



Asfalt Beton Malzemelerin Karma Mod (I-II) Kırılma Özelliklerinin Araştırılması

Investigation of Mixed Mode (I-II) Fracture Properties of Asphalt Concrete Materials

Nazife ERARSLAN^{1,*} ¹ İnşaat Mühendisliği, İzmir Demokrasi Üniversitesi, İzmir, Türkiye, **Orcid:** 0000-0002-5202-9644

Araştırma Makalesi

Gönderilme Tarihi : 06/10/2022

Kabul Tarihi : 08/06/2023

Anahtar Kelimeler

Asfalt Beton (AC)
AC ve Karma Mod I-II Kırılma
AC ve Mod I Kırılma
Asfalt Beton ve Kohezif Çatlak

Research Paper

Received Date : 06/10/2022

Accepted Date : 08/06/2023

Keywords

Asphalt Concrete (AC)
AC and Mixed Mode I-II Fracturing
AC and Mod I Fracturing
AC and Cohesive Crack

Özet

Bu çalışmada, asfalt beton (AC) numunelerinde çatlak oluşumunu ve yayılmasını araştırmak için Yarı Dairesel Disk Eğilme (SCB) numuneleri ile deneysel, analitik ve sayısal analiz araştırmaları yapılmıştır. Bu çalışmanın amacı, AC malzemelerin karma mod I-II (çekme ve kesme) kırılmasını analiz etmek için ASTM D8044 standardının sadece mod I için değil karma modu test etmede uygulanabilirliğini araştırmaktır. Gerilme dağılımı ve çatlak ilerleme sayısal analizleri, kırılma mekaniği programı FRANC2D kullanılarak yapıldı. AC numunelerinin mod I (çekme) kırılma tokluğu (KIC) değerinin 0.45 MPa√m olduğu bulunmuştur. Öte yandan, $\beta=30^\circ$ için mod II kırılma tokluğu (KIIC) değeri 0.17 MPa√m ve $\beta=45^\circ$ için mod II değeri ise 0,19 MPa√m olarak bulunmuştur. Sayısal analizlerle Kritik Çatlak Eşiği (CCT) çatlak uzunluğu 2-3 mm olarak bulunmuştur. Bu sonuç, hem deneysel bulgular hem de CCT analitik analiz sonuçları ile uyumludur. FRANC2D analizlerinde kohezif çatlak yüzeyleri arasında en belirgin kayma 30° eğimli çatlak ile gözlenmiştir. AC numunelerinde 'kanat çatlak' büyümesi literatürde ilk kez hem deneysel hem de sayısal analizlerle bu çalışma ile elde edilmiştir. Elde edilen deneysel, analitik ve sayısal sonuçlara göre, bu çalışmanın sadece mod I için önerilen ASTM D8044 test standardının AC malzemelerin karma mod I-II kırılma tokluğunun belirlenmesi için yeni bir uluslararası standart çalışmalarına yol göstereceğine inanılmaktadır.

Abstract

Experimental, analytical, and numerical analysis studies were carried out with the semicircular disc bending (SCB) specimens to investigate crack formation and propagation in Asphalt Concrete (AC) materials in this study. The main objective of this study is to investigate the feasibility of the ASTM D8044 for analyzing the mixed mode I-II fracturing of AC materials. The numerical analysis of crack growth were performed using the fracture mechanics program FRANC2D. Mode I fracture toughness (KIC) values were found to be 0.45 MPa√m for the tested AC samples. The KIIC value for $\beta=30^\circ$ was found to be 0.18 MPa√m and the mode II value for $\beta=45^\circ$ was found to be 0.19 MPa√m. The Critical Crack Threshold (CCT) length was found to be 2-3 mm. The most significant slip between the cohesive crack surfaces was obtained with the 30° inclined crack. The 'wing crack' growth in AC samples has been obtained for the first time in the literature. It is believed according to the experimental and numerical results obtained that this study may lead to the studies of a new international standard for the determination of the mixed mode I-II fracturing of AC materials by using ASTM D8044 test standard recommended for mode I.

1. Giriş

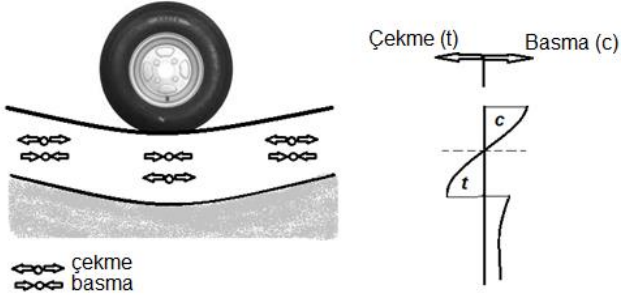
Yol kaplamaları, trafik yükünden kaynaklanan gerilmeleri alt temel malzemesini deforme etmeyecek bir ölçekte alt katmanlara dağıtan kompozit bir malzemedir. Aynı zamanda, yol alt tabakalarından gelen deformasyon ve çatlakları yüzeye yansıtan da bir tabakadır. Tekerlek yükü altında meydana gelen eksenel gerilmeler, yüzeye yakın alanlarda basma gerilmesine neden olur (Şekil 1).

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author): nazife.dogan@idu.edu.tr

Tekerleğin hemen altındaki bölgede düşey yönde oluşan gerilmeler çapsal sıkıştırma gerilmeleridir ve bu gerilmeler yatay yönde indirekt dolaylı çekme gerilmelerinin oluşmasına neden olurlar (Şekil 1). Yüzey kaplamasında oluşan basınç gerilmeleri tekerlek izi şeklinde deformasyonlara neden olurken, kaplama altında oluşan dolaylı çekme gerilmeleri ise çekme ve yorulma çatlaklarına ve deformasyona neden olur. Bu noktada, kırılma mekaniği ilkeleri, asfalt kaplama ve asfalt bitümlü temel (ABT) araştırmalarında oldukça faydalı olacağı aşikardır. Özellikle, kırılma mekaniğinde yer alan

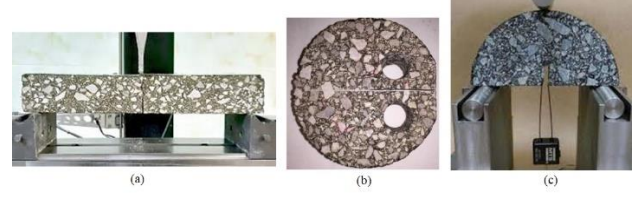


mod I (çekme) ve karma mod I-II (çekme-kesme) çatlakları/yenilmeleri, bu tür hem basma hem de endirekt çekme ve makaslama gerilemelerinin olduğu asfalt kaplama ve asfalt beton araştırmalarında oldukça fayda sağladığı literatürde pek çok araştırmada belirtilmiştir [1-5].



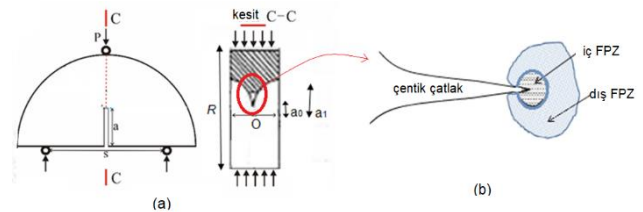
Şekil 1. Teker yükü altında esnek yol kaplamalarda gerilme dağılımı

AC farklı fazları olan bir kompozit malzeme olup çoğunlukla bir kaplamanın temel tabakası olarak kullanılan büyük boyutlu agregaların kullanıldığı bir malzemedir. Çeşitli bağlayıcı veya bitüm türleri ve farklı boyutlardaki agregaların karıştırılmasıyla farklı hava boşluğu oranlarında oluşturulabilen bu partiküllü kompozitler, sıcak bölgelerde farklı deformasyonlar gösterirler, örneğin duktıl deformasyonlar, fakat soğuk iklimlerde kırılğan malzeme deformasyonları gösterirler [5-11]. AC gibi kompozitler heterojen malzemelerdir ve asfalt karışımlarının üretimi sırasında özellikle agregalar ve bitüm bağlayıcı arasında birçok yapısal mikro çatlak oluşur. Bu mikro çatlaklar özellikle mekanik yükleme ve sıcaklık değişimlerinden dolayı büyümeye ve yayılmaya başlarlar. Bu nedenle, asfalt kompozitlerin mekanik özelliklerini anlamak için kırılma mekaniği uygulamalarının kullanılması oldukça fayda sağlamaktadır. AC malzeme araştırmacıları son yıllarda kırılma mekaniği testlerini kullanmaya başlamış ve dahası bu alanda yeni uluslararası standart testler sunulmuştur [12-13]. AC araştırmalarında kullanılan test yöntemleri arasında özellikle çentik çatlaklı kiriş (SEB) testi, direkt çekme disk (DCT) testi ve yarım daire disk (SCB) testleri tercih edilmektedir [8, 14] (Şekil 2). Literatürdeki son araştırmalarda, kırılma mekaniği prensipleri özellikle yorulma ve viskoz deformasyon araştırmalarında, örn. AC'deki deformasyonları daha ayrıntılı olarak tanımlamak için kohezif çatlak modelleri, kullanıldığı görülmektedir. [4, 15-17].



Şekil 2. AC malzemelerde kırılma testleri(a) SEB test (b) DCT test and (c) SCB test

AC kompozitlerde kırılma kaynaklı deformasyonu tanımlamak ve AC'nin mekanik performansını artırmak için yapılan testlerin çoğunda, yeni oluşacak çatlakın başlama yerini kontrol edebilmek için numuneye bir çentik yerleştirilir [2, 6, 18]. Kırılma mekaniği prensiplerinden Gerilme Yoğunluk Faktörü (SIF) yaklaşımının, çatlak önündeki plastik bölgenin büyüklüğünün ilk çatlak uzunluğuna kıyasla küçük olması durumunda, sıcak karışımı asfalt (HMA) gibi viskoelastik malzemeler için oldukça uygun olduğu kabul edilir [1, 18]. Son yıllarda asfalt kompozitlerin mod I kırılma tokluğunu belirlemek için çentik çatlaklı içeren SCB geometrisini uluslararası standart testler önerildi [12-13, 17-20]. Ayrıca SCB numune geometrisi ile, çentik çatlaklı ucunda oluşan elastoplastik deformasyonların incelenmesi için çatlak gelişme alanı olan FPZ'nin (Fracture Process Zone: FPZ) incelenmesi de mümkün olmaktadır (Şekil 3). FPZ genel olarak iki bölgede incelenir: 1) İç bölge: ilk gerilme kaynaklı çatlak gelişimi; ve 2) Dış bölge: kararsız/duraysız çatlak gelişimi. İç bölgede, çentik çatlak ucunda indüklenen gerilmeler, çatlak yayılımındaki gerilme artışlarından daha hızlı artar ve bu alanda ezik bölge oluşur. Bu bölgede ayrıca gerinin sertleşmesine yol açan pek çok mikro ve nano ölçekli çatlak oluştuğunu belirtmek önemlidir. Bu bölge, gerilme konsantrasyonu olan SIF değerinin kritik bir değere yani kırılma tıkızlığı değerine (K_{IC}) ulaşana kadar büyümeye devam eder. Dış bölgede ise, numune içindeki indüklenen gerilme, kararsız çatlakların gelişmesi ve daha büyük deplasmanların oluşması nedeniyle daha azalmaya başlar [21-22].



Şekil 3. SCB numune geometri parametreleri ve çentik çatlaklı önünde FPZ bölgeleri

Çatlak ucunun etrafında herhangi bir noktadaki gerilim durumu şu şekilde hesaplanır:

$$\frac{K_I}{\sigma_o \sqrt{\pi c}} = Y_I \quad (1)$$

Burada, maksimum asal gerilme (çekme) yönünde ilerleyen çentik çatlak çevresindeki gerilim koşulu, K_I ($N/mm^{3/2}$); kırılma yükü P , çentik çatlak uzunluğu, c ve numune boyutları ile orantılı olarak tanımlanır. σ_o , $F/2rt$ formülü ile bulunur. F , kırılma meydana geldiği andaki maksimum yüküdür (MN). Numunenin boyutları, t , r ve c , sırasıyla metre cinsinden kritik çatlak boyutunun kalınlığı, yarıçapı ve uzunluğudur. Y_I , boyutsuz mod I SIF değeridir. Böylece, K_I 'in kritik değere ulaşması ile, malzemelerin kırılma tokluğu, K_{IC} , parametresi elde edilir.

2. Deneysel Materyal ve Metotlar

2.1. Deneysel Materyaller

AC karışım dizaynında, Aydın Köşk Başçayır Taşocağından üretilen (19–38) mm, (13-19) mm., (5-13) mm ve (0–5) mm tane boyu agregalar ve 50/70 penetrasyonlu bitüm kullanılmıştır. Karışım gradasyonunun hazırlanmasında, elek analizi sonuçlarının ortalamaları esas alınmıştır (Tablo 1). Dizayn gradasyonuna uygun olarak hazırlanan agregalara şartnamelere uygun standard deneyler yapılmıştır (Tablo 2). Kullanılan bitüme ait deneylerin sonuçları ise Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 1. Agregaların kullanım oranları ile dizayn gradasyonu

Kullanım oranları	27	15	23	35	100
Elek açıklığı, mm	(19-38)	(13-18)	(5-12)	(0-5) mm	Karş.
mm	% geçen	% geçen	% geçen	% geçen	Grad.
37,5	100				100
25	61,4				89,6
19,1	25,7	100			79,9
12,7	1,9	30,8	100		63,1
9,52	1,7	2,3	88,5		56,2
4,76	1,6	2,0	16,0	100	39,4
2,00	1,5	1,8	1,9	66,6	24,4
0,42	1,4	1,7	1,7	29,7	11,4
0,177	1,3	1,6	1,6	17,6	7,1
0,075	1,2	1,5	1,5	10,8	4,7

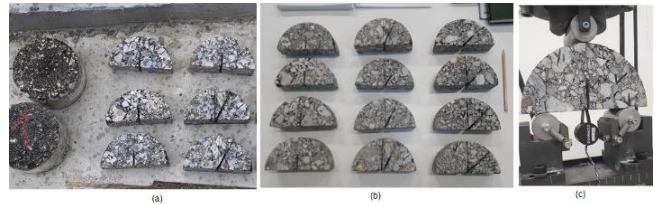
Tablo 2. Agregalara ait bazı standart deneyler

	Kaba Agregası	İnce Agregası	Filler	Deney Standardı
Hacim Özgül Ağırlığı	2,783	2,758		TS EN 1097-6
Zahiri Özgül Ağırlığı	2,816	2,821	2,764	
Absorpsiyonu %	0,432	0,813		

Tablo 3. Bitüm deney sonuçları

Bitüm Özgül Ağırlığı	1,029	TS 1087
Bitüm Penetrasyonu, dmm	57	TS EN 1426
Yumuşama Noktası, °C	51,0	TS EN 1427
İmalatta kullanılacak bitümlü bağlayıcı	Rafinerisi tipi	Aliğa Bitüm

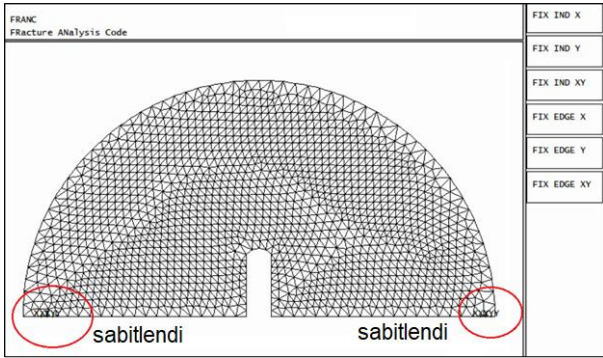
Marshall Metoduna göre 2x75 darbeyle yapılan dizayn sonucunda, Optimum Bitüm kuru agregaya göre ağırlıkça %3,85 (100g. kuru agregası + 3,85 gr. uygun özellikteki bitüm) olarak bulunmuştur. Karışım gradasyonu ve optimum bitüm içeriği belirlendikten sonra, AC karışımları oluşturulmuş ve kırılma tokluğu testleri için ASTM D8044 standardı takip edilerek silindirik numuneler sahadan alınmıştır. Sahadan alınan silindirik karot numunelerden yirmi adet yarım daire SCB numunesi kırılma tokluğu testleri için hazırlanmış olup her çentik açısı deneyi için üçer tekrar testleri yapılmıştır. (Şekil 4). Kırılma tokluğu deneylerinde, $\beta=0^\circ$, $\beta=30^\circ$ ve $\beta=45^\circ$ olan üç farklı çentik çatlak açısına sahip numuneler test edilmiştir. Her deney setinden dört tekrarlı deney olmak üzere on iki SCB numunesi test edildi (Şekil 4-b). Numune kalınlığı B , 50 mm, numune çapı D , 150 mm, çatlak kalınlığı t , 2 mm ve dış çentik çatlak uzunluğu a_1 , 38 mm olarak belirlenmiştir. Deneyler, 18° laboratuvar ortam sıcaklığında yapılmıştır. Çatlak açılma deplasmanı (COD) mesafesi doğrudan ölçülmüştür. A ölçümü için SHIMADZU P701805 model transdüser kullanıldı (Şekil 4-c). Kullanılan transdüser, Amerikan standardı ASTM 399 70T ve ASTM D8044-16'da belirtilen özellikleri karşılamaktadır.



Şekil 4. Hazırlanan SCB numuneleri ve COD transdüseri

2.2. Sayısal Analizler

Çalışmada sayısal analizler, kırılma mekaniği prensiplerine göre geliştirilen FRANC2D (Fracture Analyses Code) programı kullanılmıştır. FRANC2D ayrık çatlak yayılımı analizi yapabilen iki boyutlu lineer ve plastik analiz programıdır. FRANC2D ile yapılan gerilme ve çatlak analizlerinde, kırılma mekaniğinde var olan üç çatlak yayılım teorisinden Maximum Teğetsel Gerilme Konsantrasyon Teorisi kullanılır [23]. Sayısal modellemede FRANC2D ile analizlere başlamadan önce modellenecek numune geometrisi CASCA adı verilen ağ üreticisi (mesh generator) ile ağ modellemesi yapılmıştır (Şekil 5). Hem gerilme dağılımı analizleri hem de çatlaklanma analizleri yapılarak, programın sonuçları elde edilen deneysel sonuçlarla Bölüm 3'te karşılaştırılarak doğrulanmıştır. FRANC2D ile analizlere başlamadan önce SCB numunesi ve çentik çatlak açılarının ağ modellemesi CASCA ağ yaratıcısı (mesh generator) programı ile yapılmıştır. Modellenen SCB numune modelinde, üç noktalı eğilme deney düzeneğinde yer alan destek noktaları hem yatay hem düşeyde (x, horizontal direction ve y, vertical direction) sabitlenmiştir.



Şekil 5. SCB numunesinin CASCA ile modellenmesi

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Deneysel Sonuçlar

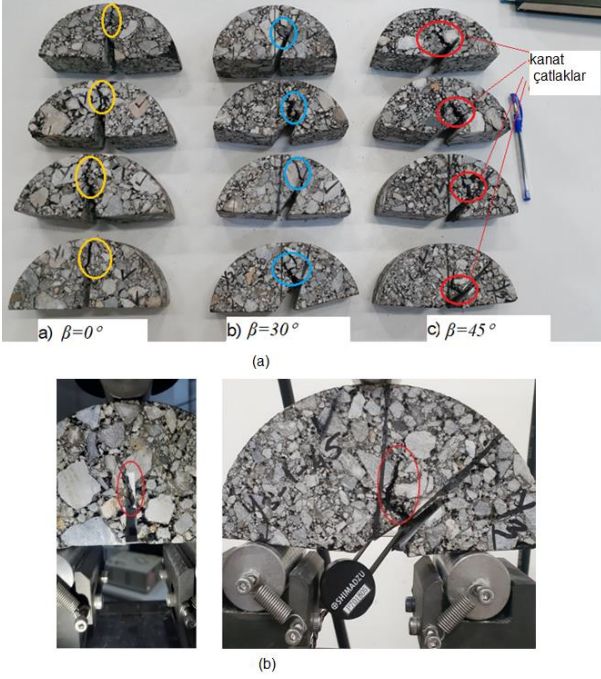
Dolaylı olarak indüklenen çekme yüklemesi ile oluşan çekme-kesme (karma mod I-II) gerilme koşulları, doğrudan çekme yüklemesi ile oluşan karma mod koşullarından oldukça farklıdır. Çapsal basma yükü ile oluşan dolaylı çekme çatlakları, çapsal basınç gerilme eksenine yönünde başlar ve bu yöne bağlı olarak 'kanat' çatlaklarının oluşması yönünde ilerler [1, 3, 24]. Mod I (çekme) ve karma mod I-II yüklemesi koşulları, çatlak eğim açısının (β) indüklenmiş çekme yüklemesi eksenine göre 0° ile 90° arasında açılarla SCB numunesi konumlandırılarak elde edilir. SCB numunesi farklı β açılarıyla yüklendiğinde

mod I-II gerilme bölgesi çatlak eksenine boyunca yer değiştirir ve yeni çatlaklar bu bölgede oluşmaya başlar. Kırılma tokluğu deney sonuçları ve SCB geometri detayları Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. SCB tokluk deney sonuçları

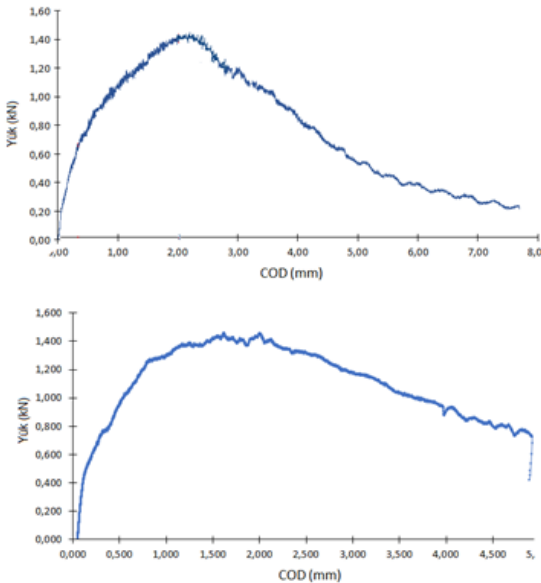
Çatlak eğim açısı, β	D (mm)	B (mm)	a (mm)	(P) (kN)	K_{IC} ($MPa\sqrt{r}$)	K_{IIC} ($MPa\sqrt{r}$)
0°	150	51	36	1.46	0.46	-
0°	150	51.5	37	1.47	0.48	-
0°	150	51	36	1.43	0.43	-
Ort.	150	51	36	1.45	0.45	-
St.Sp.	0.00	0.00	0.58	0.03	0.03	
30°	151	50	36	1.53	0.43	0.16
30°	150	51	37	1.58	0.47	0.19
30°	151	50	37	1.56	0.44	0.17
Ort.	151	50	37	1.56	0.45	0.18
St.Sp.	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	
45°	150	50	37	1.61	0.33	0.17
45°	150	50	36	1.63	0.35	0.19
45°	151	51	37	1.65	0.37	0.20
Ort.	150	51	37	1.63	0.35	0.19
St.Sp.	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01

Test edilen SCB numuneleri Şekil 6'da gösterilmiştir. Test edilen numuneler incelendiğinde, çatlak başlama açısının (θ), β açısına bağlı olduğu gözlenmiştir. Mod I ve karma mod I-II kırılma testlerinin deneysel bulguları, $\beta=0^\circ$ ve $\beta=30^\circ$ açıları arasında eğimli çentik çatlaklarda yeni çatlakların çatlak ucu etrafında başladığını göstermiştir. Çünkü çentik çatlak ucu, çekme gerilmesi konsantrasyonunun en yüksek olduğu bölgedir. Mod I yüklemesinin gerçekleştiği $\beta=0^\circ$ eğim açısına sahip numunelerde ise, yeni oluşan çatlakların dolaylı çekme gerilmesine dik yönde yayılma eğiliminde olduğu gözlenmiştir (Şekil 6). En önemli diğer bulgulardan biri ise, indüklenen gerilme kaynaklı yeni çatlak başlama yerinin, $\beta=45^\circ$ eğimli çentik çatlakın merkezine doğru kaydığı saptanmıştır (Şekil 6). Elde edilen bu sonuç, kırılma mekaniği prensipleri ve 'kanat' çatlak oluşumu konseptiyle oldukça uyumludur. Çünkü, $\beta=30^\circ$ ve $\beta=45^\circ$ eğimli çentik çatlakları ile yapılan deneylerde, çatlak yayılma yönü çatlak ekseninden uzaklaşır ve çapsal basma yüklemesi eksenine doğru ilerlemek için kavisli bir yol boyunca büyür. Bu gerilme kaynaklı oluşan kavisli çatlaklara, kırılma mekaniğinde "kanat çatlakları" denir [25-26]. (Şekil 6). Bu çalışmada yapılan deneylerde gözlemlenen kanat çatlakları prensipi, kırılma mekaniğinde en tipik çatlak yayılma biçimidir. Böylece, kırılma mekaniği ilkelerinin AC örnekleri kullanılarak yapılan araştırmalarda kullanılabilirliği ve doğruluğu bir bakıma bu çalışma ile gösterilmiştir.



Şekil 6. (a) Test edilmiş numunelerden bazıları (b) COD ve deney düzeneği

Yük-COD eğrilerinden bazıları Şekil 7’de verilmiştir. Test edilen tüm numunelerde düktil davranış gösteren benzer yük-COD grafikleri elde edilmiştir. Yük-COD eğrilerinde görüldüğü gibi AC numunelerinde, literatürde görülen tipik elastoplastik deformasyon davranışı tespit edilmiştir. Bu grafiklerde, yenilme öncesi gerilim sertleşmesi/güçlenmesi (strain hardening) ve yenilme sonrası gerilim yumuşaması (strain softening) davranışları görülmektedir. Bunun nedenleri ileriki bölümlerde tartışılmıştır.



Şekil 7. Yük-COD eğrileri

Kırılma mekaniği ilkelerinde, çatlak ucunun önünde depolanan enerji, kırılma için gereken yüzey enerjisini aştığında, yeni çatlak oluşumu ve ardından kararlı çatlak büyümesi meydana gelir [16, 27]. Yenilmeye neden olan bu makro çatlakların başladığı nokta, kırılmaya karşı malzeme direnç değeri olarak tanımlanan kırılma tokluğunu (KIC) ve FPZ çevresinde kararsız çatlak yayılımının başladığını gösterir. Bununla birlikte, bir çatlağın FPZ’de kararsız olarak yayılmaya başladığı çatlak uzunluğunu belirlemek kolay değildir. Bu özellikle AC gibi elastoplastik malzemelerde oldukça zordur. Çapsal basma gerilmesi ile yüklenen SCB numunesindeki 2a uzunluğunda bir chevron çatlak için, boyutsuz gerilme-yoğunluk faktörü (NI) hesaplanabilir bir parametredir [7, 15, 28]. N_I , boyutsuz çatlak uzunluğunun ($\alpha=a/R$) bir fonksiyonudur. ‘Düz çatlak varsayımı kriteri (STCA)’ kullanılarak, çapsal basma altında SCB numunesi içindeki çentik çatlağı için gerilme yoğunluk faktörünü (K_I), Eş.2 ile hesaplanır. Atkinson v.d., [28] tarafından $\alpha=0.1-0.6$ aralığındaki çatlaklar için boyutsuz gerilim yoğunluk faktörünün (YI) sayısal değerlerinin bulunması için Eş. 3 ve Eş. 4’te verilen eşitlikler önerilmiştir:

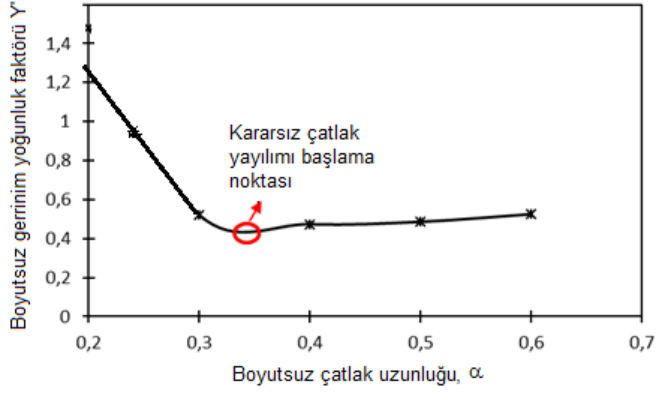
$$K_{Ic} = \frac{P}{(\pi R)^{1/2} B} \alpha^{1/2} N_I(\alpha) \left(\frac{\alpha_1 - \alpha_0}{\alpha - \alpha_0} \right)^{1/2} \quad (2)$$

$$N_I = 0.991 + 0.141\alpha + 0.863\alpha^2 + 0.886\alpha^3 \quad (3)$$

$$Y = \alpha^{1/2} N_{1(\alpha)} \left(\frac{\alpha_1 - \alpha_0}{\alpha - \alpha_0} \right)^{1/2} \quad (4)$$

P, R ve B sırasıyla; kırılma yükü, numune yarıçapı ve numune kalınlığı iken; $\alpha_1=a_1/R$ ve $\alpha_0=a_0/R$. a_0 ve a_1 parametreleri Şekil 3’te gösterilmektedir. Eş.2’nin uygulanabilmesi için kritik çatlak uzunluğu a ’nın, $a_0 < a < a_1$ değerleri arasında olması gerekmektedir. Bu çalışmada, kararsız çatlak yayılımının başlangıç noktası anlamına gelen kritik çatlak uzunluğu a ’nın, a_0 ile a_1 arasında olup olmadığı analitik ve sayısal analizler ile araştırılmıştır. Gerilme yoğunluğu katsayısı (Y) grafiği ve boyutsuz çatlak uzunluğu grafiği Şekil 8’de gösterilmiştir. Kararsız/kritik çatlak yayılımı, boyutsuz gerilim yoğunluğu faktörünün minimum olduğu yerdir ve analitik analizlerde $Y_{min}^* = 0,47$ ’ye eşit olduğunda, AC’nin ilgili kırılma tokluğu değerinin $0,45 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ olduğunu gösterir. Bu noktada, $\alpha=0.34$ olup çatlak uzunluğu ise $\alpha=a/R$ bağıntısıyla 2,5 mm olarak bulunur. Böylece, kararsız çatlak yayılmasının başladığı nokta, a_0 ile a_1 arasında olduğu ve kritik çatlak uzunluğu belirlenmiştir. Bu durum, iç çentik çatlağının önünde gelişen FPZ nedeniyle SCB

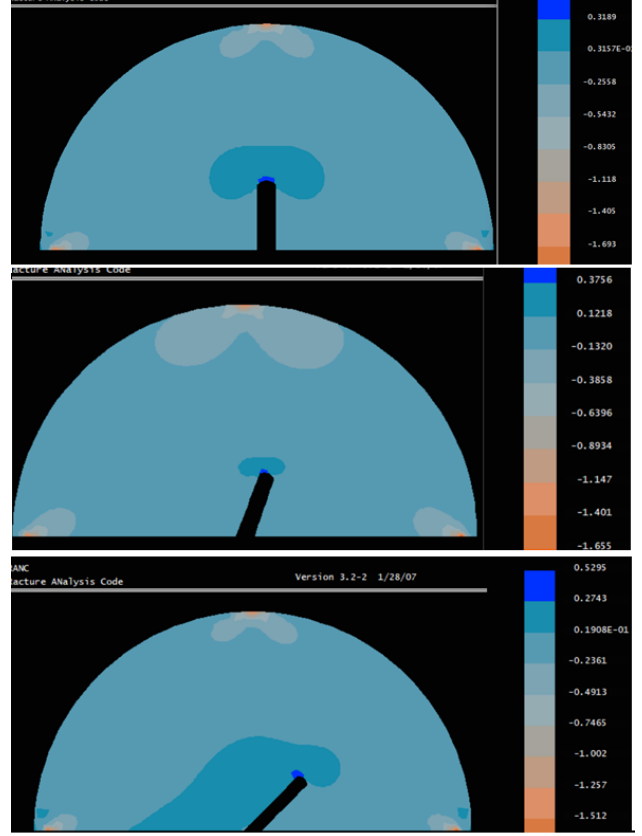
numunesindeki iç çentik çatlağının ucunda kararsız çatlak yayılımının başladığı anlamına gelir.



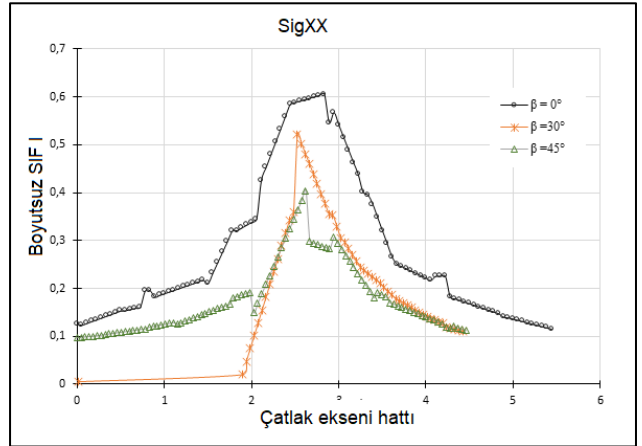
Şekil 8. SCB numunelerinde boyutsuz gerilim yoğunluğu katsayısı ve çatlak uzunluğu ilişkisi

3.2. Sayısal Analiz Sonuçları

İlk sayısal analizler, çatlak analizlerinden önce SCB numunesindeki çentik çatlakları etrafındaki gerilme dağılımının incelenmesi için yapıldı (Şekil 9). Genel olarak, yüksek çekme gerilimi konsantrasyonu bölgesinin, artan β ile çentik çatlağının merkezine doğru yer değiştirdiği bulundu. FRANC2D ileri işlem menüsü seçeneklerinden 'çizgisel sonuç' seçeneği ile grafiksel bir karşılaştırma olanağı yaratılarak elde edilen sonuçlar Şekil 10'da verilmiştir. Hem Şekil 9'daki renkli kontur gösteriminde hem de Şekil 10'daki grafik gösterimde görüldüğü gibi, maksimum çekme gerilimi $\beta = 0^\circ$ simülasyonları ile elde edilmiştir. Modellenen çatlağın mod I durumunda elde edilen maksimum SIF değerine benzer şekilde, maksimum SIF değerine yakın değerler karma mod I-II durumunda da ($\beta = 30^\circ$ ve $\beta = 45^\circ$) elde edildi (Şek.9, Şek.10). Deneysel ve sayısal analiz sonuçlarına göre, $\beta = 30^\circ$ olduğunda hem çekme hem de kesme gerilmelerinin en yüksek değere sahip olup karma modlu kırılmanın elde edildiği sonucuna varılır. Elde edilen bulgularla, mod I için önerilen ASTM standardının AC malzemelerinin mod II kesme ve karma mod I-II mukavemetinin hesaplanmasında da kullanılabilirliği gösterilmiştir.



Şekil 9. SCB numunelerinde gelişen gerilme dağılımlarının FRANC2D sayısal analiz programı ile modellenmesi

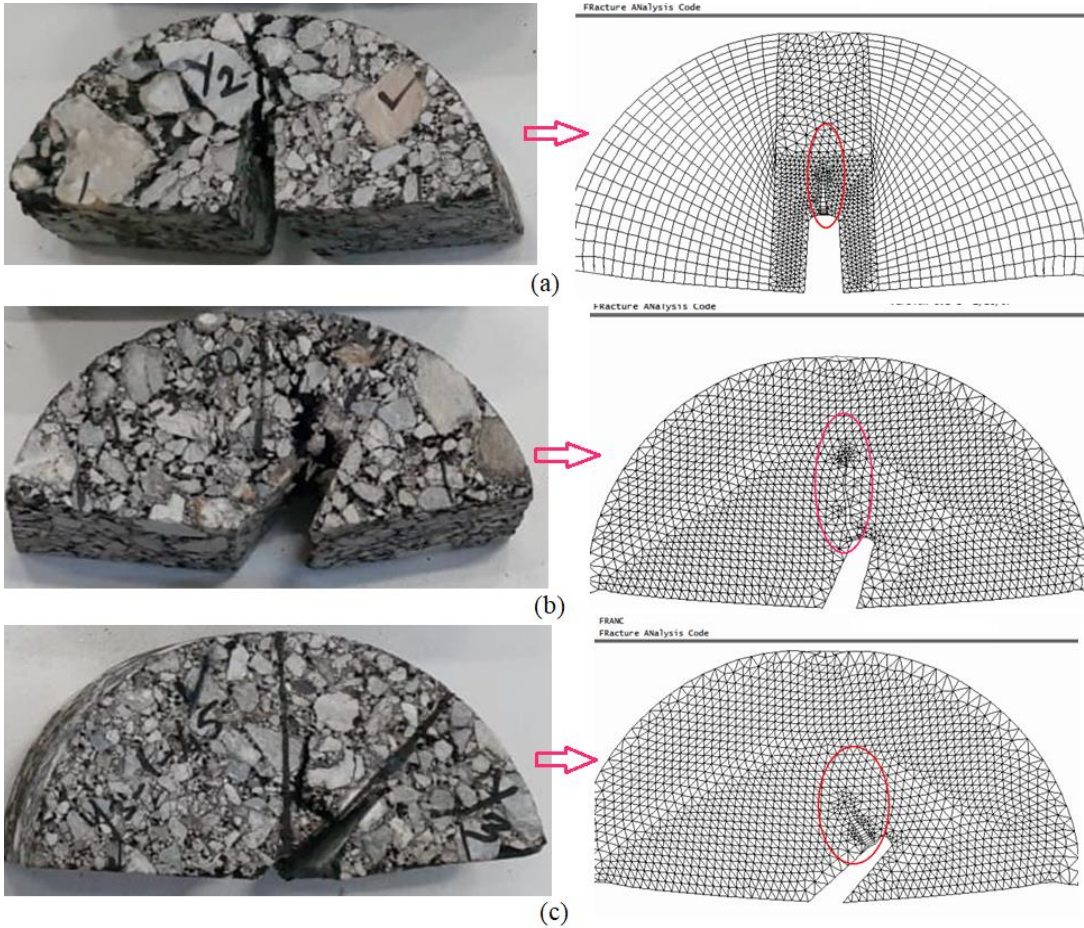


Şekil 10. Çatlak eğim açısı β ve SIF I ilişkisi

FRANC2D ile yapılan gerilme analizlerinden sonra çentik çatlak eğim açlarına bağlı olarak AC numunelerinin kırılma davranışını analiz etmek için çatlak analizleri yapıldı. FRANC2D programını diğer sayısal analiz programlarından ayıran en önemli özellik, her çatlak ilerleme adımında, çatlak ucunu çevreleyen ağ elemanlarının silinmesi ve oluşturulan çatlağı mevcut ağa bağlamak için ağın otomatik olarak yeniden oluşturulmasıdır (Şekil 11). SCB numunelerinde çentik çatlağının ucundaki FPZ'nin etkisi, heterojen ve elastoplastik olan kompozit malzemeler için çok daha

belirgindir. Bu nedenle, Kritik Çatlak Eşiği (CCT) analitik analizlerinde kritik SIF değerlerini bulmak için gerilme analizlerinde lineer elastik kırılma mekaniği (LEFM) modellenmesi kullanılırken, kohezif çatlak analizi için doğrusal olmayan elastik kırılma mekaniği (Non-LEFM:NEFM) modellenmesi yapılmıştır. Bu tip çatlak ilerleme davranışı 'kohezyonlu kırılma modeli' olarak tanımlanır [29-30]. Kırılma mekaniği alanında kohezif çatlak yaklaşımlarından biri olan Genelleştirilmiş Dugdale Modeli (GDM) (kohezif çatlak modeli olarak adlandırılır), sayısal analizlerde kohezif kırılmayı modellemek için kullanılır [29, 31-32]. FRANC2D'de var olan NEFM dinamik gevşeme analitik çözümü, GDM analizlerinde kullanılabilir olma özelliği ile programı kullanışlı ve sonuçların doğruluğunu yüksek düzeyde verir. FRANC2D ile yapılan NEFM sayısal modellemelerinde FPZ bölgesinin etkisini, doğrusal olmayan arayüz elemanlarına

sahip kohezif çatlak analizleri kullanılmıştır. FRANC2D ile yapılan sayısal çatlak modelleme sonuçları Şekil 12'de gösterilmiştir. Daha önceki bölümde deneysel sonuçlarda verildiği gibi, başlangıç çatlak açısı, θ 'nın çatlak eğim açısı β 'ya oldukça bağlı olduğu sayısal analiz sonuçlarıyla da elde edilmiştir. Ayrıca, çatlak ilerleme yönü, yüklenme yönüne paralel bulunmuş ve deneysel bulgular ile sayısal analiz sonuçlarının oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Şekil 11'de verilen deneysel ve sayısal çatlak analizleri karşılaştırıldığında, çekme gerilmesi yoğunlaşma bölgesi ve yeni oluşacak çatlakın artan β açıları ile çatlak merkezine doğru yer değiştirdiği gözlenmiştir. Bu çalışma ile, AC gibi elastoplastik malzemelerle elde edilen kırılma deneylerinin sonuçları ile sayısal çatlak analiz sonuçları arasında literatürde ilk kez bu kadar uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

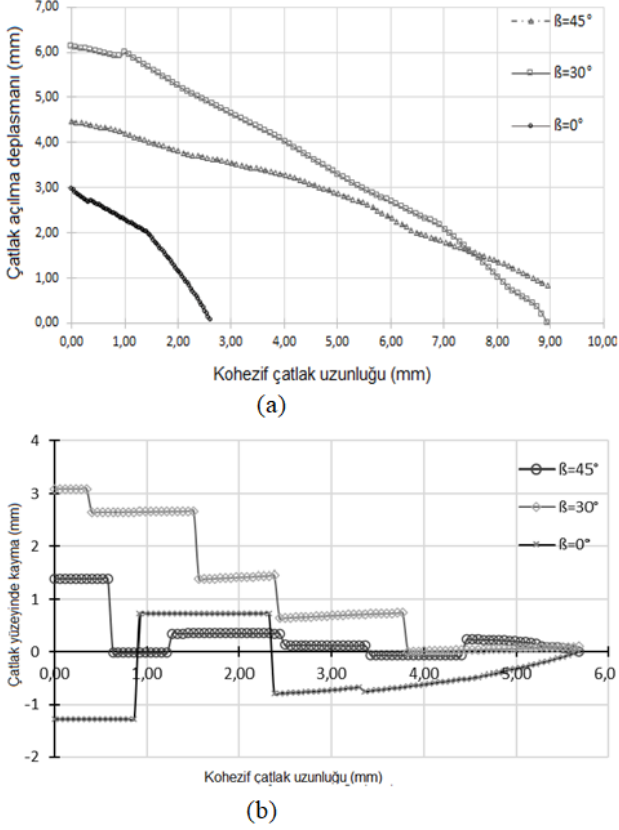


Şekil 11. FRANC2D ile çatlak modellenmesi ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması

Karma mod I-II kohezif çatlak uzunluğu ve çatlak yüzeylerinde kayma miktarı ilişkisi, farklı β değerleri için tespit edilmiş ve grafiksel olarak Şekil 12'de gösterilmiştir. Şekil 12b'de verilen grafiğin adımlı grafik şeklinde olmasının nedeni, her bir çatlak ilerleme adımının sayısal analizlerde otomatik değil ayrı ayrı yapılmasından

kaynaklanmaktadır. Her kohezyonlu çatlak ilerlemesi adımı çatlak yüzleri arasındaki kayma büyüklüğü, FRANC2D programının 'post-process' seçeneği ile elde edilmiştir. Bu grafiğe göre, ilerleyen çatlak yüzeyleri arasında en belirgin kayma 30° eğimli çatlak ile gözlenmiştir. Daha önce gerilme analizlerinde de

gösterildiği gibi, en yüksek kesme gerilmesi yine 30° eğimli çatlak ile elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre bu çalışma, ASTM tarafından sadece mod I için önerilen ASTM8044 test standardı geliştirilerek, AC malzemelerin karışık mod I-II kırılma tokluğunun belirlenmesi için yeni bir uluslararası standart çalışmalarına yol gösterici olabilir.



Şekil 12. (b)Farklı β değerleri ile kohezif çatlak uzunluğu ve çatlak yüzeylerinde kayma miktarı ilişkisi

4. Bulgular ve Tartışma

Asfalt kaplamalarda meydana gelen kusurlar; deformasyonlar, matris-mineral ayrışmaları ve çatlaklar olmak üzere üç grupta özetlenmektedir. Literatürde deformasyonlar ve ayrışmalar ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır [1-3, 10-11, 15]. Bununla birlikte, literatürde asfalt kompozitlerde çatlaklanma ile ilgili sınırlı sayıda çalışma vardır ve genellikle düşük sıcaklıklardaki gevrek asfalt kırılma koşulları içindir [1, 6, 8]. Ancak kırılma mekaniği prensiplerine göre, elastik ve elasto-plastik malzemelerde mikro çatlaklar ve önceden var olan yapısal kusurlar nedeniyle makro kırıklar ve deformasyonlar meydana gelir [26, 33]. Bu çatlaklar gerilme yoğunlaştırıcı gibi etkileri olduğundan ve malzemenin kırılma direnci üzerinde temel bir etkiye sahip olduğundan dolayı makro ölçekli deformasyonlara sebep olurlar. Asfalt kompozitler tük taşıma kapasitesi ve yüzey dayanımları açısından tanımlanan ve sınıflanan üstyapı

malzemelerinin işlevselliği, bu çatlak/kırılma özelliklerine oldukça bağlı olduğu açıktır. Asfalt, agregalar ve asfalt beton karışımları için özgül ağırlık, penetrasyon, yumuşama noktası, gradasyon, özgül ağırlık, birim ağırlık, boşluk yüzdesi ve Los Angeles aşınma testi, su emme, yoğunluk, boşluk yüzdesi gibi birçok rutin testler vardır. Tüm bu testlerin yürütülmesinde ve yorumlanmasında birçok belirsizlik olmasına rağmen, bu testler ve yolların servis ömrü bir mühendisin sahip olabileceği en iyi rehberdir. Bu araştırma, ile özellikle bu testlerin amacı olan durabilite ve dayanıklılık mekanizmalarının temelinde yatan çatlak mekaniği prensiplerini ve bu alanda en önemli konulardan biri olan kırılma tokluğu parametresi ile asfalt araştırmalarındaki kritik çatlak oluşumları ve gerilim sertleşmesi konusu arasındaki ilişkinin araştırılması amaçlanmıştır. Fakat, sadece mod I (çekme) kırılma tokluğunun belirlenmesi için önerilen ASTM ve AASTO standartları dışında, karma mod I-II ve kesme mod II kırılma tokluğu değerlerinin belirlenmesi için şu an var olan bir test yöntemi yoktur. Bu nedenle bu araştırmada ASTM tarafından önerilen ASTM D8044 standart testinin karma mod ve mod II kırılma dayanımı değerlerinin belirlenmesi için kullanılabilirliği hem deneysel hem de analitik ve sayısal analizlerle incelenmiştir.

Kararsız çatlak başlama (SCI) noktası ve kritik çatlak uzunluğu kırılma mekaniği Kritik Çatlak Eşiği (CCT) analitik çözümlenmesine dayalı olarak 2,5 mm olarak bulunduğu daha önceki kısımlarda Şekil 8'de verildi. Analitik analizle elde edilen 2.5 mm kritik çatlak uzunluğu değeri, deneysel olarak elde edilen ve Şekil 7'de verilen yük-COD eğrilerinde yenilmenin gerçekleştiği 2-2.5mm COD değeri ile oldukça uyumlu sonuçlardır. Elde edilen bu kritik çatlak uzunluğu değeri, literatürde 'Alt-kritik' (sub-critical) çatlaklar olarak adlandırılan kararlı çatlakların, 2-2.5mm COD değerine kadar duraylı olarak ilerleyecekleri ve kararsız çatlak ilerlemesini yani yenilmeyi başlatmak için bir araya gelecekleri anlamına gelir. Yük-COD grafiklerinin ve CCT analiz sonuçlarının uyumluluğu, AC araştırmalarında kırılma mekaniği alanının ne kadar gerekli olduğunu açıkça göstermektedir.

İleri kohezif çatlak analizleri ile her bir β açısı için, çatlak açıklığı ve kohezif çatlak uzunluğu arasındaki ilişkiler sırasıyla Şekil 13'te verilmiştir. Sayısal analiz sonuçları ve deneysel veriler arasında iyi bir uyum olduğu görülmektedir. Kohezif çatlak ilerlemesi aynı zamanda oluşan FPZ bölgesinin boyutları hakkında bilgi verir ve en uzun kohezif çatlak uzunluğu 8-9 mm arasında $\beta=30^\circ$ ve 45° eğimli çatlaklarla elde edilmiştir (Şekil 12a). 30° ve 45° eğim açılarıyla modellenen çatlaklar beklendiği gibi karma mod I-II kırılmasına yol açtığı ve bu açılarla yapılan deneylerde malzemenin kırılmasında hem çekme hem de kesme gerilmelerinin etkili olduğu tespit edilmiştir. Buna

karşın, mod I kırılma modu ($\beta=0^\circ$) sonuçlarına göre kohezif çatlak uzunluğu 2-3mm olarak bulunmuş ve bu sonuca göre FPZ bölgesi beklendiği gibi açılma modunda bir kırılmada en küçük boyutta olacaktır (Şekil 12a).

Bu çalışmanın ana amaçlarından biri AC malzemelerin kırılma özelliklerinin belirlenmesi ve AC araştırmaları için kırılma mekaniği ilkelerinden yararlanarak mod I için önerilen ASTM D8044 standardının karma mod I-II testleri için kullanılabilirliğinin araştırılmasıdır. SCB numuneleri üzerinde yapılan statik çapsal basma (indirekt/dolaylı çekme) testleri sonucunda elde edilen deneysel bulgulara göre, çentikli çatlakların 45° çatlak eğim açısına (β) kadar açıldığı tespit edilmiştir. AC numunelerinin mod I kırılma tokluğu (K_{IC}) değeri $0.45 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ bulunmuştur. Bununla birlikte, $\beta=30^\circ$ için mod II kırılma tokluğu (K_{IIC}) değeri $0.18 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ve $\beta=45^\circ$ için mod II değeri ise $0,19 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ olarak bulunmuştur.

Bu araştırmada, gerilme dağılımı ve çatlak yayılma sayısal analizleri kırılma mekaniği programı FRANC2D kullanılarak yapıldı ve bu çalışma ile programın kırılma malzemeler yanında elasto-plastik malzemeler için de oldukça uygun olduğu anlaşılmıştır. Sayısal analizlerde gerilme analizlerinden sonra yapılan çatlak analizleri ile çatlak eğim açısı (β) değerleri ile çatlak yayılma yönünün çapsal yüklemeye yönüne paralel olduğu ve 'kanat çatlak' oluşumlarının hem deneysel hem de sayısal analizlerle tespit edilmesi literatürde ilk kez bu çalışma ile elde edilmiştir. Hem deneysel hem de sayısal analizlerde, yüksek çekme gerilmesi bölgesinin, artan β değerleri ile çentikli çatlakın merkezine doğru kaydığı gözlenmiştir. Böylece simülasyonlarda β arttığında çatlak başlangıç bölgesinin, çentikli çatlakın merkezine daha yakın bir bölgede olacağı anlaşılır. Bu bulgu hem deneysel hem de sayısal analizlerle doğrulanmıştır.

Kırılma mekaniğinde kararsız/kritik çatlak yayılımının başlangıcı, boyutsuz gerilme yoğunluğu faktörünün minimum olduğu yerdir ve bu çalışmada analitik analizlerde $Y_{min}^*=0,47$ 'ye eşit olduğunda, AC'nin mod I kırılma tokluğu değerinin $0,45 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ olduğu gösterilmiştir. $Y_{min}^*=0,47$ 'ye eşit olduğunda ise kritik çatlak uzunluğunun $2,5 \text{ mm}$ olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca analizlerde, kararsız çatlak yayılımının başladığı noktanın, a_0 ile a_1 arasında olduğu da tespit edilmiştir. Bu durum, iç çentik çatlakının önünde gelişen FPZ nedeniyle SCB numunesindeki iç çentik çatlakının ucunda kararsız çatlak yayılımının başladığı anlamına gelir. Elde edilen bu sonuç, LEFM prensiplerine göre kırılma mekaniği hipotezleri ile oldukça uyumludur.

5. Sonuçlar

Bu çalışmanın amacı, AC malzemelerin karma mod I-II (çekme ve kesme) kırılmasını analiz etmek için ASTM D8044 standardının sadece mod I için değil karma modu test etmede uygulanabilirliğini araştırmaktır. Elde edilen deneysel sonuçlara göre AC numunelerinin mod I (çekme) kırılma tokluğu (KIC) değerinin $0.45 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ olduğu bulunmuştur. Öte yandan, $\beta=30^\circ$ için mod II kırılma tokluğu (KIIC) değeri $0.18 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ve $\beta=45^\circ$ için mod II değeri ise $0,19 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ olarak bulunmuştur.

CCT çatlak uzunluğu sayısal analizler ve analitik analizlerle 2-3 mm olarak bulunmuştur. Bu sonuç, hem deneysel bulgular hem de CCT analitik analiz sonuçları ile uyumludur. FRANC2D analizlerinde kohezif çatlak yüzeyleri arasında en belirgin kayma 30° eğimli çatlak ile gözlenmiştir. AC numunelerinde 'kanat çatlak' büyümesi literatürde ilk kez hem deneysel hem de sayısal analizlerle bu çalışma ile elde edilmiştir. Elde edilen deneysel, analitik ve sayısal sonuçlara göre, bu çalışmanın sadece mod I için önerilen ASTM D8044 test standardının AC malzemelerin karma mod I-II kırılma tokluğunun belirlenmesi için yeni bir uluslararası standart çalışmalarına yol göstereceğine inanılmaktadır.

Etik Standartlar Beyanı

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar, bu makalede bildirilen çalışmayı etkilemiş gibi görünebilecek, bilinen rakip mali çıkarları veya kişisel ilişkileri olmadığını beyan ederler.

Teşekkür

Yazar, bu araştırmada numune temininde yardımcı olan ve desteklerini esirgemeyen Karayolları İzmir 2.Bölge Müdürlüğü ve Ar-Ge Başmühendisi Kanat Uğur Aydın Bey'e ve deneyler sırasında yardımcı olan İzmir Demokrasi Üniversitesi Yüksek Lisans öğrencisi Mehmet Kartal'a teşekkürlerini sunar.

Kaynaklar

- [1] Li, X., Marasteanu, M.O., 2004. Evaluation of the Low Temperature Fracture Resistance of Asphalt Mixtures Using the Semi-Circular Bend Test, Journal of Asphalt Pavement Technology, 73, 401-426.

- [2] Kuruppu, M., Obara, Y., Ayatollahi, M.R., Chong, K.P., Funatsu, T., 2014. ISRM-Suggested Method for Determining the Mode I Static Fracture Toughness Using Semi-Circular Bend Specimen. *Rock Mechanics Rock Engineering*, 47, 267–274.
- [3] Ling, M., Luo, X., Chen, Y., Hu, S., Lytton, R., 2019. A calibrated mechanics-based model for top-down cracking of asphalt pavements. *Construction and Building Materials*, 48, 102-112.
- [4] Wang, H., Wang, J., Chen, J.Q., 2014. Micromechanical Analysis of Asphalt Mixture Fracture with Adhesive and Cohesive Failure. *Engineering Fracture Mechanics*, 132, 104–119.
- [5] Zhang, Y., Luo, Z., Luo, R., Lytton, R., (2014). Crack initiation in asphalt mixtures under external compressive loads. *Construction and Building Materials*, 72, 94-103.
- [6] Ling, M., Zhang, Y., Kaseer, F., Martin, A.E., Lytton, R., 2020. Investigation of fracture behavior of asphalt mixture composite using energy-based approach. *Composites Part B: Engineering*, 181, 107324
- [7] Si, Z., Little, D.N., Lytton, R., 2002. Characterization of Microdamage and Healing of Asphalt Concrete Mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14 (6), 461-470
- [8] Marasteanu, M.O., Dai, S., Labuz, J.F., Li, X., 2002. Determining the Low-Temperature Fracture Toughness of Asphalt Mixtures. *Transportation Research Board*, 1789, 191–199
- [9] Aliha, M.R.M., Fazaeli, H., Aghajani, S., Nejad, F.M., 2015 Effect of temperature and air void on mixed mode fracture toughness of modified asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 95, 545–555
- [10] Aliha, M.R.M., Pour, P.J.H., 2020. Fracture resistance study for hot mix asphalt mixture under out of plane sliding mode. *Engineering Fracture Mechanics*, 238, 107230.
- [11] Mirsayar, M.M., Shi, X., Zollinger, D.G., 2017. Evaluation of interfacial bond strength between Portland cement concrete and asphalt concrete layers using bi-material SCB test specimen. *Engineering Solid Mechanics*, 65, 293–306
- [12] AASHTO. Guide for Design of Pavement Structures, 4th ed.; American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, USA, 1993; pp. 1–640.
- [13] ASTM D8044, 2016. Standard Test Method For Evaluation Of Asphalt Mixture Cracking Resistance Using The Semi-Circular Bend Test (SCB) At Intermediate Temperatures.
- [14] Wagoner, M.P., Buttlar, W., Paulino, G.H., 2005. Disk-shaped compact tension test for asphalt concrete fracture. *Experimental Mechanics*, 45(3), 270-277.
- [15] Li, C., Guo, J., (2019). Cracking simulation of asphalt concrete beam specimen using cohesive zone model. *Construction and Building Materials*, 214, 49-60.
- [16] Song, S.H., Wagoner, M.P., Pagulino, W., Buttlar, G., 2008. Crack opening displacement parameter in cohesive zone models: experiments and simulations in asphalt concrete fatigue. *Fracture of Engineering Materials and Structure*, 31 (10), 850-856.
- [17] Yin, A., Yang, X., Zeng, G., Gao, H., 2015. Experimental and numerical investigation of fracture behavior of asphalt mixture under direct shear loading. *Construction and Building Materials*, 86, 21–32.
- [18] Im, S., Ban, H., Kim, Y.R. 2014. Characterization of mode-I and mode-II fracture properties of fine aggregate matrix using a semicircular specimen geometry. *Construction and Building Materials*, 52, 413-421.
- [19] Ayetollahi, M.R. and Pirmohammad, S., 2013. Temperature effects on brittle fracture in cracked asphalt concretes. *Structural Engineering Mechanics*, 45(1),19-32
- [20] NRC, 2004. Guide for mechanistic – empirical design of new and rehabilitated pavement structures. *Transportation Research Board, NCHRP 1-37A Final report*.
- [21] Sulaiman, S.J., Stock, A.F 199). The use of fracture mechanics for the evaluation of asphalt mixes. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 64, 500-531
- [22] Shenoy, A., 2002. Stress relaxation can perturb and prevent physical hardening in a constrained binder at low temperature. *Road Materials and Pavement Design*, 3, 87-94.
- [23] Erdogan, F., Sih, G.C., 1963. On the Crack Extension in Plates under Plane Loading and Transverse Shear, *ASME Journal of Basic Engineering*, 10, 25–37
- [24] Al-Shayea N.N., 2005. Crack propagation trajectories for rocks under mixed mode I–II fracture. *Engineering Geology*, 81(1), 84-97

- [25] Evans, M., Hesp, S.A.M., 2011. Physical hardening effects on stress relaxation in asphalt cements and implications for pavement performance. *Transportation Research Records*, 2207, 34-42.
- [26] Saha, G., Biligiri, K.P., 2015. Fracture damage evaluation of asphalt mixtures using Semi-Circular Bending test based on fracture energy approach. *Engineering Fracture Mechanics*, 142, 154-169.
- [27] Romero, P., Youtcheff, J., Stuart, K., 1999. Low-temperature physical hardening of hot-mix asphalt. *Transportation Research*, 1661, 22-26.
- [28] Atkinson, C., Smelser, R., Sanchez, J., 1982. Combined mode fracture via the cracked Brazilian disk test. *International Journal of Fracture*, 18, 279–291.
- [29] Dugdale D.S., (1960). Yielding of Steel Sheets Containing Slits. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 8, 100–104.
- [30] Barenblatt G.I., 1962. The Mathematical Theory of Equilibrium Cracks in Brittle Fracture. *Advances in Applied Mechanics*, 7, 55–129.
- [31] Hillerborg, A., Modeer, M., and Petersson, P.E., 1976. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements, *Cement and Concrete Research*, 6 ,773-782.
- [32] Petersson, P.E., 1981. Crack growth and development of fracture zones in plain concrete and similar materials, Report TVBM -1006/1-174, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden
- [33] Kim M, Hussein H., 1987. Variation of fracture toughness of asphalt concrete under low temperatures. *Construction and Building Materials*, 11 (7-8), 403-411.