

Sönmüş Kireç-Diatomit-SBS Katkılarıyla Geri Dönüştürülmüş Asfalt Kaplamaların Performans Analizi

Burak KORZAY¹

Atakan AKSOY^{2*}

Mehmet Emre TEKİN³

ÖZ

Geri dönüştürülmüş asfalt kaplamalar (RAP); ekonomik ve çevresel üstünlüklere sahiptir. Sera gazı emisyonlarını ve bitüm gereksinimini azaltması, tamamen dönüştürülebilir olması, atık depolamayı azaltması, hammadde kaynaklarını koruması, kullanım çeşitliliği yönleriyle avantajlıdır. Sürdürülebilirlik yaklaşımlarıyla, artan oranda aşınma tabakalarında kullanılmaktadır. Bu hedeflerle, Türkiye için, saha çalışmalarına yönelik %50 RAP ile aşınma tabakası dizaynları üretilmiştir. Katkı olarak; SBS ile yaygın kullanım oranlarının çok daha düşük değerlerinde uyumlaştırıcı sönmüş kireç (HL) ve diatomit (D) kullanılmıştır. Çalışmada, HL ve D ile RAP karışımların su hasarı ve tekerlek izi bakımından garantili iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Diatomit kullanımı; gerek Türkiye gerekse dünya için yenilikçi bir konudur. Sabit HL-SBS içeriğinde, D%5-10 oranları ayrı ayrı kullanıldı. AASHTO T283 Modifiye Lottman ve Hamburg tekerlek izi testleri uygulandı. %50RAP eklenmiş karışımlar, seçilen katkı ile orijinal karışımlardan daha dirençli hale gelmiştir. Modifiye Lottman testinin D, HL, SBS ve RAP'lı karışımlar için ayırt edici olduğu ve performans artışını yansıttığı görülmektedir. Sabit ve az HL oranında, D oranının %5'den %10 değerine artırılması ile su hasarı direncinin artması, HL ve D'nin birlikte performans artışı oluşturabildiğini gösterdi. HL+SBS uyumu; daha yüksek su hasarı direnci oluşturmaktadır. SBS, gerek HL gerekse de D ile uyumlu çalışmaktadır. Düşük HL- D oranlarında ve yaygın oranda %5SBS kullanımı; %50RAP karışımlarda su hasarı direnci bakımından çok yüksek iyileşme sağlamaktadır. Tüm %50RAP modifiye karışımların kontrol karışımlardan daha

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 8 Kasım 2022 günü ulaşmıştır. 1 Eylül 2023 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Ocak 2024 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://doi.org/10.18400/tjce.1363595>

1 İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İSFALT A.Ş., İstanbul, Türkiye
burak.korzay@isfalt.istanbul - <https://orcid.org/0000-0001-8401-2153>

2 Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye
aaksoy@ktu.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0001-5232-6465>

3 İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İSFALT A.Ş., İstanbul, Türkiye
etekin@isfalt.istanbul - <https://orcid.org/0000-0003-1582-4232>

* Sorumlu yazar

yüksek tekerlek izi direnci vermesi bu karışımların uygulamada başarıyla kullanılabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Asfalt kaplamalar, geri dönüştürülmüş asfalt kaplama, diatomit, sönmüş kireç, SBS polimer, su hasarı, tekerlek izi, Hamburg tekerlek izi deneyi.

ABSTRACT

Performance Analysis of Recycled Asphalt Pavements with Hydrated Lime-Diatomite-SBS Additives

Reclaimed asphalt pavements (RAP); has economic and environmental advantages. It is advantageous in terms of reducing greenhouse gas emissions and bitumen requirement, being completely recyclable, reducing waste storage, protecting raw material resources, and diversity of use. With sustainability approaches, it is increasingly used in wear layers. With these objectives, wearing layer designs with 50% RAP for field studies were produced for Turkey. As an additive materials; compatibilizer hydrated lime (HL) and diatomite (D) were used at much lower values than the common usage rates with SBS. It was aimed to obtain guaranteed improvement of RAP mixtures with HL and D in terms of water damage and rutting. Using of diatomite is one of the innovative issues for both Turkey and the world. 5-10% ratios of D were used separately for the constant HL-SBS content. AASHTO T283 Modified Lottman and Hamburg rutting tests were performed. Mixtures with 50%RAP added became more resistant than the original mixtures with the selected additives. It is seen that the modified Lottman test is distinctive for mixtures with D, HL, SBS and RAP and reflects the performances successfully. Increased water damage resistance at a constant low HL ratio with the increasing the D ratio from 5% to 10% indicate that HL and D together can produce performance improvement. HL+SBS compliance provides higher water damage resistance. SBS works in harmony with both HL and D. Low HL-D rates and widespread use of 5%SBS provides very high improvement in water damage resistance in mixtures with 50%RAP. The fact that all 50%RAP modified mixtures gave higher rutting resistance than control mixtures shows that these mixtures can be used successfully in practice.

Keywords: Asphalt pavements, recycled asphalt pavement, diatomite, hydrated lime, SBS polymer, water damage, rutting, Hamburg test.

GİRİŞ

Endüstri, RAP kalitesini iyileştirmek ve asfalt karışımlarda daha yüksek oranda kullanmak için sürekli farklı yollar aramaktadır. Amerika'da, şu anda, eski asfalt kaplamalardan kazınan RAP'ın yeni kaplamalarda kullanım oranı %99'dur. Üreticilerin; ortalama RAP yüzdeleri olarak %20 veya daha fazla kullanım bildirdiği eyaletlerin sayısı önemli ölçüde artmıştır. 2009'da on eyaletten 2017'de 24 eyalete yükselmiştir ancak ortalama RAP yüzdesi hala %20-35 civarındadır [1]. RAP karışımının %95'inden fazlasının yeni kaplamalarda ve kalan %5'in temel tabakaları gibi diğer alanlarda kullanılmasıyla, asfalt karışımı üreticileri, ülkenin en gayretli geri dönüştürücüleri olmaktadır. Asfalt karışımlarında kullanılan toplam tahmini RAP miktarı 2021'de 94,6 milyon tondur. Bu, 2009'da kullanılan tahmini RAP tonajından %68,9'luk bir artışı temsil etmektedir. 2009'dan bu yana toplam asfalt karışımı tonajı yalnızca %20,6 arttı. RAP kullandığını bildiren üreticilerin yüzdesi, 2020'ye göre %1,1 artışla yanıt

verenlerin %100'ü oldu. İki üretici, 2021'de RAP'ın küçük bir miktarını (36.000 ton veya %0,07) düzenli depolamaya tabi tuttuklarını bildirdi [2]. Son araştırmalar, mekanik özelliklerde tatmin edici sonuçlar elde ederek, yeni karışım tasarımlarına %50'nin üzerindeki oranlarda RAP ikamesinin yeni karışımları üretmek için uygun olduğunu göstermektedir [3-4]. %100 RAP'ın, malzeme döngüsünü kapatarak gerçek sürdürülebilirliği sağlayacağı ve geleneksel asfaltla aynı yüksek değerli uygulamada kullanılmasına imkan olacağı savunulmaktadır [5]. Yeniden kullanılan RAP yüzdesi, dünyanın birçok ülkesinde kademeli artmaktadır. Ağırlıkça %15-%20 aralığında bir RAP bitümlü karışımların üretimi için standart uygulama haline gelmektedir. Yüksek (ağırlıkça %40'ın üzerinde) veya çok yüksek (ağırlıkça %100'e kadar) RAP'lı bitümlü karışımlar üretmenin fizibilitesi incelenmektedir. RAP kullanımını; ağırlıkça %15-30'luk ortalama RAP içeriğinin ötesine geçecek şekilde sınırlayan olumsuz algılar ve pratik sorunlar vardır. Bunlar; HMA (sıcak karışım asfalt) karışımlarında RAP agregalarının kalitesi, üretim plant tesisinin teknolojisi, karışım tasarım metodolojisi ve RAP içeren nihai karışımın performansı olarak özetlenebilir [6]. ABD ve Avrupa'daki ortak uygulamalar, esas olarak yeni HMA /WMA (ılık karışım asfalt) karışımlarına eklenen RAP miktarı ve bağlanmamış katmanlar için agrega olarak kullanılan miktar açısından farklılık gösterir. Bu nedenle, Tablo 1'de listelenen yüzdeler, Avrupa Devletlerinin geri dönüştürülmüş agrega potansiyelinden daha çok yararlanabileceğini vurgulamaktadır [7-8].

Tablo 1 - ABD ve Avrupa'da RAP kullanımının karşılaştırılması [7-8]

Değerlendirilen Miktarlar	Amerika	Avrupa
Toplam HMA ve WMA üretimi	389.300.000 Ton	297.900.000 Ton
Plant tesislerinde kabul edilen toplam RAP	101.100.000 Ton	49.500.000 Ton
Sıcak Karışım Asfalt/Ilık asfalt karışımlarında kullanılan RAP	%81,3	%51,4
Soğuk Asfalt karışımlarında kullanılan RAP	%0,297	%3,81
Bağlanmamış tabakalar için agrega olarak kullanılan RAP	%6,33	%17
Başka amaçlar için kullanılan RAP	%1,98	%2
RAP dolgu	%0	%9.63

2011 yılında FHWA (The Federal Highway Administration), karışımın toplam ağırlığına göre %25'ten fazla RAP içeren asfalt betonlarını yüksek içerikli RAP olarak tanımlamıştır [9]. Sürdürülebilirlik analizi; %30, %40 ve %50 RAP içeren karışımları hazırlamak için tüketilen enerjinin sırasıyla %26, 33 ve %40 azaldığını ortaya koymaktadır [10]. HMA karışımlarına %30 ve %40 RAP eklenmesinin inşaat, bakım, rehabilitasyon ve malzeme ikamesi değerleri dikkate alındığında sırasıyla %19 ve %40 maliyet tasarrufu sağladığını dile getirilmektedir [11]. %25 RAP dahil edilmesi sırasıyla enerji tüketiminde, eşdeğer CO₂ emisyonunda ve maliyette %33, 35 ve %8,5 azalmaya neden olmaktadır [12]. Yüksek RAP oranı, RAP'ın yaşlanmış bağlayıcısı nedeniyle nihai karışımların yorulma ve termal çatlama direncini önemli ölçüde azaltmaktadır [13-14].

HMA plentlerinin kurutucusunda aleve maruz kalan RAP agregalarının doğrudan ısıtılması sonucunda RAP bağlayıcının daha fazla yaşlanması ve sertleşmesi nedeniyle, yüksek RAP içeren karışımların mekanik özellikleri etkilenmektedir [15-17]. RAP içeriği esas olarak üretim kalitesi ve dolayısıyla asfalt plentindeki karışımların performansı gibi pratik konularla sınırlıdır. RAP malzemeleri yüksek sıcaklıklarda yaşlanır ve yüksek oranda kullanılması potansiyel olarak yolların erken çatlamasına neden olabilir. Diğer bir neden ise, öğütme işlemi nedeniyle agregaların ezilmesi sonucu çok miktarda ince partikül oluşmasıdır. Bu daha ince parçacıklar, yüksek RAP içeriğinde karışım tasarımı için derecelendirme gereksinimlerini sınırladığı için RAP kullanımının maksimum içeriğini sınırlar. Tesisler RAP'ın daha yüksek oranına izin vermemektedir, çünkü batch plentlerde tipik RAP katma aralığı %10-20'dir ve drum plentler %50'ye kadar uyum sağlayabilir [18].

Artan yaşlanma bağlayıcının gerilme gevşeme kapasitesini azaltmakta, bu da karışımın çatlama direncini azaltmaktadır [19]. RAP, işlenmemiş malzeme tüketimini; ilişkili maliyet ve enerjiyi azaltır. Ayrıca, RAP dökümü için gerekli olan değerli depolama alanlarından tasarruf edilebilmektedir. RAP malzemesinin orijinal özelliklerini eski haline getirmek için bazı geliştiriciler katılmalıdır. Geliştirici ile oluşan asıl mekanizma çok iyi bilinmemektedir. RAP karışımlarının performansının öngörülemez olmasını sağlayabilir ve dolayısıyla RAP içeriğinin artırılmasında bir kısıtlama oluşturur. RAP malzeme kalitesi için herhangi bir uygun karakterizasyon yönteminin olmaması ve saf ve RAP bağlayıcının harmanlanması hakkında çok az bilgi sahibi olunması da; RAP karışımın performansı hakkında öngörülemez olmanın ve dolayısıyla daha yüksek RAP içeriği kullanma konusunda ihtiyatlı olmanın başlıca nedenidir [20]. Yüksek RAP içeriğine sahip kesimlerin esas olarak daha düşük sürüş kalitesi, daha fazla çatlama ve daha iyi tekerlek izi direnci gösterme eğiliminde olduğu, ancak farklılıkların her zaman istatistiksel olarak anlamlı olmadığı belirtilmektedir [21]. Yüksek oranda RAP eklenmesinin, üstü yapı performansından ödün vermeden kullanılabileceği belirtilmektedir [22].

EN13108'e göre karışım prosedürünün güvenilirliği araştırıldı. Özellikle, aşınma tabakası RAP bileşenlerinin dozajlanması ve RAP bağlayıcı içinde bulunan bağlayıcının ve ex-novo eklenen bağlayıcının Performans Derecesi ve kritik sıcaklıklarının belirlenmesi için SuPerPave® tasarım yönergeleri uygulandı. RAP yüzdesi olarak %30, %40 ve %50 oranları kullanıldı. Sonuçlar, uygulanan rasyonel karışım tasarımının, Avrupa standartlarıyla tamamen uyumlu olarak aşınma tabakası geri dönüştürülmüş karışımların performans seviyelerini garanti ettiğini gösterdi [23]. Değişen belirli karışım tasarım parametrelerinin (agrega ve filler yapısı, bağlayıcı içeriği ve türü) %20 RAP malzemesi içeren karışımların mekanik özellikleri üzerindeki etkisi kalitatif değerlendirilmiştir. Analiz sonuçları, bağlayıcı yapısındaki ve bağlayıcı içeriğindeki değişikliklerin, karışımların kompleks modülü üzerinde istatistiksel olarak önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. RAP malzeme içeriğinin ve yeni eklenen bağlayıcı penetrasyon derecesinin, karışımların kompleks modülü ve yolculuk ömrü üzerindeki etkisi nicel olarak tahmin edilmiştir. %60'a kadar RAP malzemesi içeren karışımların gözlenen yolculuk ve kompleks modül performansları teknik, ekonomik ve çevresel açıdan oldukça cesaret vericidir [24].

NAPA anketi, hemen hemen tüm asfalt fabrikalarının ürünlerinde RAP kullandığını ifade etmektedir. (HMA)/(WMA) kullanılan toplam RAP miktarı arttı. Asfalt karışımlarında kullanılan ulusal ortalama RAP yüzdesi 2009'da %15,6'dan 2016'da %20,5'e istikrarlı bir şekilde yükseldi ve buna karşılık gelen RAP kullanımından elde edilen yıllık tasarruf 2 milyar

dolardan fazla oldu. AB Üyesi 28 ülke için 2016 yılında üretilen 226,8 milyon ton asfalt malzemesinin yaklaşık %17'si mevcut RAP malzemelerine karşılık gelmektedir [16]. Termal üretim koşullarının mekanizmaları ve bunların RAP karışımlarının performansı üzerindeki etkileri iyi anlaşılmamıştır. Üretim koşulları ile RAP karışımlarının performansı arasındaki korelasyonların deneysel kanıtları da laboratuvarında üretilen ve plentte üretilen RAP karışımlarına dayalı olarak gözden geçirilmiştir. Deneysel çalışmalar, karıştırma süresi, karışım boşaltma sıcaklığı ve silo depolama süresi gibi üretim parametrelerinin RAP karışımlarının performansı üzerindeki önemini vurgulamıştır. Yerel asfalt fabrikalarında kullanılan en iyi üretim uygulamalarını belirlemek için RAP karışımlarının saha performansı bakımından; tesis tipi, ham agrega sıcaklığı, RAP giriş sıcaklığı, RAP nem içeriği, karışım tahliye sıcaklığı, silo depolama sıcaklığı ve süresi, taşıma süresi ve teslimat sıcaklığı dahil olmak üzere RAP karışımlarının üretim koşullarının kaydedilmesi ve ardından takip edilmesi şiddetle tavsiye edilir. Daha kısa bir silo depolama süresi, ham ve RAP bağlayıcılar arasında eksik bir karışıma neden olabileceğinden ve daha uzun bir silo depolama süresi, bağlayıcıların aşırı oksitlenmesine neden olabileceğinden, RAP karışımları için silo depolama süresine özel dikkat gösterilmelidir. Yüksek oranda RAP karışımlarında daha yumuşak bir orijinal bağlayıcı tercih edilmelidir [16].

SBS kopolimer modifiye asfalt, temel olarak kalıcı deformasyon, düşük sıcaklıkta çatlama, yorulma, soyulma, aşınma direnci ve yaşlanmayı önlemeyi iyileştirmek amacıyla geliştirilmiştir. SBS modifiye karışımlarda sorgulanmaktadır. Geri kazanılmış SBS modifiye asfalt karışımları, SBS'nin varlığı nedeniyle geri kazanılmış asfalt bağlayıcılardan farklıdır [25-27]. RAP ve gençleştirici katkının performans üzerine etkileri incelenmiştir. Geri kazanılmış SBS modifiye asfalt kaplamayı içeren asfalt karışımlara yeni SBS modifiye asfalt bağlayıcı ve gençleştirici maddenin karıştırılmasıyla; daha iyi nem duyarlılığı, tekerlek izi direnci, dinamik modül, düşük sıcaklıkta çatlama önleme performansı ve yorulma direncine sahip karışımlar elde edildiği görülmüştür. Gençleştirici, RAP içeren daha sürdürülebilir asfalt kaplama hazırlama çabasına fayda sağlayacaktır [28]. Eski SBS modifiye asfalt karışımının geri dönüştürülmesinin, modifiye edilmemiş asfalt karışımı ile aynı geri dönüşüm sürecini takip edip edemeyeceği konusunda çok az literatür vardır. RAP ile (HMA) için tasarım süreci, RAP yüzdesi %25'ten düşük olduğunda orijinal HMA için karışım tasarımına benzer [29-32]. RAP'ın SBS Polimeri İle modifiye edilmiş bağlayıcı içeren karışımlara dahil edilmesinin kırılmaya karşı direnci arttırdığı; yarı dairesel çentikli kırılma testi ile belirlenmiştir. Karışımların yorulma özelliklerini önemli ölçüde değiştirme eğiliminde olan %30'dan fazla RAP'a sahip karışımlarda dikkatli olunmalıdır [33].

Fransa'da, A84 karayolunda, beş yıl sonra elde edilen saha sonuçlarına göre, HL, asfalt katkısı olarak güçlü bir teknik ilgi çekmektedir. HL'li ve HL'siz beş bölüm oluşturuldu ve takip edildi. Karışımlar, %15 RAP içeren yarı yoğun asfalt betonu (Fransız BBSG) idi. Deneysel program, standart ve ileri düzey reolojik ve kimyasal testlere dayalı bağlayıcı değerlendirilmesini ve daldırma sonrasında kalan mukavemet, kompleks modül ve yorulma gibi karışım testlerini içeriyordu. Ek olarak, RAP'ın nem direnci üzerindeki olumsuz etkisi vurgulanmış ve HL, performans kaybını en aza indirmek için etkili bir çözüm olarak ortaya çıkmıştır [34].

Asfalta D eklenmesi (DMA), yüksek sıcaklık performansını, depolama stabilitesini, tekerlek izi direncini ve uzun vadeli yaşlanma direncini artırabilir. DMA mastik; kireçtaşı, HL ve uçucu kütle modifiye edilenden daha uygun yüksek ve orta sıcaklık performanslarına sahiptir

[35]. Bununla birlikte, DMA, asfalt karışımının ısıl iletkenliğini ve düşük sıcaklıkta deformasyon yeteneğini düşürmek gibi bazı çekinceler sunmaktadır [36]. DMA hazırlanması için direkt ve indirekt yöntemler kullanılabilir. Direkt harmanlama yöntemi kullanıldığında, D mineral tozu olarak asfalt ve agregaya karışımına ilave edilir. İndirekt yöntemi kullanıldığında, karışımın hazırlanmasından önce DMA bağlayıcı hazırlanır [37]. DMA karışımların yorulma performansının kontrol karışımlara göre önemli ölçüde iyileşmesi, asfalt ve D arasındaki üstün uyum özelliklerine atfedilmektedir. Bu uyum, karıştırma süresini azaltmakta, DMA yaşlanmasını azaltmakta, doğrudan doğruya asfalt karışımının durabilitesini iyileştirmektedir [38].

Bu çalışmada; RAP malzemesinin yüksek oran olarak kabul edilen %50 katma oranı için katkı seçenekleri bağlamında performansları araştırılmış ve alternatif karışımlar üretilmiştir. %50 RAP İstanbul'da Avrupa yakasından temin edilen Akdağlar Aşınma Tabakası tip dizaynı ile kullanılmıştır. Yaşlanmanın yönetilmesi ve deneme üretimine de geçilecek olduğundan dolayı gerek uygulama gerekse plent koşulları düşünülerek karışımların kalitesinin sürdürülebilir kılınmasında farklı katkı seçenekleri oluşturulmuştur. RAP malzemenin homojenizasyon sorunu olabilmesinden dolayı hem HL hem D katkılı hem de SBS katkılı seçenekler üretilmiştir. Oluşturulmuş geniş kombinasyonda karışım örneklerine su hasarı ve Hamburg tekerlek izi deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen performans düzeyleri geleneksel kontrol ve geleneksel SBS kontrol karışımlar ile kıyaslanmaktadır. D katkısının seçilmesi nedeni Türkiye için henüz yeni bir perspektif olarak silika içeriğinin yüksek oluşu ile yaşlanmanın yönetilmesi ve karışım performansının artırılması olmaktadır. Önemli oran olarak %50RAP uygulamasını başarılı kılarak ekonomik kazanımlar elde etme ve orijinal karışımlara benzer performansların sorgulanması noktasında; HL, D ve SBS formülasyonları farklı seçeneklerde kullanılmıştır. D %5 ve %10 oranları olarak literal uyumla birlikte 2 farklı oran seçeneğinde kullanılmıştır. Belirlenen katkı seçeneklerinin literatürde belirtilen yaygın kullanım oranlarına göre oldukça düşük düzeyde seçilen bu katkıların oluşturabileceği birlikte çalışma konusu sorgulanmaktadır. Yüksek RAP oranları için oluşturulan karışımlar SBS katkısının da varlığında ayrıca irdelenmektedir. Çok yoğun bir deneysel araştırma çerçevesi ile elde edilen sonuçlar laboratuvar testleri anlamında sorgulanmaktadır ve literal olarak irdelenmektedir.

MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışmada; agregaya, bitüm, diatomit, HL, SBS polimer malzemeleri ve araziden temin edilen RAP malzemesi kullanılmıştır. Elek analizi tane boyutu dağılım verileri Tablo 2'de; kaba agregaya fiziksel özellikleri Tablo 3'de, ince agregaya fiziksel özellikleri ise Tablo 4'de verilmektedir. RAP gradasyonu Tablo 2'de verilmektedir ve bitüm yüzdesi de %3,85 olarak ekstraksiyon deneyinden hesaplanmıştır.

Tablo 5 bitüm özelliklerini vermektedir. Dizaynda, (12–19), (5–12) ve (0 –5) mm dane boyutu agregalar ve B50/70 bitüm kullanılmıştır. Gradasyonun hazırlanmasında, Tablo 6'da ki elek ortalamaları alındı. Gradasyon eğrisi Şekil 1'de sunulmaktadır. İSFALT AŞ Fabrikası'ndan Akdağlar Taş Ocağı'ndan alınarak laboratuvara teslim edilen Kumtaşı agregalarla "Asphalt Institute MS-2 Marshall Metoduna göre 2x75 darbeyle 135-140°C'de sıkıştırılan numunelerle Aşınma Tip 1 dizaynı sonucunda, optimum bitüm; kuru agregaya göre ağırlıkça %5,3±0,2 (100g kuru agregaya + 5,3gr B50/70 bitüm) olarak bulunmuştur.

Optimum bitüm hesabında Marshall grafiklerinden faydalanılmış, %4 boşluk değerine karşılık gelen bitüm değeri alınmıştır. Dizayn sonuçları Tablo 7’de verilmektedir.

Tablo 2 - Tane boyutu dağılımı (Deney metodu-ASTM C136 /117)

Elek No (inç)	Elek No (mm)	12-19 mm	5-12 mm	0-5 mm	RAP
3/4"	19	100,0	100,0		100
1/2"	12,5	15,6	97,1		100
3/8"	9,5	4,9	73,3	100,0	99,4
No 4	4,75	3,9	15,4	98,4	83,4
No 10	2,0	3,9	5,2	61,3	53,4
No 40	0,425	3,9	5,0	24,4	25,1
No 80	0,180	3,9	4,4	12,5	18
No 200	0,075	2,0	3,0	5,6	12

Tablo 3 - Kaba agrega fiziksel özellikleri

Deney Adı	Metot	Birim	Sonuç	Limit
Los Angeles Aşınma	TS EN 1097-2	%	17	Maks. 27
Yassılık İndeksi, 5-12 mm	TS EN 933-3	%	13	Maks. 20
Yassılık İndeksi, 12-19 mm	TS EN 933-3	%	11	Maks. 20
Soyulma Mukavemeti	TS EN 12697-11	%	70	Min. 60
Kil ve Ufalanabilir Taneler	ASTM C142	%	0	Maks.0,3
Kuru Tane Yoğunluğu	TS EN 1097-6	Mg/m ³	2,72	-
Görünür Tane Yoğunluğu	TS EN 1097-6	Mg/m ³	2,77	-
Doygun Kuru Yoğunluk	TS EN 1097-6	Mg/m ³	2,74	-
Su Absorbsiyonu	TS EN 1097-6	%	0,8	Max. 2,0

Tablo 4 - İnce agrega fiziksel özellikleri

Deney Adı	Deney Metodu	Birim	Sonuç	KTŞ 2013
Plastisite İndeksi	TS 1900-1	%	NP	NP
Metilen Mavisi	TS EN 933-9+A1	MB	1,3	Max.1,5
Kurutulmuş Tane Yoğunluğu	TS EN 1097-6	Mg/m ³	2,66	-
Görünür Tane Yoğunluğu	TS EN 1097-6	Mg/m ³	2,79	-
Doygun Kuru Yoğunluk	TS EN 1097-6	Mg/m ³	2,71	-
Su Absorbsiyonu	TS EN 1097-6	%	1,7	Max. 2,0
Filler Tane Yoğunluğu	TS EN 1097-7	Mg/m ³	2,75	-

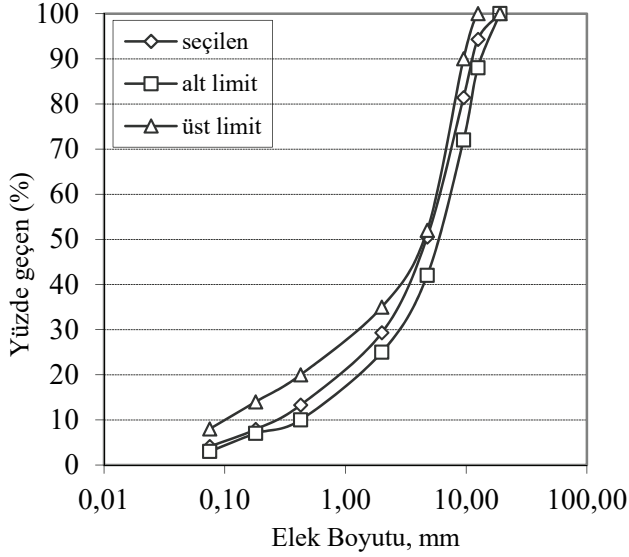
Tablo 5 - Bitümlü bağlayıcı özellikleri (B50/70)

Deney Adı	Metot	Birim	Sonuç	Şartname
Penetrasyon 25°C	TS EN 1426	0,01mm	60	50-70
Özgül Ağırlık d25/25	TS EN 15326 +A1	-	1,014	-
Yoğunluk 25°C		Kg/m ³	1011	-
Yumuşama Noktası	TS EN 1427	°C	50	46-54
Parlama Noktası	TS EN ISO 2592	°C	306	Min.230
Çözünürlük	TS EN 12592	%	100	Min.99

Tablo 6 - Agregada kullanım oranları ve karışım gradasyon eğrisi

Oran		5%	52%	43%	Karışım Grad.	KTŞ 2013 Aşınma-Tip 1 Alt-Üst Sınırlar		İşyeri Karışım Formülü	
ELEK AÇIKLIK (Inch)	(mm)	12-19 mm	5-12 mm	0-5 mm					
¾"	19,0	5,0	52,0	43,0	100,0	100,0		100,0	
½"	12,5	0,8	50,5	43,0	94,3	88,0	100,0	90,0	98,0
3/8"	9,5	0,2	38,1	43,0	81,4	72,0	90,0	77,0	85,0
No 4	4,75	0,2	8,0	42,3	50,5	42,0	52,0	47,0	52,0
No 10	2,00	0,2	2,7	26,4	29,3	25,0	35,0	26,0	32,0
No 40	0,425	0,2	2,6	10,5	13,3	10,0	20,0	10,0	16,0
No 80	0,180	0,2	2,3	5,4	7,9	7,0	14,0	7,0	11,0
No 200	0,075	0,1	1,6	2,4	4,1	3,0	8,0	3,0	6,0
Agrega Karışımının Efektif Özgül Ağırlığı (G _{ef}):						2,736 gr/cm ³			
Agrega Karışımının Hacim Özgül Ağırlığı (G _{sb}):						2,692 gr/cm ³			

İşyeri Karışım Formülü, laboratuvar dizaynına göre plentin ayarlanmasından sonra, üretilen karışımın fiziksel özelliklerinin ve sıkışma kontrolüne esas yoğunluğun tayinini kapsar. Dizayn, Akdağlar Ocağı'ndan alınarak laboratuvara teslim edilen agregalarla hazırlanan, Aşınma Tip 1 karışımı içindir ve plentin çalışmasına esastır. SBS polimer kullanılmıştır. HL, S-KK-80-T türünde sönmüş kalker kirecidir. SBS Kraton-1192, %5 oranında 50/70 Penetrasyon bitüme katıldı. Modifiye bitüm, 3000 rpm yüksek kesmeli karıştırıcıda 4 saat süreyle 180 °C'de hazırlandı. Bentaş Bentonit firmasından temin edilen ve D₂ kodlu diatomit kullanılmıştır. D XRF ana oksit sonuçları, Tablo 8'de ve granülometrisi de de Şekil 2'de verildi. Diatomit, bitümün %5-%10 oranlarında kullanılmıştır. HL, kuru karışımın %0.5 oranındadır. Diatomit ve HL kuru karışıma katılmıştır. D₂ diatomit katkısının XRD analizi Şekil 3'de; SEM görüntüsü Şekil 4'de verilmektedir.



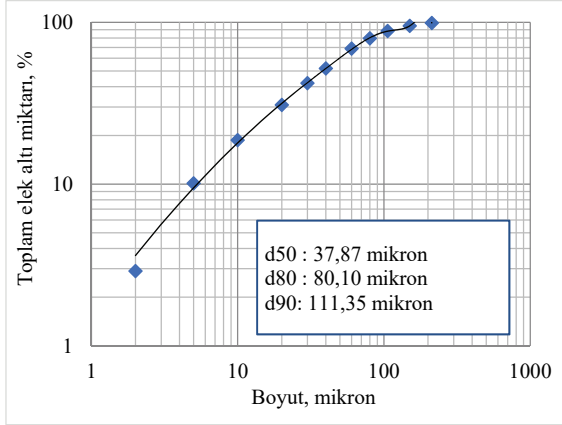
Şekil 1 - Kullanılan Karışım Gradasyon Eğrisi

Tablo 7 - Dizayn kriterleri

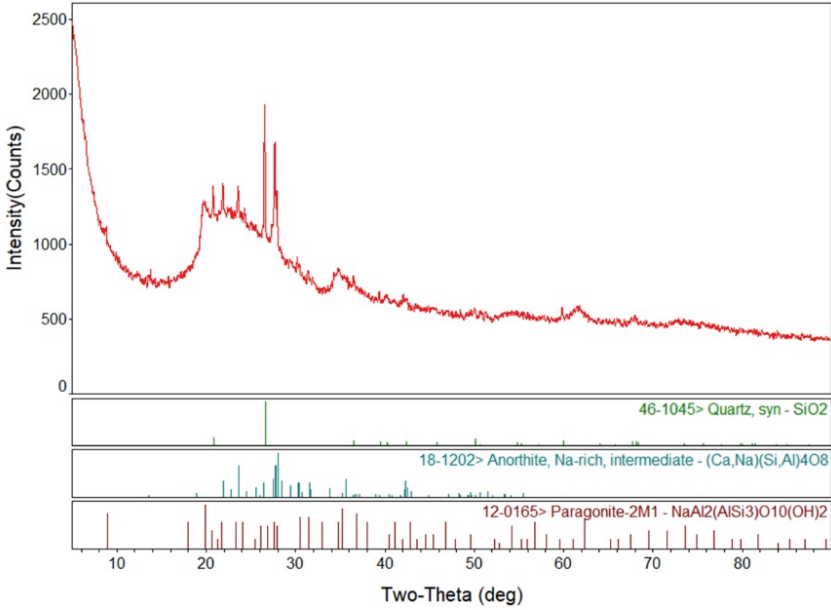
	Sonuç	Şartname
Bitüm % 'si (ağırlıkça,100'e)	5,3 ± 0,2	4,0 -7,0
Pratik Özgül Ağırlık, gr/cm ³ (Mg/m ³)	2,422	
Marshall Stabilitesi, kg	1200	Min.900
Akma, mm	3,8	2- 4
Filler / Bitüm Oranı	0,8	Maks. 1,5
Boşluk, %	4,0	3- 5
Asfaltla (bitüm) dolu boşluk, %	73,0	65- 75
Agregalar arası boşluk (VMA), %	14,6	14- 16

Tablo 8 - Diatomit katkısı ana oksit analiz sonuçları

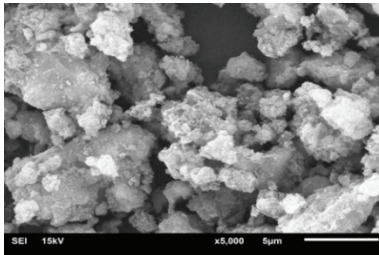
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
Birim	%	%	%	%	%	%	%	%	PPM	%
D2	74,099	8,437	2,839	3,049	1,852	0,109	1,002	0,46	0,139	0,054
	SO ₃	Cl	BaO	CuO	NiO	SrO	V ₂ O ₅	ZnO	ZrO ₂	
Birim	%	PPM	%	%	%	%	%	%	%	
D2	0,016	83	0,017	0,319	ND	0,029	0,077	ND	0,018	



Şekil 2 - D₂ kodlu diatomit granülometri eğrisi



Şekil 3 - D₂ kodlu numunenin XRD analizi



Şekil 4 - D₂ SEM görüntüsü

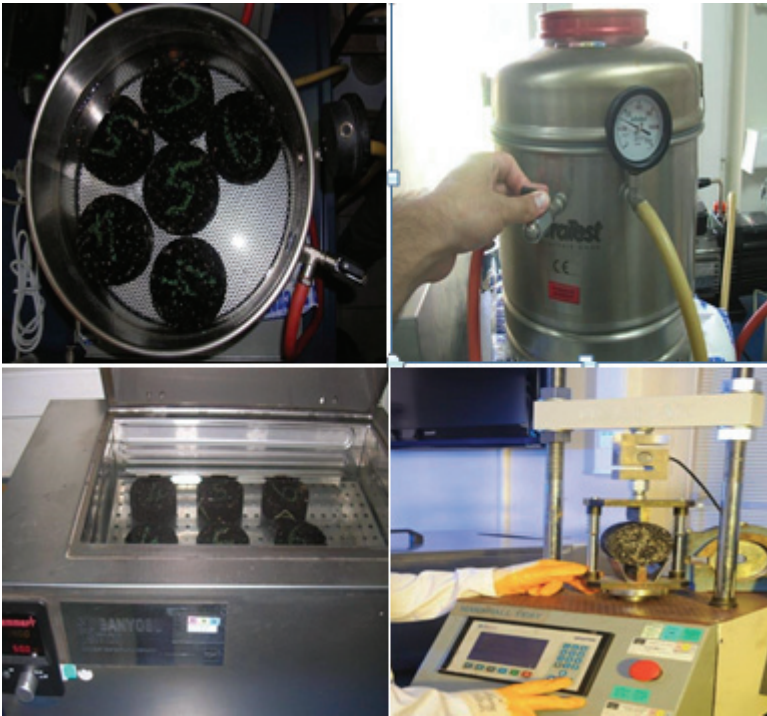
Modifiye Lottman Su Hasarı Testi (AASHTO T 283)

Asfalt kaplamalarda en yaygın sorunlardan biri, esas olarak bağlayıcı kütlesi içindeki kohezyonun azalması veya agregalar ile asfalt bağlayıcı arasındaki adezyonun azalması nedeniyle oluşan su hasarıdır [39]. Asfalt karışımlarının nem duyarlılığını değerlendirmek için Modifiye Lottman testi (AASHTO T283) uygulanmaktadır. Yaygın olarak kabul edilmektedir ve asfalt karışımların suya karşı duyarlılığı için en doğru testlerden biridir [40].

Kullanılan numuneler koşulsuz ve koşullu numuneler olarak iki kısma ayrılmıştır. Koşullu gruptaki numuneler, vakumlu piknometre ile %70 ile %80 arasında su ile doymun hale getirildi. Daha sonra bir plastik film ile kaplandı ve 10 ml su içeren plastik torbaya yerleştirildi. Plastik içindeki numuneler, 20 saat boyunca -18°C'de donmuş halde tutuldu. Dondurma işlemini tamamlayan numuneler 60°C su banyosunda 24 saat bekletilmiştir. Su banyosundan sonra plastik torba ve film çıkartılarak koşullandırma işlemi tamamlanmıştır. Koşullu ve koşulsuz gruplardaki numuneler 2 saat 25°C'de su banyosuna yerleştirildikten sonra dolaylı çekme dayanımı (ITS) testi yapılmıştır. Test makinesi ve numune boyutları tarafından kaydedilen tepe yükü kullanılarak, çekme mukavemetleri eşitlik ile hesaplanır.

$$\text{Çekme Mukavemeti (psi)}=2P/\pi tD$$

(1)



Şekil 5 - Su hasarı deneyi görüntüleri

Çekme mukavemeti (1) bağıntısı ile bulunur. Burada; P Maksimum yük (lbf), t Numune kalınlığı (inç), Numune çapı D (inç) olarak kullanılır. Her briket için çekme mukavemeti hesaplandıktan sonra koşullu numunelerin ortalama çekme mukavemeti, kuru numunelerin ortalama çekme mukavemetine oranı % olarak hesaplanır.

$$ITSR=(ITS_w/ITS_d)\times 100 \quad (2)$$

Dolaylı çekme mukavemeti oranı için (2) bağıntısı kullanılır. Burada; ITSR yüzde (%) cinsinden dolaylı çekme mukavemeti oranı, ITS_w ıslak grubun psi cinsinden ortalama dolaylı gerilme dayanımı, ITS_d kuru grubun psi cinsinden ortalama dolaylı gerilme değeridir. Deney süreçlerine ait bazı görüntüler, Şekil 5'de verilmektedir.

Oluşturulan karışım kombinasyonları için özdeş briket koşullu/koşulsuz su hasarı oranları Tablo 9-Tablo 16 arasında verilmektedir. Tablo 9-16 tablolarında, %50RC ifadesi %50 oranında RAP katılmış karışım anlamında kullanılmaktadır.

Tablo 9 - Kontrol karışım koşullu/koşulsuz özdeş briket su hasarı oranları

Kontrol Karışım		Koşullu		
		S1	S2	S3
Koşulsuz		137,02	127,51	129,45
S1	163,58	0,8376	0,7795	0,7914
S2	154,4	0,8874	0,8258	0,8384
S3	172,5	0,7943	0,7392	0,7504

Tablo 10 - Koşullu/koşulsuz briketler su hasarı oranları (%50RC%0.5HL)

%50RC %0.5HL		Koşullu		
		S1	S2	S3
Koşulsuz		127,44	141,17	123,03
S1	163,58	0,7791	0,8630	0,7521
S2	154,4	0,8254	0,9143	0,7968
S3	172,5	0,7388	0,8184	0,7132

Tablo 11 - Koşullu/Koşulsuz Briketler Su Hasarı Oranları (%50RC%0.5HL%10D)

%50RC %0.5HL%10D		Koşullu		
		S1	S2	S3
Koşulsuz		141,39	138,06	147,10
S1	163,58	0,8644	0,8440	0,8993
S2	154,4	0,9157	0,8942	0,9527
S3	172,5	0,8197	0,8004	0,8528

Tablo 12 - Koşullu/koşulsuz briketler su hasarı oranları (%50RC%0.5HL%5SBS %5D)

%50RC %0.5HL%5SBS %5D		Koşullu		
		S1	S2	S3
Koşulsuz		162,07	160,00	161,95
S1	163,58	0,9908	0,9781	0,9901
S2	154,4	1,0497	1,0363	1,0489
S3	172,5	0,9396	0,9276	0,9389

Tablo 13 - Koşullu/koşulsuz briketler su hasarı oranları (%5SBS)

%5SBS		Koşullu		
		S1	S2	S3
Koşulsuz		130,20	127,89	128,84
S1	163,58	0,7959	0,7818	0,7876
S2	154,4	0,8432	0,8283	0,8344
S3	172,5	0,7548	0,7414	0,7469

Tablo 14 - Koşullu/koşulsuz briketler su hasarı oranları (%50RC%0.5HL %5D)

%50RC %0.5HL %5D		Koşullu		
		S1	S2	S3
Koşulsuz		122,81	146,18	134,02
S1	163,58	0,7508	0,8937	0,8193
S2	154,4	0,7954	0,9468	0,8680
S3	172,5	0,7120	0,8474	0,7769

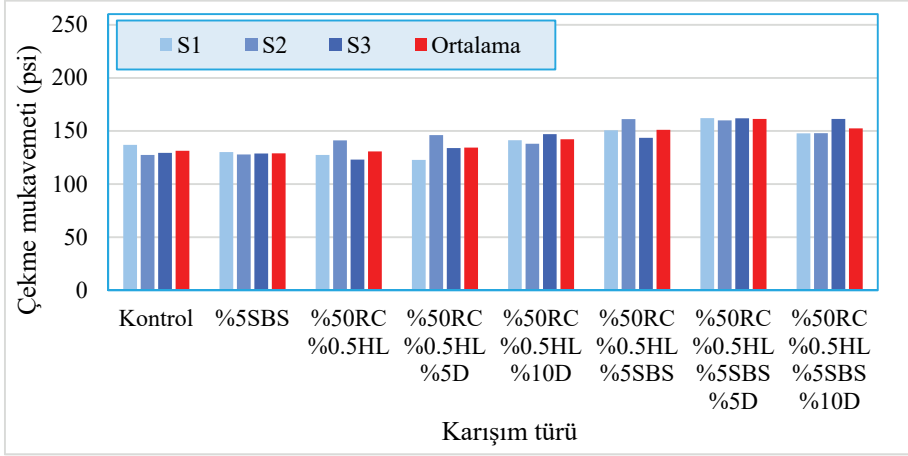
Tablo 15 - Koşullu/koşulsuz briketler su hasarı oranları (%50RC%0.5HL%5SBS)

%50RC %0.5HL%5SBS		Koşullu		
		S1	S2	S3
Koşulsuz		150,71	161,22	143,65
S1	163,58	0,9214	0,9856	0,8782
S2	154,4	0,9761	1,0442	0,9304
S3	172,5	0,8737	0,9346	0,8328

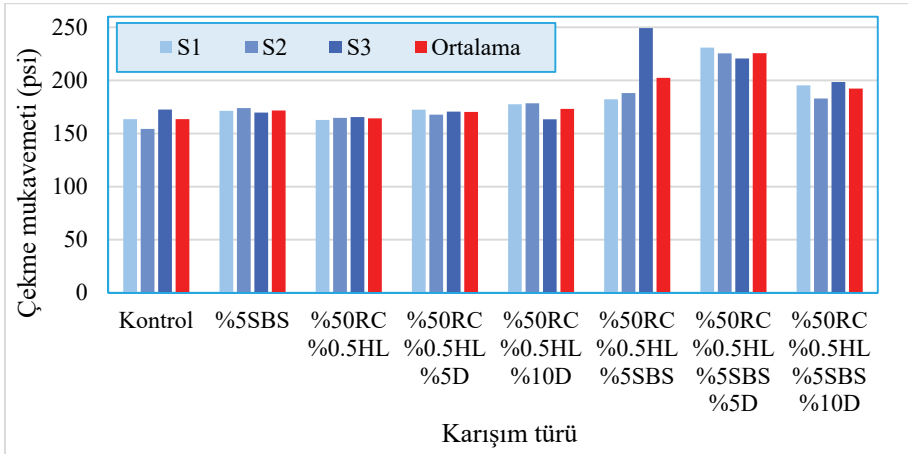
Tablo 16 - Koşullu/koşulsuz briketler su hasarı oranları (%50RC%0.5HL%5SBS%10D)

%50RC %0.5HL %5SBS %10D		Koşullu		
		S1	S2	S3
Koşulsuz		147,88	147,99	161,39
S1	163,58	0,9041	0,9047	0,9866
S2	154,4	0,9578	0,9585	1,0453
S3	172,5	0,8573	0,8579	0,9356

Şekil 6 kontrol ve tüm modifiye karışımların ITS değerlerini sunmaktadır. Şekil 7, kontrol ve modifiye karışımların koşulsuz ITS değerlerini vermektedir. Şekil 6 ve Şekil 7 kapsamındaki veriler irdelendiğinde, uygulanan su hasarı koşullandırmasının ITS değerlerini azalttığı belirtilebilir. %50RAP katkıli karışımlarda Şekil 6 ve Şekil 7’de görüldüğü üzere, karışımda ister HL isterse D olsun karışıma SBS girmesi durumunda ITS değerleri yaklaşık %15 düzeyinde artmaktadır. Bu artış, özellikle koşulsuz briketler için çok belirgin olmaktadır. Koşullandırma durumunda ise yine HL ve D birlikte ve ayrı ayrı varlığında, SBS katkısı bireysel briket anlamında ve ortalama değerleri anlamında yine mukavemet artışı oluşturmaktadır.

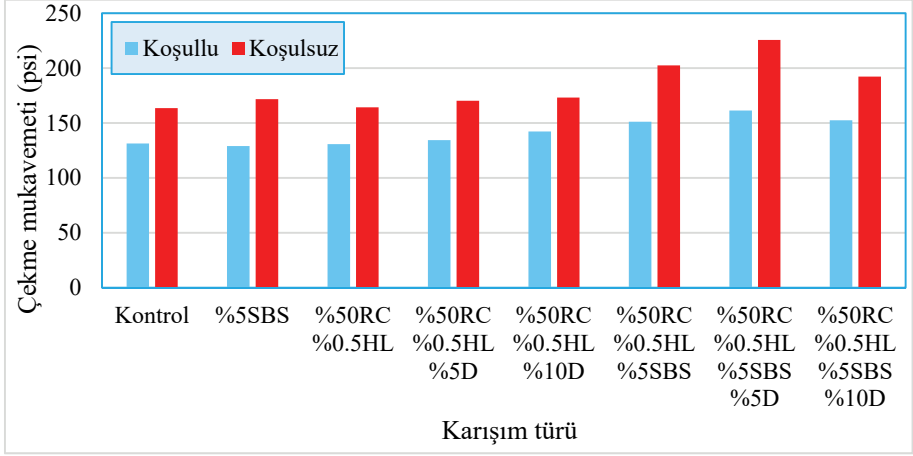


Şekil 6 - Koşullu çekme dayanımı

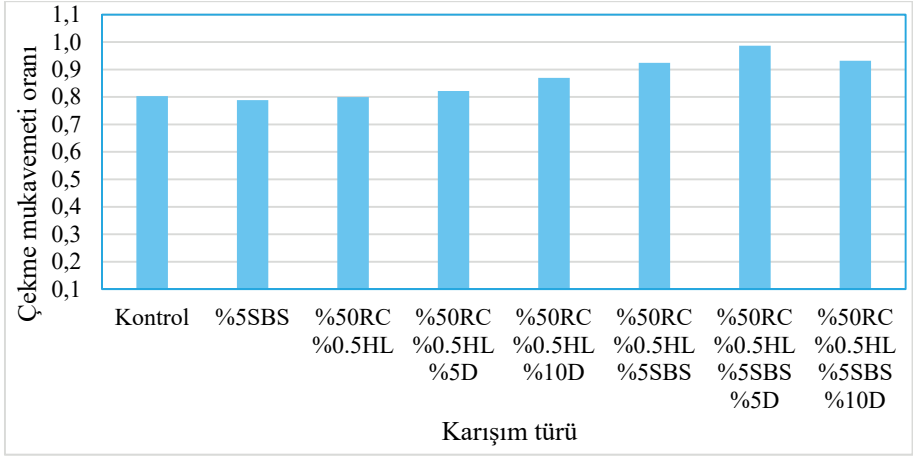


Şekil 7 - Koşulsuz çekme dayanımı

Şekil 8, koşullu ve koşulsuz çekme dayanımlarının ortalamalarını vermektedir. Değerler, kontrol ve katkılı modifiye karışım alternatifleri için, özdeş briketlerin ortalaması olarak sunulmaktadır.



Şekil 8 - Koşullu ve koşulsuz çekme dayanımlarının ortalamaları



Şekil 9 - Kontrol karışımların ve %50RAP katkılı modifiye karışımların koşullu/kontrol koşulsuz dolaylı çekme mukavemeti oranları

Şekil 9'dan görüldüğü üzere, %50RAP katkılı karışımlarda sadece %0.5HL kullanılması su hasarı direnci bakımından henüz iyileşme sağlayamamıştır. Sadece HL kullanılması durumunda bile, %50RAP karışımlar için kontrol ve SBS katkılı kontrol karışıma benzer sonuç alınmaktadır. Sadece su hasarı değerlendirilirse %50RAP karışımlar için bu oran yaklaşımı değeri yüksektir. Diğer performans problemleri ile karşılaştırma yapılmalıdır.

Tekerlek izi ve özellikle yorulma deneyleri gerçekleştirilmelidir. %5D katıldığında kısmi iyileşme başlamıştır. %10D değerinde ise su hasarı direnci belirgin olarak artmıştır. Düşük HL oranında D oranının %5'den %10 değerine artırılması ile su hasarı direncinin artması, HL ve diatomitin birlikte performans artışı ortaya koyabildiğini göstermektedir.

Şekil 9'da kontrol karışımların ve %50RAP katkılı modifiye karışımların koşullu/kontrol koşulsuz dolaylı çekme mukavemeti oranları verilmektedir. 0.75 oran değeri bir kabul kriteri olarak ele alındığında, kontrol ve %5SBS kontrol karışımları kabul kriteri olarak kabul görmektedir. Dikkati çeken önemli nokta, %50RAP katkılı karışımlarda HL ve D katkısı ile SBS varlığında su hasarı oran değerlerinin %50 RAP seçeneklerinde dahi artmış olmasıdır. Kontrol karışımlara göre, %50RAP katkılı karışımların HL-SBS varlığında su hasarı direnci %12 oranında artmaktadır. Bu karışım bünyesinde %5D ilavesi ile kontrol karışımlara göre artış oranı %18,68 olmaktadır. Aynı karışımlarda D oranının %5 değerinden %10 değerine çıkması halinde artış oranı %13 olmaktadır. HL-SBS varlığında, %50RAP katkılı karışımlarda %5D değeri %10D değerine göre daha yüksek su hasarı direnci vermektedir. %50RAP katkılı karışımların su hasarı direncinin orijinal karışımların su hasarı direncinin üzerine çıktığı görülmektedir. HL, su hasarı ve diğer performans yönlerinden önemli üstünlük sağlayan bir katkı malzemesidir. HL katma oranı, literatürde belirtilen ve önerilen genel kullanım oranının yaklaşık 1/3 kısmı olarak kullanılmıştır. Bir karışım uyumlaştırıcı fonksiyonu ve performans geliştirici olarak öngörülmüştür. D katkısı ise yine literatürde %13 oranı olarak genellikle kullanılırken bu araştırmada, çoklu katkı seçenekleri bağlamında, yine daha düşük ve çok düşük oranları olarak %5 ve %10 oranları kullanılmıştır.

HL+SBS birlikte kullanılan %50RAP katkılı karışımlarda ise çok daha yüksek su hasarı direnci söz konusudur. HL+SBS uyumunun daha yüksek bir su hasarı direnci oluşturduğu görülmektedir. Su hasarı performans artışı bakımından %50RAP katkılı karışımlarda HL+D birlikteliğine göre HL+SBS birlikteliği belirgin olarak daha fazla su hasarı direnci oluşturmaktadır. Her ne kadar HL katkısının bitümdeki karboksilik asit bileşenleri ile tepkimeye girdiği değerlendirilse de, esas anlamda bitüm ve karışım modifiyeri olan SBS katkısının HL ile daha yüksek uyum verdiği görülmektedir ve su hasarının da bitüm modifikasyonu ile olan ilişkisinin daha belirgin etkin faktör olduğu anlaşılmaktadır. SBS katkısı %50RAP katkılı karışımlarda sönmüş kireçli ve diatomitli karışımlar için su hasarı direncini daha da artırmış ve bu anlamda 0.90 değerini aşan çok yüksek bir su hasarı direnci oluşturmuştur. %0.5HL katkılı karışımlarda geleneksel SBS kullanım oranında daha düşük diatomit oranı (%5) daha belirgin bir iyileşme sağlayabilmiştir. Bu noktada, katkısız kontrol koşullu karışımlara göre %22,5 yüksek su hasarı direnci RAP katkılı karışımlar **için oluşmuştur ki bu çok üstün başarımlar olarak değerlendirilmektedir**. Buradan şu genel sonucu çıkarmak da olanaklıdır. SBS katkısı gerek sönmüş kireçle gerekse de diatomitle uyumlu çalışmaktadır.

Hidrate kirecin, asfalt kaplamada bağlayıcı filmi sertleştirmek için en çok kullanılan filler maddesi olduğu ve aktif dolgu partikülleri arasındaki güçlü fiziksel-kimyasal etkileşim nedeniyle agrega-asfalt bağını geliştirerek asfalt karışımının nem etkilerine karşı daha az duyarlı olmasına neden olduğu bilinmektedir. HL ve asfalt bağlayıcı gelişmiş kohezyon mukavemeti ve hasar direncine sahip bir bağlayıcı üretmektedir [41]. Diatomit modifiye asfalt karışımın su stabilite değerleri, modifiye edilmemiş karışıma kıyasla önemli ölçüde artmasına rağmen, diatomitin asfalt karışımlarının çatlama direnci üzerinde çok az bir iyileştirmeye sahip olduğu belirtilmektedir [42]. Donma-çözülme döngüsü etkileri altında

diatomit ile modifiye edilmiş asfalt karışımının performansı araştırıldı. Diatomit kullanılarak nem hasarı direncinin açıkça iyileştirildiği belirtilmektedir [43-44]. Uçucu kül ve diatomit dahil olmak üzere üç tip katı atık maddenin, yoğun asfalt karışımların tekerlek izi ve nem-hasar direnci performansını artırmak için kireçtaşı tozuna alternatif doğal filler maddeleri olarak da kullanılabilceği belirtilmektedir [45].

Modifiye Lottman testi ayırt edici ve başarımlı düzeyi yüksek bir deney yöntemi olarak öngörülmektedir. Bu çalışmada da Modifiye Lottman testinin bu ayırt ediciliği görülmüştür. Belli mantık dahilinde kendisine yüklenen fonksiyonları gerçekleştirdiği görülen SBS, HL, Diatomit modifiye karışımlar için bu ayırt ediciliği bu karışımlar noktasında da göstermiştir. Düşük oranda HL, düşük oranda diatomit ve yaygın oranda %5SBS kullanım oranlarında; %50RAP karışımlar su hasarı direnci bakımından çok yüksek bir iyileşme sağlamaktadır. Bu sonuç bu karışımların uzun dönemli performans anlamında tekerlek izi ve diğer performans problemleri açısından da çok iyi sonuç vereceği anlamında değerlendirilmektedir.

Hamburg Tekerlek İzi Deneyi

Laboratuvar tekerlek izi testi sonuçları ile saha performansı arasında daha doğru bir ilişki bulmak için onlarca yıldır çaba sarf edilmiş ve Hamburg tekerlek izi (HWT) testi, asfalt kaplama analiz cihazı (APA), Fransız üstyapı tekerlek izi testi ve akma sayısı testi gibi çeşitli tekerlek izi test yöntemleri geliştirilmiştir. Bu test yöntemleri arasında, HWT tekerlek izi derinliğinin, hızlandırılmış yükleme kolaylığı ve saha tekerlek izi derinliği ile güçlü bir korelasyona sahip olduğu kanıtlanmıştır. Ek olarak, diğer tekerlek izi test yöntemleriyle karşılaştırıldığında, HWT testi, saha karotlarını test numunesi olarak kullanabilmektedir. Açıkça, laboratuvar tekerlek izi numuneleri ile karşılaştırıldığında, HWT tekerlek izi derinliğini kullanarak bir tekerlek izi tahmin modeli oluşturmak anlamlıdır [46].

Tekerlek izi deneyi İSFALT Laboratuvarındaki Şekil 10'da görülen Hamburg tekerlek izi cihazı kullanılarak yapılmıştır. Hamburg cihazı mikser, kompaktör ve test makinesi olmak üzere üç üniteden oluşmaktadır. Her üç ünite de elektronik ısı kontrol donanımlı olarak çalışmaktadır. İç kısımların ısıtılması ve kontrol sistemi, sıcak hava üfleme veya su çevrimi ile yapılabilmektedir. Bütün test kontrolleri bilgisayar yazılımı ile desteklenmektedir. Online display bağlantı görüntüsü ve bilgi depolama özellikleri yardımıyla her bir tekerleğin oluşturduğu iz, sıcaklık ve geçiş sayısı sürekli olarak kaydedilmekte ve ekrandan da birebir izlenebilmektedir. Numune üzerinde oluşan tekerlek izi derinlikleri cihaza bağlı bilgisayar yardımıyla otomatik olarak hesaplanarak grafiğe yansıtılmaktadır. Bitümlü karışımların deformasyona karşı direnci, yüklü bir tekerleğin sabit sıcaklıkta (60°C) tekrarlanan geçişleriyle oluşan tekerlek izi derinliği ölçülerek değerlendirilmiştir. Numunelerde kullanılan optimum bağlayıcı, agrega gradasyonu ve malzeme özellikleri Marshall numuneleri için hazırlanan malzemeyle aynıdır. Deneyde kullanılmak üzere her bir karışım tipi için, 2'şer adet numune hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler deneysel uygulamaya alınmadan önce 48 saat bekletilerek dinlendirilmiştir. Marshall tasarımında tespit edilen 5,3 bitüm içeriğiyle hazırlanan numuneler, test edilmeden önce, deney sıcaklığı olan 60°C'ye gelmesi için, ısı ayarlı test kabininde 4 saat süreyle bekletilmiştir. Deney, sağ ve sol tarafta bulunan iki kalıp içerisinde yer alan aynı özellikteki karışım numunelerine uygulanmış ve bu iki değerin ortalaması deney sonucu olarak kaydedilmiştir. 20000 geçiş yapılarak tekerlek izi

derinlikleri tespit edilmiştir. Grafiklerle gösterilen tekerlek izi ölçümleri tüm karışımlar için Şekil 11-13’de verilmektedir. TS EN 12697-22 prosedürü uygulanmıştır.



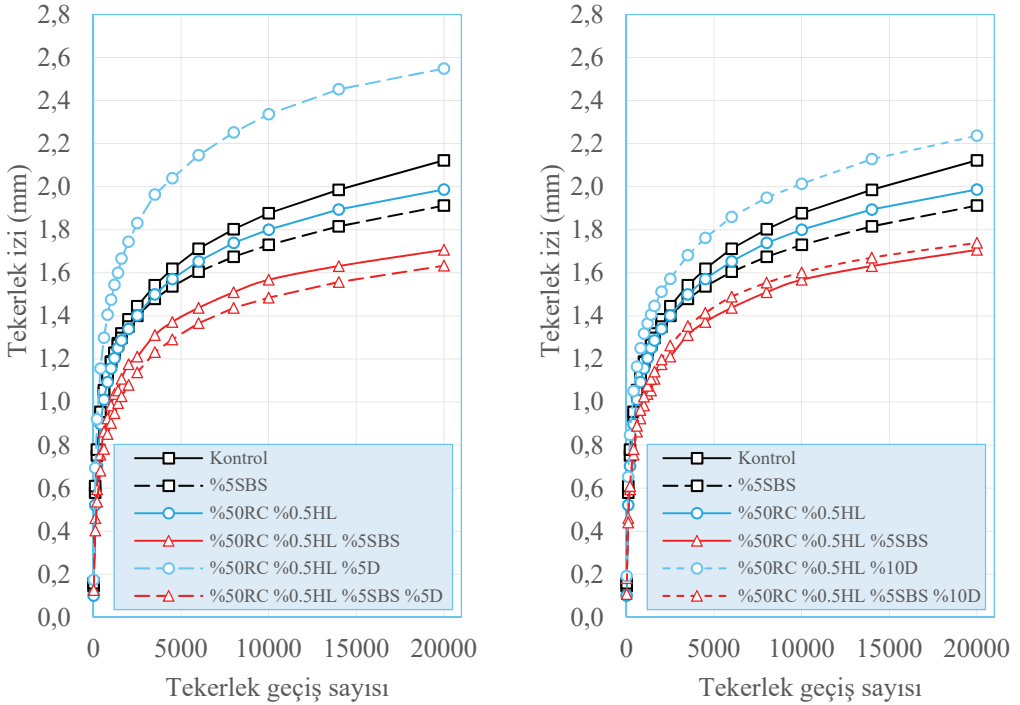
Şekil 10 - HWTT tekerlek izi test cihazı

Su hasarı deneyleri ve Hamburg tekerlek izi deneylerinin seçilen yöntemler olarak tutarlılıkları bu araştırmada oluşturulan geleneksel ve modifiye karışımlar için de net olarak gözlenmektedir. Geleneksel RAP içermeyen kontrol SBS karışımının 20 bin yükleme sonunda oluşturduğu deformasyon derinliği 1,89mm olmuştur. Bu karışıma %50 oranında RAP katılmasıyla, sönmüş kirecin birlikte kullanılması durumunda 1,95mm tekerlek izi derinliği oluşmuştur. %50RAP olmasına karşın bu değer, katkısız ve RAP olmayan karışımların yani kontrol karışımların 2,34mm tekerlek izi derinliğine göre %20 daha fazla bir tekerlek izi direnci oluştuğunu göstermektedir.

Şekil 11 karışımlar için sol tekerlek grafiklerini, Şekil 12 sağ tekerlek grafiklerini ve Şekil 13 ise ortalama tekerlek izi grafiklerini sunmaktadır. %50RAP katkılı karışımlarda HL ve SBS katkılı karışımlara %5diatomit ilavesinde 1,85mm; %10 diatomit katılması durumunda ise 1,83mm tekerlek izi derinlikleri oluşmaktadır. %50RAP katkılı seçeneklerde karışıma HL+SBS katkı birlikteliğine diatomit eklenmesi düşük ya da orta oranda kullanım noktasında (%5-%10) tekerlek izi direncini artırmaktadır. %50RAP katkılı seçeneklerde %5SBS oranında, düşük oranda HL (%0,5) ve düşük oranlı diatomit için tekerlek izi dirençleri; hiç katkısız kontrol karışımlara göre %27 oranında; SBS katkılı kontrol hasarsız karışımlara göre %3 oranında daha iyi sonuç vermektedir. Açıkça SBS katkısının tekerlek izi direnci konusundaki üstünlüğü görülmektedir. %50RAP katkılı karışımlarda da SBS katkısının HL ve HL+diatomit birlikteliğiyle uyumlu çalışması SBS katkısının farklı filler malzemeler ile rahatlıkla kullanılabileceğini işaret etmektedir. Oluşturulan SBS’li ve düşük oranlı HL+Diatomit seçenekleri %50RAP katkılı karışımları orijinal karışımlara göre daha yüksek tekerlek izi direncine kavuşturmuştur. Oluşturulan bu katkı seçenekleri %50RAP geri dönüşüm konusunu mümkün kılmaktadır.

Şekil 13’de ortalama tekerlek izi derinlikleri (mm) verilmektedir. Artan diatomit oranına göre karşılaştırma yapılması ayrıca hedeflendiği ve grafiklerde anlaşılabilirliğin oluşması için grafikler bu bakımdan düzenlenmiştir. Tekerlek izi bakımından SBS polimer üstün performans sağlamaktadır. 20000 yükleme altında tüm RAP %50 katkılı karışımlarda sabit

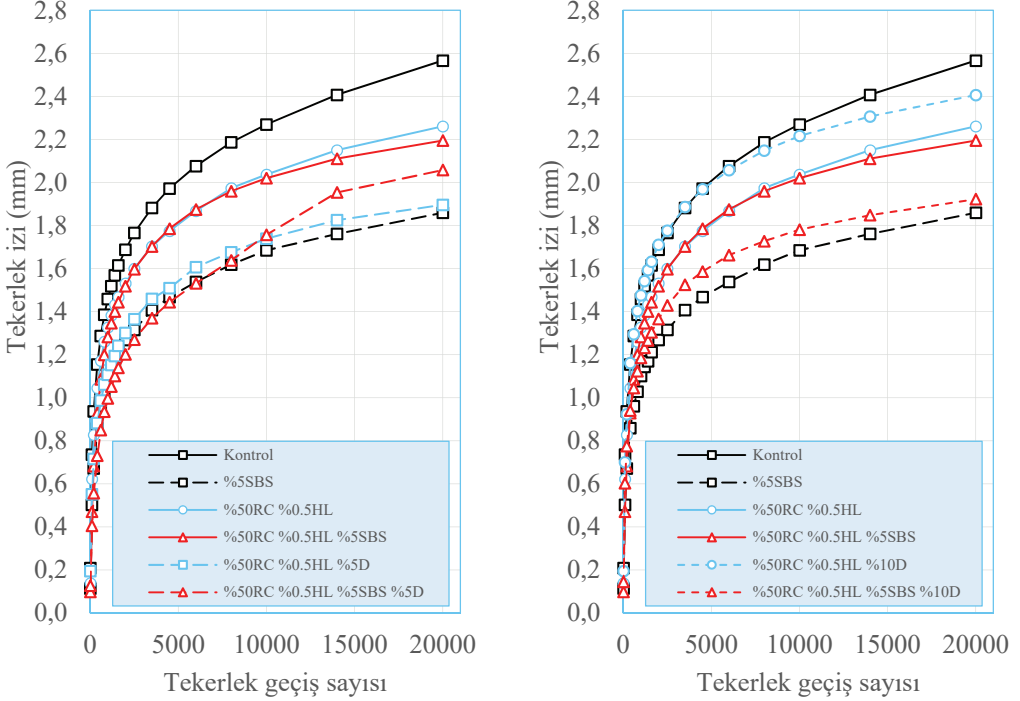
%0,5HL katkısı bulunmaktadır. Su hasarı deneylerindeki gibi burada da SBS ve HL arasında, HL düşük değerde kullanılsa da (1/3) önemli bir birlikte çalışma etkisi (sinerji) oluşmaktadır. SBS ve HL katkıları bir arada yüksek uyumludur ve birlikte çalışmaktadır.



Şekil 11 - Sol tekerlek deformasyon eğrileri

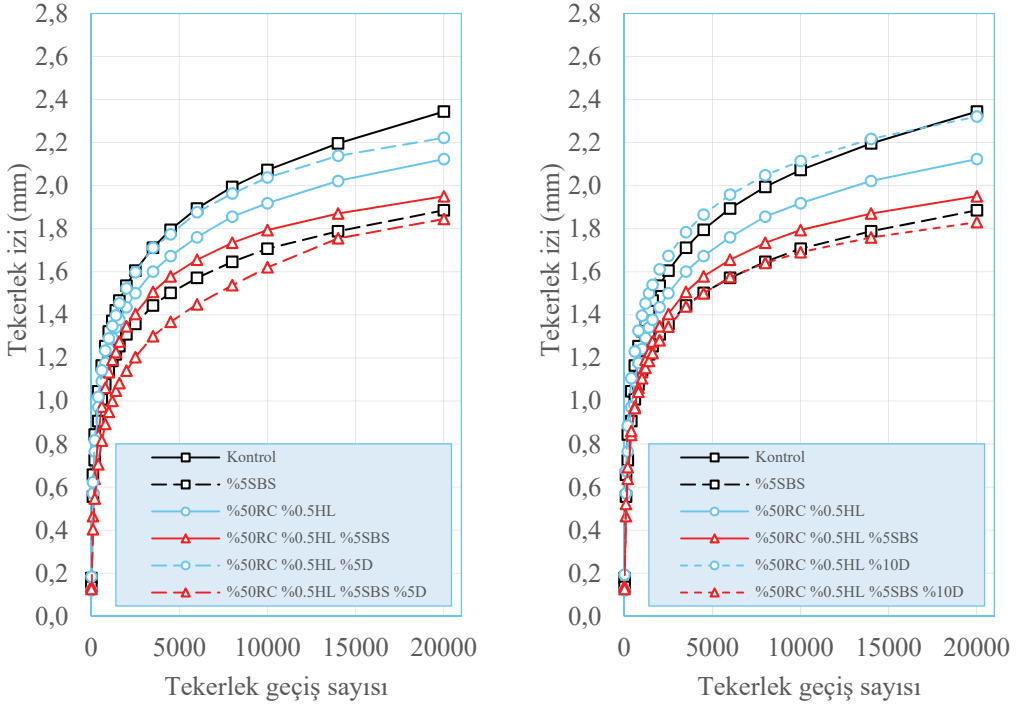
SBS katkısının yanına HL eklenmesi, SBS+HL birlikteliğine diatomit eklenmesi durumunda Hamburg tekerlek izi testi bu katkısız gelişim düzeyini tekerlek izi direnci bakımından ortaya koymaktadır. Bu bakımdan Hamburg tekerlek izi deneyi bu ayırt ediciliği noktasında üstün bir deney yöntemi olarak değerlendirilmiştir. Hamburg tekerlek izi deneyi kuru ortam olarak gerçekleştirilmiştir. Kullanılan HL katkısının kimyasal bir modifiyer olarak gerek agrega ile suyun varlığında ve gerekse de bitümün karboksilik asitleriyle girdiği tepkime sonucunda tekerlek izi bakımından çok daha yüksek tekerlek izi direncinin aktif adezyon koşullarında oluşacağı değerlendirilmektedir. Bu kuru deneyde de SBS kontrol karışımlara göre belirgin olarak tekerlek izi direncini artırmaktadır. Su hasarı direnci bakımından olduğu gibi tekerlek izi direnci bakımından da %50RAP katkılı karışımlar SBS ve HL ve D katkıları ile tekerlek izi direnci bakımından kontrol karışımlardan %28-%45 düzeyinde daha iyi tekerlek izi direnci göstermiştir. Bu durum seçilen 20000 yükleme koşulu için geçerli olmuştur. Su hasarı sonuçları ile birlikte değerlendirildiğinde daha yüksek yükleme sayıları yani uzun dönemli tekerlek izi direnci bakımından oluşturulan bu katkı birleşiminin daha da üstün tekerlek izi direnci göstereceği değerlendirilmelidir. Bu konu diğer araştırmalara konu edilecektir. Oluşturulan tüm %50RAP katkılı modifiye karışımların kontrol karışımlardan daha yüksek

tekerlek izi direnci vermesi %50RAP karışımların uygulamada başarıyla kullanılabileceğini göstermektedir. Araştırma sonuçlarının yorulma performansı bakımından da seçilen bir pilot karışım olarak %50RAP+%0.5HL+%5SBS+%5diatomit karışımı için gerçekleştirilmesi düşünülmektedir.



Şekil 12 - Sağ tekerlek deformasyon eğrileri

Filler ilavesinin, karışımdaki düşük oranına rağmen karışım mukavemetini artırdığı kanıtlanmıştır. Filler tozunun ikili rol oynadığına inanılmaktadır. Filler temel işlevi; boşlukları doldurmak, büyük agregalar arasında çok sayıda temas noktası sağlamak ve böylece bağlayıcı ve agrega birbirine geçme etkilerini artırarak karışımı güçlendirmektir. Diğer işlevi, bağlayıcıyı sertleştirmek ve büyük agregalar parçacıkları arasında daha iyi yapışmaya katkıda bulunan daha **yüksek tutarlılıklı** bir bağlayıcı veya mastik oluşturmaktır [47]. D kireçtaşı tozuna kıyasla mineral fillere uygun alternatif olduğundan, giderek daha fazla ilgi kazanmaktadır. D-kireçtaşı tozunun çeşitli hacim oranlarına (0:1, 0,25:0,75, 0,5:0,5, 0,75:0,25 ve 1:0) sahip beş grup kum asfalt, SLD yöntemi ile değerlendirildi. D kullanımıyla, kum asfaltların sıkıştırma mukavemeti, deformasyon özellikleri ve düşük sıcaklık çatlak direncinin iyileştirildiğini görüldü. Kireçtaşı-D optimal oranı; sekant modülü ve sünme gerininim sonuçlarına göre SLD yöntemiyle (0,327:0,673) olarak belirlendi [48].



Şekil 13 - Ortalama tekerlek izi eğrileri

Şekil 13’de eğrileri verilen ortalama tekerlek izi değerlerinin, sayısal olarak belirli tekerlek geçiş sayılarında tekerlek izi miktarları (mm) Tablo 17’de verilmektedir.

Diatomit asfalt mastiğinin; kireçtaşı, HL ve uçucu kül asfalt mastiklerinden daha iyi performans gösterdiği ve potansiyel filler olduğu belirtilmektedir [35]. DMA, yüksek sıcaklık ve reolojik özellikleri iyileştirmekte, düşük sıcaklık özelliğini ise önemli ölçüde etkilememektedir. DMA yaşlanma direnci, diatomit içeriği arttıkça önemli ölçüde iyileşmektedir [49-50]. Asfalt filler mastiği üretmek için %2 içerikli HL, çimento ve D seçilmiştir. Filler kullanımı mastiklerin sertliğini artırmaktadır. D mastik, yüksek sıcaklık ve stres seviyelerinde tekerlek izine karşı en iyi direnci sergiler ve diatomit filler kullanımının uygun olduğunu doğrular [51]. Mineral fillerlerin birkaç polimer modifiye bitümün reolojik davranışına etkisi—araştırıldı. PMB’leri üretmek için saf bir bitüm ve iki tip polimer (elastomerik ve plastomerik) kullanılmış ve mastik elde etmek için farklı minerallere (kireçtaşı ve bazalt) sahip iki filler maddesi seçildi. Değiştirilmemiş mastikler için BBR sonuçları, filler tipinden bağımsız olarak sertlik artışının benzer olduğunu gösterirken, polimer modifiye mastikler için sonuçlar, takviye derecesinin filler/polimer tipi kombinasyonuna bağlı olduğunu göstermektedir. Filler ilavesi, filler/polimer kombinasyonuna bağlı olarak, kalıcı deformasyon duyarlılığını azaltmakta ve elastik tepkiyi artırmaktadır. Filler ile bitüm arasında fiziksel-kimyasal etkileşim oluşmakta ve etkileşim seviyesinin büyük ölçüde polimer modifikasyonunun tipine bağlı olduğu görülmektedir [47].

Tablo 17 - Belirli tekerlek geçiş sayılarında tekerlek izi miktarı (mm)

Tekerlek geçişi	Kontrol			%5SBS			%50RC %0,5HL			%50RC %0,5HL %5SBS			%50RC %0,5HL %10D			%50RC %0,5HL %5SBS %5D			%50RC %0,5HL %5D					
	Sol	Sağ	Ort	Sol	Sağ	Ort	Sol	Sağ	Ort	Sol	Sağ	Ort	Sol	Sağ	Ort	Sol	Sağ	Ort	Sol	Sağ	Ort			
10	0,15	0,21	0,18	0,16	0,11	0,14	0,10	0,14	0,12	0,18	0,10	0,14	0,11	0,15	0,13	0,19	0,20	0,19	0,13	0,13	0,13	0,17	0,20	0,18
100	0,58	0,74	0,66	0,61	0,50	0,56	0,52	0,62	0,57	0,46	0,47	0,47	0,44	0,60	0,52	0,65	0,70	0,68	0,40	0,41	0,40	0,69	0,55	0,62
200	0,75	0,94	0,84	0,78	0,67	0,73	0,70	0,83	0,77	0,60	0,68	0,64	0,61	0,78	0,69	0,85	0,92	0,89	0,54	0,56	0,55	0,92	0,72	0,82
500	0,99	1,23	1,11	1,01	0,92	0,96	0,95	1,11	1,03	0,80	1,02	0,91	0,84	0,99	0,92	1,11	1,24	1,18	0,73	0,80	0,77	1,23	0,93	1,08
1000	1,19	1,46	1,32	1,19	1,10	1,14	1,16	1,33	1,24	0,98	1,28	1,13	1,03	1,19	1,11	1,32	1,48	1,40	0,90	1,00	0,95	1,48	1,11	1,29
2000	1,38	1,69	1,54	1,35	1,27	1,31	1,34	1,53	1,44	1,18	1,52	1,35	1,20	1,37	1,28	1,51	1,71	1,61	1,08	1,20	1,14	1,74	1,30	1,52
4000	1,58	1,93	1,76	1,51	1,43	1,47	1,54	1,74	1,64	1,35	1,74	1,55	1,38	1,56	1,47	1,72	1,93	1,83	1,26	1,41	1,34	1,99	1,48	1,74
6000	1,71	2,08	1,89	1,61	1,54	1,57	1,65	1,87	1,76	1,44	1,87	1,66	1,49	1,66	1,58	1,86	2,06	1,96	1,37	1,53	1,45	2,15	1,61	1,88
10000	1,88	2,27	2,07	1,73	1,69	1,71	1,80	2,04	1,92	1,57	2,02	1,79	1,60	1,78	1,69	2,01	2,22	2,12	1,49	1,76	1,62	2,34	1,74	2,04
12000	1,94	2,34	2,14	1,78	1,72	1,75	1,85	2,10	1,98	1,60	2,07	1,84	1,64	1,82	1,73	2,08	2,27	2,17	1,53	1,87	1,70	2,39	1,77	2,08
14000	1,99	2,41	2,20	1,82	1,76	1,79	1,89	2,15	2,02	1,63	2,11	1,87	1,67	1,85	1,76	2,13	2,31	2,22	1,56	1,95	1,76	2,45	1,83	2,14
16000	2,03	2,46	2,25	1,85	1,81	1,83	1,92	2,19	2,05	1,69	2,14	1,91	1,70	1,88	1,79	2,17	2,35	2,26	1,58	2,01	1,80	2,49	1,85	2,17
18000	2,08	2,51	2,30	1,88	1,84	1,86	1,96	2,23	2,09	1,68	2,17	1,93	1,72	1,90	1,81	2,21	2,38	2,29	1,61	2,04	1,82	2,54	1,89	2,21
20000	2,12	2,57	2,34	1,91	1,86	1,89	1,99	2,26	2,12	1,71	2,20	1,95	1,74	1,92	1,83	2,24	2,41	2,32	1,63	2,06	1,85	2,55	1,90	2,22

Diatomitin, mineral tozlara kıyasla asfalt mastiğin yaşlanmasını önemli ölçüde iyileştirdiği görüldü. Asfalt mastik, diatomit değiştirme oranı %75 olduğunda yüksek sıcaklıkta optimum mekanik özelliklere sahip olmaktadır [52]. Orta ve yüksek sıcaklıklarda asfalt mastik üzerinde diatomitin iyileştirmesinin HL ve uçucu külden daha etkin olduğu belirtilmektedir [35].

Diatomit tekerlek izi direncini önemli ölçüde iyileştirmekte buna karşın eğilme rijitlik modülü arttığında düşük sıcaklık performansını düşürmektedir. Diatomit ilavesi; asfalt mastik ve karışımının yüksek sıcaklık stabilitesine ve yaşlanma karşıtı performans gelişimine katkıda bulunmaktadır [53]. Diatomitin asfalt karışımların rijitlik modülü üzerinde önemli etkiye sahip olduğu, asfalt karışımların tekerlek izi ve yorulma önleme performansını artırdığı görüldü. Diatomit, asfalt karışımların çeşitli özelliklerini büyük ölçüde iyileştirmiştir. Ancak bu çalışmalar yoğun gradasyonlu asfalt karışımlarına dayalı iken, açık gradasyonlu karışımlara yönelik araştırmalar daha azdır [36].

SONUÇLAR

%15-20 RAP katkılı karışımlar, dizayn süreçlerinde bir sorun oluşturmaksızın rahatlıkla kullanılabilir. %50 oranında RAP kullanımı yüksek bir orandır ve bu araştırmada daha yüksek ekonomik ve diğer kazanımlar noktasında bu karışımlar sorgulanmaktadır.

Asfalt karışımının üretim aşamasında, plantlerde bitüm oksidasyonu ve buharlaşan bileşen kaybıyla yaşlanma oluşmaktadır. Arazi koşullarında artan oksidasyon ise uzun süreli yaşlanma olmaktadır. RAP katkılı karışımlar bu anlamda iki tür yaşlanmaya da maruz kalmışlardır ve tekrar üretime girdiklerinde yeniden yaşlanacaklardır. Bu bakımdan; diatomit katkısına silika içeriği ile ısı yayılımını kontrol ederek yaşlanmayı azaltması yönüyle karar verilmiştir. Sönmüş kirecin bitüm üzerindeki yaşlanma önleyici etkileri ayrıca düşünülmüştür. %50RAP katkılı karışımlarda; SBS katkısı ve bu filler türü katkıların birlikte çalışma etkisi değerlendirilmiş ve katkı seçim süreci özellikle yaşlanma yönlü iyileştirme pratiği üzerine odaklandırılmıştır. SBS polimer varlığında, SBS polimer ile birlikte çalışma etkisi ele alınarak ve düşük oranlarda da performans artışı sağladıkları bilindiğinden dolayı; D ve HL yaygın kullanım oranlarının oldukça düşük değerlerinde (1/3) kullanılmıştır. Diatomitin yeni perspektif olarak, düşük ve orta kullanım oranı (%5-%10) seçenekleri de dahil edilmiştir (Maksimum %13 olarak biliniyor). SBS polimeri %5 yaygın kullanım oranında kullanılmıştır. Bu araştırmadan aşağıda belirtilen sonuçları çıkarmak olanaklı gözükmektedir:

Modifiye Lottman testinin; D, HL, SBS ve RAP'lı karışımlar için ayırt edici olduğu ve performansları başarılı yansıttığı görülmektedir. %0,5 HL oranında (düşük HL oranı-%1-1,5 genelde kullanılan); D oranının %5'den (%18 artış) %10 değerine (%13 artış) artırılması ile su hasarı direncinin artması, HL ve diatomitin birlikte performans artışı oluşturduğunu göstermektedir. HL+SBS birlikteliği (0.92); HL+D (%5D) birlikteliğine göre (0.87) daha yüksek bir su hasarı direnci oluşturmaktadır. SBS katkısı gerek HL gerekse de diatomitle uyumlu çalışmaktadır. Düşük oranda HL, düşük oranda D ve yaygın oranda %5SBS kullanım oranlarında; %50RAP karışımlar su hasarı direnci bakımından çok yüksek (0.99) bir iyileşme (%19 fazla) sağlamaktadır.

%50RAP katkılı (HL-D-SBS) modifiye karışımların; kontrol karışımlardan %27 daha yüksek tekerlek izi direnci vermesi bu karışımların başarıyla kullanılabileceğini göstermektedir. %50RAP seçenekleri, seçilen katkı birleşimleri ile orijinal karışımlardan daha dirençli hale hem tekerlek izi hem de su hasarı deneylerinde getirilmiştir. Düşük kullanım oranlı diatomit+HL birlikteliğinin, SBS oranı azaltılması için kullanılıp kullanılmayacağı araştırılmalıdır.

Kaynaklar

- [1] Williams BA, Copeland A, Ross TC. Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2017 Natl. Asph. Pavement Assoc., vol. 8th Annual, no. Information Series 138 (8th edition), IS 138(8e).
- [2] Williams BA, Willis JR, Shacat J. Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2021, Natl. Asph. Pavement Assoc., vol. 12th Annual, no. 12th Annual Asphalt Pavement Industry Survey IS 138 Produced December 2022.
- [3] Zaumanis M, Cavalli M C and Poulidakos LD. How not to design 100% RAP using performance-based tests, Road Mater. Pavement Des., vol. 0, no. 0, pp. 1–13, 2018.
- [4] Tran N, Taylor A, Turner P, Holmes C and Porot L. Effect of rejuvenator on performance characteristics of high RAP mixture, Asph. Paving Technol. Assoc. Asph. Paving Technol. Tech. Sess., vol. 85, pp. 283–313, 2016.
- [5] Zaumanis M. 100 % Recycled Hot Mix Asphalt and the Use of Rejuvenators, Worcester Polytechnic Institute 2014.
- [6] Tarsi G, Tataranni P, Sangiorgi C. The Challenges of Using Reclaimed Asphalt Pavement for New Asphalt Mixtures: A Review, 13, 4052; doi:10.3390/ma13184052 Materials 2020.
- [7] Brett AW, Willis JR, Ross TC. Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 9th ed.; IS 138; National Asphalt Pavement Association: Greenbelt, MD, USA, 2019.
- [8] European Asphalt Pavement Association—EAPA. Asphalt in Figures 2018; EAPA: Brussels, Belgium, 2018.
- [9] Copeland, A. Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice; No. FHWA-HRT-11-021; Federal Highway Administration: McLean, VA, USA, 2011.
- [10] Aurangzeb Q, Al-Qadi IL, Ozer H, Yang R, Hybrid life cycle assessment for asphalt mixtures with high RAP content, Resour. Conserv. Recycl. 83 77–86, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.12.004>. (2014)
- [11] Visintine BA. An investigation of various percentages of reclaimed asphalt pavement on the performance of asphalt pavements, Materials Science, 17 March 2011.
- [12] Li J, Xiao F, Zhang L, Amirhanian SN. Life Cycle Assessment And Life Cycle Cost Analysis Of Recycled Solid Waste Materials In Highway Pavement: A Review, J. Clean. Prod. 233 1182–1206, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.061>, 2019.

- [13] Li X, Marasteanu MO, Williams RC, Clyne TR. Effect of reclaimed asphalt pavement (proportion and type) and binder grade on asphalt mixtures, *Transp. Res. Rec.* 2051 (1) 90–97, <https://doi.org/10.3141/2051-11> 2008.
- [14] Zaumanis M, Mallick RB, Frank R, 100% Recycled Hot Mix Asphalt: A Review And Analysis, *Resour. Conserv. Recycl.* 92, 230–245, 2014.
- [15] Karimi MM, Jahanbakhsh H, Nejad FM. Energy-Based Approach To Characterize Induced Heating Of Asphalt Concrete Under Electromagnetic Field, *Constr. Build. Mater.* 273 2021.
- [16] Zhang K., Huchet F, Hobbs A. A Review Of Thermal Processes In The Production And Their Influences On Performance Of Asphalt Mixtures With Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), *Constr. Build. Mater.* 206 (2019) 609–619,
- [17] Kandhal PS, Mallick RB. *Pavement Recycling Guidelines For State And Local Governments: Participant’s Reference Book.* No. FHWA-SA-98-042, 1997.
- [18] Zaumanis M and Mallick RB. Review Of Very High-Content Reclaimed Asphalt Use In Plantproduced Pavements: State Of The Art, *Int. J. Pavement Eng.*, vol. 16, no. 1, pp. 39–55 2015
- [19] Molenaar AAA, Hagos ET, Van de Ven MFC. Effects of Aging on the Mechanical Characteristics of Bituminous Binders in PAC, *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 22, no. 8, pp. 779– 787, 2010.
- [20] Rathore M et al. *Asphalt Recycling Technologies: A Review on Limitations and Benefits*, IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 660 012046, IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/660/1/012046, 2019.
- [21] Anderson E, Daniel JS. Long-Term Performance Of Pavement With High Recycled Asphalt Content: Case Studies. *Transportation Research Record: Journal Of The Transportation Research Board*, No. 2371. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC, pp 1–12. doi:10.3141/2371-01 2013.
- [22] Apeageyi A, Clark T, Rorrer T. Stiffness of high RAP asphalt mixtures: Virginia’s experience, *J Mater Civ Eng* 25(6):747–754. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000543, 2013.
- [23] Olita S, Ciampa D. SuPerPave® Mix Design Method of Recycled Asphalt Concrete Applied in the European Standards Context, *Sustainability*, 13, 9079. <https://doi.org/10.3390/su13169079>, 2021.
- [24] Mangiafico S et al. Statistical Analysis Of The Influence of RAP And Mix Composition On Viscoelastic And Fatigue Properties Of Asphalt Mixes, *Materials and Structures* 48:1187–1205 DOI 10.1617/s11527-013-0225-z, 2015.
- [25] Cong PL, Zhou B, Chen SF. Low Temperature Rheological And Mechanistic Characteristics Of Three Different Types Of Asphalt Binders, *Int. J. Pavement Res. Technol.* 4 307–312, 2011.

- [26] Dony A, Colin J, Bruneau D, Drouadaine I, Navaro J. Reclaimed Asphalt Concretes With High Recycling Rates: Changes In Reclaimed Binder Properties According To Rejuvenating Agent, *Constr. Build. Mater.* 41 175–181, 2013.
- [27] Gonzalez O, Munoz ME, Santamaría A. Rheology And Stability Of Bitumen/ EVA Blends, *Eur. Polym. J.* 40 2365–2372, 2004.
- [28] Cong P et al. Investigation Of The Properties Of Asphalt Mixtures Incorporating Reclaimed SBS Modified Asphalt Pavement, *Construction and Building Materials* 113 334–340, 2016.
- [29] Colbert B, You Z. The Properties Of Asphalt Binder Blended With Variable Quantities Of Recycled Asphalt Using Short Term And Long Term Aging Simulations, *Constr. Build. Mater.* 26, 552–557, 2012.
- [30] Yu X, Zaumanis M, Santos S, Poulidakos LD. Rheological, Microscopic, And Chemical Characterization Of The Rejuvenating Effect On Asphalt Binders, *Fuel* 135 162–171, 2014.
- [31] Valdes G, Perez-Jimenez F, Miro R, Martinez A, Botella R. Experimental Study Of Recycled Asphalt Mixtures With High Percentages Of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), *Constr. Build. Mater.* 23 1289–1297, 2011.
- [32] Shirodkar P, Mehta Y, Nolan A, Sonpal K, Norton A, Tomlinson C, Dubois E, Sullivan P, Sauber R. A Study To Determine The Degree Of Partial Blending Of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Binder For High RAP Hot Mix Asphalt, *Constr. Build. Mater.* 25 150–155, 2011.
- [33] Huang B, Li G, Vukosavljevic D, Shu X, Egan BK. Laboratory Investigation of Mixing Hot-Mix Asphalt with Reclaimed Asphalt Pavement. In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1929, Transportation Research Board of the National Academies, Washington D.C. pp. 37–45. 2005.
- [34] Bouron S, Hammoum F, Ruat H. et al. Improving The Durability Of Asphalt Mixtures With Hydrated Lime: Field Results From Highway A84, *Case Studies in Construction Materials* 14 e00551 2021.
- [35] Cheng Y, Tao J, Jiao Y et al. Influence Of The Properties Of Filler On High And Medium Temperature Performances Of Asphalt Mastic, *Construction and Building Materials*, vol. 118, pp. 268–275, 2016.
- [36] Guo Q, Li L, Cheng Y, Jiao Y, and Xu C. Laboratory Evaluation On Performance Of Diatomite And Glass Fiber Compound Modified Asphalt Mixture, *Materials and Design*, vol. 66, pp. 51–59, 2015.
- [37] Zhou Z. Experimental Study on Mix Design of Diatomite Modified Asphalt Mixture. Master's Thesis, Jilin University, Changchun, China, 2008.
- [38] Li ZS. A Study on The Performance of Diatomite Modified Asphalt Mixture. Master's Thesis, Jilin University, Changchun, China, 2008.
- [39] Jahangiri B et al. Performance Evaluation of Asphalt Mixtures With Reclaimed Asphalt Pavement And Recycled Asphalt Shingles In Missouri, *Transp. Res. Rec.* 2019.

- [40] AASHTO (2014). Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-induced Damage. AASHTO T 283e14. American Association of State and Highway Transportation Officials, Washington, DC.
- [41] Epps J, Berger E, and Anagnos JN. Treatments. In: Moisture Sensitivity Of Asphalt Pavements: A National Seminar. Washington, D.C.: Transportation Research Board of the National Academies. 117–183, 2003.
- [42] Yang C, Xie J, Zhou X, Liu Q, Pang L. Performance Evaluation and Improving Mechanisms of Diatomite-Modified Asphalt Mixture. *Materials*, 11, 686, 2018.
- [43] Shukry NAM, Hassan NA, Abdullah ME, Hainin MR, Yusoff NIM, Jaya RP, Mohamed A. Effect Of Various Filler Types On The Properties Of Porous Asphalt Mixture. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 342, 012036, 2018.
- [44] Luo S, Chen N, Xu H, Tan B, Chen, Q. Study on Indoor Pavement Performance of Diatomite-Modified Asphalt Mixture. In Proceedings of the 2016 International Conference on Innovative Material Science and Technology (IMST 2016), Shenzhen, China, 19–21 August 2016.
- [45] Zhang H. Optimum Filler–Bitumen Ratio of Asphalt Mortar Considering Self-Healing Property, *J. Mater. Civ. Eng.* ©ASCE, 31-8, American Society of Civil Engineers [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002792](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002792) August 2019.
- [46] Chen L et al. Rutting Prediction Model for Semirigid Base Asphalt Pavement Based on Hamburg Wheel Tracking Test, *Int. J. Geomech.*, 21(11): 04021215, ASCE, 2021.
- [47] Cardone, F et al. Influence Of Mineral Fillers On The Rheological Response Of Polymer-Modified Bitumens And Mastics, *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2 (6), 373–381, 2015.
- [48] Cheng Y et al. Effects of Diatomite–Limestone Powder Ratio on Mechanical and Anti-Deformation Properties of Sustainable Sand Asphalt Composite, *Sustainability*, 10, 808, 2018.
- [49] Cong P, Chen S, Chen H. Effects Of Diatomite On The Properties Of Asphalt Binder, *Constr. Build. Mater.* 30, 495–499, 2012.
- [50] Cong P, Liu N, Tian Y, Zhang Y. Effects Of Long-Term Aging On The Properties Of Asphalt Binder Containing Diatoms. *Constr. Build. Mater.* 123, 534–540, 2016.
- [51] Shukrya NAM et al. Influence Of Diatomite Filler On Rheological Properties Of Porous Asphalt Mastic, *International Journal Of Pavement Engineering*, VOL. 21, NO. 4, 428–436 <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1483504>, 2020.
- [52] Wang YD. Research On The Anti-Ageing Mechanism And Mechanical Properties Of Diatomite Modified Asphalt Binder [Master's thesis], Jilin University, Changchun, China, 2015.
- [53] Zhu DP, Zhang JZ, Chen JB, Yuan K, Cheng C. Experiment On Road Performance Of Diatomite Modified Asphalt Mixture in Permafrost Regions, *China Journal of Highway and Transport*, vol. 26, no. 4, pp. 23–28, 2013.

