

## FARKLI ILIK KARIŞIM KATKILARI İLE HAZIRLANAN MARSHALL NUMUNELERİNİN ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Akın İSTEK\*   
Taner ALATAŞ\*\* 

Alınma:08.08.2018 ; düzeltme:10.12.2018 ; kabul:25.08.2019

**Öz:** Asfalt üretiminde uygulamaya konulan bilimsel gelişmelerden biri de ılık karışım asfalt teknolojisidir. Ilık karışım asfalt teknolojisi ile daha düşük sıcaklıklarda asfalt üretimi mümkün olmaktadır. Bu çalışmada, Pawma-1 (%0,35) ve Low Energy and Low Carbon-Dioxide Asphalt Pavement (Leadcap) (%1,5) ılık karışım asfalt katkı maddeleri ile Stiren-Butadien-Stiren (SBS) (%2) katkı maddesi karışım numunelerinde denenmiştir. Bununla beraber, sönmüş kirecin ılık karışım asfaltlarda filler olarak kullanımının etkileri de incelenmiştir. Çalışmada TÜPRAŞ rafinerisinden temin edilen bitüm (B50/70) ve agrega olarak Elazığ Hankendi bölgesinden temin edilen kalker türü kırmataş malzeme kullanılmıştır. Modifiye bağlayıcılar hazırlandıktan sonra Marshall yöntemine göre optimum bitüm oranları belirlenerek karışım numuneleri hazırlanmıştır. Karışım numunelerinin yarısında filler yerine %2 oranında sönmüş kireç kullanılmıştır. Hazırlanan numuneler üzerinde Marshall stabilite ve akma deneyi (ASTM D-1559) uygulanmıştır. Leadcap, Pawma-1 ve SBS katkıları ile hazırlanan karışımlarda stabilite artmıştır. Sönmüş kirecin, ılık karışım asfaltların stabilitelerini artırdığı görülmüştür. Sönmüş kireç katkılı SBS modifiyeli karışımların en olumlu sonuçları verdikleri tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Ilık karışım asfalt, Leadcap, Pawma-1.

### Investigation of the Properties of Marshall Samples Prepared with Different Warm Mix Additives

**Abstract:** One of the scientific advances put into practice in asphalt production is warm mix asphalt technology. By warm mix asphalt technology, it is possible to produce asphalt at lower temperatures. In this study, Pawma-1 (%0.35) and Low Energy and Low Carbon-Dioxide Asphalt Pavement (Leadcap) (%1.5) warm mix asphalt admixtures and Styrene-Butadiene-Styrene (SBS) (%2) admixture were tested in mixture samples. The effects of the use hydrated lime in warm mix asphalt as filler, have also been examined. Bitumen (B50/70) obtained from TÜPRAŞ refinery was used in the study. Limestone type crushed stone material obtained from Elazığ Hankendi region was used as aggregates. After preparing the modifier binders, mixture samples were prepared by determining the optimum bitumen contents according to the Marshall method. 2% hydrated lime was used instead of filler in half of the mixture samples. Marshall stability and yield test (ASTM D-1559) were applied on the prepared samples. Stability increased with Leadcap, Pawma-1 and SBS additives. It has been shown that the hydrated lime increases the stability values of warm mix asphalts. It has been determined that SBS modified mixtures with hydrated lime gave the most positive results.

**Keywords:** Warm mix asphalt, Leadcap, Pawma-1.

\* Fırat Üniversitesi Keban Meslek Yüksek Okulu Elazığ.

\*\* Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, 23119, Elazığ.

İletişim Yazarı: Taner ALATAŞ (talatas@firat.edu.tr)

## 1. GİRİŞ

İlık karışım asfalt, asfalt karışımların üretim ve serim sıcaklıklarının düşürülmesine imkân tanıyan teknoloji olarak ifade edilmektedir. 20°C ile 55°C daha düşük sıcaklıklarda bağlayıcının viskozitesini düşürerek bağlayıcının agregayı bütünüyle sarması neticesinde bağlayıcı ile agrega arasındaki gerekli aderansın sağlanmasıdır. Aynı mekanizma ile karışımın düşük sıcaklıklardaki işlenebilirliğini iyileştirmektedir. Düşük sıcaklıklardaki karışımın sıkıştırma performansının artması sonucunda kaplamanın yaşlanma sertleşmesine ve nem hasarına sebep olan geçirgenliği azalmaktadır. Bununla birlikte ılık karışım asfalt teknolojisi, soğuk havalarda kaplama yapılmasının gerektiği veya asfalt karışımın serilmeden önce uzun süre taşınmasının gerekli olduğu durumlarda faydalı olmaktadır. Çevre sıcaklığı ile karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı arasındaki farkın azalması sebebiyle sıkıştırma için gerekli olan zaman aralığı artacaktır (D'Angelo ve diğ., 2008). Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının azalması, ılık asfalt kaplamaların kür süresinin azalmasına ve yolun sıcak asfalt kaplamalara oranla trafiğe daha erken açılmasını sağlamaktadır. Havaalanı kaplamalarında yapılacak onarım ve bakım işlerinde, ekonomik şartlar dolayısıyla yolun uzun zaman trafiğe kapalı kalmaması gerektiği için ılık karışım asfalt kullanımı yerinde bir seçim olacaktır (Su ve diğ., 2009).

Şengöz ve Oylumluoğlu (2013) yaptıkları bir çalışmada, ılık asfalt karışımların geri dönüştürülmüş asfalt kaplamalarda kullanımı araştırılmıştır. Kontrol numuneleriyle, Rediset kullanılan geri dönüştürülmüş asfalt karışımlarının stabiliteeleri benzer çıkmıştır. Bayazit ve diğ. (2012) tarafından yapılan bir çalışmada, ılık asfalt karışımların mekanik özellikleri araştırılmıştır. 160/220 penetrasyon derecesindeki bitüme Fischer-Tropsch parafin mumu ve polietilen mum bitüm ağırlığının %6'sı oranında ilave edilmiştir. Asfalt karışımların mekanik özellikleri Marshall testi ve indirekt çekme direnci deneyleri ile belirlenmiştir. Test sonuçlarına göre Fischer-Tropsch parafin mumu katkılı numunelerin Marshall stabiliteeleri ve ITS değerleri kontrol numunelerine göre daha yüksek çıkarken, polietilen mum katkılı numunelerin Marshall stabiliteeleri ve ITS değerleri kontrol numunelerine göre daha düşük çıkmıştır. Sanchez-Alonso ve diğ. (2011) tarafından yapılan bir çalışmada, ılık asfalt katkılı bitümlerin mekaniksel özellikleri ve sıkıştırılabilirliği araştırılmıştır. Kimyasal, organik ve köpük ılık asfalt katkı maddeleri kullanılmıştır. Üç farklı referans sıcaklığında yapılan test sonuçlarına göre üretim sıcaklığın azalmasıyla daha az sıkıştırma enerjisi gerekmektedir ve referans numunelerine göre katkılı numunelerin suya olan hassasiyeti iyileşmektedir. Tüm katkılı numunelerin rijitlik modülleri referans numunelerine göre daha yüksek çıkmıştır. Pawma-1 ılık karışım asfalt katkısı ülkemizde üretilmektedir. Pawma-1 ile modifiye edilmiş bağlayıcılar üzerinde yapılan deneylerde viskozitenin ve penetrasyonun azaldığı, yumuşama noktasının ise arttığı görülmüştür. (İstek ve Alataş, 2017). Leadcap, Kumho Petrokimyasal şirketi ile Kore İnşaat Teknoloji Enstitüsü işbirliği ile geliştirilen bir ılık karışım asfalt katkı maddesidir. Leadcap ilavesi ile bağlayıcının viskozitesinin düştüğü ve yüksek sıcaklıklardaki reolojik özelliklerinin iyileştiği görülmüştür (Kim ve diğ., 2014). Leadcap katkılı karışımların, tekerlek izine karşı sıcak asfalt kaplamalara göre daha iyi performans sergilediği görülmüştür (Lee ve diğ., 2011).

Bitümlü sıcak karışımların, trafik yüklerine ve ısıya olan dayanımlarının artırılması için çeşitli katkı maddeleri kullanılmaktadır. Bu katkı maddelerinden yaygın olarak kullanılan Stiren-Butadien-Stiren (SBS) kopolimeridir. Yapılan çalışmalarda SBS'nin bitümlü sıcak karışımların tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımını arttırdığı tespit edilmiştir. Sıcak iklimli bölgelerde SBS kullanımının bağlayıcı sebepli bozulmaların önlenmesine yardımcı olacağı, pahalı olan bakım ve onarım harcamalarının geciktirilmesini sağlayacağı görülmüştür (Yılmaz ve Kök, 2008). Kuloğlu ve diğ. (2013) yaptıkları bir çalışmada, SBS katkılı bitümlü karışımların arazi performanslarının değerlendirilmesini yapmışlardır. Kaplamanın bir yıl içinde maruz kaldığı toplam sıcaklık indeksi ile rijitlik modülü ve stabilite arasında doğrusal bir ilişkinin olduğunu, SBS katkılı numunelerin saf karışımlara oranla daha fazla stabiliteye ve rijitlik modülüne sahip olduklarını tespit etmişlerdir. Kumar ve diğ. (2008) tarafından yapılan çalışmada, SBS ve düşük yoğunluklu polietilenin (LDPE) bağlayıcı ve bitümlü karışımların performansı üzerindeki

etkileri incelenmiştir. Deney sonuçları neticesinde iki katkı maddesinin de kalıcı deformasyona karşı dayanımı arttırdığı tespit edilmiştir. Şengül ve diğ. (2013) tarafından yapılan bir çalışmada, SBS modifiyeli taş mastik asfaltların kaplama performansı araştırılmıştır. Marshall oranı yaklaşımı ile optimum bitüm içerikleri hesaplanan numuneler üzerinde tekrarlı sünme, indirekt çekme rijitlik modülü ve tekerlek izi deneyleri yapılmıştır. Modifiye edilen numunelerin rijitlik modülleri ve tekerlek izine karşı dirençleri artmıştır. Lu ve Isacson'un (1997) yaptıkları bir çalışmada, SBS modifiyeli bağlayıcıların reolojik özellikleri araştırılmıştır. SBS kopolimer ilavesi ile yüksek sıcaklıklarda bağlayıcının elastisitesinde ve düşük sıcaklıklarda bağlayıcı esnekliğinde artış olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca SBS ilavesi ile bağlayıcının ısı hassasiyeti azalmıştır.

Yapılan laboratuvar çalışmalarında, bitümlü sıcak karışımlara sönmüş kireç ilave edilmesinin trafik yüklerinden doğan gerilmelerin yayılmasına yardımcı olduğu ve mukavemeti arttırdığı, tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımını arttırdığı tespit edilmiştir (Little ve diğ., 2006). Johansson (1995) tarafından yapılan bir çalışmada, kireç soyulma önleyici katkı maddesi olarak kullanılmıştır. Çalışma neticesinde sönmüş kireç ilavesinin bağlayıcının erken yaşlanmasını geciktirdiği böylelikle adezyon kuvvet durumunu iyileştirdiği ortaya çıkmıştır. Jones'un (1997) yaptığı bir çalışmada, sönmüş kirecin esnek kaplamanın sertleşme özelliği üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Araştırma neticesinde, %1,5 kuru ağırlık oranındaki sönmüş kirecin kaplamanın yaşlanma sertleşmesini azaltmada yeterli katkıyı sağlayacağı tespit edilmiştir. Mohammad ve Abadie'nin (2000) yaptıkları bir çalışmada, sönmüş kirecin polimer katkılarıyla birlikte kullanıldığı zaman faydalarının daha da arttığı, bu performans artışlarının yalnız başına kullanılmasına kıyasla oldukça fazla olduğu görülmüştür. Khodaii ve diğ. (2012) tarafından yapılan bir çalışmada, nem hasarına karşı etkinliği sıcak karışım asfaltlarda kanıtlanan sönmüş kirecin, ılık karışım asfaltlarda kullanıldığı zaman nasıl etki edeceği araştırılmıştır. Çalışmada yüzde 0-2 arasında değişen oranlarda sönmüş kireç kullanılmıştır. Çalışma neticesinde sürekli gradasyona sahip ılık asfalt karışımlarda kireç oranının artmasıyla nem hasarına karşı direnç artmıştır. Fakat süreksiz gradasyona sahip ılık karışım asfaltların bir kısmında minimum yüzde 80 olan çekme direnci limitinin sağlanmadığı görülmüştür. Kim ve diğ. (2014) tarafından yapılan bir çalışmada, atık lastik modifiyeli karışımlara sönmüş kireç ilave edilerek nem hassasiyetine karşı dayanımı araştırılmıştır. Çalışma neticesinde sönmüş kireç katkılı karışımların nem hassasiyetinde kayda değer iyileştirmeler görülmüştür.

Bu çalışmada, farklı ılık asfalt katkı maddeleri kullanarak elde edilen Marshall numunelerinin özellikleri incelenmiş, katkısız ve SBS modifiyeli sıcak asfalt karışımlarla karşılaştırılmıştır. Bununla birlikte daha önce yapılan çalışmalarda, bitümlü sıcak karışımların bazı özelliklerini iyileştirdiği gözlemlenen sönmüş kirecin ılık karışım asfaltlarda filler olarak kullanımının etkileri araştırılmıştır. Modifiye bağlayıcılar hazırlandıktan sonra Marshall yöntemine göre optimum bitüm oranları belirlenerek karışım numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler üzerinde Marshall stabilite ve akma deneyi (ASTM D-1559) uygulanmıştır.

## 2. MATERYAL VE METOT

### 2.1. Materyal

Deneysel çalışmalarda bağlayıcı olarak TÜPRAŞ rafinerisinden temin edilen B 50/70 sınıfı bitüm, agrega olarak Elazığ Hankendi bölgesinden temin edilen kalker türü kırmataş malzeme kullanılmıştır. Katkı maddesi olarak Leadcap, Pawma-1, SBS ve sönmüş kireç kullanılmıştır. Bu katkı maddelerinden Pawma-1 ve Leadcap ılık karışım asfalt katkı maddeleri, SBS ise sıcak karışım asfalt katkı maddesidir. Bu katkılar bağlayıcıya ilave edilerek bağlayıcı malzeme modifiye edilmiştir. Agregaların fiziksel özellikleri Tablo 1'de, kullanılan gradasyon Tablo 2'de ve gradasyon eğrisi Şekil 1'de verilmiştir. Bağlayıcı malzemeye ait özellikler Tablo 3'de, Katkı maddeleri Şekil 2'de verilmiştir.

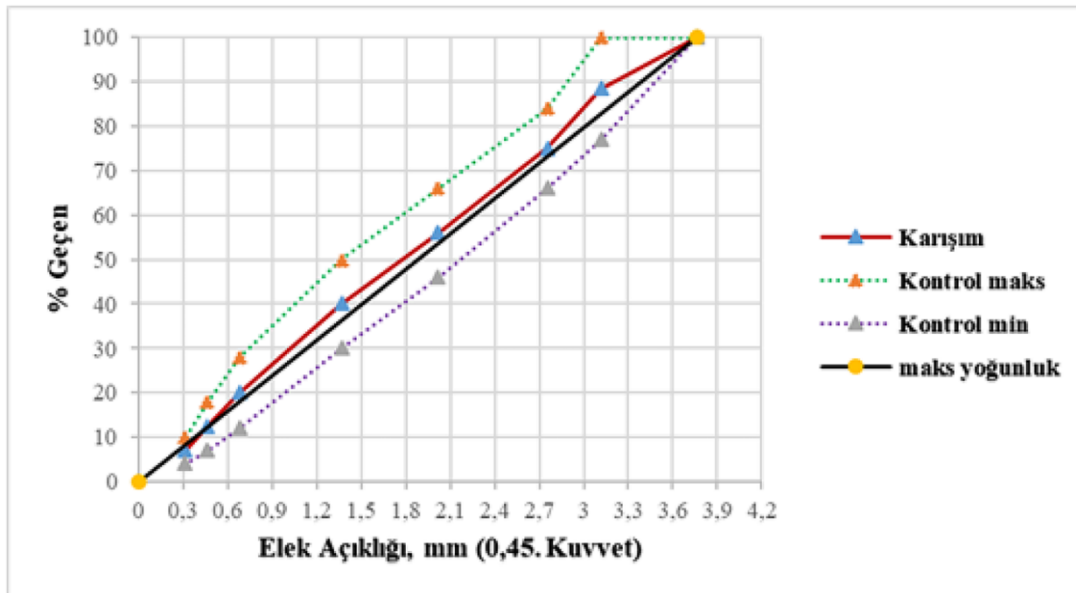
**Tablo 1. Agregaların fiziksel özellikleri.**

Özellikler	Standart	Sonuç	Şartname Limiti
------------	----------	-------	-----------------

Özellikler	Standart	Şartname Limitleri	Kaba	İnce	Filler
Dayanıklılık (Los Angeles Aşınma Kaybı), %	TS EN 1097-2	maks 30	24		
Sağlamlık (MgSO <sub>4</sub> ile Donma Kaybı), %	TS 1367-2	maks 18	6,5		
Su Absorpsiyonu %	ASTM C127	maks 2	0,3		
Hacim Özgöl Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	ASTM C127		2,677		
Hacim Özgöl Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	ASTM C128			2,628	
Zahiri Özgöl Ağırlık	ASTM C127		2,698		
Zahiri Özgöl Ağırlık	ASTM C128			2,675	
Zahiri Özgöl Ağırlık	ASTM D854				2,717

**Tablo 2. Agregada gradasyonu.**

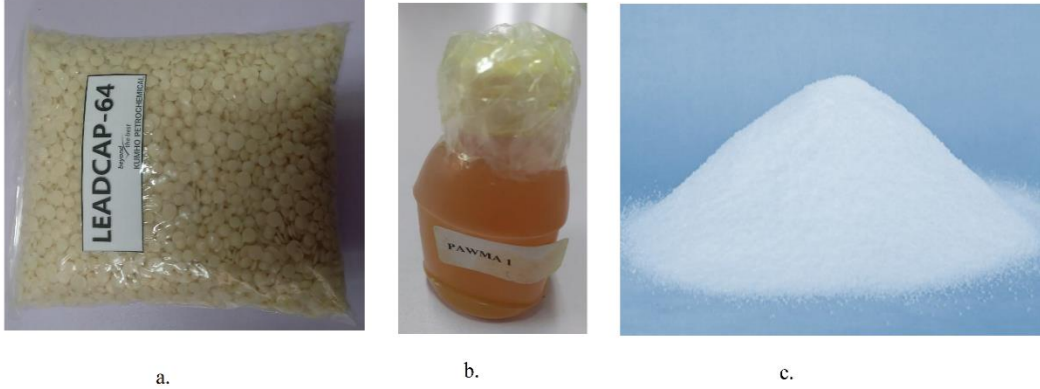
Elek Boyutu (mm)	19,00	12,50	9,50	4,75	2,00	0,420	0,180	0,075
%Geçen	100	88,5	75	56	40	20	12,5	7
<b>Karışımındaki Agregada Yüzdeleri</b>								
Kaba						44		
İnce						49		
Filler						7		



**Şekil 1:**  
Agregada gradasyon eğrisi.

Penetrasyon (0.1 mm), 100 g, 5 s	ASTM D5	53	50-70
Yumuşama noktası (°C)	ASTM D36	49,9	46-54
Penetrasyon indeksi (PI)	-	-1,09	-
Özgül ağırlık	-	1,039	-
Viskozite (cP, 135°C)	ASTM D4402	400	-
Viskozite (cP, 165°C)	ASTM D4402	125	-
Karıştırma sıcaklığı (°C)	-	157	-
Sıkıştırma sıcaklığı (°C)	-	144	-
<b>RTFOT Sonrası</b>			
Kütle kaybı (%)	ASTM D2872	0,314	maks 0,5
Penetrasyon (0.1 mm), 100 g, 5 s	ASTM D5	27	-
Kalıcı penetrasyon, (%)	-	51	min 50
Yumuşama noktası (°C)	ASTM D36	54,3	-
Yumuşama noktasındaki artış (°C)	-	4,4	maks 9
Penetrasyon indeksi (PI)	-	-1,52	-

**Tablo 3. Bağlayıcı malzemeye ait özellikler.**



a.

b.

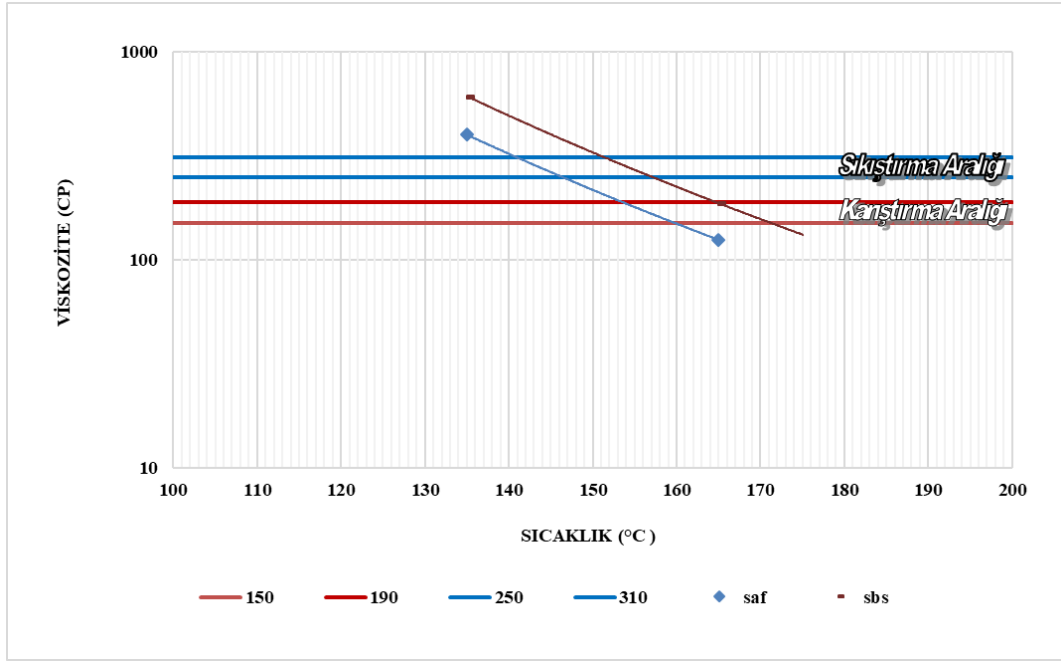
c.

**Şekil 2:**

*Katkı maddeleri.*

*a. Leadcap b. Pawma-1 c. SBS*

Çalışmada, öncelikle Dönel viskozimetre (RV) deneyi ile katkısız bağlayıcının karıştırma sıcaklığı 157°C, SBS katkılı bağlayıcının karıştırma sıcaklığı ise 168°C olarak bulunmuştur. Deney sonuçları şekil 3'te verilmiştir. Üretici firmaların tavsiye ettikleri şekilde Pawma-1 %0,35, Leadcap %1,5 oranlarında katkısız bağlayıcının karıştırma sıcaklığı olan 157°C sıcaklıktaki bitüme ilave edilmiş ve 1000 devir/dakika hıza sahip karıştırıcıda 10 dakika süreyle karıştırılmıştır. SBS katkısı ise 180°C sıcaklıktaki bitüme ilave edilmiş ve 1000 devir/dakika sahip hızdaki karıştırıcıda 1 saat süreyle karıştırılmıştır. SBS oranı %2 olarak belirlenmiştir. Yapılan çeşitli çalışmalarda en etkin kireç oranının agrega ağırlığının %2'si olduğu belirlenmiştir (Little ve diğ., 2006). Sönmüş kireç içeren karışımlarda %2 oranında kalker filler yerine sönmüş kireç kullanılmıştır.



**Şekil 3:**  
Bağlayıcıların viskozite sıcaklık değışimi

## 2.2. Metot

### 2.2.1. Marshall Stabilite ve Akma Deneyi

Marshall stabilite ve akma deneyi ile bitümlü karışımlarda kullanılacak optimum bitüm muhtevası tespit edilmektedir. Bu deney için belirlenen gradasyonda yaklaşık 1100-1200 gram agrega numunesi alınıp, bir kaba konulmakta ve kullanılacak bitümün viskozimetre deneyi ile bulunan karıştırma sıcaklığına kadar belirli bir süre etüvde ısıtılmaktadır. Daha sonra agrega numunesi karıştırma kabına dökülmekte, ortası çukurlaştırılmakta ve önceden ısıtılmış bitüm dökülerek malzeme kaybı olmadan agrega daneleri tamamen bitümle kaplanana kadar bir mikserle karıştırılmaktadır. Karıştırma işleminden sonra karışım kalıplara doldurulup şişlendikten sonra Marshall tokmağı yardımıyla sıkıştırılmaktadır. Kaplamanın cinsine ve trafik seviyelerine bağlı olarak Marshall tokmağı ile karışımın her iki yüzüne 50 veya 75 darbe uygulanmaktadır. Daha sonra numuneler işaretlenerek soğumaya bırakılmaktadır. Soğuyan numuneler bir krika yardımıyla kalıptan çıkarılmakta, yükseklikleri ölçülmekte, havada ve suda gerekli tartımları yapılarak fiziksel özellikleri tespit edilmektedir. Stabilite ve akma değerlerini tespit etmek için numuneler 30-40 dakika  $60 \pm 1^\circ\text{C}$  su banyosunda bekletildikten sonra Marshall aletine yerleştirilmekte ve dakikada 50,8 mm'lik bir hızda yükleme yapılmaktadır. Kalıcı Marshall stabilitesi yönteminde numuneler  $60 \pm 1^\circ\text{C}$  sıcaklığa sahip su banyosunda 24 saat bekletildikten sonra Marshall deneyine tabi tutulmaktadır. Deney sonunda bu numunelerin stabilite değerlerinin normal stabilite değerlerine oranı kalıcı Marshall stabilitesi değerini vermektedir ( Ağar ve Umar, 1991; Önal ve Kahramangil, 1993). Marshall stabilite ve akma deney aleti Şekil 4'te gösterilmiştir.

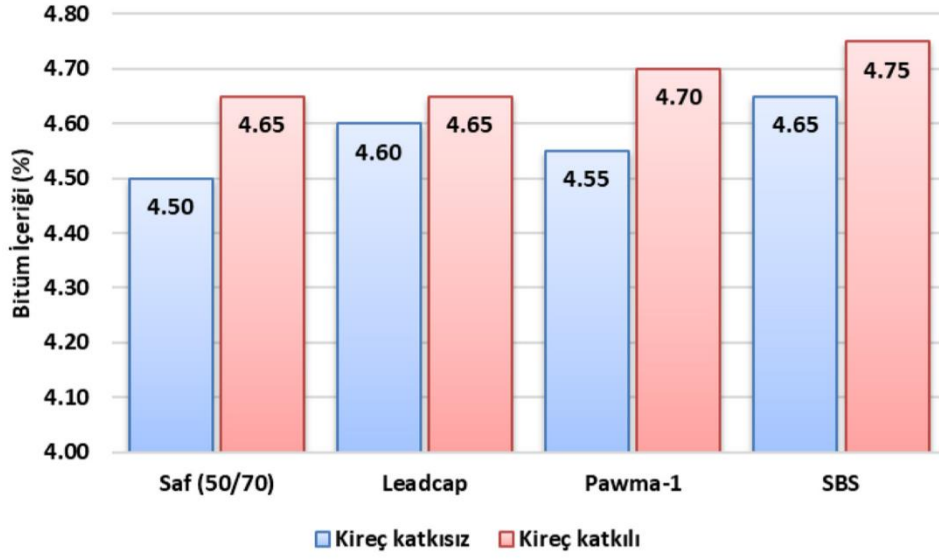


**Şekil 4:**  
*Marshall stabilite ve akma deney aleti.*

### 3. DENEYSEL ÇALIŞMA

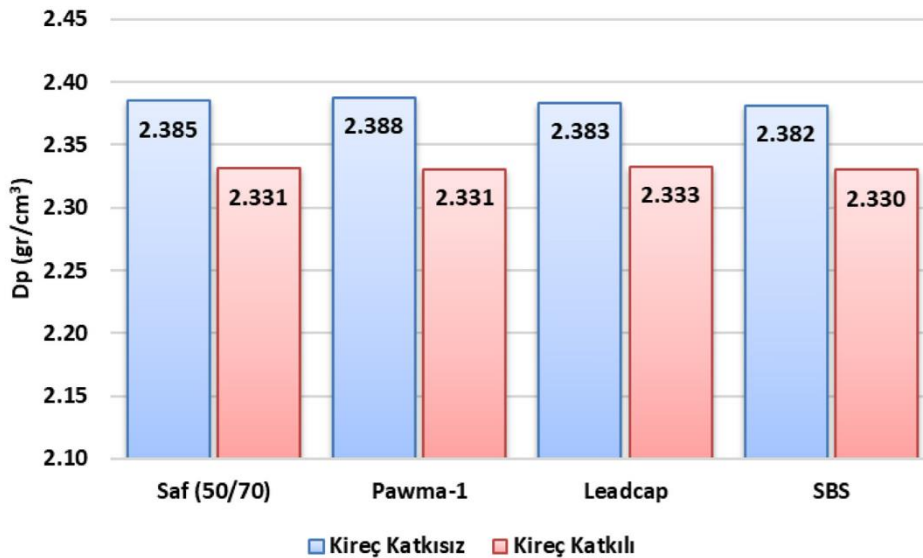
Karışımlar, belirlenen gradasyonda 1100 gram agrega ile agrega ağırlığının %4,0; 4,5; 5,0; 5,5; 6,0 oranlarında bitüm kullanılarak hazırlanmıştır. Her bir oranda üçer numune hazırlanmıştır. Saf ve modifiye karışımlar sönmüş kireç katkılı ve katkısız olarak iki grup halinde hazırlanmıştır. Sönmüş kireç katkısız karışımlarda gradasyona uygun olarak %7 oranında filler kullanılmıştır. Sönmüş kireç katkılı karışımlarda %5 oranında filler, %2 oranında sönmüş kireç kullanılmıştır. Katkısız bağlayıcının karıştırma sıcaklığı RV deneyi ile 157°C olarak belirlenmiş, numuneler hazırlanırken bağlayıcı malzeme ve agrega karışımı bu sıcaklıklarda karıştırılmıştır. İlık karışımlar hazırlanırken üretici firmaların tavsiye ettikleri şekilde bağlayıcı malzeme katkısız bağlayıcıyla aynı sıcaklığa yani 157°C'ye kadar ısıtılırken, agrega karışımı ise 135°C'ye kadar ısıtılmıştır. SBS katkılı bağlayıcının karıştırma sıcaklığı 168°C olarak belirlenmiş ve numuneler hazırlanırken bağlayıcı malzeme ve agrega karışımı bu sıcaklıklarda karıştırılmıştır. Marshall tokmağı ile karışımların her iki yüzüne 75 darbe uygulanmıştır. Hazırlanan numunelerin yükseklikleri ölçülmüş, havada ve suda tartımları yapılarak, hacim özgül ağırlıkları ( $D_p$ ), boşluk oranları ( $V_h$ ), agregalar arası boşluk oranları ( $VMA$ ) ve asfaltla dolu boşluk oranları ( $V_f$ ) belirlenmiştir. Daha sonra numuneler Marshall stabilite aletinde denenererek stabilite ve akma değerleri belirlenmiştir. Bulunan optimum bitüm içerikleri Şekil 5'te verilmiştir.

Sönmüş kireç katkısı, agrega karışımının inceliğini, dolayısıyla toplam yüzey alanını arttırdığı için bütün karışımların optimum bitüm oranlarını arttırmıştır. En fazla artış saf ve Pawma-1 modifiyeli karışımlarda görülürken, en az artış Leadcap modifiyeli karışımda görülmüştür. Kireç katkısız ve katkılı, saf ve modifiye karışımlardan optimum bitüm içeriklerinde 48 adet numune hazırlanmıştır. Bu numunelerden 24 tanesi Marshall testine tabi tutulmadan önce 24 saat 60°C sıcaklıktaki su banyosunda bekletilerek koşullandırılmıştır.



**Şekil 5:**  
*Optimum bitüm içerikleri.*

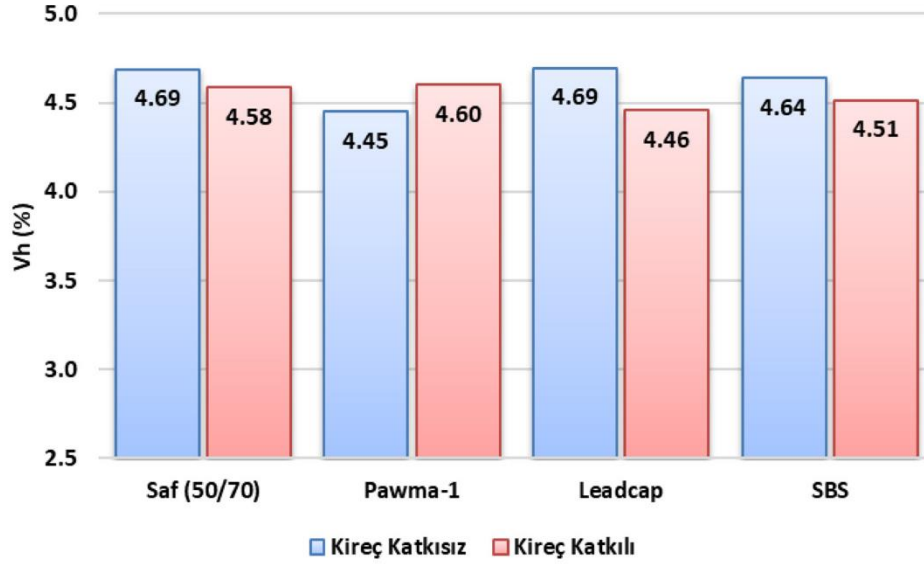
Optimum bitüm içeriğinde hazırlanmış **koşullandırılmamış** karışımların Dp değerleri Şekil 6'da, Vh değerleri Şekil 7'de, VMA değerleri Şekil 8'de, Vf değerleri Şekil 9'da, stabilite değerleri Şekil 10'da, akma değerleri Şekil 11'de, Marshall oranı değerleri Şekil 12'de verilmiştir. Optimum bitüm içeriğinde hazırlanmış **koşullandırılmış ve koşullandırılmamış** karışımların Marshall stabilite değerleri Şekil 13'de, akma değerleri Şekil 14'de, Marshall oranı değerleri Şekil 15'de gösterilmiştir. Optimum bitüm içeriğinde hazırlanmış **sönmüş kireç katkılı** koşullandırılmış ve koşullandırılmamış karışımların Marshall stabilite değerleri Şekil 16'da, akma değerleri Şekil 17'de, Marshall oranı değerleri Şekil 18'de gösterilmiştir.



**Şekil 6:**  
*Numunelerin Dp değerleri.*

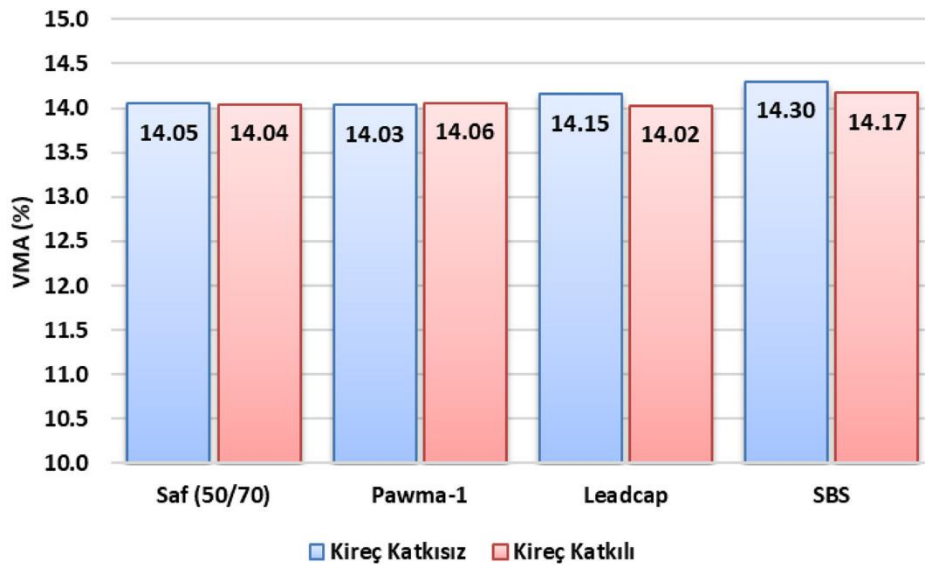


Karışımların hacim özgül ağırlıklarının birbirlerine çok yakın olduğu görülmüştür. Sönmüş kireç katkısının hacim özgül ağırlıkları küçük bir oranda azalttığı belirlenmiştir. En büyük hacim özgül ağırlık değeri Pawma-1 modifiyeli karışımlarda görülürken en düşük hacim özgül ağırlık değeri sönmüş kireç katkılı SBS modifiyeli karışımlarda görülmüştür.



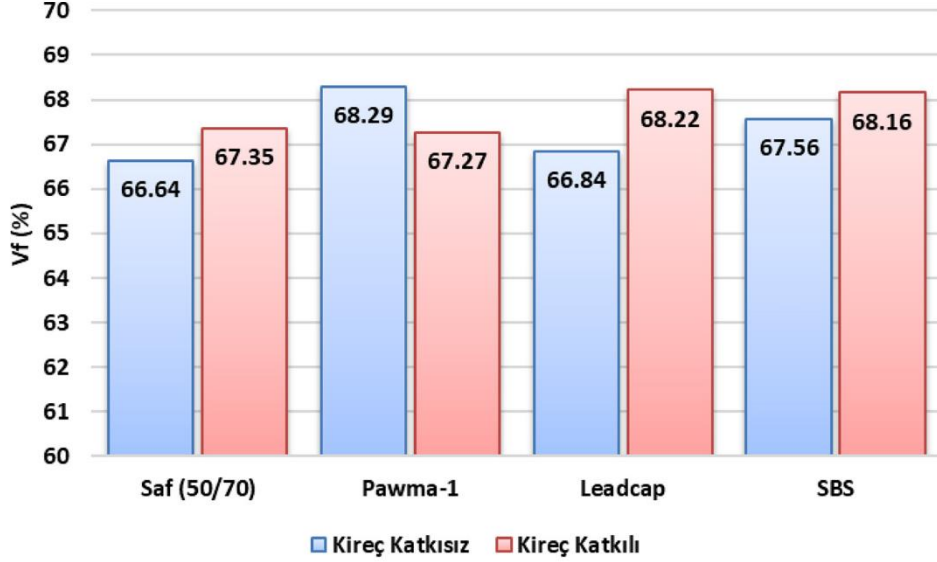
**Şekil 7:**  
Numunelerin Vh değerleri.

Bütün karışımların boşluk oranı değerleri, %3-5 olan şartname ölçütünü sağlamışlardır. Pawma-1 modifiyeli karışımda sönmüş kireç katkısı boşluk oranını artırırken diğer karışımlarda sönmüş kireç katkısı boşluk oranlarını bir miktar azaltmıştır.



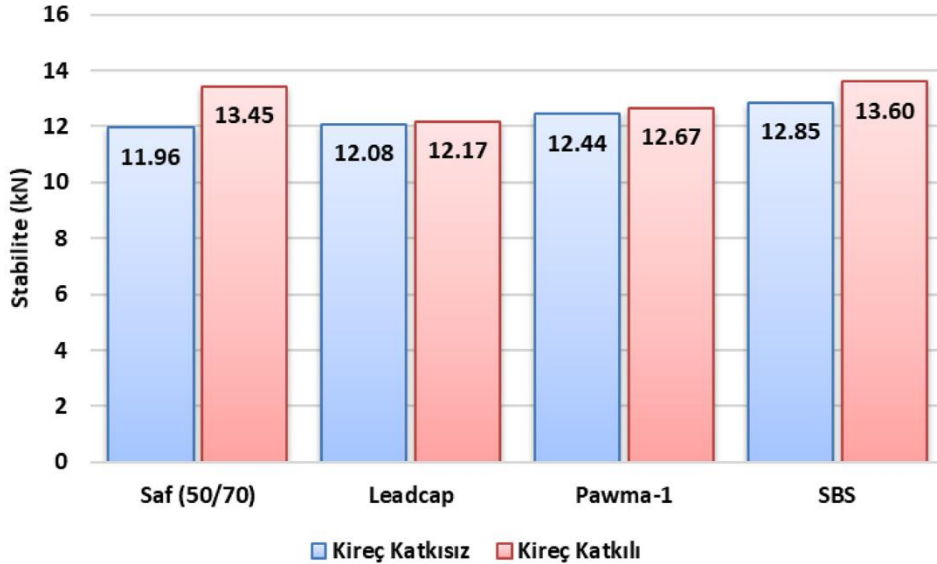
**Şekil 8:**  
Numunelerin VMA değerleri.

Bütün karışım ların WMA değ erleri, min %14 olan şartname ölçütünü sağlamışlardır. Sönmüş kireç katkısının WMA değ erlerini önemli oranlarda değ iş tirmedığı görülmüş tür. En yüksek VMA değ erleri SBS modifiyeli karışım larında görülmüş tür.



**Şekil 9:**  
Numunelerin Vf değ erleri.

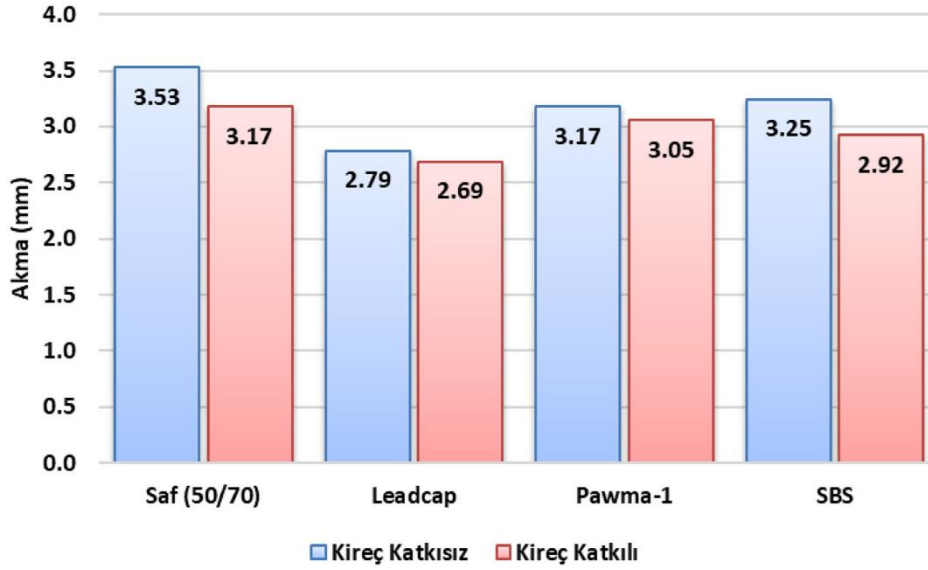
Bütün karışım ların Vf değ erleri, %65-75 olan şartname ölçütünü sağlamışlardır. Pawma-1 modifiyeli karışım da sönmüş kireç katkısı Vf değ erini azaltırken diğ er karışım larında sönmüş kireç katkısı Vf değ erlerini bir miktar arttırmış tür.



**Şekil 10:**  
Numunelerin Stabilite değ erleri.

Bütün karışım ların stabilite değ erleri, minimum 9 kN olan şartname ölçütünü sağlamışlardır. Sönmüş kireç bütün karışım ların stabilite değ erlerini arttırmış tür. En yüksek

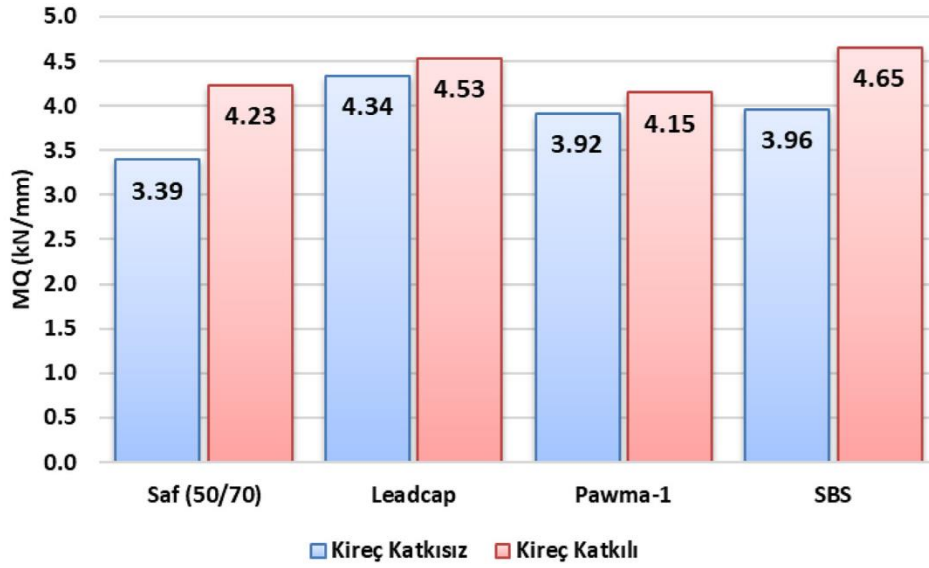
stabilite değeri sönmüş kireç katkıli SBS modifiyeli karışımlarda görülmüştür. SBS katkısı ile stabilite değeri %7,47 oranında artarken bu artış sönmüş kireç ilavesi ile %13,6 oranına yükselmiştir. Leadcap katkısı ile stabilite değeri %1,03 oranında artarken bu artış sönmüş kireç ilavesi ile %1,77 oranına yükselmiştir. Pawma-1 katkısı ile stabilite değeri %3,99 oranında artarken bu artış sönmüş kireç ilavesi ile %5,93 oranına yükselmiştir. B 50/70 (saf) karışımın stabilite değeri kireç ilavesi ile %12,42 oranında artmıştır. Sönmüş kireç katkısının, saf (50/70) bitüm ile hazırlanan karışımlar üzerinde en yüksek oranda olumlu etki yaptığı görülmüştür. Sönmüş kirecin ılık karışım asfaltların stabilite değerlerini arttırdığı görülmüş fakat bu artışın saf bitüm ile hazırlanan karışımlarda meydana gelen artışa göre çok düşük olması, kirecin olumlu etkisinin düşük karıştırma sıcaklıklarında azaldığını göstermiştir.



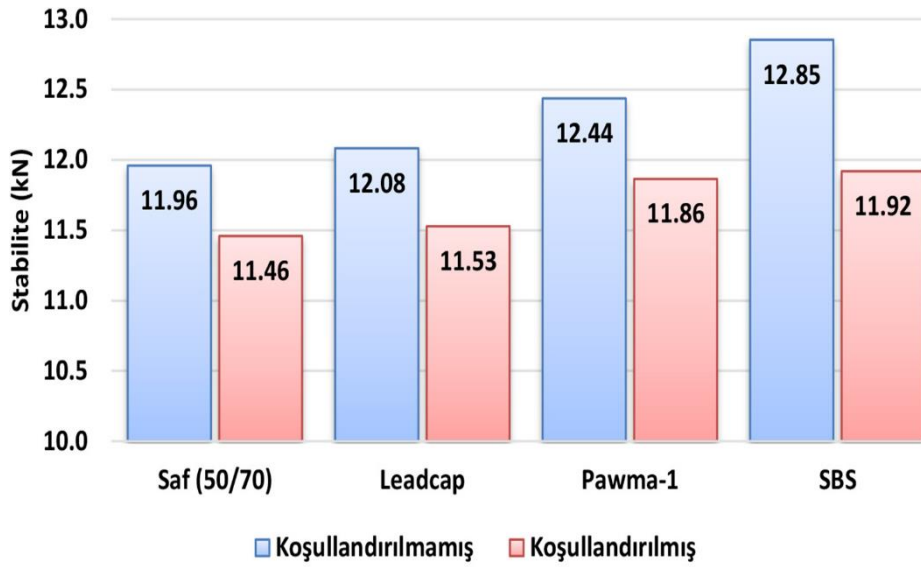
**Şekil 11:**  
*Numunelerin Akma değerleri.*

Bütün karışımların akma değerleri, 2-4 mm aralığı olan şartname ölçütünü sağlamışlardır. Tüm karışımlarda kireç katkısı ile akma bir miktar azalmıştır. En düşük akma kireç katkıli Leadcap modifiyeli karışımlarda görülürken en yüksek akma değerleri saf (50/70) karışımlarda görülmüştür. SBS katkısı ile akma değeri %7,93 oranında azalırken, sönmüş kireç ilavesi ile azalma oranı %17,28 olmuştur. Leadcap katkısı ile akma değeri %20,96 oranında azalırken, sönmüş kireç ilavesi ile azalma oranı %23,80 olmuştur. Pawma-1 katkısı ile akma değeri %10,20 oranında azalırken, sönmüş kireç ilavesi ile azalma oranı %13,60 olmuştur. B 50/70 (saf) karışımın akma değeri kireç ilavesi ile %10,20 oranında azalmıştır.

Marshall oranı değeri, stabilite değerinin akma değerine bölünmesi ile tespit edilmektedir. Kireç içermeyen modifiye karışımlarda Marshall oranı değerleri artmıştır. Marshall oranı, Leadcap modifiyeli karışımlarda %27,88 oranında, Pawma-1 modifiyeli karışımlarda %15,52 oranında, SBS modifiyeli karışımlarda %16,73 oranında artmıştır. Kireç katkısı ile tüm karışımların Marshall oranı değerleri artmıştır. Marshall oranı kireç katkıli, saf (50/70) karışımlarda %24,85 oranında, Leadcap modifiyeli karışımlarda %4,44 oranında, Pawma-1 modifiyeli karışımlarda %5,90 oranında, SBS modifiyeli karışımlarda %17,46 oranında artmıştır. Kalıcı deformasyona karşı dayanımın göstergesi olan MQ sonuçlarından bütün katkıların bitümlü sıcak karışımların kalıcı deformasyona karşı dayanımını arttıracığı özellikle kireç kullanımının en etkin katkı olduğu tespit edilmiştir.

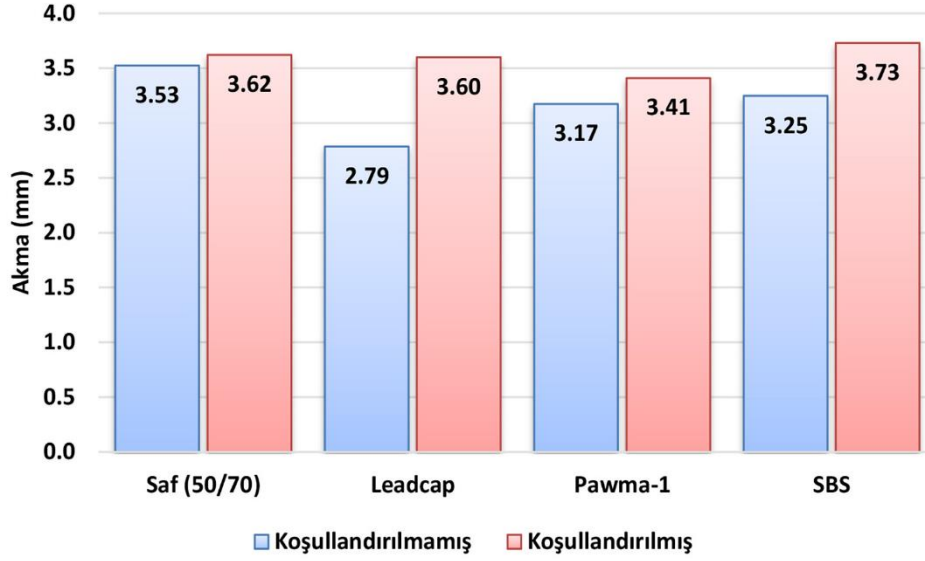


**Şekil 12:**  
Numunelerin Marshall oranı değerleri.



**Şekil 13:**  
Koşullandırılmış ve koşullandırılmamış kireç katkısız karışımların Marshall stabilite değerleri.

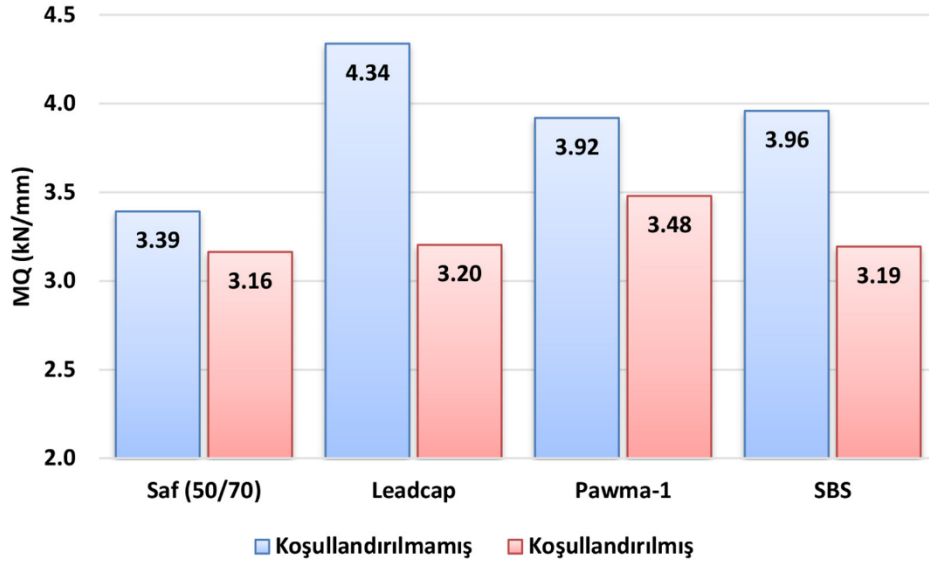
Koşullandırma neticesinde saf (50/70) karışımlarda %4,19 oranında, Leadcap modifiyeli karışımlarda %4,58 oranında, Pawma-1 modifiyeli karışımlarda %4,61 oranında, SBS modifiyeli karışımlarda %7,27 oranında stabilite değeri azalmıştır. Koşullandırılmış karışımların stabilite değerlerinin birbirlerine yakın olduğu görülürken en yüksek stabilite değeri SBS modifiyeli karışımlarda görülmüştür. Koşullandırılmış karışımlarda stabilite değerleri saf karışımlara oranla Leadcap modifiyeli karışımlarda %0,61 oranında, Pawma-1 modifiyeli karışımlarda %3,49 oranında, SBS modifiyeli karışımlarda %4,01 oranında artmıştır.



**Şekil 14:**

*Koşullandırılmış ve koşullandırılmamış kireç katkısız karışımların Akma değerleri.*

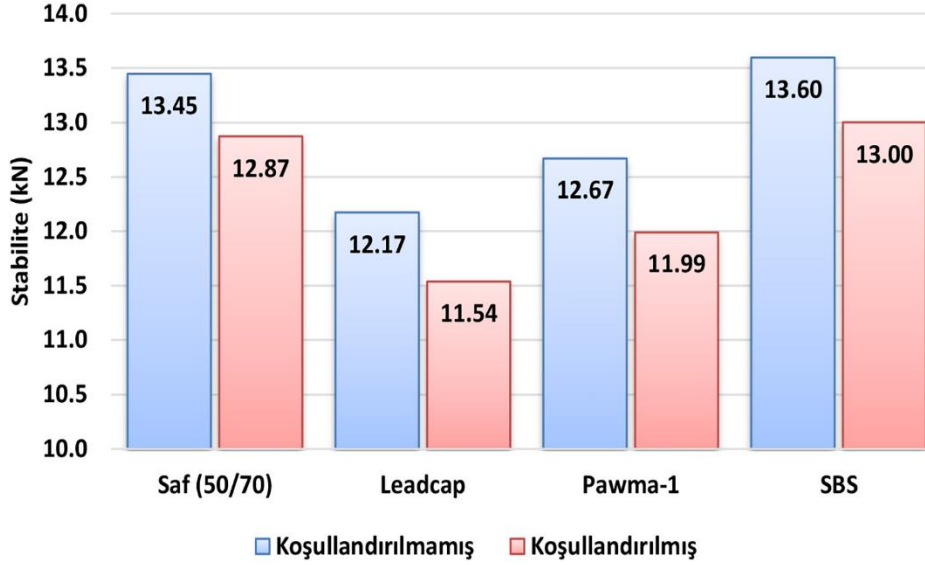
Koşullandırma neticesinde saf karışımlarda %2,72 oranında, Leadcap modifiyeli karışımlarda %29,20 oranında, Pawma-1 modifiyeli karışımlarda %7,46 oranında, SBS modifiyeli karışımlarda %4,25 oranında akma değeri artmıştır. Koşullandırılmış numunelerde en düşük akma değeri Pawma-1 modifiyeli karışımlarda görülmüştür. Koşullandırılmış karışımlarda saf karışımlara oranla, Leadcap modifiyeli karışımlarda %0,55 oranında, Pawma-1 modifiyeli karışımlarda %5,8 oranında akma değerleri azalırken SBS modifiyeli karışımlarda %3,03 oranında akma değerleri artmıştır.



**Şekil 15:**

*Koşullandırılmış ve koşullandırılmamış kireç katkısız karışımların Marshall oranı değerleri.*

Koşullandırma neticesinde saf karışımlarda %6,73 oranında, Leadcap modifiyeli karışımlarda %26,15 oranında, Pawma-1 modifiyeli karışımlarda %11,23 oranında, SBS modifiyeli karışımlarda %19,32 oranında Marshall oranı değerleri azalmıştır. Koşullandırılmış numunelerde en yüksek Marshall oranı değeri Pawma-1 modifiyeli karışımlarda görülmüştür. Koşullandırılmış numunelerde saf karışımlara oranla, Leadcap modifiyeli karışımlarda %1,26 oranında, Pawma-1 modifiyeli karışımlarda %10,12 oranında, SBS modifiyeli karışımlarda %0,95 oranında Marshall oranı değerleri artmıştır.

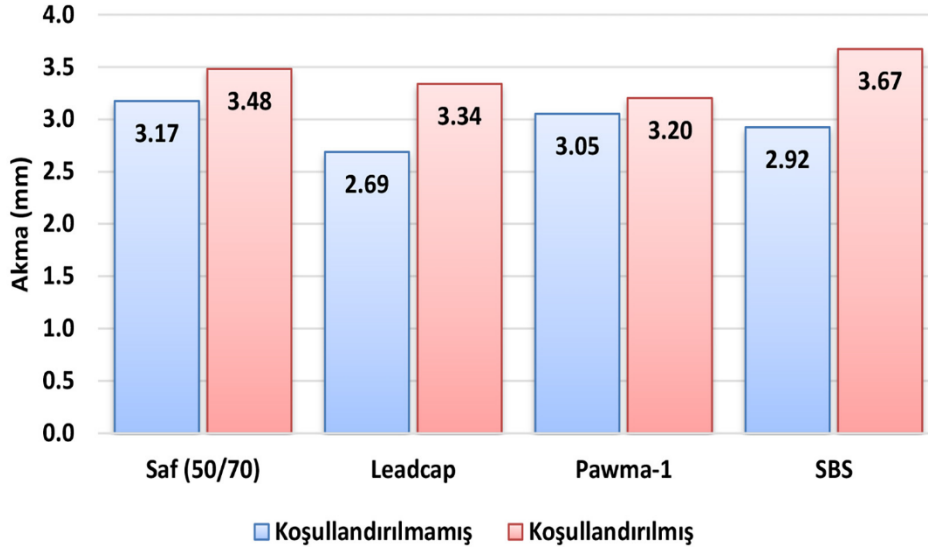


**Şekil 16:**

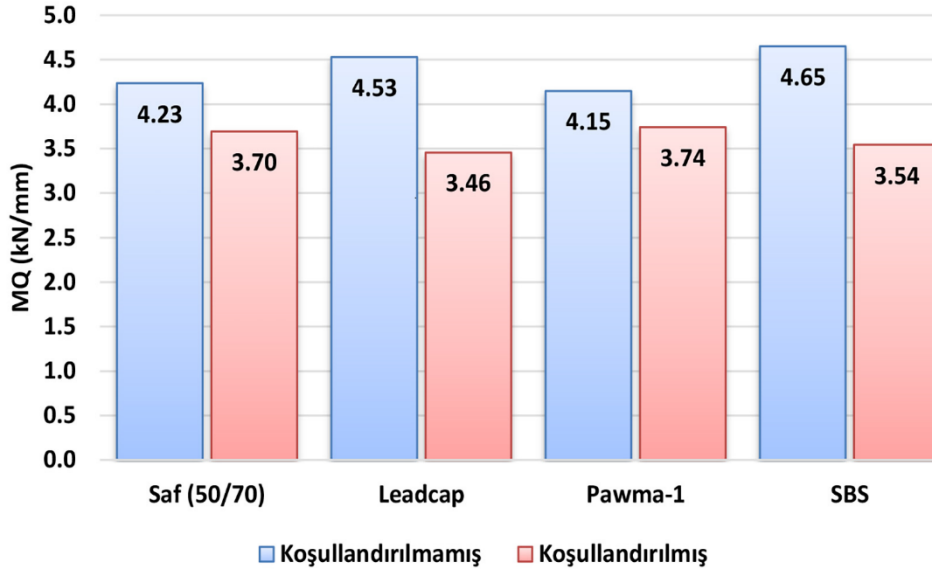
*Koşullandırılmış ve koşullandırılmamış kireç katkılı karışımların Marshall stabilite değerleri.*

Koşullandırma neticesinde sönmüş kireç katkılı, saf (50/70) karışımlarda %4,27 oranında, Leadcap modifiyeli karışımlarda %5,20 oranında, Pawma-1 modifiyeli karışımlarda %5,36 oranında, SBS modifiyeli karışımlarda %4,37 oranında stabilite değeri azalmıştır. Koşullandırılmış karışımlarda stabilite değerleri saf karışımlara oranla Leadcap modifiyeli karışımlarda %10,33 oranında, Pawma-1 modifiyeli karışımlarda %6,83 oranında azalırken, SBS modifiyeli karışımlarda %1,01 oranında artmıştır.

Koşullandırma neticesinde tüm karışımlarda akma değerleri artmıştır. Saf (50/70) karışımlarda %9,71 oranında, Leadcap modifiyeli karışımlarda %24,30 oranında, Pawma-1 modifiyeli karışımlarda %4,91 oranında, SBS modifiyeli karışımlarda %25,54 oranında bir artış görülmüştür. Koşullandırma neticesinde akma değeri en fazla değişen sönmüş kireç katkılı SBS modifiyeli karışımlar olmuştur. Koşullandırılmış karışımlarda saf karışımlara oranla, Leadcap modifiyeli karışımlarda %4,02 oranında, Pawma-1 modifiyeli karışımlarda %8,04 oranında akma değerleri azalırken SBS modifiyeli karışımlarda %5,46 oranında akma değerleri artmıştır.



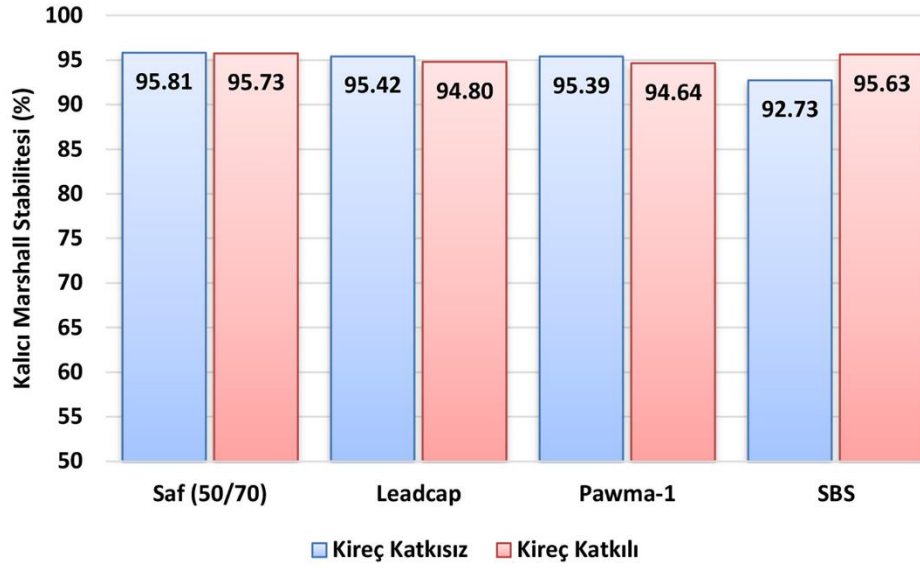
**Şekil 17:**  
*Koşullandırılmış ve koşullandırılmamış kireç katkıli karışımların Akma değerleri.*



**Şekil 18:**  
*Koşullandırılmış ve koşullandırılmamış kireç katkıli karışımların Marshall oranı değerleri.*

Koşullandırma neticesinde sönmüş kireç katkıli saf karışımlarda %12,74 oranında, Leadcap modifiyeli karışımlarda %23,73 oranında, Pawma-1 modifiyeli karışımlarda %9,79 oranında, SBS modifiyeli karışımlarda %23,83 oranında Marshall oranı değeri azalmıştır. Koşullandırılmış numunelerde en yüksek Marshall oranı değeri Pawma-1 modifiyeli karışımlarda görülmüştür.

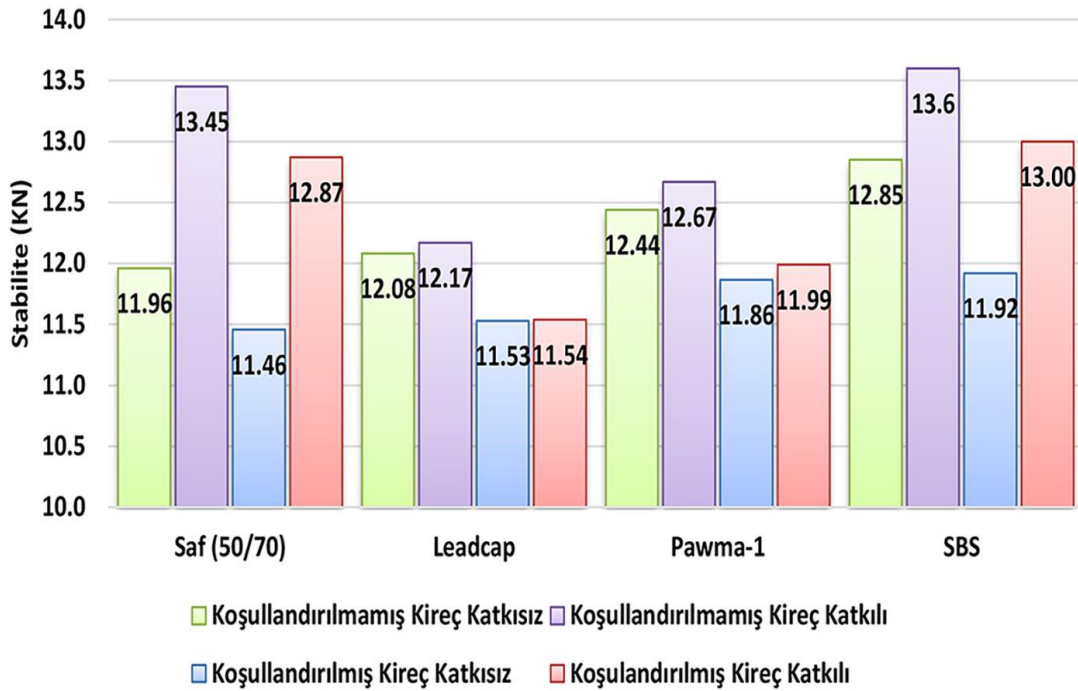
**Sönmüş kireç katkıli ve katkısız** numunelerin kalıcı Marshall stabiliteleeri Şekil 19’da, numunelerin Marshall stabiliteleerindeki değışim Şekil 20’de gösterilmiştir



**Şekil 19:**

*Koşullandırılmış ve koşullandırılmamış kireç katkılı karışımların Marshall oranı değerleri.*

Bütün numunelerin kalıcı Marshall stabilitesi değerlerinin yüksek oranlarda, birbirlerine yakın olduğu ve numunelerin nem hasarına karşı dayanıklı oldukları görülmüştür. Sönmüş kireç katkısının kalıcı Marshall stabilitesi değerlerini fazla etkilemediği görülmüştür.



**Şekil 20:**

*Numunelerin Marshall stabilitelerindeki değişim.*



Numunelerin stabilite değerlerindeki değişimlere bakıldığında, kirecin yüksek karıştırma sıcaklıklarında etkinliğinin arttığı ve stabiliteyi yüksek oranlarda arttırdığı, düşük karıştırma sıcaklıklarında ise etkinliğinin azaldığı ve stabiliteyi küçük oranlarda arttırdığı görülmektedir.

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada bitüm modifikasyonunda SBS, Pawma-1 ve Leadcap kullanılarak modifiye bitümler hazırlanmıştır. Kireç katkısız ve katkılı, saf ve modifiye karışımlardan 48 adet numune hazırlanmıştır. Hazırlanan ılık karışım asfaltların stabilite, akma, Marshall oranı ve kalıcı Marshall stabiliteyi belirlenmiş, katkısız ve SBS katkılı sıcak karışım asfaltlarla karşılaştırılmıştır. Ayrıca filler olarak %2 oranında kullanılan sönmüş kirecin etkisi araştırılmıştır.

Sönmüş kireç katkısı, agrega karışımının inceliğini, dolayısıyla toplam yüzey alanını arttırdığı için bütün karışımların optimum bitüm oranlarını arttırmıştır. En fazla artış saf ve Pawma-1 modifiyeli karışımlarda görülürken en az artış Leadcap modifiyeli karışımda görülmüştür.

Leadcap, Pawma-1 ve SBS katkı maddeleri ile stabilite artmıştır. Sönmüş kireç katkısı bu artışın daha fazla olmasını sağlamıştır. Sönmüş kireç katkısı en olumlu etkiyi, saf (50/70) bitüm ile hazırlanan karışımlar üzerinde yapmıştır. Sönmüş kirecin ılık karışım asfaltların stabilite değerlerini arttırdığı görülmüş fakat bu artışın saf bitüm ile hazırlanan karışımlarda meydana gelen artışa göre çok düşük olması, kirecin olumlu etkisinin düşük karıştırma sıcaklıklarında azaldığını göstermiştir. SBS katkılı karışımlarda stabilitenin yüksek çıkması ve kireç katkısıyla stabilitenin artması çalışmanın literatürle uyumlu olduğunu göstermiştir. Ilık karışım asfaltların, düşük karıştırma sıcaklığında hazırlanmasıyla oluşan çevresel ve ekonomik faydalarının yanında stabiliteyi de olumlu olarak etkilediği tespit edilmiştir.

#### KAYNAKLAR

1. Ağar, E., ve Umar, F. (1991) *Yol üstyapısı*, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
2. Bayazit, M., Ünvermez, ve A., Taşdemir, Y. (2012) Investigation of warm mix asphalt mixtures. *10th International Congress on Advances in Civil Engineering*, Middle East Technical University, Ankara.
3. D'Angelo, J.A., Harm, E.E., Bartoszek, J.C., Baumgardner, G.L., Corrigan, M.R., Cowser, J.E., Newcomb, D.E. (2008) *Warm-mix asphalt: European practice*, Washington, USA, FHWA.
4. İstek, A., ve Alataş, T. (2017) Farklı ılık asfalt katkılarının bitümlü bağlayıcıların mekanik özelliklerine etkisi, *International Conference on Advanced Engineering Technologies*, 840-849. Bayburt, Türkiye.
5. Johansson, L. (1995) Influence of hydrated lime on bitumen hardening, *Kth infrastrukturs och samhaellsplanering rapport* (95: 8).
6. Jones, G. (1997) The effect of hydrated lime on asphalt in bituminous pavements. NLA Meeting, Utah DOT.
7. Khodaii, A., Tehrani, H. K., ve Haghshenas, H. (2012) Hydrated lime effect on moisture susceptibility of warm mix asphalt, *Construction and Building Materials*, 36, 165-170, doi: [10.1016/j.conbuildmat.2012.04.073](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.073).
8. Kim, H., Jeong, K.D., Lee, M. S., ve Lee, S.J. (2014) Performance properties of CRM binders with wax warm additives, *Construction and Building Materials*, 66, 356-360, doi: [10.1016/j.conbuildmat.2014.05.052](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.052).

9. Kuloğlu, N., Karakaş, A. S., Kök, B. V., ve Yılmaz, M. (2013) Bitümlü sıcak karışımların arazi performanslarının değeriendirilmesi. *10.Ulaştırma Kongresi*, İzmir.
10. Kumar, P., Mehndiratta, H., Singh, V. (2008) Use of fly ash in bituminous layer of pavement. *Indian Highways*, 8, 41-50.
11. Lee, J., Kim, Y. R., Lee, J., Kwon, S.A., ve Yang, S.C. (2011) Comprehensive laboratory performance evaluation of wma with leadcap additives. *2nd International Warm-Mix Conference* Hyatt Regency at the Arch, St. Louis, Missouri, USA.
12. Little, D.N., Epps, J.A., ve Sebaaly, P.E. (2006) *Hydrated Lime in Hot Mix Asphalt*, National Lime Association.
13. Lu, X., ve Isacson, U. (1997) Rheological characterization of styrene-butadiene-styrene copolymer modified bitumens, *Construction and Building Materials*, 11(1), 23-32, doi: [10.1016/S0950-0618\(96\)00033-5](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(96)00033-5).
14. Mohammad, L., ve Abadie, G. Puppala. (2000) Mechanistic Evaluation of Hydrated Lime in HMA Mixtures, Transportation Research Board.
15. Önal, M.A., ve Kahramangil, M. (1993) *Bitümlü Karışımlar Laboratuvar El Kitabı*, Ankara, Karayolları Genel Müdürlüğü.
16. Sanchez-Alonso, E., Vega-Zamanillo, A., Castro-Fresno, D., ve DelRio-Prat, M. (2011) Evaluation of compactability and mechanical properties of bituminous mixes with warm additives, *Construction and Building Materials*, 25(5), 2304-2311, doi: [10.1016/j.conbuildmat.2010.11.024](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.024).
17. Su, K., Maekawa, R., ve Hachiya, Y. (2009) Laboratory evaluation of WMA mixture for use in airport pavement rehabilitation, *Construction and Building Materials*, 23(7), 2709-2714, doi: [10.1016/j.conbuildmat.2008.12.011](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.12.011).
18. Şengöz, B., ve Oylumluoğlu, J. (2013) Utilization of recycled asphalt concrete with different warm mix asphalt additives prepared with different penetration grades bitumen. *Construction and Building Materials*, 45, 173-183, doi: [10.1016/j.conbuildmat.2013.03.097](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.097).
19. Şengül, C. E., Oruç, S., İskender, E., ve Aksoy, A. (2013) Evaluation of SBS modified stone mastic asphalt pavement performance, *Construction and Building Materials*, 41, 777-783, doi: [10.1016/j.conbuildmat.2012.12.065](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.065).
20. Yılmaz, M., ve Kök, B.V. (2008) Stiren-Butadien-Stiren modifiyeli bitümlü bağlayıcıların Superpave sistemine göre yüksek sıcaklık performans seviyesinin ve işlenebilirliğinin belirlenmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23(4), 811-819.