

Bitümlü Sıcak Karışımların Lineer Olmayan Kırılma Analizi

Ragıp İNCE^{1*}, Buğrahan Fatih FURTANA²

^{1,2} İnşaat Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye
¹rince@firat.edu.tr, ²bffurtana@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 24/12/2024;

Kabul/Accepted: 03/02/2025)

Öz: Son yıllarda beton, kaya ve asfalt gibi yarı-gevrek malzemelerin kırılma parametrelerini tayin etmek için, kübik veya silindirik kompakt numunelerin kullanımı artmaktadır. Diğer taraftan, asfalt ve kaya malzemelerinin kırılma mekaniği testlerinde yarım daire eğilme (YDE) numuneleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu testlerde yük-deformasyon ilişkisinin tespitinde genellikle makinenin yükleme çenesinin deformasyonu dikkate alınmaktadır. Bu nedenle sunulan çalışmada, daha gerçekçi deformasyon ölçümü sağlayan bir çerçeve sistemi geliştirilerek bitümlü sıcak karışım numuneleri üzerinde test edilmiştir. Burada geliştirilen bu deney düzeneği sayesinde, bitümlü sıcak karışımlardan imal edilen çentikli YDE numunelerinin normal ve düşük sıcaktaki performansını değerlendirmek için kullanılması hedeflenmiştir. Bu çalışmanın çıktısı, aynı zamanda Ülkemizde son 5 yılda kış aylarında meydana gelen şiddetli depremler neticesinde, deprem bölgelerinde gözlemlenen karayolu hasarlarının kırılma mekaniği prensipleriyle analizini mümkün kılacağından, sadece ulusal değil uluslararası düzeyde güvenilirliği yüksek tasarımların gerçekleştirilmesini sağlayacaktır. Bu çalışmada, oda sıcaklığında test edilen YDE numunelerinde lineer ve lineer olmayan kırılma tokluğu arasında %50 civarında farkın olduğunu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Bitümlü Sıcak Karışım, Kırılma mekaniği, Yarım Daire Eğilme (YDE) Numuneleri.

Non-linear Fracture Analysis of Hot Mix Asphalts

Abstract: The use of cubic or cylindrical compact samples has been increasing in order to determine the fracture parameters of quasi-brittle materials such as concrete, rock and asphalt. On the other hand, semi-circular bending (SCB) samples are widely used in fracture mechanics tests of asphalt and rock materials. However, in these fracture tests, the deformation of the stroke of the test machine is commonly taken into account in measuring the load-deformation relationship. Therefore, a frame system, which provides more permanent deformation, was developed and subsequently tested on bituminous hot mixture samples. The test apparatus developed in the presented work will be used to evaluate the performance of notched SCB samples manufactured from bituminous hot mixtures at normal and low temperatures. The output of this study will also enable the analysis of the road damages observed in earthquake zones as a result of the severe earthquakes which occurred in the winter months in the last 5 years in our country with the principles of fracture mechanics, and will enable the realization of highly reliable designs not only at the national but also at the international level. In this study, it was determined that there was a difference of around 50% between linear and non-linear fracture toughness in YDE specimens tested at room temperature.

Key words: Hot Mix Asphalt, Fracture mechanics, Semi-Circular Bending (SCB) Samples.

1. Giriş

Beton, asfalt ve kaya gibi yarı-gevrek malzemelerden üretilmiş yapı elemanlarının göçmesini tanımlamak için kırılma mekaniği tabanlı lineer olmayan kırılma modelleri geliştirilmiştir. Bununla beraber, tersinir yüklemelere maruz beton, asfalt ve kaya gibi malzemelerden üretilen yapı elemanlarında hasar oluşmadan önce elemanın kritik kesitlerinde çatlaklar gelişebilmekte ve taşıyıcı eleman yumuşama adı verilen dayanım kaybına maruz kalabilmektedir. Çatlamış veya yerel hasarlara uğramış bir taşıyıcı eleman, sadece kırılma mekaniği modelleri veya yaklaşımları kullanılarak çözümlenebilir [1-3].

Yukarıdaki bilgilerin ışığında kırılma mekaniği, taşıyıcı elemanın bünyesinde yer alan gerilme yığılmasını arttıran boşluk ve çatlak gibi kusurları dikkate alarak bu kusurların kritik seviyeye erişebileceği durumları tespit etmeye çalışır. 1920'lerde Griffith [4] tarafından bünyede var olan bir çatlakın gelişmesi için gerekli olan enerjiyi yeni oluşacak yüzey enerjisi ile dengede olması gerektiğini öne sürerek Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (LEKM) temelini atmıştır. 1960'larda Kaplan [5] tarafından, LEKM'nin prensipleri harç (ince daneli) ve beton (iri daneli) karışımlara uygulanmıştır. Bununla beraber, 1970'lerde yapılan birçok laboratuvar çalışması, LEKM teorisinin harç ve beton gibi yarı-gevrek malzemelere uygulanamayacağını ortaya koymuştur. Bu olumsuzlukları dikkate alan

* Sorumlu yazar: rince@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-9837-8284, ² 0009-0007-7171-9089

beton teknolojisi sahasında çalışan uzmanlar ve bilim adamları, lineer olmayan kırılma mekaniği modellerini ileri sürmüşlerdir [1, 6-10].

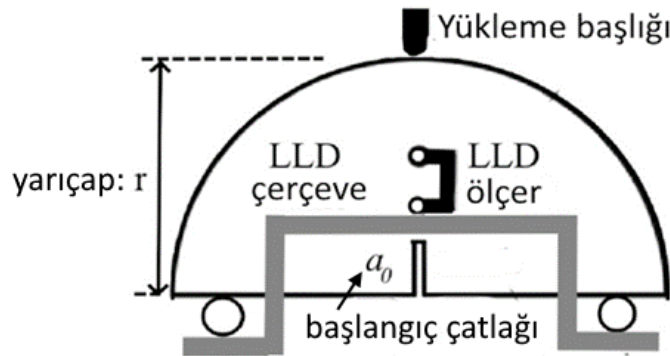
Bu kırılma modelleri, çatlaklı bir taşıyıcı elemanda çatlağın gerisinde artan yüklemelerle birlikte gelişen ve hala gerilme transferini temin eden, kırılma süreci bölgesinin (KSB) adı verilen bölgeyi dikkate almaktadır ve yarı-gevrek malzemeleri simule etmek için en az iki kırılma parametresini kullanırlar. Hem yapı elemanlarının boyutlandırılmasında kullanılan şartnameler ve hem de LEKM tarafından dikkate alınmayan bu yumuşama bölgesi yarı-gevrek malzemelerde KSB uzunluğu 100 mm gibi büyük değerler alabilmektedir [6]. Buna karşın metallere artan yüklemelerle gelişen akma (plastik) bölgesi (KSB) çentigin arkasında çok küçük yer işgal etmektedir.

Yarı-gevrek malzemelerin analizinde kullanılan kırılma teorileri, kohezif çatlak yaklaşımları [6] ve eşdeğer elastik çatlak modelleri [7-10] şeklinde iki ayrı kategoride incelenebilir. Birinci kategorideki modeller, KSB'yi çatlak ucunda azalan ve çatlığa basınç yapan bir gerilme dağılımı ile modellerken, eşdeğer elastik çatlak modelleri başlangıç çatlak uzunluğundan (a_0) daha büyük olan efektif bir çatlak uzunluğu (a_e) kullanarak modellemektedir.

Nallathambi ve Karihaloo [2] tarafından önerilen EÇM'ne göre yarı-gevrek malzemeli bir yapının göçmesi kırılma tokluğu parametresi K_{Ic}^e ve efektif çatlak uzunluğu a_e gibi iki parametre ile tanımlanmaktadır. Bu kırılma modeli, kapalı devre deney ekipmanına ihtiyaç duymaktadır. Bu deney düzeneğinde, mesnet seviyesinde kiriş üzerine yerleştirilen rijit bir çerçeve üzerine bağlanan lineer deplasman ölçer (LVDT) çentik ağzı seviyesindeki çökmeyi ölçmektedir. Bu ölçüm sayesinde yükleme sırasında yerel deformasyona uğramayan iki kısım arasındaki relatif deplasmanı kullanarak kirişin orta noktasındaki çökmeyi belirlemektedir.

Diğer taraftan bitümlü sıcak karışımların kırılma mekaniği testlerinde, yarım daire eğilme (YDE) numuneleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 1'de detaylandırıldığı gibi, bu numunelerin kırılma mekaniği testlerinde rijit bir çerçeve ile numune üzerindeki sabit bir nokta arasında yerleştirilen yükleme hattı deformasyon ölçer (LLD) ile yük-deformasyon ilişkisi tayin edilmektedir [1]. Bu deney düzeneği kompleks ve pahalı olup, Dünyada sadece belirli firmalar tarafından üretilen özel ekipmanlara ihtiyaç duymaktadır.

AASHTO [1]'nin kompleks ve tahribatlı yönteminin zorluğundan dolayı, uygulamada yük altındaki deformasyon ölçümü yapılır. Ancak yükün etkilediği noktadaki yerel deformasyonlardan dolayı yük-deformasyon eğrisi hata içermektedir. Bu çalışmada, Şekil 1a'da ki kirişler için kullanılan deney düzeneği YDE numunelerine adapte edilmesi amaçlanmıştır. Bu şekilde AASHTO [1] tarafından önerilen test tekniğine alternatif daha ucuz ancak güvenilir bir deney düzeneği geliştirilmesi düşünülmektedir.



Şekil 1. AASHTO [1] YDE deney düzeneği.

Beton, asfalt ve kaya malzemelerden oluşan bir taşıyıcı elemanı kırılma mekaniği tabanlı analiz etmek için, ilk olarak elemanda kullanılan malzemenin kırılma karakteristiklerini tespit etmek gerekir. Bu tip yarı-gevrek malzemelerin kırılma karakteristiklerinin tespit etmek için ise metallere olduğu gibi çentikli üç noktalı eğilme numunelerinin kullanımı yaygındır. Bununla birlikte kiriş numunesinin asfalt ve kayalarda kullanılan alternatif kompakt modeli yarım daire eğilme (YDE) numunesidir [1, 3, 11]. Bu tip kompakt numuneler bazı avantajlara sahiptir [12-19]:

- Bu numuneler, küçük olup hesaplarda numune ağırlığı ihmal edilebildiğinden özellikle boyut etkisi laboratuvar çalışmalarında büyük kolaylık sağlar.
- Bu numunelerin kalıpları, malzemenin dayanımının tespitinde kullanılan kalıplarıyla aynı olduğundan dolayı şantiyede şartlarında büyük kolaylık sağlar.

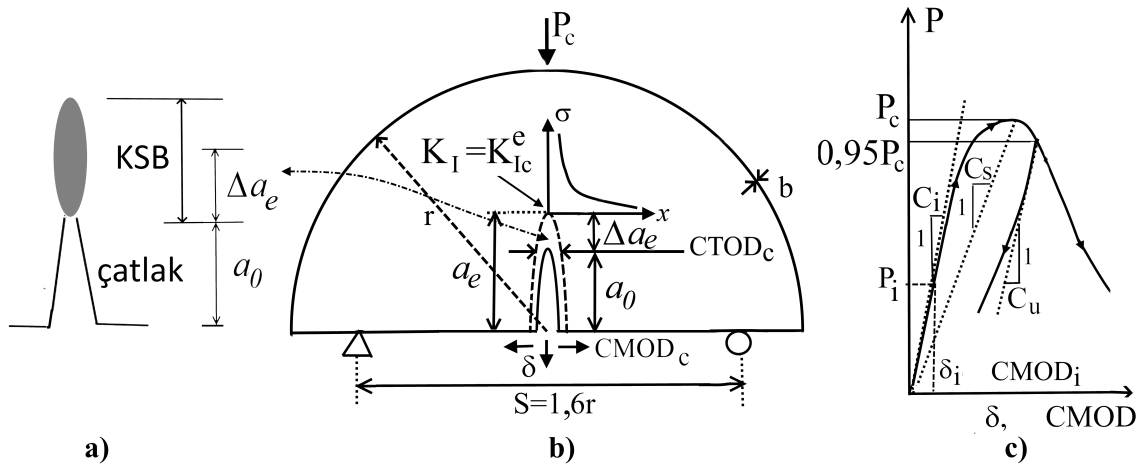
- Eski bir yapıdan alınan karot numuneler ile kompakt numune üretilerek, yapının göçme analizi kırılma mekaniğine göre kolaylıkla yapmak mümkün olabilmektedir.

Şekil 2a'da görüldüğü gibi çatlaklı yarı-gevrek malzemelerde çatlağın arkasında oluşan ve ilerleyen çatlak kesitinde gerilme transferini mümkün kılan, kırılma süreci bölgesinin (KSB) varlığı bu malzemelerin lineer olmayan davranışının temelini oluşturmaktadır. Yarı-gevrek malzemeler için bu bölgeyi karakterize eden birçok lineer olmayan kırılma mekaniği modelleri geliştirilmiştir. Bu modeller parametreleri tayin etmek için çentikli giriş numunelerin kullanımını öngörmekle birlikte, Şekil 2b'de görülen çentikli YDE numunesi, prensip olarak çentikli girişin kompakt modeli olup aşağıda tanımlanan modeller için de bu numuneyi kullanmak mümkündür [3]. Modeller temelde pik yükte çentik arkasında oluşan eşdeğer bir KSB bölgesi uzunluğunu (Δa_e) tayin etmek için LEKM bağıntılarını kullanırlar (Şekil 2b). Sonuç olarak pik yükte a_0 uzunluğundaki başlangıç çatlağı gelişerek efektif çatlak boyuna $a_e = a_0 + \Delta a_e$ erişecektir. Bu efektif çatlak boyuna karşılık gelen kırılma tokluğu değeri ise malzemenin lineer olmayan kırılma tokluğu olarak adlandırılmaktadır.

Lineer olmayan kırılma mekaniği yaklaşımları içerisinde, İki parametrelilik model [7], kırılma tokluğu K_{Ic}^3 ve kritik çatlak ucu açılımı CTODc gibi iki parametre ile betonun kırılmasını tahmin etmektedir. Yaklaşım, bu parametreleri deneysel olarak komplians yaklaşımıyla tayin etmektedir. Burada kırılma parametreleri, kapalı devre deney ekipmanı kullanarak, numunenin Yük-Çatlak Ağzı Açılımı (P-CMOD) ilişkisinden faydalanarak hesaplar. Şekil 2c'de görüldüğü gibi P-CMOD eğrisinde başlangıç ve yük boşaltma komplians değerleri (C_i ve C_u) gerekli LEKM bağıntılarına yerleştirilerek K_{Ic}^3 ve CTODc değerleri hesaplanır.

Nallathambi ve Karihaloo [2] tarafından önerilen EÇM göre beton bir yapının göçmesini kırılma tokluğu parametresi K_{Ic} ve efektif çatlak uzunluğu a_e gibi iki parametre ile tanımlamaktadır. Bu yöntemde parametreler, iki parametrelilik modelden farklı olarak yine kapalı devre deney ekipmanı ile çentikli girişin yük-deplasman (P- δ) ilişkisi tabanlı sekant komplians (C_s) yöntemiyle tayin edilmektedir (Şekil 2c). Bazant ve Kazemi [8], yine test elemanlarının pik yüklerini kullanan Boyut Etkisi Modelini geliştirmiştir. Bu modele göre, sonsuz büyüklükteki bir yapıdaki göçme G_f kırılma enerjisi ve c_f kırılma süreci bölgesi uzunluğu ile tanımlanmaktadır. Yapılan araştırmalar iki parametrelilik kırılma modeli ile boyut etkisi modelinin betonun kırılma parametreleri açısından özdeş sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Çift-K Modeli [9], beton yapılar da kırılmayı modellemek için, başlangıç kırılma tokluğu K_{Ic}^{ini} ve kritik kırılma tokluğu K_{Ic}^{crit} gibi iki parametre kullanılmaktadır. Yöntemin diğer kırılma modellerinden en önemli farkı, diğer kırılma modellerinde sadece çatlağın ani gelişmesini dikkate alan parametreler ile beton yapılar modellenirken, Çift-K yönteminde buna ilave olarak çatlağın yayılmaya başlama kriterini de dikkate almasıdır. Bu model iki parametrelilik modele benzer olarak P-CMOD tabanlı komplians yaklaşımıyla parametreleri hesaplamaktadır. Ancak burada Şekil 2c'de detaylandırıldığı gibi C_u yük boşaltma komplians değeri yerine C_s sekant komplians değeri kullanılmaktadır ve kapalı devre bir sisteme ihtiyaç duymamaktadır. Yapılan araştırmalar iki parametrelilik kırılma modeli ile Çift-K modelinin betonun kırılma parametreleri açısından özdeş sonuçlar verdiğini göstermiştir.



Şekil 2. a) Kırılma süreci bölgesi (KSB) b) Çatlaklı YDE numunesi c) P- δ veya P-CMOD eğrileri.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Bu çalışmada TÜPRAŞ Batman rafinerisinden temin edilen 1,033 yoğunluğa sahip B70/100 sınıfı bitüm kullanılmıştır. 70/100 iklim şartlarından dolayı Türkiye de en çok kullanılan bağlayıcıdır. Çalışmada kullanılan bitümün genel özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Saf bitümün genel özellikleri.

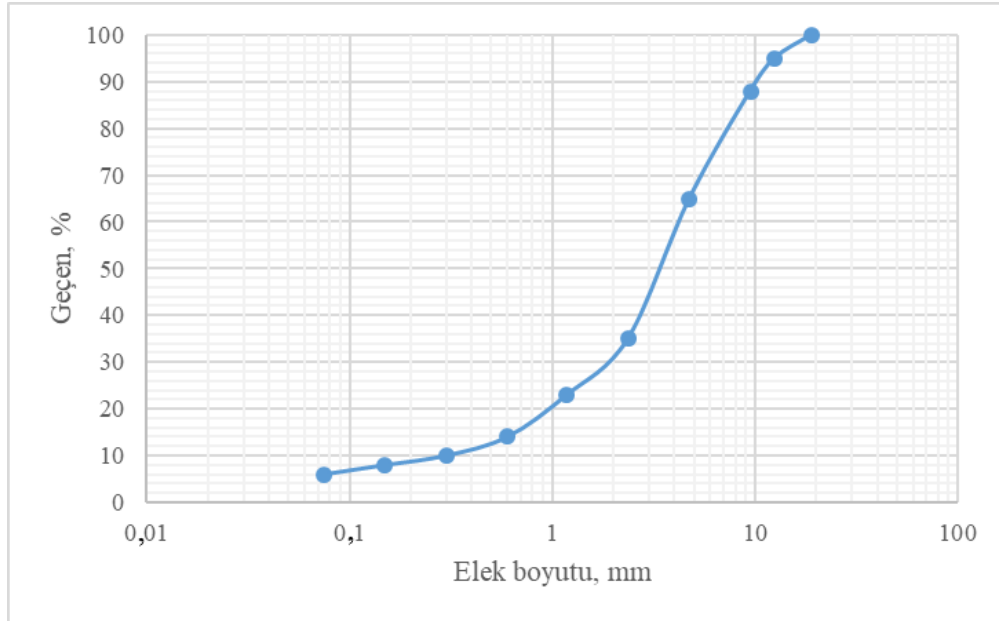
Özellikler	Birim	Standart	Sonuçlar
Penetrasyon	mm ⁻¹	EN 1426	87,4
Yumuşama noktası	°C	EN 1427	52,6
Parlama noktası	°C	EN ISO 2719	230
Viskozite 135°C /165°C	cP	ASTM D4402	562,5/162,5

2.2. Bitümlü Sıcak Karışımların Hazırlanması

Karışım numuneleri Tablo 2’de verilen agrega gradasyonu esas alınarak hazırlanmış ve saf karışımın tasarım bitüm içeriği %4,67 olarak belirlenmiştir. Şekil 3’te agrega gradasyon eğrisi verilmiştir. Hazırlanan karışım 15 cm çapında, yaklaşık 6 cm yüksekliğinde silindirik bitümlü sıcak karışım numuneleri olarak 600±18 kPa statik basınç 1,25±0,02°lik eğim açısına sahip döner bir kompaktör kullanılarak %4 boşluk oranında sıkıştırılmıştır. Daha sonra 15 cm numuneler ortadan ikiye kesilip, çentikler açılarak yarım daire numuneleri hazırlanmıştır. Numunelerin orta noktasından yaklaşık 6 mm derinliğinde çentik açılmıştır. Tablo 3’te çalışmada kullanılan agregaların fiziksel özellikleri detaylandırılmıştır.

Tablo 2. Bitümlü sıcak karışımlarda kullanılan agrega gradasyonu.

Elek Boyutu (mm)	19	12,5	9,5	4,75	2,36	1,18	0,6	0,3	0,15	0,075
Geçen (%)	100	95	88	65	35	23	14	10	8	6



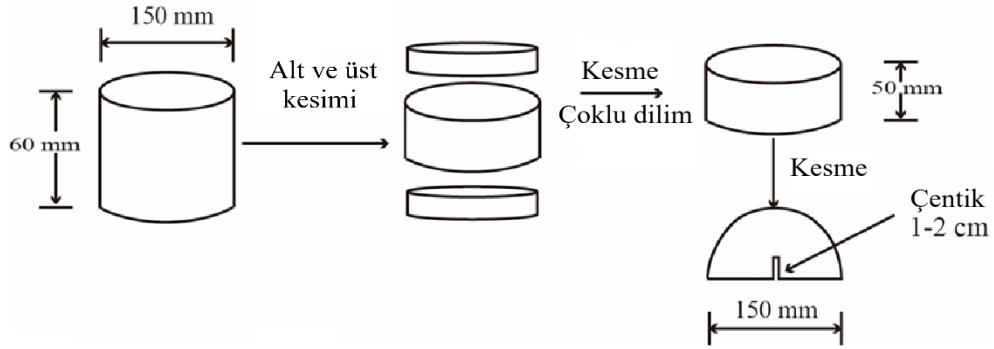
Şekil 3. Karışımda kullanılan agrega yığınının gradasyon eğrisi.

Tablo 3. Agregaların fiziksel özellikleri.

Özellikler	Standart	Şartname Sınırı	İri	İnce	Filler
Los Angeles (%)	ASTM D131	Maks. 30	29,2	-	-
Mikro-Deval (%)	ASTM D6928	Maks. 15	17,4	-	-
Don etkisi	ASTM C88	Maks. 18	16,7	-	-
Metilen mavisi (g/cm ³)	ASTM C837	Maks. 1.5	0,5	-	-
Özgür ağırlık (g/cm ³)	ASTM C127		2,626	-	-
Özgür ağırlık (g/cm ³)	ASTM C128		-	2,661	-
Özgür ağırlık (g/cm ³)	ASTM D8		-	-	2,689

2.3. Yarım Daire Eğilme (YDE) Numunelerinin Hazırlanması

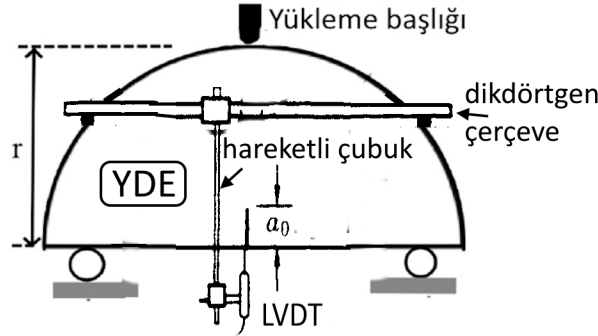
YDE test numunelerini hazırlama prosedürleri Şekil 4'te gösterilmektedir. Şekil 5'te ise bu çalışmada kullanılan numunelere çentik aşma işlemi görülmektedir. 60 mm yüksekliğinde ve 150 mm çapında uzun silindirik asfalt numuneleri yağurmalı pres ile sıkıştırılmıştır. Uzun numunelerin üst ve alt yüzeylerinin, yüzeylerde bulunan üniform olmayan hava boşluğu olasılığını ortadan kaldırmak için her iki uçtan 5 mm kesilerek, 50×150 mm boyutlarında numuneler elde edilmiştir. Daha sonra numuneler iki yarıya bölündü ve YDE test numuneleri oluşturmak için ortalarına çentikler açılmıştır. Numune kalınlığı ve karışım tasarımından bağımsız olarak 150 mm'lik numuneler için 6 mm'lik çentik uzunluğu seçilmiştir. Çentik kalınlığı yaklaşık 2 mm'dir.

**Şekil 4.** YDE numunelerinin hazırlanma şeması.**Şekil 5.** YDE numunelerinin hazırlanışı.

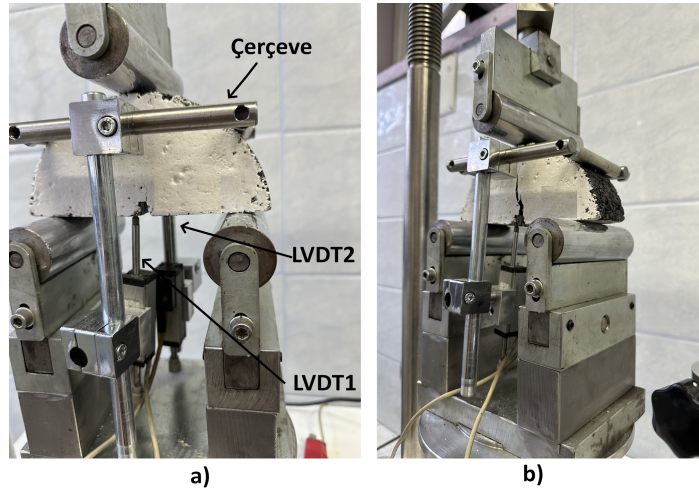
2.4. YDE Numunelerinin Testi

Betonun kırılma mekaniğinde popüler bir metot olan efektif çatlak modelinde kirişler için kullanılan deplasman çerçevesi Şekil 6'da detaylandırıldığı gibi YDE numunesine adapte edilmiştir. Rijit dikdörtgen şeklinde tasarlanan çerçeve üzerinde kayar halde bulunan çubuğun ucuna monte edilecek LVDT sayesinde çentik altı deplasmanı mesnet üzerindeki çerçeve mesnedi baz alınarak belirlenmiştir.

YDE testi oda sıcaklığında yapılmıştır. Bitümlü sıcak karışım numunelerinin lineer olmayan kırılma tokluğu değeri komplians yöntemine göre belirlenmiştir. Numuneler 0,5 mm/dk. hızla yüklenmiştir [3]. Numunelere ait deney detayı Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 6. YDE numunesinin yük-deplasmanının tayini için önerilen çerçeve sistemi.



Şekil 7. YDE numune deneyi a) Pik yükteki durum b) Göçme durumu.

3. YDE Test Sonuçlarının analizi

Asfalt, beton ve kayaların kırılma mekaniği uygulamalarında yaygın olarak kullanılan yarım daire eğilme (YDE) numunesi, ilk olarak Lim vd. [20] tarafından kırılma tokluğu değerleri elde edilmiştir. Bununla beraber bitümlü sıcak karışımın kırılma mekaniği üzerine detaylı çalışmalar Marasteanu [21] tarafından yapılmıştır. Bu kapsamdaki çalışmalar, kırılma enerjisi ve kırılma tokluğu üzerinedir. Kırılma enerjisi tabanlı yaklaşım lineer-olmayan kırılma mekaniği kapsamında olmakla birlikte, kırılma tokluğu tabanlı yaklaşım için lineer elastik kırılma mekaniği prensipleri kullanılmaktadır. Bununla beraber, lineer olmayan kırılma mekaniği yaklaşımları asfalt ve beton gibi elasto-plastik (yarı-gevrek) malzemelerin kırılmasını modellemek için en az iki parametrenin kullanılmasını önermektedir.

Yarı-gevrek malzemelerin kırılma mekaniğinde yaygın olarak kullanılan efektif çatlak modeli (EÇM), kırılma tokluğu ve efektif (veya kritik) çatlak boyu üzere çatlaklı yapıları modellemektedir. EÇM'e göre, malzemenin kırılma parametrelerini hesaplamak için çentikli üç noktalı eğilme numunelerinin yük-deplasman ilişkisini kullanmaktadır. Modelde, belirli bir başlangıç çatlak uzunluğuna sahip numunenin maksimum yüküne karşılık gelen sekant modülü, farklı bir başlangıç çatlak uzunluklu kırışın dinamik modülüne eşdeğer olduğu duruma karşılık gelen başlangıç çatlak uzunluğu değeri efektif çatlak uzunluğu olarak kabul etmektedir. Bunun için model bir düzeltme faktörüne ihtiyaç duymaktadır.

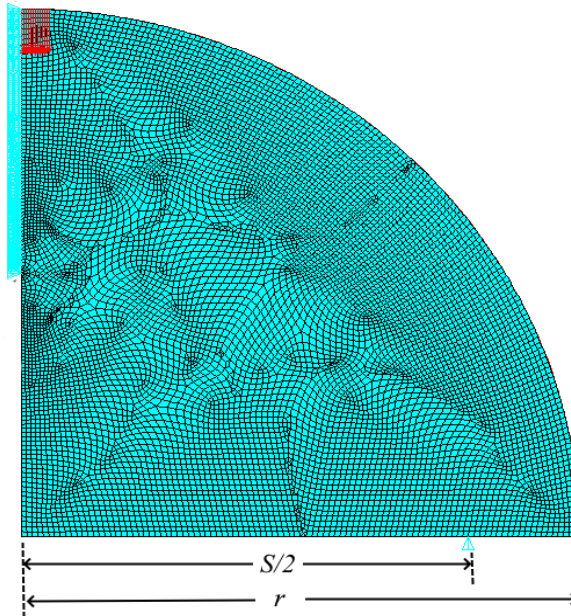
Son zamanlarda İnce vd. [3], YDE numunelerinin lineer olmayan kırılma parametrelerini tayin etmek için, Şekil 8 de görüldüğü gibi ANSYS sonlu elemanlar paket programı kullanarak modellediler. Sonuç olarak yükleme açıklığı/numune çapı oranı 0,8 olan YDE numuneleri için aşağıdaki LEKM bağıntılarını (Denklem 1, 2 ve 3) geliştirdiler:

$$K_{Ic} = \frac{P_c}{2br} \sqrt{\pi a_e} \frac{5,18 - 13,878\alpha + 27,145\alpha^2 - 26,887\alpha^3 + 10,321\alpha^4}{(1-\alpha)^{1.5}} \quad (1)$$

$$\delta = \frac{P\alpha}{2bE} D_1(\alpha) \quad (2)$$

$$D_1(\alpha) = \frac{1}{0,1323\alpha - 0,153\alpha^2 - 0,1169\alpha^3 + 0,1591\alpha^4 - 0,0212\alpha^5} \quad (3)$$

Burada P_c , pik yük, b numune genişliği, r numunenin yarıçapı, a_e efektif çentik boyu, $\alpha=a/r$ relatif çentik boyu, P yük ve E malzemenin elastisite modülüdür. İnce vd. [3] daha sonra, literatürde YDE numunelerinin kullanıldığı 8 adet çalışmayı komplians prensiplerini kullanarak modellediler. Bu çalışmalarda, YDE numunesinin P- δ ilişkisi, AASHTO [1] yöntemine göre veya makine çene deplasmanı teknikleriyle tayin edilmiştir. İnce vd. EÇM tabanlı komplians yaklaşımıyla malzemenin kırılma tokluğunu hesaplamışlardır.



Şekil 8. YDE numunesinin sonlu eleman modeli.

Geliştirilen komplians yönteminde, ilk olarak malzemenin elastisite modülü hesaplanmıştır. Bunun için YDE numunesinin P- δ ilişkisinin artan kısmında $P_c/3$ ile $2P_c/3$ aralığındaki veri çiftleri (P_i , δ_i) üzerine uygulanan lineer

regresyon denkleminde C_i komplians değeri (regresyon eğrisi denkleminde eğimin çarpıma göre tersi) hesaplanmıştır. Sonuç olarak elastisite modülü (E) (Denklem 4) ve Denklem (2)'den aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$E = \frac{\alpha_0}{2bC_i} D_1(\alpha_0), \quad C_i = \frac{\delta_i}{P_i} \quad (4)$$

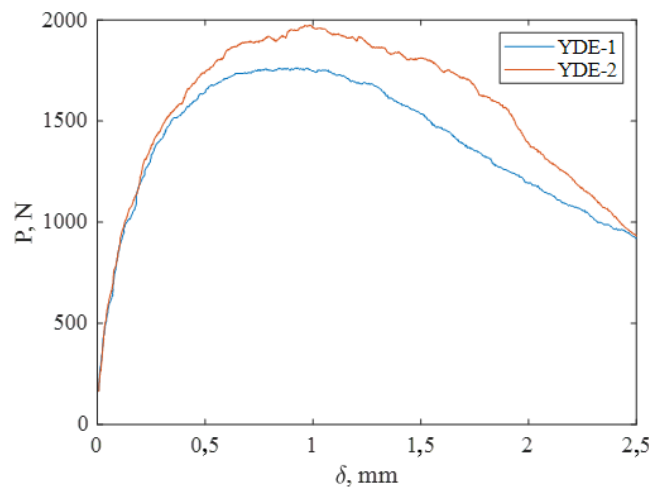
Sekant komplians değeri ise pik yüke karşılık koordinatlardan $C_s = \delta_c/P_c$ (burada δ_c pik yükteki deplasman değeri olmak üzere) şeklinde hesaplanmıştır. Pik yükte KSB ile orantılı olduğu kabul edilen kritik çatlak uzama değeri veya efektif (veya kritik) çatlak boyu (a_e), YDE numunesinin başlangıçtaki elastisite modülü ile pik yükteki elastisite modülünün eşdeğerliliği kullanılarak hesaplanabilir. Bununla beraber uygulamada efektif çatlak boyu yerine relatif efektif çatlak boyu değeri kullanılır ve bu değer Denklem (5)'ten deneme-yanılma yöntemiyle veya Newton yöntemiyle tayin edilebilir:

$$\alpha_e = \alpha_0 \frac{C_s D_1(\alpha_0)}{C_i D_1(\alpha_e)} \quad (5)$$

Şekil 9'da bir adet silindirik asfalt karışımından elde edilen iki YDE numunesine ait yük-deplasman diyagramları görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi numunelerin başlangıç eğimleri (dolayısıyla elastisite modülü) birbirine oldukça yakın olmakla birlikte, asfaltın agregalı kompozit yapısından dolayı (heterojen) pik yük değerlerinde biraz farklılık görülmektedir.

Tablo 4'te numune geometrilerine (sırasıyla başlangıç çatlak boyu a_0 , numune genişliği b ve numune karakteristik boyutu r) ve yük-deplasman diyagramlarına ait karakteristikler (sırasıyla pik yük P_c , pik yüke karşılık gelen deplasman değeri δ_c , başlangıç komplians değeri C_i ve sekant komplians değeri C_s) her bir numune için verilmiştir. Tablo 5'te ise MATLAB programı yardımıyla hesaplanmış kırılma karakteristikleri (sırasıyla relatif başlangıç çentik boyu α_0 , relatif efektif çentik boyu α_e , elastisite modülü E , LEKM'e göre hesaplanmış kırılma tokluğu değeri K_{Ic} -LEKM, komplians yöntemine göre hesaplanmış lineer olmayan kırılma tokluğu değeri K_{Ic} ve kırılma enerjisi G_f) verilmiştir. Bazant tarafından önerilen boyut etkisi modeli [8] tabanlı kırılma enerjisi (G_f) LEKM'nin temel formülasyonu (Denklem 6) kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

$$G_f = \frac{K_{Ic}^2}{E} \quad (6)$$



Şekil 9. YDE numunelerinin yük-deplasman (P-δ) diyagramları.

Tablo 5'ten açıkça görülmektedir ki, numunelerin E ve K_{Ic} değerleri birbirine oldukça yakın değerler çıkmıştır. Diğer taraftan oda sıcaklığında test edilen numunelerin düşük sıcaklıkta test edilen numunelere nazaran LEKM tabanlı kırılma tokluğu değeri ile lineer olmayan kırılma tokluğu arasındaki farkın oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Bunun sebebi oda sıcaklığındaki numune daha sünek olup kritik yükte KSB'nin boyutunun ihmal edilemeyecek mertebede olmasıdır [1, 3]. Daha önceki çalışmanın sonuçlarına paralel olarak buradaki çalışmada vurgulamaktadır ki düşük sıcaklıktaki bitümlü sıcak karışımların lineer ve lineer olmayan kırılma toklukları arasındaki fark %5 değerini geçmezken, oda sıcaklığında bu fark %50'nin üzerinde çıkmaktadır.

Tablo 4. Numune geometrilerine ve yük-deplasman diyagramlarına ait karakteristikler.

Numune	a_0 (mm)	b (mm)	r (mm)	P_e (N)	δ_e (mm)	C_i (mm/N)	C_s (mm/N)
YDE-1	23,1	49,5	72,6	1762	0,843	0,000234	0,000524
YDE-2	23,3	51,0	74,3	1974	0,962	0,000254	0,000529

Tablo 5. Numunelerin kırılma karakteristikleri.

Numune	α_0	α_e	E (MPa)	K_{Ic} -LEKM (MPa \sqrt{m})	K_{Ic} (MPa \sqrt{m})	G_f (N/m)
YDE-1	0,132	0,377	228	0,198	0,376	621
YDE-2	0,124	0,351	199	0,207	0,378	716

4. Sonuçlar

Sunulan deneysel ve teorik çalışmadan aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

- Son yıllarda yarı-gevrek malzemelerin kırılma parametrelerini tayin etmek için, kübik veya silindirik kompakt numunelerin kullanımı artmaktadır. Şimdiye kadar YDE numuneleri malzemenin lineer elastik kırılma tokluğu veya kırılma enerjisini tayin etmek için kullanılmıştır. Kırılma enerjisinin tayininde ise kompleks ve pahalı deney ekipmanı kullanılmakta veya hatalı yükleme başlığı deformasyon ölçümü tekniği kullanılmaktadır. Burada önerilen teknik ile hem düşük sıcaklıkta hem de oda sıcaklığında YDE numuneleri aynı test tertibatı ile test edilebilecektir.
- Sunulan çalışmada, bu tip numunelerin betonun kırılma mekaniğinde popüler lineer olmayan kırılma mekaniği modellerine göre komplians tabanlı analizinin basit ve ucuz deney ekipmanlarıyla yapılması amaçlanmıştır. Bitümlü sıcak karışımın kırılma mekaniği uygulamalarında yaygın olarak kullanılan çentikli yarım daire eğilme (YDE) numunesi üzerine yapılan kırılma mekaniği tabanlı çalışmalar, kırılma enerjisi ve kırılma tokluğunu dikkate almaktadır. Kırılma enerjisi tabanlı yaklaşım lineer-olmayan kırılma mekaniği kapsamında olmakla birlikte, kırılma tokluğu tabanlı yaklaşım lineer elastik kırılma mekaniği (LEKM) kullanılmaktadır. Bununla beraber, gerçek malzemeler lineer elastik davranmaz ve bu sebeple asfalt ve beton gibi elasto-plastik davranan bir kompozit LEKM ile tam olarak modellenemez.
- Sunulan çalışmanın diğer bir amacı, şimdiye kadar bitümlü sıcak karışımlarda, LEKM tabanlı olarak hesaplanan kırılma tokluğu parametresinin yarı-gevrek malzemelerin kırılma mekaniğinde popüler bir metod olan efektif çatlak modeline göre tayin edilmesidir. Çünkü mevcut deney ekipmanı kompleks olup dünyada sadece belirli firmalar tarafından üretildiğinden pahalıdır. Bu sebeple geliştirilen basit deney ekipmanı ile milli servet yurt dışına çıkmayacaktır.
- Burada önerilen yöntem, bitümlü sıcak karışımlardan imal edilen çentikli YDE numunelerinin normal ve düşük sıcaklıktaki performansını değerlendirmek için geliştirilmiştir. Bu deneysel ve teorik çalışmanın çıktısı, aynı zamanda Ülkemizde son 5 yılda kış aylarında meydana gelen şiddetli depremler neticesinde, deprem bölgelerinde gözlemlenen karayolu hasarlarının kırılma mekaniği prensipleriyle analizini mümkün kılacağından sadece ulusal değil uluslararası düzeyde güvenilirliği yüksek tasarımların gerçekleştirilmesini sağlayacaktır.
- Uygulamada kaya ve bitümlü sıcak karışımların kırılma tokluğunun tespitinde yaygın olarak YDE numuneleri kullanılmakla birlikte, kırılma test sonuçları LEKM tabanlı olarak analiz edilmektedir. Bununla beraber bu çalışma, oda sıcaklığında test edilen YDE numunelerinde lineer ve lineer olmayan kırılma tokluğu arasında %50 civarında farkın olduğunu göstermektedir. Bu fark, oda sıcaklığında test edilen numunede çatlakın gerisinde gelişin KSB bölgesinin büyük olmasından kaynaklanmaktadır. Oysa

düşük sıcaklıklarda KSB çok küçük olduğundan bu farkın %5'i geçmeyeceği şartnamelerde belirtilmektedir.

- Burada geliştirilen deney düzeneği ile YDE numuneleri sadece yük-deplasman ilişkileri dikkate alınarak lineer olmayan kırılma parametrelerinin tespit edilmesi için oda sıcaklığındaki saf bitümlü sıcak karışımlar kullanılmıştır. Bununla beraber ileriki çalışmalarda düşük, orta ve yüksek sıcaklıklardaki saf ve katkılı bitümlü sıcak karışımların lineer olmayan kırılma parametrelerinin tespit edilmesi hedeflenmektedir.

Rekabetçi Çıkar Beyanı

Yazarlar, bu makalede rapor edilen çalışmayı etkiliyor gibi görünebilecek, birbiriyle rekabet eden herhangi bir finansal çıkar veya kişisel ilişkinin bulunmadığını beyan ederler.

Teşekkür

R.İ. ve B.F.F. fikir sahibi ve deneyleri gerçekleştirdi. R.İ. ve B.F.F. sonuçları yorumladı ve makaleyi yazdı.

Kaynaklar

- [1] AASHTO Designation: TP 105-13. 2015. Standard Method of Test for Determining the Fracture Energy of Asphalt Mixtures Using the Semicircular Bend Geometry (SCB), American Association of State and Highway Transportation Officials.
- [2] Nallathambi P, Karihaloo BL. Determination of the specimen size independent fracture toughness of plain concrete. *Mag of Conc Res* 1986; 38: 67-76.
- [3] Ince R, Yalcin E, Yılmaz M. Quantifying nonlinear fracture parameters in bituminous SCB specimens: A compliance-based approach. *Case Stud Const Mater* 2024; 21, e03437.
- [4] Griffith AA. The phenomena of rupture and flow in solids. *Phil Trans Roy Soc.*1920; A221: 163-198.
- [5] Kaplan MF. Crack propagation and the fracture of concrete. *J of ACI* 1961; 58: 591-610.
- [6] Hillerborg A, Modeer M, Petersson PE. Analysis of crack formation and growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. *Cem & Conc Res* 1976; 6: 773-782.
- [7] Jenq YS, Shah SP. A two-parameter model for concrete. *J Eng Mech- ASCE* 1985; 111: 1227-1241.
- [8] Bazant ZP, Kazemi MT. Determination of fracture energy, process zone length, and brittleness number from size effect with application to rock and concrete. *Int J Fract* 1990; 44(2): 111-131.
- [9] Xu S, Reinhardt HW. Determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle fracture, Part I: Experimental investigation of crack propagation. *Int J of Fract* 1999; 98: 111-149.
- [10] Hu X, Duan K. Size effect and quasi-brittle fracture: the role of FPZ. *Int J Fract* 2008; 154: 3-14.
- [11] Özdemir AM, Yalçın E, Yılmaz M, Yılmaz B. Farklı çentik derinliklerine sahip asfalt karışımlarının orta sıcaklıklarda kırılma özelliklerinin incelenmesi: Sonlu elemanlar yaklaşımı. *Pamukkale Üniv Müh Bil Der* 2024; 30(6): 808-818
- [12] Brühwiler E, Wittmann FH. The wedge splitting test, a method of performing stable fracture tests. *Eng Fract Mech* 1990; 35: 117-126.
- [13] Ince R. Determination of concrete fracture parameters based on two-parameter and size effect models using split-tension cubes. *Eng Fract Mech* 2010; 77: 2233-2250.
- [14] Ince R. Determination of concrete fracture parameters based on peak-load method with diagonal split-tension cubes. *Engineering Eng Fract Mech* 2012; 82: 100-114.
- [15] Ince R. Determination of the Fracture Parameters of the Double-K Model Using Weight Functions of Split-Tension Specimens. *Eng Fract Mech* 2012; 96: 416-432.
- [16] Ince R. Usage of compact compression specimens to determine non-linear fracture parameters of concrete. *Fatig Fract Eng Mater Struct* 2021; 44: 410-426.
- [17] Ince R. Utilization of Splitting-Strips in Fracture Mechanics Tests of Quasi-Brittle Materials. *Arch Appl Mech* 2021; 91: 2661-2679.
- [18] Ince R, Bildik AT. A preliminary concrete mixture design based on fracture toughness. *Mater Struct* 2021, 54: 11.
- [19] Ince R, Bildik AT. Batch design of cementitious composites for the double-K fracture model. *Mater Struct* 2023; 56: 145.
- [20] Lim IL, Johnston W, Choi SK. Stress intensity factors for semi-circular specimen under three-point bending. *Eng Fract Mech* 1993; 44: 363-382.
- [21] Li XJ, Marasteanu MO. Using Semi Circular Bending Test to Evaluate Low Temperature Fracture Resistance for Asphalt Concrete *Exper Mech* 2010; 50: 867-876.