



BİTÜMLÜ KAPLAMALARIN SU ETKİLERİNE KARŞI PERFORMANSI ÜZERİNDE ATIK LDPE'NİN ETKİSİ

Tacettin GEÇKİL, Ceren Beyza İNCE*

İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Malatya, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Bitüm, LDPE, Bitümlü Sıcak Karışım, Marshall Stabilite, Endirekt Çekme Mukavemeti.</i>	<p>Bu çalışmada, bitümlü kaplamaların su etkilerine karşı performansı üzerinde atık düşük yoğunluklu polietilen (LDPE)'nin etkisi araştırılmıştır. Bunun için, bitüm ile LDPE arasında bir etkileşim sağlamak amacıyla saf B 70/100 bağlayıcısına bağlayıcı ağırlığının % 2,5 kadar trietanolamin (TEOA) eklenmiştir. Elde edilen, bitüm-TEOA harmanına bitüm ağırlığının % 1, 2, 3, 4 ve 5 oranlarında LDPE eklenerek modifiye bitümler elde edilmiştir. Saf ve modifiye bitüm numunelerinin fiziksel özellikleri geleneksel testlerle, bitüm-TEOA-LDPE arasındaki etkileşim ise kimyasal analizlerle belirlenmiştir. Daha sonra, Marshall karışım yöntemi esas alınarak saf bağlayıcı ve agrega ile karışım numuneleri hazırlanmış ve optimum bitüm içeriği (OBİ) tespit edilmiştir. Belirlenen OBİ oranı baz alınarak LDPE modifiyeli sıcak karışım numuneleri hazırlanmış ve bütün karışım numuneleri Marshall stabilite ve akma, kalıcı Marshall stabilitesi (RMS) ve endirekt çekme mukavemeti (ITS) testlerine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlarda, atık LDPE katkısı ile bağlayıcıların sertliğinin arttığı ve bitüm-TEOA-LDPE arasında iyi bir etkileşim sağlandığı görülmüştür. Diğer taraftan, özellikle %4 atık LDPE katkılı karışım numunelerinin Marshall stabilitesi, RMS ve endirekt çekme mukavemeti oranı (ITSR) değerlerinde iyileşmeler meydana geldiği ve bitümlü kaplamaların su etkilerine karşı performansının artış gösterdiği görülmüştür.</p>

EFFECT OF WASTE LDPE ON THE PERFORMANCE OF BITUMINOUS PAVEMENTS AGAINST WATER IMPACTS

Keywords	Abstract
<i>Bitumen, LDPE, Bituminous Hot Mixes, Marshall Stability, Indirect Tensile Strength.</i>	<p>In this study, the effect of waste low density polyethylene (LDPE) on the performance of bituminous pavements against water effects was investigated. For this, 2.5% by weight of the binder triethanolamine (TEOA) was added to the pure B 70/100 binder to provide an interaction between bitumen and LDPE. Modified bitumens were obtained by adding LDPE in the ratios of 1, 2, 3, 4 and 5% by weight of bitumen to the obtained bitumen-TEOA blend. The physical properties of pure and modified bitumen samples were determined by conventional tests, and the interaction between bitumen-TEOA-LDPE was determined by chemical analysis. Then, samples were prepared with pure binder and aggregate based on the Marshall mixture method and the optimum bitumen content (OBC) was determined. Based on the determined OBC ratio, LDPE modified hot mix samples were prepared and all mix samples were subjected to Marshall stability and flow, retained Marshall stability (RMS) and indirect tensile strength (ITS) tests. In the results, it was seen that the hardness of the binders increased with the waste LDPE additive and a good interaction was provided between bitumen-TEOA-LDPE. On the other hand, it was observed that Marshall stability, RMS and indirect tensile strength ratio (ITSR) values of especially 4% waste LDPE added mixture samples improved, and the performance of bituminous pavements against water effects increased.</p>

Alıntı / Cite

Geçkil, T., İnce, C.B., (2022). Bitümlü Kaplamaların Su Etkilerine Karşı Performansı Üzerinde Atık LDPE'nin Etkisi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(2), 631-642.

* İlgili yazar / Corresponding author: c.beyzaince@gmail.com, +90-507-831-5591

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
T. Geçkil, 0000-0001-8070-6836	Başvuru Tarihi / Submission Date	27.04.2021
C.B. İnce, 0000-0002-6385-0964	Revizyon Tarihi / Revision Date	28.01.2022
	Kabul Tarihi / Accepted Date	28.02.2022
	Yayın Tarihi / Published Date	30.06.2022

1. Giriş (Introduction)

Günümüzde taşımacılıktan teknolojiye hatta otomobil sanayisine kadar hemen hemen her sektörde kullanılan plastikler insanoğlunun günlük yaşamının önemli bir parçası haline gelmiştir. Hafif, kolay işlenebilir ve uygun maliyette olmaları plastiklerin üretim hızının artmasına ve dolayısıyla her sektörde kullanılmasına sebep olmaktadır. Yapılan araştırmalara göre dünya genelinde plastik üretimi 2016 yılında 335 milyon ton iken 2035 yılında bu rakamların iki katına çıkacağı ön görülmektedir (Almeida vd., 2020; Bahij vd., 2020; Gala vd., 2020) Üretilen bu plastiklerin yalnızca yaklaşık %30'unun geri dönüşümde kullanılması ve aynı zamanda üretim hızının artarak devam etmesi atık plastik miktarının da artmasına sebep olmaktadır (Bahij vd., 2020).

Dünyadaki plastik üretiminin yüksek olması ve buna paralel olarak atık miktarının artması ciddi bir çevre kirliliğini de kaçınılmaz kılmaktadır. Doğaya bırakılan plastikler, görsel kirlilik ve yer işgal etmenin yanı sıra birçok canlının ölümüne sebep olmaktadır. Atık plastiklerin canlılar ve çevre üzerinde meydana getirmiş olduğu tüm bu sorunlar, atık yönetimi konusunun önemini bir kez daha ortaya koymuştur. Bu amaçla, son yıllarda yapılan araştırmaların çoğu atık plastiklerin kullanımı ve geri dönüşümü üzerine olmuştur (Behl vd., 2014; Jung vd., 2018; Njeru vd. 2006).

Bilindiği gibi dünyada en çok üretilen ve kullanılan plastik çeşitlerini polietilen tereftalat (PET), düşük yoğunluklu polietilen (LDPE), yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), polivinil klorür (PVC), polipropilen (PP) ve polistiren (PS) oluşturmaktadır (Behl vd., 2014; Geçkil vd., 2020; Leng vd., 2018; Özyurt 2020; Soncu ve Akkoyun 2020). Bu plastiklerin büyük çoğunluğunu (yaklaşık %40'ını), diğer plastiklere nazaran daha kısa kullanım ömrüne sahip olan ve ambalaj sektörünün %50'sini oluşturan LDPE esaslı plastikler meydana getirmektedir (Almeida vd., 2020). LDPE, çoğunlukla alışveriş sektöründe kullanılan taşıma poşetleri olmak üzere, bilgisayar parçaları, içecek kutuları gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Abhijith vd., 2019). Kimyasallara karşı dirençli, ısı sızdırmaz, opak ve buhar geçirgenliği minimum olan bir malzeme olan LDPE, zincir yapısında meydana gelen az miktarda dallanma sebebiyle düşük sıcaklıkta bile esnek özellik gösteren bir malzemedir (Sen vd., 2015).

Bu çalışmada, atık plastik çeşitlerinden biri olan ve ciddi çevresel kirliliğe sebebiyet veren LDPE'nin trietanolamin (TEOA) kimyasalı ile birlikte yol mühendisliğinde bir iyileştirici olarak kullanımı araştırılmıştır.

Yol mühendisliğinde bir kaplama çeşidi olan bitümlü sıcak karışım (BSK) kaplamalar, trafik yükleri ve şiddeti, sıcaklık ve su gibi etmenler sebebiyle zamanla bozulmaya başlamaktadır (El-Maaty Behiry 2013; Geçkil vd., 2020). Su dışındaki diğer etmenler kaplamada çoğunlukla kalıcı deformasyon ve çatlamalara sebep olurken, kaplamadaki suyun varlığı kaplamanın ayrışmasına neden olmaktadır. Suyun varlığı, bitüm ile agrega arasındaki yapışma kuvvetinin azalmasına neden olur ve bu durum adezyon kaybı olarak adlandırılmaktadır. Adezyon kaybı ile kaplama yumuşamaya başlar ve bu durum da kohezyon kaybı olarak ifade edilmektedir. Kısaca, kaplamadaki su sebebiyle meydana gelen bozulmalar adezyon ve kohezyon kaybı ile direkt olarak ilgilidir (El-Maaty Behiry 2013, Kök 2007).

BSK kaplamalarda su sebebiyle meydana gelen bozulmaları azaltmak amacıyla hidrate kireç, portland çimentosu, silan ve silikon katkıları ile metal iyonu yüzey ajan katkıları kullanılmaktadır (Özen 2011; Aksoy vd., 2012). Sudan kaynaklı bozulmaları azaltmak amacıyla çoğunlukla kullanılan bir yöntem olan BSK'ya kireç eklenmesiyle, kireç bitüm ile agrega arasındaki bağ kuvvetini arttırarak yapı ile etkileşime girmektedir (Görkem ve Şengöz 2009). Bununla birlikte, son zamanlarda çeşitli polimer malzemeler de su hasarını önlemek amacıyla BSK'da kullanılmaya başlanmıştır (Kumar vd., 2006; Geçkil vd., 2021).

Bir atık plastik çeşidi ve polimer bir malzeme olan LDPE'nin bitüm modifikasyonunda kullanıldığı çalışmalarda, genel olarak LDPE katkılı bitümlü bağlayıcıların viskozitesinin ve yumuşama noktasının arttığı, duktilite ve penetrasyon değerinin ise azaldığı ayrıca reolojik özelliklerinin iyileştiği görülmüştür (Al-Hadidy ve Tan 2009; Nejres vd., 2020; Punith vd., 2007). LDPE'nin sıcak karışımlarda kullanıldığı çalışmalarda, Awwab ve Shbeeb (2007) çalışmalarında karışım tasarımında polietilen grubu malzemeleri (HDPE ve LDPE) kullanmışlar ve çalışmanın sonunda polietilen katkılı karışımların stabilite değerlerinin daha yüksek olduğunu ifade etmişlerdir. Nkanga ve arkadaşları (2017), LDPE katkısının sıcak karışımların stabilitesi üzerindeki etkilerini araştırmışlar ve LDPE katkısının karışımların stabilitesini önemli ölçüde arttırdığını ifade etmişlerdir. Al-Hadidy ve Tan (2009), LDPE katkısıyla karışımların stabilite ve ITS değerlerinde önemli artışlar meydana geldiğini ifade etmişlerdir.

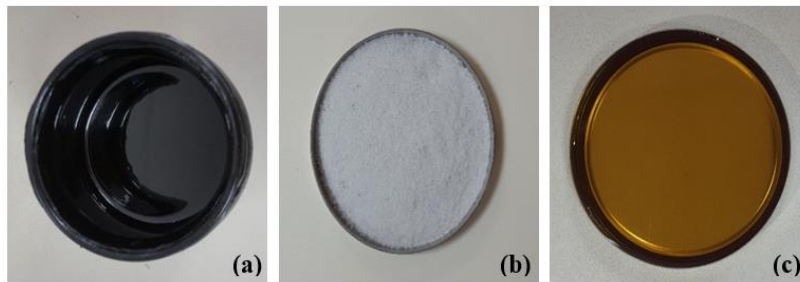
Ancak, LDPE gibi plastik polimer kökenli malzemeler kullanılarak yapılan çalışmalarda, plastiklerin bitüm içerisinde homojen olarak dağılmadığı ve faz ayrışması sorununun meydana geldiği görülmüştür. Bu sebeple, LDPE gibi plastikler bitüm modifikasyonunda genellikle farklı polimerlerle birlikte kullanılmaya çalışılarak faz ayrışması sorunu ortadan kaldırılmaya çalışılmıştır. Bununla birlikte, araştırmacılar son yıllarda bitüm ile kimyasal etkileşim kurabilen polimer üretimine (reaktif terpolimer gibi) ve bitüm ile polimer arasında kimyasal etkileşim sağlayabilen çeşitli katkıları kullanmaya başlamışlardır (Geçkil vd., 2020; Polacco vd., 2015). Bu katkılardan biri olan TEOA, çalışmalarda bitüm ile polimer malzemeler arasında iyi bir kimyasal etkileşim kurmak ve tek fazlı bir yapı elde etmek amacıyla kullanılmıştır (Geçkil vd., 2020; Geçkil vd., 2021).

Bu çalışmada ise, bitümlü kaplamaların su etkilerine karşı performansı üzerinde atık LDPE'nin TEOA ile birlikte kullanımının etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, hazırlanan modifiye karışım numuneleri, Marshall stabilite ve akma, RMS ve ITS deneylerine tabi tutulmuştur.

2. Materyal ve Metot (Material and Method)

2.1. Materyal (Material)

Çalışmada, Elazığ Karayolları Asfalt Şantiyesinden alınan penetrasyon sınıfı B 70/ 100 saf bitüm (Şekil 1a) bağlayıcı olarak, atık LDPE (Şekil 1b) modifiye edici katkı olarak, bitüm ile atık LDPE arasında kimyasal bir etkileşim sağlamak amacıyla TEOA kimyasalı (Şekil 1c) kullanılmıştır. Saf bitümün özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Saf Bitüm (a); atık LDPE (b); TEOA (c) (Pure Bitumen (a); waste LDPE (b); TEOA (c))

Tablo 1. Saf Bağlayıcının Özellikleri (Properties of Pure Binder)

Özellik	Standart	Limit	Sonuç
Penetrasyon (0.1 mm)	ASTM D5	70-100	88
Yumuşama noktası (°C)	ASTM D36	43-51	46,75
Düktilite (cm)	ASTM D113	min. 100	117
Parlama noktası (°C)	ASTM D92	min. 230	238
Özgül ağırlık (gr/cm ³)	ASTM D70	1,0-1,1	1,038

Modifiye edici katkı olarak kullanılan atık LDPE, Bursa-SÖZAL Kimya LTD.ŞTİ.'den tedarik edilmiştir. LDPE'nin özellikleri (Beşergil 2008; Sen vd., 2015) Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. LDPE'nin Fiziksel Özellikleri (Physical Properties of LDPE)

Özellik	LDPE
Yoğunluk (gr/cm ³)	0,910-0,925
Sertlik (D)	41-46
Erime noktası (°C)	105-115 °C
Çekme dayanımı (MPa)	7-40
Elastik modül (GPa)	0,07-0,3
Uzama (%)	90-800

Bitüm ile LDPE arasında kimyasal bir etkileşim sağlamak amacıyla İnönü Üniversitesi Kimya Mühendisliği laboratuvarından temin edilen TEOA kimyasalı kullanılmıştır. TEOA'nın özellikleri (Geçkil vd., 2020) Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. TEOA'nın Kimyasal Özellikleri (Chemical Properties of TEOA)

Özellik	TEOA
Kimyasal formül	C ₆ H ₁₅ NO ₃
Molar kütle	149.19 gr/mol
Kaynama noktası (°C)	335.4 (°C)
Yoğunluk (gr/cm ³)	1.12 gr/cm ³
Yapı	Bazik

Çalışmada, BSK aşınma tabakası tasarımında Karayolları 8.Bölge Müdürlüğü Malatya asfalt plentinden temin edilen kırmataş kalker agregası kullanılmıştır. Kullanılan agreganın fiziksel özellikleri Tablo 4'de, seçilen agrega gradasyonu ise Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 4. Agreganın Fiziksel Özellikleri (Physical Properties of Aggregate)

Özellik	Standart	Limit	Sonuç
Kaba agrega zahiri özgül ağırlık (gr/cm ³)	ASTM C127	-	2,70
Kaba agrega hacim özgül ağırlık (gr/cm ³)	ASTM C127	-	2,67
Kaba agrega su emme yüzdesi	ASTM C127	≤2,0	0,47
İnce agrega zahiri özgül ağırlık (gr/cm ³)	ASTM C128	-	2,75
İnce agrega hacim özgül ağırlık (gr/cm ³)	ASTM C128	-	2,63
İnce agrega su emme yüzdesi	ASTM C128	≤2,0	1,66
Filler zahiri özgül ağırlık (gr/cm ³)	ASTM D 854	-	2,85
Aşınma kaybı, Los Angeles (%)	TS EN 1097-2	≤27,0	27,0
Donma kaybı, MgSO ₄ (%)	TS EN 1367-2	≤16,0	2,0
Yassılık indeksi (%)	TS EN 933-3	≤20,0	5,0

Tablo 5. Agregada Gradasyonu (Aggregate Gradation)

Elek no (mm)	19	12,5	9,5	4,75	2,36	1,18	0,6	0,3	0,15	0,075
Geçen (%)	100	94	84	58	35	22	16	12	8	5

2.2. Metot (Method)

2.2.1. LDPE Katkılı Bitümlerin Hazırlanması (Preparation of LDPE Additive Bitumens)

Çalışmada, LDPE katkıli bağlayıcılar elde etmek amacıyla, ilk olarak 160 °C sıcaklığa kadar ısıtılan saf bitüme bitüm ağırlığının %2,5'i kadar TEOA ilave edilerek 500 devirde 10 dakika boyunca aynı sıcaklıkta karıştırma işlemi yapıldı. Karıştırma işlemi sıcaklık ve devir ayarlı bir modifiye bitüm karıştırıcısı ile gerçekleştirilmiştir. Kullanılan TEOA oranı, karıştırma süresi ve devir sayısı laboratuvarında yapılan ön çalışmalar (Geçkil vd., 2021) sonucunda belirlendi. Daha sonra, bitüm ağırlığının %1, 2, 3, 4 ve 5 oranlarında LDPE ilave edilerek, 1000 devirde 50 dakika boyunca aynı sıcaklıkta karıştırma işlemi (Al-Hadidy ve Tan 2009; Punith vd., 2007) devam ettirildi. Tüm modifiye bitümlerin hazırlanmasında aynı işlem sırası takip edildi.

Çalışmada kullanılan saf ve LDPE katkıli bitümler sırasıyla B, B+%1L, B+%2L, B+%3L, B+%4L ve B+%5L olarak ifade edilmiştir.

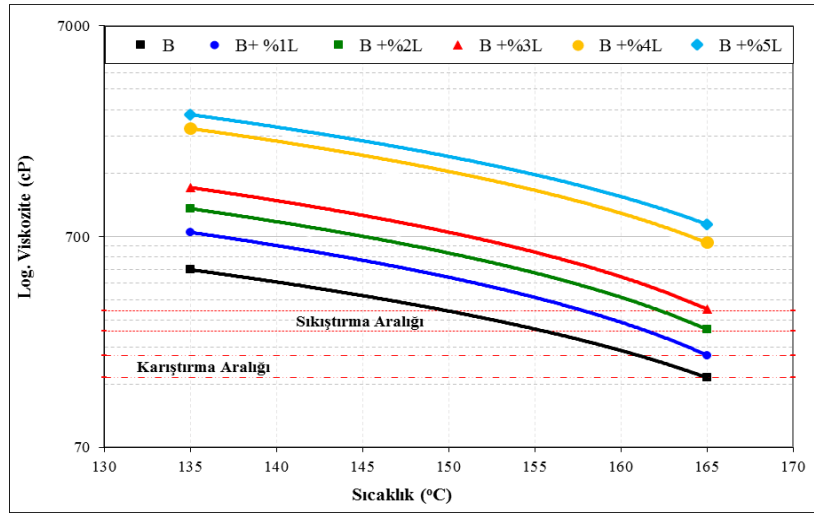
Saf ve LDPE katkıli bağlayıcıların fiziksel özellikleri ASTM D5, ASTM D36 ve ASTM D113 standartlarına göre sırasıyla penetrasyon, yumuşama noktası ve duktilite deneyleri ile belirlenerek elde edilen sonuçlar Tablo 6'da verilmiştir. Ayrıca bağlayıcıların yüksek sıcaklıklardaki işlenebilirlik özellikleri ASTM D4402 standardına göre RV deneyi ile belirlenmiştir. RV deneyi sonucunda elde edilen viskozite-sıcaklık grafiği Şekil 2'de verilmiştir. Elde edilen bu grafik yardımıyla saf ve LDPE katkıli bağlayıcıların karıştırma (170±20 cP)-sıkıştırma (280±30 cP) sıcaklık aralıkları (Geçkil, 2008) ve ortalama karıştırma-sıkıştırma sıcaklıkları tespit edilmiştir. Elde edilen tüm sonuçlar yine Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6'da görüldüğü gibi, B 70/100 penetrasyon sınıflı saf bitüme LDPE ilavesiyle (%1, 2, 3, 4 ve 5) penetrasyon değerleri saf bitüme kıyasla sırasıyla %13,8; %25,5; %26,7; %33,9 ve %35,3 oranında azalma göstermiştir. LDPE ilavesiyle oluşan bu sertleşmenin doğal bir sonucu olarak, bağlayıcıların yumuşama noktası değerleri de saf bağlayıcıya göre sırasıyla %5,3; %10; %12,8; %22,6 ve %26,5 oranında artış göstermiştir. Bununla birlikte, bağlayıcıların duktilite değerleri de saf bitüme kıyasla sırasıyla %4,3; %7,7; %9,4; %13,7 ve %15,4 azalma

göstermiştir. Tüm sonuçlardaki artış ve azalış oranlarının %4 LDPE oranında pik yaptığı, bu orandan sonra değişimlerin azaldığı görülmektedir. Elde edilen bu sonuçlara göre, LDPE katkısıyla bağlayıcıların sertleşme eğiliminin arttığı ve sıcaklık hassasiyetinin azaldığı ifade edilebilir.

Tablo 6. Bağlayıcıların Geleneksel Test Sonuçları (Conventional Test Results of Binders)

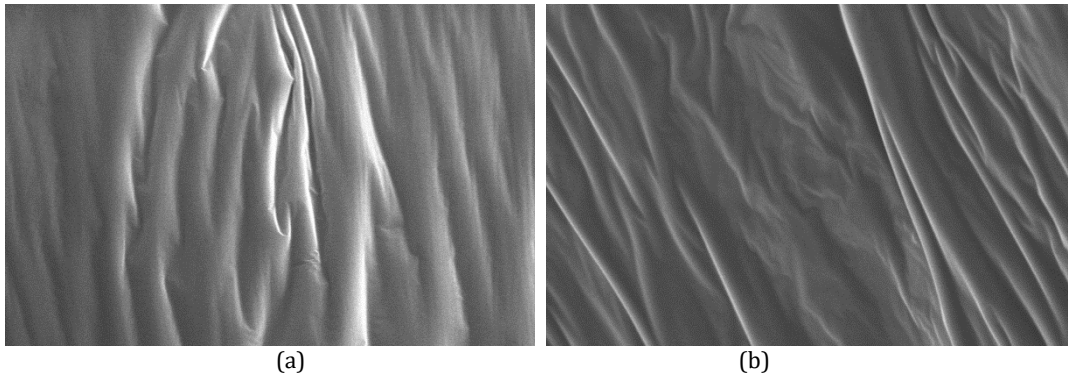
Özellik	Bağlayıcı türü					
	B	B +%1L	B +%2L	B +%3L	B +%4L	B +%5L
Penetrasyon	88	75,9	65,6	64,5	58,1	56,9
Yumuşama noktası	46,8	49,3	51,5	52,8	57,4	59,2
Düktilite	117	112	108	106	101	99
PI	-0,63	-0,34	-0,17	0,11	0,88	1,20
Karıştırma aralığı, °C	160,8-165,7	165.7-167.3	167.3-170.7	169.0-170.7	174.2-175.9	175.9-177.7
Sıkıştırma aralığı, °C	149.9-156.0	157.6-160.8	162.4-165.7	165.7-167.3	172.4-174.2	174.2-175.9
Karıştırma sıcaklığı, °C	163,3	166,5	169	169,9	175,1	176,8
Sıkıştırma sıcaklığı, °C	153	159,2	164,1	166,5	173,3	175,1



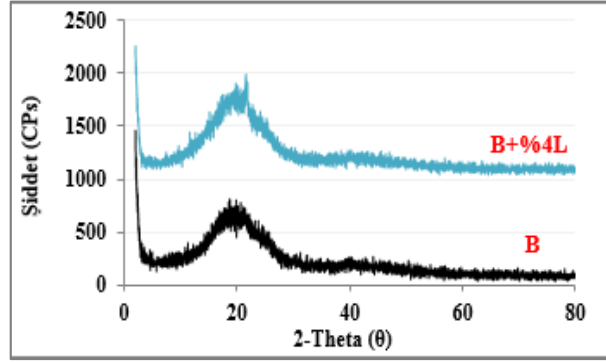
Şekil 2. Bağlayıcıların Viskozite-Sıcaklık Grafiği (Viscosity-Temperature Graph of Binders)

Şekil 2 incelendiğinde, LDPE katkı oranının artışıyla bağlayıcıların viskozite değerlerinin artış gösterdiği ancak kritik bir oran %4 LDPE oranından sonra artış hızının azaldığı görülmektedir. Elde edilen viskozite değerleri yardımıyla bağlayıcıların plentteki karıştırma ve yoldaki sıkıştırma sıcaklıkları da LDPE katkı oranının artışı ile beraber artış göstermiştir (Tablo 6). Tüm bu sonuçlar, LDPE katkısı ile bağlayıcıların kıvamının sertleştiğini ve bu sebeple bağlayıcıların plentte karıştırma ve yoldaki serme esnasında daha fazla enerji harcanabileceğini ifade etmektedir. Ancak LDPE katkısının çevreye ve canlılara vermiş olduğu zararlar göz önüne alındığında, fazla enerji sarfiyatının göz ardı edilebileceği söylenebilir.

Çalışmada saf ve LDPE katkılı bitümlerin kimyasal yapısında meydana gelen değişimler SEM ve XRD analizleri ile belirlenmiştir. Bu amaçla saf bitüm (B) ile kritik oran olan B+%4L bağlayıcılarının SEM görüntüleri (2.5K büyütme) Şekil 3'de, XRD desenleri ise Şekil 4'de verilmiştir.



Şekil 3. Bağlayıcıların SEM Görüntüleri; (A) B; (B) B+%4L (SEM Images of Binders)



Şekil 4. Bağlayıcıların XRD Desenleri (XRD Patterns of Binders)

Şekil 3a'da saf bitümün (B) SEM görüntüsü incelendiğinde, yapının oldukça homojen ve tek fazlı olduğu görülmektedir. Saf bitüme %4 LDPE+ TEOA ilave edildiğinde ise (Şekil 3b), saf bitümde olduğu gibi homojen, tek fazlı bir yapının elde edildiği görülmektedir. Şekil 4'de saf bitümün (B) XRD deseni incelendiğinde, iki farklı makromoleküler yapının mevcut olduğu görülmektedir. İlk pik $2\theta \cong 20^\circ$ geniş ve yayvan olan kristalin bölgeyi, ikinci pik ise $2\theta \cong 40^\circ$ civarında ve daha az alana sahip olan amorf bölgenin varlığını göstermektedir. B+%4L bağlayıcısının XRD deseni incelendiğinde ise saf bitüme göre pik şiddetinin arttığı ve kristalin bölgelerin kısmen arttığı, ancak LDPE katkısıyla $2\theta \cong 40^\circ$ civarındaki pikin giderek yayvanlaşmaya başladığı ve amorf yapının giderek arttığı görülmüştür. Bu durum LDPE katkısının, bitüm-TEOA harmanıyla birleşmesiyle yapıyı amorflaştırıldığı ve kimyasal bir etkileşime girdiği şeklinde açıklanabilir.

2.2.2. LDPE Modifiyeli Karışımların Hazırlanması (Preparation of LDPE Modified Mixtures)

Atık LDPE katkısının BSK kaplamaların suya karşı direncine olan etkisini tespit etmek için, saf ve LDPE katkılı bağlayıcılar kullanılarak ASTM D1559 standardına göre Marshall tasarım yöntemi ile BSK numuneleri elde edilmiştir. Bunun için öncelikle, agrega ve saf bitüm kullanılarak katkısız sıcak karışımlar için optimum bitüm içeriği (OBİ) tespit edilmiştir. Bu OBİ oranı baz alınarak saf ve modifiye bitümler ile karışım numuneleri hazırlanmıştır. Her bir karışım numunesi için 1200 gr agrega alınmış ve bitümler kendi karıştırma sıcaklıklarında karıştırma cihazıyla karıştırılmış (Şekil 5a) ve sıkıştırma sıcaklıklarında işlenmiştir. Numuneler 457 mm yükseklikten serbest düşürülen sıkıştırma tokmağı (Şekil 5b) ile her bir yüzüne 75, toplamda 150 vuruş yapılarak (Geçkil vd., 2021) sıkıştırılmıştır.

Çalışmada, saf ve LDPE modifiyeli karışımlar yine sırasıyla B, B+%1L, B+%2L, B+%3L, B+%4L ve B+%5L olarak ifade edilmiştir.

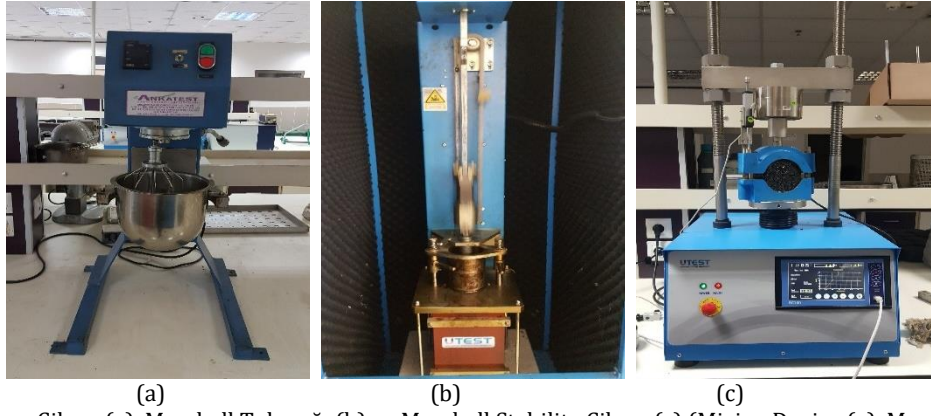
3. Deneysel Yöntem (Experimental Method)

3.1. Marshall Stabilite ve Akma Deneyi (Marshall Stability and Flow Test)

BSK'ların plastik akmaya karşı gösterdiği direnç ASTM D1559'a göre Marshall stabilite ve akma deneyi ile tespit edilmektedir. Deneyde, hazırlanmış olan karışım numunelerinin ağırlıkları ve yükseklikleri alınarak $60 \pm 1^\circ \text{C}$ sıcaklığa sahip su banyosunda ortalama 35 dakika bekletildikten sonra çıkarılarak Marshall stabilite cihazına (Şekil 5c) yerleştirilir. Daha sonra numuneler 50 ± 2 mm/dakika yükleme hızına maruz bırakılarak kırıldıkları andaki stabilite ve akma değerleri tespit edilir. Stabilite değeri, kaplamaların deformasyonlara karşı koyabildiği en yüksek yük değerini ifade ederken; akma değeri ise bu yük değerine ulaşıldığında oluşan deformasyonu ifade etmektedir. Deneyde, standart kabul edilen yükseklik 63,5 mm olup, bu değerden farklı olan numuneler için denklem (1) bağıntısı kullanılarak, numunelerin düzeltilmiş stabilite değerleri hesaplanır (Geçkil vd., 2021).

$$c = 5.24 \times e^{(-0.0258 \times h)} \quad (1)$$

Denklem 1'de yer alan c; düzeltme katsayısını, h ise numune yüksekliğini ifade etmektedir. Marshall stabilite ve akma deneyi sonucunda, stabilite ve akma değerleri kullanılarak BSK'nın sertliklerinin ve deformasyonlara karşı dirençlerinin bir ölçüsü olarak kabul gören Marshall oranı (MQ) değerleri de tespit edilebilmektedir. MQ değeri, karışım stabilitesinin akma değerine oranlanmasıyla belirlenmekte olup, bu değer yüksek olması BSK kaplamanın deformasyonlara karşı dirençli olduğunu ifade etmektedir (Geçkil vd., 2021).



Şekil 5. Karıştırma Cihazı (a), Marshall Tokmağı (b) ve Marshall Stabilite Cihazı (c) (Mixing Device (a), Marshall Rammer (b), and Marshall Stability Device(c))

3.2. Kalıcı Marshall Stabilitesi (Retained Marshall Stability - RMS)

Bu deneyle, BSK kaplamaların sudan kaynaklı nem hasarlarına karşı dayanımları belirlenebilmektedir. Bunun için, karışım numuneleri 60 ± 1 °C sıcaklığa sahip su banyosunda 24 saat bekletilerek Marshall stabilite cihazı ile yüklemeye tabi tutulmaktadır. Elde edilen stabilite değeri numunenin normal stabilite değerine bölünmesiyle RMS değeri elde edilmektedir. Deney sonucunda, yüksek RMS değerine sahip olan sıcak karışım numunelerinin su veya nem hasarlarına karşı daha yüksek dirence sahip olduğu değerlendirilmektedir (Geçkil vd., 2021).

3.3. Endirekt Çekme Mukavemeti Deneyi (Indirect Tensile Strength Test - ITS)

ITS deneyi, ısı ve yüklere maruz kalan sıcak karışım yol kaplamalarının bünyesinde meydana gelen çekme gerilmelerini simüle etmektedir. AASHTO T245 standardına göre gerçekleştirilen deney Marshall stabilite test cihazı kullanılarak yapılmaktadır. Deneyde, silindirik numuneler dakikada 50mm'lik yükleme hızında çap düzlemi doğrultusunda düşey olarak yüklemeye maruz bırakılarak kırılması sağlanır. Deney sonucunda, BSK kaplamalarda meydana gelen bu kırılmalar ile kaplamanın yapısı arasında bir ilişki kurulabilmektedir. Ayrıca, kaplamanın sahip sertlik ve durabilitesi hakkında da fikir sahibi olunabilmektedir. Karışım numunelerinin ITS değeri denklem (2) yardımı ile hesaplanabilmektedir (Geçkil vd., 2021; Ahmedzade vd. 2007).

$$ITS = \frac{2P_{max}}{\pi t x d} \quad (2)$$

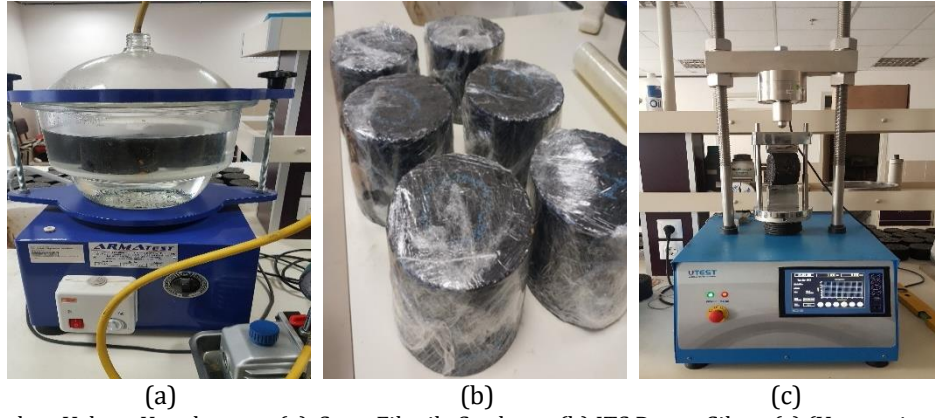
Denklem 2'de, P_{max} ; numuneye uygulanmış maksimum yükü, t ; numune kalınlığını, d ise numune çapını ifade etmektedir. Karışım numunelerinin ITS değerleri, BSK'nın kohezyon yeteneğine bağlı olarak değişmekte ve bu da büyük oranda bitümün özelliklerinden kaynaklanmaktadır (Geçkil vd., 2021; Ahmedzade vd. 2007).

3.4. Su Hasarına Karşı Direnç (Resistance to Water Damage)

Su hassasiyeti, BSK kaplamaların su ile temas etmesinden sonra bünyesinde oluşan nem sebebiyle oluşabilecek hasara karşı göstermiş olduğu direnci ifade edilmektedir. Kaplamadaki su veya nemin varlığı, bitüm ile agrega arasındaki bağı zayıflatır ve kaplamada bozulmalara sebep olur. BSK kaplamalarda suya karşı hassasiyet AASHTO T283 standardı ile belirlenmektedir. Standarda göre BSK numuneleri "koşullandırılmamış" ve "koşullandırılmış" olmak üzere iki gruba ayrılarak değerlendirilir. Koşullandırılmamış numuneler 2 saat boyunca 25°C sıcaklıktaki su banyosunda bekletilir. Koşullandırılmış numuneler ise numunelerin hava boşlukları %60-80 su ile dolacak şekilde vakum işlemine (Şekil 6a) maruz bırakılır. Bunun ardından numuneler streç film (Şekil 6b) ile sarılarak 16 saat boyunca -18°C sıcaklıktaki dondurucuda bekletilir ve süre bitiminde bu numuneler 24 saat boyunca 60°C sıcaklıktaki su banyosunda bekletilir. Süre bitiminde banyodan alınan numuneler 2 saat boyunca 25°C sıcaklıktaki banyosunda bekletilir. Bu işlemlerden sonra koşullandırılmamış (ITS_{kuru}) ve koşullandırılmış ($ITS_{yaş}$) numuneler Marshall cihazı kullanılarak endirekt çekme direnci (ITS) testine (Şekil 6c) tabi tutulur. Deney sonucunda BSK numunelerinin endirekt çekme direnci oranı (ITSR) değerleri denklem (3) yardımı ile hesaplanır.

$$ITSR = (ITS_{yaş}/ITS_{kuru}) \times 100 \quad (3)$$

BSK numunelerinin sudan kaynaklı bozulmalara karşı dirençleri bakımından ITSR değerlerinin %80'den daha fazla olması istenmektedir (Görkem ve Şengöz 2009; Geçkil vd., 2020).

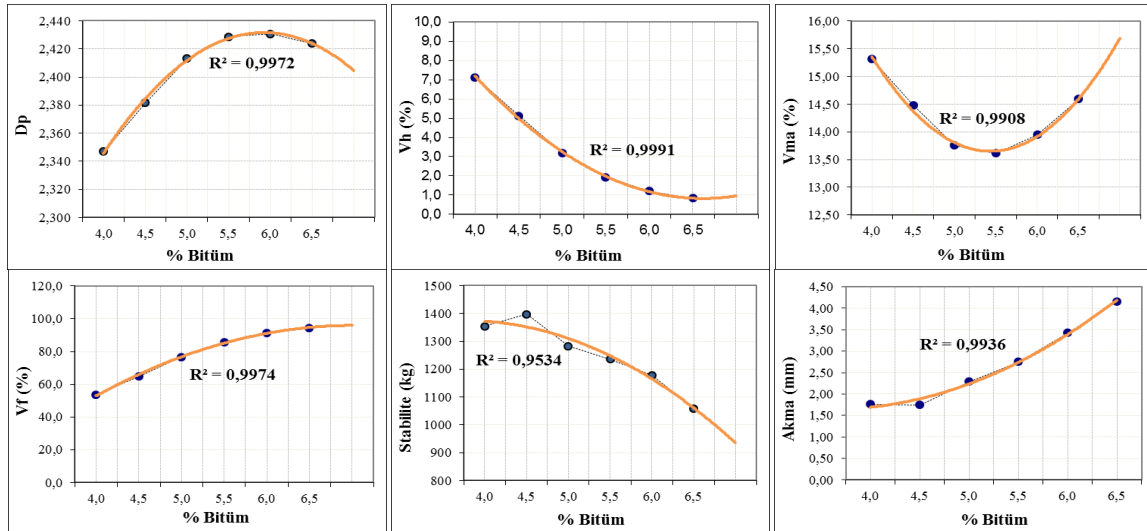


Şekil 6. Numunelere Vakum Uygulanması (a), Streç Film ile Sarılması (b) ITS Deney Cihazı (c) (Vacuuming The Samples (a), Wrapping With Stretch Film (b) ITS Test Device (c))

4. Bulgular (Findings)

4.1. Marshall Stabilite Sonuçları (Marshall Stability Results)

Karışım tasarımı için saf B 70/100 bitümü ve 1200 gr agregata kullanılarak sıcak karışım numuneleri hazırlanmıştır. Bunun için sabit tutulan 1200 gr agreganın ağırlıkça %4; %4,5; %5; %5,5; %6; %6,5'i kadar bağlayıcı ilave edilerek her bir yüzdede üç karışım numunesi toplamda 18 karışım numunesi hazırlanmıştır. Her bir numunenin ağırlığı ve yüksekliği ölçüldükten sonra, hacim özgül ağırlığı (D_p), boşluk oranı (V_h), agregalar arası boşluk oranı (VMA) ve bitümlü dolu boşluk oranı (V_f) gibi hacimsel özellikleri belirlenmiştir. Ardından tüm numunelerin stabilite ve akma değerleri tespit edilmiştir. Saf bağlayıcı ile hazırlanmış olan sıcak karışım numunelerinin elde edilen çeşitli hacimsel ve mekanik özelliklerinin bitümlü değişim grafikleri Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. OBİ Belirlenmesinde Kullanılan Grafikler (Graphs Used in The Determination of OBI)

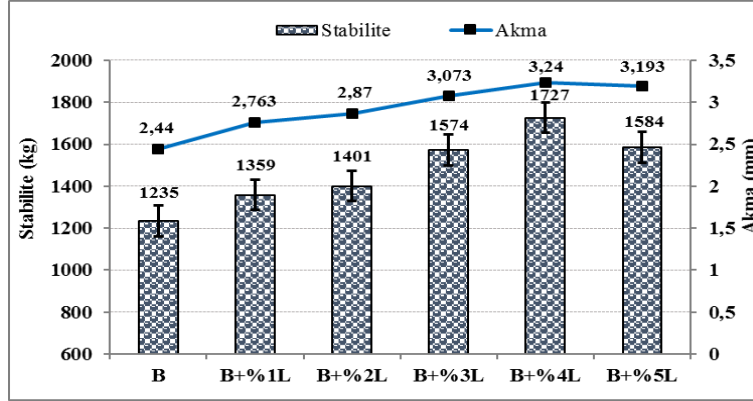
Tablo 7. Karışımların Hacimsel Özellikleri ve Marshall Stabilite-Akma Değerleri (Volumetric Properties And Marshall Stability-Flow Values of Mixtures)

Karışım türü	D_p (gr/cm ³)	V_h (%)	VMA (%)	V_f (%)	Stabilite(kg)	Akma(mm)
B (%5)	2,40	3,91	14,39	72,81	1235	2,44
B+%1L	2,394	3,97	14,44	72,50	1359	2,763
B+%2L	2,402	3,66	14,16	74,14	1401	2,87
B+%3L	2,404	3,56	14,07	74,72	1574	3,073
B+%4L	2,398	3,81	14,29	73,37	1727	3,24
B+%5L	2,402	3,66	14,16	74,18	1584	3,193
KTŞ	-	3-5	14-16	65-75	>900	2-4

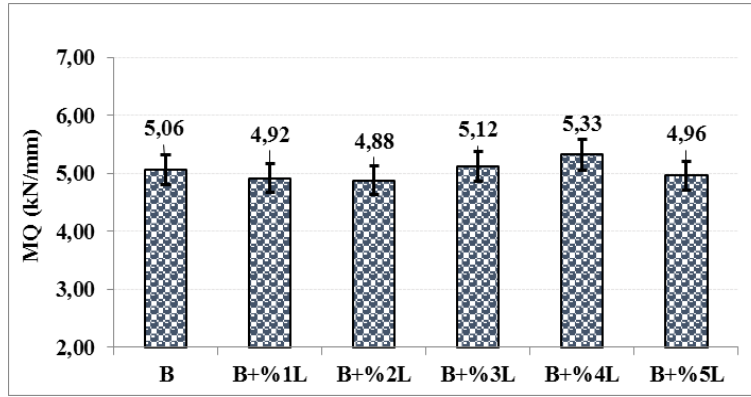
Şekil 7'de elde edilen grafikler kullanılarak, maksimum D_p (%6) ve stabilite (%4,5), %4 V_h için karşılık gelen değer (%4,8) ve %70 V_f için karşılık gelen değerlerin (%4,8) aritmetik ortalaması hesaplanarak OBİ %5 olarak tespit

edilmiştir. Bu OBI oranında saf (B) numunesi hazırlandıktan sonra Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ)'nin asfalt betonu aşınma tabakasına ait olan maksimum ve minimum değerleri ile kıyaslaması yapılmış (Tablo 7) ve bu değerlerle uyumlu olduğu görülmüştür. Çalışmada, tespit edilen OBI= %5 esas alınarak saf ve LDPE ilaveli sıcak karışım numuneleri hazırlanmış ve elde edilen değerler aynı tabloda gösterilmiştir. LDPE katkılı modifiye karışım numunelerinin saf karışım numuneleri ile kıyas yapılabilmesi amacıyla bu oran sabit tutulmuştur.

Saf ve LDPE ilaveli karışım numunelerinin Marshall stabilite ve akma değerleri Şekil 8'de, MQ değerleri ise Şekil 9'da verilmiştir.



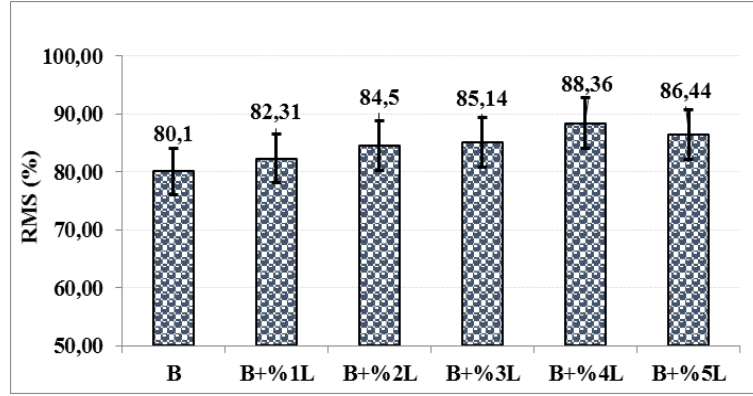
Şekil 8. Karışımların Marshall Stabilite-Akma Değerleri (Marshall Stability-Flow Values of Mixtures)



Şekil 9. Karışımların MQ Değerleri (MQ Values of Mixtures)

Şekil 8 incelendiğinde, LDPE katkı oranının artışıyla karışım numunelerinin stabilite değerlerinin giderek arttığı görülmektedir. Saf karışım numunesine göre LDPE katkılı karışımların stabilite değerlerindeki artış oranları sırasıyla %10; %13,4; %27,4; %39,8 ve %28,3 şeklindedir. Karışım numuneleri içerisindeki en yüksek stabilite değerine ise %4 LDPE katkılı karışım numunesinin ulaştığı görülmektedir. Bu durumda LDPE katkısının, kaplamaların kalıcı deformasyon direncini önemli derecede arttırdığını söylemek mümkündür. LDPE modifiyeli karışımların akma değerleri incelendiğinde ise (Şekil 8), katkı artışıyla akma değerlerinin büyük oranda artış gösterdiği görülmektedir. Saf karışıma göre meydana gelen artış oranları sırasıyla %13,2; %17,6; %25,9; %32,8 ve %30,9 şeklindedir. Akma değeri, BSK kaplamanın trafik yükleri altındaki esnek veya plastik davranışını karakterize eden bir değerdir. Saf karışıma göre en yüksek akma değeri %4 LDPE katkılı karışımında elde edilmiştir. LDPE katkısıyla karışımların akma değerinin artış göstermesi, kaplamanın kırılma anında esnek davranış sergileyeceğini göstermektedir. Şekil 9 incelendiğinde, LDPE katkı oranının artmasıyla karışımların MQ değerlerinde değişimler meydana gelmiştir. Bu değişimler saf karışım numunesine göre sırasıyla %2,8; %3,6 azalma, %1,2; %5,3 artış ve %2 azalma şeklinde meydana gelmiştir. MQ, karışımların kayma gerilmelerine karşı direncinin bir ölçüsüdür. Elde edilen sonuçlardan LDPE katkısının, karışımların kayma gerilmelerine karşı direncini arttırdığını söylemek mümkündür.

Atık LDPE'nin BSK kaplamaların suya karşı hassasiyeti üzerindeki etkilerini belirlemek için saf ve LDPE modifiyeli karışım numunelerinin RMS değerleri tespit edilerek elde edilen sonuçlar Şekil 10'da verilmiştir.

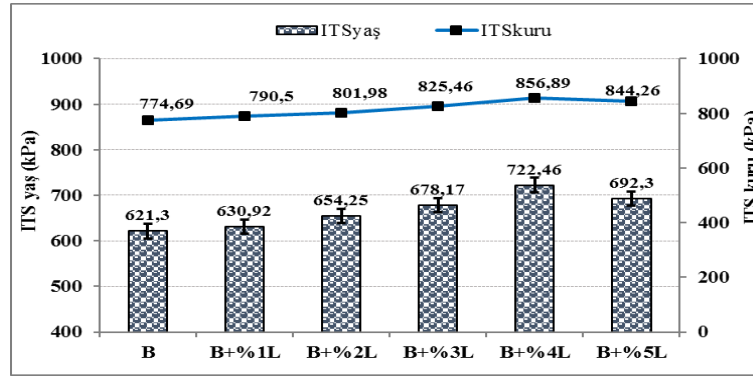


Şekil 10. Karışımların RMS Değerleri (RMS Values of Mixtures)

Şekil 10 incelendiğinde, LDPE katkı oranının artışı ile modifiye karışımların saf karışıma göre RMS değerlerinde önemli artışlar meydana gelmiştir. Bu artışlar sırasıyla %2,8; %5,5; %6,3; %10,3 ve %7,9 şeklindedir. Elde edilen bu sonuçlara göre, en yüksek RMS değerinin B+%4L karışımlardan elde edildiği ve dolayısıyla suya karşı hassasiyetin en az B+%4L karışımlar olduğu söylenebilir. LDPE katkısıyla RMS değerlerinin artış göstermesi, LDPE katkısının agrega ile asfalt arasındaki bağlanma yeteneği üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu ve dolayısıyla da BSK kaplamanın sudan kaynaklı bozulmalara karşı direnci üzerinde artışa sebep olduğu belirtilebilir.

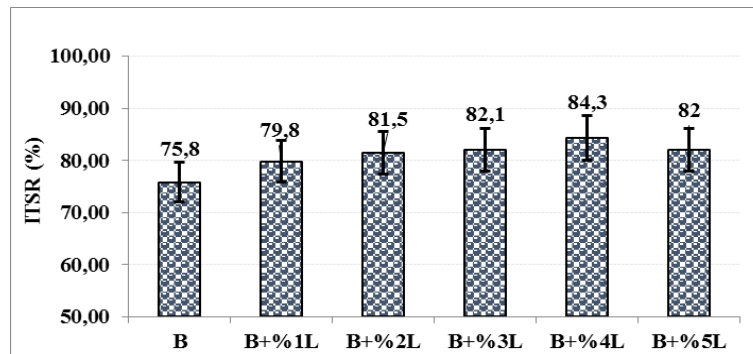
4.2. ITS ve Su Hasarı Direnci Sonuçları (ITS and Water Damage Resistance Results)

LDPE'nin BSK'nın sudan kaynaklı bozulmalara karşı dirençlerini belirlemek amacıyla, koşullandırılmış ve koşullandırılmamış saf ve LDPE modifiyeli karışım numunelerine ITS deneyi uygulanmıştır. Belirlenen ITS değerleri Şekil 11'de, ITSR değerleri ise Şekil 12'de verilmiştir.



Şekil 11. Karışımların ITS Değerleri (ITS Values of Mixtures)

Şekil 11 incelendiğinde, LDPE katkı oranının artışıyla ITS_{yaş} karışım numunelerinin indirekt çekme mukavemet değerlerinde değişimler meydana gelmiştir. Bu değişimler saf karışıma kıyasla sırasıyla %1,5; %5,3; %9,2; %16,3 ve %11,4 artış şeklindedir. ITS_{kuru} karışım numunelerinin indirekt çekme mukavemet değerlerinde meydana gelen değişimler ise saf karışıma kıyasla sırasıyla %2; %3,5; %6,6; %10,6 ve %9,0 artış şeklindedir. LDPE katkı oranının artışıyla karışım numunelerinin ITS_{yaş} ve ITS_{kuru} değerlerinin artış göstermesi, trafik yüklerine maruz kalan BSK kaplamaların yük altında oluşan çekme gerilmelerine karşı direncinin arttığını ifade etmektedir.



Şekil 12. Karışımların ITSR Değerleri (ITSR Values of Mixtures)

Şekil 12’de, LDPE katkı oranının artışıyla karışımların ITSR değerlerinin saf karışıma göre sırasıyla %5,3; %7,5; %8,3; %11,2 ve %8,2 artış gösterdiği görülmektedir. Bu sonuçlara göre, en yüksek ITSR değeri B+%4L karışımlarda görülmüştür. LDPE modifiyeli karışımların, ITSR değerlerinin %80’in üzerinde olması, sudan kaynaklanan bozulmalara karşı LDPE katkısının etkili olduğunu göstermektedir.

RMS ve ITSR sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, LDPE katkısının BSK kaplamalarının suya karşı performansı üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu, %4 LDPE oranının kaplamaların adezyon ve kohezyon yeteneğini arttırmada etkili olduğu görülmüştür.

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada, atık LDPE katkısının bitümlü kaplamaların suya karşı performansı üzerindeki etkisi araştırılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Saf ve LDPE katkılı bağlayıcıların fiziksel test sonuçlarına göre, LDPE katkısıyla bağlayıcıların sertliğinin arttığı, bitüm sınıfının %2 LDPE oranıyla birlikte 50/70 olarak değiştiği ve bu sebeple daha yüksek sıcaklığa sahip bölgelerde kullanılabileceği görülmüştür.
2. Kimyasal analiz sonuçlarına göre, bitüm ile LDPE arasında kimyasal bir etkileşim sağlandığı ve bitüm-TEOA-LDPE karışımının homojen tek fazlı bir yapıda davrandığı tespit edilmiştir.
3. Marshall stabilite sonuçlarına göre, LDPE katkısı ile karışımların stabilitesinin %39,8 kadar arttığı ve en yüksek stabilite değerinin B+%4L katkılı karışımlardan elde edildiği görülmüştür.
4. MQ sonuçlarına göre, LDPE katkısı ile MQ değerinin %5,3 artış ile B+%4L karışımlardan elde edildiği görülmüştür.
5. RMS sonuçlarına göre, LDPE ilavesiyle RMS değerinin %10,3 artış ile B+%4L karışımlardan elde edildiği ve bu oranda BSK’nın su etkilerine karşı daha dirençli olduğu görülmüştür.
6. ITSR sonuçlarına göre, LDPE katkısıyla karışımların ITSR değerlerinin %11,2 artış ile B+%4L karışımlardan elde edildiği ve LDPE’nin yol kaplamalarının nem direncini iyileştirdiği görülmüştür.
7. Elde edilen bu olumlu sonuçların bitüm, TEOA ve LDPE arasında oluşan kimyasal etkileşim sebebiyle meydana gelen homojen tek fazlı bir bağlayıcı yapısından kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

Sonuç olarak, bir atık plastik çeşidi olan LDPE katkısının bitüm ve dolayısıyla karışım modifikasyonunda kullanılmasıyla BSK kaplamalarının suya karşı performansını arttırmada önemli bir etkiye sahip olduğu ifade edilebilir. Bu olumlu durumun yanında, atık LDPE’nin yol mühendisliğinde bir iyileştirici olarak kullanılmasıyla, bu atıkların çevreye ve canlılara vermiş olduğu zararların ortadan kaldırılabilceğini söylemek mümkündür.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından İÜ-BAP 2016/65 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- AASHTO, 1994. T245 Method Of Test For Resistance To Plastic Flow Of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus, AASHTO.
- AASHTO, 1989. T283 Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage. AASHTO.
- Abhijith, G., Abhishek, R., Adithyan, S., Adwaith, P., Sivaselvi, K., 2019. Reinforcement of Bitumen Using Low Density Polyethylene and Green Sand. *Materials Today: Proceedings*, 18, 5057–5062.
- 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 Sigma*, 25(2), 179-189.
- Aksoy, A., Iskender, E., Oruç, Ş., Özen H., 2012. SBS Polimeri ve Su Hasarı Önleyici Katkıların Asfalt Kaplamalarda Performans Karşılaştırması. *İMO Teknik Dergi*, 80, 5967-5986.
- Al-Hadidy, A.I., Tan, Y., 2009. Evaluation of pyrolysis LDPE modified asphalt paving materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 21(10), 618-623.
- Almeida, A., Capita, S., Bandeira, R., Fonseca, M., Picado-Santos, L., 2020. Performance of AC mixtures containing flakes of LDPE plastic film collected from urban waste considering ageing. *Construction and Building Materials*, 232, 117253.
- ASTM, 1992. C 127-88 Test Method for Specific Gravity and Adsorption of Coarse Aggregate, USA, ASTM International.

- ASTM, 1992. C128 Test Method for Specific Gravity and Adsorption of Fine Aggregate, USA, ASTM International.
- ASTM, 2013. D05 Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials. USA, ASTM International.
- ASTM, 2014. D36 Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-And-Ball Apparatus), USA, ASTM International.
- ASTM, 2008. D70 Standard Test Method for Density of Semi-Solid Bituminous Materials (Pycnometer Method), West Conshohocken, PA, ASTM International.
- ASTM, 2013. D92 Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester, West Conshohocken, PA, ASTM International.
- ASTM, 2017. D113 Standard Test Method for Ductility of Asphalt Materials, West Conshohocken, PA, ASTM International.
- ASTM, 2002. D1559 Standard Test Method for Marshal Test, West Conshohocken, PA, ASTM International.
- ASTM, 2015. D 4402 Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using A Rotational Viscometer. USA, ASTM International.
- Awwab, M.T., Shbeeb, L., 2007. The Use of Polyethylene in Hot Asphalt Mixtures. American Journal of Applied Sciences, 4(6), 390-396.
- Bahij, S., Omary, S., Feugeas, F., Faqiri, A., 2020. Fresh and hardened properties of concrete containing different forms of plastic waste – A review. Waste Management, 113, 157–175.
- Behl, A., Sharma, G., Kumar, G., 2014. A sustainable approach: utilization of waste PVC in asphaltting of roads. Construction and Building Materials 54, 113-117.
- Besergil, B., 2008. Polimer Kimyası (ikinci baskı). Gazi Kitabevi, Ankara.
- El-Maaty Behiry, A.E.A., 2013. Laboratory evaluation of resistance to moisture damage in asphalt mixtures. Ain Shams Engineering Journal, 4 (3), 351-363.
- Gala, A., Guerrero, M., Serra, J.M., 2020, Characterization of post-consumer plastic film waste from mixed MSW in Spain: A key point for the successful implementation of sustainable plastic waste management strategies. Waste Management 111, 22–33.
- Geçkil, T., 2008. Siyah karbonun bitümlü sıcak karışımların özelliklerine etkisinin araştırılması. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Geçkil, T., Önal, Y., İnce, C.B., 2020. Atık Polietilen Tereftalat (PET) ile Modifiye Edilmiş Saf Bitümün Fiziksel, Morfolojik ve Isıl Özellikleri. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 32(1), 157-166.
- Geçkil, T., Önal, Y., İnce, C.B., 2021. Atık PET ile Modifiye Edilmiş Bitümlü Sıcak Karışımların Nem Direnci. Politeknik Dergisi, 24(2), 461-471.
- Görkem, Ç., Şengöz, B., 2009. Predicting stripping and moisture induced damage of asphalt concrete prepared with polymer modified bitumen and hydrated lime. Construction and Building Materials, 23 (6), 2227–2236.
- Jung, M.R., Horgen, F.D., Orski, S.V., 2018. Validation of ATR FT-IR to identify polymers of plastic marine debris, including those ingested by marine organisms. Marine Pollution Bulletin, 127, 704–716.
- Kök, B.V., 2007. Bitümlü Sıcak Karışımların Üretiminde Yeni Bir Karıştırma Yönteminin Araştırılması. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- Kumar, P., Chandra, S., Bose, S., 2006. Strength characteristics of polymer modified mixes. International Journal of Pavement Engineering, 7(1), 63–71.
- Leng, Z., Sreeram, A., Padhan, R.K., Tan, Z., 2018. Value-added application of waste PET based additives in bituminous mixtures containing high percentage of reclaimed asphalt pavement (RAP). Journal of Cleaner Production, 196, 615-625.
- Nejres, M., Mustafa, Y.F., Aldewachi, H.S., 2020. Evaluation of natural asphalt properties treated with egg shell waste and low density polyethylene. International Journal of Pavement Engineering, 1029-8436.
- Njeru, J., 2006. The urban political ecology of plastic bag waste problem in Nairobi, Kenya. Geoforum, 37, 1046–1058.
- Nkanga, U.J., Joseph, J.A., Adams, F.V., Uche, O.U., 2017. Characterization of bitumen/plastic blends for flexible pavement application. Procedia Manufacturing, 7, 490-496.
- Özen, H., 2011. Rutting evaluation of hydrated lime and SBS modified asphalt mixtures for laboratory and field compacted samples. Construction and Building Materials, 25(2), 756–765.
- Özyurt, H., 2020. Design And Properties Of Composite Sustainable Building Material By Using Waste HDPE. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi 8(3), 777 – 782.
- Polacco, G., Filippi, S., Merusi, F., Stastna, G., 2015. A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: asphalt/polymer interactions and principles of compatibility. Advances in Colloid and Interface Science, 224, 72-112.
- Punith, V.S., Veeraragavan, A., 2007. Behavior of asphalt concrete mixtures with reclaimed polyethylene as additive. Journal of Materials in Civil Engineering, 19, 500-507.
- Sen, S.K., Raut, S., 2015. Microbial degradation of low density polyethylene (LDPE): A review. Journal of Environmental Chemical Engineering, 3, 462–473.
- Soncu, S., Akkoyun M., 2020. Surface Free Energy And Flexural Properties Of Wollastonite Filled Polypropylene Composites, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi 9(2), 389 – 395.
- TS, 2012. EN 933-3 Agregaların geometrik özellikleri için deneyler - Bölüm 3: Tane şekli tayini - Yassılık endeksi, TSE.
- TS, 2010. EN 1097-2 Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler bölüm 2 : Parçalanma direncinin tayini için metotlar, TSE.
- TS, 2010. EN 1367-2 Agregaların termal ve bozunma özellikleri için deneyler bölüm 2: Magnezyum sülfat deneyi, TSE.