

## Asfalt Kaplamalarda Bitüm Oranına Bağlı Olarak Sıkıştırma Sıcaklığının Etkisinin Marshall Deneyi Parametreleri ile İncelenmesi

Nazlı Gül ARAZ<sup>1</sup>, Atakan AKSOY<sup>2</sup>, Mustafa Taha ASLAN<sup>2,\*</sup>, Erol İSKENDER<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Fen Mühendislik ve İnşaat Taahhüt Ticaret Limited Şirketi, 61200, Trabzon, Türkiye

<sup>2</sup> Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon, Türkiye

<sup>3</sup> Karadeniz Teknik Üniversitesi, Of Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 61830, Trabzon, Türkiye

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author  
E-mail: aslanmustafataha@gmail.com

Araştırma Makalesi/Research Article  
Geliş Tarihi/Received: 22.05.2023  
Kabul Tarihi/Accepted: 20.06.2023

### ÖZ

Asfalt kaplamaların sıkıştırma sıcaklığının kontrol altına alınması kaplamadan beklenen performansın sağlanması açısından en önemli konulardan birisidir. Tasarım ve üretim aşamalarında ne kadar dikkat edilse de serme ve sıkıştırma aşamalarında karışım sıcaklığında bir miktar homojensizlikler ortaya çıkabilmektedir. Bu çalışmada aşınma tabakası tip 1A'ya göre dizayn edilmiş yoğun gradasyonlu asfalt kaplamalar için optimum bitüm içeriği %5,1 olarak hesaplanmış, bu değerinin altında ve üstünde (4,8; 4,9; 5,0; 5,0; 5,2; 5,3; 5,4) bitüm oranlarında hazırlanan asfalt karışımlar 143 °C ve 137 °C sıkıştırma sıcaklığında imal edilmiştir. Asfalt karışım örnekleri pratik yoğunluk, akma, stabilite ve Marshall oranı parametreleri ile değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda, 143 °C sıkıştırma sıcaklığında 137 °C'ye göre daha yüksek Marshall stabilite değerlerinin elde edilebildiği, optimum bitüm oranından daha yüksek artan değerlerde bitüm oranının artmasıyla akma değerlerinin artmakta olduğu ve 143 °C sıkıştırma sıcaklığında 137 °C değerine göre daha düşük akma değerleri olduğu gözlemlenmiştir. Stabilite değerlerindeki standart hatanın 143 °C sıcaklıkta daha düşük olduğu, sıkıştırma işlemi yapılırken, homojenlik anlamında, düşük sıcaklıklarda daha çok dikkat edilmesi gerektiği anlaşılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Asfalt karışım, Bitüm oranı, Sıkıştırma sıcaklığı, Marshall özellikleri, Karışım homojenliği

## Investigation of The Effect of Compaction Temperature Depending on Bitumen Ratio on Asphalt Pavements with Marshall Test Parameters

### ABSTRACT

Controlling the compaction temperature of asphalt pavements is one of the most important issues in terms of providing the expected performance from the pavement. No matter how much care is taken in the design and production stages, some inhomogeneities may occur in the mixing temperature during the laying and compaction stages. In this study, the optimum bitumen content was calculated as 5.1% for dense graded asphalt pavements designed according to wear layer type 1A, below and above this value (4.8; 4.9; 5.0; 5.0; 5.2; 5.3; 5.4) asphalt mixtures prepared at bitumen ratios of were produced at compaction temperatures of 143 °C and 137 °C. Asphalt mix samples were evaluated with practical density, flow, stability and Marshall quotient parameters. As a result of the study, it was found that higher Marshall stability values could be obtained at 143 °C compaction temperature than 137 °C, Marshall flow values increased with increasing bitumen ratio at higher values than optimum bitumen ratio, and lower flow values compared to 137 °C at 143 °C compaction temperature values have been observed. It has been understood that the standard error in the stability values is lower at 143 °C, and more attention should be paid at low temperatures in terms of homogeneity while compacting.

**Keywords:** Asphalt mixtures, Bitumen content, Compaction temperature, Marshall properties, Mixture homogeneity

### Cite as;

Araz, N.G., Aksoy, A., Aslan, M.T., İskender, E (2023). Asfalt Kaplamalarda Bitüm Oranına Bağlı Olarak Sıkıştırma Sıcaklığının Etkisinin Marshall Deneyi Parametreleri ile İncelenmesi, *Recep Tayyip Erdogan University Journal of Science and Engineering*, 4(1), 39-50. Doi: 10.53501/rteufemud.1292656  
Orcid ID: N.G.Araz, 0000-0001-8793-8509; A.Aksoy, 0000-0001-5232-6465; M.T.Aslan, 0000-0002-0453-788X; E.İskender, 0000-0001-7934-839X

## 1. Giriş

Asfalt, birçok avantajı sayesinde yol yapımında en yaygın kullanılan malzemedir. Yol kaplamalarının %90'dan daha fazlası bitümlü malzemelerle yapılmaktadır. Rijit yol kaplamaları ile karşılaştırıldığında, esnek kaplamalar daha ucuzdur, geri dönüştürülebilir, bakımı daha kolaydır ve inşaatı daha basit ve hızlıdır. İnşaatı sırasında yolların kapalı olduğu süreyi azaltır. Ancak, asfalt bağlayıcının viskoelastik davranışından dolayı, asfalt karışım performansı sıcaklık değişimleri ile büyük ölçüde değişebilmesi onun en büyük dezavantajlarından birini oluşturmaktadır (Betancourt-Jimenez vd., 2022). Bitümlü sıcak karışımlar, belirlenen gradasyondaki agregayla, deneysel çalışmalarla belirlenmiş bir orandaki bitümün yine belirlenen sıcaklıkta asfalt plentinde karıştırılmasıyla üretilirler. Sıcak karışım içerisinde büyük oranda bulunan agregaya; karışımın içsel sürtünme direnç ve dayanımını sağlarken, asfalt çimentosu da agregalar arasındaki boşlukları doldurarak kaplamanın trafik yüklerine ve hava koşullarına karşı stabilite ve durabilitesini artırmakta ve aynı zamanda düzgün bir yüzey sağlayarak sürüş konforunu artırmaktadır (Saltan ve Uysal, 2018). Sıcak karışım asfalt (HMA) numunelerinin hacimsel parametrelerinin belirlenmesi, inşa edilen yolların kalite kontrolü için hayati öneme sahiptir. Sıkıştırma sıcaklığı, HMA hacimsel parametrelerini değiştirebilen parametrelerden biridir (Saedi, 2012). ASTM D 6926'ya (ASTMD6926, 2020) göre (Marshall Aparatı kullanılarak bitümlü numunelerin hazırlanması için standart uygulama) sıkıştırma sıcaklığı, bitümün  $0,28 \pm 0,03$  pa.s viskoziteler üretmek için ısıtılması gereken sıcaklıktır. Asfalt karışımın sıcaklığı belirli bir sıcaklığın altına düştüğünde sıkıştırmaya yönelik daha fazla enerji harcanması etkili olamayacağı gibi daha fazla sıkıştırma, karışımdaki agregayı kırabilir, kaplama yoğunluğunu azaltabilir ve sıkıştırma amacını engelleyebilir. 135 ile 150 °C arasında bir sıkıştırma sıcaklığı tavsiye edilir. 150 °C sıkıştırma sıcaklığının kullanılması, tasarım bağlayıcı içeriğinin 135 °C'de sıkıştırılmasına göre %0,5 kadar daha düşük olmasına neden

olabilir (Youness Ahmed, 2007). Çevre kirliliği ve küresel ısınma, artan enerji maliyetleri ve mali endişeler, araştırmacıları sıcak karışım asfalttan daha az enerji gerektiren, daha az sera gazı yayan ve daha az maliyetli olan ılık karışım asfalt (WMA) teknolojisi gibi çeşitli yöntemleri araştırmaya yöneltmiştir (Zarei vd., 2022; Yan vd., 2022). WMA'lar geleneksel Sıcak Karışım Asfalta (HMA) benzer, ancak karıştırma ve sıkıştırma işlemleri için 20–40 °C daha az sıcaklık gerektirir. Üretim sıcaklıklarının düşürülmesi, daha düşük enerji tüketimi ve sera gazı emisyonları gibi önemli çevresel faydalar sağlarlar. Aynı şekilde, ekonomik değerlendirmeler, WMA'ların HMA'larla finansal olarak rekabet ettiğini ve hatta daha uygun maliyetli olabileceğini ortaya koymuştur (Polo-Mendoza vd., 2022). Bahsedilen özelliklere rağmen, WMA karışımlarda bitüm ve agregaya arasındaki yetersiz adezyondan dolayı çatlamalar gibi çeşitli bozulmaların oluşabileceği ve yüksek trafik yükleri ve sert hava koşulları gibi faktörlerden dolayı bu tür karışımların uygulanmasının sınırlı kalabileceği ifade edilmiştir (Zarei vd., 2022). Literatüre göre, HMA'ya kıyasla bu ürünle ilgili en büyük teknik sorun, daha düşük su hasarı direncidir (Capitao vd., 2012). Bu nedenle, asfalt kaplamanın mekanik özelliklerini koruyarak karışımın sıkıştırma sıcaklığının düşürülmesi önemli bir konudur. Literatürde yer alan çeşitli çalışmalardan sıkıştırma sıcaklığının karışımın mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkisinin olduğu görülmektedir. Sıkıştırma sıcaklığının hava boşlukları ve esneklik modülü üzerindeki etkisinin incelendiği bir çalışmada sıcak karışım asfaltlar ile laboratuvar ve saha çalışmaları yürütülmüştür. 79 °C, 116 °C, 154 °C ve 191 °C sıcaklıklarda sıkıştırılan asfalt karışım numunelerinde en düşük hava boşluklarına 154 °C sıkıştırma sıcaklığına ulaşılmış, esneklik modüllerinin artan sıcaklıkla doğrusal olarak arttığı sonucuna varılmıştır (Newcomb vd., 1992).

Sıkıştırma sıcaklığının, modifiye edilmemiş asfalt karışımlar için karışımların sıkıştırılmış yoğunluğu üzerinde önemli bir faktör olmadığını, ancak modifiye bağlayıcılar içeren karışımlar için

önemli bir faktör olduğu belirtilmiştir (McGennis vd., 1996). Laboratuvar ve arazide HMA'nın sıkıştırma etkisinin maksimize edildiği sıcaklık aralığının araştırıldığı çalışmada, üç bağlayıcı ve iki agrega türü kullanılarak altı laboratuvar karışımı ve beş saha karışımı üretilmiştir. Agrega türü, köşeliliği ve gradasyonunun sıkıştırma için gereken enerji üzerinde sıkıştırma sıcaklığından daha büyük bir etkiye sahip olduğu görülmüştür (DeSombre vd., 1998). Asfalt beton karışımlarının dayanıklılığı üzerinde gradasyon tiplerinin ve sıkıştırma sıcaklıklarının etkisine ilişkin yapılan çalışmada, sıkıştırma sıcaklıklarının bu karışımların dayanıklılığını büyük ölçüde etkilediği görülmüştür (Stas vd., 2007). Sıkıştırma sıcaklıklarının HMA özellikleri üzerindeki etkilerinin değerlendirildiği çalışmada aşınma ve binder tabakaları üzerine çalışılmıştır. 85–160 °C arasında değişen altı sıkıştırma sıcaklığı seçilmiştir. Sonuçlar, her iki karışımın yoğunluğunun artan sıkıştırma sıcaklığı ile arttığını ve en yüksek yoğunluğun 145 °C sıcaklıkta meydana geldiğini göstermiştir (Saedi, 2012). Sıcaklık ve yükleme frekansının farklı gradasyonlar ve bağlayıcılar kullanılarak üretilen üç asfalt karışımının dinamik modülü ve faz açısı üzerindeki etkisi araştırılmış, asfalt karışımlarının dinamik modülünün, sıcaklıktaki artışla veya yükleme frekansındaki azalmayla azaldığı görülmüştür (Li vd., 2013). Ayrıca, sıkıştırma sıcaklığındaki artış, yoğun gradasyonlu asfalt karışımın daha iyi performans göstermiştir. Karışımın yoğunluğunu, Marshall Stabilitesini, esneklik modülünü ve sünme modülünü de arttırmıştır (Rahmat vd., 2019). Sabit gradasyonlu ve %5,5 sabit bitüm içeriğindeki asfalt karışım örnekleri için ortalama sıkıştırma sıcaklığı, sıkıştırma sıcaklığından 5 °C daha yüksek seçilmiş, 120–170 °C aralığında altı farklı sıcaklıkta ve eşit sıkıştırma enerjisinde, sıkıştırma sıcaklıklarının Marshall Stabilitesi, Marshall oranı, karışımın hacimsel özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Asfalt karışımlarının yoğunluk, Marshall Stabilite ve Marshall oranı değerleri ve asfaltla dolu boşluğun sıkıştırma sıcaklıklarının artmasıyla birlikte arttığı, hava boşluğu oranlarının ise azaldığı bulunmuştur (Ivica Androjic ve Dimter, 2015). Standart

sıkıştırma sıcaklığının altındaki sıkıştırma, HMA özellikleri üzerinde olumsuz etki yaratabileceği, çatlama ve su hasarı problemlerine yol açabileceği bilinmektedir. Ulaşılabilir yoğunluktaki azalma doğrudan sıkıştırma sıcaklıklarıyla ilişkilendirilmiştir. Düşük sıkıştırma sıcaklıkları ile hava boşluğu içeriğinin arttığı ve stabilitenin azaldığı, 135 °C sıcaklıkta sıkıştırılmış bir numune ile karşılaştırıldığında, 93 °C sıcaklıkta sıkıştırılmış bir numune iki kattan daha fazla hava boşluğu içerir, ayrıca 65 °C sıcaklıkta hava boşluğu içeriği dört katına çıkar. Tipik olarak, azalan sıkıştırma sıcaklığı hava boşluklarında artış ve stabilitede azalma göstermektedir (Youness Ahmed, 2007). İstenen sıkıştırma sıcaklığının sağlanamaması, agregaların bozulması ile birlikte agrega ve asfalt arasındaki adezyon bağının kaybına yol açacaktır (Kok ve Yılmaz, 2009). Sıcaklığın, sıcak karışım asfalt özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu, Marshall özellikleri ile sıcaklık arasında yüksek korelasyon ( $R^2 > 0,9$ ) gerçekleştiği, sıcaklık artışı ile stabilitenin arttığı ancak bu artışın bir sınırı olduğu ve yapılan çalışmada bu sınırın 145 °C olduğu ifade edilmektedir (Saedi, 2012). Yukarıdaki çalışmalardan, HMA'nın harici olarak uygulanan farklı yük ve ortam koşullarına dayanıklı olacak şekilde tasarlanması gerektiği açıktır. HMA karışımının seçimi, çevre koşullarına ve yükün türüne bağlıdır. Ayrıca, bitüm içeriği, türü ve derecesi; agrega kalitesi ve mineral filler miktarı, katkı maddelerinin miktarı ve hava boşluklarının hacmine ek olarak, HMA'nın stabilitesini, durabilitesini, geçirimsizliğini, işlenebilirliğini, esnekliğini ve yorulma direncini en çok etkileyen parametrelerdir (Panda vd., 2017). Farklı bitüm içeriğindeki asfalt karışımlarının performansı 1, 2, 4, 6 ve 8 donma-çözülme döngüsünde incelenmiş; donma-çözülme döngüleri altında optimum bitümden daha yüksek bitüm içeriklerinde asfalt karışımların su hasarına karşı hassasiyetinin azaldığı, kalıcı deformasyona karşı direncin arttığı görülmüştür. Su hasarına karşı direncin artırılmasının istendiği durumlarda optimum bitüm içeriğinin artırılabilirliği ifade edilmiştir (Keymanesh vd., 2014). Literatürde yer alan çalışmalar çoğunlukla sıkıştırma sıcaklığının

Marshall özellikleri, karışımın hacimsel özellikleri ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisine odaklanmıştır. Sıkıştırma sıcaklığının karışımın bitüm içeriği ile bağlantılı olarak çalışıldığı araştırmaların eksikliği görülmektedir. Ayrıca tavsiye edilen sıkıştırma sıcaklığının çok az altında ve üstündeki sıcaklıkların seçilmesinin etkileri yeterince çalışılmamıştır. Bu çalışmanın amacı, optimum bitüm içeriğinin altında ve üstündeki oranlarda sıkıştırma sıcaklığının etkisinin araştırılması, daha yüksek bitüm içeriğinde sıkıştırma sıcaklığının düşürülebilirliğinin veya daha yüksek sıkıştırma sıcaklıklarında optimum bitüm oranının düşürülebilirliğinin sorgulanmasıdır. Bu amaçla, 140 °C sıkıştırma sıcaklığında elde edilen optimum bitüm içeriği baz alınarak; %4,8; 4,9;

5,0; 5,1; 5,2; 5,3; 5,4 bitim içeriklerinde ve 137 °C ile 143°C sıkıştırma sıcaklıklarında asfalt karışım örnekleri hazırlanarak Marshall stabilitesi, akma ve Marshall oranı değerlendirmeleri yapılmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1 Materyal

Deneysel çalışmalarda genel mühendislik özellikleri Tablo 1’de verilen asfalt çimentosu ve Tablo 2’de gösterilen kireçtaşı agregası kullanılmıştır. Çalışmada Karayolları Teknik Şartnamesi (KTS, 2013) esas alınarak Aşınma Tip 1A karışımına uygun yoğun gradasyonlu agregas kombinasyonu kullanılmıştır. Kullanılan agregas gradasyonu ve şartname limitleri Şekil 1’de gösterilmiştir.

**Tablo 1.** Asfalt çimentosu test sonuçları

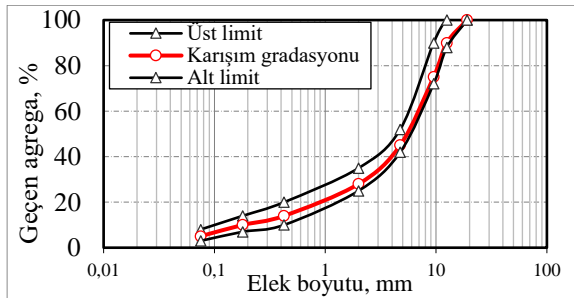
**Table 1.** Asphalt cement test results

Test	Standart	Sonuç	Şartname limiti
Birim hacim ağırlık, 25°C’de (g/cm <sup>3</sup> )	ASTM D70	1,011	
Yumuşama noktası (°C)	ASTM D36-76	52	46-54
Parlama noktası (°C)	ASTM D92	240	Min. 230
Penetrasyon (100 g, 5 s, 25°C); 0,1mm	ASTM D5	63	50-70
Düklilite (25°C, 5 cm/dak.), cm	ASTM D113	100+	

**Tablo 2.** Kireçtaşı agregalarının mühendislik özellikleri

**Table 2.** Engineering properties of limestone aggregate

Agrega Özelliği	Deney Yöntemi	Değer	Şartname limiti
Hacim özgül ağırlık (kaba agregas)	TS EN 1097-6	2,707	
Hacim özgül ağırlık (ince agregas)	TS EN 1097-6	2,763	
Hacim özgül ağırlık (filler)	TS EN 1097-7	2,242	
Los Angeles aşınma (%)	ASTM C-131	26,7	
Yassılık (%)	BS 812 (Part 105)	9,71	En fazla 25
Soyulma direnci (katkısız) (%)	ASTM D-1664	60-65	En az 60
Kil toprakları ve ufalanabilir daneler, (%)	ASTM C 142	-	Bulunmayacak
İnce agregas için plastisite indeksi	TS -1900-1	Plastik değil	Plastik değil
İnce agregas için organik madde, (%)	TS EN 1744-1		Negatif



**Şekil 1.** Agregas gradasyon eğrisi ve şartname limitleri

**Figure 1.** Aggregate gradation curve and specification limits

### 2.2. Karişim Tasarımı

Yoğun gradasyonlu asfalt betonu tasarımı, Marshall Tasarım yöntemiyle, Karayolları Teknik Şartnamesine (KTS, 2013) göre yapılmıştır. Optimum bitüm içeriği %4 hava boşluğunu veren bitüm oranı olarak alınmış ve %5,10 olarak hesaplanmıştır. Yapılan deneylere ait görseller Şekil 2’de verilmiştir. Optimum bitüm içeriğine karşılık gelen asfalt karışım özellikleri grafiksel olarak belirlenmiş ve Tablo 3’te verilmiştir



**Şekil 2.** a) Elenmiş agregalardan görüntü b) asfalt karışım hazırlama c) agrega ve asfalt karışım görüntüsü d) Marshall stabilite testi görüntüsü

**Figure 2.** a) Sieved aggregate picture b) preparing of asphalt mixture c) A picture of aggregate and asphalt mixtures d) Marshall stability test picture

**Tablo 3.** Asfalt betonu laboratuvar tasarım sonuçları

**Table 3.** Asphalt cement test results

Tasarım ölçütleri	Tasarım sonuçları	Şartname limitleri
Darbe sayısı, her bir yüze	75	75
Yoğunluk, g/cm <sup>3</sup>	2,44	
Marshall stabilitesi, kg	1189	En az 900
Hava boşluğu, %	4,0	3-5
Asfaltla dolu boşluk, %	71,64	65-75
Akma, mm	3,48	2-4
Bitüm içeriği, %	5,10	4-7
Mineral agregalar arası boşluk, %	14,37	14-16

### 2.3. Metot

Yoğun gradasyonlu asfalt betonu Tip 1A karışım tasarımı Marshall metoduna göre yapılmıştır. Sıkıştırma 140±1 °C sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Optimum bitüm oranı %5,1 olarak hesaplanmıştır. Optimum bitüm içeriğinin altında ve üstünde bitüm oranları seçilmiş; %4,8; 4,9; 5,0; 5,1; 5,2; 5,3 ve 5,4 bitüm içeriklerinde asfalt karışımlar, optimum bitüm oranının hesaplandığı standart sıkıştırma sıcaklığının

(140±1 °C) üstündeki (143±1 °C) ve altındaki (137±1 °C) sıcaklıklarda sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma işlemi TS EN 12697-30 standardına (TS EN 12697-30, 2019) uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Farklı bitüm içerikleri ve sıkıştırma sıcaklıklarında hazırlanan örneklerin hacimsel özellikleri TS EN 12697-8 (TS EN 12697-8, 2005) ve Marshall stabilite ve akma değerleri BS EN 12697-34 (BS EN 12697-34, 2020) standardına göre belirlenmiştir.

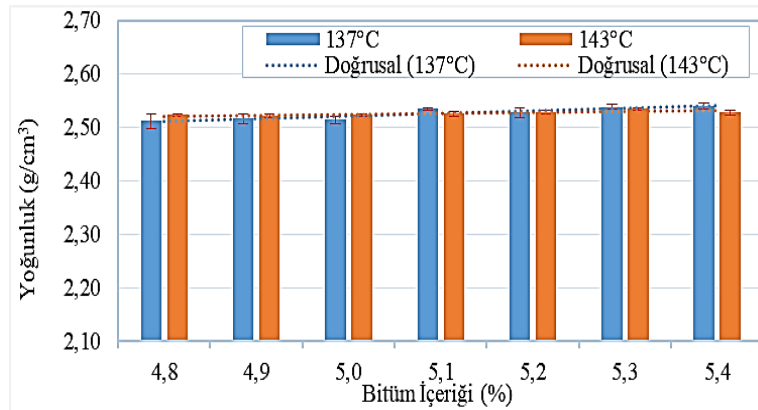


### 3. Bulgular ve Tartışma

140 °C sıcaklıkta sıkıştırılan örneklerle yapılan karışım tasarımında, optimum bitüm içeriğindeki yoğunluk, grafik üzerinden 2,44 gr/cm<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir. 137 ve 143 °C sıcaklıkta sıkıştırılan örneklerin bitüm içeriklerine bağlı olarak yoğunlukların değişiminin ortalama değeri ve standart hata değerleri Şekil 3'te, dört örneğin değerlerinin ortalaması alınarak gösterilmiştir.

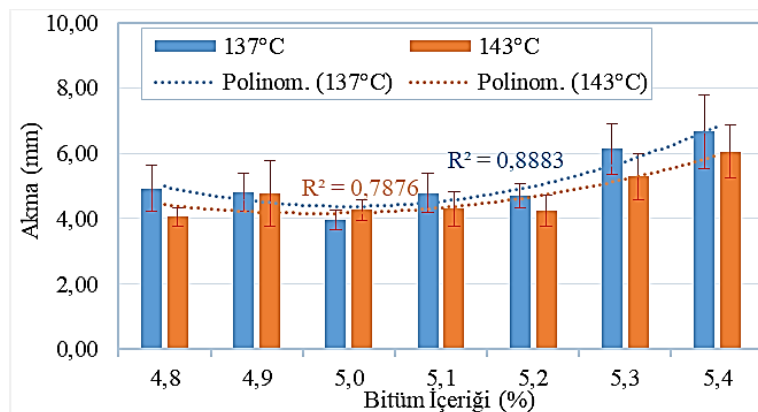
Sıkıştırma sıcaklığının 137 °C'den 143 °C'ye yükseltilmesi ile asfalt karışım örneklerinin yoğunluklarının da genel olarak yükseldiği görülmektedir. Bu yükseliş değerinin çok küçük olduğu, ortalama olarak hesaplandığında %0,14 değerinde kaldığı görülmektedir. Her iki sıkıştırma sıcaklığında da bitüm içeriğinin artması ile beklediği gibi asfalt karışım örneklerinin yoğunlukları da artmıştır. 137 °C sıcaklıktaki artış miktarının 143 °C'ye göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Bitüm içeriğinin %4,8'den %5,4'e

çıkarılması ile 137 °C ve 143 °C sıcaklıkta sıkıştırılan örneklerde sırasıyla %1,143 ve %0,179 yoğunluk artışı belirlenmiştir. Bitüm içeriğinin değişimine bağlı olarak çok anlamlı bir farklılık olmamasına rağmen sıkıştırma sıcaklığına bağlı olarak yoğunlukların standart hatasının sıcaklığın düşmesiyle arttığı tespit edilmiştir. Üretilen asfalt karışım örneklerinin ortalama akma değerleri ve akma değerlerinin standart hata değerleri Şekil 4'te, sıkıştırma sıcaklıklarının değişimine göre akma değerlerinin ilişkisi de Şekil 5'te verilmiştir. 137 °C sıcaklıkta sıkıştırılan örneklerin akma değerlerinin genel olarak 143 °C sıcaklıktakilere göre daha yüksek olduğu ve sınır değer üzerinde olduğu görülmektedir. Bitüm oranının artması ile akma miktarının artış eğilimi gösterdiği ve %5,2 bitüm oranından sonra hızlı bir artışın gerçekleştiği görülmüştür. Sıcaklığa bağlı olarak akma değerleri arasında orta dereceli doğrusal ilişki ( $R^2=0,8039$ ) hesaplanmıştır.



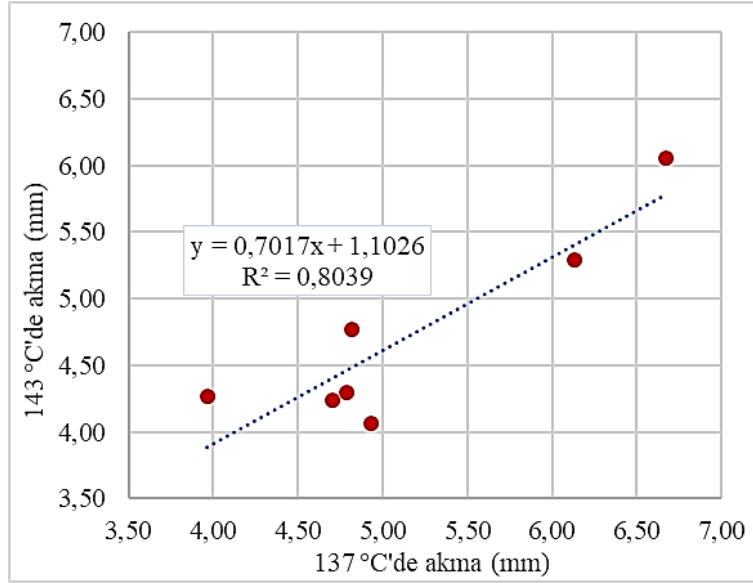
Şekil 3. 137 °C sıcaklıkta üretilen örneklerin yoğunluk değerleri

Figure 3. Density values of samples produced at 137 °C



Şekil 4. Farklı sıcaklık ve bitüm içeriklerinde üretilen asfalt karışımların akma değerleri

Figure 4. Flow values of asphalt mixtures produced at different temperatures and bitumen contents

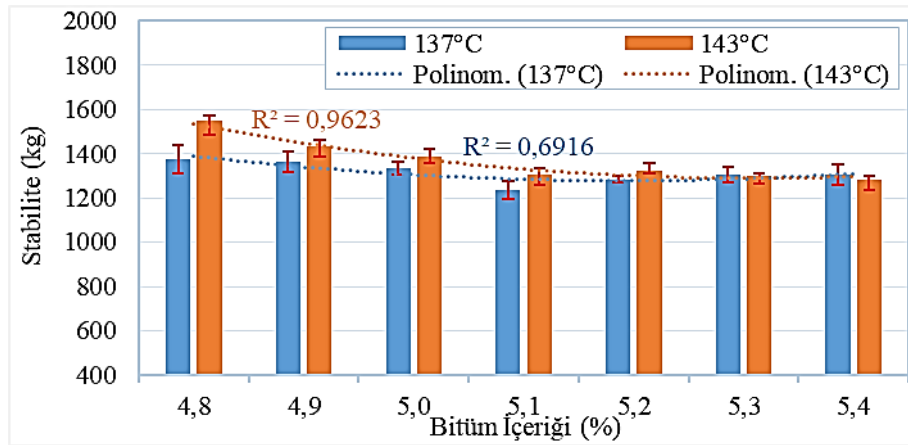


Şekil 5. 137 ve 143 °C sıcaklıkta üretilen örneklerin akma değerleri arasındaki ilişki

Figure 5. The relationship between the flow values of the samples produced at 137 and 143 °C

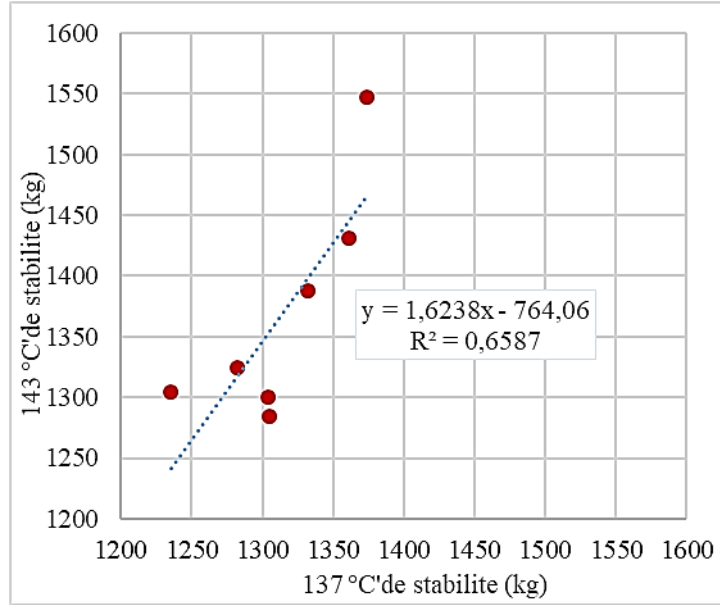
Üretilen örneklerin stabilite değerleri, dörder örneğin değerlerinin ortalaması alınarak Şekil 6'da gösterilmiştir. Örneklerin stabilite değerleri arasında sıkıştırma sıcaklığına bağlı olarak, yüksek bitüm içeriklerinde (optimum bitüm içeriğinden daha yüksek) çok önemli bir farklılığın oluşmadığı görülmüştür. Daha düşük bitüm içeriklerinde, sıkıştırma sıcaklığı yüksek olan karışımların stabilitelerinin daha yüksek olduğu görülmüştür. %4,8 bitüm oranı ile hazırlanan karışımlarda, 143 °C sıcaklıkta sıkıştırılanlar, %13 daha yüksek stabilite göstermiştir. Ancak bitüm oranı arttıkça aradaki

fark azalmış %5,3 ve %5,4 bitüm içeriklerinde düşük sıcaklıkta sıkıştırılan örneklerin stabilite değerleri daha yüksek çıkmıştır. %5,4 bitüm içeriğinde, 137 °C sıcaklıkta sıkıştırılan örnekler, %2 oranında daha yüksek stabilite değerleri vermiştir. Bitüm oranı ile stabilite değerleri arasında, yüksek sıkıştırma sıcaklığında, güçlü bir ilişki ( $R^2=0,9623$ ) gözlemlenmiştir. Ancak düşük sıkıştırma sıcaklığında bu ilişkinin derecesi ( $R^2=0,6916$ ) azalmıştır. Aynı zamanda, sıkıştırma sıcaklıkları ile stabilite değerleri arasındaki ilişki de araştırılmış ve düşük dereceli ( $R^2=0,6587$ ) bir doğrusal ilişki bulunmuştur.



Şekil 6. 137 ve 143 °C sıcaklıkta üretilen örneklerin stabilite değerlerinin karşılaştırılması

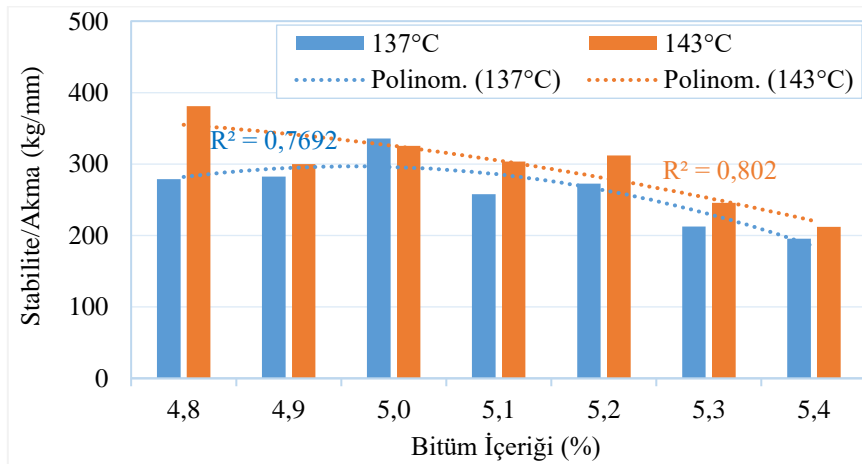
Figure 6. Comparison of stability values of samples produced at 137 and 143 °C



**Şekil 7.** 137 ve 143 °C sıcaklıkta üretilen örneklerin stabilite değerleri arasındaki ilişki  
**Figure 7.** The relationship between the stability values of the samples produced at 137 and 143 °C

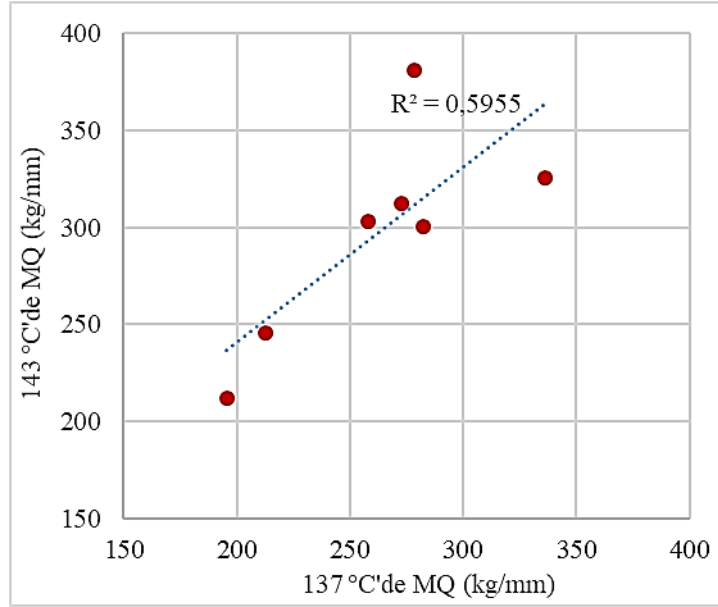
Üretilen asfalt karışım briketlerinin Marshall oranı (MQ) değerleri, Marshall stabilitesinin akma değerine oranlanması ile hesaplanmış ve Şekil 8'de dört örneğin MQ değerlerinin ortalaması alınarak verilmiştir. 143 °C sıcaklıkta sıkıştırılmış karışımlarda, Marshall oranı değerlerinin asfalt karışımındaki bitüm oranının artmasıyla azalma eğilimi göstermiş, 137 °C sıcaklıkta sıkıştırılan örneklerde ise %5 bitüm oranına kadar artış olmuş, daha sonra bitüm oranı

arttıkça MQ değeri azalmıştır. Genel olarak (%5 bitüm oranı hariç) 143 °C sıcaklıkta sıkıştırılan örnekler daha yüksek MQ değeri göstermiştir. En yüksek fark en düşük bitüm içeriği olan %4,8 bitüm oranında (%8) gerçekleşmiş, bitüm oranı arttıkça MQ değerleri arasındaki farkın da azaldığı görülmüştür. 137 °C ve 143 °C sıcaklıkta sıkıştırılan örneklerin MQ değerleri arasında yüksek dereceli bir ilişki görülmemiştir ( $R^2=0,5955$ ).



**Şekil 8.** 137 ve 143 °C sıcaklıkta üretilen örneklerin stabilite/akma değerleri  
**Figure 8.** Stability/flow values of samples produced at 137 and 143 °C





**Şekil 9.** 137 ve 143 °C sıcaklıkta üretilen örneklerin stabilite/akma değerleri arasındaki ilişki  
**Figure 9.** Relationship between the stability/flow values of the samples produced at 137 and 143 °C

Marshall stabilite testi süresince, uygulanan yükten dolayı yükleme başlıklarının hareketi sırasında, asfalt briketinde maksimum yüke ulaşıldığında örnekte oluşan düşey deformasyon, akma olarak adlandırılmaktadır. Marshall akması, asfalt betonunun çatlamaksızın alt tabakadaki hareketlere ve yavaş oturmalara karşı kendisini ayarlama yeteneğidir. Akma, stabiliteye karşıt bir özellik olarak dikkate alınabilir (Ahmedzade vd., 2007). Çok yüksek akma değerleri asfalt karışımın yük altında yüksek miktarda deformasyona uğrama olasılığından dolayı istenmezken, çok düşük akma değerleri de yüksek rijitlikten dolayı düşük sıcaklıklarda çatlama olasılığından dolayı tercih edilmemektedir (ASTM D6927-15, 2022). İçsel sürtünme ile ilişkili deformasyonu temsil eden akma değeri, trafik yükleri altında asfalt betonunun elastik ve plastik davranışını ifade etmektedir. Maksimum akma değeri maksimum karışım plastisitesini gösterirken, minimum akma değeri karışımın kırılma bir davranış sergilediğini gösterir (Asphalt Institute 1993). Özetle, asfalt betonunun elastik ve plastik davranışları, Marshall testi tasarımından elde edilen akma değeri ile belirlenebilir. Asfalt içeriği arttıkça, asfalt karışım tasarımında akış değeri artar çünkü karışımın elastik davranışı etkilenir (Kütük-Sert ve Kütük, 2012).

%5-%5,1 bitüm içeriğinde en düşük ancak limit değerler sınırında akma değerlerine ulaşılmıştır. Düşük bitüm içeriklerinde karışım yoğunluklarının düşük buna bağlı olarak boşluk miktarının yüksek olmasından dolayı; yüksek bitüm içeriklerinde de fazla bitümün kaba agregalar üzerinde yağlama etkisi yaparak yük altında yeniden yerleşmelerini kolaylaştırıcı etki oluşturarak daha yüksek akma değerlerine ve bu nedenle daha düşük karışım rijitliğine neden olduğu söylenebilir. Ancak bazı kaynaklarda (Ogundipe, 2016) akma değerinin karışımın deformasyon direncini yansıtmadığı, bu değerlerin tekrarlı yük sünme deneyi ve tekerlek izi deneyi gibi deneylerle doğrulanması gerektiği ifade edilmektedir. Marshall stabilitesi, asfalt karışımların yer değiştirme, tekerlek izi ve kesme gerilmelerine karşı direnci ile ilgilidir. Stabilite esas olarak içsel sürtünme ve kohezyondan elde edilir. İçsel sürtünme, agregaların birbirine kenetlenme ve sürtünme direnci iken; kohezyon, bitümlü malzemenin bağlayıcı kuvvetidir (Vincent Chu, 2017). Stabilitedeki artış, agrega ve bitüm arasındaki güçlü adezyona bağlanabilir. Marshall oranı, stabilite değerinin akma değerine oranlanması ile hesaplanabilir ve bu oran karışımın sertliği, kesme kuvveti ve deformasyon direnci hakkında fikir vermektedir (Mistry ve Roy, 2020). Marshall Oranının sınır değeri Endonezya Marshall oranı şartnamesinde (R. SNI,

2005) 250 olarak belirtilmiştir. Daha yüksek değerlerin yüksek sertlikten dolayı çatlama riski oluşturacağı ifade edilmektedir. 137 °C sıcaklıkta sıkıştırılan örneklerin Marshall oranı değerleri 250 kg/mm'den büyük ancak 143 °C'de sıkıştırılan örneklerinkine göre daha düşük çıkmıştır. Düşük bitüm içerikleri için 137 °C'de yapılan sıkıştırma çatlama direnci açısından iyi sonuç verirken; %5,3 ve üzerindeki bitüm oranlarında Marshall oranının daha da düşmesinden dolayı tekerlek izi direnci açısından problem oluşturabilecektir. Genel bir yaklaşım olarak optimum bitüm değeri olan %5,10 değerinin  $\pm$  %0,30 değişim aralığında stabilite değerlerinin değişim aralığı bu oranlar için karışım homojenliği hakkında fikir vermektedir. 137 °C sıcaklıkta kullanılan bitüm oranlarında stabilite değerlerinin standart hatası yaklaşık 40 kg iken 143 °C için bu değer 25 kg seviyesinde çıkmıştır. Bu değerler düşük sıkıştırma sıcaklıklarında karışım homojenitesinin daha zor sağlanabileceği anlamına gelmektedir. Sun vd. (2022)'nin yaptığı bir araştırmada, homojenlik katsayısı ile tasarım faktörleri arasında güçlü korelasyon bulunmuştur. Nominal maksimum agrega boyutunun ve agrega gradasyonunun kabalığının artmasıyla, asfalt karışımının homojenliğinin azaldığı, asfalt içeriğinin çok fazla veya çok az olmasının ise homojenlik için elverişsiz olduğu görülmüştür. Sıkıştırma sıcaklıklarının artması, daha büyük stabilite değerlerinin alınmasına neden olmaktadır ancak düşük bitüm oranlarında karışım rijitliğinin çok fazla artması düşük sıcaklıklarda daha yüksek çatlama problemi potansiyeli oluşturabilecektir. %4,8 değerinden %5,40 bitüm oranı değerine %0.1 artışlarla gidildiğinde her iki sıcaklık koşulu için de düzeltilmiş stabilite değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bu sonuç, mantıklı olarak görülmektedir. Optimum bitümden daha düşük civar bitüm değerlerinde daha yüksek stabilite edilmesi daha rijit bir karışımı daha yüksek bir bitüm içeriğinde daha düşük bir stabilite değeri de daha esnek bir karışımı işaret etmektedir. Bu doğal sonuç, Marshall deneyleri ile doğrulanabilmiş dolayısıyla Marshall deneyinin plastik akmaya karşı olan davranışı belirlemedeki etkinliği gözlemlenmiştir.

#### 4. Sonuçlar ve Öneriler

Düşük bitüm oranlarında üretilen asfalt karışımların pratik yoğunlukları 143 °C sıkıştırma sıcaklığı ile sıkıştırılan örneklerde daha yüksek çıkarken yüksek bitüm oranında hazırlanan karışımlar 137 °C sıkıştırma sıcaklığında sıkıştırıldığında daha yüksek pratik yoğunluklar elde edilmiştir. 143 °C sıkıştırma sıcaklığı 137 °C sıkıştırma sıcaklık değerine göre genel olarak daha yüksek Marshall stabilite değeri vermektedir. Fakat artan bitüm oranlarında (%5,3 ve %5,4) 137 °C'de sıkıştırılan örneklerin stabilite değerleri daha yüksek çıkmaktadır. Akma değerleri açısından bakıldığında ise 5,2-5,3-5,4 oranları için yani optimum bitüm oranından daha yüksek artan değerlerde bitüm oranının artmasıyla akma değerleri artmaktadır. 143 °C sıkıştırma sıcaklığı 137 °C sıkıştırma sıcaklık değerine göre bu bitüm oranları için daha düşük akma değerleri vermektedir. Genel olarak, yüksek sıcaklıkta (143 °C) sıkıştırılan asfalt karışımların stabilite değerlerinin değişimi düşük sıcaklıkta (143 °C) sıkıştırılan asfalt karışımların stabilite değerlerinden daha düşük çıkmıştır. Bu sonuçlar, düşük sıcaklıkta sıkıştırılan asfalt karışımların homojenliğinin sağlanması konusuna daha çok dikkat edilmesi zorunluluğunu ortaya koymaktadır. Optimum bitüm içeriğinin altındaki oranlarda hazırlanan karışımların Marshall oranları buna bağlı olarak tekerlek izi dirençleri artmaktadır. Optimum bitüm oranının üzerinde ise önemli bir değişim görülmemekte, her iki sıcaklıkta da Marshall oranları yakın seviyede korunmaktadır. Agrega etrafındaki bitüm filminin daha kalın olmasının istendiği soğuk iklimli bölgelerde yüksek bitüm içerikli karışımların daha düşük sıcaklıklarda sıkıştırılabileceği anlaşılmaktadır. Ancak karışım homojenitesinin iyileştirilmesi için maksimum agrega boyutunun düşürülebileceği değerlendirilmektedir. Bu alanda daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır.

#### Yazar Katkısı

**N. Gül Araz:** Veri İyileştirme, Biçimsel Analiz, Araştırma; **A. Aksoy:** Kavramsallaştırma, Biçimsel Analiz, Araştırma, Proje Yönetimi; **M.**

**Taha Aslan:** Araştırma, Metodoloji, Görseleştirme, Yazma-İnceleme ve Düzenleme, Kaynaklar; **E. İskender:** Araştırma, Veri İyileştirme, Biçimsel Analiz, Metodoloji, Yazma-İnceleme ve Düzenleme.

## Kaynaklar

- Ahmedzade, P., Alataş, T., Geçkil, T. (2007). The effect of carbon black on the mechanical properties of asphalt mixtures. *Journal of Engineering and Natural Sciences*, 25(2), 179-189.
- Asphalt Institute. (1993). Mix designs methods for asphalt concrete and other hot mix types. Asphalt Institute, Lexington, KY.
- ASTM D6926-20. (Jan 27, 2020). Standard Practice for Preparation of Asphalt Mixture Specimens Using Marshall Apparatus.
- ASTM D6927-15. (Nov 07, 2022). Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures.
- Betancourt-Jimenez, D., Montoya, M., Haddock, J., P. Youngblood, J., J. Martinez, C. (2022). Regulating asphalt pavement temperature using microencapsulated phase change materials. *Construction and Building Materials*, 350, 128924. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.12894>
- BS EN 12697-34:2020. This standard BS EN 12697-34:2020 Bituminous mixtures. (03.04.2020). Test methods is classified in these ICS categories: 93.080.20 Road construction materials.
- Capitão, S., Picado-Santos, L., Martinho, F. (2012). Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 36, 1016-1024. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.038>
- DeSombre, R., Newcomb, D.E., Chadbourn, B., Voller, V. (1998). Parameters to define the laboratory compaction temperature range for hot mix asphalt. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 67, 125–152.
- Ivica Androjić, I., Dimter, S. (2015). Influence of compaction temperature on the properties of marshall specimens. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 10(4), 309–315. <https://doi.org/10.3846/bjrbe.2015.39>
- Karayolu Teknik Şartnamesi. (KTSŞ) (2013). Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Keymanesh, M.R., Kie-Badroodi, S., Haghightpour, P.J. (2014). An examination of the effect of bitumen content on the performance of moisture susceptibility of asphalt mixture under freeze-thaw cycles. *International Journal of Engineering Innovation and Research*, 3(6), 909-914.
- Kok, B.V., Yilmaz, M. (2009). The effects of using lime and styrene-butadiene-styrene on moisture sensitivity resistance of hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 23(5), 1999-2006. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.08.019>
- Kütük-Sert, T., Kütük, S. (2012). Physical and Marshall properties of borogypsum used as filler aggregate in asphalt concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(2), 234-243. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000580](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000580)
- Li, P., Ding, Z., Zhang, Z. (2013). Effect of temperature and frequency on visco-elastic dynamic response of asphalt mixture. *Journal of Testing and Evaluation*, 41(4), 571–578. <https://doi.org/10.1520/JTE20120044>
- McGennis, R.B., Anderson, R.M., Perdomo, D., Turner, P. (1996). Issues pertaining to use of the superpave gyratory compactor. *Transportation Research Record*, 1543, 139–144. <https://doi.org/10.1177/0361198196154300118>
- Mistry, R., Roy, T.K. (2020). Predicting marshall stability and flow of bituminous mix containing waste fillers by the adaptive neuro-fuzzy inference system. *Revista de la Construcción*, 19(2). <http://dx.doi.org/10.7764/rdlc.19.2.209>
- Newcomb, D.E., Stroup-Gardiner, M., Epps, J.A. (1992). Laboratory and field studies of polyolefin and latex modifiers for asphalt mixtures. *Polymer modified asphalt binders*, 129–150. <https://doi.org/10.1520/STP17830S>
- Ogundipe, O.M. (2016). Marshall stability and flow of lime-modified asphalt concrete. *Transportation Research Procedia*, 14, 685–693. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.333>
- Panda, R.P., Das, S.S., Sahoo, P.K. (2017). Optimum bitumen content for bituminous concrete – an alternative approach for estimation. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, 8(10), 435–453.
- Polo-Mendoza, R., Rita, P.N., Filippo, G., Gilberto, MA. (2022). Eco-friendly design of warm mix asphalt (WMA) with recycled concrete aggregate (RCA): A case study from a developing country. *Construction and Building Materials*, 326, 126890. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126890>
- Rahmat, N.A., Hassan, N.A., Jaya, R.P., Mohd Satar, M.K.I., Mohd Azahar, N., Ismail, S., Hainin, M.R. (2019). Effect of compaction temperature on the performance of dense-graded asphalt mixture.

- National Colloquium on Wind and Earthquake Engineering IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 012012.  
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/244/1/012012>
- R. SNI 03 1737-1989, Pedoman pelaksanaan lapis campuran beraspal panas - Revisi SNI 03 1737-1989. (Badan Penelitian dan Pengembangan PU, Bandung) 2005; 1-47.
- Saedi, H. (2012). Assessment of compaction temperatures on hot mix asphalt (HMA) properties. *International Science Index, World Academy of Science, Engineering and Technology*, 6, 179–183.  
<https://doi.org/10.5281/zenodo.1059439>
- Saltan, M., Uysal, F. (2018). Vermikülitin bitümlü sıcak karışımlarda kullanılabilirliğinin marshall stabilite deney yöntemi ile araştırılması. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22(1), 253- 257.  
<https://doi.org/10.19113/sdufbed.35525>
- Stas, R., Miro, O., Al-Shalout, I. (2007). Effects of moisture, compaction temperature and gradation types on durability of asphalt concrete mixtures. *Damascus University Journal*, 23(2), 7–35.
- Sun, P., Zhang, K., Han, S., Liang, Z., Kong, W., Zhan, X. (2022). Method for the evaluation of the homogeneity of asphalt mixtures by 2-Dimensional Image Analysis. *Materials*, 15, 4265.  
<https://doi.org/10.3390/ma15124265>
- TSE - TS EN 12697-8, Bituminous mixtures (8 February 2005). Test methods for hot mix asphalt - Part 8: Determination of void characteristics of bituminous specimens.
- TSE – TS EN 12697-30, Bituminous mixtures (29 April 2019). Test methods - Part 30: Specimen preparation by impact compactor.
- Vincent, T. H. CHU. (2010). A Self Learning Manual – Mastering Different Fields of Civil Engineering Works. VC-Q-A-Method.
- Yan, T., Tuross, M., Le, J.L., Marasteanu, M. (2022). Reducing compaction temperature of asphalt mixtures by gnp modification and aggregate packing optimization. *Materials*, 15, 6060.  
<https://doi.org/10.3390/ma15176060>
- Youness Ahmed, H. (2007). Methodology for determining most suitable compaction temperatures for hot mix asphalt. *Journal of Engineering Sciences*, 35(5), 1235-1253.  
<https://doi.org/10.21608/jesaun.2007.114551>
- Zarei, M., Taghizadeh, M.R., Moayedi, S.S., Naseri, A., Al-Bahrani, M., Khordehbinan, M.W. (2022). Evaluation of fracture behavior of warm mix asphalt (WMA) modified with hospital waste pyrolysis carbon black (HWPCB) under freeze–thaw damage (FTD) at low and intermediate temperatures. *Construction and Building Materials*, 356, 129184. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129184>