

İnce Agregada Kısımda Kireçtaşı Kullanılan Taş Mastik Asfaltın Çatlama Davranışının İncelenmesi

Halis Bahadır KASİL^{1*}
Muhammed Yasin ÇODUR²



ÖZ

Son yıllarda ağır trafik yükleri altında daha uzun ömürlü olması nedeniyle Taş Mastik Asfalt uygulamaları artmıştır. Ancak ülkemizde Taş Mastik Asfalt tasarımında kullanılan agregaların kaba ve ince kısımlarının Karayolları Teknik Şartnamesine göre aynı ocaktan elde edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, kaba agregada fraksiyonu için bazalt, ince agregada fraksiyonu için ise kireçtaşı kullanılmasının olumlu sonuçlar vereceği varsayımıyla deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada, AASHTO T 393 standardına uygun olarak Illinois Esneklik İndeksi deneyi ile kırılma mekanizması özellikleri belirlenmiştir. Bu çalışma sonucunda, Taş Mastik Asfaltın ince agregada kısmında kireçtaşı kullanımının olumsuz sonuç meydana getirmediği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Illinois esneklik indeksi, yarı dairesel eğilme deneyi, taş mastik asfalt, kireçtaşı, bazalt.

ABSTRACT

Investigation of Cracking Behaviour of Stone Mastic Asphalt Using Limestone as Fine Aggregate

In recent years, Stone Mastic Asphalt applications have increased due to its longer life under heavy traffic loads. However, in our country, the coarse and fine fraction of aggregates used in Stone Mastic Asphalt design should be obtained from the same quarry according to the Highways Technical Specifications. In this study, experimental studies were carried out with the assumption that using basalt for the coarse aggregate fraction and limestone for the fine aggregate fraction would yield positive results. In the experimental study, fracture mechanics properties were determined by the Illinois Flexibility Index test in accordance with AASHTO

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 11 Kasım 2024 günü ulaşmıştır. 28 Mart 2025 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 30 Kasım 2025 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://doi.org/10.18400/tjce.1582736>

1 Erzurum Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Türkiye
halis.kasil24@erzurum.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0002-6678-7868>

2 College of Engineering and Technology, American University of the Middle East, Kuwait
muhammed.codur@aum.edu.kw - <https://orcid.org/0000-0001-7647-2424>

* Sorumlu yazar

T 393 standard. As a result of this study, it was determined that the use of limestone in the fine aggregate fraction of Stone Mastic Asphalt does not produce negative results.

Keywords: Illinois flexibility index, semi-circular bending test, stone mastic asphalt, limestone, basalt.

1. GİRİŞ

Taş Mastik Asfalt (TMA), yol yapım endüstrisinde esnek kaplamalar için dünya çapında yaygın olarak kullanılan bir kaplama türüdür. Ulusal Asfalt Teknolojisi Merkezi (NCAT) tarafından yapılan bir performans değerlendirmesinde, TMA'nın Bitümlü Sıcak Karışımlara (BSK) kıyasla özellikle aşınma tabakalarında tekerlek izine, çatlamaya ve diğer sorunlara karşı oldukça dirençli olduğu belirtilmiştir [1]. TMA'nın performansına katkıda bulunan ana faktörler agrega kalitesi [2,3], taş iskeleti oluşturan iri agregaların birbirine en iyi şekilde teması ve uygun boşluk derecelendirmesi ile oluşturulan yapı [3, 4], bitüm ve elyaftır. TMA kaplamalar, şartnamede belirtilen gradasyon limitlerini korumak kaydıyla, kaba agrega, ince agrega ve mineral filler ile bitüm ve elyafla belirli bir oranda karıştırılmasıyla elde edilir.

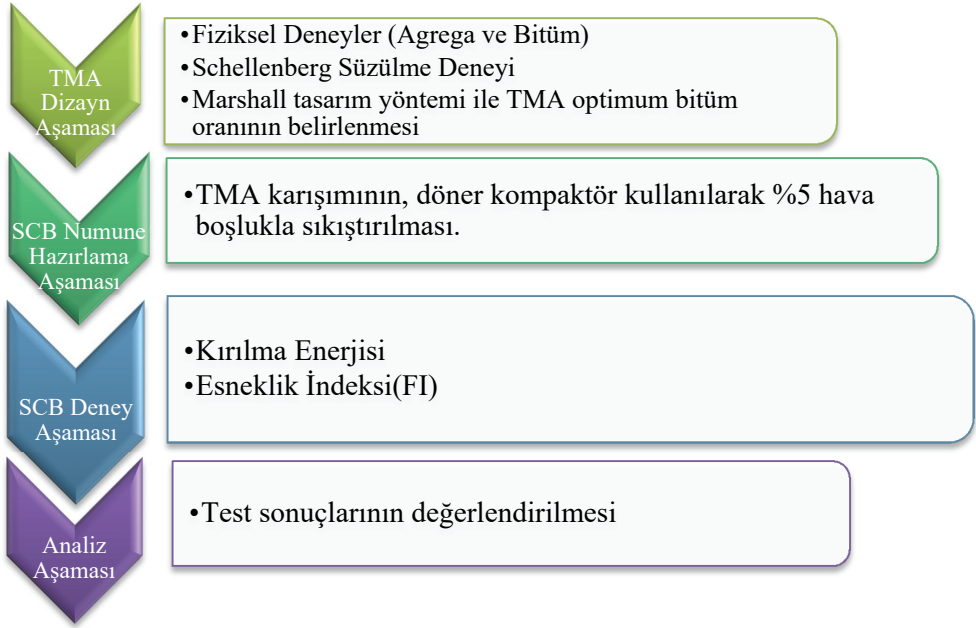
Literatürdeki birçok çalışma, BSK tasarımıyla kaplama hasarlarının en önemli nedeni olan çatlama karakteristiklerinin ihmal edilmemesinin gerektiğini ortaya koymaktadır. [5, 6].

Literatür taraması, çatlama özelliklerini değerlendirmek için Illinois Yarı Dairesel Eğilme (IL-SCB) deneyi kullanılarak BSK üzerinde çeşitli çalışmalar yapıldığını göstermektedir. Ancak, TMA karışımlarının ince agrega fraksiyonunda iri agrega fraksiyonundan farklı agrega tipleri kullanılarak elde edilen numunelerin çatlama özelliklerinin karşılaştırılmasını değerlendiren çok az sayıda çalışma tespit edilmiştir. Bu nedenle, bu çalışmada, TMA karışımlarının ince fraksiyonunda kireçtaşı agregalarının kullanılmasının çatlama davranışı üzerindeki etkisini araştırmak için IL-SCB deneyine dayalı olarak farklı ocaklardan agregalar ve farklı rafinerilerden bitüm temin edilerek kullanılmıştır.

Yarı Dairesel Eğilme (SCB) testinin ilk kullanımı, kayaların mekanik özelliklerini tespit etmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. [7]. Illinois Ulaşım Merkezi'ndeki (ICT) araştırmacılar, bilimsel çalışmalar sonucunda Illinois Esneklik İndeksi Deneyinin (I-FIT) ara sıcaklık koşullarında BSK'nın çatlama direncini belirlemek için uygulanabileceğini tespit etmiş ve geçerliliğini kanıtlamıştır. Bu doğrulamanın sonucunda, araştırmacılar TMA kaplamalarında sıkça tercih edilmeye başlanan geleneksel asfalt betonunun çatlama performansını belirlemek için I-FIT yöntemine yönelmişlerdir. I-FIT yönteminin esneklik ve çatlak direncinin etkili bir şekilde belirlenmesini sağladığı belirlenmiştir [8, 9]. Kırılma mekaniği prensibine dayanan I-FIT, bir asfalt karışımının ara sıcaklıkta kırılmaya karşı direncini belirlemek için yarım daire şeklinde bir numune hazırlanmasını gerektirmektedir [10, 11]. BSK üzerinde zaman içinde gerçekleştirilen deneyler arasında SCB deneyinin daha tutarlı olduğu gözlemlenmiştir. Cihazın karmaşıklık olmaması numunenin yorulma ve çatlama özelliklerinin belirlenmesi deneyinde tercih sebebi olarak gösterilmiştir. SCB deneyinin yaygın olarak kullanılmasının nedenleri basitlik, kısa deney süresi, uygulanabilirlik, uygun maliyetli deney ekipmanı, tekrarlanabilirlik ve tutarlılıktır [10, 12-17].

Standart deney yöntemi, yük uygulama yönünde 50 mm/dak sabit bir yük hattı yer değiştirme (LLD) hızı ile otomatik olarak monotonik yük uygulayan üç noktalı bir eğilme mekanizmasıdır. Yük (kN) ve LLD (mm) kaydedilerek bir yük-deplasman eğrisi çizilir.

Deney, standarttaki ara sıcaklık değeri olan 25 °C'de gerçekleştirilmiştir. Bu deney sıcaklığı, BSK'nın çatlama davranışını belirlemek için SCB deneyi ile ilgili birçok çalışmada kullanılan sıcaklıkla aynıdır [11,18-20]. I-FIT ile elde edilen ilk parametre olan Esneklik İndeksi (FI), A_{liq} ve Yük-Yer Değiştirme eğrisinin altındaki alana bağlı olarak elde edilen toplam kırılma enerjisinin, yük-yer değiştirme grafiğinin tepe noktasından sonraki eğrinin eğimine oranıdır. Şekil 1'de çalışmanın akış şeması gösterilmektedir.



Şekil 1 - Çalışmanın akış şeması

Literatür incelendiğinde, asfalt karışımlarda yüksek FI sonucunun çatlamaya karşı iyi bir direnç değerini işaret ettiği anlaşılmaktadır [12]. Türkiye'de yol tasarımında esas alınan Karayolu Teknik Şartnamesine (KTŞ) göre, TMA karışımın ince agregası için kaba agregası ile aynı taş ocağının kullanılması gerektiği belirtilmektedir. Bu araştırmanın amacı, ince agregası kısmında kireçtaşı kullanılan TMA karışımların kırılma mekanizma özelliklerini test etmek ve sonuçları karşılaştırmaktır. Bu bağlamda, farklı rafinerilerden elde edilen bitüm ve farklı ocaklardan elde edilen agregalar ile FI değerleri analiz edilmiştir.

Uygun bazalt agregası ocaklarının az olması ve bu ocakların işletilmesindeki zorluklar göz önüne alındığında, yukarıda bahsedilen ince agregada kireçtaşı kullanımı büyük önem taşımaktadır [3]. Ayrıca bazalt taş ocağı işletmesi sırasında kil bantlarına rastlama olasılığının yüksek olması nedeniyle tasarım ve uygulamada bitümün agregayı sarması sorunu ortaya çıkabilmekte, bu da yolun bozulmasını hızlandırmaktadır.

2. MATERİYAL VE YÖNTEM

2.1. Materyal

2.1.1. Agregada

TMA aşınma tabakası için kullanılan agreganın karışım gradasyonu, KTŞ'de belirtilen TMA Tip-I/A gradasyon sınır değerlerine göre Çizelge 5'te sayısal olarak gösterilmiştir [21]. Çalışmada, Türkiye'nin Doğu Anadolu Bölgesi'nde karasal iklimin yoğun olarak yaşandığı Erzurum ili sınırları içerisinde yer alan dört taş ocağı tercih edilmiştir. Deneyler, KTŞ'ye göre maksimum dane çapı 19,1 mm olan üç farklı bazalt ve maksimum dane çapı 4,75 mm olan bir kireçtaşı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bazalt agregaları A, B ve C taş ocaklarından, kireçtaşı agregası ise D taş ocağından temin edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan ocaklardan alınan agregaların ortak özellikleri, KTŞ'de [21] belirtilen Los Angeles (%25), Metilen Mavisi (1,5 g/kg), MgSO₄ (%14), yassılık indeksi (%25) sınır değerlerinden düşük olmaları ve agregaların tüm yüzeylerinde %100 kırılmış olmalarıdır. Mineral filler olarak ince agregada kullanılan aynı taşocaklarının malzemeleri kullanılmıştır. Çizelge 1 agregaların fiziksel özelliklerini göstermektedir.

Çizelge 1 - A, B, C ve D Taşocaklarının Fiziksel Özellikleri

Taşocağı	Agrega Tipi	LA (%)	MB (g/kg)	MgSO ₄ (%)	Yassılık İndeksi (%)	Özgül Ağırlık			Su Absorbsiyonu (%)	
						Kaba Agregada	İnce Agregada	Mineral Filler	Kaba Agregada	İnce Agregada
A	Bazalt	18	1	1	15	2,649	2,669	2,794	0,56	0,74
B	Bazalt	15	0,75	1	17	2,729	2,741	2,760	0,98	1,12
C	Bazalt	18	1	2	16	2,826	2,842	2,917	1,23	1,35
D	Kireçtaşı	23	0,75	2	-	-	2,720	2,721	-	0,62

LA= Los Angeles Aşınma Kaybı MB= Metilen Mavisi

2.1.2. Bitüm

Bu çalışmada, penetrasyon sınıfı 70/100 olan üç farklı rafineriden alınan bitüm kullanılmıştır. Bu bitümler Türkiye'de sıklıkla kullanılan Kırıkkale Tüpraş(K), İzmit Tüpraş(İ) ve Batman Tüpraş(BT) rafinerilerinden elde edilmiştir. Bitüm üzerinde sırasıyla TS EN 15326 [22] TS EN 1426 [23], TS EN 12592 [24], TS EN 1427 [25], TS EN ISO 2592 [26] standartlarına göre özgül ağırlık, penetrasyon, çözünürlük, yumuşama noktası ve parlama noktası deneyleri yapılmış ve belirlenen değerler Çizelge 3'te verilmiştir. Çizelge 2'de agregalar ve bitüm için kullanılan kısaltmalar gösterilmektedir.

Çizelge 2 - Karışım kısaltma listesi

Karışım kısaltması	Kaba Agregası	İnce Agregası	Bitüm Rafinerisi
AA-BT	A	A	BT
BB-BT	B	B	
CC-BT	C	C	
AD-BT	A	D	
BD-BT	B	D	
CD-BT	C	D	
AA-K	A	A	K
BB-K	B	B	
CC-K	C	C	
AD-K	A	D	
BD-K	B	D	
CD-K	C	D	
AA-İ	A	A	İ
BB-İ	B	B	
CC-İ	C	C	
AD-İ	A	D	
BD-İ	B	D	
CD-İ	C	D	

Çizelge 3 - Bitüm üzerinde yapılan deneylerin sonuçları (B70-100)

Deney	Metot	Birim	Deney Sonuçları (DS)			Sınır Değerler (KTŞ)
			Bitüm Rafinerisi			
			BT	K	İ	
Penetrasyon, (25 °C)	TS EN 1426	0,1 mm	72	74	74	$70 \leq DS \leq 100$
Parlama Noktası (Cleveland)	TS EN ISO 2592	°C	254	300	333	$DS \geq 230$
Yumuşama Noktası	TS EN 1427	°C	47,4	45,4	44,3	$43 \leq DS \leq 51$
Özgül Ağırlık, (25 °C)	TS EN 15326	g/cm³	1,040	1,038	1,034	$1 \leq DS \leq 2$
Çözünürlük	TS EN 12592	%	99,9	99,8	99,8	$DS \geq 99$

2.1.3. Elyaf

TMA bitüm bakımından zengin bir karışım olduğundan, fazla bitümün kusmasını ve karışımın aşağı süzülmesini önlemek için serme-sıkıştırma sırasında elyaf eklemek gerekmektedir. Bu çalışmada, Türkiye'de yaygın olarak kullanılan polimer bazlı selülozik elyaf tercih edilmiştir. Türkiye'de TMA karışımlarında bitümlü bağlayıcıların süzülme miktarını belirlemek için TS EN 12697-18'e [27] göre Schellenberg deneyi yapılmış ve belirlenen değerler Çizelge 4'te verilmiştir.

TMA karışımlarında bitüm süzülmesini önlemek için kullanılan elyaf yüzdesi Schellenberg süzülme deneyi ile belirlenmiştir. Deneyler için karışım numuneleri laboratuvarda hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlar tartılarak bir beher yerleştirilmiştir. Beherlere yerleştirilen numuneler, 170 ± 5 °C sıcaklıkta bir saat boyunca etüvde bekletilmiştir. Bir saatin sonunda, asfalt karışım dolu beher etüvden çıkarılmıştır ve herhangi bir çalkalama veya titreşim olmadan hemen ters çevrilerek tepsiye dökülmüştür. Deney sonucunu elde etmek için beher tekrar tartılmıştır ve bitüm süzülme yüzdesi belirlenmiştir.

Çizelge 4 - TMA Schellenberg süzülme deneyinin sonuçları

Taşocağı	Deney Sonuçları (DS)			Sınır Değerler (KTŞ), %	
	Bitüm Rafinerisi				
	BT	K	İ		
Süzülme Yüzdesi (%0,3 elyafı), %	A	0,08	0,14	0,23	0,3 mak
	B	0,14	0,19	0,24	
	C	0,10	0,15	0,20	
	AD	0,10	0,16	0,26	
	BD	0,17	0,23	0,28	
	CD	0,13	0,17	0,22	

2.2. Yöntem

2.2.1. Marshall test yöntemine göre TMA tasarımı

TMA bitümce zengin bir sıcak karışım olması nedeni ile optimum bitüm oranı belirlenirken (%5,5, %6,0, %6,5, %7,0 ve %7,5) oranlarında bitümlü sıcak karışımlar hazırlanmıştır. Yukarıda belirtilen her bitüm oranı için üç adet olmak üzere on beş briket standart Marshall Kompaktörü kullanılarak hazırlanmıştır. KTŞ'ye göre TMA aşınma tabakası tasarımında optimum bitüm yüzdesinin belirlenmesi için minimum %16 Agregalar arası boşluk (VMA) ve %2-%4 arası hava boşluğu yüzdesi (V_h) idealdir. Briketler, KTŞ'de belirtildiği gibi bir Marshall tokmağı ile her bir yüzeye elli darbe uygulanarak hazırlanmıştır. Taş Mastik Asfalt Aşınma briketlerinin hazırlanmasında elli darbe uygulanmasının sebebi karışımın kesikli bir gradasyona sahip olması yani iri agrega yüzdesinin yüksek olması ve bu nedenle iri agregaların Marshall tokmağının düşmesi sırasında ezilmeye maruz kalmasıdır.

Çizelge 5 - TMA Aşınma Karışım Gradasyonu ve KTŞ Tolerans Sınırları [21]

Oran		%18	%54	%18	%10	Karışım Gradasyonu	KTŞ TMA Aşınma- Tip 1/A Tolerans Sınırları	
Elek Açıklık		12-19 mm	5-12 mm	0-5 mm	Filler			
İnç, mm	mm	Geçen %	Geçen %	Geçen %	Geçen %	Geçen %	Geçen %	
3/4"	19,1	100	100	100	100	100	100	100
1/2"	12,7	62,1	100	100	100	93,5	90,0	100
3/8"	9,5	3,4	70,3	100	100	67,3	50,0	75
No.4	4,75	1,1	12,3	100	100	33,0	25,0	40
No.10	2,00	1,0	3,0	73,2	100	23,9	20,0	30
No.40	0,420	0,8	2,0	32,8	100	16,4	12,0	22
No.80	0,177	0,6	1,5	14,9	90,1	12,4	9,0	17
No.200	0,075	0,4	0,9	7,7	78,3	9,6	8,0	12

Çizelge 6. Marshall deney sonuçları

Taşocağı	Bitüm Rafinerisi	Optimum Bitüm Yüzdesi, %	V _h , %	VMA, %
AA	BT	6,70	3,0	16,4
BB		6,80	3,0	16,4
CC		6,95	3,0	16,9
AD		6,65	3,0	16,4
BD		6,75	3,0	16,5
CD		6,85	3,0	16,7
AA	K	6,60	3,0	16,3
BB		6,70	3,0	16,3
CC		6,85	3,0	16,7
AD		6,55	3,0	16,3
BD		6,65	3,0	16,4
CD		6,75	3,0	16,6
AA	İ	6,50	3,0	16,2
BB		6,60	3,0	16,2
CC		6,75	3,0	16,6
AD		6,45	3,0	16,2
BD		6,55	3,0	16,2
CD		6,65	3,0	16,5

Bu aynı zamanda karışımında kullanılacak ince agregada kısmında yer alacak kalkerin de toz haline gelmesinin önüne geçmesi konusunda çalışmada kolaylık sağlamıştır. KTŞ 408.04 Karışım Dizaynı ve 408.05 Yapım Şartları bölümleri dikkate alınarak TMA için karıştırma sıcaklığı 170 °C ve sıkıştırma sıcaklığı 145 °C olarak belirlenmiştir. Yüksek durabilite, düşük permeabilite, düşük trafik gürültü kirliliği, yansıma çatlaklarına ve tekerlek izlerine karşı yüksek direnç sağlayan TMA [28] tasarımının Marshall deney sonuçları Çizelge 6'da sunulmuştur.

Marshall yöntemi ile belirlenen yukarıdaki Çizelge 6'da görülen optimum bitüm oranlarında SCB numuneleri hazırlanmadan önce her grubu temsil edebilecek şekilde briketler hazırlanmıştır. Bu briketlere TS EN 12697-1 [29] standardına göre ekstraksiyon deneyi gerçekleştirilmiştir. Burada ince agregada kısmında kireçtaşı gibi daha düşük dayanıma sahip agregaların bitüm ile karıştırılarak sıkıştırılması esnasında gradasyonda inceme gibi durumlar ile karşılaşılıp karşılaşmayacağının tespit edilmesine çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar “Bulgular ve Tartışma” kısmında paylaşılarak değerlendirilmiştir.

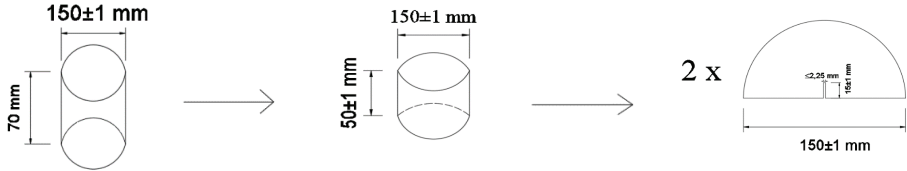
2.2.2. SCB Numunelerinin Hazırlanması

Çizelge 6'da görülen her karışım için elde edilen bitüm oranları, test numunelerinin hazırlanmasında esas alınmıştır. Yarı dairesel eğilme numunesi üretmek için Superpave Döner Kompaktör (SGC) kullanılarak 70 mm yüksekliğinde 150±1 mm çapında(D) silindirik asfalt numuneleri hazırlanmıştır. SCB numunelerinin yükseklikleri, test standardında belirtildiği gibi her iki taraftan kesilerek 50±1 mm kalınlığa (t) düşürülmüştür. Bu SCB numuneleri yarım daire olarak iki eşit parçaya ayrılmıştır. Daha sonra bu asfalt numunelerinin düz kenarına dik olacak şekilde ortadan 15±1 mm uzunluğunda (a) ve 2,25 mm'den daha az kalınlıkta (n) bir çentik açılmıştır [30].

KTŞ'ye uygun olarak hazırlanan TMA briketlerinin V_h değeri %3 olarak tespit edilmiştir. KTŞ'de sıkıştırılmış yol kaplamasından alınan karotlarda V_h değerinin maksimum %5 olması belirtilmektedir. Bu nedenle, SCB numuneleri optimum bitüm oranında %5±0,5 hava boşluğu ile SGC'de hazırlanmıştır. SGC ayarları, 1,250° dönüş açısı, 600 kPa eksenel basıncı ve dönüş sayısı olarak 120 seçilmiştir. Hazırlanan örnek SCB numunesi Şekil 2 ve Şekil 3'te gösterilmiştir. AASHTO şartnamesine göre aynı özelliğe sahip karışımlardan elde edilecek her briket grubunda en az üç geçerli sonuç elde edilmesi belirtilmektedir [30]. Bu çalışmada bu şartları sağlamak için 186 SCB numunesi üretilmiş ve teste tabi tutulmuştur.



Şekil 2 - SCB numunesi



Şekil 3 - SCB numune hazırlama aşamaları

2.2.3. Test Ekipmanı

Ölçüm ekipmanı numuneye uygulanan yükü ve bu yükün meydana getirdiği yer değiştirmeyi tespit etmek amacıyla bir yük başlığı ve doğrusal değişken yer değiştirme dönüştürücüsü (LVDT) ile tasarlanmıştır. Deney sırasında elde edilen veriler veri toplama sistemine kaydedilmekte ve Şekil 4'teki örnek grafikte gösterildiği gibi her bir numune için yük ve yük doğrultusu yer değiştirme (LLD) eğrisi oluşturulmaktadır.

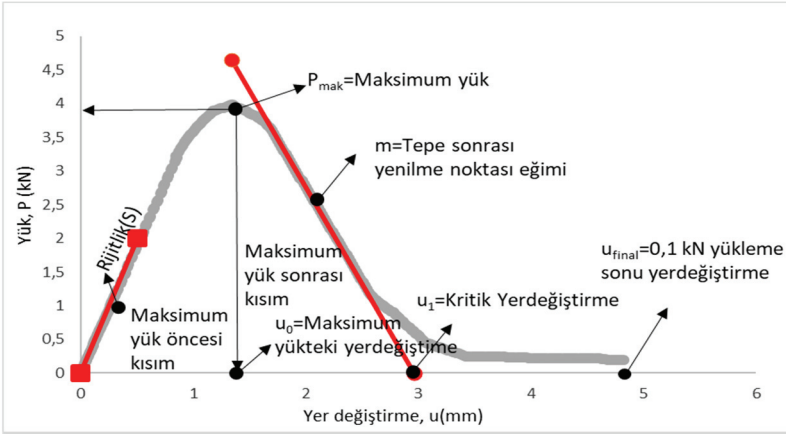
2.2.4. Yarı Dairesel Eğilme (SCB) Testi

SCB testi, SGC [30] veya üstyapıdan alınan karotlardan alınan silindirik numuneler üzerinde, standartta belirtilen kriterlere uygun olarak, basit, pahalı olmayan ekipmanlarla kolayca gerçekleştirilmektedir. Tasarlanan TMA karışımların yenilme potansiyelini belirlerken kullanılan SCB testi için AASHTO T 393 [30] standardının ana ilkeleri esas alınmıştır. Standartta göre yükleme hızı olarak 50 mm/dak uygulanmıştır. Numunelere $25 \pm 0,5$ °C'de su banyosunda koşullandırma sonrası deney yapılmıştır. Numuneler su banyosundan çıkarıldıktan hemen sonra test gerçekleştirilmiştir. Sebebi ise yüksek yükleme hızları ve sıcaklık değişimlerinden etkilenmemektir.

Deney sırasında yük-deplasman değerleri kaydedilerek grafik eğrileri çizilmiştir. I-FIT'in birincil çıktı parametresi olan FI değeri, aşağıda yer alan bölüm 2.2.4.2'de açıklandığı gibi toplam kırılma enerjisi, yük-yer değiştirme eğrisinin tepe sonrası yenilme noktasının eğimine bölünerek hesaplanır. İyi bir çatlama direnci, asfalt karışımlarda yüksek FI değeri ile gösterilir [32].

Literatürdeki bu FI parametresi ara sıcaklıkta gerçekleştirilen deneylerden elde edilmiştir (Oda sıcaklığı veya 25 °C) [9, 30, 32]. FI son zamanlarda SCB test sonuçlarından TMA çatlak ilerlemesini daha iyi analiz etmek veya karakterize etmek için yeni alternatif parametre olarak önerilmektedir [10, 11, 30]. Bu araştırma çalışmasında, IL-SCB testine dayanan popüler çatlama testi indeksi (FI) ve TMA gradasyonunun ince agrega kısmında kireçtaşı agregalarının kullanılmasının sonuçlar üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Şekil 4'te rijitlik, tepe yükü, kritik yer değiştirme, son yer değiştirme, tepe yükündeki yer değiştirme ve yenilme noktasındaki tepe sonrası eğrinin eğimi (m) gösterilmektedir.



Şekil 4 - Tipik I-FIT test sonucu: laboratuvarı hazırlanan TMA karışımı için yük/yer değiştirme eğrisi

2.2.4.1. Kırılma enerjisi (G_f)

Sayısal bir entegrasyon tekniği kullanılarak Şekil 4'deki yük-deplasman eğrisinin altındaki alan yardımı ile kırılma işi (w_f) öncelikli olarak hesaplanmaktadır.

Kırılma enerjisi (G_f) ise, Şekil 4'te tanımlanan yük-deplasman eğrisinin altındaki alan ile hesaplanan W_f 'nin çentikten yukarı doğru oluşan çatlak bölgesinin kesit alanına (A_{lig}) bölünmesi sonucu Denklem 1 ile elde edilen değerdir. A_{lig} genellikle numune kalınlığının (t) brikette açılan çentikten itibaren ölçülen yarıçap uzunluğu (a) ile çarpılmasıyla hesaplanmaktadır [33]. Malzemenin mikro yapısal özellikleri dikkate alınmadan, bu alan genellikle ölçülen (a) ve (t)'nin çarpımıyla hesaplanır [30]. Ayrıca G_f , AASHTO T 393'te numuneyi çatlatmak için gereken A_{lig} alanı başına enerji miktarı olarak tanımlanmaktadır [30].

$$G_f = \frac{W_f}{A_{lig}} \times 10^6 \quad (\text{J/m}^2) \quad (1)$$

2.2.4.2. Esneklik indeksi (FI)

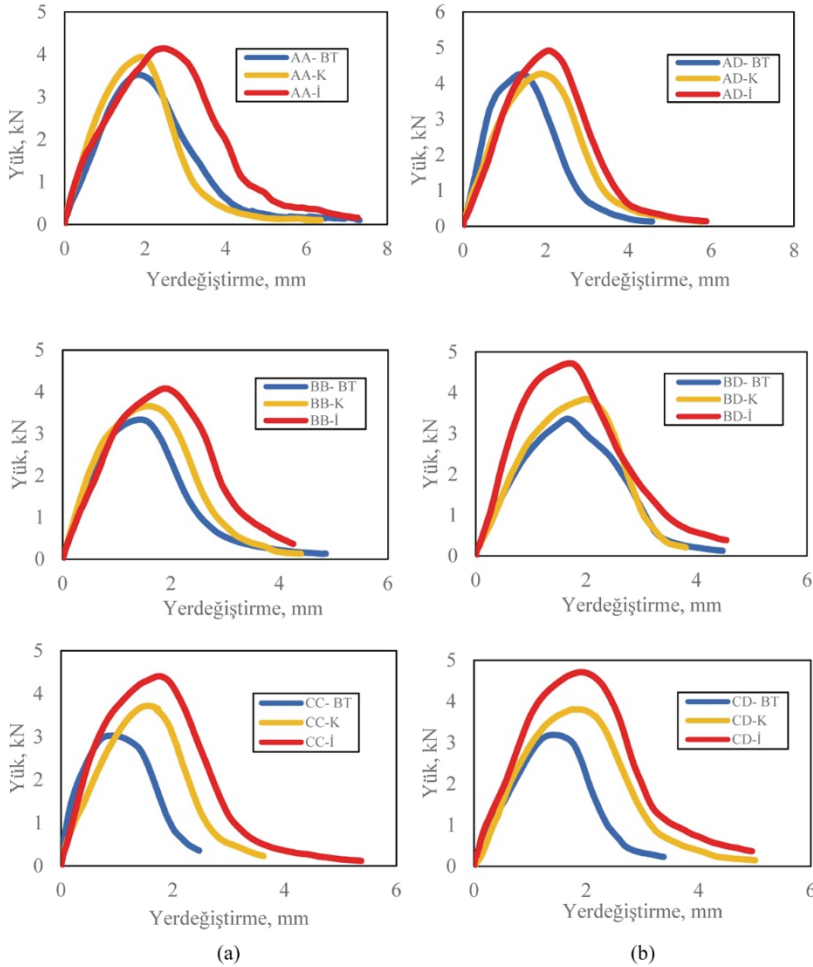
FI, asfalt karışımlarının çatlama davranışını analiz etmek için belirlenmiş bir katsayıdır ve Esneklik İndeksinin kısaltmasıdır [8, 33]. Esneklik indeksi yük yer değiştirme eğrisi aracılığı ile belirlenmektedir. Bu indeks, test numunesindeki çatlak ilerlemeye başladıktan sonra meydana gelen toplam kırılma enerjisi ile yenilme noktasının eğimi arasındaki ampirik ilişkinin bir fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır. Sonuç olarak FI, G_f 'nin Şekil 4'te temsilen gösterilen yük yer değiştirme eğrisindeki P_{mak} noktası sonrası kısımda yer alan eğrinin yenilme noktasından çizilen teğetin eğimine (m) bölünmesi sonucu Denklem 2 ile hesaplanmaktadır [10 ,11].

$$FI = A \times \frac{G_f}{|m|} \quad (2)$$

Burada yenilme noktasından çizilen teğetin eğiminin mutlak değeri $|m|$ 'nin birimi (kN/mm)'dir. A katsayısı bir birim dönüştürme faktörü ve ölçeklendirme katsayısıdır. Bu katsayı 0,01 olarak alınmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

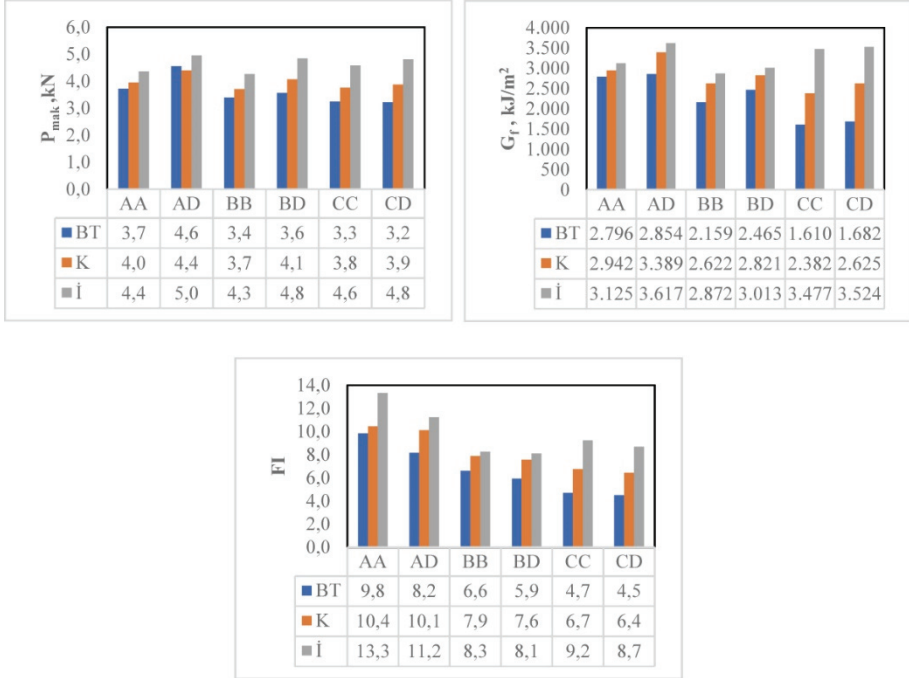
Bu makalede, TMA karışımlarının ince agrega kısmında kireçtaşı agregalarının kullanılmasının kırılma potansiyelini karakterize etmek için farklı taş ocakları ve rafinerilerde elde edilen agrega ve bitümün karıştırılması ile elde edilen numunelere I-FIT SCB testi uygulanmıştır. Testte ara sıcaklık 25 °C ve yükleme hızı 50 mm/dk olarak uygulanmıştır.



Şekil 5 - (a) kaba ve ince kısmı sadece bazalt agregaları (b) kaba kısmında bazalt agregaları ve ince kısmında kireçtaşı agregaları kullanılarak farklı rafinerilerden elde edilen bitüm ile üretilen TMA karışımlarının SCB test sonuçları

Çalışmada Çizelge 6'da yer alan 18 farklı karışım için 186 adet yarı silindirik numune hazırlanmıştır. Bu numunelere yapılan SCB test sonuçları ile ilgili AASHTO T 393 [30] aynı özellikteki her bir karışımın FI değerlerinin varyasyon katsayısının (CoV) %27,1'in altında olması ve aynı zamanda bu kuralı sağlayan numune sayısının ise en az 3 olması gerektiği belirtilmektedir. Hazırlanan 186 numune için bu kuralları sağlayan 60 sonuç elde edilmiştir.

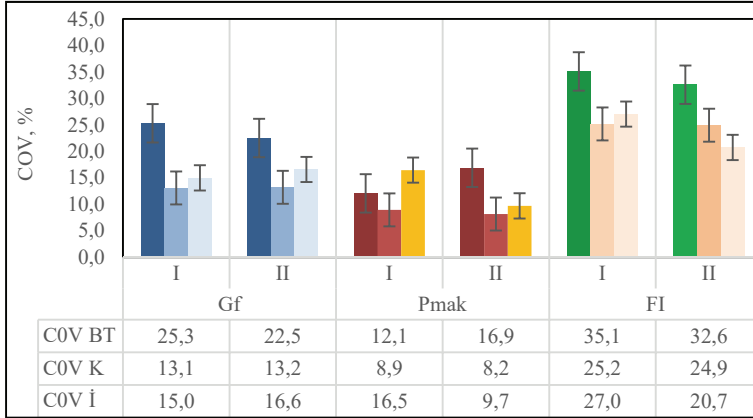
Şekil 5'deki yük-yer değiştirme eğrileri karşılaştırıldığında, İ bitümleri ile hazırlanan aynı gradasyondaki agregalar karışımının diğer bitümlere göre daha elastik davrandığı ve daha yüksek kırılma enerjisine sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 6 - Farklı rafinerilerden elde edilen bitüm ile üretilen TMA karışımlarının tüm kırılma parametreleri

Şekil 6'daki kırılma performans parametrelerine ait grafikler incelendiğinde, karışımın ince agregalar kısmında kireçtaşı agregalarının kullanılmasının sonuçları olumlu yönde etkilediği görülmektedir. Şekil 6 incelendiğinde İ bitümüyle elde edilen karışımların G_f , P_{max} ve FI değerlerinin diğerlerine göre daha yüksek olduğu görülmektedir. AASHTO T 393 standardı ile elde edilen FI ve G_f , P_{max} sonuçlarının kendi içerisinde uyumlu olması deneysel çalışma sürecinin doğruluğunu belirgin şekilde göstermiştir. P_{max} ve G_f değerleri agreganın özgül ağırlık değerinin ve aynı zamanda su emme oranının artması ile azalmıştır. Ayrıca literatürde bitüm absorpsiyonunun artmasının P_{max} ve G_f değerlerini azalttığı görülmüştür [34]. Performans testlerinde kullanılan Tablo 1'deki agregaların özgül ağırlık ve su emme oranlarındaki azalmanın FI değerleri üzerinde artırıcı bir etkiye sahip olduğu Şekil 6'da görülmektedir. Karışımın ince kısmında kireçtaşı agregası kullanıldığında FI azalmasına

rağmen P_{mak} ve G_f değerleri artmıştır. Test, kireçtaşı agregalarının kullanımının karışımın sünek davranışı üzerinde olumlu bir etkisi olduğunu göstermiştir. Elde edilen karışımların FI değerleri kayda değer şekilde azalmamış, P_{mak} ve G_f değerleri artmıştır.



Şekil 7 - (I) iri ve ince agrega için sadece bazalt kökenli üç farklı taş ocağından alınan agregalar (II) iri agrega için bazalt kökenli üç farklı taş ocağından alınan agregalar ve ince agrega için kireçtaşı kökenli bir taş ocağından alınan agrega kullanılarak farklı rafinerilerden alınan bitüm ile üretilen TMA karışımlarının SCB test sonuçlarının CoV'si

Şekil 7'deki CoV değerleri incelendiğinde, ince agrega kısmında bazalt ocaklarının tercih edildiği karışımların CoV'sinin biraz daha yüksek olduğu, ancak önemli bir farklılık göstermediği görülmektedir. FI'nın CoV değerleri daha yüksek olmasına rağmen, diğer değişkenlerde CoV daha düşüktür, yani tekrarlanabilirlik daha yüksektir.

Karışımlardaki ince agreganın kireçtaşı kökenli olmasının CoV'da düşüşe neden olduğu görülmektedir. Şekil 7'de (II) CoV değerlerinin %70'i (I) değerlerinden daha düşüktür. Bu da TMA karışımlarındaki boşlukların kireçtaşı kökenli agregalar ile daha iyi dolduğunu ve esnek bir yapının oluşmasında etkili olduğunu göstermektedir. Ayrıca bu durum bize karışımın ince agrega kısmında kireç taşı kullanımının sonuçlarda tekrarlanabilirlik açısından daha tutarlı olduğunu göstermektedir.

Ayrıca yukarıda "Yöntem" kısmında açıklanan ve çalışmayı desteklemek amacı ile karışımların ince kısmında kireçtaşı kullanılması ile elde edilen briketlerin gradasyonlarının kontrolü için ekstraksiyon deneyi gerçekleştirilmiştir. Ekstraksiyon deneyi ile zengin bitüm ve kesikli gradasyona sahip TMA Aşınma karışımlarının ince agrega kısmında bazalt dışında kullanılan kireçtaşı gibi daha düşük dayanımlı agregaların sıkıştırma esnasında kırılıp gradasyonunun incelenmesine ve bitümün yetersizliğine sebebiyet vermesi ihtimaline karşı önlem alınmıştır. Elek analizi değerlerinin ortalamaları Çizelge 8'de görülmektedir.

Çizelge 8'deki ortalama sonuçlara bakıldığında karışımların ince kısmında kireçtaşı kullanılması ile elde edilen briketlerin elek analizi değerleri ile karışımın esas alınan elek analizi değerleri karşılaştırıldığında sonuçların yakın çıktığı gözlenmektedir. Bu gözlem

kesik gradasyonlu karışım olan TMA Aşınmada kireçtaşı kullanımının yüksek kaba agreganın yüzdesini azaltıcı yani karışımı inceltici olumsuz bir etki yapmadığını göstermiştir.

Çizelge 8. Karışım sonrası ince agregada olarak kireçtaşı kullanılan briketlere yapılan ekstraksiyon sonucu elde edilen ortalama elek analizi değerleri

Elek Açıklığı		Karışım Gradasyonu Geçen, %	İnce Kısımda Kireçtaşı Kullanılan Briketlerin Ekstraksiyon Sonucu Elde Edilen Ortalama Gradasyonu Geçen, %
in, No	mm		
3/4"	19,10	100	100
1/2"	12,70	93,5	94,5
3/8"	9,52	67,3	69,2
No.4	4,75	33,0	36,1
No.10	2,00	23,9	24,9
No.40	0,420	16,4	19,0
No.80	0,177	12,4	14,8
No.200	0,075	9,6	10,7

4. SONUÇLAR

Bu araştırma, I-FIT test yöntemi kullanılarak bazalt ve kireçtaşı agregalarının farklı kombinasyonları ile tasarlanan TMA karışımlarının çatlama performansının değerlendirilmesine dayanmaktadır. Karışımındaki iri agregada üç farklı bazalt ocağından elde edilmiştir. İnce agregada bir kireçtaşı ocağından elde edilmiştir. İnce agregada kısmında farklı kireçtaşı kullanılmasının etkilerini incelemek için tek tip gradasyon kullanılmıştır. Maksimum agregada boyutu 19,1 mm olarak seçilmiştir. 18 farklı TMA aşınma tasarımı yapılarak çalışmada gerekli olan optimum bitüm yüzdeleri tespit edilmiştir. Karışımların her birine performans testi I-FIT uygulanmıştır. Testlerin sonucunda elde edilen esneklik indeksi değerleri aşağıda değerlendirilmiştir;

1. Çalışmada, aynı gradasyona sahip farklı bileşenlerle 18 TMA karışımı elde edilmiştir. Agregada ve bitüm bileşenlerindeki farklılıklar, SCB test sonuçlarında küçük farklılıklara neden olmuştur. İnce agregada kısmında bazalt ve kireçtaşı agregalarının kullanılması ile beraber farklı bitümler kullanılarak elde edilen TMA karışımlarının FI değerlerinin CoV değerlerinin standardın gerektirdiği değerin altında olması, SCB testinin sıcak karışımların performans analizinde bir seçenek olabileceğini göstermiştir.

2. Türkiye'de TMA üretiminde bazalt kullanımı Karayolları Teknik Şartnamesine dayanmakla birlikte, ince agregada kısmında kireçtaşı agregalarının da kullanılabileceği düşünülmektedir. Yol yapımına uygun bazalt ocaklarının sınırlı sayıda olduğu ve bazalt taşocaklarının işletilmesinde süreç ve ekonomi dikkate alındığında alternatif kireçtaşı kullanımının katkısı göz ardı edilmeyecek kadar önemlidir. Bu açıdan çalışma

değerlendirildiğinde kireçtaşı kullanımı hem zaman hem ekonomi hem de ekolojik çevre açısından önem arz etmektedir.

3. TMA karışımlarının FI sonuçları incelendiğinde, ince agrega kısmında kireçtaşı agrega kullanımının sayısal değerler açısından birbirine yakın olduğu görülmüş, bu durum kireçtaşı için olumlu olduğunu göstermiştir.

4. Çalışma, aynı ham petrolden üretilen bitümün üretim kriterlerindeki farklılığın bağlayıcının sünekliğini değiştirdiğini ve bunun TMA karışımlarının çatlama performansı üzerinde etkili olduğunu ortaya koymaktadır.

5. Hafif ve gözeneksiz agregaların performansa olumlu katkıda bulunacağı gözlemlenmiştir.

6. TMA karışımlarının ince kısmında kireçtaşı agregalarının hem karışımdaki gradasyonu hem de performansını olumsuz yönde etkilemediği deney sonuçlarından anlaşılmıştır. Çalışmanın özgünlüğünü güçlendirmek ve Karayolları Teknik Şartnamesinde kireçtaşı kullanılmasına yer verilmesi için çalışmanın genişletilmesinin uygun olacağı düşünülmektedir.

7. Giriş bölümünde de belirtildiği gibi ince agrega kısmında kireçtaşı kullanılması üretim maliyetini düşürecektir. Ayrıca taş ocağı işletmesi sırasında kireçtaşında kil bantlarına rastlanma olasılığının düşük olması nedeniyle bitüm ile agrega arasında aderans sorunu yaşanmayacaktır. Sonuç olarak yolun ekonomik ömrü uzamış olacaktır.

8. Bu çalışma ile TMA Aşınma için ince agrega olarak kireç taşı kullanılmasının gradasyonda büyük oranda bir incelmeye sebebiyet vermediği ekstraksiyon deneyi ile tespit edilmiştir. Bu sayede kireçtaşının gradasyonu inceleneceği kaygısının da ortadan kalkmasına yardımcı olacak bir çalışma olmuştur.

9. Çalışmadan elde edilen son önemli sonuç, karışımın ince agrega kısmında kireçtaşı kullanılması ile elde edilen TMA Aşınma karışımlarına yapılan Tekerlek İzinde Oturma deney sonuçlarının sınır değerler içinde kalmasıdır. Bu sonuç ile TMA Aşınma tabakasının ince agrega kısmında kireçtaşı kullanımının olumsuz bir sonuç oluşturmayacağı da gözlenmiştir.

Semboller

AASHTO Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma Birliği

A_{lig} Ligament area= $a \times t$, mm² (Yükün etkidiği en kesit alanı)

CoV Varyasyon katsayısı

FI Flexibility Index (Esneklik İndeksi)

G_f Kırılma enerjisi, J/m²

ICT Illinois Center for Transportation (Illinois Ulaşım Merkezi)

I-FIT Illinois Flexibility Index Test (Illinois Esneklik İndeksi Testi)

LA Los Angeles değeri

LLD	Load-Line Displacement, mm (Yük Hattı Yer Değiştirmesi)
LVDT	Doğrusal değişken yer değiştirme dönüştürücü
m	Maksimum yük sonrası eğim, kN/mm
MgSO ₄	Magnezyum sülfat
MB	Metilen Mavisi değeri
NCAT	National Center for Asphalt Technology (Ulusal Asfalt Teknolojisi Merkezi)
P _{mak}	Kırılmaya neden olan maksimum yük, kN
P	Numuneye uygulanan yük, kN
SCB	Semi-circular bending (Yarı-dairesel eğilme)
SGC	Superpave Gratory Compactor
t	Numune kalınlığı, mm
TMA	Taş Mastik Asfalt
u	Yük hattı yer değiştirmeleri, mm
u _{final}	0,1 kN yükleme sonu yer değiştirme, mm
u ₀	Maksimum yükteki yer değiştirme, mm
u ₁	Kritik yer değiştirme, mm
W _f	Kırılma enerjisinin yaptığı iş, J

Teşekkür

Bu çalışma, Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde tamamlanmış ilk yazarın doktora tezinin bir parçasını oluşturmaktadır. Bu çalışma için gerekli olan cihaz ve laboratuvar ortamının kullanılması hususundaki maddi manevi katkılarından dolayı Karayolları Genel Müdürlüğü'ne teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- [1] Brown E.R., Mallick, R.B., Haddock, J.E., & Bukowski, J., Performance of Stone Mastic Asphalt (SMA) Mixtures In The United States. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 1997.
- [2] Cao, W., Liu, S., & Feng, Z.C., Comparison of Performance of Stone Matrix Asphalt Mixtures Using Basalt and Limestone Aggregates. Construction and Building Materials, Issue 41, pp. 474-479, 2013.
- [3] Iskender, E., Rutting Evaluation of Stone Mastic Asphalt for Basalt and Basalt-Limestone Aggregate Combinations. Composites: Part B, Issue 54, pp. 255-264, 2013.

- [4] Jiang, J., Ni, F., Gao, L., & Yao, L., Effect of The Contact Structure Characteristics on Rutting Performance in Asphalt Mixtures Using 2D İmaging Analysis. *Construction and Building Materials*, Issue 136, pp. 426-435, 2017.
- [5] Nsengiyumva, G., You, T., & Kim, Y.R., Experimental-Statistical İnvestigation of Testing Variables of a Semicircular Bending (SCB) Fracture Test Repeatability for Bituminous Mixtures. *Journal of Testing and Evaluation*, 5(45), pp.1691-1701, 2017.
- [6] Alı, S. I. A., Alothman, D., & Gökçekuş, H., Rheological Performance of ZycoTherm/Nano-Silica Composite Modified Binders at High and Low Temperatures. *Turkish Journal of Civil Engineering*, 34(2), 77-102, 2023. <https://doi.org/10.18400/tjce.1239171>
- [7] Zhou, Y., Xia, K., Li, X., & Li, H., Suggested Methods for Determining the Dynamic Strength Parameters and Mode-I Fracture Toughness of Rock Materials. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Issue 49, pp. 105-112, 2012.
- [8] Barry, M.K., *An Analysis of Impact Factors on the Illinois Flexibility Index Test*. Urbana, Illinois, 2016.
- [9] Rivera-Perez, J., Ozer, H., & Al-Qadi, I.L., Impact of Specimen Configuration and Characteristics on Illinois Flexibility Index. *Transportation Research Record*, 2672(28), 383-393, 2018.
- [10] Al-Qadi, I.L., Ozer, H., Lambros, J., El Khatib, A., Singhvi, P., Khan, T., Rivera-Perez, J., & Doll, B., *Testing Protocols to Ensure Performance of High Asphalt Binder Replacement Mixes Using RAP and RAS*. Illinois Center for Transportation, 2015.
- [11] Ozer, H., Al-Qadi, I.L., Singhvi, P., Khan, T., Rivera-Perez, J., and El-Khatib, A., *Fracture Characterization of Asphalt Mixtures with High Recycled Content Using Illinois Semicircular Bending Test Method and Flexibility Index*. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2016.
- [12] Molenaar, A. A. A., Skarpas, A., Liu, X., & Erkens, S., *Semi-Circular Bending Test; Simple But Useful?* *Proceedings of the Technical Sessions*, Issue 71, pp. 794-815, 2002.
- [13] Elseifi, M.A., Mohammad, L.N., Ying, H., & Cooper, S., Modeling and evaluation of the cracking resistance of asphalt mixtures using the semi-circular bending test at intermediate temperatures. *Road Materials and Pavement Design*, 13(sup1), 124–139, 2012. <https://doi.org/10.1080/14680629.2012.657035>
- [14] Mohammad, L.N., Kim, M., & Elseifi, M., *Characterization of Asphalt Mixture's Fracture Resistance Using the Semi-Circular Bending (SCB) Test*. 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements, pp. 1-10, 2012.
- [15] Kim, M., Mohammad, L.N., and Elseifi, M.A., *Characterization of Fracture Properties of Asphalt Mixtures as Measured by Semicircular Bend Test and Indirect Tension Test*. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2012.
- [16] Zegeye, E., Le, J.L., Turos, M., & Marasteanu, M., Investigation of size effect in asphalt mixture fracture testing at low temperature. *Road Materials and Pavement Design*, 13(sup1), 88–101, 2012. <https://doi.org/10.1080/14680629.2012.657064>

- [17] Zhou, F., Im, S., Hu, S., Newcomb, D., & Scullion, T., Selection and Preliminary Evaluation of Laboratory Cracking Tests for Routine Asphalt Mix Designs. Road Materials and Pavement Design, pp. 62-86, 2017.
- [18] Ozer, H., Al-Qadi Imad, L., Lambros, J., El-Khatib, A., Singhvi, P., & Doll, B., Development of the Fracture-Based Flexibility Index for Asphalt Concrete Cracking Potential Using Modified Semi-Circle Bending Test Parameters. Construction and Building Materials, Issue 115, pp. 390-401, 2016.
- [19] Ozer, H., Al-Qadi, I.L., Singhvi, P., Bausano, J., Carvalho, R., Li, X., & Gibson, N., Prediction of Pavement Fatigue Cracking at an Accelerated Testing Section Using Asphalt Mixture Performance Tests. International Journal of Pavement Engineering, pp. 264-278, 2018.
- [20] Jahanbakhsh, H., Hosseini, P., Nejad, F.M., & Habibi, M., Intermediate Temperature Fracture Resistance Evaluation of Cement Emulsified Asphalt Mortar. Construction and Building Materials, Issue 197, pp. 1-11, 2019.
- [21] Karayolları Genel Müdürlüğü, Karayolu Teknik Şartnamesi, Ankara, 2013.
- [22] Türk Standartları Enstitüsü, Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar-Yoğunluk ve özgül kütle tayini-Kapiler kapaklı piknometre yöntemi, TS EN 15326, Ankara, 2010.
- [23] Türk Standartları Enstitüsü, Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar-İğne batma derinliği tayini, TS EN 1426, Ankara, 2015.
- [24] Türk Standartları Enstitüsü, Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar - Çözünürlük tayini, TS EN 12592, Ankara, 2015.
- [25] Türk Standartları Enstitüsü, Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar-Yumuşama noktası tayini-Halka ve bilçe yöntemi, TS EN 1427, Ankara, 2015.
- [26] Türk Standartları Enstitüsü, Petrol ve ilgili ürünler – Parlama ve yanma noktasının tayini - Cleveland açık kap yöntemi, TS EN ISO 2592, Ankara, 2017.
- [27] Türk Standartları Enstitüsü, Bitümlü karışımlar - Deney metotları - Sıcak karışım asfalt için -Bölüm 18: Bağlayıcının süzülmesi, TS EN 12697-18, Ankara, 2018.
- [28] İskender, E., Aksoy, A., Nanokil/Polimer/Bitüm Nanokompozit Hazırlama Yönteminin Asfalt Karışım Performansı Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması. Turkish Journal of Civil Engineering, Mayıs 2021;32(3):10885-10906. doi:10.18400/tekderg.686346
- [29] Türk Standartları Enstitüsü, Bitümlü karışımlar-Sıcak asfalt karışımları için deney yöntemleri-Bölüm 1: Çözünür bağlayıcı içeriği, TS EN 12697-1, Ankara, 2020.
- [30] American Association of State and Highway Transportation Officials, Standard Method of Test for Determining the Fracture Potential of Asphalt Mixtures Using the Illinois Flexibility Index Test (I-FIT). American Association of State and Highway Transportation Officials, AASHTO T 393, 2022.
- [31] American Association of State and Highway Transportation Officials, Standard Method of Test for Preparing and Determining the Density of Asphalt Mixture Specimens by Means of the Superpave Gyratory Compactor, AASHTO T 312, 2022.

- [32] Kaseer, F., Yin, F., Arámbula-Mercado, E., Martin, A.E., Daniel, J.S., & Salari, S., Development of an Index to Evaluate the Cracking Potential of Asphalt Mixtures Using the Semi-Circular Bending Test, *Construction and Building Materials*, Issue 167, pp. 286-298, 2018.
- [33] Espinosa, L., Caro, S., & Wills, J., Study of the Influence of the Loading Rate on the Fracture Behaviour of Asphalt Mixtures and Asphalt Mortars. *Constr. Build. Mater.*, vol. 262, Nov, 2020.
- [34] Kasil, H.B., Farklı Malzeme Bileşenleri İle Tasarlanan Taş Mastik Asfalt Aşınma Karışımının Çatlak Performansının Araştırılması, *Doktora Tezi*, Erzurum Teknik Üniversitesi, 2024.