



Farklı çentik derinliklerine sahip asfalt karışımlarının orta sıcaklıklarda kırılma özelliklerinin incelenmesi: Sonlu elemanlar yaklaşımı

Investigation of the fracture properties of asphalt mixtures with different notch depths at intermediate temperatures: Finite element approach

Ahmet Münir ÖZDEMİR^{1*}, Erkut YALÇIN², Mehmet YILMAZ², Bahadır YILMAZ¹

¹İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bursa Teknik Üniversitesi, Bursa, Türkiye.
ahmet.ozdemir@btu.edu.tr, bahadir.yilmaz@btu.edu.tr

²İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye.
erkutyalcin@firat.edu.tr, mehmetyilmaz@firat.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 27.09.2022
Kabul Tarihi/Accepted: 12.11.2023

Düzeltilme Tarihi/Revision: 28.08.2023

doi: 10.5505/pajes.2023.88590
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Son zamanlarda araştırmacılar, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak asfalt karışımlarının çeşitli özelliklerini araştırmaya odaklanmıştır. Bu yöntem sayesinde laboratuvar ortamında performans testlerini simüle etmek ve çok benzer sonuçlar elde etmek mümkündür. Bu çalışmada, laboratuvar ortamında yarı dairesel asfalt karışım numuneleri oluşturulmuştur. Çentik derinliğinin asfalt karışımlarının kırılma özellikleri üzerindeki etkisi, 0.1, 0.5, 1, 5 ve 10 mm/dk'lık beş farklı yer değiştirme hızında SCB testi simüle edilerek değerlendirilmiştir. Sonuçlar, çentik derinliği arttıkça maksimum yük ve kırılma enerjisi değerlerinin azaldığını göstermiştir. Ayrıca, elastik-plastik kırılma mekaniği yaklaşımı (J-integral) kullanılarak asfalt karışımlarının çatlak mukavemeti hesaplanmıştır. Son olarak, farklı değişkenlerin sonuçlar üzerindeki etki derecesini belirlemek için Tepki Yüzey Metodolojisi (RSM) analizi yapılmıştır. Sonuç olarak, çentik derinliğinin, yer değiştirme oranından daha önemli olduğu belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Asfalt karışım, kırılma mekaniği, sonlu elemanlar, yarı daire eğilme, tepki yüzey metodu

Abstract

Recently, researchers have focused on investigating various properties of asphalt mixtures using finite element method. Thanks to this method, it is possible to simulate performance tests in the laboratory and get very similar results. In this study, semi-circular asphalt mixture samples were obtained in the laboratory, and then subjected to the Semi-Circular Bending (SCB) test to determine the fracture parameters. With the help of the finite element software, 2D asphalt mixture samples were created with five different notch depths of 1 cm, 1.5 cm, 2 cm, 2.5 cm, and 3 cm. The effect of notch depth on the fracture properties of asphalt mixtures was evaluated by simulating the SCB test at five different displacement rates 0.1, 0.5, 1, 5, and 10 mm/min. The results showed that the maximum load and fracture energy values decreased as the notch depth increased. Furthermore, the cracking strength of asphalt mixtures was calculated by using the elastic-plastic fracture mechanics approach (J-integral). Finally, Response Surface Methodology (RSM) analysis was performed to determine the degree of impact of the different variables on the results. Consequently, the notch depth was more significant than the displacement rate.

Keywords: Asphalt mixture, fracture mechanics, finite element, semi-circular bending, response surface methodology

1 Giriş

Asfalt, petrolün rafine edilmesi sonucu elde edilen, bağlayıcılık ve geçirimsizlik yeteneklerine sahip viskoelastik ve termoplastik bir malzemedir [1-3]. Belirli gradasyona sahip agrega ile karıştırıldıktan sonra serilip sıkıştırılması ile asfalt kaplamalar elde edilmektedir. Asfaltın rolü bağlayıcılık iken, agrega ise yapısal iskelet görevi üstlenmektedir [4, 5]. Zamanla artan trafik yükleri, yorulma etkileri, çok yüksek ve düşük sıcaklıklar, çevresel etkiler, ultraviyole ışınlar gibi sebeplerden dolayı malzemede bozulmalar meydana gelmektedir [6-8]. Başlıca bozulmalardan biri çatlak oluşumudur. Çatlak oluşumunun sonucunda yapısal bozulmalar meydana gelebilmekte, trafik güvenliğini tehlikeye atacak durumlar oluşabilmektedir [9, 10]. Asfaltın viskoelastik ve termoplastik özelliklerinden dolayı çatlama davranışları karmaşıktır [11]. Bu davranışları karakterize etmek için karmaşık analizler gerekmektedir. Asfalt karışımların çatlak özelliklerini değerlendirmek amacıyla çok çeşitli laboratuvar deneyleri olduğu gibi bunlara ek olarak kırılma mekaniği yaklaşımları da

kullanılmaktadır. Asfalt karışımların kırılma davranışlarını karakterize etmek için birçok çalışma yapılmıştır [12-15]. Bu davranış üzerinde bitümlü bağlayıcının, agrega tipinin ve gradasyonunun, boşluk oranının, yüklenme ve dışsal şartların etkisi olduğu bilinmektedir [16-19].

Laboratuvar ortamında asfalt karışımların kırılma özelliklerini belirlemek amacıyla farklı deney yöntemleri ve numune şekilleri tasarlanmıştır. Bunlardan bazıları iki, üç ve dört noktalı eğilme deneyleri, tek kenar çentik (SEB) deneyi, disk şekilli kompakt çekme (DCT) deneyi, indirekt çekme (IDT) testleridir [20]. Ancak, numune hazırlama kolaylığı, deney basitliği, tutarlılık ve sadelik, yeniden üretilebilirlik, araziden rahatça karot alma gibi avantajlarından dolayı SCB deneyi ön plana çıkmaktadır. SCB deneyi ilk olarak kaya malzemelerin kırılma dirençlerini değerlendirmek için kullanılmıştır [21]. Daha sonra SCB teknikleri asfalt karışımların çatlak dirençleri ve kırılma davranışlarını incelemek için düzenlenmiştir [22]. SCB deneyi ile elde edilen parametreler kırılma davranışını analiz etmek için kırılma mekaniği ilkeleri kullanılarak değerlendirilmiştir [23]. Son zamanlarda asfalt karışımlara SCB

*Yazışılan yazar/Corresponding author

deney prosedürü uygulanarak çok sayıda çalışma yapılmıştır. Yang ve ekibi yaptıkları çalışmada SCB deneyi ile asfalt karışımların düşük sıcaklık (-10°C) performansını incelemişlerdir. Bu performansa bağlayıcının film kalınlığının, dolgu içeriğinin ve yaşlandırma koşullarının ne derecede etki ettiğini araştırmışlardır. SCB deneyi için 3 mm/dk'lık yükleme hızının optimum değer olduğunu ve yaşlanma etkilerinin düşük sıcaklık performansında önemli bir parametre olduğunu belirtmişlerdir [24]. Sah ve Biligiri, kırılma mekaniği yaklaşımları ile asfalt karışımların bazı fiziksel özelliklerinin kırılma davranışı üzerinde etkisini araştırmışlardır. Ayrıca, enerjiye dayalı hasar modelleri geliştirmişlerdir. Sonuç olarak SCB deneyinin umut verici bir yöntem olduğunu, bazı kırılma mekaniği prensiplerini kapsamlı bir şekilde anlamaya oldukça yardımcı olduğunu belirtmişlerdir [25]. Li ve Marasteau, SCB deneyi sonucunda asfalt karışımların kırılma direncinin agrega tipinden ve hava boşluğu içeriğinden önemli ölçüde etkilendiğini belirlemişlerdir. Ayrıca, hem yükleme hızının hem de ilk çentik uzunluğunun etkisinden de bahsetmişlerdir [26]. Literatürden deneysel yaklaşım örneklerini çoğaltmak mümkündür.

Son yıllarda çeşitli yazılımlar kullanılarak sonlu eleman yöntemi ile asfalt karışımların mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla çok sayıda çalışma yapılmıştır. Sonlu eleman yazılımlarından biri olan ABAQUS kullanım kolaylığı, doğrusal olmayan analiz kullanarak karmaşık problemleri hızlıca çözebilmesi, çok çeşitli özelliklerdeki malzemeleri kütüphanesinde barındırması, bazı özellikleri otomatik seçebilmesi gibi özelliklerinden dolayı çokça tercih edilmektedir [27]. Kırılma özelliklerini sonlu eleman yöntemiyle incelemek, hem zaman, hem iş yükü, hem de maliyet anlamında oldukça avantajlıdır. Asfalt karışımlar için SCB deneyini ABAQUS programı ile simüle etmek konusunda literatürde çalışmalar mevcuttur. Al-Qudsi ve ekibi yaptıkları çalışmada, kırılma mekaniği tabanlı deneylere ek olarak simülasyonun da yapılmasını önererek, yapışkan (kohesiv) bölge modellemesi ile SCB deneyini simüle etmişlerdir. Sonuç olarak makul bir hesaplama süresinde çatlak başlama ve yayılma özelliklerini açıklamışlardır [28]. Zhang ve Liu, görüntü işleme teknikleri kullanarak ABAQUS yazılımında iki boyutlu yarım daire numuneleri elde etmiş ve SCB prosedürünü uygulayarak sünme deformasyonunu araştırmışlardır. Sonuç olarak deneysel sonuçlar ile simülasyon sonuçları arasında oldukça yakın bir ilişki olduğunu belirlemişlerdir [29]. Lancaster ve ekibi yaptıkları çalışmada, asfalt karışımlardaki çatlak yayılmasını modellemek amacıyla genişletilmiş sonlu eleman metodu (XFEM) kullanarak SCB modelleri tasarlamış, deneysel veriler ile model verilerini karşılaştırmışlardır. Laboratuvar verileri ile model verileri birbirine çok yakın bir şekilde elde edilmiştir [30].

Bu çalışmada farklı çentik boylarının ve deneysel olarak elde edilen malzeme özelliklerinin asfalt karışımların kırılma özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Numunelere 1 cm, 1.5 cm, 2 cm, 2.5 cm ve 3 cm olmak üzere beş farklı çentik boyu verilmiş, sınır şartları ve SCB deney prosedürleri ABAQUS programında oluşturularak simülasyon gerçekleştirilmiştir. Ayrıca yazılımda 0.1, 0.5, 1, 5 ve 10 mm/dk olmak üzere farklı deplasman hızları tatbik edilerek kırılma özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Viskoelastik özellikler programın arayüzünde girdi olarak kullanılabilecek şekilde karakterize edilmiştir. Kırılma parametreleri ise laboratuvar ortamında çentik içermeyen yarım daire numunelerinin SCB deneyine tabi tutulması ve

daha sonra sonuçların optimize edilmesi ile elde edilmiştir. Çatlak dayanımını değerlendirmek amacıyla elastik-plastik kırılma mekaniği yaklaşımı (J-integral) ile J_c değeri elde edilmiştir. Ayrıca, her bir numune için Esneklik İndeksi (Flexibility Index (FI)) değerleri bulunmuştur.

2 Materyal ve Metot

2.1 Materyal

Bu çalışmada kullanılan saf bitüm TÜPRAŞ Batman rafinerisinden temin edilmiştir ve B 50/70 penetrasyon sınıfındadır. Saf bitümün genel özellikleri Tablo 1'de, agrega gradasyonu ise Şekil 1'de verilmiştir. Karışımda kullanılan agrega kalker (kireçtaşı) türü kırılma malzeme olup, Elazığ Karayolu Bölgesi'nden temin edilmiştir. Karışımlarda kullanılacak agrega yığınının mutabakat ve kaynak özellikleri tespit edilerek, tasarım trafiği (15 milyon) ve kaplamanın kalınlığına (<100mm) bağlı olarak Superpave şartname kriterleri ile karşılaştırılmış ve bu kriterlerin sağlandığı görülmüştür. Ayrıca Tablo 2'de tasarım trafiğinin de dikkate alındığı Superpave karışım tasarım kriterleri sunulmuştur.

Tablo 1. Bitümlü bağlayıcının özellikleri

Table 1. Properties of bituminous binder

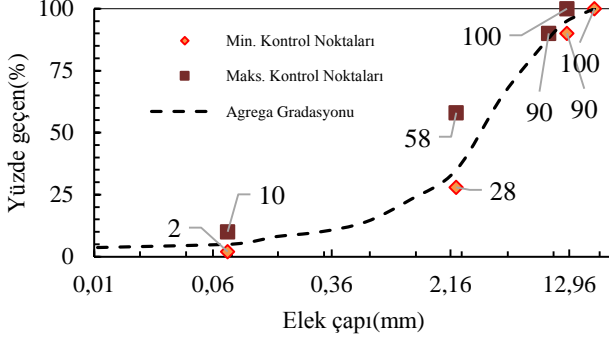
Özellikler	Birim	Standart	Sonuç Değeri	Şartname Sınırları
Penetrasyon	mm ⁻¹	EN 1426	62	50-70
Yumuşama noktası	°C	EN 1427	53.3	46-54
Penetrasyon indeksi (PI)	-	-	0.119	
Parlama noktası	°C	EN ISO 2719	245	>230
Yoğunluk	g/cm ³	ASTM D70 - 18a	1.044	
Çözünürlük	%	EN 12592	100	>99
Karıştırma sıcaklığı	°C	-	167.5-	
Sıkıştırma sıcaklığı	°C	-	173.3-155.2-	
			160.6	

Tablo 2. Superpave şartnamesi karışım tasarım ilkeleri

Table 2. Superpave mixture design procedures

Tasarım Hava Boşluğu	%4				
Filler/bitüm oranı	0.6-1.2*				
Çekme gerilmesi dayanımı	Min. %80				
Mineral agrega içerisindeki boşluk % (VMA)	Nominal maksimum agrega boyutu				
	37.5mm	25mm	19mm	12.5mm	9.5mm
	11	12	13	14	15
Tasarım ESAL seviyesi	Maks. Teorik özgül ağırlık %'si			Bitüm ile dolu boşluk %'si (VFA)	
	Nilk	Ndes	Nmax		
<0.3	≤91.5	50	≤98	70-80	

0.3-3	≤90.5	75	≤98	65-78
3-30	≤89	100	≤98	65-75
>30	≤89	125	≤98	65-75



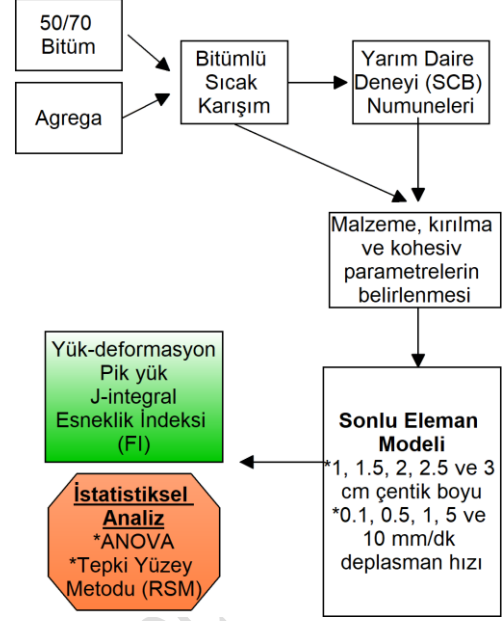
Şekil 1. Agregra gradasyonunun gösterimi
Figure 1. Illustration of aggregate gradation

Bitümlü sıcak karışım numuneleri Superpave karışım tasarımına bağlı kalınarak hazırlanmıştır. Karışım tasarımı, Superpave gradasyon grafiğini ve sınırlarını sağlayan farklı agregra deneme karışımlarının hazırlanması, deneme karışımlarının bitümlü bağlayıcı ile karıştırılarak kısa dönem yaşlandırmaya tabi tutulması, yaşlandırılmış numunelerin sıkıştırılması, agregra deneme karışımlarının hacimsel özellikleri tespit edilerek tasarım agregra gradasyonunun belirlenmesi ve seçilen tasarım gradasyonu için gerekli olan tasarım bitüm içeriğini belirlemek amacıyla çeşitli bitüm içeriklerinde karışım numunesi hazırlanarak bunların sıkıştırılması işlemlerini kapsamaktadır. Çalışmada kullanılan bitümlü sıcak karışımının deney sonuçları Tablo 3'de verilmiştir.

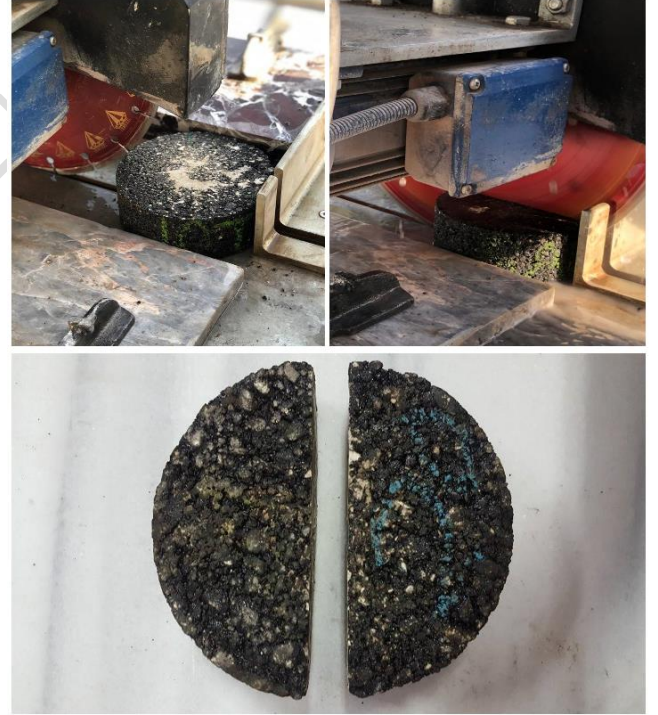
Tablo 3. Bitümlü sıcak karışımın deney sonuçları
Table 3. Experimental results of hot mix asphalt

Deney Sonucu	Değer	Sınır Değerler
Marshall Stabilite	38.2 kN	>8.83 kN
Akma	2.88 mm	2mm-4mm
Marshall Oranı	13.3 kN/mm	
Hava Boşluğu	%3.95	%3-5
Optimum Bitüm Oranı	%4.67	

Çalışmanın tamamı için bir akış şeması oluşturulmuş ve Şekil 2'de verilmiştir. Bu çalışmada çentik içermeyen yarım daire numuneleri hazırlanmış (Şekil 3) ve yarım daire deneyine tabi tutularak bu sonuçlar ile kırılma parametreleri belirlenmiştir.



Şekil 2. Çalışmanın akış şeması
Figure 2. Flowchart of the study



Şekil 3. Yarım daire numunelerinin hazırlanması ve nihai numuneler

Figure 3. Preparation of semicircular samples and final samples

2.2 Çatlak dayanımının araştırılması

SCB deneyi, hazırlanışı, araziden karot numune alınmasındaki kolaylığı ve deneysel sadeliği sebebiyle birçok araştırmacı tarafından tercih edilmektedir [31, 32]. Ayrıca kiriş eğilme deneyleri ile kıyaslandığında gerçek kaplama özelliklerine daha yakın bir gerilme dağılımı sağladığı belirlenmiştir [33, 34]. Basitçe, SCB deneyi düzeneği alt kenarda iki destek silindirden ve üst kenarın orta noktasında bir yüklemeye

silindirinden oluşmaktadır. Deney düzeneğinin detaylı gösterimi Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. SCB deneyi düzeneği
Figure 4. SCB test setup

Bitümlü sıcak karışımlar sıcaklık, zaman ve yükleme süresine göre farklı davranışlar sergilemektedir. Bu davranışları lineer elastik ve elastik plastik olarak ayırabilmek mümkündür. Çatlak direncini düşük sıcaklıklarda (1°C ve aşağısı) lineer elastik kırılma mekaniği yaklaşımına göre değerlendirmek daha doğru iken, orta ve yüksek sıcaklıklarda (25°C ve üstü) ise elastik-plastik kırılma mekaniği ile değerlendirmek gerekmektedir [35]. Viskoelastik malzemeler için 25°C ve üstü sıcaklıklarda kırılma özelliklerini incelemek, malzeme viskoz özellikler kazanacağı için daha karmaşıktır. Bu bağlamda elastik-plastik kırılma mekaniği prensipleri ile çatlak direncini belirlemek amacıyla kritik şekil değiştirme enerjisi salınım hızı yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yaklaşım sonucu elde edilen parametre olan J integral, kısaca J_c olarak adlandırılır (Eş. 1). J_c , çentik derinliği başına şekil değiştirme enerjisinin değişim oranının (dU/da) bir fonksiyonudur. Karışımda çatlama yüzeyinin birim alanının oluşması için harcanan şekil değiştirme enerjisini temsil etmektedir [36]. Bir başka deyişle çatlak uzunluğunun "da" kadar artması için gerekli enerjidir denebilir. J_c değerinin büyük olması malzemenin kırılmaya karşı dayanımının yüksek olacağını göstermektedir. Deney gerçekleştirilirken numunenin üstünden sabit bir hızla yük uygulanmakta ve yük-deplasman değerleri sürekli olarak kaydedilerek J_c değerleri elde edilmektedir. Deneysel çalışma ASTM D8044-16'ya bağlı kalınarak gerçekleştirilmektedir. Yapılan çalışmalarda J_c değerinin belirlenmesi için optimum deney koşulları araştırılmıştır. Sonuç olarak 25°C sıcaklıkta 0.5 mm/dk yükleme hızının kullanılması uygun görülmüştür [37-39].

$$J_c = \left(-\frac{1}{b} \right) \frac{dU}{da} \quad (1)$$

Burada; b, numune kalınlığını (mm); a, çentik yüksekliğini (mm) ve U, maksimum yük-deplasman eğrisi altında kalan alandan elde edilen kırılmaya neden olan toplam şekil değiştirme enerjisini ifade etmektedir.

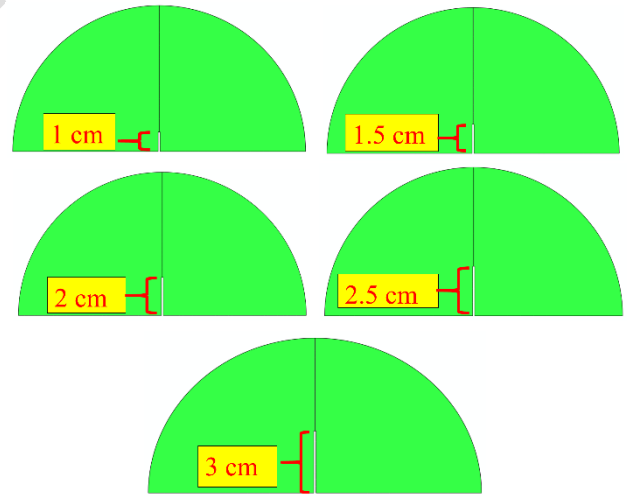
J_c belirlenirken en az iki farklı çentik boyuna sahip karışım numunesinde deney gerçekleştirilmelidir. İki farklı çentik boyu

ile deney gerçekleştirildikten sonra Eş. 2 yardımıyla J_c değeri hesaplanmaktadır.

$$J_c = \left(\frac{U_1}{b_1} - \frac{U_2}{b_2} \right) \times \frac{1}{a_2 - a_1} \quad (2)$$

2.3 Sonlu elemanlar yöntemi ile SCB deneyinin modellenmesi

Son yıllarda genel olarak viskoelastik malzemelerin, özel olarak da asfaltik malzemelerin çeşitli koşullar altında davranışlarını sonlu elemanlar yöntemi ile modelleme konusunda çok çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Laboratuvar ortamında elde edilmesi zor, yorucu veya maliyetli olan bazı analizler sonlu eleman yöntemiyle değerlendirilebilmektedir. Bu sayede gerek zaman, gerekse iş gücünden kazanç sağlamaktadır. Bu amaçla çeşitli yazılımlar geliştirilmiştir. Hızlı çözüm alması, kullanışlı arayüzü, isabetli çözüm gibi özelliklerinden dolayı ABAQUS yazılımı çokça tercih edilen bir sonlu eleman yazılımıdır. Asfalt karışımların tekerlek izi, çatlak oluşumu ve ilerlemesi, termal davranışları, kırılma mekaniği gibi fenomenleri sonlu eleman yazılımı ABAQUS ile başarılı bir şekilde araştırılmıştır. Bu çalışmada Şekil 5'te gösterildiği gibi 2 boyutlu yarım daire şeklinde 1 cm, 1.5 cm, 2 cm, 2.5 cm ve 3 cm çentik boylarına sahip beş asfalt karışım numunesi oluşturulmuş ve numunelerin üst tarafına 0.1, 0.5, 1, 5 ve 10 mm/dk deformasyon hızlarında yükleme verilerek gerekli değerler elde edilmiştir. Bu sayede farklı çentik boylarının ve deplasman hızlarının kırılma özelliklerine olan etkisi değerlendirilmiştir. Çalışmada ABAQUS, 2017 sürümü kullanılmıştır.

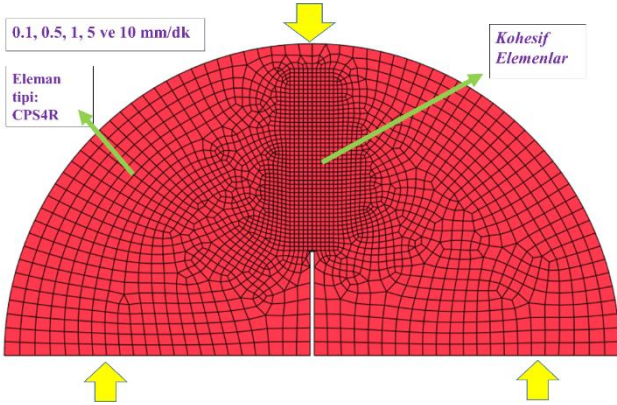


Şekil 5. Farklı çentik boylarında oluşturulan 2 boyutlu sonlu eleman modelleri

Figure 5. 2D finite element models created with different notch sizes

Oluşturulan modellerin sınır şartları deney standardında olduğu gibi uygulanmıştır. Gerekli yakınsama çalışmaları yapıldıktan sonra ağ işlemi uygulanmıştır. Ağ işlemi uygulanmış örnek bir numunenin sınır şartları ile birlikte gösterimi Şekil 6'da verilmiştir. Ağ işlemi sonucunda, 1, 1.5, 2, 2.5 ve 3 cm çentik derinlikleri için sırasıyla 2965, 2825, 2467, 2401, 2289 düğüm noktası mevcuttur. Ayrıca, oluşturulan her bir sonlu eleman modelinin ağ işlemi için ağ aralığı 3.3 mm olarak belirlenmiş, kohesiv bölge için ise sonuç hassasiyetini

artırmak amacıyla 1 mm aralıklar ile ağ işlemleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6. Sonlu elemanlara bölünmüş (meshlenmiş) numune

Figure 6. Meshed sample

2.3.1 Gerekli malzeme özelliklerinin belirlenmesi

Asfalt viskoelastik ve termoplastik bir malzemedir. Bu sebeple sıcaklık ve zamana bağlı olarak oldukça kompleks davranışlar göstermektedir. ABAQUS yazılımında viskoelastik malzemelerin mekanik davranışları Prony serileri ile tanımlanabilmektedir. Ayrıca Prony serileri zaman veya frekans girdilerine bağlı olarak da karakterize edilebilmektedir. Bu çalışmada deneysel olarak elde edilen zamana bağlı kayma röleksasyon modülü verileri ile malzeme parametreleri elde edilmiştir. Program, lineer viskoelastik özellikleri kayma modülü $G(t)$ ve hacim modülü $K(t)$ şeklindeki Prony serisi formuna dönüştürmektedir:

$$G(t) = \frac{E(t)}{2(1 + \nu)} \quad (3)$$

$$K(t) = \frac{E(t)}{3(1 - 2\nu)} \quad (4)$$

$$E(t) = E_0 \left(1 - \sum_{i=1}^N E_i \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}} \right) \right) \quad (5)$$

Burada, E_0 anlık modüldür; N , Prony serisindeki terimlerin sayısıdır; E_i , boyutsuz röleksasyon modülüdür; τ_i röleksasyon süreleridir; ve ν Poisson oranıdır. Kayma röleksasyon modülü için Eş. 5, Abaqus'ta Eş. 6 olarak da yazılmıştır [40, 41]:

$$g(t) = g_0 \left(1 - \sum_{i=1}^N g_i \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}} \right) \right) \quad (6)$$

Burada, g_0 anlık kesme modülüdür, $g(t)$ kayma röleksasyon modülüdür, g_i ve τ_i Abaqus'taki Prony serisi katsayılarıdır.

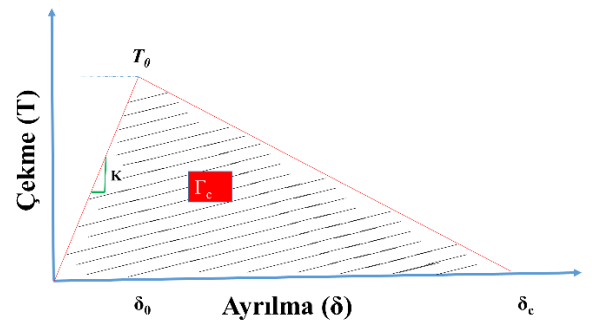
Viskoelastik malzeme girdileri ile eş zamanlı olarak elastik parametrelerin de sunulması gerekmektedir. Bu amaçla saf asfalt karışım için programa sunulan temel bazı parametreler Tablo 4'de verilmiştir. Analiz kapsamında malzeme homojen ve izotropik olarak kabul edilmiştir.

Tablo 4. Sonlu eleman modeli için belirlenen temel karışım parametreleri

Table 4. Basic asphalt mixture parameters determined for the finite element model

Özgül ağırlık (gr/cm ³)	Elastisite modülü (MPa)	Poisson oranı	Tip
2.4	700	0.35	Homojen/İzotropik
Knn	Kss	Ktt	Kırılma Enerjisi
700	258	258	170 N.mm

Sonlu eleman modelinde kırılma alanını ve davranışını karakterize etmek amacıyla üçgen (bilinear) çekme-ayırma (traction-separation) kanunu (BTSL)'na bağlı kalınarak kohesiv parametreler belirlenmiştir. Üçgen çekme ayrılma kanunu, basitliği ve kırılma fenomenini çok yönlü karakterize edebilmesi sebebiyle çokça tercih edilmektedir [42]. Kohesiv davranışı tanımlamak çatlak ucundaki tekilleşme (singularity) problemi ile karşılaşmayı önlemektedir. Asfalt karışımların çatlama özelliklerini değerlendirmek için gerçekleştirilen araştırmalarda çokça kez kohesiv parametrelerden yararlanılmış ve oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 7'de gösterildiği gibi kohesiv davranış, kritik çekme değeri olan kohesiv dayanım (T_0), elastik davranışın olduğu bölgedeki rijitlik (K) ve kohesiv kırılma enerjisi (Γ_c)'den oluşmaktadır. Γ_c , çekme-ayırma eğrisinin altında kalan alandır ve tam ayrılma (separation) için gereken kırılma enerjisi olarak tanımlanır. T_0 'a kadar elastik davranış sergilenir, daha sonra ayrılma tamamlanana kadar yumuşama bölgesi olarak tanımlanır. δ_0 'dan önce, yani elastik bölgede, malzemede herhangi bir hasar meydana gelmez, deformasyon ise geri kazanılabilir düzeydedir. Hasar başlama noktası (δ_0, T_{max})'na ulaşıldığında numunede hasar kademeli olarak ilerler. Hasar değişkeni 0'dan 1'e yükselir. Elemanın tamamen hasar gördüğü durumda, yani hasar değişkeni 1'e eşit olduğunda, eleman simülasyonda devre dışı kalır ve meydana gelen hasar model boyunca ilerler [16, 43, 44]. Deneysel olarak bulunan değerler optimize edilerek kohesiv parametreler elde edilmiştir. Daha sonra bu değerler sonlu eleman yazılımında girdi olarak kullanılmış ve oluşturulan modellerde ayrılma sağlanarak kırılma özelliklerinin incelenmesi sağlanmıştır.



Şekil 7. Üçgen çekme-ayırma yasası

Figure 7. Bilinear traction-separation law

2.4 Esneklik İndeksi

Asfalt karışım gibi kompleks bir malzemenin kırılma özelliklerini tek bir parametre ile açıklamak yetersiz kalacaktır. Bu sebeple farklı mühendislik indekslerini kullanarak asfalt karışımların çatlama özelliklerini araştırmak gerekmektedir [45, 46]. Araştırmacılar tarafından Illinois Esneklik İndeksi olarak da bilinen FI değeri öne sürülmüştür [47]. Bu parametre ile amaç kırılma enerjisi (G_f)'yi normalize ederek numuneler arasındaki farkları değerlendirmektir. Bu amaçla kırılma

enerjisi, pik nokta sonrası eğim (m) değerine bölünerek FI elde edilir (Eş. 7, Eş. 8) [48]:

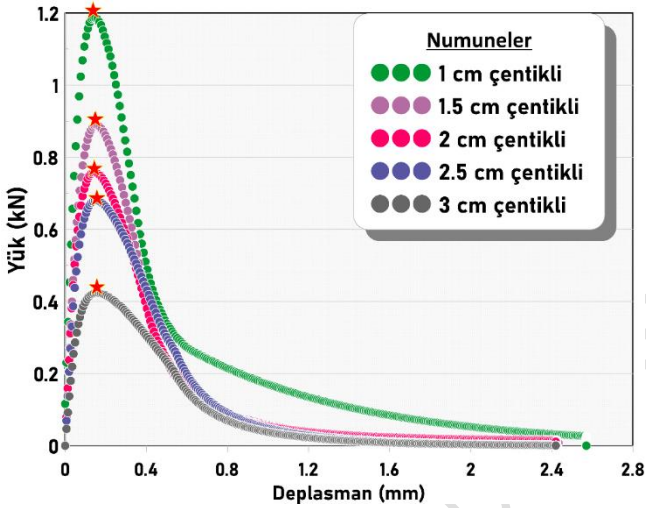
$$Gf = Wf/A \quad (7)$$

$$FI = 0.01 \times \frac{Gf}{|m|} \quad (8)$$

Burada Gf toplam kırılma enerjisidir (J/m^2); Wf , kırılmanın yaptığı iş (J); A ligament alanıdır (ligament uzunluğu ile numune kalınlığının çarpımı); FI , Esneklik indeksidir; ve m , en yüksek yüke karşılık deplasman eğrisinin bükülme noktasındaki eğimdir. Yüksek FI değeri, yüksek çatlak direnci anlamına gelmektedir.

3 Bulgular

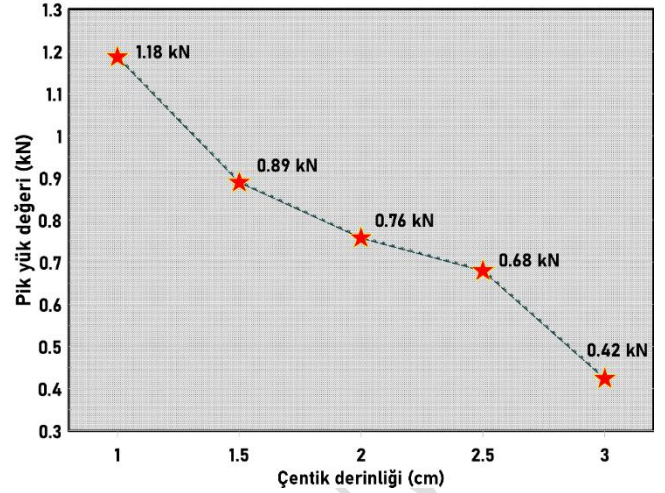
Sonlu eleman yöntemi ile modellenen 1, 1.5, 2, 2.5, 3 cm çentik boylarına sahip asfalt karışımların 0.5 mm/dk yükleme hızında gerçekleştirilen SCB deneyi sonuçları Şekil 8'de verilmiştir. Şekil 8, numunelerin yük-deplasman eğrilerini kapsamaktadır. J_c değeri ve FI değeri elde edilirken 0.5 mm/dk deplasman hızından elde edilen sonuçlar kullanılmıştır.



Şekil 8. Farklı çentik boylarına sahip asfalt karışımların yük-deformasyon eğrisi

Figure 8. Load-deformation curve of asphalt mixtures with different notch sizes

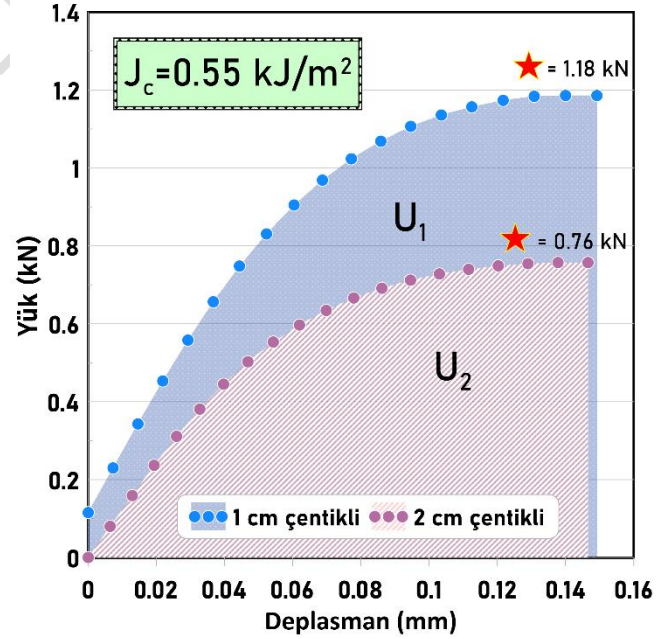
Tüm numunelere sabit 0.5 mm/dk deplasman hızında yükleme uygulanmış ve yük-deplasman eğrileri elde edilmiştir. Farklı çentik boylarının çatlak özelliklerine olan etkisini incelemek amacıyla çizilen Şekil 8 incelendiğinde SCB deneyinin başarıyla simüle edildiği görülmekte ve istenilen değerlendirme ölçütleri sağlanmaktadır. Tüm malzeme özellikleri ve diğer girdiler 25°C sıcaklıkta belirlenmiş ve modele bu şekilde aktarılmıştır. Deney sonuçları bu sıcaklıktaki mekanik davranış hakkında bilgi vermektedir. Görüldüğü üzere 25°C sıcaklıkta asfalt karışım belirgin bir viskoelastik davranış sergilemiş, ani kırılmalar göstermemiştir. Sonlu eleman modelinde viskoelastisitenin de yansıtılabilmiş olması sevindiricidir. Şekil 8'e göre çentik boyu azaldıkça maksimum yük değeri ve başlangıç rijitliği değeri artmıştır. Çentik boyu küçüldükçe kırılması gereken alan artmaktadır ve bu sebeple daha fazla enerji gerekmektedir [49]. Numunelerin pik yüklerinin detaylı gösterimi Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9. Deneye tabi tutulan numunelerin pik yük değerleri

Figure 9. Peak load values of samples

Şekil 9 incelendiğinde çentik derinliği arttıkça pik yük değerlerinin azaldığı görülmektedir. Deney sonuçlarına göre 1 cm çentik boyuna göre 1.5 cm, 2 cm, 2.5 cm ve 3 cm çentik boylarında pik yük değerlerinin sırasıyla 32.58%, 55.26%, 73.53%, 180.95% oranlarında azaldığı belirlenmiştir. Sonlu eleman modeli sonuçlarından elde edilen sonuçlar J_c değerinin hesaplanmasında kullanılmıştır. J -integral sonuçları Şekil 10'da verilmiştir.

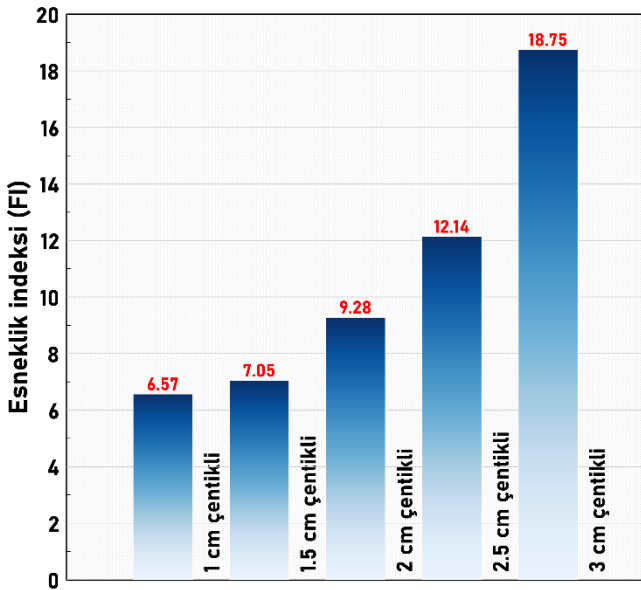


Şekil 10. J -integral hesap alanı ve değerleri

Figure 10. J -integral calculation area and values

Farklı çentik uzunluklarına sahip asfalt karışımların yük-deplasman eğrileri kullanılarak J_c değeri belirlenir. J_c , yani J -integral, farklı çentik uzunluklarına sahip numuneler arasındaki potansiyel enerji farkı olarak tanımlanır. Bir başka ifadeyle asfalt karışım numunelerinde çatlakın ilerlemesi için gereken dış enerjidir denebilir [15]. J_c hesaplanırken yük-deplasman eğrisinde maksimum yüke kadar olan alan dikkate alınır. Şekil 10'da 1 cm ve 2 cm çentik derinliğine sahip modellerin maksimum yüke kadar olan eğrileri verilmiştir. 1 cm ve 2 cm çentikli numuneler arasında yapılan J -integral

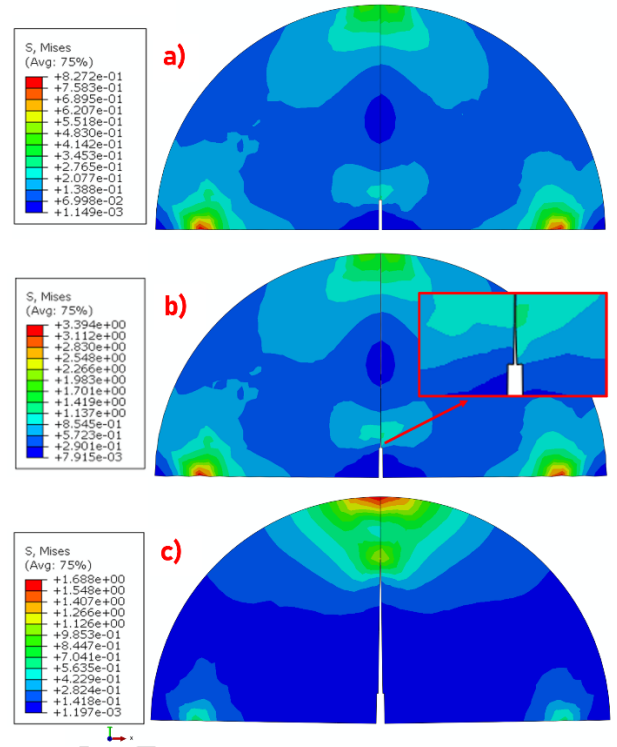
hesaplamaları sonucunda J_c değeri 0.55 kJ/m^2 bulunmuştur. ASTM 8044'e göre asfalt karışımlar için yeterli kırılma direnci değeri $0.50-0.60 \text{ kJ/m}^2$ olmalıdır. Elde edilen değer şartnamedeki değere göre idealdir. Farklı çentik boylarına sahip asfalt karışım modellerinin esneklik indeksi (FI) sonuçları Şekil 11'de verilmiştir. Şekil 11 incelendiğinde çentik boyunun artması ile FI değerlerinde düzenli bir artış meydana gelmiştir. Bir başka deyişle, ligament uzunluğunun azalması ile FI değerleri artmıştır da denebilir. Literatürde bazı çalışmalarda benzer sonuçlar bulunmuş fakat FI değerinin bir malzeme özelliği olduğu ve çentik boyu ile değişmemesi gerektiği öne sürülmüştür. Bu amaçla bazı düzeltme faktörleri önerilmiştir [50, 51]. FI değeri, malzemeye yönelik işlemler yapıldıktan sonra önemli bir değerlendirme ölçütü olarak karışımıza çıkmaktadır. Örneğin, bitüm modifikasyonunun, gradasyondaki değişimlerin veya sıcaklığın kırılma özellikleri üzerindeki etkilerinin incelenmesinde faydalı olmaktadır.



Şekil 11. Yarım daire numunelerinin esneklik indeksi sonuçları

Figure 11. Flexibility Index (FI) results of SCB samples

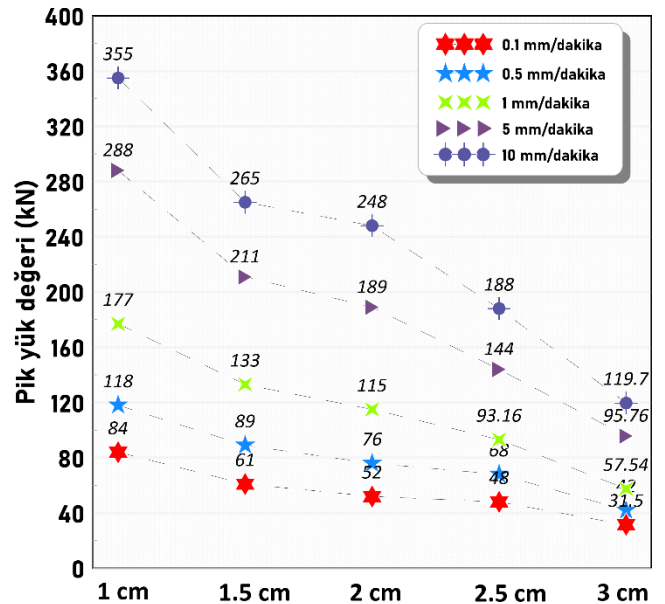
1 cm çentik boyuna sahip yarım daire numunesinde deney süresince meydana gelen gerilmeler Şekil 12'de verilmiştir. Şekil 12 incelendiğinde deney başladığında (a) monotonik yükleme ile birlikte numunede dengeli bir gerilme dağılımı olduğu, deney devamında (b) ise çentik açılan bölgede gerilme miktarının artarak kohesiv yırtılmanın başarıyla simüle edildiği görülmektedir. Numune yük alırken mesnet reaksiyon kuvvetleri oluşmuş, çatlak oluşumu gerçekleşip ilerleme tamamlandıktan (numune yırtıldıktan) sonra reaksiyon kuvvetleri azalmıştır. Bir başka deyişle numune kırılmış ve artık yük almamaktadır.



Şekil 12. Deney esnasında her bir aşamada gerilme dağılımları

Figure 12. Stress distributions at each stage during the experiment

Şekil 13'de sonlu eleman yöntemi yardımıyla 0.1, 0.5, 1, 5 ve 10 mm/dk deplasman hızlarında yükleme yapılmış asfalt karışım modellerinin sonuçları sunulmuştur. Şekil 13 incelendiğinde deplasman hızının artmasıyla pik yük değerlerinin arttığı görülmektedir. Daha önceki sonuçlara benzer şekilde tüm yükleme hızlarında çentik boyunu artmasıyla birlikte pik yük değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Deplasman hızının nispeten yüksek olduğu 5 mm/dk ve 10 mm/dk hızlarında çentik boyu arttıkça pik yük değerlerinin daha sert düşüşler sergilediği, deplasman hızı düştükçe pik yük değerlerindeki bu düşüşün daha yumuşak olduğu görülmüştür.



Şekil 13. Farklı deplasman hızlarında pik yük değerleri

Figure 13. Peak load values at different displacement speeds

Farklı değişkenlerin sonuçlara etkisini belirlemek için tepki yüzey metodolojisi (RSM) analizi yapılmıştır. Analiz, R2 değerlerinin ve program önerisinin karşılaştırılması esas alınarak kübik bir model olarak tasarlanmıştır. Kübik model için varyans analizi (ANOVA) ve uyum istatistiklerinin sonuçları sırasıyla Tablo 5 ve 6'da sunulmuştur. F değerinin 1'den büyük olması modelin anlamlı olduğunu ifade eder. Tablo 5'e göre F değeri (235.06), modelin anlamlı olduğunu göstermektedir. 0.0500'den küçük p değerleri, model

terimlerinin önemli olduğunu gösterir. Bu durumda A, AB, B², AB², A³ ve B³ önemli model terimleridir. Öngörülen R² 0.9705 olarak bulunmuştur, dolayısıyla tepe yük değerlerinin çok yüksek doğrulukla tahmin edildiği söylenebilir. R² değeri Eş. 9 yardımı ile bulunmuştur. Hassasiyet yeterliliği (AP), sinyal-gürültü oranını ölçer. Bu değer 4'ten büyük olması modelde yeterli bir sinyal olarak yorumlanır. Tablo 6'ya göre AP değeri (57.0291) ideal durum için fazlasıyla yeterlidir.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{gercek} - Y_{model})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_{gercek})^2} \quad (9)$$

Tablo 5. Pik yük için kübik model ANOVA sonuçları

Table 5. Cubic model ANOVA results for peak load

Kaynak	Kareler toplamı	Serbestlik derecesi (df)	Kareler ortalaması	F-değeri	p
Model	1.757E+05	9	19527.76	235.06	< 0.0001
A-Çentik derinliği	4380.31	1	4380.31	52.73	< 0.0001
B-Deplasman hızı	75.47	1	75.47	0.9085	0.3556
AB	11310.35	1	11310.35	136.15	< 0.0001
A ²	57.43	1	57.43	0.6913	0.4188
B ²	5848.44	1	5848.44	70.40	< 0.0001
A ² B	3.41	1	3.41	0.0411	0.8421
AB ²	1046.75	1	1046.75	12.60	0.0029
A ³	1150.27	1	1150.27	13.85	0.0020
B ³	2584.11	1	2584.11	31.11	< 0.0001
Kalan	1246.13	15	83.08		
Toplam	1.770E+05	24			

Tablo 6. Kübik modelin temel istatistiksel değerleri

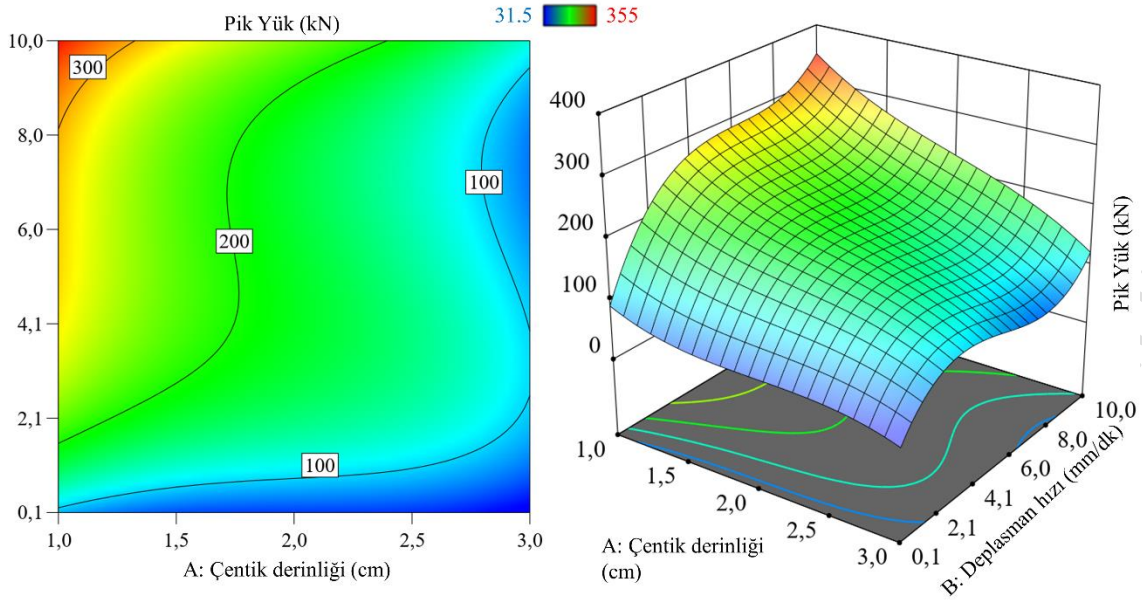
Table 6. Basic statistical values of the cubic model

Nitelik	Değer
Standart Sapma	9.11
Ortalama	133.95
C.V. %	6.80
R ²	0.9930
Düzenlenmiş R ²	0.9887
Tahmin R ²	0.9705
Hasassiyet Yeterliliği (AP)	57.0291

RSM yazılımı tarafından oluşturulan ikinci dereceden model denklemlerinden, test parametreleri ile tepe yük tepkileri arasındaki matematiksel ilişki aşağıda verilmiştir (Denklem 10). Gerçek faktörler açısından denklem, her bir faktörün verilen seviyeleri için yanıt hakkında tahminlerde bulunmak için kullanılabilir. Denklem 10'da "A" çentik derinliğini ve "B" deplasman hızını temsil eder.

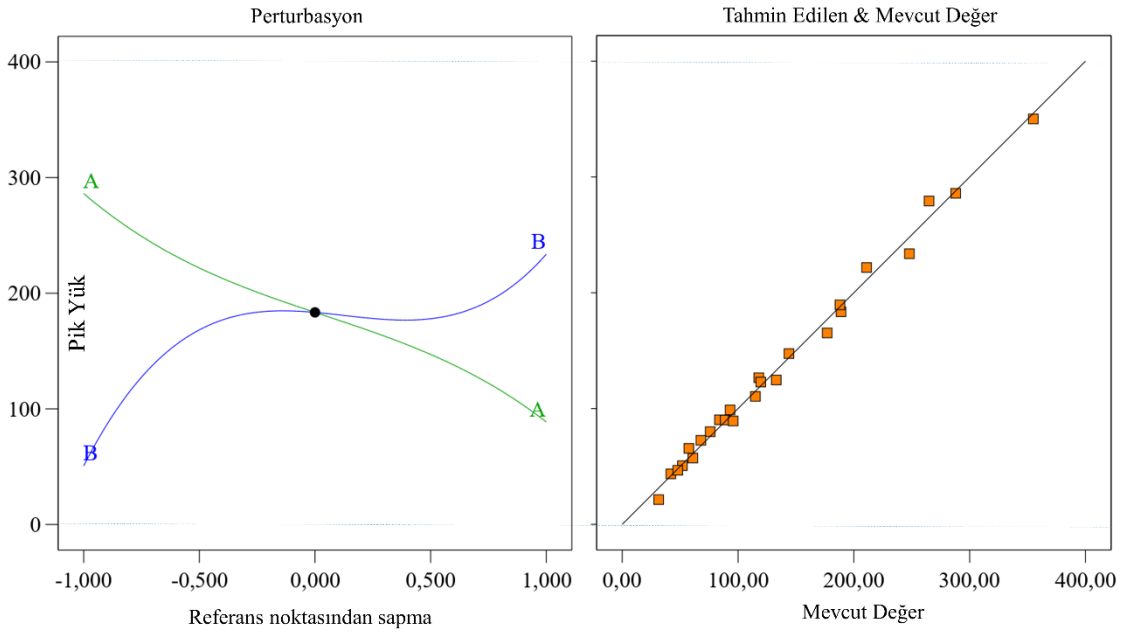
$$\begin{aligned} \text{Pik Yük} = & +320.56946 - 405.08966 \times A + \\ & 117.66638 \times B - 17.22084 \times A \times B + 197.02398 \times \\ & A^2 - 17.33345 \times B^2 - 0.234075 \times A^2 \times B + 1.00639 \times \\ & A \times B^2 - 31.97600 \times A^3 + 0.900222 \times B^3 \end{aligned} \quad (10)$$

Yüzey ve kontur grafikleri, yanıt üzerindeki iki faktörün etkilerini değerlendirmek için yaygın olarak kullanılır [52, 53]. RSM analizi sonucunda değişkenlerin etkilerinin 2 boyutlu ve 3 boyutlu gösterimleri Şekil 14'te verilmiştir. Kontur grafiğindeki renkler farklı yanıt değerlerini temsil etmektedir. Örneğin, maviden kırmızıya daha yüksek bir yanıt değeri gösterir. Şekil 14 incelendiğinde hem çentik derinliğinin hem de yer değiştirme hızının tepe yük değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. 3 boyutlu yüzey grafiği, yüksek yanıt değerlerinin elde edildiğini ve modelin yüksek bir anlamlılık düzeyine sahip olduğunu göstermektedir. İlgili parametrelere karşılık gelen tepe yük değerleri 2 boyutlu çizimden kolayca görülebilir ve her iki değişkenin tepe yük değerleri üzerindeki birleşik etkisi 3 boyutlu çizimden anlaşılabilir. 3 boyutlu çizimden çentik derinliğinin artmasıyla tepe yük değerlerinin azaldığı anlaşılmaktadır. Ayrıca deplasman hızının artması ile tepe yük değerlerindeki artış deneysel sonuçları doğrulamaktadır. Deneysel sonuçlarını etkileyen değişkenlerin ne ölçüde söz sahibi olduğunun bilinmesi faydalı olacaktır. Pertürbasyon eğrileri ve gerçek değerlere karşı tahmin edilen değerler Şekil 15'te çizilmiştir.



Şekil 14. 2 boyutlu ve 3 boyutlu tepki yüzey grafikleri

Figure 14. 2D and 3D response surface plots



Şekil 15. Değişkenlerin perturbasyon eğrileri ve tahmin edilene karşılık mevcut değerler

Figure 15. Perturbation curves of variables and predicted vs. actual values

Perturbasyon eğrileri, tüm değişkenlerin etkisinin bir göstergesidir. Modelde kullanılan iki değişken pik yük üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Ancak çentik derinliğinin pik yük üzerinde daha fazla etkiye sahip olduğu ve deplasman hızının belirli bir değerden sonra azaldığı ve daha sonra tekrar arttığı tespit edilmiştir. Şekil 14'te, gerçek değerler ile modelin tahmin edilen değerleri arasındaki ilişki incelendiğinde son derece doğru tahmin performansı elde edildiği görülmüştür.

4 Sonuçlar

- Bu çalışmada yarım daire şeklinde asfalt karışım numuneleri elde edilerek kırılma parametreleri belirlenmiştir. Deneysel olarak belirlenen malzeme özellikleri ve kırılma parametreleri elde edildikten sonra sonlu eleman yazılımı ABAQUS yardımıyla 1 cm, 1.5 cm, 2 cm, 2.5 cm ve 3 cm olmak üzere beş farklı çentik boyuna sahip yarım daire şeklinde asfalt karışım modelleri oluşturulmuştur. Numuneler

üzerinde yardımıyla yarım daire eğilme (SCB) deneyi simüle edilerek farklı çentik boylarının kırılma özellikleri üzerinde etkisi değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir:

- Asfalt karışımının viskoelastik özellikleri relaxation modulus değerleri ile karakterize edilmiştir. Sonlu eleman yazılımı ABAQUS'te viskoelastik özellikler başarıyla simüle edilmiş, SCB deneyi sonuçlarında viskoelastik özellikler belirgin olmuştur. Ani kırılmalar meydana gelmemiştir.
- Deney simülasyonu sonuçlarına göre çentik boyu arttıkça asfalt karışımların maksimum yük değerlerinin azaldığı belirlenmiştir.
- Çentik boyunun azalması, kırılması gereken alanın artması anlamına gelmektedir. Bu sebeple kırılma enerjisi de yükselmektedir.
- Farklı deplasman hızlarında gerçekleştirilen sonlu eleman simülasyonu sonuçlarına göre deplasman hızının artmasıyla pik yük değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Yüksek deplasman hızlarında çentik boyunun artmasıyla daha sert düşüşler görülmüş, hızın düşmesiyle bu düşüş yumuşamıştır.
- J-integral yöntemiyle yarım daire şeklindeki asfalt karışımlarının kırılma direnci araştırılmıştır. Sonuçlara göre 0.55 kJ/m^2 bulunan J_c değeri, standardın önerdiği $0.50-0.60 \text{ kJ/m}^2$ aralığına göre ideal bir değer olarak değerlendirilmiştir.
- Asfalt karışımların kırılma özelliklerini değerlendirmek amacıyla Flexibility Index (FI) değerleri elde edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, çentik boyunun artması ile FI değerlerinin arttığı belirlenmiştir.
- Çentik boyunun artması karışım numunesinde ligament uzunluğunun azalması anlamına gelmektedir. Bu da FI değerlerindeki artışın sebeplerindendir.
- Tepki yüzeyi metodolojisi analizi, çentik derinliğinin, tepe yük değerlerinde yer değiştirme oranından daha etkili olduğunu ortaya koydu.
- Genel olarak, asfalt karışımlar hakkında araştırmalar yapmak kompleks yapıları, laboratuvarında maliyetli numune üretim süreci, pahalı deney düzenekleri gibi sebeplerden dolayı zor olabilmektedir. Bu sebeple sonlu eleman yazılımları kullanılarak hem zamandan hem de maliyetten tasarruf edilebilmektedir. Gelecekteki çalışmalarda çeşitli katkılar içeren ve farklı gradasyona sahip asfalt karışımların mikro modelleri oluşturularak sonlu eleman analizi yapılması planlanmaktadır.

5 Conclusions

Asphalt mixture SCB models were obtained in this study, and fracture parameters were determined. After the experimentally determined material properties and fracture parameters, semi-circular asphalt mixture models with five different notch lengths, 1 cm, 1.5 cm, 2 cm, 2.5 cm, and 3 cm, were created with the help of the finite element software ABAQUS. The effect of different notch lengths and displacement rates on the fracture properties was evaluated

by simulating the semi-circular bending (SCB) test. The results obtained are as follows:

- The relaxation modulus characterized the viscoelastic properties of the asphalt mixture. Viscoelastic properties were successfully simulated in the finite element software ABAQUS, and viscoelastic properties were evident in the results of the SCB experiment. No sudden ruptures occurred.
- According to the finite element results, it was determined that the maximum load values of asphalt mixtures decreased as the notch depth increased.
- Decrease in the notch depth means an increase in the area to be broken. Therefore, the fracture energy also increases.
- According to the finite element simulation results, it was determined that the peak load values increased with the increase in the displacement rate. At high displacement rates, sharper decreases were observed with the increase of the notch depth, and this decrease softened with the decrease in rate.
- The J-integral method investigated the fracture resistance of semi-circular asphalt mixtures. According to the results, the J_c value was found to be 0.55 kJ/m^2 , and it was evaluated as an excellent value according to the $0.50-0.60 \text{ kJ/m}^2$ range recommended by the standard.
- Flexibility Index (FI) values were obtained to evaluate the fracture properties of asphalt mixtures. When the results were examined, it was determined that the FI values increased with the increase of notch length.
- An increase in notch length means a decrease in ligament length in the mixture sample. This is one of the reasons for the increase in FI values.
- Response surface methodology analysis revealed that the notch depth is more effective on peak load values than displacement rate.

6 Yazar katkı beyanı

Çalışmada, Yazar 1 fikrinin oluşumu, literatür taraması ve analizi üzerine; Yazar 2, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi, kullanılan malzemelerin temini ve sonuçların analizi üzerine; Yazar 3, makalenin içeriği, imla ve denetimi üzerine; Yazar 4, analiz sonuçlarının tasarımı, analizine ve değerlendirilmesi üzerine katkıda bulunmuştur.

7 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

8 Kaynaklar

- [1] Shafabakhsh G, Sadeghnejad M, Ebrahimnia R. "Fracture resistance of asphalt mixtures under mixed-mode I/II loading at low-temperature: Without and with nano SiO₂". Construction and Building Materials, 266: 120954, 2021.
- [2] Arslan D, Gürü M, Çubuk MK. "Improvement of

- Bitumen and Bituminous Mixtures Performance Properties with Organic Based Zincphosphate Compound". *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 27(2): 459–466, 2012.
- [3] Arslan D, Gürü M, Çubuk MK, Çubuk M, Farshbafian FK. "Investigation of rheological and mechanical properties of kaolin-clay modified bitumen". *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35(3): 1409–1419, 2020.
- [4] Hunter R, Self A, Read J. *The Shell Bitumen Handbook*, 6th edition. 2015.
- [5] Yalçın E. "Investigation of physical, chemical and rheological properties of bituminous binders modified with different rejuvenators". *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 37(1): 497–510, 2021.
- [6] Motevalizadeh SM, Rooholamini H. "Cohesive zone modeling of EAF slag-included asphalt mixtures in fracture modes I and II". *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 112: 102918, 2021.
- [7] Aliha MRM, Jafari Haghghat Pour P. "Fracture resistance study for hot mix asphalt mixture under out of plane sliding mode". *Engineering Fracture Mechanics*, 238: 107230, 2020.
- [8] Öcal A, Gürü M, Karacasu M. "Improvement of bitumen performance properties with nano magnesium spinel and colemanite". *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33(3): 939–951, 2018.
- [9] Wei H, Li J, Wang F, Zheng J, Tao Y, Zhang Y. "Numerical investigation on fracture evolution of asphalt mixture compared with acoustic emission". *International Journal of Pavement Engineering*, 1–11, 2021.
- [10] Mota R V., Kuchiishi AK, Takahashi MM, de Souza G, Camargo FF, Bessa IS, *et al.* "Effect of Binder Rheology and Aggregate Gradation on the Permanent Deformation of Asphalt Mixtures". *International Journal of Civil Engineering*, 19(7): 777–787, 2021.
- [11] Rahbar-Rastegar R, Zhang R, Sias JE, Dave E V. "Evaluation of laboratory ageing procedures on cracking performance of asphalt mixtures". *Road Materials and Pavement Design*, 20: S647–S662, 2019.
- [12] Pirmohammad S, Abdi M, Ayatollahi MR. "Effect of support type on the fracture toughness and energy of asphalt concrete at different temperature conditions". *Engineering Fracture Mechanics*, 254: 107921, 2021.
- [13] Pirmohammad S, Majd Shokorlou Y, Amani B. "Fracture Resistance of HMA Mixtures Modified with Nanoclay and Nano-Al₂O₃". *Journal of Testing and Evaluation*, 47(5): 20180919, 2019.
- [14] Fakhri M, Ghanizadeh AR, Omrani H. "Comparison of Fatigue Resistance of HMA and WMA Mixtures Modified by SBS". *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 104: 168–177, 2013.
- [15] Song W, Xu Z, Xu F, Wu H, Yin J. "Fracture investigation of asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement using an equivalent energy approach". *Engineering Fracture Mechanics*, 253: 107892, 2021.
- [16] Elseifi MA, Mohammad LN, Ying H, Cooper S. "Modeling and evaluation of the cracking resistance of asphalt mixtures using the semi-circular bending test at intermediate temperatures". *Road Materials and Pavement Design*, 13: 124–139, 2012.
- [17] Cannone Falchetto A, Moon KH, Lee CB, Wistuba MP. "Correlation of low temperature fracture and strength properties between SCB and IDT tests using a simple 2D FEM approach". *Road Materials and Pavement Design*, 18: 329–338, 2017.
- [18] Wang H, Zhang C, Yang L, You Z. "Study on the rubber-modified asphalt mixtures' cracking propagation using the extended finite element method". *Construction and Building Materials*, 47: 223–230, 2013.
- [19] Najjar S, Mohammadzadeh Moghaddam A, Sahaf A, Rasaei Yazdani M, Delarami A. "Evaluation of the mixed mode (I/II) fracture toughness of cement emulsified asphalt mortar (CRTS-II) using mixture design of experiments". *Construction and Building Materials*, 225: 812–828, 2019.
- [20] Serin S, Emiroğlu M, Gönül VE. "Investigation of the fracture energy of hot mixtures asphalt incorporating metallic wastes via semi-circular bending test". *Construction and Building Materials*, 300: 124006, 2021.
- [21] Chong KP, Kuruppu MD. "New specimen for fracture toughness determination for rock and other materials". *International Journal of Fracture*, 26(2): R59–R62, 1984.
- [22] Biligiri KP, Said S, Hakim H. "Asphalt mixtures' crack propagation assessment using semi-circular bending tests". *International Journal of Pavement Research and Technology*, 5(4): 209–217, 2012.
- [23] Saha G, Biligiri KP. "Fracture properties of asphalt mixtures using semi-circular bending test: A state-of-the-art review and future research". *Construction and Building Materials*, 105: 103–112, 2016.
- [24] Yang S, Jiang J, Leng Z, Ni F. "Feasibility and performance of the Semi-circular Bending test in evaluating the low-temperature performance of asphalt mortar". *Construction and Building Materials*, 269: 121305, 2021.
- [25] Saha G, Biligiri KP. "Fracture damage evaluation of asphalt mixtures using Semi-Circular Bending test based on fracture energy approach". *Engineering Fracture Mechanics*, 142: 154–169, 2015.
- [26] Li X-J, Marasteanu MO. "Using Semi Circular Bending Test to Evaluate Low Temperature Fracture Resistance for Asphalt Concrete". *Experimental Mechanics*, 50(7): 867–876, 2010.
- [27] Imaninasab R, Bakhshi B, Shirini B. "Rutting performance of rubberized porous asphalt using Finite Element Method (FEM)". *Construction and Building Materials*, 106: 382–391, 2016.
- [28] Al-Qudsi A, Cannone Falchetto A, Wang D, Büchler S, Kim YS, Wistuba MP. "Finite element cohesive fracture modeling of asphalt mixture based on the semi-circular bending (SCB) test and self-affine fractal cracks at low temperatures". *Cold Regions Science*

- and Technology, 169: 102916, 2020.
- [29] Zhang X, Liu J. "Viscoelastic creep properties and mesostructure modeling of basalt fiber-reinforced asphalt concrete". *Construction and Building Materials*, 259: 119680, 2020.
- [30] Lancaster IM, Khalid HA, Kougioumtzoglou IA. "Extended FEM modelling of crack propagation using the semi-circular bending test". *Construction and Building Materials*, 48: 270-277, 2013.
- [31] Safazadeh F, Romero P, Mohammad Asib AS, VanFrank K. "Methods to evaluate intermediate temperature properties of asphalt mixtures by the semi-circular bending (SCB) test". *Road Materials and Pavement Design*, 1-13, 2021.
- [32] Hofman R. "Semi-circular bending test to assess the resistance against crack growth". In *Sixth International RILEM Symposium on Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials*. RILEM Publications SARL, pp. 257-263 (2003).
- [33] Wang J, Qin Y, Xu J, Zeng W, Zhang Y, Wang W, *et al.* "Crack resistance investigation of mixtures with reclaimed SBS modified asphalt pavement using the SCB and DSCT tests". *Construction and Building Materials*, 265: 120365, 2020.
- [34] Jiang J, Ni F, Wu F, Sadek H, Lv Q. "Evaluation of the healing potential of asphalt mixtures based on a modified semi-circular bending test". *Construction and Building Materials*, 196: 284-294, 2019.
- [35] Molenaar JMM. "Performance related characterisation of the mechanical behaviour of asphalt mixtures", (2003).
- [36] Mohammad LN, Kim M, Elseifi M. "Characterization of Asphalt Mixture's Fracture Resistance Using the Semi-Circular Bending (SCB) Test". Presented at the (2012).
- [37] Shu X, Huang B, Vukosavljevic D. "Evaluation of Cracking Resistance of Recycled Asphalt Mixture Using Semi-Circular Bending Test". In *Paving Materials and Pavement Analysis*. American Society of Civil Engineers, pp. 58-65 (2010).
- [38] Mohammad L, Saadeh S, Cooper S. "Evaluation of Asphalt Mixtures Containing Sasobit Warm Mix Additive". In *GeoCongress 2008*. American Society of Civil Engineers, pp. 1016-1023 (2008).
- [39] Kabir MS. "Effect of Hydrated Lime on the Laboratory Performance of Superpave Mixtures", (2008).
- [40] ABAQUS. *Abaqus 6.14 Theory Guide*. Dassault Systèmes Simulia Corp., 2014.
- [41] ABAQUS. *Abaqus 6.14 User's Guide*. Dassault Systèmes Simulia Corp., 2014.
- [42] Li G, Li C. "Linking bilinear traction law parameters to cohesive zone length for laminated composites and bonded joints". *Advances in aircraft and spacecraft science*, 1(2): 177-196, 2014.
- [43] Pirmohammad S, Khoramishad H, Ayatollahi MR. "Effects of asphalt concrete characteristics on cohesive zone model parameters of hot mix asphalt mixtures". *Canadian Journal of Civil Engineering*, 43(3): 226-232, 2016.
- [44] Aragão FTS, Kim Y-R, Lee J, Allen DH. "Micromechanical Model for Heterogeneous Asphalt Concrete Mixtures Subjected to Fracture Failure". *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(1): 30-38, 2011.
- [45] Ozer H, Al-Qadi IL, Lambros J, El-Khatib A, Singhvi P, Doll B. "Development of the fracture-based flexibility index for asphalt concrete cracking potential using modified semi-circle bending test parameters". *Construction and Building Materials*, 115: 390-401, 2016.
- [46] Lu DX, Saleh M, Nguyen NHT. "Effect of rejuvenator and mixing methods on behaviour of warm mix asphalt containing high RAP content". *Construction and Building Materials*, 197: 792-802, 2019.
- [47] Al-Qadi IL, Ozer H, Lambros J, Khatib A El, Singhvi P, Khan T, *et al.* "Testing Protocols to Ensure Performance of High Asphalt Binder Replacement Mixes Using RAP and RAS". *Civil Engineering Studies*, Illinois Center for Transportation Series, 2015.
- [48] Kaseer F, Yin F, Arámbula-Mercado E, Epps Martin A, Daniel JS, Salari S. "Development of an index to evaluate the cracking potential of asphalt mixtures using the semi-circular bending test". *Construction and Building Materials*, 167: 286-298, 2018.
- [49] Nsengiyumva G, Kim Y-R, You T. "Development of a Semicircular Bend (SCB) Test Method for Performance Testing of Nebraska Asphalt Mixtures". 1(15): 171, 2015.
- [50] Rivera-Perez J, Ozer H, Al-Qadi IL. "Impact of Specimen Configuration and Characteristics on Illinois Flexibility Index". *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2672(28): 383-393, 2018.
- [51] Lu DX, Saleh M, Nguyen NHT. "Evaluation of Fracture and Fatigue Cracking Characterization Ability of Nonstandardized Semicircular-Bending Test for Asphalt Concrete". *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(8): 04020215, 2020.
- [52] Wang X, Fan T. "Optimization in Process Parameters of Calcium Sulfate Whisker Modified Asphalt Using Response Surface Methodology". *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 45(4): 2841-2851, 2021.
- [53] Khodaii A, Mousavi ES, Khedmati M, Iranitalab A. "Identification of dominant parameters for stripping potential in warm mix asphalt using response surface methodology". *Materials and Structures*, 49(6): 2425-2437, 2016.