

**Demiryolu Dingilinin S-Geçiş Bölgesindeki Üç Boyutlu Çatlaklarda Çatlak Boyutu ve Yöneliminin Gerilme Şiddet Faktörlerine Etkisi**

Oğuzhan DEMİR

*Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 11100, Bilecik, Türkiye**oguzhan.demir@bilecik.edu.tr**(Alınış/Received: 17.08.2026, Kabul/Accepted: 16.09.2026, Yayımlama/Published: 16.09.2026)*

Öz: Demiryolu dingillerinin S-geçiş bölgeleri, geometrik süreksizlikler ve karmaşık gerilme dağılımları nedeniyle çatlak oluşumu ve ilerlemesi açısından kritik bölgeler arasında yer almaktadır. Bu çalışmada, demiryolu dingilinin tekerlek ve tahrik dişlisinin dingil üzerindeki oturma yerleri arasında bulunan S-geçiş bölgesindeki üç boyutlu yüzey çatlaklarının gerilme şiddet faktörleri (GŞF) sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak sistematik olarak incelenmiştir. Parametrik analizlerde çatlak derinliğinin yerel radyal et kalınlığına oranı $a/t = 0,08, 0,10$ ve $0,12$, çatlak derinliğinin çatlak uzunluğuna oranı $a/c = 0,5, 1,0$ ve $1,5$, çatlak eğim açıları $\alpha = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ ve çatlak sapma açıları $\beta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ olarak ele alınmıştır. Etkileşim integrali yöntemiyle çatlak önü boyunca elde edilen K_I, K_{II} ve K_{III} değerleri değerlendirilmiştir. Sonuçlar, çatlak eğim açısının (α) GŞF bileşenlerinin büyüklüğü ve dağılımı üzerinde belirgin etkisi olduğunu ve eğim açısının artmasıyla çatlak önü dağılımlarının simetrikliğinin bozulduğunu göstermiştir. Buna karşılık, çatlak sapma açısındaki (β) değişimlerde GŞF dağılımları çatlak merkezine göre yaklaşık simetrik kalmıştır. $\alpha = 0^\circ$ durumunda en yüksek K_I değerleri elde edilirken, $\alpha = 45^\circ$ civarındaki çatlak yönelimlerinde K_{II} ve K_{III} değerlerinin mutlak büyüklükleri en yüksek seviyelere ulaşmıştır. Ayrıca β açısının artmasıyla K_I azalırken K_{II} ve K_{III} artmış, bu etkinin $\beta = 30^\circ$ sonrasında sınırlanmaya başladığı görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Demiryolu dingili, S-geçiş bölgesi, Gerilme şiddet faktörü, Üç boyutlu çatlak, Karışık mod kırılma, Sonlu elemanlar yöntemi

Effect of Crack Size and Orientation on Stress Intensity Factors of Three-Dimensional Cracks in the S-Transition Region of a Railway Axle

Abstract: S-transition regions of railway axles are critical locations for crack initiation and propagation due to geometric discontinuities and highly non-uniform stress fields. In this study, the stress intensity factors (SIFs) of three-dimensional surface cracks located in the S-transition region between the wheel and driving-gear seats of a railway axle were systematically investigated using the finite element method. The parametric analyses considered crack-depth-to-local-wall-thickness ratios of $a/t = 0.08, 0.10$, and 0.12 , crack-depth-to-crack-length ratios of $a/c = 0.5, 1.0$, and 1.5 , crack inclination angles of $\alpha = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$, and crack deflection angles of $\beta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$. The K_I, K_{II} , and K_{III} components were calculated along the crack front using the Interaction Integral method. The results showed that crack inclination (α) has a pronounced effect on the magnitude and distribution of the SIF components, with increasing inclination generally reducing K_I and enhancing K_{II} and K_{III} at intermediate angles. Increasing inclination also caused the crack front SIF distributions to become less symmetric. In contrast, changes in crack deflection angle (β) generally preserved the approximately symmetric character of the crack front distributions. At $\alpha = 0^\circ$, the highest K_I values were obtained, whereas the absolute values of K_{II} and K_{III} reached their highest levels for crack orientations around $\alpha = 45^\circ$. Furthermore, as the β angle increased, K_I decreased while K_{II} and K_{III} increased, with this effect becoming limited beyond $\beta = 30^\circ$.

Keywords: Railway axle, S-transition region, Stress intensity factor, Three-dimensional crack, Mixed-mode fracture, Finite element method

Atıf için/Cite as: O. Demir, "Demiryolu dingilinin s-geçiş bölgesindeki üç boyutlu çatlaklarda çatlak boyutu ve yöneliminin gerilme şiddet faktörlerine etkisi," *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 25, no. 2020448, 2026, doi: 10.47072/demiryolu.2020448

1. Giriş

Demiryolu dingilleri; tekrarlı eğilme, burulma, frenleme/çekiş yükleri, tekerlek-ray temas kuvvetleri, sıkı geçme ve kalıntı gerilmeler ile değişken genlikli işletme yüklerine maruz kalan kritik bileşenlerdir [1]. Dingil hasarı tekerlek takımı bütünlüğünü ve araç güvenliğini tehlikeye atabileceğinden, güvenli ömür tasarımı çoğunlukla kırılma mekaniği tabanlı hasar toleransı yaklaşımlarıyla desteklenmektedir [2]. Bu yaklaşımda, dingilde tespit edilen bir çatlağın işletme yükleri altında ilerleyerek kritik boyuta ulaşmasına kadar geçen güvenli işletme süresi, çatlak ilerleme davranışı ve gerilme şiddet faktörleri kullanılarak tahmin edilmektedir [3]. Demiryolu dingillerinin hasar toleransı ve yorulma davranışı üzerine yapılan çalışmalar, bu yaklaşımın uygulanabilirliğini ortaya koymuştur [4, 5].

Dingillerdeki kusurlar korozyon, darbe, imalattan kaynaklı işleme izleri, titreşimli aşınma, imalat kusurları ve yüzey/yüzey altı süreksizliklerden kaynaklanabilmektedir [6]. Bu çalışmanın odak noktası, tekerlek ve tahrik dişlisinin dingil üzerindeki oturma yerleri arasında bulunan S-geçiş bölgesidir. Çap değişimi, kavisli geçiş geometrisi ve yakınındaki sıkı geçme bileşenleri nedeniyle bu bölgede karmaşık ve düzgün olmayan bir gerilme alanı oluşmaktadır. Döner eğilme ve sıkı geçme etkilerinin birlikte değerlendirildiği çalışmalar, çatlak derinliği, çatlak en-boy oranı, geçiş geometrisi ve sıkı geçmeden kaynaklanan gerilmelerin çatlak önünde oluşan GŞF dağılımını önemli ölçüde değiştirdiğini göstermiştir [7, 8]. Geçiş geometrisi, eğilme, burulma ve karışık mod yüklemenin etkileri faturalı dingil numunelerinde de incelenmiştir [12, 13, 14]. Farklı işletme koşulları altındaki GŞF değerleri ve bunların nümerik olarak belirlenmesine yönelik yöntemler de literatürde ele alınmıştır [15, 16].

Çatlak geometrisi, GŞF dağılımını belirleyen diğer önemli bir parametredir. Demiryolu dingilleri için çoğunlukla yarı eliptik yüzey çatlakları kullanılmasına rağmen gerçek kusurlar eğik, düzensiz veya çentik/aşınma izleriyle ilişkili olabilir ve çatlak en-boy oranı ilerleme sırasında değişebilir [17]. Eğik çatlaklar üzerine yapılan üç boyutlu çalışmalar, başlangıç çatlak eğiminin yerel GŞF değerlerini ve geriye kalan yorulma ömrünü etkilediğini göstermiştir [18]. Dairesel çubuklar için geliştirilen çözümler ise çekme, eğilme ve burulma altında çatlak önü boyunca mod-I, mod-II ve mod-III GŞF değerlerinin belirlenmesi açısından aktarılabılır referanslar sunmaktadır [19, 20]. Nümerik sonuçların çatlak ilerleme deneyleriyle doğrulanması da hesaplanan çatlak önü parametrelerinin güvenilirliği açısından önemlidir [21].

Eğik ve sapmış yüzey çatlakları için gerçekleştirilen karışık mod çalışmalarında, çatlak eğim açısının artmasıyla mod-I GŞF değeri azalırken mod-II ve mod-III GŞF bileşenlerinin belirli bir açıya kadar arttığı, daha yüksek açılarda ise tekrar azaldığı bildirilmiştir [22, 23]. Bununla birlikte, plaka ve dairel çubuk çözümleri S-geçişinin eğrilikliğini, asimetrik gerilme gradyanlarını, yerel radyal et kalınlığını ve komşu sıkı geçme alanını tam olarak temsil edememektedir. Ray çeliğindeki yüzey altı çatlakları üzerine yapılan çalışmalar da temas yüklerinin mod-II ve mod-III karakterli çatlak ilerlemesine neden olabileceğini ve çatlak eğiminin çatlak ilerleme davranışını etkilediğini göstermiştir [24].

Mod-I, mod-II ve mod-III GŞF değerlerinin yorulma ömrüne etkisi; numune ölçeği, sıkı geçme ve kalıntı gerilmeler, çatlak kapanması ve yük geçmişi gibi faktörlere de bağlıdır. Küçük ölçekli numunelerden elde edilen çatlak ilerleme parametrelerinin gerçek dingillere doğrudan aktarılmasının her zaman mümkün olmadığı gösterilmiştir [25, 26, 27]. Tam ölçekli işletme yük spektrumları altında yapılan çalışmalar, çatlak ilerleme modellerinin dingil ömrü tahminindeki önemini ortaya koyarken [28], yük sırası etkileri ve aşırı yük kaynaklı gecikmeler de dikkate alınmıştır [29]. Üç boyutlu çatlak ilerleme ve olasılıksal değerlendirmeler ise nümerik çatlak önü güncellemesinin uygulanabilirliğini ve malzeme değişkenliğinin ömür tahminindeki etkisini göstermiştir [30, 31]. Bunun yanında, sıkı geçme ve kalıntı gerilmelerin çatlak çevresindeki gerilme alanı ve GŞF değerleri üzerindeki etkilerinin [7, 9], yüzey işlemlerinin çatlak ilerlemesi

ve yorulma ömrü üzerindeki etkilerinin [32, 33, 34], aşınma kaynaklı çatlak oluşumu ve çatlak ilerlemesinin incelendiği [35, 36] ve tekerlek-ray etkileşimi ve sürtünmeli temas koşulları dikkate alınarak rayın yorulma hasar direncinin değerlendirildiği [37] çalışmalar da literatürde yer almaktadır.

Son dönem çalışmalarında boyut etkileri, stokastik değerlendirmeler ve gerçekçi kusur geometrileri de ele alınmıştır. Tam ölçekli yüksek hızlı tren dingilleri, stokastik ömür değerlendirmeleri ve yapay kusurlar üzerine yapılan çalışmalar bu konudaki belirsizliklerin önemini ortaya koymaktadır [38, 39, 40]. Doğal çatlak, mikro-çökme, çevresel kanal kusurları ve tekerlek göbeği arayüzündeki çatlaklar da güncel çalışmalarda incelenmiştir [41, 42, 43].

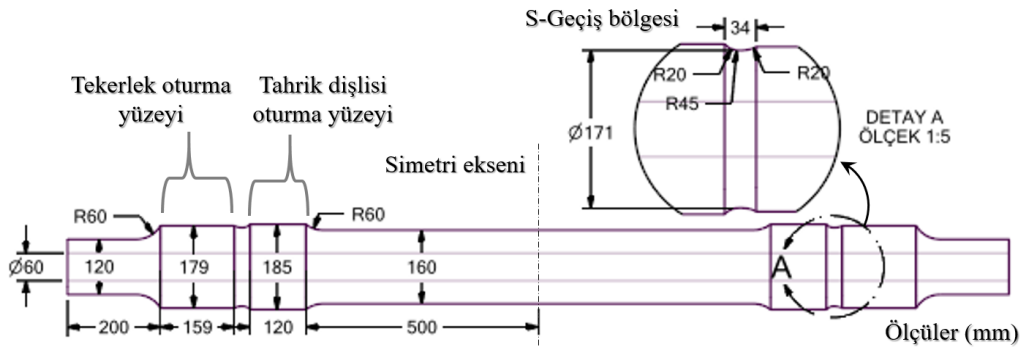
Demiryolu dingillerinde çatlakların hızlı ilerleyerek ani kırılmaya yol açabilmesi, özellikle geometrik süreksizliklerin bulunduğu bölgelerde çatlak davranışının ve kırılma riskinin güvenilir biçimde değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır.

Bu çalışmada, demiryolu dingilinin tekerlek ve tahrik dişlisinin dingil üzerindeki oturma yerleri arasında bulunan S-geçiş bölgesindeki üç boyutlu çatlakların GŞF çözümleri sistematik olarak incelenmiş ve S-geçiş bölgesindeki düzensiz gerilme alanı ile etkileşimi ortaya konmuştur. Farklı çatlak derinliklerine ve farklı çatlak en-boy oranlarına sahip eğimli ve sapmış çatlaklar geniş bir yelpazede ele alınarak, bu parametrelerin K_I , K_{II} ve K_{III} GŞF değerleri üzerindeki etkileri tartışılmıştır. Böylece çalışma, demiryolu dingillerinin S-geçiş bölgelerindeki çatlakların kırılma değerlendirmesi için sistematik bir GŞF temeli sunmaktadır.

Bu çalışmada demiryolu dingillerinin gerçek işletme koşullarında maruz kaldığı tam değişken yük spektrumu, döner eğilme çevrimleri, dinamik etkiler ve burulma yükleri doğrudan modellenmemiştir. Bunun yerine, çatlak boyutu ve yöneliminin üç boyutlu gerilme şiddet faktörü bileşenleri üzerindeki etkisini sistematik olarak değerlendirebilmek amacıyla belirli bir eğilme yükleme durumu esas alınmıştır. Dolayısıyla, elde edilen sonuçlar tam servis yükleme geçmişinin doğrudan bir simülasyonunu değil, belirlenen referans eğilme durumu altında çatlak geometrisi ve yöneliminin K_I , K_{II} ve K_{III} üzerindeki etkisini ortaya koyan parametrik bir değerlendirmeyi temsil etmektedir.

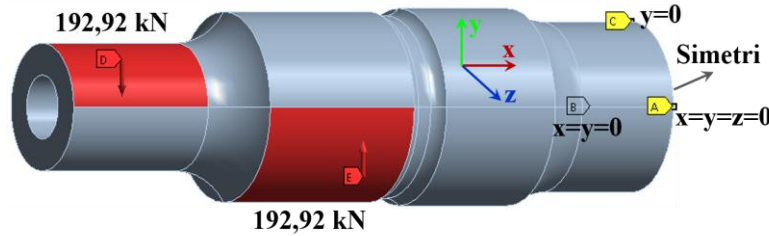
2. Yöntem ve Sayısal Model

Demiryolu dingilinin S-geçiş bölgesindeki üç boyutlu yüzey çatlaklarının GŞF (K_I , K_{II} ve K_{III}) değerlerini belirlemek üzere detaylı bir sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Kırılma mekaniği analizlerine geçilmeden önce, sayısal modelin ve uygulanan sınır koşullarının doğruluğunu kanıtlamak amacıyla literatürde yer alan Yamamoto ve Ishiduka'nın [9] yapmış olduğu çalışmada yer alan dingil geometrisi referans alınarak modellenmiştir. Şekil 1'de delikli demiryolu dingilinin boyutları ve simetri eksenine göre yapısı gösterilmiştir.



Şekil 1. İncelenen demiryolu dingilinin genel geometrisi, boyutları ve S-geçiş bölgesinin teknik detayı [9]

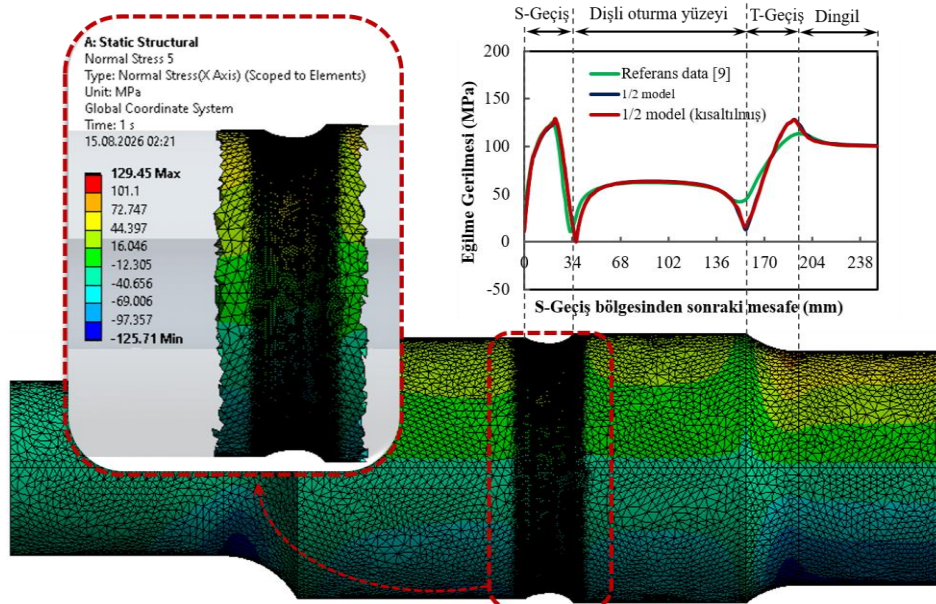
Referans çalışmada geometrik simetriden faydalanılarak 1/4 simetrik model tercih edilmiştir. Ancak bu çalışmada açılı (eğim (α) ve sapma (β) açılarına sahip) çatlak geometrileri incelendiğinden, çatlak ucundaki gerilme dağılımının üç boyutlu değerlendirilebilmesi için model ilk aşamada merkezi simetrik (1/2 simetrik) olarak yapılandırılmıştır. Ardından hesaplama maliyetini düşürmek amacıyla, çatlak bölgesinin baskın olarak basit eğilmeye maruz kaldığı dikkate alınarak S-geçiş bölgesindeki gerilme alanını etkilemeyecek şekilde merkezden belirli bir mesafe model kısaltılarak kesit yüzeyine simetri koşulları tanımlanmıştır (Şekil 2). Referans çalışmada [9] 160 mm çaplı dingil bölgesinde 100 MPa gerilme olacak şekilde yükleme yapıldığı belirtildiği için, mevcut modelde de aynı gerilmeyi oluşturabilmek için 192,92 kN eğilme yükü Şekil 2’de gösterildiği şekilde uygulanmıştır. Referans çalışmada [9] kullanılan SFA640 çeliğinin elastik malzeme özellikleri esas alınarak sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiştir. Elastisite modülü 206 GPa ve poisson oranı 0,3 olarak alınmıştır. Mevcut çalışmanın amacı zamana bağlı bir servis yükleme geçmişini veya yorulma çatlak ilerlemesini doğrudan simüle etmek değil, belirli bir eğilme yükleme durumu altında çatlak boyutu ve yöneliminin üç boyutlu gerilme şiddet faktörleri üzerindeki etkisini karşılaştırmalı olarak incelemektir. Bu nedenle analizlerde statik eğilme yükü, referans bir yükleme durumu olarak kullanılmıştır.



Şekil 2. Merkezi simetrik kısaltılmış modele uygulanan yükleme ve sınır koşulları

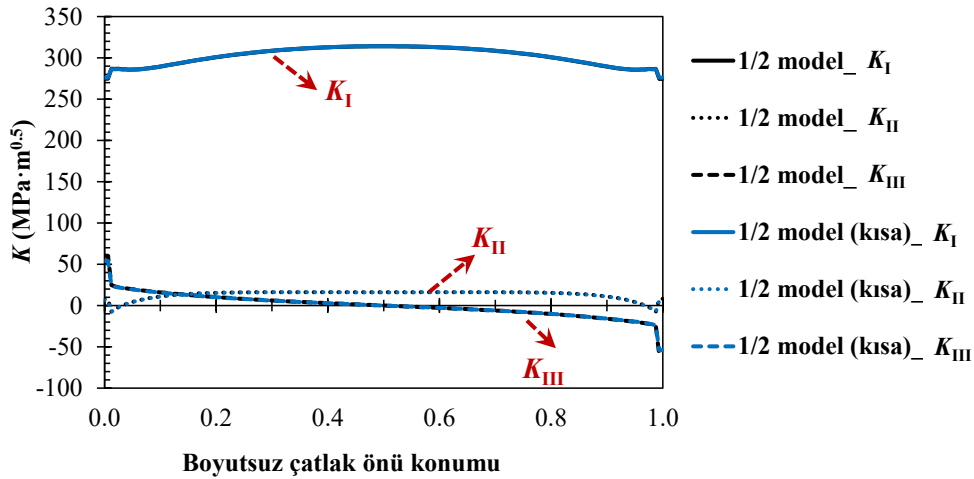
Rijit cisim hareketini önlemek amacıyla model üzerinde sınırlı sayıda serbestlik derecesini kısıtlayan noktasal sınır koşulları uygulanmıştır. Şekil 2’de gösterilen A, B ve C noktaları, sonlu eleman modeli üzerinde seçilmiş tekil düğümleri temsil etmektedir. A düğümünde üç doğrultudaki ötelenmeler ($U_x=U_y=U_z=0$), B düğümünde iki doğrultudaki ötelenmeler ($U_x=U_y=0$) ve C düğümünde yalnızca düşey doğrultudaki ötelenme ($U_y=0$) sınırlandırılmıştır. Böylece modelin rijit cisim hareketleri önlenirken, modelin geniş bir bölgesinde yapay rijitlik oluşturabilecek ilave kısıtlamalardan kaçınılmıştır. Kullanılan noktasal kısıtların S-geçiş bölgesindeki gerilme alanı üzerindeki etkisi, Şekil 3’te sunulan doğrulama sonuçları kapsamında değerlendirilmiştir. Mevcut model, kısaltma yapılmamış yarı model ve referans çalışmadan elde edilen eksenel gerilme dağılımlarının S-geçiş bölgesi boyunca yakın uyum göstermesi, rijit cisim hareketlerini önlemek amacıyla kullanılan A, B ve C kısıtlarının incelenen bölgede anlamlı bir yapay gerilme veya rijitlik etkisi oluşturmadığını göstermektedir.

Sonlu eleman analizleri ANSYSTM [44] kullanarak gerçekleştirilmiştir. Çatlaksız model üzerinden yapılan statik gerilme analizlerinde, hem merkezi simetrik modelin hem de kısaltılmış merkezi simetrik modelin S-geçışı ve tahrik dışlısı oturma yüzeyi boyunca ürettiği eksenel (eğilme) gerilme dağılımları, Yamamoto ve Ishiduka [9] tarafından verilen 1/4 simetrik model verileriyle karşılaştırılmış ve sonuçların uyum içerisinde olduğu gösterilmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. Çatlaksız model gerilme analizi sonuçları ve referans çalışma ile karşılaştırılması

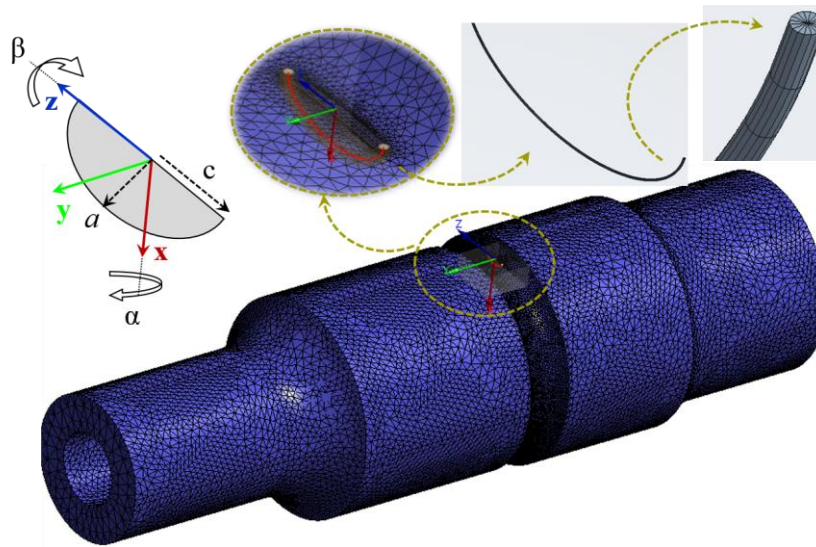
Kısıltılmış modelde kullanılan sınır koşulunun çatlaklı model sonuçları üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla, $\alpha = 0^\circ$ yönelimindeki aynı çatlak geometrisi için kısıltılmamış yarı simetrik model üzerinde ilave bir kırılma analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4'te kısıltılmış ve kısıltılmamış yarı modellerden elde edilen K_I , K_{II} ve K_{III} GŞF değerlerinin çatlak önü boyunca karşılaştırılması sunulmaktadır. Sonuçlar, GŞF değerlerinin çatlak önü boyunca genel dağılım karakteri ve büyüklükler açısından iki model arasında birebir uyum bulunduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, modelin S-geçiş bölgesinden yeterince uzak bir konumda kısıltılmasının, incelenen çatlak bölgesindeki GŞF sonuçları üzerinde anlamlı bir etki oluşturmadığını göstermektedir.



Şekil 4. Kısıltılmış ve kısıltılmamış yarı modeller için elde edilen GŞF dağılımları ($\alpha = 0^\circ$)

Doğrulan modelin S-geçiş bölgesinde maksimum eğilme gerilmesinin olduğu noktaya yarı eliptik yüzey çatlakları yerleştirilmiştir. Çatlak ucu civarındaki gerilme tekilliğini doğru yakalayabilmek için çatlak önü boyunca dairesel ağ yapısı ve çeyrek nokta elemanları kullanılmıştır. Çatlak derinliği " a " ve yarı çatlak uzunluğu " c " ile ifade edilmektedir. Çatlakın merkezinde bulunan yerel koordinat sistemine göre, x eksenine etrafında 15° er derece döndürülerek $\alpha = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ ve 90° eğik çatlaklar, z eksenine etrafında 15° er derece döndürülerek ise $\beta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ ve 60° sapmış çatlaklar elde edilmiştir (Şekil 5). Şekil 5'te S-geçiş

bölgesinde oluşturulan üç boyutlu çatlak modeli, sonlu eleman ağ yapısı ve çatlak önü bölgesinin detayları gösterilmektedir. Sayısal analizler ANSYS Workbench (Sürüm 2026 R1) yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çatlak ucu çevresindeki bölgede 20 düğümlü ikinci dereceden SOLID186 elemanları kullanılırken, modelin geri kalan kısmı 10 düğümlü SOLID187 elemanları ile bölüntülenmiştir. Çatlak ucu civarındaki $1/\sqrt{r}$ gerilme tekilliğini doğru yakalayabilmek amacıyla çatlak önündeki ilk eleman sırası çeyrek nokta elemanları olarak tanımlanmıştır. $a=10$ mm ve $c=10$ mm çatlak boyutları için en büyük kontur yarıçapı = 0,6, çatlak önü bölüntü sayısı = 80, çevresel bölüntü sayısı = 16 ve ağ kontur sayısı = 10 parametreleri kullanılarak oluşturulan sonlu eleman modeli 18072 adet SOLID186 elemanı, 150951 adet SOLID187 elemanı ve toplam 334762 düğüm içermektedir. Karışık modlu gerilme şiddet faktörlerinin (K_I , K_{II} ve K_{III}) hesaplanmasında Etkileşim İntegrali yöntemi kullanılmıştır. Çatlak ucuna yakın iç konturlardaki yerel ağ hassasiyetlerinin ve sayısal gürültülerin etkisini elemek amacıyla, alan bağımsızlığının ve yakınsamanın sağlandığı en dıştaki (son) konturdan elde edilen K_I , K_{II} ve K_{III} değerleri nihai sonuçlar olarak esas alınmıştır.



Şekil 5. S-geçiş bölgesindeki üç boyutlu çatlak modeli, ağ yapısı ve çatlak önü detayı

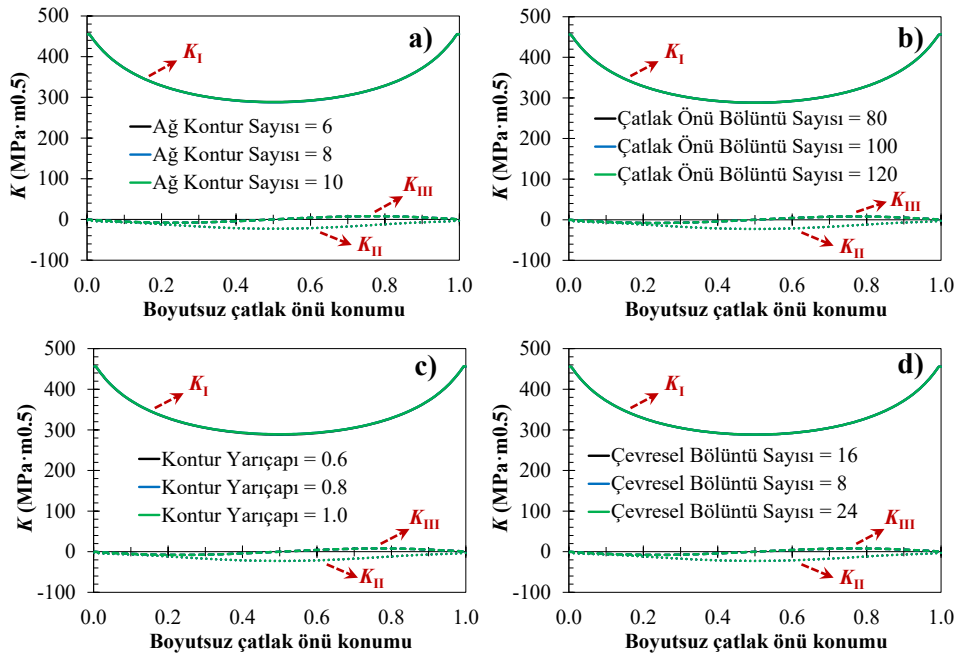
Çalışma kapsamında değerlendirilen parametrelerin özeti Tablo 1’de verilmiştir. Tabloda yer alan “t” yerel radyal et kalınlığını temsil etmektedir. S-geçiş bölgesinin dış çapı 171 mm ve delik çapı 60 mm olduğundan, yerel radyal et kalınlığı, $t = 55.5$ mm olarak hesaplanmıştır. Bu değer referans alınarak çatlak derinlikleri (a), a/t oranlarına göre belirlenmiş, çatlak uzunlukları (c) ise a/c oranları kullanılarak hesaplanmış ve farklı eğim ve sapma açıları için parametrik analizler gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. Çatlak geometrisi ve yönelimine ilişkin parametrik çalışma aralığı

Parametre	Parametrenin Tanımı	Değerler
α	Çatlak eğim açısı	$0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$
β	Çatlak sapma açısı	$0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$
a/t	Çatlak derinliğinin yerel radyal et kalınlığına oranı	0,08; 0,10; 0,12
a/c	Çatlak derinliğinin çatlak uzunluğuna oranı	0,5; 1,0; 1,5

Ağ yapısının sonuçlara etkisini ve ağdan bağımsızlığı (mesh bağımsızlığı) değerlendirmek amacıyla hassasiyet ve optimizasyon çalışması yürütülmüştür. Bu kapsamda ağ kontur sayısı (6, 8 ve 10), çatlak önü bölüntü sayısı (80, 100 ve 120), kontur yarıçapı (0,6; 0,8 ve 1,0 mm) ve

çevresel bölüntü sayısı (8, 16 ve 24) parametrelerinin K_I , K_{II} ve K_{III} değerleri üzerindeki etkileri $a = 10$ mm ve $c = 10$ mm çatlak boyutları için incelenmiştir (Şekil 6).



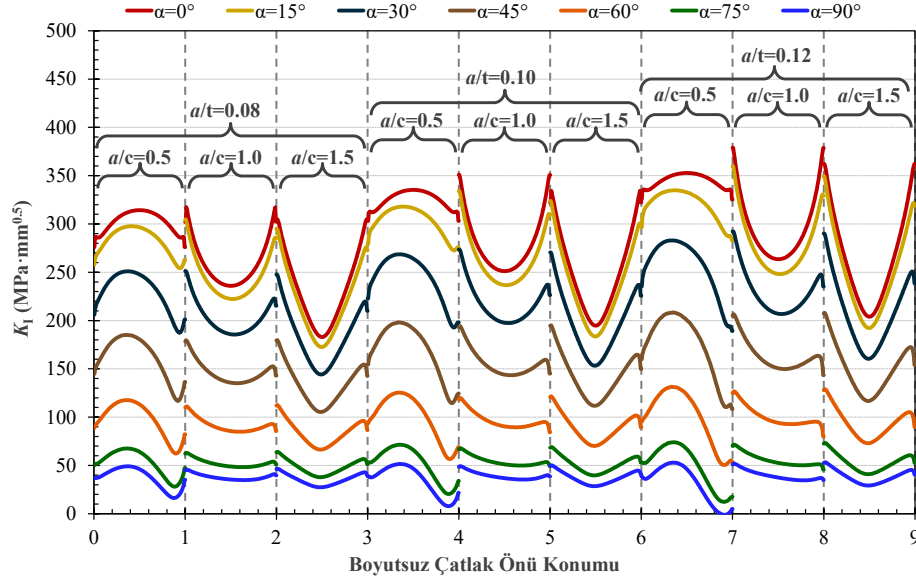
Şekil 6. Ağ hassasiyet analizleri ve parametrelerin GŞF (K_I , K_{II} , K_{III}) sonuçlarına etkisi

Grafiklerden görüldüğü üzere seçilen parametre varyasyonlarının K_I , K_{II} ve K_{III} değerleri üzerinde ihmal edilebilir bir değişime yol açtığı ve ağ bağımsızlığının sağlandığı gösterilmiştir. Farklı parametre kombinasyonlarına ait eğrilerin üst üste görünmesi, ilgili sonuçların birbirine yakın değerler vermesinden kaynaklanmaktadır. Yapılan optimizasyon analizleri sonucunda hesaplama süresi ve hassasiyet dengesi gözetilerek, ağ kontur sayısı 6, çatlak önü bölüntü sayısı 80, kontur yarıçapı 0,6 mm ve çevresel bölüntü sayısı 8 olarak belirlenmiş parametrik analizlerde bu temel ağ konfigürasyonu kullanılmıştır. Bununla birlikte, modellenmesi daha zor olan yüksek eğim veya sapma açısına sahip bazı derin ve sığ çatlakların yeterli ağ inceliğiyle oluşturulabilmesi amacıyla, gerekli durumlarda bazı ağ parametrelerinde sınırlı değişiklikler yapılmıştır. Örneğin, $\beta = 75^\circ$ sapma açısında çatlakın serbest yüzeye çok yaklaşması nedeniyle uygun ve yeterli incelikte bir ağ yapısı oluşturulamamış, bu nedenle parametrik analizlerde sapma açısı 60° ile sınırlandırılmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

Bu bölümde, demiryolu dingilinin S-geçiş bölgesinde modellenen üç boyutlu eğik yüzey çatlaklarına ait GŞF analiz sonuçları sunulmaktadır. Analizlerden çatlak önü boyunca elde edilen mod-I, mod-II ve mod-III GŞF değerleri olan K_I , K_{II} ve K_{III} değerlendirilmiştir. Bulguların daha kompakt ve karşılaştırmalı bir şekilde sunulabilmesi amacıyla, her bir a/t ve a/c parametre kombinasyonuna ait tekil boyutsuz çatlak önü koordinatları 0 ile 1 arasında tanımlanmış ve dokuz farklı çatlak geometrisine ait sonuçlar yatay eksende uç uca eklenerek 0-9 aralığında tek bir grafik üzerinde gösterilmiştir. Bu gösterim, çatlak boyutu, çatlak en-boy oranı ve eğim açısının farklı kırılma modları üzerindeki etkilerinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Çatlak eğim açısının ($\alpha = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ ve 90°) GŞF üzerindeki etkilerinin incelendiği parametrik analizlerde, çatlak sapma açısı $\beta = 0^\circ$ (sapmasız durum) olarak sabit tutulmuştur. Şekil 7’de farklı çatlak boyutları ve eğim açıları için çatlak önü boyunca elde edilen K_I dağılımları verilmiştir. Dokuz farklı çatlak geometrisine ait sonuçların karşılaştırmalı olarak tek bir grafik üzerinde değerlendirilebilmesi amacıyla, her bir çatlak geometrisi için 0-1

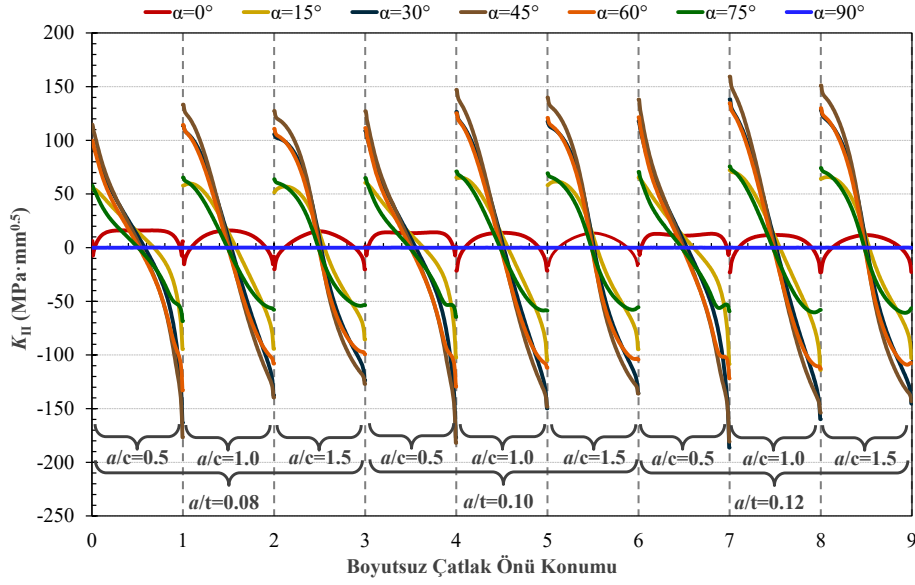
aralığında tanımlanan boyutsuz çatlak önü koordinatı ardışık olarak birleştirilmiştir. Böylece dokuz çatlak geometrisine ait sonuçlar 0-9 aralığındaki birleşik boyutsuz koordinat üzerinde sunulmuştur. Birleşik koordinat eksenindeki her bir birim aralık, ilgili çatlak geometrisinin kendi normalize edilmiş çatlak önü koordinatını temsil etmektedir.



Şekil 7. Farklı çatlak boyutları (a/t , a/c) ve eğim açıları (α) için çatlak önü boyunca K_I GŞF dağılımı

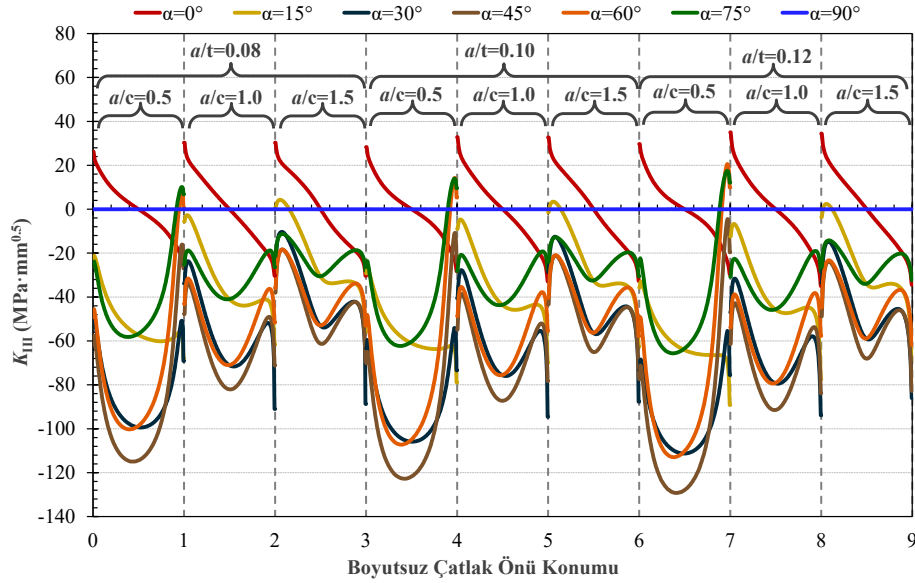
Beklendiği üzere, çatlak düzleminin aksenal gerilmeye tam dik konumda olduğu eğim açısının $\alpha = 0^\circ$ olduğu tüm kombinasyonlar için en yüksek K_I değerleri elde edilmiştir. Eğim açısı kademeli olarak arttıkça etkin mod-I açılma etkisinin azalmasına bağlı olarak K_I değerleri genel olarak düşmüş ve $\alpha = 90^\circ$ durumunda en düşük seviyelere ulaşmıştır. Bununla birlikte, $\alpha = 90^\circ$ durumunda K_I değerlerinin tamamen sıfıra ulaşmaması, S-geçiş bölgesindeki düzgün olmayan yerel gerilme alanının çatlak önü boyunca hâlâ bir açılma bileşeni oluşturduğunu göstermektedir. Ayrıca, çatlak derinliğinin yerel radyal et kalınlığına oranı (a/t) arttıkça K_I seviyelerinde genel bir artış gözlenirken, bu etkinin eğim açısı arttıkça zayıfladığı görülmektedir. Bu durum, yüksek eğim açılarında etkin mod-I açılma etkisinin azalmasıyla ilişkilendirilebilir. Çatlak en-boy oranının $a/c = 0.5$ 'ten 1.5 'e değişmesi ise yalnızca K_I seviyesini değil, çatlak önü boyunca GŞF dağılımının şekli ve genliğini de değiştirmektedir. Ayrıca eğim açısının artmasıyla çatlak önü boyunca K_I dağılımlarının simetrikliğinin belirgin biçimde bozulduğu görülmektedir. Bu davranış, S-geçiş bölgesinde kısa mesafelerde önemli değişimler gösteren yerel eğilme gerilmesi dağılımı (Şekil 3) ile eğimli çatlağın etkileşimiyle ilişkilendirilebilir, çünkü çatlak cephesinin farklı noktaları farklı gerilme seviyelerine maruz kalmaktadır.

Şekil 8'de düzlem içi kayma/kesme modunu temsil eden K_{II} GŞF değerlerinin dağılımı verilmiştir. $\alpha = 0^\circ$ ve $\alpha = 90^\circ$ durumlarında K_{II} değerlerinin sıfıra yakın olması, bu yönelimlerde düzlem içi kayma etkisinin oldukça sınırlı olduğunu göstermektedir. Buna karşılık, çatlak eğim açısının ara değerlere ulaşmasıyla K_{II} belirgin biçimde artmış ve özellikle $\alpha = 45^\circ$ 'de mutlak değer açısından en yüksek seviyelere ulaşmıştır. Eğimli çatlaklarda K_{II} dağılımının çatlak önü boyunca pozitif ve negatif değerlere geçiş göstermesi, kayma etkisinin yalnızca büyüklüğünün değil, yönünün de çatlak önü boyunca değiştiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca dağılımların belirgin asimetrik karakteri, çatlak yönelimi ile S-geçiş bölgesindeki düzensiz gerilme alanının (Şekil 3) etkileşimiyle ilişkilendirilebilir. Çatlak derinliğinin yerel radyal et kalınlığına oranı (a/t) ve çatlak en-boy oranındaki (a/c) değişimler K_{II} 'nin mutlak değerini ve dağılım şeklini etkilemekle birlikte, bu etkilerin çatlak eğim açısının etkisine kıyasla daha sınırlı olduğu görülmektedir.



Şekil 8. Farklı çatlak boyutları (a/t , a/c) ve eğim açıları (α) için çatlak önü boyunca K_{II} GŞF dağılımı

Düzlem dışı yırtılma modunu temsil eden K_{III} GŞF değerlerinin çatlak önü boyunca değişimi ise Şekil 9'da gösterilmektedir.

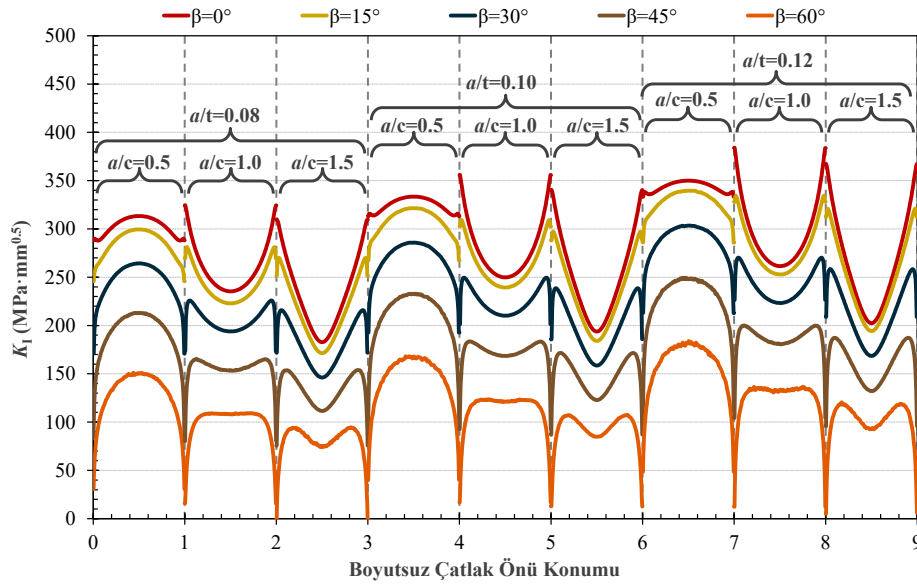


Şekil 9. Farklı çatlak boyutları (a/t , a/c) ve eğim açıları (α) için çatlak önü boyunca K_{III} GŞF dağılımı

$\alpha = 90^\circ$ durumunda K_{III} değerlerinin sıfıra yakın olduğu, $\alpha = 0^\circ$ 'de ise düşük mutlak değerlerde kaldığı görülmektedir. Çatlak eğim açısının artmasıyla K_{III} değerlerinin mutlak büyüklüğü belirgin biçimde artmakta ve özellikle $\alpha = 45^\circ$ 'de en yüksek seviyelere ulaşmaktadır. Daha yüksek eğim açılarında, özellikle $\alpha = 75^\circ$ 'de, K_{III} değerlerinin mutlak büyüklüğü tekrar azalmaktadır. K_{III} dağılımlarında çatlak önü boyunca gözlenen işaret değişimleri, mod-III yırtılma bileşeninin yönünün çatlak cephesi boyunca değiştiğini göstermektedir. Çatlak en-boy oranının (a/c) değişmesi, K_{III} değerlerinin hem büyüklüğünü hem de çatlak önü boyunca dağılım şeklini belirgin biçimde etkilemekte, özellikle a/c oranının artmasıyla K_{III} 'ün mutlak değerlerinde genel olarak azalma görülmektedir. Çatlak derinliğinin yerel radyal et kalınlığına oranının (a/t) artması ise özellikle belirli a/c ve α kombinasyonlarında K_{III} 'ün mutlak değerlerini artırmaktadır. Bu sonuçlar,

çatlak geometrisinin ve yöneliminin mod-III GŞF dağılımı üzerinde önemli bir etkisinin bulunduğunu göstermektedir.

Eğim açısının K_I , K_{II} ve K_{III} üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesinin ardından, çatlak sapma açısının (β) GŞF dağılımları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çatlak sapma açısının ($\beta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ ve 60°) GŞF üzerindeki etkilerinin değerlendirildiği analizlerde ise çatlak eğim açısı $\alpha = 0^\circ$ (eksenel gerilmeye dik konum) olarak sabit tutulmuştur. Şekil 10'da, farklı a/t ve a/c oranlarına sahip çatlaklar için β sapma açısının çatlak önü boyunca K_I değerleri üzerindeki etkisi verilmiştir.

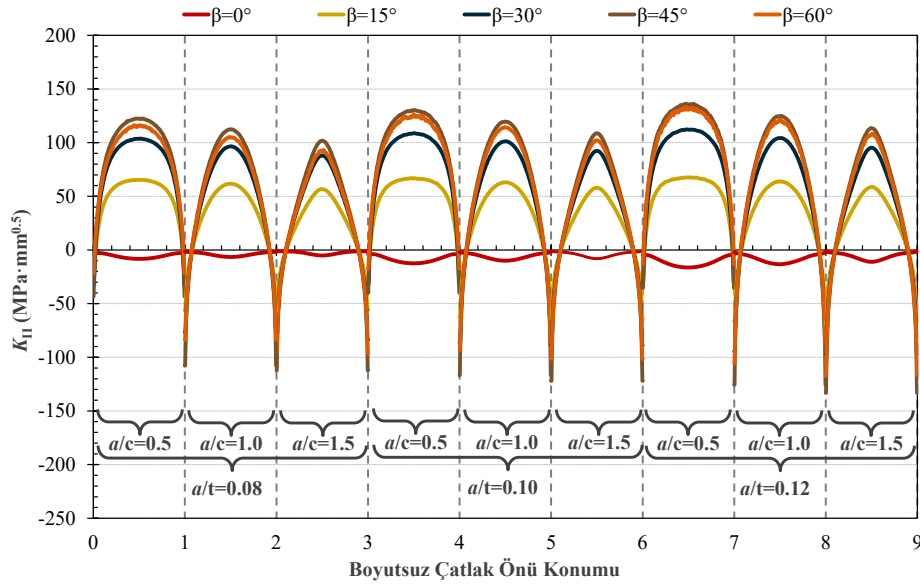


Şekil 10. Farklı çatlak boyutları (a/t , a/c) ve sapma açıları (β) için çatlak önü boyunca K_I GŞF dağılımı

Şekil 10 incelendiğinde, $\beta = 0^\circ$ durumunda en yüksek K_I değerlerinin elde edildiği ve sapma açısının artmasıyla K_I değerlerinin genel olarak azaldığı görülmektedir. Bu azalma özellikle $\beta = 45^\circ$ ve $\beta = 60^\circ$ durumlarında daha belirgin hale gelmektedir. Farklı β değerlerinde çatlak önü boyunca oluşan K_I dağılımları genel karakterini korumakta ve çatlak merkezine göre yaklaşık simetrik bir yapı sergilemektedir. Bu durum, α değişiminde gözlenen asimetrik dağılımın aksine, sapma açısının (β) çatlakın S-geçiş bölgesindeki eksenel gerilme gradyanı boyunca konumunu değiştirmemesiyle ilişkilendirilebilir. Çatlak derinliğinin yerel radyal et kalınlığına oranı (a/t) arttıkça, tüm sapma açıları için K_I seviyelerinde genel bir artış gözlenmektedir. Çatlak en-boy oranındaki (a/c) değişimin ise K_I 'in mutlak değerlerinin yanı sıra çatlak önü boyunca dağılımın şekli ve yerel maksimum-minimum değerleri üzerinde etkili olduğu görülmektedir.

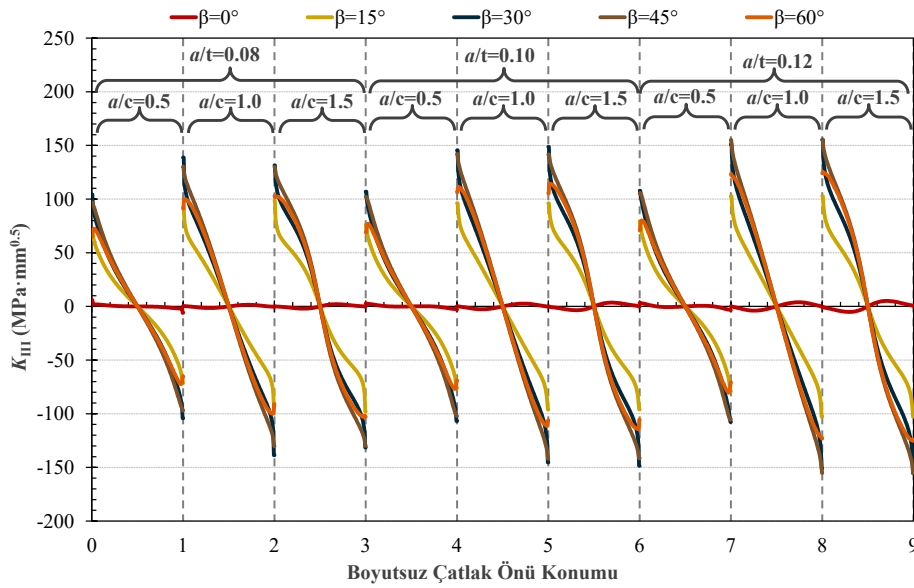
Şekil 11'de düzlem içi kayma modunu temsil eden K_{II} GŞF değerlerinin farklı sapma açıları için çatlak önü boyunca dağılımı verilmiştir. $\beta = 0^\circ$ durumunda K_{II} değerlerinin tüm çatlak geometrilerinde sıfıra yakın olduğu görülürken, sapma açısının artmasıyla K_{II} değerlerinin mutlak büyüklüğü belirgin biçimde artmaktadır. $\beta = 30^\circ, 45^\circ$ ve 60° durumlarında yüksek K_{II} değerleri elde edilmiş, özellikle $\beta = 45^\circ$ ve $\beta = 60^\circ$ eğrilerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Çatlak önü boyunca oluşan pozitif ve negatif K_{II} değerleri, düzlem içi kayma bileşeninin çatlak cephesi boyunca yön değiştirdiğini göstermektedir. Bununla birlikte, farklı β değerlerindeki dağılımların çatlak merkezine göre yaklaşık simetrik karakterini koruduğu görülmektedir. Bu davranış, sapma açısının çatlakın S-geçiş bölgesindeki eksenel konumunu değiştirmemesi ve çatlak cephesinin karşılıklı noktalarının benzer gerilme seviyeleriyle karşılaşmasıyla ilişkilendirilebilir. Çatlak en-boy oranı (a/c) arttıkça K_{II} 'nin pozitif tepe değerlerinde genel olarak azalma görülürken, çatlak derinliğinin yerel radyal et kalınlığına oranının (a/t) artması K_{II} seviyelerinde sınırlı bir artışa neden olmaktadır. Bu sonuçlar, K_{II} dağılımı üzerinde sapma açısının

baskın bir parametre olduğunu, çatlak geometrisinin ise dağılımın genliği ve biçimini ikincil olarak etkilediğini göstermektedir.



Şekil 11. Farklı çatlak boyutları (a/t , a/c) ve sapma açıları (β) için çatlak önü boyunca K_{II} GŞF dağılımı

K_{III} değerlerinin çatlak önü boyunca dağılımı Şekil 12'de verilmiştir. $\beta = 0^\circ$ durumunda K_{III} değerlerinin tüm çatlak geometrilerinde sıfıra yakın olduğu, sapma açısının artmasıyla birlikte düzlem dışı yırtılma bileşeninin belirgin biçimde ortaya çıktığı görülmektedir. $\beta = 15^\circ$ 'de K_{III} değerleri artmaya başlarken, $\beta = 30^\circ$, 45° ve 60° durumlarında daha yüksek ve birbirine yakın mutlak değerler elde edilmiştir. Bu durum, belirli bir sapma açısından sonra sapma açısının K_{III} üzerindeki etkisinin sınırlanmaya başladığını göstermektedir. K_{III} dağılımlarının çatlak önü boyunca pozitif ve negatif değerlere geçmesi, mod-III bileşeninin yönünün çatlak cephesi boyunca değiştiğini göstermektedir. Bununla birlikte, farklı β değerlerinde dağılımların çatlak merkezine göre yaklaşık simetrik karakterini koruduğu görülmektedir. Çatlak derinliğinin yerel radyal et kalınlığına oranı (a/t) arttıkça K_{III} değerlerinin mutlak büyüklüğü genel olarak artmaktadır. Çatlak en-boy oranının (a/c) değişimi ise K_{III} dağılımının hem genliği hem de şekli üzerinde etkili olmakta, ancak bu etkinin β sapma açısındaki değişime göre daha sınırlı kaldığı görülmektedir.



Şekil 12. Farklı çatlak boyutları (a/t , a/c) ve sapma açıları (β) için çatlak önü boyunca K_{III} GŞF dağılımı

4. Sonuç

Bu çalışmada, demiryolu dingilinin tekerlek ve tahrik dişlisinin dingil üzerindeki oturma yerleri arasında bulunan S-geçiş bölgesindeki üç boyutlu yüzey çatlaklarının gerilme şiddet faktörü değerleri sonlu elemanlar yöntemi ile sistematik olarak incelenmiştir. Farklı çatlak boyutları, en-boy oranları, eğim ve sapma açıları dikkate alınarak K_I , K_{II} ve K_{III} değerlerinin çatlak önü boyunca değişimleri değerlendirilmiştir. Elde edilen temel sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Çatlak eğim açısının (α) GŞF'ler üzerinde belirgin bir etkisi olduğu görülmüştür. $\alpha = 0^\circ$ durumunda K_I değerleri tüm çatlak geometrileri için en yüksek seviyelerde elde edilirken, eğim açısının artmasıyla K_I genel olarak azalmış ve $\alpha = 90^\circ$ durumunda en düşük seviyelere ulaşmıştır. Buna karşılık K_{II} ve K_{III} 'ün mutlak değerleri ara eğim açıları, özellikle $\alpha = 45^\circ$ civarında, belirgin biçimde artmıştır. $\alpha = 0^\circ$ mod-I açısından en kritik, $\alpha = 45^\circ$ ise mod-II ve mod-III açısından en kritik yükleme açıları olarak değerlendirilmiştir.

Eğim açısının (α) artmasıyla özellikle K_I ve K_{III} dağılımlarının çatlak önü boyunca simetrikliği belirgin biçimde bozulmuştur. Bu davranış, eğimli çatlağın S-geçiş bölgesindeki kısa mesafelerde önemli değişimler gösteren eksenel eğilme gerilmesi alanı etkileşimiyle ilişkilendirilmiştir. Çatlak önü üzerindeki farklı noktaların farklı gerilme seviyelerine maruz kalması, GŞF dağılımlarının asimetrik hale gelmesine neden olmuştur.

Çatlak derinliğinin yerel radyal et kalınlığına oranı olan a/t 'nin artması, özellikle K_I olmak üzere GŞF değerlerinde genel bir artış eğilimine neden olmuştur. Bununla birlikte, eğim açısının (α) artmasıyla a/t 'nin GŞF üzerindeki etkisinin bazı durumlarda zayıfladığı görülmüştür. Çatlak en-boy oranı a/c ise yalnızca GŞF seviyelerini değil, çatlak önü boyunca dağılımların şekli, genliği ve yerel maksimum/minimum noktalarının konumlarını da etkilemiştir.

Çatlak sapma açısı (β) arttıkça K_I değerleri genel olarak azalırken, K_{II} ve K_{III} bileşenleri belirginleşmiştir. K_{II} ve K_{III} için $\beta = 30^\circ$, 45° ve 60° durumlarında yüksek değerler elde edilmiş ve özellikle daha yüksek sapma açıları değişimin sınırlanmaya başladığı görülmüştür. Çatlak sapma açısının (β) GŞF dağılımlarına etkisi, eğim açısının (α) etkisinden farklı bir davranış göstermiştir. α değişimlerinde özellikle K_I ve K_{III} değerlerinde çatlak merkezine göre simetriklik bozulurken, β değişimlerinde GŞF dağılımları çatlak merkezine göre yaklaşık simetrik karakterini

korumuştur. Bu durum, sapma açısının çatlağın S-geçiş bölgesindeki gerilme gradyanı boyunca konumunu değiştirmemesiyle ilişkilendirilmiştir.

Genel olarak sonuçlar, S-geçiş bölgesindeki üç boyutlu çatlakların GŞF davranışının yalnızca çatlak boyutuna bağlı olmadığını, çatlak yönelimi ve geometrisinin de K_I , K_{II} ve K_{III} bileşenlerinin büyüklüğü ve çatlak önü boyunca dağılımı üzerinde önemli rol oynadığını göstermiştir. Elde edilen sonuçların, demiryolu dingillerinin S-geçiş bölgelerinde bulunan çatlakların kırılma ve yapısal bütünlük değerlendirmelerinde kullanılabilecek bir GŞF referans temeli sağlaması beklenmektedir.

Bununla birlikte, gerçek demiryolu işletme koşullarında meydana gelen döner eğilme, dinamik yükler, değişken yük spektrumları ve burulma etkileri nedeniyle çatlak üzerindeki yerel gerilme durumu ve buna bağlı olarak K_I , K_{II} ve K_{III} bileşenleri çevrim boyunca değişebilir. Mevcut sonuçlar belirlenen statik eğilme yükü altındaki referans durum için geçerlidir.

Kaynakça

- [1] U. Zerbst, S. Beretta, G. Köhler, A. Lawton, M. Vormwald, H. T. Beier, *et al.*, “Safe life and damage tolerance aspects of railway axles-A review,” *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 98, pp. 214-271, 2013, doi: 10.1016/j.engfracmech.2012.09.029.
- [2] U. Zerbst, M. Vormwald, C. Andersch, K. Mädler, and M. Pfuff, “The development of a damage tolerance concept for railway components and its demonstration for a railway axle,” *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 72, no. 2, pp. 209-239, 2005, doi: 10.1016/j.engfracmech.2003.11.011.
- [3] U. Zerbst, M. Schödel, and H. Beier, “Parameters affecting the damage tolerance behaviour of railway axles,” *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 78, no. 5, pp. 793-809, 2011, doi: 10.1016/j.engfracmech.2010.03.013.
- [4] M. Luke, I. Varfolomeev, K. Lütkepohl, and A. Esderts, “Fracture mechanics assessment of railway axles: Experimental characterization and computation,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 17, no. 3, pp. 617-623, 2010, doi: 10.1016/j.engfailanal.2009.04.008.
- [5] M. Luke, I. Varfolomeev, K. Lütkepohl, and A. Esderts, “Fatigue crack growth in railway axles: Assessment concept and validation tests,” *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 78, no. 5, pp. 714-730, 2011, doi: 10.1016/j.engfracmech.2010.11.024.
- [6] Z. Pater, J. Tomczak, and T. Bulzak, “Novel cross wedge rolling method for producing railcar axles,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 128, pp. 3403-3413, 2023, doi: 10.1007/s00170-023-12142-1.
- [7] M. Madia, S. Beretta, and U. Zerbst, “An investigation on the influence of rotary bending and press fitting on stress intensity factors and fatigue crack growth in railway axles,” *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 75, no. 8, pp. 1906-1920, 2008, doi: 10.1016/j.engfracmech.2007.08.015.
- [8] M. Madia, S. Beretta, M. Schödel, U. Zerbst, M. Luke, and I. Varfolomeev, “Stress intensity factor solutions for cracks in railway axles,” *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 78, no. 5, pp. 764-792, 2011, doi: 10.1016/j.engfracmech.2010.03.019.
- [9] M. Yamamoto and H. Ishiduka, “Stress concentration of transition groove induced by a press-fitted part in railway axles,” *International Journal of Fatigue*, vol. 97, pp. 48-55, 2017, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2016.12.025.
- [10] T. Nwe and M. Pimsarn, “Multiaxial fatigue-life prediction of railway axles with consideration of braking effects,” *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, vol. 10, no. 3, pp. 897-905, 2023, doi: 10.18280/mmep.100320.
- [11] A. Pourheidar, S. Beretta, D. Regazzi, and C. Baykara, “Comparison of SIF solutions for cracks under rotating bending and their impact upon propagation lifetime of railway axles,” *Procedia Structural Integrity*, vol. 8, pp. 116-127, 2018, doi: 10.1016/j.prostr.2017.12.060.
- [12] R. Hannemann and M. Sander, “Effect of specimen geometry and press-fit on the stress intensity factor solution for scaled wheelset axles under bending,” *Procedia Structural Integrity*, vol. 2, pp. 2527-2534, 2016, doi: 10.1016/j.prostr.2016.06.316.
- [13] R. Hannemann, P. Köster, and M. Sander, “Investigations on crack propagation in wheelset axles under rotating bending and mixed mode loading,” *Procedia Structural Integrity*, vol. 5, pp. 861-868, 2017, doi: 10.1016/j.prostr.2017.07.104.

- [14] R. Hannemann, P. Köster, and M. Sander, "Fatigue crack growth in wheelset axles under bending and torsional loading," *International Journal of Fatigue*, vol. 118, pp. 262-270, 2019, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2018.07.038.
- [15] T. Nwe and M. Pimsarn, "Deterministic stress intensity factor of a railway axle under adverse running condition," *Materials Science Forum*, vol. 1109, pp. 165-171, 2023, doi: 10.4028/p-k75d6R.
- [16] A. Boldyrev, P. Zhironov, S. Kravcov, and F. Lozbinev, "Improvement of the direct method to determine stress intensity factors for wheel pair axles," *Transport Engineering*, pp. 36-43, 2024, doi: 10.30987/2782-5957-2024-10-36-43.
- [17] L. Náhlík, P. Pokorný, M. Ševčík, R. Fajkoš, P. Matušek, and P. Hutař, "Fatigue lifetime estimation of railway axles," *Engineering Failure Analysis*, vol. 73, pp. 139-157, 2017, doi: 10.1016/j.engfailanal.2016.12.014.
- [18] L. Náhlík, P. Pokorný, M. Ševčík, and P. Hutař, "Influence of initial inclined surface crack on estimated residual fatigue lifetime of railway axle," *Journal of Multiscale Modelling*, vol. 7, no. 4, Art. no. 1640007, 2016, doi: 10.1142/S1756973716400072.
- [19] A. Levan and J. Royer, "Part-circular surface cracks in round bars under tension, bending and twisting," *International Journal of Fracture*, vol. 61, no. 1, pp. 71-89, 1993, doi: 10.1007/BF00032340.
- [20] M. Fonte and M. Freitas, "Stress intensity factors for semi-elliptical surface cracks in round bars under bending and torsion," *International Journal of Fatigue*, vol. 21, no. 5, pp. 457-463, 1999, doi: 10.1016/S0142-1123(98)00090-5.
- [21] J. Lebahn, H. Heyer, and M. Sander, "Numerical stress intensity factor calculation in flawed round bars validated by crack propagation tests," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 108, pp. 37-49, 2013, doi: 10.1016/j.engfracmech.2013.04.013.
- [22] A. O. Ayhan, "Mixed mode stress intensity factors for deflected and inclined surface cracks in finite-thickness plates," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 71, nos. 7-8, pp. 1059-1079, 2004, doi: 10.1016/S0013-7944(03)00153-X.
- [23] H. Şahin and A. O. Ayhan, M. Faruk Yaren, "Three-dimensional mixed-mode stress intensity factor solutions for inclined surface cracks in plate structures subjected to uniaxial and biaxial uniform tensile loading," *Marine Structures*, vol. 96, Art. no. 103631, doi: 10.1016/j.marstruc.2024.103631.
- [24] X.-Y. Fang, H.-N. Zhang, and D.-W. Ma, "Influence of initial crack on fatigue crack propagation with mixed mode in U71Mn rail subsurface," *Engineering Failure Analysis*, vol. 136, Art. no. 106220, 2022, doi: 10.1016/j.engfailanal.2022.106220.
- [25] M. Rieger *et al.*, "Fatigue crack growth in full-scale railway axles-Influence of secondary stresses and load sequence effects," *International Journal of Fatigue*, vol. 132, Art. no. 105360, 2020, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2019.105360.
- [26] D. Šimůnek, M. Leitner, J. Maierhofer, H. Gänser, and R. Pippan, "Analytical and numerical crack growth analysis of 1:3 scaled railway axle specimens," *Metals*, vol. 9, no. 2, Art. no. 184, 2019, doi: 10.3390/met9020184.
- [27] D. Šimůnek, M. Leitner, M. Rieger, R. Pippan, H. Gänser, and F. Weber, "Fatigue crack growth in railway axle specimens-Transferability and model validation," *International Journal of Fatigue*, vol. 133, Art. no. 105421, 2020, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2019.105421.
- [28] A. Pourheidar, L. Patriarca, S. Beretta, and D. Regazzi, "Investigation of fatigue crack growth in full-scale railway axles subjected to service load spectra: Experiments and predictive models," *Metals*, vol. 11, no. 9, Art. no. 1427, 2021, doi: 10.3390/met11091427.
- [29] J. Maierhofer, H. P. Gänser, D. Šimůnek, M. Leitner, R. Pippan, and M. Luke, "Fatigue crack growth model including load sequence effects-Model development and calibration for railway axle steels," *International Journal of Fatigue*, vol. 132, Art. no. 105377, 2020, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2019.105377.
- [30] V. Giannella, R. Sepe, G. D. Michele, and R. Esposito, "Deterministic fatigue crack-growth simulations for a railway axle by dual boundary element method," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1038, no. 1, Art. no. 012080, 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1038/1/012080.
- [31] V. Giannella, "Fatigue crack-growth predictions for a railway axle under material data variability," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1038, no. 1, Art. no. 012062, 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1038/1/012062.
- [32] P. Pokorný, P. Dlhý, J. Poduška, R. Fajkoš, T. Vojtek, L. Náhlík, M. Grasso, and P. Hutař, "Influence of heat treatment-induced residual stress on residual fatigue life of railway axles," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 109, Art. no. 102732, 2020, doi: 10.1016/j.tafmec.2020.102732.

- [33] Y. Hu, Q. Qin, S. Wu, X. Zhao, and W. Wang, "Fatigue resistance and remaining life assessment of induction-hardened S38C steel railway axles," *International Journal of Fatigue*, vol. 144, Art. no. 106068, 2021, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2020.106068.
- [34] D. D. Ji, J. W. Zhang, J. S. Xu, H. Li, and K. Su, "Residual life prediction of a deep-rolled axle with flaws based on the extended finite element method," *Scientia Sinica Technologica*, vol. 53, pp. 417-429, 2023.
- [35] L. Zou, D. Zeng, Y. Zhang, L. Lu, H. Zhao, T. Xu, G. Shi, and H. Chen, "A coupled wear and crack initiation-propagation methodology for fretting fatigue life assessment in press-fitted axles," *International Journal of Fatigue*, vol. 159, Art. no. 106817, 2022, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2022.106817.
- [36] T. Xu, L. Lu, D. Zeng, and L. Zou, "Fretting fatigue crack growth simulation and residual life assessment of railway press-fitted axle," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 286, Art. no. 109290, 2023, doi: 10.1016/j.engfracmech.2023.109290.
- [37] Y. Sarıkavak, "Tekerlek Ray Etkileşimi, Perlitik ve Beynitik Çeliklerin Yorulma Hasar Direnci Üzerine Bir Sonlu Elemanlar Analizi", *Demiryolu Mühendisliği*, sy 14, ss. 65–76, Tem. 2021, doi: 10.47072/demiryolu.934471.
- [38] R.-G. Yan, W.-J. Wang, R. Ding, Y.-M. Zeng, W. Shan, Y. Yin, and X.-S. Wang, "Research on size effects in fracture properties and residual life prediction for high-speed train axles," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 134, Part B, Art. no. 104715, 2024, doi: 10.1016/j.tafmec.2024.104715.
- [39] D. Tichon, T. Vojtek, P. Dlhý, P. Pokorný, L. Náhlík, A. Fernández-Canteli, R. Fajkoš, O. Peter, *et al.*, "Stochastic assessment of residual fatigue life of railway axles considering relevant critical factors," *Railway Engineering Science*, vol. 34, pp. 1-24, 2026, doi: 10.1007/s40534-025-00376-6.
- [40] H. Zhao, D. Liao, J. Gao, S. Zhu, L. Liu, J. Han, and S. Li, "Damage tolerance assessment of heavy-duty freight railway axles with artificial defects," *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 38, Art. no. 57, 2025, doi: 10.1186/s10033-025-01218-6.
- [41] D. Zeng, Y. Meng, Y. Dong, X. Zhang, L. Zou, and L. Lu, "Fretting fatigue analysis and residual strength evaluation of railway axles containing defects of natural crack and micro-sinking," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 313, Art. no. 110678, 2025, doi: 10.1016/j.engfracmech.2024.110678.
- [42] Y. Dong, D. Zeng, H. Zhao, P. Wu, *et al.*, "Fretting fatigue strength evaluation of scaled press-fitted railway axle containing a circumferential groove defect," *International Journal of Fatigue*, vol. 194, Art. no. 108824, 2025, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2025.108824.
- [43] F. Lasmar and F. de C. Magalhães, "Fracture mechanics-based residual life assessment of railway axles with cracks at the wheel hub interface," in *Proc. 28th Int. Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2025)*, 2025, Art. no. COB2025-1164, doi: 10.26678/ABCM.COBEM2025.COB2025-1164.
- [44] Ansys Mechanical, Help System, Fracture Analysis Guide: SMART Method for Crack-Growth Simulation. (2026). ANSYS, Inc, Canonsburg, PA.

Özgeçmiş



Oğuzhan DEMİR

Lisans eğitimini Selçuk Üniversitesi'nde, yüksek lisans eğitimini Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi'nde ve doktora eğitimini Sakarya Üniversitesi'nde tamamlamıştır. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi'nde Doç.Dr. olarak görev yapmaktadır.

E-Posta: oguzhan.demir@bilecik.edu.tr

Beyanlar:

Bu çalışmanın hazırlanması sürecinde, yapay zekâ tabanlı araçlardan yalnızca yazım dili, dilbilgisi ve anlatımın iyileştirilmesi amacıyla yararlanılmıştır. Yapay zekâ araçları, literatür taraması, çalışmanın bilimsel içeriğinin oluşturulması, veri analizi, sonuçların elde edilmesi veya yorumlanması süreçlerinde kullanılmamıştır. Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.