



EĞİK ÇATLAK İÇEREN ÇELİK PLAKANIN YORULMA DAVRANIŞININ FARKLI HASAR MODELLERİYLE TAHMİNİ

Oğuzhan DEMİR

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bilecik, TÜRKİYE
oguzhan.demir@bilecik.edu.tr

(Geliş/Received: 03.02.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 15.03.2020)

ÖZ: Çoğu mühendislik yapı ve uygulamalarında malzeme, imalat yöntemi, çevresel faktörler veya yapıya etkiyen yükleme türleri gibi birçok parametreden kaynaklı çatlak veya kırılma problemleri ile karşılaşmaktadır. Özellikle yüksek teknoloji gerektiren ve Ar-Ge harcamalarının yüksek olduğu bazı kritik yapılarda ise, bu problemler çok büyük bir sorun haline gelebilmektedir. Yapıda bulunan bu çatlaklar bazen emniyetli bir boyuta kadar yapının içerisinde kalabilmekte veya bazen ani bir kırılma ile büyük maddi hasarlara, hatta bazı durumlarda ciddi can kayıplarına da neden olabilmektedirler. Bu tür olumsuz durumların önüne geçmek için, yapıda var olan çatlaklar ile yapının fonksiyonunu ne kadar süre ile güvenli bir şekilde devam ettirebileceğinin, bir başka deyişle hasarlı yapının emniyetli kalan ömrünün tespiti için kırılma parametrelerinin hassas ve doğru bir şekilde hesaplanması gerekmektedir. Ayrıca farklı yükleme koşulları altında hasarlı yapının nasıl davranacağına bilinmesi ve tasarım aşamasında bu durumlar göz önünde bulundurularak tasarımda iyileştirmeye gidilmesi, oluşması muhtemel hasarları minimize etme imkanı sunmaktadır. Bu çalışmada, karışık modlu yüklere maruz çatlaklı yapıların kırılma ve çatlak ilerleme davranışının tahminine yönelik olarak yakın zamanda geliştirilmiş olan Demir ve Ayhan hasar modelinin uygulanabilirliği literatürdeki mevcut hasar modelleri ile birlikte değerlendirilmiştir. Alüminyum malzeme kullanılarak farklı geometri ve boyutlara sahip test numuneleri ile geliştirilen Demir ve Ayhan hasar modelinin çelik numuneler için de kullanılabilir ve uygulanabilir olduğu gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yorulma, Çatlak ilerleme modeli, Yorulma ömrü tahmini

Prediction of Fatigue Behavior of Steel Plate with Inclined Crack Using Different Damage Models

ABSTRACT: Cracks or fracture problems are encountered in many engineering structures and applications, due to many parameters such as material, manufacturing method, environmental factors or loading types affecting the structure. Especially in some critical structures where high technology is needed and research and development expenditures are high, these problems may become extremely vital. These cracks can remain in the structure until a certain safe size or sometimes with a sudden fracture may cause serious financial losses, leading to serious accidents and even in some cases may cause loss of lives. To prevent such negative situations and to ensure that cracked structures function safely i.e., to determine fail-safe/remaining life assessment of a damaged structure, fracture parameters must be calculated accurately and precisely. In addition, knowing how the cracked structure will behave under different loading conditions and accordingly improving the design during the design stage enable minimization of possible damages. In this study, the applicability of the recently developed Demir and Ayhan damage model for estimating the fracture and crack propagation behavior of cracked structures subjected to mixed mode loads was evaluated together with the existing damage models in the literature. It is shown that the Demir and Ayhan damage model, which was developed using aluminum test specimens having different geometries and dimensions, can also be used and applied for steel specimens.

Key Words: *Fatigue, Crack growth criterion, Prediction of fatigue life.*

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Endüstride karşılaşılan yapısal hasarların ana nedenlerinden biri olan yorulma çatlakları, modern yapısal malzemelerin tasarımı ve performansı açısından büyük önem taşımaktadır. Literatürde yer alan kırılma ve çatlak ilerleme problemleri ile ilgili birçok çalışma, yükleme yönüne dik doğrultuda bulunan başlangıç çatlağının yükleme sonrası yine aynı doğrultuda ilerlediği tekil mod-I yüklerine maruz kalan yapılara odaklanmıştır. Ancak, uygulamada görülen birçok kırılma mekaniği problemi, sadece tekil mod-I yükleme koşulları dikkate alınarak yeterli şekilde analiz edilebilse de, hala mod-I analiz yaklaşımlarının yeterli olmadığı karışık mod yüklerine maruz kalan birçok problem vardır. Ayrıca, tekil mod-I yükleme durumu pratikte her zaman ortaya çıkmamakta ve birçok durumda çatlaklar, yük yönünün çatlak düzlemine açılmalta etkilediği karışık mod yüklerine maruz kalmaktadırlar.

Günümüzde karşılaşılan birçok mühendislik probleminde, çok eksenli yükler, çatlak yüzeylerinin yükleme doğrultusuna göre açılmalta yönelimleri, farklı sınır koşulları türleri ve kombinasyonları gibi farklı nedenlerden dolayı karışık modlu kırılma ve çatlak ilerleme problemleri ile karşılaşılmaktadır. En temel karışık mod kırılma tipi, hem mod-I (açma) hem de mod-II (kayma) yüklerinin çatlak ucuna etki ettiği düzlem içi karışık mod-I/II yükleme durumudur. Bir düzlemde karışık mod çatlağının yönlenmesi üzerine ilk çalışmalar 1960' lı yılların başlarında Erdoğan ve Sih'in çalışmasıyla başlamış olsa da (Erdoğan ve Sih, 1963), iki boyutlu karışık modlu kırılma ile ilgili problemlere özellikle son yıllarda çok daha fazla önem verilmiştir. Karışık mod yük altındaki çatlak ilerlemesi sırasında, çatlak ilerleme ömrü kırılma modlarının baskınlığına göre değişmektedir. Bu nedenle, ömür tahminlerinin doğru bir şekilde değerlendirilebilmesi için, karışık mod yükleme koşulları altında kırılma modlarının eşdeğer karşılığı olan eşdeğer gerilme şiddet faktörünün (ΔK_{es}) hassas bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Literatürde karışık mod-I/II problemleri için önerilen ΔK_{es} değerinin tespitine yönelik farklı hasar modelleri bulunmaktadır. Maksimum teğetsel gerilme (maximum tangential stress-MTS) modeli (Erdoğan ve Sih, 1963), minimum gerinim enerji yoğunluğu (minimum strain energy density-SED) modeli (Sih ve Macdonald, 1974), maksimum enerji salınım oranı (maximum energy release rate-MERR) modeli (Nuismer, 1975; Hussain ve diğ., 1974), maksimum teğetsel gerinim (maximum tangential strain-MTSN) modeli (Chang, 1981) karışık mod-I / II yükleme koşullarında malzemelerin kırılma davranışını anlamak için kullanılan en yaygın modellerden bazılarıdır. Ayrıca, Tanaka (1974), Pook (1989), Koo ve Choy (1991) ve Richard (Richard, 1985; Sander ve Richard, 2005; 2006) düzlem içi karışık mod-I/II problemleri için eşdeğer gerilme şiddet faktörünü tanımlayan farklı modeller önermişlerdir.

Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde farklı malzemelerden yapılmış değişik tip numuneler kullanılarak özellikle son yıllarda çok çeşitli deneysel ve nümerik analizlerin gerçekleştirildiği görülmektedir. Bunlar arasında; disk tipi numuneler (Al-Shayea, 2005; Aliha ve diğ., 2014; Akbardoost ve Rastin, 2015), üç veya dört noktalı eğme numuneleri (Aliha ve diğ., 2009; Marsavina ve diğ., 2013), açılı köşe veya merkezi çatlak içeren dikdörtgenel numuneler (Seed ve Nowell, 1994; Ayatollahi ve Aliha, 2009) ve özel tutucuları ile birlikte tasarlanarak tek eksenli bir yükleme cihazında iki eksenli yükleme oluşturmak için tasarlanan kelebek tipi numuneler (Katanchi ve diğ., 2018), Arcan numunesi (Arcan ve diğ., 1978) ve Richard ve ekibinin geliştirmiş olduğu kompakt çekme kayma (compact tension shear-CTS) numunesi (Richard ve Benitz, 1983; Sander ve Richard, 2006; Jiang ve diğ., 2009; Kim ve Chung, 2012; Patle ve diğ., 2012; Zhao ve Guo, 2012; Gouda ve diğ., 2013) en yaygın kullanılan numune tipleridir. Malzeme olarak ise genellikle, soda kireç camı (soda lime glass) (Ayatollahi ve Aliha, 2009; Mirsayar ve diğ., 2017), seramik (Aliha ve Ayatollahi, 2012; Zabihi ve diğ., 2018), çok kristalli grafit (Ayatollahi ve Aliha, 2008), polimetil metakrilat (Polymethylmethacrylate-PMMA) (Ayatollahi ve diğ., 2006; Hernandez-Gomez ve diğ., 2004; Mirsayar, 2015; Hou ve diğ., 2019; Mousavi ve diğ., 2020), beton (Seitl ve diğ., 2018) ve mermer (Saghafi ve diğ., 2010; Aliha ve diğ., 2012; 2013) gibi gevrek yapıdaki malzemelerin karışık mod-I/II yüklemesi altında kırılma davranışları incelenmiştir. Bu çalışmalarda gerçekleştirilen test ve analizlerin sonuçları literatürde bulunan mevcut hasar modelleri ile karşılaştırılarak elde edilen sonuçlar

değerlendirilmiştir. Bu çalışmaların çoğunda hasar modellerinin test sonuçlarını karşılamadığı görülerek mevcut modeller revize edilmiş ve test sonuçlarını karşılayan güncellenmiş yeni modeller önerilmiştir. Örneğin; Saghafi ve diğ. (2010) mermer taşından hazırlanan asimetric yarı dairesel eğme numunesine üç nokta eğme yükü altında kırılma tokluğu testi gerçekleştirerek MTS modeli ile karşılaştırmış ve modifiye edilmiş bir MTS hasar modeli önermişlerdir. Mirsayar (2015) açılı çatlağa sahip polimetil metakrilat malzemesinden yapılmış karesel plakanın karışık mod kırılma tokluğu test sonuçlarını MTSN hasar modeli ile karşılaştırmış ve yeni bir modifiye edilmiş MTSN modeli geliştirmiştir. Hou ve diğ. (2019) mermer taşı ve PMMA gibi farklı malzeme ve numune tiplerini kullanarak gerçekleştirdikleri kırılma tokluğu test sonuçlarını SED ve MTS hasar modelleri ile karşılaştırmış ve yeni bir modifiye MTSN modeli önermişlerdir. Mirsayar ve diğ. (2017) soda kireç camından yapılmış dairesel disk tipi numune kullanarak test sonuçlarını MTS, SED ve MTSN modelleri ile karşılaştırmış ve MTSN modelini genişleterek yeni bir hasar modeli geliştirmişlerdir.

Yukarıda verilen literatür özetinden görüldüğü üzere, geniş bir yelpazede bulunan karışık mod-I/II kırılma ve çatlak ilerleme problemleri ile ilgili literatürde halen genel kabul görmüş bir hasar modeli bulunmamaktadır. Ayrıca mevcut hasar modellerinin incelendiği literatürde yer alan çoğu çalışmada yapıların sadece kırılma davranışının analiz edildiği görülmektedir. Yorulma yükü altında yapıların çatlak ilerleme davranışının incelenerek mevcut hasar modellerinin değerlendirildiği sınırlı sayıda çalışmanın olduğu görülmektedir. Yazar ve ark. tarafından (Demir ve diğ., 2016; 2017; 2018; Ayhan ve Demir, 2016) farklı tipte numuneler kullanılarak Al 7075-T651 alüminyum alaşımlı malzeme üzerinde yakın zamanda geniş spektrumlu karışık mod-I/II yüklemeye şartları içeren birçok nümerik ve deneysel çalışma gerçekleştirilmiş, elde edilen sonuçlar mevcut hasar modelleri ile karşılaştırılmış ve literatüre yeni numune, tutucu modelleri ve hasar modelleri önerilmiştir. Deney ve analizlerde numune üzerinde eşzamanlı olarak farklı oranlarda mod-I ve mod-II yüklerinin oluşmasını sağlamak için numunelere uygun özel tutucular kullanılmıştır. Tutucular üzerinde 15'er derecelik değişen açılarda yüklemeye delikleri oluşturularak farklı yüklemeye açılarında kırılma testleri gerçekleştirilmiştir. Testlerden elde edilen kopma yükleri, analizlerden elde edilen K_I , K_{II} ve K_{III} gerilme şiddet faktörleri ve kırılma esnasında çatlakın izlediği ilerleme doğrultuları kullanılarak hem karışık mod-I/II yüklemeye durumları hem de karışık mod-I/II/III yüklemeye durumları için yeni hasar modelleri önerilmiştir. Önerilen hasar modellerinin literatürde kabul görebilmesi için farklı numune, malzeme, yüklemeye ve sınır koşullarına maruz çeşitli yapılar üzerinde de test edilmesi gerekmektedir. Nitekim Sajith ve diğ. (2019a; 2019b; 2020) Al 2024-T3, Al 6061-T6 ve AISI 316 paslanmaz çeliği gibi farklı malzemeler kullanılarak gerçekleştirilen karışık mod-I/II çatlak ilerleme deneylerindeki yorulma ömürlerini literatürdeki mevcut hasar modelleri ve Demir ve diğ. (2017; 2018) tarafından önerilen hasar modeli ile tahmin ederek sonuçları karşılaştırmış ve Demir ve diğ. tarafından geliştirilen hasar modelinin deney sonuçları ile örtüşen tahminlerde bulunduğunu belirtmişlerdir. Önerilen çalışmada, Demir ve diğ. tarafından karışık mod-I/II kırılma tokluğu test sonuçları kullanılarak geliştirilen hasar modelinin farklı malzeme ve yüklemeye koşullarına sahip yapılara uygulanabilirliğinin gösterilmesi için, Chen ve diğ. (2018) tarafından gerçekleştirilen nümerik çalışmadaki veriler referans alınarak farklı hasar modellerine göre çatlak ilerleme davranışı analiz edilmiştir.

ÇATLAK İLERLEME MODELİ (CRACK GROWTH MODEL)

Başlangıç çatlakına sahip bir yapının bir sonraki çatlak ilerleme doğrultusu ve profilinin tahmini için, çatlak ucu boyunca sıralanan her bir düğüm noktasına ait gerilme şiddet faktörleri hesaplandıktan sonra, belirlenen bir çatlak ilerleme modeli kullanılarak bir sonraki çatlak ucunun ilerleme doğrultusu ve profili tahmin edilmektedir. Bu çalışmada çatlak ilerleme ömrünün tahmini için çatlak ilerleme modeli olarak Denklem (1)'de verilen Paris-Erdoğan (Paris ve diğ., 1961; Paris ve Erdoğan, 1963) denklemi kullanılmıştır.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_{e\varphi})^n \quad (1)$$

Denklem (1)'de yer alan, a çatlak uzunluğu, N çevrim sayısı, $\Delta K_{eş}$ karışık mod yorulma yüklemesi altında eşdeğer gerilme şiddet faktörü değer aralığı, C ve n ise çatlak ilerlemesi ile ilişkili malzeme özellikleridir. Eğer yükleme durumu basit mod-I yüklemesi ise, $\Delta K_{eş}$ herhangi bir düğüm noktası için mod-I gerilme şiddet faktörü değer aralığını temsil etmektedir. Fakat yükleme durumu karışık modlu yükleme ise $\Delta K_{eş}$ herhangi bir düğüm noktasında karışık modlu yükün neticesinde ortaya çıkan kırılma modlarının eşdeğerine karşılık gelen bir değer aralığını ifade etmektedir. Bu çalışmada karışık mod-I/II yükleme durumu incelendiği için, denklemdeki $\Delta K_{eş}$ herhangi bir düğüm noktasında oluşan mod-I ve mod-II değerlerine karşılık gelen bir eşdeğer gerilme şiddet faktörü değer aralığını ifade etmektedir. Eşdeğer gerilme şiddet faktörünün tahmini için Demir ve ark. (2017; 2018) tarafından yakın zaman önce geliştirilen ve Denklem (2) ile verilen eşitlik kullanılmıştır.

$$K_{eş} = (a \cdot K_I^4 + b \cdot K_{II}^4 + c \cdot K_I^2 \cdot K_{II}^2)^{1/4} \quad (2)$$

Denklem (2)'de yer alan K_I , açılma modu (mod-I) ile ilgili gerilme şiddet faktörünü, K_{II} ise düzlem içi kayma modu (mod-II) ile ilgili gerilme şiddet faktörünü temsil etmektedir. a , b ve c katsayıları, nümerik analiz ve deney verileri kullanılarak gerçekleştirilen regresyon analizleri sonrası elde edilen katsayılardır. Denklem (2)'de kullanılan katsayılar aşağıda Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Denklem (2)'de kullanılan katsayılar

Table 1. Coefficients used in equation (2)

a	b	c
1.0519	-0.0350	2.3056

Çatlak ucunun ilerleme doğrultusunun tahmini için ise Demir ve diğ. (2017; 2018) tarafından çatlak ucu sapma açısının (θ_0) tahminine yönelik geliştirilen ve aşağıda Denklem (3) ile verilen eşitlik kullanılmıştır.

$$\theta_0 = -\arccos \left(\frac{e \cdot K_{II}^2 + K_I \cdot \sqrt{K_I^2 + f \cdot K_{II} \cdot K_I + g \cdot K_{II} \cdot K_I}}{K_I^2 + h \cdot K_{II}^2} \right) \quad (3)$$

Denklem (3)'te kullanılan katsayılar Çizelge 2'de verilmiştir. Kullanılan denklemler ile ilgili daha detaylı bilgilere ilgili kaynaklardan (Demir ve ark. 2017; 2018) ulaşılabilir.

Çizelge 2. Denklem (3)'te kullanılan katsayılar

Table 2. Coefficients used in equation (3)

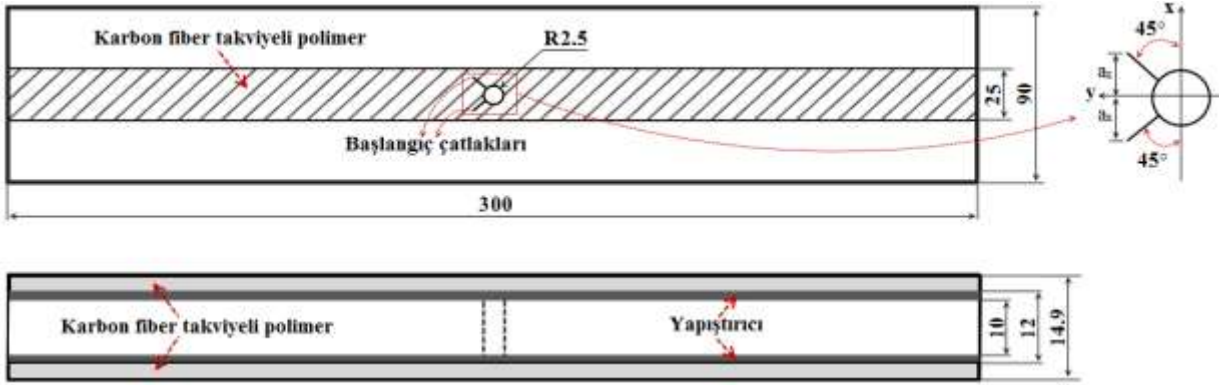
e	f	g	h
0.1723	5.1062	-2.7483	-1.1636

Yukarıda denklemleri verilen Demir ve Ayhan hasar modeline göre, herhangi bir çatlak ilerleme adımında çatlak ucunun herhangi bir düğüm noktası için elde edilen maksimum $K_{eş}$ değeri, malzemenin kırılma tokluğu (K_{IC}) değerine ulaştığı anda kararsız çatlak ilerlemesi başlamakta ve kırılma meydana gelmektedir.

PROBLEM TANIMI (PROBLEM DEFINITION)

Başlangıç çatlağının yükleme doğrultusuna göre açılı olduğu farklı ön-gerilme oranlarında karbon fiber takviyesi ile güçlendirilmiş çatlaklı çelik plaka problemi (Chen ve diğ., 2018) literatürden referans olarak seçilmiştir. Referans çalışmada, ayrıntılı boyutları Şekil 1'de verilen delikli plakaya tek eksenli yükleme altında çevrimsel çeki yükü uygulanarak nümerik olarak çatlak ilerleme analizi

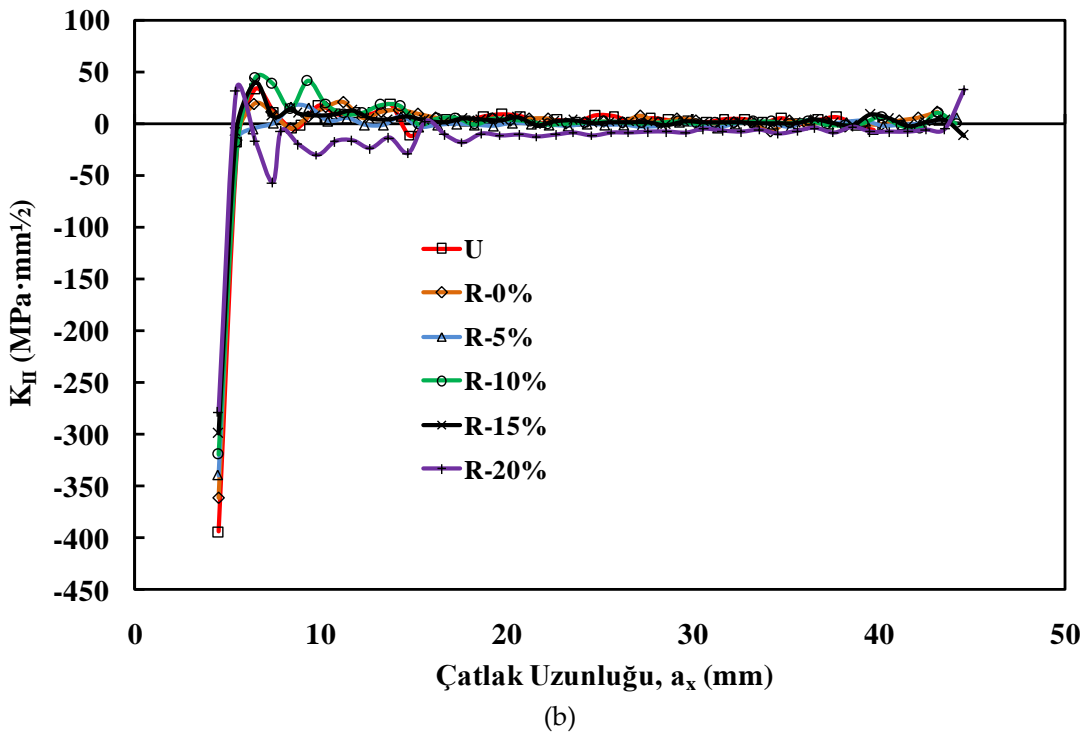
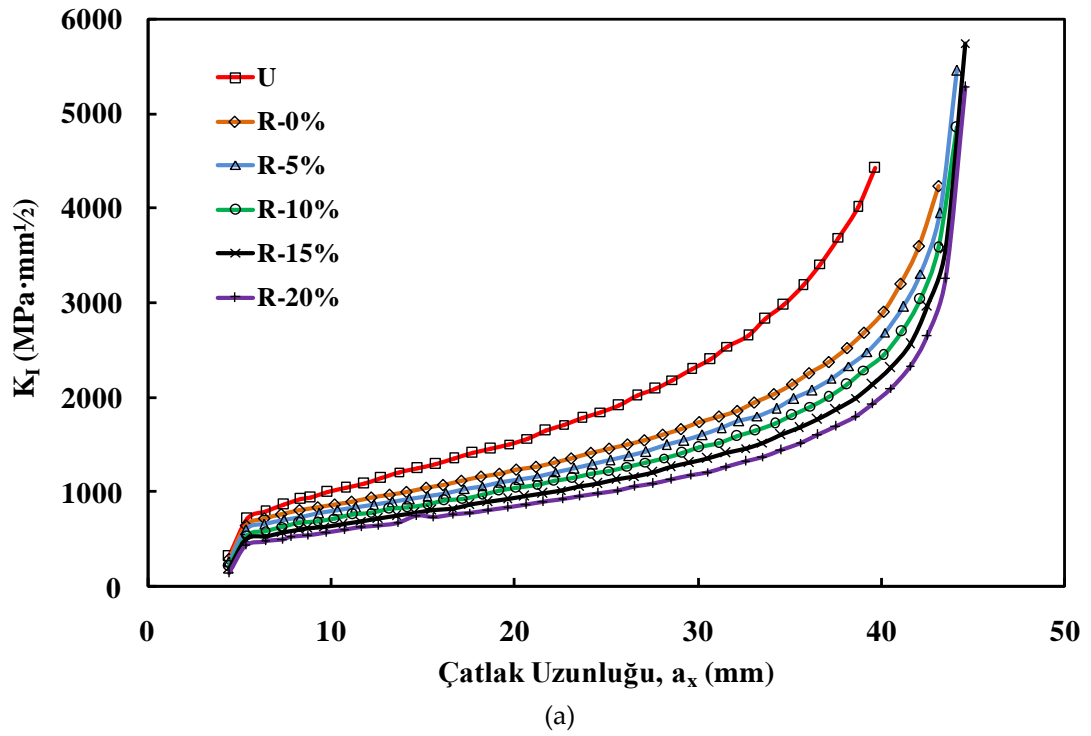
gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada ise, başlangıç çatlağının yükleme doğrultusuna göre 45° açılı olduğu problem ele alınarak yakın zamanda geliştirilmiş olan Demir ve Ayhan hasar modelinin çatlak ilerleme profili ve çatlak ilerleme ömrünün tahminini açısından hasar modelinin uygulanabilirliği literatürdeki mevcut hasar modelleri ile birlikte değerlendirilmiştir.



Şekil 1. Çatlak ucunun yakın görünümü ve numunenin ön ve üst görünüşü (Chen ve diğ., 2018)

Figure 1. Front and top view of the specimen and close-up view of the crack front (Chen ve diğ., 2018)

Başlangıç çatlağı yükleme doğrultusuna göre açılı olduğu için karışık mod-I/II yükleme durumu oluşmaktadır. Plakanın 160 MPa ile 16 MPa arasında değişen yorulma yüküne maruz kaldığı varsayılmıştır. Şekil 2'de karbon fiber takviyesi ile güçlendirilmemiş, ön gerilmemiş ve ön gerilme oranı %0, %5, %10, %15, %20 oranında karbon fiber takviyesi ile güçlendirilmiş plakada başlangıç çatlağının yükleme doğrultusuna göre 45° açılı olduğu durumlar için gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri sonrası her bir ilerleme adımının çatlak ucu için elde edilen K_I ve K_{II} gerilme şiddet faktörlerinin dağılımı verilmiştir.



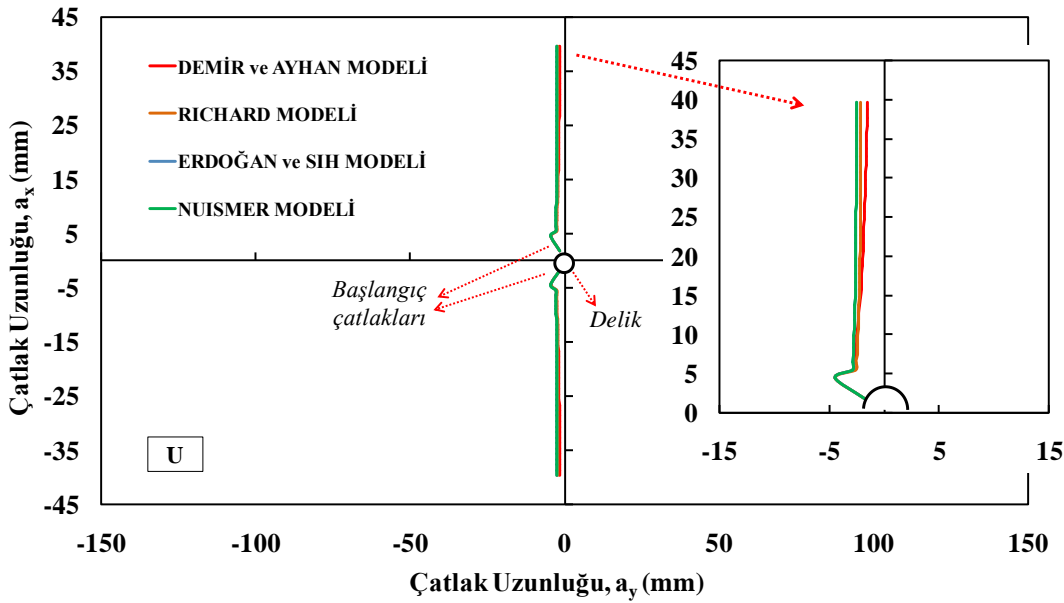
Şekil 2. Her bir çatlak ilerleme adımı için çatlak uzunluğuna karşılık (a) K_I , (b) K_{II} değişimi (Chen ve diğ., 2018)

Figure 2. Distribution of (a) K_I , (b) K_{II} , with respect to the crack length for each crack propagation steps (Chen ve diğ., 2018)

Şekil 2'de yer alan U: Karbon fiber takviyesi ile güçlendirilmemiş durumu, R: Karbon fiber takviyesi ile güçlendirilmiş durumu ve sonrasında gelen yüzdelik ifade ise maksimum çekme gerilmesi değerinin ön gerilme değerine oranını ifade eden ön gerilme oranını temsil etmektedir. Ele alınan tüm durumlar için çatlak uzunluğu arttıkça K_I gerilme şiddet faktörü değerinin beklendiği gibi artan bir eğilim gösterdiği görülmektedir. Çatlak ilerledikçe doğrultusu yüklemeye yönüne dik konuma geldiği için K_I gerilme şiddet faktörü değeri artmaktadır. Yine ele alınan tüm durumlar için, 1. ilerleme adımı ile birlikte K_{II} gerilme şiddet faktörü değerinin ise ani bir değişimle sifıra yakın değerler aldığı ve eğilimin çatlak ilerledikçe bu şekilde devam ettiği görülmektedir. Bu durum, başlangıçta yüklemeye doğrultusuna açılı olan başlangıç çatlağının 1. ilerleme adımı ile birlikte ani bir yön değişimi gösterdiğine işaret etmektedir. Yani başlangıçta karışık modlu olarak başlayan problem çatlak ilerledikçe basit mod-I problemine dönüşmektedir.

ÇATLAK İLERLEME PROFİL TAHMİNLERİ (PREDICTIONS OF CRACK GROWTH TRAJECTORIES)

Bu bölümde, her bir çatlak ilerleme adımı için elde edilen gerilme şiddet faktörü değerleri kullanılarak farklı hasar modellerinin çatlak ilerleme profil tahminleri değerlendirilmiştir. Şekil 3'te karbon fiber takviyesi ile güçlendirilmemiş (U) durum için farklı hasar modellerine göre tahmin edilen çatlak profillerinin 90x300 boyutundaki plakadaki değişimi gösterilmiştir.

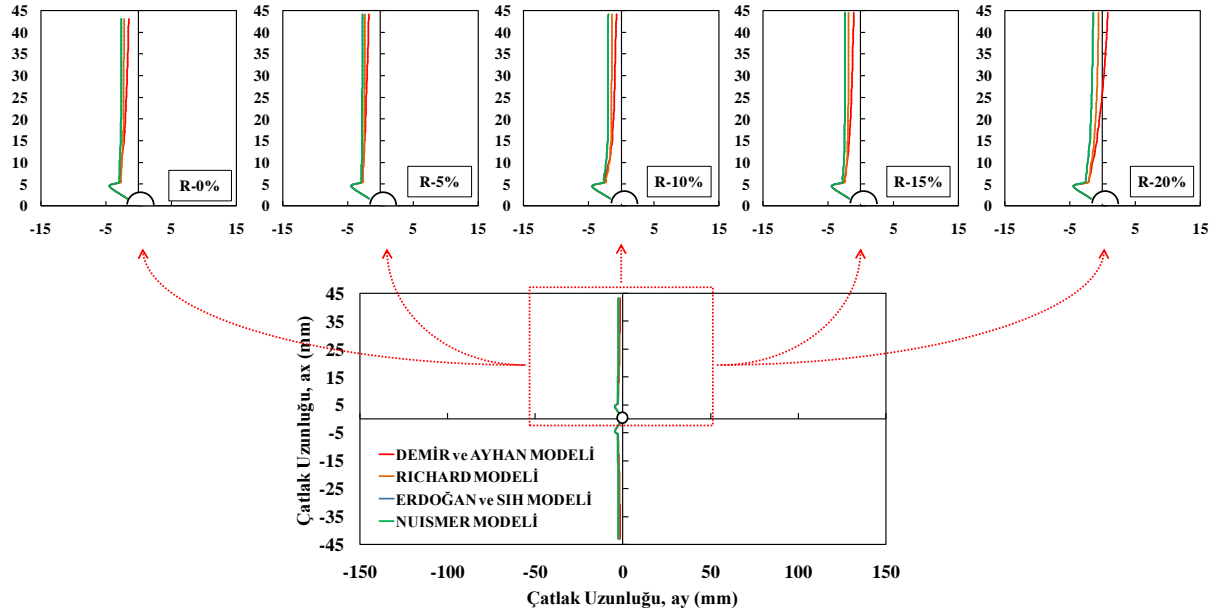


Şekil 3. Takviyesiz (U) plakada farklı hasar modellerine göre tahmini yorulma çatlak ilerleme profillerinin değişimi

Figure 3. Variation of predicted fatigue crack propagation profiles according to the different damage models for unreinforced (U) plate

Karbon fiber takviyeli ve takviyesiz tüm durumlar için gerçekleştirilen çatlak ilerleme profil tahminlerinde, Erdoğan ve Sih modeli (Erdoğan ve Sih, 1963) ile Nuismer hasar modeli (Nuismer, 1975) kullanılarak elde edilen çatlak sapma açıları aynı çıkmıştır. Bu yüzden iki modeli temsil eden profil grafikte üst üste çakışmıştır. Çok az farklılıkların dışında hasar modellerinin tahmin ettiği yorulma çatlak ilerleme profillerinin karbon fiber takviye edilmemiş (U) durum için benzer bir eğilim gösterdiği görülmektedir. Ön gerilmesiz (R-0%) ve ön gerilme oranı %0, %5, %10, %15, %20 oranında karbon fiber takviyesi ile güçlendirilmiş (R-5, R-10, R-15, R-20%) plaka için gerçekleştirilen çatlak ilerleme profil tahminleri, temsili bir plaka üzerinden alınan detay görüntüleri ile Şekil 4'te verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi karbon fiber takviyeli durumlar için farklı hasar modellerine göre elde edilen tahmini yorulma çatlak ilerleme profillerinin çok az farklılıkların dışında bir önceki karbon fiber takviyesiz durum için elde edilen sonuçlarda olduğu gibi benzer bir eğilim gözlemlenmektedir. Takviyeli ve takviyesiz

incelenen tüm durumlarda, 1. ilerleme adımı ile birlikte çatlak anı bir yön değişikliği göstererek yüklemeye doğru dikey doğrultuda ilerlediği çatlak ilerleme profillerinden görülmektedir.

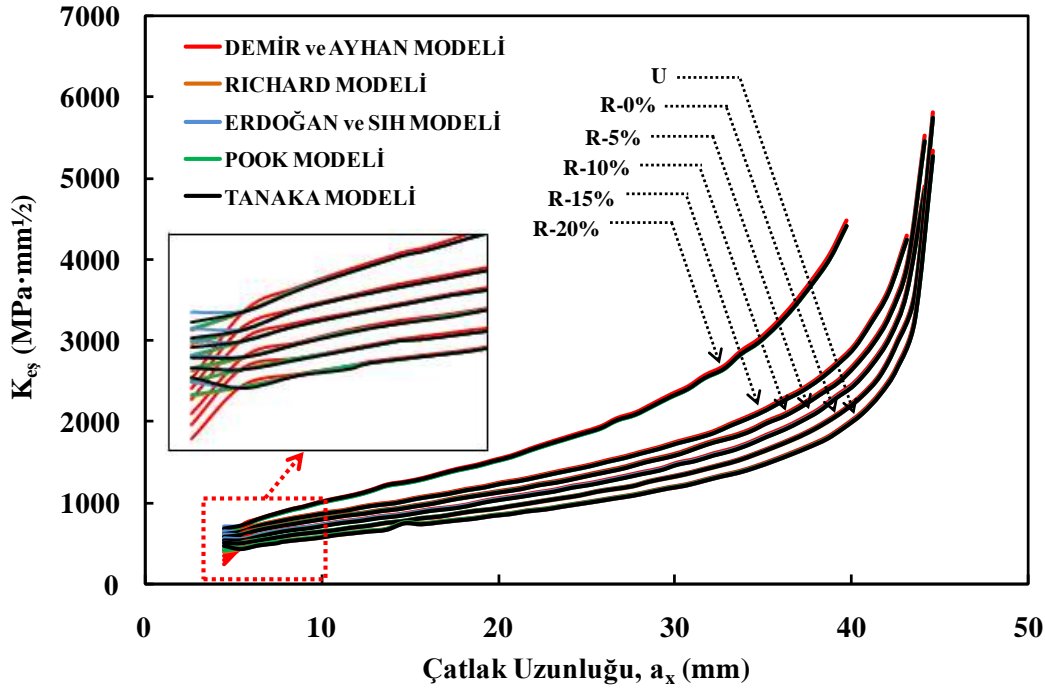


Şekil 4. Takviyeli (R-5, R-10, R-15, R-20% ön gerilmeli) plakaların farklı hasar modellerine göre tahmini yorulma çatlak ilerleme profillerinin değişimi

Figure 4. Variation of predicted fatigue crack propagation profiles according to the different damage models for reinforced (R-5, R-10, R-15, R-20% pre-stressed) plates

ÇATLAK İLERLEME ÖMÜR TAHMİNLERİ (PREDICTIONS OF CRACK GROWTH LIVES)

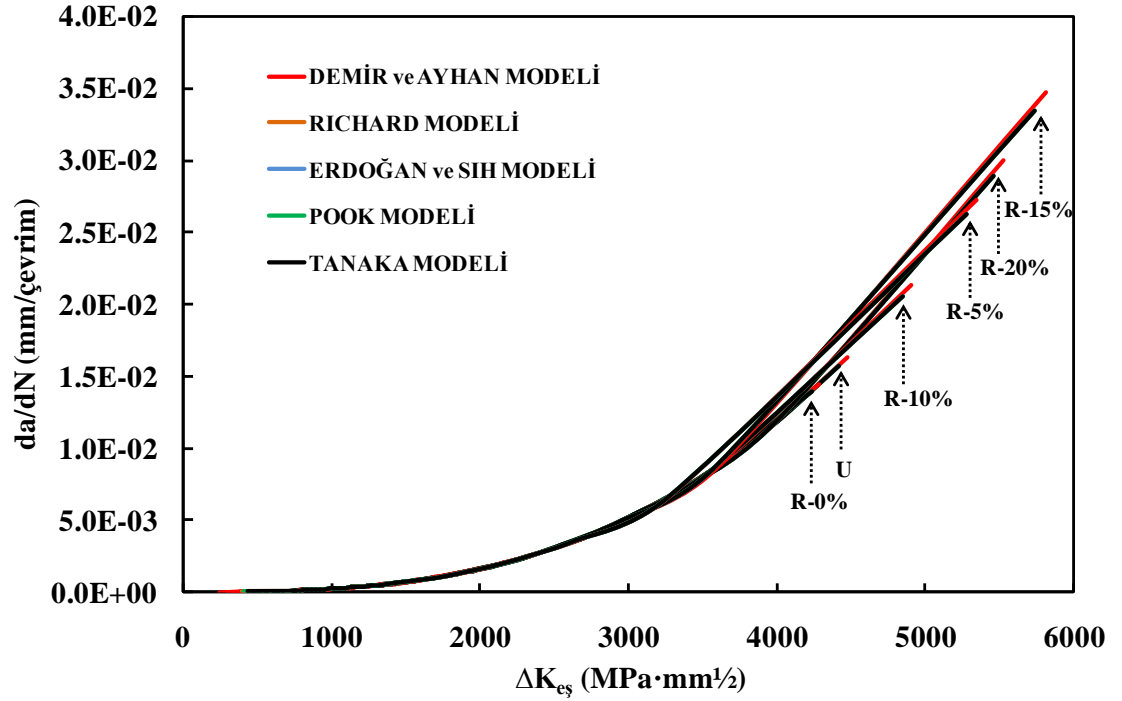
Bu bölümde ise, her bir ilerleme adımının çatlak ucu için elde edilen K_I ve K_{II} gerilme şiddet faktörleri kullanılarak farklı hasar modellerine göre eşdeğer gerilme şiddet faktörleri elde edilmiş ve çatlak ilerleme malzeme özellikleri ile birlikte bu değerler kullanılarak çatlak ilerleme ömür tahminleri yapılmıştır. Çatlak ilerleme malzeme sabitleri için $C=6.77 \times 10^{-3} (da/dN:mm/çevrim, K:MPamm^{1/2})$ ve $n=2.88$ değerleri kullanılmıştır. Şekil 5'te, farklı hasar modellerine göre elde edilen eşdeğer gerilme şiddet faktörlerinin ($K_{eş}$) çatlak uzunluğuna bağlı olarak değişimi verilmiştir.



Şekil 5. Takviyeli (R-5, R-10, R-15, R-20% ön gerilmeli) ve takviyesiz (U) plakalar için farklı hasar modellerine göre elde edilen eşdeğer gerilme şiddet faktörlerinin (K_{es}) çatlak uzunluğuna bağlı olarak değişimi

Figure 5. Variation of the equivalent stress intensity factors (K_{es}) obtained from different damage models with respect to the crack length for reinforced (R-5, R-10, R-15, R-20% pre-stressed) and unreinforced (U) plates

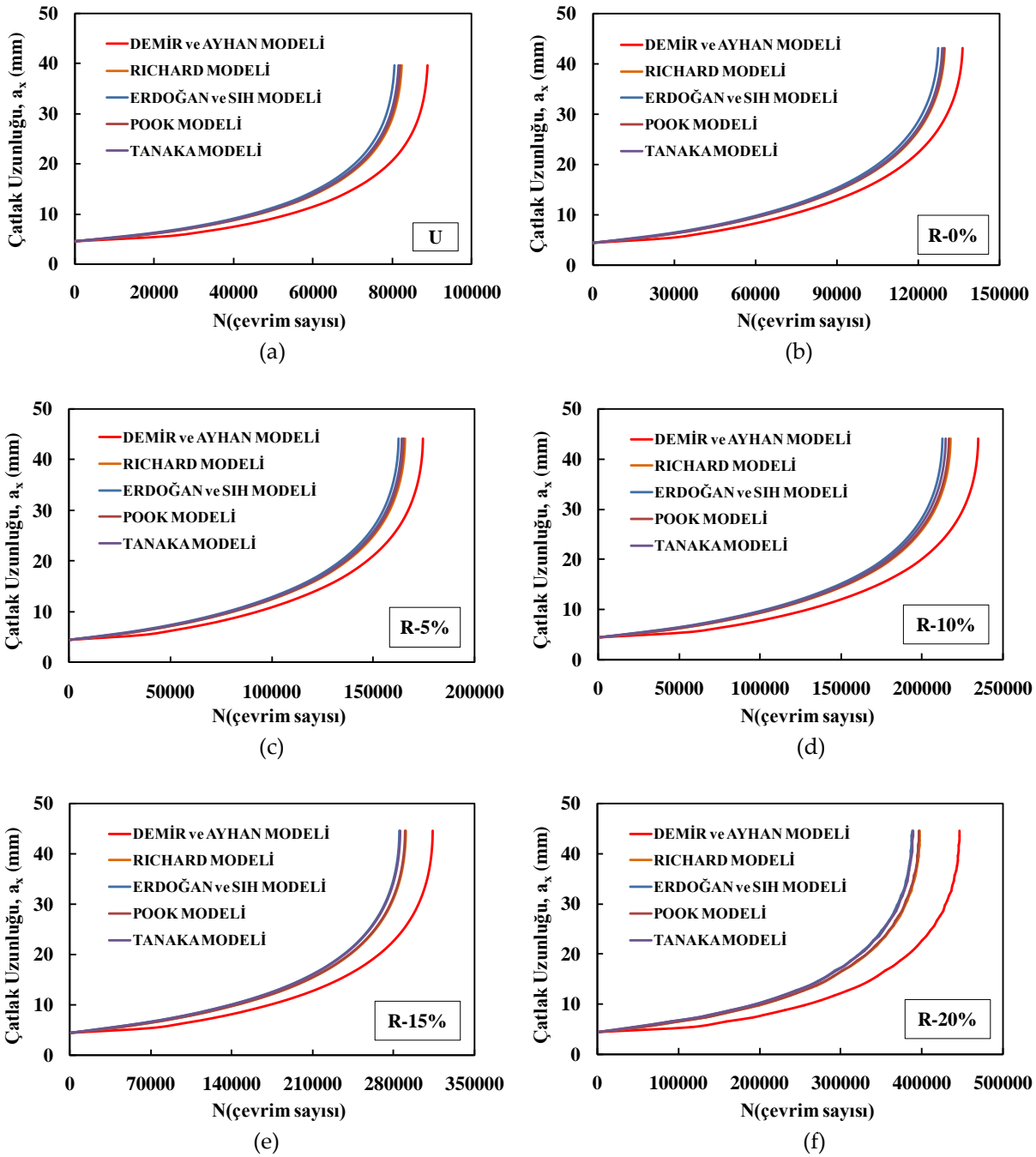
Beklendiği gibi takviyeli plakada ön gerilme oranı arttıkça eşdeğer gerilme şiddet faktörü değerleri çatlak ilerlemesi ile birlikte artış göstermiştir. Baskın kırılma modu mod-I olduğu için K_I dağılımına benzer bir K_{es} dağılımı gözlenmiştir. Başlangıç çatlağı dışında diğer tüm ilerleme adımları için hasar modellerine göre elde edilen K_{es} dağılımı birbirine yakın eğilimdedir. Başlangıç çatlağı için K_I gerilme şiddet faktörüne oranla daha yüksek K_{II} değerleri var olduğu için, hasar modellerine göre elde edilen K_{es} gerilme şiddet faktörü değerleri de farklılık göstermektedir. C ve n malzeme sabitleri kullanılarak çatlak ilerleme oranını gösteren $da/dN-\Delta K_{es}$ değişimine (Şekil 6) bakıldığında hasar modellerinin birbiri ile uyumlu bir profil gösterdiği görülmektedir.



Şekil 6. Takviyeli (R-5, R-10, R-15, R-20% ön gerilmeli) ve takviyesiz (U) plakalar için farklı hasar modellerine göre elde edilen $da/dN-\Delta K_{es}$ değişim eğrileri

Figure 6. $da/dN-\Delta K_{es}$ variation curves obtained from different damage models for reinforced (R-5, R-10, R-15, R-20% pre-stressed) and unreinforced (U) plates

Son olarak, mevcut hasar modelleri ve Demir ve Ayhan modeline göre ömür tahminleri yapılarak Demir ve Ayhan modelinin ömür tahminleri açısından değerlendirmesi yapılmıştır. Şekil 7'de ele alınan karbon fiber takviyeli ve takviyesiz tüm durumlar için hasar modellerine göre yapılan ömür tahminleri verilmiştir.



Şekil 7. Farklı hasar modellerine göre çevrim sayısının çatlak uzunluğuna bağlı değişimi, a) Takviyesiz (U), b) Takviyeli (R-5%), c) R-10%, d) R-15%, e) R-20% ön gerilmeli plaka

Figure 7. Variation of the number of cycles with respect to the crack length according to different damage models, a) for unreinforced (U), b) for reinforced (R-5%), c) R-10%, d) R-15%, e) R-20% pre-stressed plates

Demir ve Ayhan modeli dışındaki diğer hasar modellerinin birbirleri ile daha yakın ömür tahminlerinde buldukları görülmektedir. Demir ve Ayhan hasar modeli ile diğer modeller arasında yaklaşık %5 ile %12 arasında değişen farklılıklar bulunmaktadır. Bunun sebebi ise Şekil 5'te başlangıç çatlak için Demir ve Ayhan modeline göre elde edilen $K_{eş}$ değerinin diğer modellerden küçük farklılıklar göstermesinden kaynaklanmaktadır. Referans alınan kaynakta herhangi bir deney verisi olmadığı için hangi modelin daha doğru bir tahmin yaptığına yönelik bir yorum yapılamamaktadır. Ancak sonuçlar göstermektedir ki, her ne kadar başlangıç çatlakının ilk ilerlemesinden sonra problem basit mod-I problemine dönüşse de, hasar modellerine ait $K_{eş}$ denklemlerinin farklılığından kaynaklı olarak ömür

tahminleri de değişkenlik göstermektedir. Bu yüzden hasar modelleri tarafından önerilen $K_{eş}$ denklemleri malzemelerin ömürlerinin tahmininin de büyük önem arz etmektedir. Özellikle mod-II'nin çok daha baskın olduğu daha karmaşık modlu yüklemelerde, problemin basit mod-I problemine dönüşmesi çatlakın daha sonraki ilerleme adımlarında gerçekleşeceği için bu ilerleme adımlarında oluşan $K_{eş}$ farklılıkları hasar modellerine göre yapılan ömür tahminlerinde daha çok farklılıkların oluşmasına neden olacaktır. Çatlak ilerleme profili ve ömür tahmini için doğru hasar modelinin seçimi için farklı malzeme, yükleme ve sınır şartları içeren daha fazla doğrulama çalışmalarının yapılmasına literatürde ihtiyaç vardır.

SONUÇ ve TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

Önerilen çalışmada, karışık modlu yüklere maruz çatlaklı yapıların kırılma ve çatlak ilerleme davranışının tahminine yönelik olarak yakın zaman önce geliştirilmiş olan Demir ve Ayhan hasar modelinin çatlak ilerleme profili tahmini ve ömür tahminine yönelik uygulanabilirliği literatürdeki mevcut hasar modelleri ile birlikte değerlendirilmiştir. Chen ve ark. (2018) tarafından karbon fiber takviyesiz ve farklı ön gerilme oranlarında karbon fiber takviyesi ile güçlendirilmiş, açılı çatlak içeren çelik plaka üzerinde gerçekleştirilen nümerik çalışmadaki datalar referans alınarak farklı hasar modellerine göre çatlak ilerleme profili tahminleri ve çatlak ilerleme ömür tahminleri yapılmıştır. Çatlak ilerleme profil tahminlerinde, analiz edilen tüm durumlar için, çok az farklılıkların dışında hasar modellerinin tahmin ettiği yorulma çatlak ilerleme profillerinin benzer bir eğilim gösterdiği görülmüştür. Çatlak ilerleme ömür tahminlerinde ise, Demir ve Ayhan modeline göre tahmin edilen ömür değerlerinin diğer hasar modellerine kıyasla yaklaşık %5 ila %12 daha fazla olduğu görülmüştür. Bunun sebebi ise, başlangıç çatlakları için Demir ve Ayhan modeline göre elde edilen $K_{eş}$ değerlerinin diğer hasar modellerine göre daha düşük olmasıdır. Verilerin alındığı referans çalışmada deneysel bir veri olmadığı ve sadece nümerik analiz gerçekleştirildiği için hangi hasar modelinin ömrü daha doğru tahmin ettiği ile ilgili bir yorum yapılamamıştır. Ancak bu çalışma için, hasar modellerinin yaklaşık %5 ile %12 farkla birbirleri ile benzer ömür tahminlerinde bulunduğu söylenebilir. Ayrıca önerilen çalışma göstermiştir ki, sadece başlangıç çatlakları için elde edilen minimal düzeydeki $K_{eş}$ farklılıkları, çatlak ilerleme ömür tahminlerini etkileyerek daha yüksek farklılıkların oluşmasına sebebiyet vermektedir. Özellikle daha karmaşık modlu yüklemelerde diğer ilerleme adımlarında da oluşabilecek $K_{eş}$ farklılıkları, hasar modellerine göre yapılan ömür tahminlerinde daha çok farklılıkların oluşmasına neden olacaktır. Bu yüzden ömür tahminlerinde kullanılan $K_{eş}$ denklemi seçimi sonuçları önemli ölçüde etkilemektedir.

Sonuç olarak, farklı geometri ve boyutlara sahip alüminyum malzemeden imal edilmiş test numuneleri ile gerçekleştirilen karışık mod-I/II kırılma tokluğu test sonuçları kullanılarak geliştirilen Demir ve Ayhan hasar modelinin, farklı geometri ve sınır şartları içeren karışık mod-I/II yorulma yüküne maruz çelik malzemelerin yorulma çatlak ilerleme davranışının analiz edilmesi için kullanılabilir ve uygulanabilir olduğu gösterilmiştir.

KAYNAKLAR(REFERENCES)

- Akbardoost, J., Rastin, A. 2015, "Comprehensive data for calculating the higher order terms of crack tip stress field in disk-type specimens under mixed mode loading", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 76, 75-90.
- Aliha, M. R. M., Ayatollahi, M. R., Kharazi, B. 2009, "Numerical and experimental investigations of mixed mode fracture in granite using four-point-bend specimen", In *Damage and fracture mechanics* (pp. 275-283). Springer, Dordrecht.
- Aliha, M. R. M., Ayatollahi, M. R. 2012, "Analysis of fracture initiation angle in some cracked ceramics using the generalized maximum tangential stress criterion", *International Journal of Solids and Structures*, 49(13), 1877-1883.
- Aliha, M. R. M., Ayatollahi, M. R., Akbardoost, J. 2012, "Typical upper bound–lower bound mixed mode fracture resistance envelopes for rock material", *Rock mechanics and rock engineering*, 45(1), 65-74.

- Aliha, M. R. M., Hosseinpour, G. R., Ayatollahi, M. R. 2013, "Application of cracked triangular specimen subjected to three-point bending for investigating fracture behavior of rock materials", *Rock mechanics and rock engineering*, 46(5), 1023-1034.
- Aliha, M. M., Behbahani, H., Fazaeli, H., Rezaifar, M. H. 2014, "Study of characteristic specification on mixed mode fracture toughness of asphalt mixtures", *Construction and Building Materials*, 54, 623-635.
- Al-Shayea, N. A. 2005, "Crack propagation trajectories for rocks under mixed mode I-II fracture", *Engineering Geology*, 81(1), 84-97.
- Arcan, M., Hashin, Z. A., Voloshin, A. 1978, "A method to produce uniform plane-stress states with applications to fiber-reinforced materials", *Experimental mechanics*, 18(4), 141-146.
- Ayatollahi, M. R., Aliha, M. R. M., Hassani, M. M. 2006, "Mixed mode brittle fracture in PMMA—an experimental study using SCB specimens", *Materials Science and Engineering: A*, 417(1-2), 348-356.
- Ayatollahi, M. R., Aliha, M. R. M. 2008, "Mixed mode fracture analysis of polycrystalline graphite—a modified MTS criterion", *Carbon*, 46(10), 1302-1308.
- Ayatollahi, M. R., Aliha, M. R. M. 2009, "Analysis of a new specimen for mixed mode fracture tests on brittle materials", *Engineering Fracture Mechanics*, 76(11), 1563-1573.
- Ayatollahi, M. R., Moghaddam, M. R., Berto, F. 2015, "A generalized strain energy density criterion for mixed mode fracture analysis in brittle and quasi-brittle materials", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 79, 70-76.
- Ayhan, A. O., Demir, O. 2016, "Investigation of mixed mode-I/II fracture problems-Part 2: evaluation and development of mixed mode-I/II fracture criteria", *Frattura ed Integrità Strutturale*, 10(35), 340-349.
- Chang, K. J. 1981, "On the maximum strain criterion—a new approach to the angled crack problem", *Engineering Fracture Mechanics*, 14(1), 107-124.
- Chen, T., Hu, L., Zhang, N., Yu, Q. Q. 2018, "Boundary element analysis of fatigue behavior for CFRP-strengthened steel plates with center inclined cracks", *Thin-Walled Structures*, 125, 164-171.
- Demir, O., Siriç, S., Ayhan, A. O., Lekesiz, H. 2016, "Investigation of mixed mode-I/II fracture problems-Part 1: computational and experimental analyses", *Frattura ed Integrità Strutturale*, 10(35), 330-339.
- Demir, O., Ayhan, A. O., İriç, S. 2017, "A new specimen for mixed mode-I/II fracture tests: Modeling, experiments and criteria development", *Engineering Fracture Mechanics*, 178, 457-476.
- Demir, O., Ayhan, A. O., İriç, S., Lekesiz, H. 2018, "Evaluation of mixed mode-I/II criteria for fatigue crack propagation using experiments and modeling", *Chinese Journal of Aeronautics*, 31(7), 1525-1534.
- Erdoğan, F., Sih, G. C. 1963, "On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear", *Journal of basic engineering*, 85(4), 519-525.
- Gouda, P. S., Kodancha, K. G., Siddaramaiah, D. J. 2013, "Experimental and numerical investigations on fracture behavior of high silica glass/satin textile fiber reinforced hybrid polymer composites", *Adv. Mater. Lett.*, 4(11), 827-835.
- Hernandez-Gomez, L. H., Saucedo-Meza, I., Urriolagoitia-Calderón, G., Balankin, A. S., Susarrey, O. 2004, "Evaluation of crack initiation angle under mixed mode loading at diverse strain rates", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 42(1), 53-61.
- Hou, C., Jin, X., Fan, X., Xu, R., Wang, Z. 2019, "A generalized maximum energy release rate criterion for mixed mode fracture analysis of brittle and quasi-brittle materials", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 100, 78-85.
- Hussain, M. A., Pu, S. L., Underwood, J. 1974, "Strain energy release rate for a crack under combined mode I and mode II", In *Fracture analysis: Proceedings of the 1973 national symposium on fracture mechanics, part II*. ASTM International.
- Jiang, H., Gao, X., & Srivatsan, T. S. (2009). Predicting the influence of overload and loading mode on fatigue crack growth: a numerical approach using irreversible cohesive elements. *Finite Elements in Analysis and Design*, 45(10), 675-685.

- Katanchi, B., Choupani, N., Khalil-Allafi, J., Tavangar, R., Baghani, M. 2018, "Mixed-mode fracture of a superelastic NiTi alloy: Experimental and numerical investigations", *Engineering Fracture Mechanics*, 190, 273-287.
- Kim, C. S., Chung, K. W. 2012, "A study on fatigue crack propagation of rail steel under constant and mixed mode variable amplitude loadings", *International Journal of Railway*, 5(2), 71-76.
- Koo, J. M., Choy, Y. S. 1991, "A new mixed mode fracture criterion: maximum tangential strain energy density criterion", *Engineering fracture mechanics*, 39(3), 443-449.
- Marsavina, L., Sadowski, T., Knec, M. 2013, "Crack propagation paths in four point bend Aluminium-PMMA specimens", *Engineering Fracture Mechanics*, 108, 139-151.
- Mirsayar, M. M. 2015, "Mixed mode fracture analysis using extended maximum tangential strain criterion", *Materials & Design*, 86, 941-947.
- Mirsayar, M. M., Joneidi, V. A., Petrescu, R. V. V., Petrescu, F. I. T., Berto, F. 2017, "Extended MTSN criterion for fracture analysis of soda lime glass", *Engineering Fracture Mechanics*, 178, 50-59.
- Mousavi, S. S., Aliha, M. R. M., Imani, D. M. 2020, "On the use of edge cracked short bend beam specimen for PMMA fracture toughness testing under mixed-mode I/II", *Polymer Testing*, 81, 106199.
- Nuismer, R. J. 1975, "An energy release rate criterion for mixed mode fracture", *International journal of fracture*, 11(2), 245-250.
- Paris, P. C., Erdogan F. 1963, "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws", *J. Basic Eng.* Dec 1963, 85(4): 528-533.
- Paris, P. C., Gomez, M. P., Anderson, W. E. 1961, "A rational analytic theory of fatigue", *The trend in engineering*, 13, 9.
- Patle, V., Bhadauria, S. S., Jain, A. 2012, "Analysis of Crack Tip Opening Displacement under Mixed Mode Fracture Using FEM Technique", *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 3, 27-34.
- Pook, L. P. 1989, "The significance of mode I branch cracks for mixed mode fatigue crack growth threshold behaviour", In *ICBMFF2*.
- Richard, H. A., Benitz, K. 1983, "A loading device for the creation of mixed mode in fracture mechanics", *International Journal of Fracture*, 22(2), R55-R58.
- Richard, H. A. 1985, "Fracture mechanical predictions for cracks with superimposed normal and shear loading", *Dusseldorf: VDI-Verlag*.
- Saghafi, H., Ayatollahi, M. R., Sistaninia, M. 2010, "A modified MTS criterion (MMTS) for mixed-mode fracture toughness assessment of brittle materials", *Materials Science and Engineering: A*, 527(21-22), 5624-5630.
- Sajith, S., Shukla, S. S., Murthy, K. S. R. K., Robi, P. S. 2019a, "Mixed mode fatigue crack growth studies in AISI 316 stainless steel", *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 103898.
- Sajith, S., Murthy, K. S. R. K., Robi, P. S. 2019b, "Mixed mode fatigue crack growth studies of crack emanating from circular hole", In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2200, No. 1, p. 020041). AIP Publishing.
- Sajith, S., Murthy, K. S. R. K., Robi, P. S. 2020, "Experimental and numerical investigation of mixed mode fatigue crack growth models in aluminum 6061-T6", *International Journal of Fatigue*, 130, 105285.
- Sander, M., Richard, H. A. 2005, "Finite element analysis of fatigue crack growth with interspersed mode I and mixed mode overloads", *International Journal of Fatigue*, 27(8), 905-913.
- Sander, M., & Richard, H. A. (2006). Experimental and numerical investigations on the influence of the loading direction on the fatigue crack growth. *International Journal of Fatigue*, 28(5-6), 583-591.
- Seed, G. M., & Nowell, D. (1994). Use of the distributed dislocations method to determine the T-stress. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 17(5), 605-618.
- Seitl, S., Miarka, P., Bílek, V. 2018, "The mixed-mode fracture resistance of C 50/60 and its suitability for use in precast elements as determined by the Brazilian disc test and three-point bending specimens", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 97, 108-119.

- Sih, G. C., Macdonald, B. 1974, "Fracture mechanics applied to engineering problems-strain energy density fracture criterion", *Engineering Fracture Mechanics*, 6(2), 361-386.
- Tanaka, K. 1974, "Fatigue crack propagation from a crack inclined to the cyclic tensile axis", *Engineering Fracture Mechanics*, 6(3), 493-507.
- Zabihi, M., Ayatollahi, M. R., Rezaie, H. R. 2018, "Mixed-mode fracture of synthesized nanocrystalline forsterite for biomedical applications", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 94, 173-180.
- Zhao, J., Guo, W. 2012, "Three-parameter K-T-Tz characterization of the crack-tip fields in compact-tension-shear specimens", *Engineering Fracture Mechanics*, 92, 72-88.