosedürü uygulanarak bitüm oranı-stabilite, bitüm oranı-Dp, bitüm oranı- Vfa yüzdesi, bitüm oranı- Vh, bitüm oranı-VMA yüzdesi grafikleri hazırlanmıştır.

Kireçtaşı agrega gradasyonu sabit tutularak %3.5-4.0-4.5-5.0-5.5-6.0 bitüm oranlarında Marshall briketleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelere Marshall sıcak karışım tasarım yöntemi prosedürü uygulanarak bitüm oranı-stabilite, bitüm oranı-akma, bitüm oranı-Dp, bitüm oranı- Vfa yüzdesi, bitüm oranı- boşluk yüzdesi, bitüm oranı- VMA yüzdesi grafikleri hazırlanmıştır. Optimum bitüm miktarının tayininde maksimum stabiliteyi veren bitüm oranı (%4.70), maksimum pratik özgül ağırlığı veren bitüm oranı (5.20), Vfa yüzdesi %70 olarak belirlenen bitüm oranı (%4.70) ve %4 boşluk oranını veren bitüm oranı (%4.78) değerlerinin ortalaması alınarak belirlenmiştir (Tablo 4). Ayrıca asfalt betonu aşınma tabakası dizayn kriterleri Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 4. Optimum bitüm oranının belirlenmesi

	İstenilen	Oran
Pratik Özgül ağırlık (Dp), (gr/cm ³)	Maksimum	5.20
Marshall Stabilitesi (MS), (kg)	Maksimum	4.70
Boşluk (Vh), (%)	4	4.78
Asfaltla dolu boşluk yüzdesi (Vfa), (%)	65-75 (70)	4.70
Optimum bitüm içeriği (Dp, MS, Vh ve Vfa'nın ortalaması)	4.85 (%)	

Tablo 5. Asfalt betonu dizayn kriterleri (27)

Özellikler	Binder		Aşınma TIP-1, TIP-2		Aşınma TIP-3	
	min.	maks.	min.	maks.	min.	maks.
Briket Yapımında Uygulanacak Darbe Sayısı	75		75		75	
Marshall Stabilitesi, kg	750	-	900	-	400	-
Boşluk, %	4	6	3	5	5	12
Asfaltta Dolu Boşluk, %	60	75	65	75	-	-
Agregalar Arası Boşluk, (VMA) %	13	15	14	16	-	-
Akma, mm (10 ⁻² in)	2 (8)	4 (16)	2 (8)	4 (16)	2 (8)	4 (16)
Filler/Bitüm Oranı	-	1,4	-	1,5		
Bitüm (ağırlıkça, 100'e)	3,5	6,5	4,0	7,0	5,0	8,0
Sıkıştırılmış Bitümlü Karışımların Sudan Kaynaklanan Bozulmalara Karşı Direnci, İndirekt Çekme Mukavemeti (İÇM) Oranı, min. %	80		80		80	
Tekerlek Üzinde Oturma (30.000 devirde, 60 °C'de), maks. %	-		8		-	
Tekerlek Üzinde Oturma (3.000 devirde, 60 °C'de 5 cm kalınlığında numune), maks. %					7	

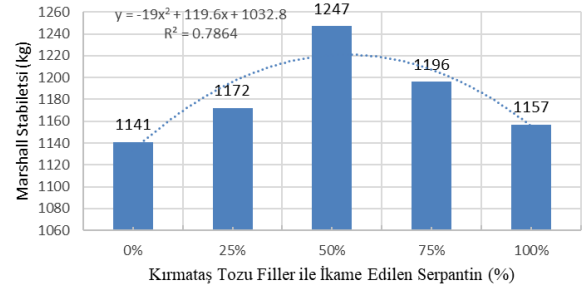
4.3. Serpantin tozunun filler olarak kullanıldığı numunelere ait Marshall stabilite deney sonuçları

Çalışmada filler olarak kireçtaşının kullanıldığı, %3.5-4.0-4.5-5.0-5.5-6.0 oranlarında bitüm oranına sahip numuneler dökülerek optimum miktarı %4.85 olarak belirlenmiştir. Belirlenen %4.85 optimum bitim içeriğine göre kalker filler yerine serpantin ikameli numuneler hazırlanmıştır.

Kireçtaşı fillere kütlece toplam filler miktarının yüzdesi olarak %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında serpantin ikame edilerek Marshall briketleri hazırlanmıştır. Serpantin ikameli asfalt beton numuneler Marshall stabilite ve akma testine tabi tutularak serpantin filler malzemesinin stabilite, akma, boşluk, Vfa miktarı ve VMA miktarı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Serpantin ikame oranına bağlı olarak esnek üstyapının mühendislik özelliklerindeki değişimler %serpantin fillere göre stabilite değişim grafiği Şekil 11, %serpantin fillere göre akma değişim grafiği Şekil 12, % serpantin fillere göre D_p değişim grafiği Şekil 13, % serpantin fillere göre % VMA değişim grafiği Şekil 14, % serpantin fillere göre V_h değişim grafiği Şekil 15 ve % serpantin fillere göre asfalt dolu boşluk (Vfa) değişim grafiği Şekil 16'da verilmiştir.

Serpantin ikameli numunelere ait stabilite ve bitüm oranı grafiği (Şekil 11) ele alındığında sadece kireçtaşı filler ile hazırlanan (0% serpantin filler) brikete ait stabilite değerinin 1141 kg, %25 serpantin ikameli numunenin stabilite değerinin 1172 kg, %50 serpantin ikameli numunenin stabilite değerinin 1247 kg, %75 serpantin ikameli numunenin stabilite değerinin 1196 kg ve %100 serpantin ikameli numunenin stabilite değerinin 1157 kg olduğu görülmektedir.

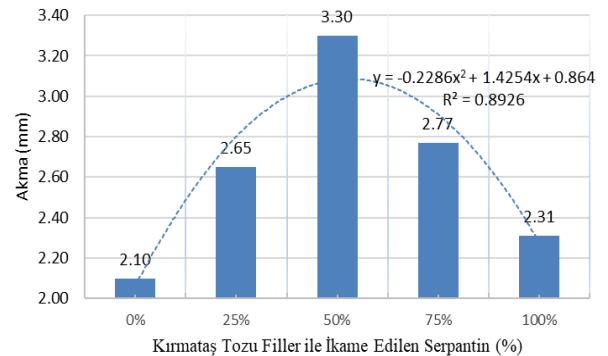
kg ve fillerin tamamının serpantin filler olduğu brikete ait stabilite değerinin ise 1157 kg olduğu görülmektedir. Stabilite, kireçtaşı filler ile üretilen şahit numuneye göre %25, %50, %75 ve %100, serpantin ikame oranlarında sırasıyla %2.7, %9.3, %4.8 ve %1.4 oranlarında artış göstermiştir. Serpantin ikameli briketlere ait stabilite değerlerinin şahit numuneye kıyasla daha iyi sonuçlar verdiği aynı zamanda KTŞ' de aşınma tabakası için belirlenmiş minimum stabilite değerinin üzerinde olduğu görülmektedir.



Şekil 11. % Serpantin fillere göre stabilite değişim grafiği

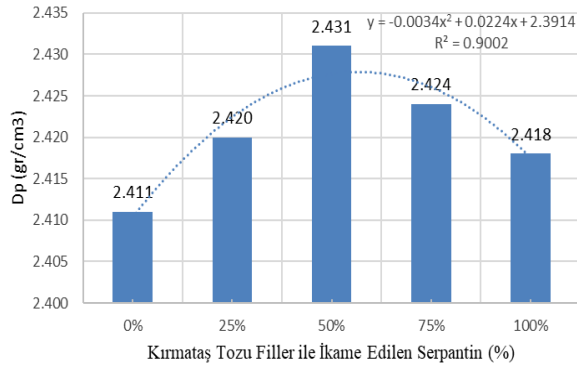
Hazırlanan numunelere ait Şekil 12'deki akma grafiği incelendiğinde akma değerlerinin 2,10 mm ile 3.30 mm arasında değiştiği görülmektedir. Serpantin ikamesi arttıkça akma değerlerinde belirli bir noktaya kadar artma, bir noktadan sonra ise azalma görülmektedir. Asfalt beton kaplamalarda akma değeri yükseldikçe kaplamanın daha fazla plastik davranış göstereceği ve deformasyona uğrama potansiyelinin artacağı bilinmektedir. Düşük akma değerleri ise esnek kaplamada bitüm oranının gerekenden az olduğunu, kaplamanın aşırı rijit ve gevrek olduğunu, kaplamada düşük sıcaklık yorulma çatlaklarının oluşabileceği anlamına gelmektedir.

Çalışmada tüm serpantin ikameli numuneler şartname sınır değerleri içerisinde kalmaktadır. Belirli bir noktadan sonra (%50 serpantin) numunelerdeki akma değerindeki düşüşün nedeninin serpantin yapısal özellikleri sebebiyle karışımda kullanılan bitümün bir kısmını absorbe etmesi, asfalt numunesinin homojen yapısını bozması olarak düşünülmektedir.



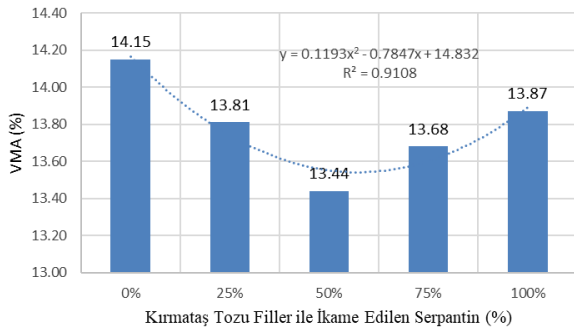
Şekil 12. % serpantin fillere göre akma değişim grafiği

Hazırlanan numune gruplarına ait pratik yoğunluk (Dp) değerleri Şekil 13'te gösterilmiştir. Deneysel sonuçları incelendiğinde Dp değerlerinin belli bir noktaya kadar artma eğilimi gösterdiği bu noktadan sonra ise azalmaya başladığı görülmektedir. Artan serpantin içeriği ile numunenin sıkışma değerinde azalma meydana geldiği ve boşluk hacmindeki artışın birim hacim ağırlıklarının azalmasına sebep olmuş olduğu düşünülmektedir. Dp değeri serpantin filler miktarının artmasıyla %25 ve %50 serpantin oranlarında şahit numuneye göre artış göstermiştir. %75 ve %100 serpantin ikameli numunelerde Dp çok küçük değerler olsa da şahit numuneye göre artış göstermiştir. En yüksek Dp değerine %50 serpantin ikameli numunede ulaşılmıştır.



Şekil 13. % serpantin fillere göre Dp grafiği

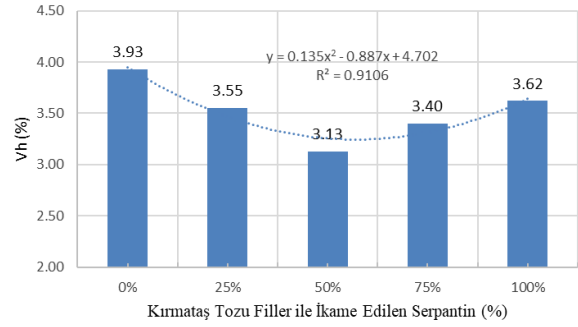
VMA grafiği incelendiğinde %25-50-75-100 serpantin ikameli briketlerde VMA değerinin şahit numuneye göre düştüğü görülmektedir. KTS'ye göre VMA değerinin %14'ten büyük olması istenmektedir. Özellikle sıcaklığın yüksek olduğu zamanlarda agregalar arasında yeterli boşluk olmaması durumunda asfalt beton kaplamalarda kuma meydana gelmektedir. Grafiğe bakıldığında serpantin ikameli numunelerin şartname sınırlarına yakın olmakla beraber %14 değerinin altında kaldığı görülmektedir.



Şekil 14. % Serpantin fillere göre % VMA değişim grafiği

Grafik incelendiğinde (Şekil 15) bitüm oranı arttıkça boşluklar asfalt çimentosuyla dolmakta ve Vh azalmaktadır. Esnek yol kaplamalarında boşluğun fazla olması çatlamalara ve akmaya neden olabilmektedir.

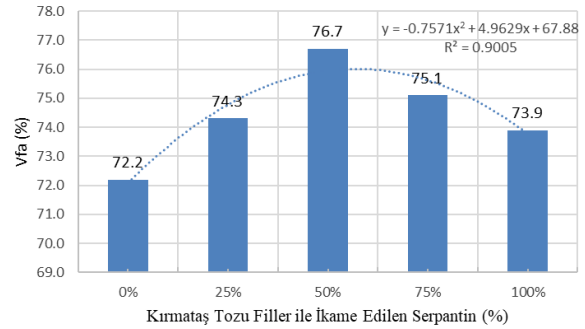
KTS'ye göre aşınma tabakası Marshall tasarım kriterlerinde izin verilen boşluk sınır değerleri %3-5'tir. Vh ve bitüm ilişkisini gösteren grafiğe bakıldığında %25, %50, %75 ve %100 serpantin ikameli briketlerde boşluk oranları sırasıyla %3.93-3.55-3.13-3.40-3.62 değerlerini almıştır. Değerler incelendiğinde serpantin ikameli tüm briketlerin şartname değerlerini sağladığı görülmektedir.



Şekil 15. % Serpantin fillere göre Vh değişim grafiği

Bu çalışmada kırmataş tozu fillerini yerine %0, %25, %50, %75 ve %100 serpantin ikamesi yapılmış ve asfalt dolu boşluk oranlarının sırasıyla %72.2, %74.3, %76.7, %75.1, %73.9 değerlerini aldığı gözlenmiştir.

Vfa asfaltla dolu boşluğu ifade etmektedir. BSK kaplamalarda boşlukların asfalt ile dolu olması homojenliği arttırmakta ve dayanımı olumlu yönde etkilemektedir. Şekil 16 incelendiğinde %50 serpantin ikameli numunede maksimum (%76.7) Vfa değerlerine ulaşıldığı, en düşük (%72.2) Vfa değerine ise şahit numunelerde (%0 serpantin filler) ulaşıldığı görülmektedir.



Şekil 16. % Serpantin fillere göre Vfa yüzdesi değişim grafiği

5. Sonuçlar

Çalışmada, serpantin toz atıkların BSK'da kireçtaşı filler yerine kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla gerçekleştirilen agrega, bitüm ve karışım deneylerinin sonucu elde edilen bulgulara göre ulaşılan sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenmiştir;

- Beton asfalt numunelerin üretiminde kullanılan agrega, filler ve bitüm için yapılan deneysel çalışmalar sonucunda agrega, filler ve bitümün şartname değerlerine uygun olduğu belirlenmiştir.
- Tez çalışmasında ön deneyler yapılarak optimum filler miktarı olarak %4.8 olarak belirlenmiştir. Belirlenen optimum filler oranında, kaba, ince ve filler malzemesi kireçtaşı olan numuneler hazırlanmıştır. Çalışmada %3.5- 4.0- 4.5- 5.0- 5.5-6.0 bitüm içeriklerinde hazırlanan Marshall numunelerine ait stabilite, akma, Dp, Vh, Vfa ve VMA grafikleri çizilerek bu grafiklerden optimum bitüm miktarı %4.85 olarak hesaplanmıştır.
- Belirlenen optimum bitüm içeriğinde (%4.85) kireçtaşı filler ile serpantin filler %0-25-50-75-100 oranlarında yer değiştirilerek her oranda 3 adet olmak üzere toplam 15 numune dökülerek serpantin ikameli briketlere ait stabilite, akma, Dp, Vh, Vfa ve VMA değerleri bulunmuştur.
- Stabilite, serpantin ikameli numunelerde artış göstermiştir. Sadece kireçtaşı filler ile hazırlanan şahit numuneye (0% serpantin filler) ait stabilite değerinin 1141 kg, %25 serpantin ikameli numunenin stabilite değerinin 1172 kg, %50 serpantin ikameli numunenin stabilite değerinin 1247 kg, %75 serpantin ikameli numunenin stabilite değerinin 1196 kg ve fillerin tamamının serpantin filler olduğu brikete ait stabilite değerinin ise 1157 kg olduğu görülmektedir. Stabilite, kireçtaşı filler ile üretilen şahit numuneye göre %0, %25, %50, %75 ve %100 serpantin ikame oranlarında sırasıyla %2.7, %9.3, %4.8 ve %1.4 oranlarında artış göstermiştir. Bu sonuçlar serpantin filler ikameli asfalt betonlarda Marshall stabilitesinin arttığı göstermiştir.
- KTŞ göre aşınma tabakası için sağlanması gereken 900 kg stabilite değerinin şahit numune ve %25-50-75-100 oranlarında

serpantin ikameli asfalt beton numunelerde sağlandığı görülmüştür.

- En yüksek stabilite değeri %50 serpantin ikameli numunede elde edilmiştir.
- KTŞ'ye göre aşınma tabakasında akma değerleri için sınır aralık 2-4 mm olarak ifade edilmektedir. Çalışmada, akma değerlerinin 2.10 mm ile 3.30 mm arasında olduğu tespit edilmiştir. Serpantin ikamesi arttıkça akma değerlerinde belirli bir noktaya kadar artış, bir noktadan sonra ise azalma olduğu görülmüştür. Çalışmada tüm serpantin ikameli numuneler şartname sınır değerleri içerisinde kalmaktadır. Belirli bir noktadan sonra (%50 serpantin) numunelerdeki akma değerindeki düşüşün nedeninin serpantin yapısal özellikleri sebebiyle karışımda kullanılan bitümün bir kısmını absorbe etmesi, asfalt numunesinin homojen yapısını bozması olarak düşünülmektedir.
- Çalışmada şahit numune ve %25-50-75-100 oranlarında serpantin ikameli BSK numunelerde akma değerlerinin KTŞ'nin standartlarına (2-4mm) uygun olduğu görülmüştür.
- Dp değeri serpantin filler miktarının artmasıyla %25 ve %50 serpantin oranlarında şahit numuneye göre artış göstermiştir. %75 ve %100 serpantin ikameli numunelerde Dp çok küçük değerler olsa da şahit numuneye göre artış göstermiştir. En yüksek Dp değerine stabilitenin en yüksek değeri aldığı %50 serpantin ikameli numune ulaşılmıştır.
- VMA ve bitüm oranı grafiği incelendiğinde %25-50-75-100 serpantin ikameli briketlerde VMA değerinin şahit numuneye göre düştüğü görülmektedir. Grafiğe bakıldığında serpantin ikameli numunelerin şartname sınırlarına yakın olmakla beraber %14 değerinin altında kaldığı görülmektedir. KTŞ'ye göre VMA değerinin %14'ten büyük olması istenmektedir. Özellikle sıcaklığın etkisiyle serpantin ikameli asfalt beton numunelerde agregalar arasında yeterli boşluk olmaması nedeniyle asfalt beton kaplamada kuma meydana gelebileceği belirlenmiştir.
- KTŞ'ye göre aşınma tabakası Marshall tasarım kriterlerinde izin verilen boşluk sınır değerleri %3-5'tir. Vh ve bitüm ilişkisini gösteren grafiğe bakıldığında %25, %50, %75

ve %100 serpantin ikameli briketlerde boşluk oranları sırasıyla %3.93-3.55-3.13-3.40-3.62 değerlerini almıştır. Değerler incelendiğinde serpantin ikameli tüm briketlerin şartname değerlerini sağladığı görülmektedir.

- Daha geniş ve kapsamlı çalışmalar sonucunda serpantin farklı disiplinlerde (çevre ve sağlık vb.) incelenmesi yine ulaştırma mühendisliği bakımından üstyapı mühendislerince daha detaylı (nem hasarı, optimum filler miktarı vb.) incelenmesi sonucunda serpantin asfalt beton kaplamalarda filler olarak kullanılması önerilmektedir.

Kaynaklar

- [1] Ahmedzade, Perviz, and Burak Sengoz. "Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete." *Journal of hazardous materials* 165.1-3: 300-305, 2009.
- [2] Yılmaz M, Kök BV, & Kuloğlu N. Effects of using asphaltite as filler on mechanical properties of hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 25(11), 4279-4286, 2011.
- [3] Serin S, Morova N, Saltan M, & Terzi S. Investigation of usability of steel fibers in asphalt concrete mixtures. *Construction and Building Materials*, 36, 238-244. 2012.
- [4] Ahmedzade P & Yılmaz M. Effect of polyester resin additive on the properties of asphalt binders and mixtures. *Construction and building materials*, 22(4), 481-486, 2008.
- [5] Saltan M, Öksüz B, Uz VE. Use of glass waste as mineral filler in hot mix asphalt. *Science and Engineering of Composite Materials*, 22(3), 271-277. 10.1515/secm-2013-0135, 2015.
- [6] Özbey BG. Ankara Elmadağ Serisinde Serpantinikol Endemizmin Ekolojik Uyum Mekanizmalarının Araştırılması. (Doktora Tezi Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara 2019.
- [7] Kurt L, Ozbey BG, Kurt F, Ozdeniz E & Bölükbaşı A. Serpentine Flora of Turkey. *Biological Diversity and Conservation*. 6/1 (2013) 134-152. 1308-8084
- [8] Terzi S. Mermer Toz Atıkların Asfalt Betonunda Filler malzemesi olarak kullanılmasının araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2000.
- [9] Gündoğan H. Fındık Kabuğu Külü ve Yüksek Karbonlu Ferrokrom Üretim Fırımlarında Ortaya Çıkan Baca Külünün Asfalt Betonunda Filler Olarak Kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, Türkiye, 2021.
- [10] Kurt L, Ozbey, B.G., Kurt, F., Ozdeniz, E. & Bölükbaşı, A. Serpentine Flora of Turkey. *Biological Diversity and Conservation*. 6/1 2013 134-152. 1308-8084
- [11] Ceylan S. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Filler Olarak Carboniferous-Triassic Kayaç Tozlarının Kullanılması ve Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, Türkiye, 2006.
- [12] ASTM C127-15. Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015. www.astm.org
- [13] ASTM C 128. Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2001 www.astm.org
- [14] ASTM C854, Standard Test Method for Resistance to External Loads on Metal Reflective Pipe Insulation 1990
- [15] ASTM D 2041. Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures, Annual Book of ASTM Standards USA, 2004.
- [16] TS EN 1097-2. Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler – Bölüm 2: Parçalanma Direnci Tayini İçin Yöntemler, Ankara, 2010.
- [17] TS EN 1097-1. Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler, bölüm 1: aşınmaya karşı direncin tayini (Mikro-Deval), Ankara, 2002.
- [18] BS 812: Part 2: (1975) Methods for determination of physical properties, British Standard Institution 1975.
- [19] TS EN 12697-11. Bitümlü karışımlar-Deney metotları-Sıcak karışimli asfalt içi-Bölüm 11: Agregave bitüm arasındaki bağlanmanı tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, s. 28, 2012.
- [20] TS EN 933-10. Tests for geometrical properties of aggregates-Part 10: Assessment of fines; Grading of fillers (air jet sieving). Türk Standartları Enstitüsü, Ankara 2015.
- [21] TS EN 1426. Bitüm ve Bitümlü Bağlayıcılar – İğne Batma Derinliği Tayini, Ankara. 2015.
- [22] TS EN 1427. Bitüm ve Bitümlü Bağlayıcılar – Yumuşama Noktası Tayini – Halka ve Bilye Yöntemi, Ankara, 2015.
- [23] TS EN ISO 2592. Petrol ve İlgili Ürünler – Parlama Yanma Noktasının Tayini, Cleveland Açık Kap Yöntemi, Ankara, 2017.
- [24] Yıldız K. *Marshall Dizayn Metodu ile Optimum Bitüm Muhtevasının Belirlenmesinde Deney Parametrelerinin Sonuca Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2003.
- [25] İsfalt. Shell Bitüm El Kitabı, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İSFALT Bilimsel Yayın No:3, ISBN: 975-8183-02-8, İstanbul, 2004
- [26] Öksüz B. Asfalt Beton Kaplamalarda Volkanik Cüruf ve Cam Atıklarının Filler Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Yüksek Lisans

Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri
Enstitüsü Isparta, Türkiye, 2011.

[27] Karayolu Teknik Şartnamesi. Ankara,
Karayolları Genel Müdürlüğü, 2013