

Bitümlü kaplamalarda düşük sıcaklık çatlaklarının incelenmesi

Yüksel TAŞDEMİR*, Emine AĞAR

İTÜ İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Düşük sıcaklık çatlaklarını etkileyen faktörler konusunda; bitümlü bağlayıcı oranını, katkı türlerini, hava boşluğu oranını ve yaşlandırma sürelerini değiştirerek gerçekleştirilen kapsamlı bir çalışma bugüne kadar yapılmamıştır. Bu çalışmada, düşük sıcaklık çatlakları üzerinde, belirtilen faktörlerin etkilerini ayrıntılı olarak inceleyebilmek amacıyla, deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Bitümlü karışımların, düşük sıcaklık çatlaklarına direncini ölçmek için sınırlandırılmış numunede termal gerilme testi cihazı kullanılmıştır. Deneysel sonuçları üzerinde, İstatistiksel Analiz Sistemi paket programı yardımıyla, genel lineer model işlemleri kullanılarak kovaryans analizi yapılmıştır. Bitümlü bağlayıcı oranı ve hava boşluğu oranının, karışımın kırılma sıcaklığı üzerinde etkili olmadığı belirlenmiştir. Katkı türüne göre, kırılma sıcaklığının değiştiği, yaşlanma süresi arttıkça, kırılma sıcaklığının yükseldiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Düşük sıcaklık çatlakları, sınırlandırılmış numunede termal gerilme testi, kovaryans analizi.

Investigation of low temperature cracking on asphalt pavements

Abstract

Researches have been carried out for more than half century on low temperature cracking which hasn't solved yet. Low temperature cracking arises due to extreme cold temperature. The aim of this study is to investigate the importance of low temperature cracking AC pavements. No comprehensive study has been investigated the influence of asphalt content, modifier type, air voids content and aging levels on low temperature cracking of asphalt concrete (AC) mixtures in single experimental research program. In this research, laboratory tests were carried out to evaluate the effect of all factors mentioned above on the low temperature cracking properties of AC mixtures. The thermal stress restrained specimen test (TSRST) was used to investigate the low temperature cracking resistance of the AC mixtures. The analysis of covariance was performed using a general linear model (GLM) procedure in the Statistical Analysis System (SAS) package program. The procedure was incorporated on test results to develop models for determining fracture temperature and fracture strength. It was found that developed models were significant at 95% significance level and asphalt content and air voids content were not significant factors on low temperature cracking. It was observed that fracture temperature changed according to used modifier type and became warmer with the increase of degree of aging.

Keywords: Low temperature cracking, thermal stress restrained specimen test, analysis of covariance.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Yüksel TAŞDEMİR. ytasdemir@ins.itu.edu.tr; Tel: (354) 242 10 02.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ İnşaat Fakültesi'nde tamamlanmış olan "Bitümlü kaplamaların termal davranışlarının performans testleri ile incelenmesi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 02.10.2003 tarihinde dergiye ulaşmış, 16.10.2003 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 30.06.2005 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Giriş

Soğuk iklimli bölgelerdeki bitümlü kaplamalar, trafik yükleriyle birlikte sıcaklık değişiminden kaynaklanan gerilmelere maruz kalmaktadır. Bu gerilmelerin etkisiyle, bitümlü kaplamalarda termal çatlaklar ortaya çıkmaktadır.

Üzerinde yarım yüzyılı aşkın bir süredir araştırmalar yapılan ve hala çözülemeyen bir sorun halinde olan termal çatlaklar, iki farklı şekilde ortaya çıkmaktadır. Kaplamalarda sıcaklık değişiminin tekrarlanması nedeniyle oluşan çatlaklar, termal yorulma çatlakları olarak adlandırılırken, kaplamalarda aşırı soğuk nedeniyle aniden oluşan çatlaklar ise düşük sıcaklık çatlakları olarak adlandırılmaktadır (Zeng, 1995). Bu çalışmada, düşük sıcaklık çatlakları incelenmiş olup, daha az önemli bir bozulma türü olarak değerlendirilen termal yorulma çatlakları, çalışmanın kapsamı dışında bırakılmıştır.

Bitümlü kaplama, soğuk hava koşullarında büzülmeye çalışmaktadır. Bitümlü kaplama ile altındaki tabaka arasındaki ara yüzeyde oluşan sürtünme, bitümlü kaplamanın büzülmesini engellemeye çalışmakta ve bunun sonunda bitümlü kaplamada çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Kaplama içerisinde termal nedenlerle ortaya çıkan çekme gerilmesi, bitümlü karışımın çekme dayanımına ulaştığında, kaplamada çatlaklar meydana gelmektedir. Sahada yapılan gözlemler, çatlağın birdenbire yüzeyde başladığını ve kaplamanın tabanına kadar indiğini göstermiştir (Jung, 1994).

Bitümlü kaplamalarda, düşük sıcaklık çatlaklarını etkileyen faktörler; kaplamanın yaşlanması, malzeme, çevresel etkiler ve üstyapı faktörleri olarak sıralanabilir. Bu çalışmada, bitümlü bağlayıcı oranının, katkı türünün, hava boşluğu oranının ve yaşlandırma süresinin kırılma sıcaklığı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bitümlü karışımların, düşük sıcaklık çatlaklarına direncini ölçmek için sınırlandırılmış numunede termal gerilme testi Thermal Stress Restrained Specimen Test – TSRST) cihazı kullanılmıştır.

Malzemeler

Bitümlü bağlayıcı

Deneylede kullanılan katkısız bitümlü bağlayıcı ve fabrikada modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcı, BP şirketinden (British Petroleum-BP) temin edilmiştir. Bu malzemeler üzerinde yapılan penetrasyon, yumuşama noktası, özgül ağırlık ve düktilite deneyleri sonucunda ilgili şartnamelere uygun sonuçlar alınmıştır (Tablo 1).

Tablo 1. Deneylede kullanılan bitümlü bağlayıcının özellikleri

Deney Adı	TS NO	Bitümlü Bağlayıcı Türü	
		PG 58-28 (Katkısız)	PG 64-28 (Fabrikada modifiye edilmiş)
Penetrasyon, 25 °C	TS 118	104	82
Yumuşama Noktası, °C	TS 120	40	54
Özgül Ağırlık		1.02	1.02
Düktilite	TS 119	>100	
Fraass Kırılma Noktası, °C		-16	-18

Superpave bitümlü bağlayıcı şartnamesinde yer alan deneylerin sonuçları, bitümlü bağlayıcılarla birlikte, BP şirketi tarafından verilmiştir (Tablo 2). Modifiyerin adı ve oranı ticari gizlilik nedeniyle BP tarafından açıklanmamıştır.

Tablo 2. Superpave bitümlü bağlayıcı şartnamesine göre test sonuçları

Ürün	PG 58-28	PG 64-28	Şartname
<i>Orijinal bitümlü bağlayıcı</i>			
Parlama noktası, °C	316	306	AASHTO T48; 230 min.
Brookfield viskozitesi, Pa.s	0.26	0.64	ASTM D4402; 3.00 maks.
Dinamik kayma G*/Sin δ, kPa	1.26	1.26	SHRP B-003; 1.00 min.
<i>RTFOT kalıntısı</i>			
Kütle kaybı, %	0.20	0.22	AASHTO T240; 1.00 maks.
Dinamik kayma G*/Sin δ, kPa	2.295	2.780	SHRP B-003; 2.20 min.
<i>PAV kalıntısı</i>			
Dinamik kayma G*/Sin δ, kPa	4918	2373	SHRP B-003; 5000 maks.
Sünme rijitliği S, Mpa	235	204	SHRP B-002; 300 maks.
Sünme rijitliği m-değeri	0.318	0.325	SHRP B-002; 0.300 min.

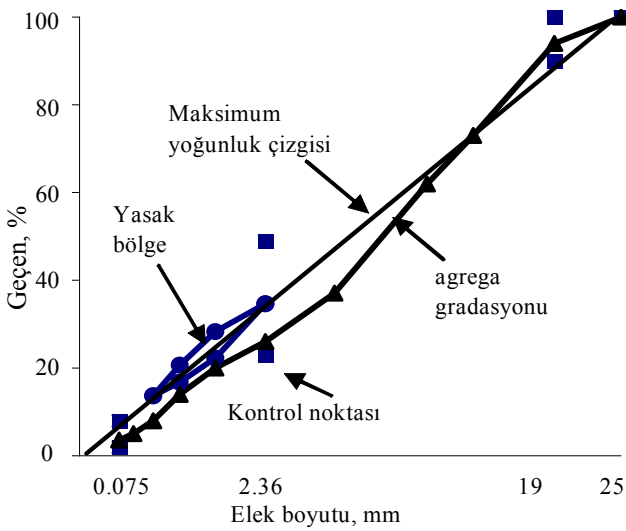
Agrega

Bazalt kökenli mineral agrega, ABD'nin Arizona Holbrook bölgesinden sağlanmıştır. Kullanılan agreganın özellikleri Tablo 3'te görülmektedir.

Tablo 3. Deneylerde kullanılan agreganın özellikleri

Agrega Özellikleri		
Özellik	Değeri	Şartname
Kaba Agregası		
Hacim Özgül Ağırlık	3.033	TS 3526 (AASHTO T85)
Su Emme Yüzdesi	1.05	TS 3526 (AASHTO T85)
Los Angeles Aşınması, %	13	TS 3694 (AASHTO T96) TS 3655 (AASHTO)
Sağlamlılık, % kayıp	1.1	T104)
Kırılmışlık Oranı, %	100	ASTM D-5821
İnce Agregası		
Hacim Özgül Ağırlık	2.91	TS 3526 (AASHTO T84)
Su Emme Yüzdesi	1.36	TS 3526 (AASHTO T84) TS 3655 (AASHTO)
Sağlamlılık, % kayıp	1.1	T104)
Köşelilik, %	45	AASHTO TP33
Mineral Filler		
Zahiri Özgül Ağırlık	2.947	

Çalışmada, SHRP'in nominal maksimum agrega boyutu 19 mm olan agrega gradasyonu seçilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Kullanılan agrega gradasyonu

SUPERPAVE sisteminde, tasarım agrega gradasyonunu belirlemek için kontrol sınırlarına ve yasaklanmış bölgeye sahip olan gradasyon grafiği

kullanılmaktadır. Bilindiği gibi geleneksel yöntemlerdeki gradasyon grafiklerinde tane boyutu ile ilgili yatay eksen yarı logaritmiktir. SUPERPAVE sisteminde ise yarı logaritmik eksen yerine 0.45'lik üstel eksen kullanılmaktadır. Standart elek açıklıklarının milimetre cinsinden 0.45'inci kuvvetleri hesaplanarak bulunan değerlerin yatay eksenindeki yeri saptanır ve buralara elek açıklığının değeri yazılır.

Superpave'de agrega gradasyonu, yasaklanmış bölgenin dışından, kontrol noktaları arasından geçmelidir. Maksimum yoğunluk çizgisi, maksimum boyutlu agregaların %100'ünün geçtiğini gösteren nokta ile başlangıç (orijin) arasında çizilmektedir. Maksimum agrega boyutu, nominal agrega boyutundan bir ebat büyüktür. Nominal maksimum agrega boyutu, agreganın %90'dan az kısmının alta geçtiği ilk eleğin bir üstündeki eleğin açıklığıdır.

Yasak bölgeden geçen karışımlarda, ince kum boyutundaki malzemenin toplam ince malzeme içindeki oranının fazla olması, sıkılaşmada zorluk çıkarır ve kalıcı deformasyonların oluşmasına neden olurlar. Gradasyon eğrisi maksimum yoğunluk hattına yakın ve paralel geçen karışımlarda, yeterli VMA sağlanamamaktadır.

Katkı maddeleri

Deneylerde katkı maddesi olarak, selülozik fiber ve sentetik fiber kullanılmıştır. Üretici firmaların önerilerine göre selülozik fiberden karışım ağırlığına göre %0.3, sentetik fiberden %0.05 oranında karışıma ilave edilmiştir.

Bitümlü karışım özellikleri

Marshall yöntemi ile, katkısız bitümlü bağlayıcı kullanılarak, karışım tasarımı yapılmış ve optimum bitümlü bağlayıcı oranı %5.0 bulunmuştur. Diğer karışımlarda da optimum bitümlü bağlayıcı oranı %5.0 olarak alınmıştır. Ayrıca, bitümlü bağlayıcı oranı değişiminin etkisini ortaya koymak için, Marshall tasarımında bulunan optimum bitümlü bağlayıcı oranının yanısıra, Iowa Ulaştırma Bölümü (Iowa Department of Transportation - IDOT) tarafından hazırlanan şartnamedeki (IDOT, 1997) minimum ve maksimum bitümlü bağlayıcı film kalınlıkları esas

alınarak, iki ayrı bitümlü bağlayıcı oranı daha hesaplama yoluyla saptanmıştır. IDOT şartnamesinde yer alan minimum bitümlü bağlayıcı film kalınlığı 8 μ , maksimum bitümlü bağlayıcı film kalınlığı 13 μ 'dur. 8 μ ile minimum VMA koşulu sağlanamadığı için, minimum VMA koşulunu sağlayan minimum bitümlü bağlayıcı film kalınlığı 9.1 μ alınmış ve bitümlü bağlayıcı oranı %4.2 olarak hesaplanmıştır. Maksimum bitümlü bağlayıcı film kalınlığı (13 μ) için bitümlü bağlayıcı oranı %5.6 olarak belirlenmiştir. Bitümlü bağlayıcı film kalınlıkları saptanırken minimum VMA şartı kontrol edilmiştir. VMA'nın hesaplanması sırasında hava boşluk oranı %4 olarak hedeflenmiştir.

Bitümlü bağlayıcı oranı arttıkça, kaplamanın kırılma sıcaklığının düşeceğine inanıldığı için, TSRST deneylerinde, optimum olan %5.0 ve maksimum bitümlü bağlayıcı film kalınlığına karşılık gelen %5.6 bitümlü bağlayıcı oranları kullanılmış, minimum bitümlü bağlayıcı film kalınlığına karşılık gelen bitümlü bağlayıcı oranı dikkate alınmamıştır.

Katkısız bitümlü bağlayıcı ile hazırlanan karışımın karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı, üretici firmanın önerisi üzerine, sırasıyla 140 ve 130°C olarak alınmıştır. Fabrikada modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcı (PG 64-28) ile üretilen karışımın, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı, üretici firmanın önerisiyle katkısız bitümlü bağlayıcıya göre 5°C daha yüksek seçilmiştir. Karışım hazırlandıktan sonra 4 saat 135°C'de bekletilmiştir. Bu bekletme, tesiste hazırlanırken ve serilirken bitümlü karışımda oluşabilecek kısa dönem yaşlanmayı temsil etmektedir (Bell vd., 1994). Bu karışımlardan, Kaliforniya yağurma presi ile 15x15x40 cm boyutlarında kirişler üretilmiştir. Kaliforniya yağurmalı presi ile hazırlanan kiriş, düşük hava boşluğu hedeflenen karışımlarda dört, yüksek hava boşluğu hedeflenen karışımlarda iki tabaka halinde sıkıştırılmıştır.

Kaliforniya yağurmalı presi ile hazırlanan kirişler, yaklaşık 24 saat sonra kalıplardan çıkarılmış, bu kirişlerin her birinden dörder adet 5x5x25 cm boyutlarında prizmatik numuneler kesilerek üretilmiştir. Prizmatik numunelerin bir

kısmı 5 gün, bir kısmı da 25 gün, 85 °C'de bekletilmiştir. Laboratuvarında sıkıştırılmış karışımın 5 gün süre ile yaşlandırılması, don olmayan nemli bölgelerde yer alan kaplamalar için 15 yıla, don olan kurak bölgelerde hizmet veren kaplamalar için ise 7 yıla karşılık gelmektedir (Bell vd., 1994). Numunelerin bazıları uzun dönem yaşlanmaya tabi tutulmadan test edilmiştir.

Test yöntemi

Sınırlandırılmış numunede termal gerilme testi cihazı

Test sistemi için temel gereksinim, soğuma sırasında, test edilecek numunenin sabit boyda kalmasını sağlamaktır. Soğuma nedeniyle nümune büzölmeye çalışacak, boyu sabit tutulduğu için büzölemeyecek, ancak nümune içinde gerilmeler oluşacaktır. İlk çalışmalarda, test numunesinin boyunu sabit tutacak, sabitlenmiş iskelet yapı kullanılmıştır (Monismith vd., 1965; Fabb, 1974). Fakat soğuma arttıkça nümune içinde oluşan gerilmeler nedeniyle iskelet yapıda deformasyon oluşmuştur. İskelet yapıdaki deformasyon sebebiyle nümune içindeki gerilmeler yok olmuş ve numunede kırılma ortaya çıkmamıştır. Arand (1987), test sistemini geliştirmiş, nümune içindeki gerilmelerin artmasını sağlayan, test sırasında sürekli olarak numunenin boyunu düzelden bir sistem yerleştirilmiştir. TSRST sistemi; yükleme çerçevesi, düşük ısı kabini, ısı ölçerler, nümune yerleştirme yeri, veri elde etme ve kontrol sisteminden oluşmaktadır.

Bu çalışmada kullanılan TSRST cihazı, Stratejik Karayolu Araştırma Programı SHRP çerçevesinde Oregon State Üniversitesinde geliştirilmiştir (Jung ve Vinson, 1993a; Jung ve Vinson, 1993b).

Deneyde kullanılacak nümune, deneyden en az 29 saat önce iki alüminyum plaka arasına epoksi ile yapıştırılmaktadır. 24 saat epoksinin sertleşmesi için beklenilmekte, 24 saat sonunda numune, 5 saat buzdolabında yaklaşık 5°C'de bekletilmektedir. 5 saat süre ile 5°C'de bekletmedeki amaç, numunenin deneyin başlangıç sıcaklığına yakın bir sıcaklığa sahip olmasını sağlamaktır. Buzdolabından alınan numune TSRST makinesine yerleştirilmektedir. TSRST cihazı içindeki

nümuneye, deney başlangıcında ön soğutmaya tabi tutulmakta ve deney 2°C’de başlatılmaktadır.

Test süresince, kabin içerisindeki sıcaklık 10°C/saat hızla azaltılmaktadır. Numune büzülürken, iki adet lineer değişkenli deformasyon ölçer (Linear Variable Differential Transducers – LVTD) hareketi algılamakta büzülme 0.0025 mm’den fazla ise dönmeli krikoya sinyal göndermekte ve dönmeli krikonun numuneyi deney başlangıcındaki boyuna uzatmaktadır. Sıcaklık azalmaya devam ettiği zaman, numune kırılmaya kadar numune içerisindeki termal gerilme artmaktadır (Zeng, 1995). Kırılma noktasında, gerilme değeri maksimuma ulaşmaktadır. Kırılmanın olduğu sıcaklığa, kırılma sıcaklığı, karşılığında olan gerilmeye de kırılma dayanımı denilmektedir.

Çalışma programı

Bitümlü karışımların kırılma sıcaklıklarını ve kırılma dayanımlarını etkileyen faktörleri ayrıntılı olarak inceleyebilmek amacıyla, iki grup TSRST test numunesi hazırlanmıştır. TSRST için numune hazırlanması protokolüne uygun olarak, numunelerin parafinli hava boşluğu oranları göz önüne alınmıştır (Harvey, 1990).

Birinci grup

Birinci grupta; iki farklı bitümlü bağlayıcı oranı (%5.0 ve %5.6), üçü katkılı (selülozik fiber, fabrikada modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcı ve sentetik fiber) ve biri katkısız olmak üzere dört tip bitümlü karışım ve üç farklı yaşlandırma süresi (0 gün, 5 gün ve 25 gün) ele alınmıştır. Hava boşluğu oranı, %4 olarak hedeflenmiştir. Birinci grupta kullanılan karışımların tasarım özellikleri Tablo 4’te görülmektedir.

İkinci grup

İkinci grupta; iki farklı bitümlü bağlayıcı oranı (%5.0 ve %5.6), iki ayrı hava boşluğu oranı (%4 ve %8), biri katkılı (selülozik fiber), diğeri katkısız olmak üzere iki tip bitümlü karışım ve üç farklı yaşlandırma süresi (0 gün, 5 gün ve 25 gün) gözönüne alınmıştır. İkinci grupta kullanılan karışımların tasarım özellikleri Tablo 5’te görülmektedir.

Tablo 4. Birinci grupta kullanılan karışımların tasarım özellikleri

Deneyisel tasarım değişkenleri	Düzeyleri
Bitümlü bağlayıcı tipi	PG 58-28
Katkı türleri	Selülozik fiber Fabrikada modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcı (PG 64-28) Sentetik fiber
Agrega tipi	Bazalt
Deneylerde kullanılan bitümlü bağ. oranları, %	5.0 ; 5.6
Hedeflenen hava boşluğu oranı, %	4
Sıkıştırma cihazı	Kaliforniya yoğurmalı presi
Nümuneye boyutları, cm	5x5x25
Yaşlandırma süresi	Kısa süreli yaşlandırma: 135°C de 4 saat Uzun süreli yaşlandırma: 85°C de 5 ve 25 gün
Soğuma hızı	10°C/saat

Tablo 5. İkinci grupta kullanılan karışımların tasarım özellikleri

Deneyisel tasarım değişkenleri	Düzeyleri
Bitümlü bağlayıcı tipi	PG 58-28
Katkı türleri	Selülozik fiber
Agrega tipi	Bazalt
Deneylerde kullanılan bitümlü bağlayıcı oranları, %	5.0 ; 5.6
Hedeflenen hava boşluğu oranı, %	4; 8
Sıkıştırma cihazı	Kaliforniya yoğurmalı presi
Nümuneye boyutları, cm	5x5x25
Yaşlandırma süresi	Kısa süreli yaşlandırma: 135°C de 4 saat Uzun süreli yaşlandırma: 85°C de 5 ve 25 gün
Soğuma hızı	10°C/saat

Deneyel çalışma sonuçları

Deney sonuçlarının sunumu sırasında, numunelere özelliklerine uygun olarak kodlar verilmiştir. Normal bitümlü bağlayıcı ile üretilenlere “UB”, selülozik fiberli numunelere “INT”, fabrikada modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcı kullanılarak hazırlanan numunelere “PBM” ve

sentetik fiberli nümunelere “FOM” kodları verilmiştir. Yüksek bitümlü bağlayıcı oranına sahip nümunelerin kodlarının başına H ve optimum bitümlü bağlayıcı oranı ile hazırlanan nümunelerin kodlarının başına “O” getirilmiştir. Karışım kodları başında yer alan 2, karışımın yüksek hava boşluğu oranına sahip olduğunu göstermektedir.

Birinci grup TSRST sonuçları Tablo 6’da, ikinci grup TSRST sonuçları Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 6. Birinci grup TSRST sonuçları

Karışım	Yaşlandırma, gün	Ortalama Parafinli Hava Boşluğu, %	Ortalama Kırılma Sıcaklığı, °C	Ortalama Kırılma Dayanımı, MPa
OUB	0	4.80	-25.37	2.95
	5	4.57	-23.47	2.72
	25	4.63	-21.27	2.44
OINT	0	4.57	-25.43	3.40
	5	4.63	-21.37	3.00
	25	4.60	-19.70	3.09
OPBM	0	4.67	-28.67	3.81
	5	4.67	-26.83	3.80
	25	4.77	-23.57	3.51
OFOM	0	4.73	-25.53	3.42
	5	4.60	-23.83	3.04
	25	5.00	-1.90	2.67
HUB	0	3.35	-24.85	2.97
	5	3.65	-23.75	2.78
	25	3.37	-23.23	2.94
HINT	0	3.73	-24.10	3.10
	5	3.78	-22.80	3.37
	25	4.10	-22.55	3.70
HPBM	0	3.83	-28.70	3.99
	5	3.85	-26.95	4.02
	25	2.97	-23.80	3.34
HFOM	0	3.93	-25.05	3.32
	5	3.93	-23.98	3.00
	25	3.83	-21.33	2.52

TSRST deneyinde nümuneler genellikle maksimum dayanıma ulaştıkları noktada kırılmışlar, kırılma anındaki sıcaklık, kırılma sıcaklığı olarak alınmıştır. Yüksek hava boşluğuna sahip bazı nümunelerde ise kırılma oluşmamış, sıcaklık -45°C’ye kadar düşmüş ve tekrar yükselmiştir. Bu gibi durumlarda, maksimum dayanımın olduğu noktaya karşılık gelen sıcaklık, kırılma sıcaklığı olarak alınmıştır.

Tablo 7. İkinci grup TSRST sonuçları

Karışım	Yaşlandırma, gün	Ortalama Parafinli Hava Boşluğu, %	Ortalama Kırılma Sıcaklığı, °C	Ortalama Kırılma Dayanımı, MPa
OUB	0	4.80	-25.37	2.95
	5	4.57	-23.47	2.72
	25	4.63	-21.27	2.44
OINT	0	4.57	-25.43	3.40
	5	4.63	-21.37	3.00
	25	4.60	-19.70	3.09
HUB	0	3.35	-24.85	2.97
	5	3.65	-23.75	2.78
	25	3.37	-23.23	2.94
HINT	0	3.73	-24.10	3.10
	5	3.78	-22.80	3.37
	25	4.10	-22.55	3.70
2OUB	0	9.20	-25.60	2.57
	5	8.87	-23.57	2.23
	25	9.33	-21.77	1.97
2OINT	0	8.83	-25.83	2.37
	5	9.13	-23.80	1.93
	25	9.00	-20.77	1.67
2HUB	0	7.17	-26.70	2.70
	5	7.13	-24.60	2.39
	25	8.40	-22.90	2.24
2HINT	0	8.40	-26.60	2.47
	5	7.70	-24.60	2.03
	25	7.27	-16.83	1.54

TSRST deney sonuçlarının istatistiksel analizi

Deneysel çalışma sonuçlarının değerlendirilmesi, istatistiksel analiz sistemi (Statistical Analysis System – SAS) paket programı ile yapılmıştır (SAS Institute, 1998). SAS paket programı içinde yer alan genel lineer model (General Linear Model – GLM) işlemleri yardımıyla, TSRST deney sonuçları üzerinde %95 güven düzeyinde kovaryans analizi gerçekleştirilmiş, kırılma sıcaklıkları ve kırılma dayanımları için modeller kurulmuştur. GLM işlemleri, Tip III hipotez testinin yapılmasını sağlamaktadır. Tip III hipotez testindeki Pr>F değerleri modeldeki etkili ve etkili olmayan faktörleri vermektedir. Tip III hipotez testinde 0.05’ten küçük Pr>F değerine sahip olan faktörler, kurulan modelde etkili, büyük olan faktörler ise etkisizdir. Tip III hipotez testinde, bir faktör veya etkileşimin değişimi incelenirken, diğer faktörler veya etkileşimler modelden çıkarılmaktadır. Yani incelenen

faktör veya etkileşimin modele etkisi belirlenmektedir.

Ayrıca, kovaryans analizinde, çoklu karşılaştırma testlerinden Duncan çoklu aralık testi uygulanmıştır. Bu test yardımıyla, her bir bağımsız değişkenin düzeylerine (örneğin, yaşlandırma süresi için düzeyler; 0 gün, 5 gün ve 25 gün) ait kırılma sıcaklıkları arasındaki farkların önemli olup olmadığı saptanmıştır. Duncan çoklu aralık testinde, her bir bağımsız değişkenin düzeyleri için bulunan kırılma sıcaklıkları arasındaki farklar önemli ($p < 0.05$) ise, kırılma sıcaklıkları ile birlikte farklı harf, önemsiz ($p > 0.05$) ise kırılma sıcaklıkları ile birlikte aynı harf kullanılmaktadır. Test, aynı şekilde kırılma dayanımları için de uygulanmıştır.

Birinci grup TSRST deney sonuçlarının istatistiksel analizi

Birinci grup TSRST deney sonuçlarının istatistiksel analizi üç basamakta gerçekleştirilmiştir.

Model kurmak için birinci grup TSRST deney sonuçlarına kovaryans analizi yapılması

Birinci grupta; iki farklı bitümlü bağlayıcı oranı, üçü katkılı ve biri katkısız olmak üzere dört tip karışım ve üç farklı yaşlandırma süresi bağımsız değişken olarak göz önüne alınmıştır. Hava boşluğu oranı; %4 olarak hedeflenmiş fakat kesme işlemi nedeniyle kontrol altında tutulamamış, %2.7 ile %5.0 arasında saptanmıştır. Bu nedenle, hava boşluğu oranı sürekli değişken (covariate variable) olarak kabul edilmiştir. Kırılma sıcaklığı ve kırılma dayanımı, analizde bağımlı değişken olarak ele alınmıştır. GLM işlemleri kullanılarak, 73 nümunenin TSRST sonuçları üzerinde kovaryans analizi gerçekleştirilmiştir.

Birinci grup TSRST deney sonuçlarına bağlı olarak model kurulması

Birinci grup TSRST deney sonuçlarına bağlı olarak kurulan kırılma sıcaklığı modeli aşağıda verilmiştir.

$$KIRSIC = \mu + \alpha_1 \text{BITORAN} + \alpha_2 \text{KATKI} + \alpha_3 \text{YAS} + \alpha_4 \text{HAVA} + \alpha_5 \text{BITORAN} * \text{KATKI} + \alpha_6 \text{BITORAN} * \text{YAS} + \alpha_7 \text{KATKI} * \text{YAS} \quad (1)$$

Modelde;	
KIRSIC	:Kırılma sıcaklığı,
BITORAN	:Bitümlü bağlayıcı oranı,
KATKI	:Karışımlarda kullanılan katkılar,
HAVA	:Hava boşluğu oranı,
YAS	:Yaşlandırma süresi,
BITORAN * KATKI	:Bitümlü bağlayıcı oranı ve katkı türleri arasındaki etkileşim,
BITORAN * YAS	:Bitümlü bağlayıcı oranı ve yaşlandırma süresi arasındaki etkileşim,
KATKI * YAS	:Katkı türleri ve yaşlandırma süresi arasındaki etkileşim,
μ	:Sabit,
α_i	:Regresyon katsayılarıdır.

Regresyon katsayıları arkasında yer alan faktörler ve etkileşimler, yalnızca düzeyi belirleyerek, regresyon katsayılarını bulmak için kullanıldığından, modelde yerlerine "1" yazılmaktadır. Hava boşluğu oranı yerine araştırılan düzeydeki hava boşluğu yazılarak, o düzeydeki hava boşluğu regresyon katsayısıyla çarpılmaktadır.

Birinci grup TSRST deney sonuçları yardımıyla kurulan kırılma sıcaklığı modelinden elde edilen bilgiler Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8'de,
E :etkili (tip III hipotez testinde $Pr > F$ değeri 0.05'ten küçük ise),
EZ :etkisiz (tip III hipotez testinde $Pr > F$ değeri 0.05'ten büyük ise) anlamlarını taşımaktadır.

Tablo 8. Birinci grup TSRST deney sonuçları yardımıyla kurulan kırılma sıcaklığı modelinden elde edilen bilgiler

Faktör/Etkileşim	$P_r > F$	Açıklama
BITORAN	0.1316	EZ
KATKI	<0.0001	E
YAS	<0.0001	E
HAVA	0.6793	EZ
BITORAN*KATKI	0.6163	EZ
BITORAN*YAS	0.0003	E
KATKI*YAS	0.0032	E

Tablo 8'den aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

- Bitümlü bağlayıcı oranı ve hava boşluğu oranı, karışımın kırılma sıcaklığı üzerinde etkili

değildir. Bitümlü bağlayıcı ve hava boşluğu oranlarındaki küçük değişimler (sırasıyla %0.6 ve %2.3) kırılma sıcaklığını etkilememektedir.

- Katkı türü ve yaşlandırma süresi ise, kırılma sıcaklığını belirgin bir şekilde etkilememektedir. Bu yüzden, karışımda kullanılacak katkı türüne dikkat edilmelidir.

- Katkı türü-yaşlandırma süresi ve bitümlü bağlayıcı oranı-yaşlandırma süresi etkileşimlerinin kırılma sıcaklığı üzerinde etkili, bitümlü bağlayıcı oranı-katkı türü etkileşiminin, kırılma sıcaklığı üzerinde etkisiz olduğu saptanmıştır. Bu sonuçtan, yaşlandırma süresinin en etkili faktör olduğu sonucu çıkarılabilir.

Deneyde bulunan kırılma sıcaklığı ile model yardımıyla bulunan kırılma sıcaklığı arasında $R^2=0.90$ 'lik bir uygunluk olduğu belirlenmiştir. Kurulan modelin ($P_r>F$) değerinin 0.0001'den küçük olduğu, dolayısıyla R^2 'nin anlamlı olduğu saptanmıştır.

Kırılma sıcaklığına benzer, kırılma dayanımı için de model geliştirilmiştir. Birinci grup TSRST deney sonuçlarına bağlı olarak kurulan kırılma dayanımı modeli aşağıdaki gibidir.

$$KIRDAY = \mu + \alpha_1 BITORAN + \alpha_2 KATKI + \alpha_3 YAS + \alpha_4 HAVA + \alpha_5 BITORAN * KATKI + \alpha_6 BITORAN * YAS + \alpha_7 KATKI * YAS \quad (2)$$

Modelde;

KIRDAY: Kırılma dayanımı olup diğer parametreler denklem 1'deki gibidir.

Birinci grup TSRST deney sonuçları yardımıyla kurulan kırılma dayanımı modelinden elde edilen bilgiler Tablo 9'da verilmiştir.

Tablo 9. Birinci grup TSRST deney sonuçları yardımıyla kurulan kırılma dayanımı modelinden elde edilen bilgiler

Faktör/Etkileşim	$P_r>F$	Açıklama
BITORAN	0.3552	EZ
KATKI	<0.0001	E
YAS	0.0014	E
HAVA	0.6907	EZ
BITORAN*KATKI	0.4885	EZ
BITORAN*YAS	0.3869	EZ
KATKI*YAS	0.0254	E

Tablo 9'dan görüldüğü gibi,

- Kullanılan katkı türü ve yaşlandırma süresi, karışımın kırılma sıcaklığı üzerinde etkili olduğu gibi, karışımın kırılma dayanımı üzerinde de etkilidir.

- Hava boşluğu oranının kırılma dayanımına etkisinin olmadığı görülmektedir. Hava boşluğu oranı, birinci grup TSRST deneylerinde çok fazla değişmediği için (%2.7 ile %5.0 arasında), ikinci grup TSRST deney sonuçlarına bakmak faydalı olacaktır.

- Katkı türü-yaşlandırma süresi etkileşiminin kırılma dayanımı üzerinde etkili, bitümlü bağlayıcı oranı-katkı türü ve bitümlü bağlayıcı oranı-yaşlandırma süresi etkileşimlerinin kırılma dayanımı üzerinde etkisiz olduğu belirlenmiştir.

Deneysel çalışma ile bulunan kırılma dayanımı ile model yardımıyla bulunan kırılma dayanımı arasında $R^2= 0.71$ şeklinde bir ilişki olduğu saptanmıştır. Kurulan modelin ($P_r>F$) değerinin 0.0001'den küçük olduğu, dolayısıyla R^2 nin anlamlı olduğu tespit edilmiştir.

Birinci grup TSRST deney sonuçlarına Duncan çoklu aralık testinin uygulanması

Duncan çoklu aralık testiyle, her bir bağımsız değişkenin düzeyleri için belirlenen kırılma sıcaklıkları ve kırılma dayanımları Tablo 10'da verilmiştir.

Tablo 10. Birinci grup için Duncan çoklu aralık test sonuçları

Bağımsız değişkenler ve düzeyleri	Kırılma Sıcaklığı, °C	Kırılma Dayanımı, MPa
Bitümlü bağlayıcı oranı, %		
5.0	-23.98a	3.17a
5.6	-24.21a	3.20a
Katkı		
UB	-23.72b	2.81d
INT	-22.85a	3.27b
PBM	-26.39c	3.73a
FOM	-23.58b	3.03c
Yaşlandırma, gün		
0	-25.88c	3.35a
5	-23.94b	3.16b
25	-22.09a	3.01b

Tablo 10'dan aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

- Duncan çoklu aralık testinde, %5.0 ve 5.6 bitümlü bağlayıcı oranlarına ait kırılma sıcaklıkları, sırasıyla -23.98°C ve -24.21°C olarak bulunmuştur. Benzer sonuçlar, Jung (1994) tarafından da elde edilmiştir. Her ikisinin de "a" ile gösterilmesi, kırılma sıcaklıkları arasında önemli bir fark olmadığını ifade etmektedir. Aynı şekilde, %5.0 ve 5.6 bitümlü bağlayıcı oranlarına ait kırılma dayanımları arasındaki farkın 0.03 MPa ve bu farkın önemsiz olduğu saptanmıştır.

- Karışımlarda kullanılan katkı türlerine göre, kırılma sıcaklıklarının değiştiği gözlenmiştir. Selülozik fiberli karışımın kırılma sıcaklığının, (-22.85°C), katkısız bitümlü karışımın kırılma sıcaklığından (-23.72°C) yüksek olduğu görülmüştür. Sentetik fiberli karışımın, kırılma sıcaklığının ise -23.58°C olduğu belirlenmiştir. Fabrikada modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcı ile üretilen karışım, diğerlerine göre, daha düşük sıcaklıkta (-26.39°C) kırılmıştır. Bitümlü karışımlarda katkı kullanımı, karışımın kırılma dayanımını arttırmıştır. Katkısız bitümlü karışımın kırılma dayanımı 2.81 MPa iken, selülozik fiberli karışımınki 3.27 MPa , fabrikada modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcı kullanılan karışımınki 3.73 MPa ve sentetik fiber katkılı karışımınki 3.03 MPa olduğu saptanmıştır. Bu durum, fabrikada modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcı ile üretilen kaplamaların düşük sıcaklık çatlaklarına karşı, diğer karışımlara göre daha dirençli olabileceğini ortaya koymaktadır. Benzer sonuçlar, Zeng (1995), Fortier ve Vinson (1998) tarafından da bulunmuştur.

- Yaşlandırma süresi arttıkça, karışımın kırılma sıcaklığı yükselmekte, kırılma dayanımı azalmaktadır. Uzun dönem yaşlandırma uygulanmayan numunelerin -25.88°C 'de, 5 gün süre ile yaşlandırılan numunelerin -23.94°C 'de ve 25 gün süre ile yaşlandırılan numunelerin -22.09°C 'de kırıldığı saptanmıştır. 5 ve 25 gün süre ile yaşlandırılan numunelerin kırılma dayanımları arasındaki fark önemsiz iken, uzun dönem yaşlandırma uygulanmayan numunelerin kırılma dayanımları ile aralarındaki farkın önemli olduğu belirlenmiştir. Zeng (1995) yaptığı

çalışmada, yaşlanma süresinin kırılma sıcaklığı üzerinde etkili olduğunu vurgulamıştır.

İkinci grup TSRST deney sonuçlarının istatistiksel analizi

İkinci grup TSRST deney sonuçlarının istatistiksel analizi üç basamakta gerçekleştirilmiştir.

Model kurmak için ikinci grup TSRST deney sonuçlarına kovaryans analizi yapılması

İkinci grupta; iki farklı bitümlü bağlayıcı oranı, iki ayrı hava boşluğu oranı, biri katkılı ve diğeri katkısız olmak üzere iki tip bitümlü karışım ve üç farklı yaşlandırma süresi bağımsız değişken olarak göz önüne alınmıştır. Hava boşluğu oranı, düşük (%4) ve yüksek (%8) olarak hedeflenmiş, fakat kesme işlemi nedeniyle kontrol altında tutulamamıştır. Bu nedenle, hava boşluğu oranı sürekli değişken (covariate variable) olarak kabul edilmiştir. Kırılma dayanımı ve kırılma sıcaklığı, analizde bağımlı değişken olarak ele alınmıştır. GLM işlemleri kullanılarak 71 numunenin TSRST sonuçları üzerinde kovaryans analizi uygulanmıştır.

İkinci grup TSRST deney sonuçlarına bağlı olarak model kurulması

İkinci grup TSRST deney sonuçlarına bağlı olarak kurulan kırılma sıcaklığı modeli, denklem 1'e benzer şekildedir.

İkinci grup TSRST deney sonuçları yardımıyla kurulan kırılma sıcaklığı modelinden elde edilen bilgiler Tablo 11'de verilmiştir.

Tablo 11. İkinci grup TSRST deney sonuçları yardımıyla kurulan kırılma sıcaklığı modelinden elde edilen bilgiler

Faktör/Etkileşim	$P_r > F$	Açıklama
BITORAN	0.1149	EZ
KATKI	0.0007	E
YAS	<0.0001	E
HAVA	0.0356	E
BITORAN*KATKI	0.1492	EZ
BITORAN*YAS	0.4978	EZ
KATKI*YAS	0.0098	E

Tablo 11'de görüldüğü gibi, karışımın kırılma sıcaklığı üzerinde, bitümlü bağlayıcı oranının

etkili olmadığı; katkı türü, yaşlandırma süresi ve hava boşluğu oranının etkili olduğu tespit edilmiştir. $P_r > F$ değerlerine göre, yaşlandırma süresi en etkili faktör olurken, katkı türü ve hava boşluğu oranı ikinci derece etkili faktörler olmaktadır. Hava boşluğu oranı arttıkça yaşlandırılmamış veya 5 gün süre ile yaşlandırılmış karışımların kırılma sıcaklığı, $1^\circ\text{C} \sim 2^\circ\text{C}$ arasında düşmektedir. Bu değerler, TSRST deneyinin tekrarlanabilme aralığının içerisinde olduğu için ihmal edilebilir düzeydedir. Benzer sonuçlar Zeng (1995) tarafından da bulunmuş, aynı şekilde hava boşluğu oranının etkisi olmadığı şeklinde yorumlanmıştır. Etkileşimlerden yalnızca, katkı türü-yaşlandırma süresi etkileşiminin kırılma sıcaklığı üzerinde etkiye sahip olduğu saptanmıştır.

DeneySEL çalışma ile bulunan kırılma sıcaklıkları ile model yardımıyla bulunan kırılma sıcaklıkları arasında $R^2=0.72$ 'lik bir ilişki olduğu saptanmıştır. Kurulan modelin ($P_r > F$) değerinin 0.0001'den küçük olduğu dolayısıyla R^2 nin anlamlı olduğu belirlenmiştir.

İkinci grup TSRST deney sonuçlarına bağlı olarak, denklem 2'ye benzer şekilde kırılma dayanımı modeli kurulmuştur. İkinci grup TSRST deney sonuçları yardımıyla kurulan kırılma dayanımı modelinden elde edilen bilgiler Tablo 12'de verilmiştir.

Tablo 12. İkinci grup TSRST deney sonuçları yardımıyla kurulan kırılma dayanımı modelinden elde edilen bilgiler

Faktör/Etkileşim	$P > F$	Açıklama
BITORAN	0.4128	EZ
KATKI	0.4660	EZ
YAS	0.0055	E
HAVA	<0.0001	E
BITORAN*KATKI	0.7913	EZ
BITORAN*YAS	0.5283	EZ
KATKI*YAS	0.8169	EZ

Kırılma dayanımı üzerinde, birinci derece etkili olan faktörün hava boşluğu oranı, ikinci derece etkili olan faktörün de yaşlandırma süresi olduğu saptanmıştır. Hava boşluğu oranındaki artışın, kırılma dayanımında 0.27 MPa ile 1.34 MPa arasında bir azalmaya neden olduğu tespit

edilmiştir. Bitümlü bağlayıcı oranı, katkı türü ve faktörlerin etkileşimlerinin kırılma dayanımı üzerinde etkili olmadığı belirlenmiştir.

Deneyde bulunan kırılma dayanımları ile model yardımıyla bulunan kırılma dayanımları arasında $R^2=0.58$ 'lik ilişki olduğu belirlenmiştir. Kurulan modelin ($P_r > F$) değerinin 0.0001'den küçük olduğu, dolayısıyla R^2 nin anlamlı olduğu tespit edilmiştir.

İkinci grup TSRST deney sonuçlarına

Duncan çoklu aralık testinin uygulanması

İkinci grup TSRST sonuçlarının istatistiksel analizinde de, birinci grupta olduğu gibi Duncan çoklu aralık testi uygulanmıştır. İkinci grup için yapılan Duncan çoklu aralık testi sonucu Tablo 13'te görülmektedir.

Tablo 13'ten elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekilde yorumlanabilir.

- Farklı bitümlü bağlayıcı oranları için, karışımların kırılma sıcaklıkları arasındaki ve kırılma dayanımları arasındaki farkın önemsiz olduğu saptanmıştır. %5.0 bitümlü bağlayıcı oranı ile hazırlanan karışımın kırılma sıcaklığı -23.26°C , %5.6 bitümlü bağlayıcı oranı ile üretilen karışımın kırılma sıcaklığı -23.71°C olarak belirlenmiştir. Kırılma dayanımları arasındaki fark (0.20 MPa) ise oldukça küçüktür.

Tablo 13. İkinci grup için Duncan çoklu aralık test sonuçları

Bağımsız değişkenler ve düzeyleri	Kırılma Sıcaklığı, $^\circ\text{C}$	Kırılma Dayanımı, MPa
Bitümlü bağlayıcı oranı, %		
5.0	-23.26a	2.51a
5.6	-23.71a	2.71a
Katkı		
UB	-24.00b	2.61a
INT	-22.96a	2.62a
Yaşlandırma, gün		
0	-25.53c	2.82a
5	-23.48b	2.59ab
25	-20.95a	2.38b

- Karışımında kullanılan katkı türleri için elde edilen kırılma sıcaklıkları arasındaki farkın önemli, kırılma dayanımları arasındaki farkın ise önemsiz olduğu tespit edilmiştir. Katkisız

bitümlü bağlayıcı ile üretilen karışım -24.00°C'de, selülozik fiberli karışım -22.96°C'de kırılmaktadır. Kırılma dayanımları arasındaki farkın önemsiz çıkması, bu grupta hedeflenen hava boşluğu oranının büyük aralığa sahip olmasından kaynaklanabilir.

• Yaşlandırma süresinin değişimine göre, kırılma sıcaklıkları arasındaki farkın önemli olduğu saptanmıştır. Uzun dönem yaşlandırma uygulanmayan karışım -25.53°C'de, 5 gün süre ile yaşlandırılan karışım -23.48°C'de, 25 gün süre ile yaşlandırılan karışım ise -20.95°C'de kırılmaktadır. Uzun dönem yaşlandırma uygulanmayan ve 5 gün süre ile yaşlandırma uygulanan nünunelerin kırılma dayanımları arasındaki farkın (0.23 MPa) önemli olmadığı saptanmıştır. Aksine, yaşlandırma uygulanmayan ve 25 gün yaşlandırma uygulanan nünunelerin ortalama kırılma dayanımları arasındaki farkın (0.44 MPa) önemli olduğu belirlenmiştir. Yaşlanma süresindeki artış, karışımın kırılma dayanımının azalmasına neden olmaktadır.

Sonuçlar

TSRST deneyinden elde edilen verilerin irdelenmesiyle aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Bitümlü bağlayıcı oranının, karışımın kırılma sıcaklığı ve kırılma dayanımı üzerinde etkili olmadığı saptanmıştır.
2. Hava boşluğu oranı, karışımın kırılma sıcaklığı üzerinde; küçük değişimlere sahip olduğunda (%2.7'den %5.0'e) etkisiz, büyük değişimlere sahip olduğunda (%3.35'ten %9.33'e) ise etkili bulunmuştur. Hava boşluğu oranı arttıkça, yaşlandırılmamış veya 5 gün süre ile yaşlandırılmış karışımların kırılma sıcaklığı 1°C ~ 2°C düşmüştür. Bu değerler, TSRST deneyinin tekrarlanabilirliğinin içerisinde olduğu için ihmal edilebilir düzeydedir. Hava boşluğu oranındaki büyük değişimin, kırılma dayanımında, katkı türü ve yaşlandırma süresine bağlı olarak azalmaya neden olduğu saptanmıştır.
3. Karışımlarda kullanılan katkı türlerine göre, kırılma sıcaklıklarının değiştiği gözlenmiştir. Fabrikada modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcı ile üretilen karışım, diğerlerine göre,

daha düşük sıcaklıkta kırılmıştır. Bitümlü karışımlarda katkı kullanımı, karışımın kırılma dayanımını arttırmıştır. Fabrikada modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcı ile üretilen kaplamaların düşük sıcaklık çatlaklarına karşı, diğer karışımlara göre daha dirençli olabileceği ortaya çıkmıştır.

4. Yaşlandırma süresi arttıkça; kırılma sıcaklığının yükseldiği, karışımın kırılma dayanımının azaldığı belirlenmiştir.
5. Yapılan kovaryans analizi sonucunda kurulan kırılma sıcaklığı ve kırılma dayanımı modellerinin tümünde R²'lerin anlamlı olduğu tespit edilmiştir. Deneyde bulunan kırılma sıcaklığı ile model yardımıyla bulunan kırılma sıcaklığı arasında birinci grupta R²= 0.90, ikinci grupta R²= 0.72'lik bir uygunluk saptanmıştır. Deneyde bulunan kırılma dayanımı ile model yardımıyla bulunan kırılma dayanımı arasında ise birinci grupta R²= 0.71, ikinci grupta R²= 0.58'lik bir uygunluk belirlenmiştir. Bulunan modeller yardımıyla, kaplamanın kırılma sıcaklığı ve kırılma dayanımı değerleri yaklaşık olarak tahmin edebilecektir.

Kaynaklar

- Arand, W., (1987). Influence of bitumen hardness on the fatigue behavior of asphalt pavements of different thickness due to bearing capacity of subbase, traffic loading, and temperature, *Proceedings, Sixth International Conference on Structural Behavior of Asphalt Pavements*, University of Michigan, 65-71.
- Bell, C. A., Wieder, A. ve Fellin, M. J., (1994). Laboratory aging of asphalt-aggregate mixtures: field validation, Strategic Highway Research Program, Report SHRP-A-390, National Research Council, Washington DC, 204 sh.
- Fabb T. R. J., (1974). The influence of mix composition, binder properties and cooling rate on asphalt cracking at low temperature, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **43**, 285-331.
- Fortier, R. ve Vinson, T.S., (1998). Low temperature cracking and aging performance of modified asphalt concrete specimens, *Transportation Research Record*, **1630**, 77-86.

- Harvey, J., (1990). Asphalt concrete specimen preparation protocol, TM-UCB-A-003A-90-4, Version 2, University of California, Berkeley, California, 13.
- IDOT, (1997). Control of asphaltic concrete mixtures, Matls I.M. 511, 12.
- Jung, D. ve Vinson T. S., (1993a). TSRST-An accelerated laboratory test to evaluate low temperature cracking resistance of asphalt-aggregate mixtures, *Transportation Research Record*, **1417**, 12-20.
- Jung, D. ve Vinson T. S., (1993b). Low temperature cracking-binder validation, Strategic Highway Research Program, SHRP-A-399, 106.
- Jung, D., (1994). Selection and performance evaluation of test method to assess thermal cracking resistance of asphalt-aggregate mixtures, *PhD Thesis*, Oregon State University, Corvallis, Oregon.
- Monishmith, C. L., Secor, G. A., ve Secor, K. E., (1965). Temperature induced stresses and deformations in asphalt concrete, *Association of Asphalt Paving Technologists*, **34**, 248-285.
- SAS Institute Inc., (1998). SAS/STAT user's guide, Release 7.0 ed., Cary, NC, USA.
- Zeng, H., (1995). On The low temperature cracking of asphalt pavements, TRITA-IP FR 95-07, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.