



Sünek Metal Plakalarda Çatlak İlerleme Mekanizmalarının Nümerik ve Deneysel Metotlarla İncelenmesi

Program Kodu: 1001

Proje No: 315M133

Proje Yürütücüsü:
Doç. Dr. Cihan TEKÖĞLU

Danışmanlar:

Doç. Dr. Hatice DURAN

Doç. Dr. Kim Lau NIELSEN

ARALIK 2018
ANKARA



ÖNSÖZ

Bu rapor; TÜBİTAK tarafından destelenen, 315M133 numaralı, "Sünek Metal Plakalarda Çatlak İlerleme Mekanizmalarının Nümerik ve Deneysel Metotlarla İncelenmesi" başlıklı, 01 Mayıs 2016 – 01 Kasım 2018 tarihleri arasında yürütülen proje kapsamında yapılan çalışmaları içermektedir. Projede, farklı kalınlıklardaki Al 1050 H14 plakalarda mod I yükü altında oluşan çatlak morfolojileri deneyler yapılarak tespit edilmiş, sünek metallerde çatlak ilerlemesini simüle eden bir sonlu elemanlar modeli geliştirilmiştir.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
TABLO LİSTESİ	iv
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
ÖZET	xv
ABSTRACT	xvi
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	3
3. GEREÇ VE YÖNTEM.....	12
3.1 Nümerik Çalışmalar	12
3.1.1 Boşluk Çekirdeklenmesiz Sonlu Elemanlar Modeli	20
3.1.2 Nürmerik Çalışmalar için Geliştirilen Yazılımlar	22
3.2 Deneysel Çalışmalar	24
3.2.1 Tek Kenar Çentikli Plakalar için Deney Düzeneği	24
3.2.2 Çift Kenar Çentikli Plakalar için Deney Düzeneği.....	38
3.2.3 Plaka Malzemesi ve Deney Numunelerinin Hazırlanması	43
3.2.4 Çatlak Morfolojisinin Belirlenmesi	48
3.2.5 İkinci Faz Parçacıklarının Büyüklük Dağılımlarının Belirlenmesi	49
4. BULGULAR.....	51
4.1 Nümerik Çalışmalar	51
4.1.1 Boşluk Çekirdeklenmesiz Sonlu Elemanlar Modeli	51
4.1.2 Boşluk Çekirdeklenmeli Sonlu Elemanlar Modeli	58
4.2 Deneysel Çalışmalar.....	69
4.2.1 Mod I Yükleme Deneyleri	69
4.2.2 Çatlak Morfolojileri: Optik Mikroskop Bulguları	73
4.2.3 Çatlak Morfolojileri: TEM Bulguları.....	90
4.2.4 İkinci Faz Fe Parçacıklarının Büyüklük Dağılımları	100
5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR.....	103
KAYNAKÇA.....	110
EKLER.....	120



TABLO LİSTESİ

Tablo 1. Farklı malzeme özelliklerine ve kalınlıklara sahip plakalarda görülen çatlak ilerleme mekanizmaları için literatürden toplanan veriler.	10
Tablo 2. Düzenek-2'yi oluşturan parçaların ağırlıkları.	29
Tablo 3. Proje kapsamında tasarlanan ve üretilen düzeneğin (düzenek-2) imalatında kullanılan malzemeler ve fiyatları.....	31
Tablo 4. Proje kapsamında test edilen farklı kalınlıktaki plakaların elastik modülleri.	46
Tablo 5. Proje kapsamında test edilen farklı kalınlıktaki plakaların çekme testi sonuçları.....	47
Tablo 6. Farklı alüminyum alaşımları için literatürden derlenen GTN parametreleri değerleri.	52
Tablo 7. Proje kapsamında test edilen farklı kalınlıklardaki Al 1050 H14 plakalardaki ikinci faz Fe parçacıklarının boyutları.	102
Tablo 8. Proje kapsamında mod I altında yırtılan Al 1050 H14 plakalarda tespit edilen çatlak morfolojileri.....	103
Tablo 9. Proje kapsamında mod I altında yırtılan Al 1050 H14 plakalar için spektroskopi analizi yapılarak tespit edilen element ağırlık oranları. Ayrıntılı analiz sonuçları EK-3'te verilmiştir.	104

ŞEKİL LİSTESİ

- Şekil 1.** Pratikte sıklıkla karşılaşılan, iş görmezlikle sonuçlanan beş farklı sünek kırılma süreci (Tekoğlu vd., 2015). 1
- Şekil 2.** Metal plakların sünek kırılması deneylerinde gözlenen üç temel çatlak ilerleme mekanizmasının şematik olarak gösterimi: (a) eğik (slanted) çatlak, (b) bardak-kapaklı (cup-cone) çatlak ve (c) bardak-bardaklı (cup-cup) çatlak ilerlemesi (El-Naaman ve Nielsen, 2013). 4
- Şekil 3.** (a) Çatlak ilerleme yüzeyinde oluşabilecek iki muhtemel kesme kuşağının şematik olarak gösterimi. (b) ve (c), bir kesme kuşağı doğrultusunda ilerlemeye başlayan çatlağın, belirli bir “ d ” mesafesi sonra diğer kesme kuşağı doğrultusunda ilerlemeye başladığı, her bir “ d ” mesafesinde tekrar eden, tersyüz olarak ilerlediği “zig-zag” mekanizmasına örnek vermektedir: (b) alüminyum alaşımı (Al 5083 H116), $d = 100$ mm, (c) orta mukavemetli çelik, $d = 40$ mm (Simonsen ve Tornqvist, 2004; El-Naaman ve Nielsen, 2013). 6
- Şekil 4.** Sırasıyla; (a) ikinci, (b) üçüncü ve (c) dördüncü grupta yer alan modellerin şematik gösterimi (Pineau ve Pardoen, 2007). 7
- Şekil 5.** Yüksekliği Y , kalınlığı t olan, mod I yüklemesi altındaki tek çentikli bir plakanın şematik gösterimi.....12
- Şekil 6.** Sünek bir plakada mod I yüklemesi altında kararlı çatlak ilerlemesini simüle etmek için proje kapsamında geliştirilen iki boyutlu düzlem gerinim sonlu elemanlar modeli. Plakanın yüksekliği Y , kalınlığı t , kırılma oluşum bölgesinin (mavi bölge) yüksekliği ise y 'dir. Kırılma oluşum bölgesindeki temsili boşluk bölgeleri (kırmızı renkteki yuvarlak bölgeler), metal ve metal alaşımlarındaki ikinci faz parçacıkları temsil etmektedir.13
- Şekil 7.** Proje kapsamında sünek plaka yırtılması için geliştirilen sonlu elemanlar modelinde (bkz. Şekil 6) kullanılan tipik bir ağ. İncelenen bütün plakalar için, başlangıç konfigürasyonunda plakanın yükseklik-kalınlık oranı $Y_0/t = 4$, plaka yüksekliğinin kırılma oluşum bölgesi yüksekliğine oranı ise $Y_0/y_0 = 2$ olarak alınmıştır. Kırılma oluşum bölgesinde bulunan toplam S_b temsili boşluk bölgesinden ikisi, sağdaki büyütülmüş şekilde görülmektedir. Daire şeklindeki temsili boşluk bölgelerinin yarıçapı $R_b = kL_{el}$ 'dir.18
- Şekil 8.** Yarıçapı $R_b = 3L_{el}$ olan bir temsili boşluk bölgesi civarındaki başlangıç boşluk oylum oranı dağılımı. σ , denklem (5)'de verilen başlangıç boşluk oylum oranı dağılım fonksiyonundaki, $f_0(x_1, x_2)$, standart sapmayı ifade etmektedir.21

- Şekil 9.** Proje kapsamında yazılan Crack_Path kodu ile belirlenen çatlak morfolojilerine örnekler: (a) eğik, (b) bardak-kapaklı çatlak.....24
- Şekil 10.** Mod I yüklemesi altında tek kenar çentikli bir plakanın (a) yükleme düzeneğinin, (b) tabii olduğu yüklerin şematik gösterimi (bkz. El-Naaman ve Nielsen, 2013).24
- Şekil 11.** Proje kapsamında test edilen tek kenar çentikli plakaların teknik çizimi.25
- Şekil 12.** (a) Projenin yurtdışı danışmanı Dr. Nielsen tarafından tasarlanan ve kullanılan deney düzeneği (düzenek-1, bkz. El-Naaman ve Nielsen, 2013). (b) Proje kapsamında tasarlanan ve kullanılan deney düzeneği (düzenek-2).26
- Şekil 13.** Şekil 12(a)'da gösterilen deney düzeneğini (düzenek-1) oluşturan parçalar. “Pim-yç”, yük kolu ile çatal arasında bulunan pimi, “pim-yk” ise yük kolu ile kolon arasında bulunan pimi ifade etmektedir.....27
- Şekil 14.** Şekil 12(b)'de gösterilen deney düzeneğini (düzenek-2) oluşturan parçalar.27
- Şekil 15.** (a) Proje kapsamında tasarlanan ve üretilen düzeneğin (düzenek-2) Instron 600 LX çekme cihazına bağlanmış hali. Denge kolunda ağırlık bulunmadığı için düzenek bir yük kaldırma aracı (forklift) ile desteklenerek dengede kalabiliyor. (b) Düzenek-2, denge koluna ağırlık bağlandığında, ek bir desteğe ihtiyaç duymadan dengede kalabiliyor.29
- Şekil 16.** Düzenek-2'nin dengede kalabilmesi için ağırlığın denge kolu üzerinde bulunması gereken konum: (a) düzeneğe plaka bağlı değilken, (b) düzeneğe; 10 mm kalınlığında, 8 g/cm³ yoğunluğunda bir plaka bağlı iken.30
- Şekil 17.** Düzenek-2'nin: (a) yükleme öncesi durumu, (b) en fazla açılacağı durumu.....30
- Şekil 18.** (a) Denge kollarını yük kollarına bağlamak için 4 adet M8 × 30 mm civata; (b) ağırlığı denge kollarına bağlamak için 4 adet M10 × 30 mm civata; (c) bağlantı plakalarını çekme cihazına bağlamak için 8 adet M12 × 50 mm ve (d) 20 adet M16 × 50 mm civata; (e) deney numunesini yük kollarına bağlamak için 10 adet M12 × 100 mm civata; (f) bağlantı plakalarını çatalara bağlamak için ise 8 adet M16 × 70 mm civata kullanılmıştır. Ayrıca, deney numunelerini yük kolları arasında sıkıştırmak için 10 adet M12 somun kullanılmıştır.32
- Şekil 19.** Şekil 13(a)'da gösterilen düzenek-1 için oluşturulan sonlu elemanlar ağı. Üstteki çatala çekme kuvveti uygulanırken alttaki çatal sabit tutulmaktadır. Düzenek, deformasyon öncesi durumda gösterilmiştir.33

- Şekil 20.** Deney düzeneğine (düzenek-1): (a) 80 kN, (b) 100 kN çekme kuvveti uygulandığında oluşan Von Mises gerilme dağılımı. Düzenek-1’de oluşan en yüksek Von Mises gerilme değeri, 80 kN’luk kuvvet için 328 MPa, 100 kN’luk kuvvet için ise 423 MPa’dır.35
- Şekil 21.** (a) Şekil 14(a)’daki çatalın ve 14(f)’deki bağlantı plakalarının Instron 600 LX çekme cihazının yük hücrelerine bağlanması. (b) Plakanın deney düzeneğine monte edilmesi.36
- Şekil 22.** (a) Deney düzeneğinin yük kaldırma aracına bağlanması. (b) Pim yataklarının yağlanması. (c) Deney düzeneğinin, çekme cihazının yük hücreleri arasına yerleştirilmesi. .37
- Şekil 23.** (a) Deney düzeneğinin yük kaldırma aracından ayrılıp çekme cihazına oturtulması. (b) Düzeneği dengede tutan ağırlığın yerine yerleştirilmesi.....37
- Şekil 24.** Tek kenar çentikli bir plakanın yırtılması deneyi süresince, (a) deney başlangıcından, (d) plakanın tamamen ikiye ayrılmasına kadar, farklı aşamalarda çekilmiş fotoğraflar.38
- Şekil 25.** Mod I yüklemesi altında çift kenar çentikli bir plakanın tabi olduğu yüklerin şematik gösterimi (bkz. El-Naaman ve Nielsen, 2013).....39
- Şekil 26.** Proje kapsamında test edilen çift kenar çentikli plakaların teknik çizimi.39
- Şekil 27.** Çift kenar çentikli plakalara mod I yükü uygulamak için proje kapsamında tasarlanan deney düzeneği.40
- Şekil 28.** Şekil 27’de gösterilen deney düzeneğinin parçaları: (a) bağlantı plakası, (b) bağlantı direği, (c) pim ve (d) çatal.41
- Şekil 29.** (a) Bağlantı plakalarını çekme cihazına bağlamak için 20 adet M16 × 50 mm civata, (b) deney numunesini çatala bağlamak için 10 adet M10 × 70 mm civata, (c) bağlantı plakalarını bağlantı direklerine bağlamak için ise 8 adet M16 × 70 mm civata kullanılmıştır. Ayrıca, deney numunelerini çatalların arasına sıkıştırmak için 10 adet M10 somun kullanılmıştır. Bütün civatalar 12.9 çeliktir.42
- Şekil 30.** (a) Çift kenar çentikli plakalara mod I yükü uygulamak için proje kapsamında tasarlanan deney düzeneğindeki çatalların (bkz. Şekil 28(d)) teknik resmi.42
- Şekil 31.** Boyutları Şekil 30’da gösterilen, AISI 1040 çeliğinden imal edilmiş bir çatala 100 kN çekme kuvveti uygulandığında oluşan Von Mises gerilme dağılımı.43

- Şekil 32.** Çift kenar çentikli plakalara mod I yükü uygulamak için tasarlanıp üretilen deney düzeneğinin: (a) yandan, (b) karşıdan görünümü.44
- Şekil 33.** Mod I yüklemesi altında çift kenar çentikli plaka yırtılması deneyi süresince, (a) deney başlangıcından (d) plakanın tamamen ikiye ayrılmasına kadar, farklı aşamalarda çekilmiş fotoğraflar.44
- Şekil 34.** ‘Rezonans Frekansı ve Sönümlenme Analizi’ yönteminde kullanılan düzenek ve yöntemin temel çalışma prensibi.46
- Şekil 35.** (a) Tek kenar, (b) çift kenar çentikli bir plaka için optik mikroskop ve TEM numuneleri.48
- Şekil 36.** Önerilen zımparalama doğrultuları: AA ilk, BB bir sonraki zımparalama doğrultusu.49
- Şekil 37.** Farklı hızlarda çekmeye tabi tutulan plakaların kırılma oluşum bölgelerindeki boşluk oylum oranı (plakanın deforme olmuş konfigürasyonunda) dağılımı. Hesaplama için toplam zaman aralığı: (a) $\Delta t = 0,025$ s, (b) $\Delta t = 0,125$ s, (c) $\Delta t = 0,200$ s. (d) Şekil (a-c)’de gösterilen plakalar için, toplam kinetik enerjinin toplam iç enerjiye oranının (K.E/I.E) adım sayısına göre değişimi.53
- Şekil 38.** $f_{0b} = 10 - 4$; $f_{kr} = 0,25$; $f_{MEY} = 0,66$; $R_b = 3L_{el}$ ve $N = 0,1$ olan plakalar için yakınsaklık testleri. Plakalardaki temsili boşluk sayısı: (a, b, c) için $S_b = 100$, (d, e, f) için $S_b = 50$, (g, h, i) için $S_b = 10$. Hesaplama için toplam zaman aralığı: (a, d, g) için $\Delta t = 0,125$ s; (b, e, h) için $\Delta t = 0,200$ s; (b, e, h) için $\Delta t = 0,400$ s.55
- Şekil 39.** $f_{0b} = 10 - 4$; $f_{kr} = 0,01$; $f_{MEY} = 0,05$; $R_b = 3L_{el}$ ve $N = 0,1$ olan plakalar için yakınsaklık testleri. Plakalardaki temsili boşluk sayısı ve yarıçapı: (a, b) için $S_b = 10$, $R_b = 3 L_{el}$; (c, d) için $S_b = 50$, $R_b = 6 L_{el}$; (e, f) için $S_b = 75$, $R_b = 9 L_{el}$. Hesaplama için toplam zaman aralığı: (a, c, e) için $\Delta t = 0,5$ s; (b, d, f) için $\Delta t = 1,0$ s.56
- Şekil 40.** Boşluk çekirdeklenmesiz model kullanılarak yapılan parametrik çalışma sonucuna örnekler: $f_{0b} = 10 - 4$, $f_{kr} = 0,01$ ve $f_{MEY} = 0,05$ olan plakalar için çatlak morfolojileri. Bütün plakalar için $S_b = 25$; (a, d) için $R_b = 3 L_{el}$; (b, e) için $R_b = 6 L_{el}$, (c, f) için $R_b = 9 L_{el}$; (a, b, c) için $N = 0,05$, (d, e, f) için $N = 0,15$ ’dir.57
- Şekil 41.** Temsili boşluk bölgesi sayısı $S_b = 10$, büyüklük parametresi $k = 3$ olan plaka (P1) için farklı deformasyon aşamalarında kırılma oluşum bölgesindeki boşluk oylum oranı dağılımı: (a)

kırılma oluşum bölgesinde incelme başladığı anda, (b) makroskobik deformasyon yoğunlaşması başladığı anda, (c) makroskobik deformasyon yoğunlaşması başlangıcı ile nihai yırtılma arasındaki bir anda ve (d) nihai yırtılma anında. (e) Mod I yüklemesi boyunca plakadaki normalize mühendislik geriliminin (Σ_{22}/σ_0) mühendislik gerinimine (E_{22}) bağlı olarak değişimi.60

Şekil 42. Temsili boşluk bölgesi sayısı $S_b = 10$, büyüklük parametresi $k = 3$ olan üç farklı plaka için nihai yırtılma anında kırılma oluşum bölgesindeki boşluk oylum oranı dağılımı: (a) plaka P1, (b) plaka P2 ve (c) plaka P3. Bu üç plaka için, mod I yüklemesi boyunca normalize mühendislik geriliminin (Σ_{22}/σ_0) mühendislik gerinimine (E_{22}) bağlı olarak değişimi.62

Şekil 43. Temsili boşluk bölgesi sayısı $S_b = 100$, büyüklük parametresi $k = 18$ olan plaka (P4) için farklı deformasyon aşamalarında kırılma oluşum bölgesindeki boşluk oylum oranı dağılımı: (a) makroskobik deformasyon yoğunlaşması başladığı anda ve (b) nihai yırtılma anında. (c) Mod I yüklemesi boyunca plakadaki normalize mühendislik geriliminin (Σ_{22}/σ_0) mühendislik gerinimine (E_{22}) bağlı olarak değişimi.63

Şekil 44. Temsili boşluk bölgesi sayısı $S_b = 100$, büyüklük parametresi $k = 18$ olan üç farklı plaka için nihai yırtılma anında kırılma oluşum bölgesindeki boşluk oylum oranı dağılımı: (a) plaka P4, (b) plaka P5 ve (c) plaka P6. (d) Bu üç plaka ve Şekil 41'de gösterilen plaka P1 için, mod I yüklemesi boyunca normalize mühendislik geriliminin (Σ_{22}/σ_0) mühendislik gerinimine (E_{22}) bağlı olarak değişimi.64

Şekil 45. Temsili boşluk bölgesi büyüklük parametresi $k = 3$ olan dört farklı plaka için nihai yırtılma anında kırılma oluşum bölgesindeki boşluk oylum oranı dağılımı. Temsili boşluk bölgesi sayısı: (a) için $S_b = 25$, (b) için $S_b = 50$, (c) için $S_b = 75$ ve (d) için $S_b = 100$ 'dür.66

Şekil 46. Temsili boşluk bölgesi büyüklük parametresi $k = 18$ olan dört farklı plaka için nihai yırtılma anında kırılma oluşum bölgesindeki boşluk oylum oranı dağılımı. Temsili boşluk bölgesi sayısı: (a) için $S_b = 10$, (b) için $S_b = 25$, (c) için $S_b = 50$ ve (d) için $S_b = 75$ 'tir.66

Şekil 47. Temsili boşluk bölgesi sayısı $S_b = 10$ olan dört farklı plaka için nihai yırtılma anında kırılma oluşum bölgesindeki boşluk oylum oranı dağılımı. Temsili boşluk bölgesi büyüklük parametresi: (a) için $k = 6$, (b) için $k = 9$, (c) için $k = 15$ ve (d) için $k = 18$ 'dir. Her dört plaka için de temsili boşlukların uzaysal dağılımı aynıdır.67

Şekil 48. Temsili boşluk bölgesi sayısı $S_b = 100$ olan dört farklı plaka için nihai yırtılma anında kırılma oluşum bölgesindeki boşluk oylum oranı dağılımı. Temsili boşluk bölgesi büyüklük

parametresi: (a) için $k = 3$, (b) için $k = 6$, (c) için $k = 9$ ve (d) için $k = 15$ 'tir. Her dört plaka için de temsili boşlukların uzaysal dağılımı aynıdır.....67

Şekil 49. İki farklı plakanın nihai yırtılma anında kırılma oluşum bölgesindeki (a, c) boşluk oylum oranı dağılımı, (b, d) eşdeğer plastik gerinim dağılımı. Temsili boşluk bölgesi sayısı ve büyüklük parametresi, sırasıyla, (a, b)'de gösterilen plaka için $S_b = 10$, $k = 3$; (c, d)'de gösterilen plaka için ise $S_b = 100$, $k = 18$ 'dir.68

Şekil 50. 4mm kalınlığında, Al 1050 H14 malzemeden üretilmiş, tek kenar çentikli plakalar için: (a, c, e) normalize yük –yer değiştirme eğrileri; (b, d, f) normalize yük–çatlak ilerlemesi eğrileri. Haddeleme doğrultusu (a, b)'deki numuneler için çekme doğrultusuna paralel (0°), (c, d)'deki numuneler için diktir (90°). (a-d) proje kapsamında yapılan deneylerin sonuçlarını, (e, f) ise El-Naaman ve Nielsen (2013) çalışmasında elde edilen sonuçları göstermektedir71

Şekil 51. 4mm kalınlığında, Al 1050 H14 malzemeden üretilmiş, çift kenar çentikli plakalar için: (a, c, e) normalize yük –yer değiştirme eğrileri; (b, d, f) normalize yük–çatlak ilerlemesi eğrileri. Haddeleme doğrultusu (a, b)'deki numuneler için çekme doğrultusuna paralel (0°), (c, d)'deki numuneler için diktir (90°). (a-d) proje kapsamında yapılan deneylerin sonuçlarını, (e, f) ise El-Naaman ve Nielsen (2013) çalışmasında elde edilen sonuçları göstermektedir.....72

Şekil 52. Optik mikroskopta incelenen, tek kenar çentikli Al 1050 H14 numune örnekleri. Haddeleme doğrultusu çekme doğrultusuna (a) paralel (0°), (b) dik (90°) numuneler. (a) ve (b)'de numune kalınlığı yukarıdan aşağı doğru 0,5; 1; 3; 4 ve 5 mm olarak artmaktadır.73

Şekil 53. 0,5 mm kalınlığında, 0° , tek kenar çentikli numune 6 için optik mikroskop görüntüleri. Çentik ucundan yaklaşık: (a) 7,3 cm uzaklıktaki bir bölgeden alınan görüntü, (b) 6 cm uzaklıktaki bir bölgeden alınan görüntü.....75

Şekil 54. 0,5 mm kalınlığında, 90° , tek kenar çentikli numune 2 için optik mikroskop görüntüleri. Çentik ucundan yaklaşık: (a) 5 cm uzaklıktaki bir bölgeden alınan görüntü, (b) 7,25 cm uzaklıktaki bir bölgeden alınan görüntü.75

Şekil 55. 1 mm kalınlığında, 0° , tek kenar çentikli numune 4 için optik mikroskop görüntüleri. Çentik ucundan yaklaşık: (a) 2,5 cm uzaklıktaki bir bölgeden alınan, çatlak kanalı dışındaki bölgeye odaklanmış görüntü, (b-d) 2,5 cm uzaklıktaki bir bölgeden alınan, çatlak kanalına odaklanmış görüntüler. (a) ve (b) için mercek büyütme oranı $0,5 \times 10^4$ kat, (c) için 1×10^4 kat, (d) için ise 2×10^4 kattır.76

Şekil 56. 1 mm kalınlığında, 90°, tek kenar çentikli numune 8 için, çentik ucundan yaklaşık 8 cm uzaklıktaki bir bölgeden alınan optik mikroskop görüntüleri. Mercek büyütme oranı (a) için $0,5 \times 10^4$ kat, (b) için 1×10^4 kat, (c) için ise 2×10^4 kattır.76

Şekil 57. 3 mm kalınlığında, 0°, tek kenar çentikli numune 6 için, çentik ucundan yaklaşık 2,3 cm uzaklıkta bir bölgeden alınan optik mikroskop görüntüleri. Mercek büyütme oranı (a) için $0,5 \times 10^4$ kat, (b) için 1×10^4 kat, (c) için ise 2×10^4 kattır.77

Şekil 58. 3 mm kalınlığında, 90°, tek kenar çentikli numune 3 için, çentik ucundan yaklaşık 2,5 cm uzaklıkta bir bölgeden alınan optik mikroskop görüntüleri. Mercek büyütme oranı (a) için $0,5 \times 10^4$ kat, (b) için 1×10^4 kat, (c) için ise 2×10^4 kattır.78

Şekil 59. 4 mm kalınlığında, 0°, tek kenar çentikli numune 5 için, çentik ucundan yaklaşık 6 cm uzaklıktaki bir bölgeden alınan optik mikroskop görüntüleri. Mercek büyütme oranı (a, c, d) için $0,5 \times 10^4$ kat, (b) için ise 2×10^4 kattır.78

Şekil 60. 5 mm kalınlığında, 0°, tek kenar çentikli numune 5 için, çentik ucundan yaklaşık 8,5–9 cm uzaklıktaki bir bölgeden alınan optik mikroskop görüntüleri. Mercek büyütme oranı her iki şekil için de $0,5 \times 10^4$ kattır.79

Şekil 61. Optik mikroskopta incelenen, çift kenar çentikli Al 1050 H14 numune örnekleri. Haddemeleme doğrultusu çekme doğrultusuna (a) paralel (0°), (b) dik (90°) numuneler. (a) ve (b)'de numune kalınlığı yukarıdan aşağı doğru 0,5; 1; 3; 4 ve 5 mm olarak artmaktadır.81

Şekil 62. 0,5 mm kalınlığında, 0°, çift kenar çentikli numune 5 için optik mikroskop görüntüleri. 0 cm'deki çentik ucundan yaklaşık: (a-e) 4,8 cm uzaklıktaki bir bölgeden alınan, (f, g) 6,0 cm uzaklıktaki bir bölgeden alınan görüntüler. Mercek büyütme oranı (a, f) için $0,5 \times 10^4$ kat, (b, e, g) için 1×10^4 kat, (c) için 2×10^4 kat, (d) için ise 5×10^4 kattır.82

Şekil 63. 0,5 mm kalınlığında, 90°, çift kenar çentikli numune 2 için optik mikroskop görüntüleri. 0 cm'deki çentik ucundan yaklaşık 3 cm uzaklıktaki bir bölgeden alınan görüntüler. Mercek büyütme oranı (a) için $0,5 \times 10^4$ kat, (b) için 1×10^4 kat, (c) için 2×10^4 kat, (d) için ise 5×10^4 kattır.83

Şekil 64. 1 mm kalınlığında, 0°, çift kenar çentikli numune 2 için optik mikroskop görüntüleri. 0 cm'deki çentik ucundan yaklaşık: (a-d) 1,8 cm uzaklıktaki bir bölgeden alınan, (e, f) 4,2 cm uzaklıktaki bir bölgeden alınan görüntüler. Mercek büyütme oranı (a, e) için $0,5 \times 10^4$ kat, (b, f) için 1×10^4 kat, (c) için 2×10^4 kat, (d) için ise 5×10^4 kattır.84

Şekil 65. 1 mm kalınlığında, 90°, çift kenar çentikli numune 4 için, 0 cm'deki çentik ucundan yaklaşık 7,4 cm uzaklıktaki bir bölgeden alınan optik mikroskop görüntüleri. Mercek büyütme oranı (a) için $0,5 \times 10^4$ kat, (b) için 1×10^4 kat, (c) için ise 2×10^4 kattır.85

Şekil 66. 3 mm kalınlığında, 0°, çift kenar çentikli numune 5 için, 0 cm'deki çentik ucundan yaklaşık 3,3 cm uzaklıktaki bir bölgeden alınan optik mikroskop görüntüleri. Mercek büyütme oranı (a) için $0,5 \times 10^4$ kat, (b) için 1×10^4 kat, (c) için 2×10^4 kat, (d) için ise 5×10^4 kattır...85

Şekil 67. 3 mm kalınlığında, 90°, çift kenar çentikli numune 1 için optik mikroskop görüntüleri. 0 cm'deki çentik ucundan yaklaşık: (a, b) 4,6 cm uzaklıktaki bir bölgeden alınan, (c, d) 5,7 cm uzaklıktaki bir bölgeden alınan görüntüler. Mercek büyütme oranı (a, b) için $0,5 \times 10^4$ kat, (b, d) için ise 1×10^4 kattır.86

Şekil 68. 4 mm kalınlığında, 0°, çift kenar çentikli numune 6 için, 0 cm'deki çentik ucundan yaklaşık 5,2 cm uzaklıktaki bir bölgeden alınan optik mikroskop görüntüleri. Mercek büyütme oranı (a) için $0,5 \times 10^4$ kat, (b) için ise 1×10^4 kattır.87

Şekil 69. 4 mm kalınlığında, 90°, çift kenar çentikli numune 1 için, 0 cm'deki çentik ucundan yaklaşık 4,4 cm uzaklıktaki bir bölgeden alınan optik mikroskop görüntüleri. Mercek büyütme oranı hem (a) hem (b) için $0,5 \times 10^4$ kattır. (a) ve (b) aynı bölgeden alınmış görüntülerdir. (b)'de üst duvarlar daha iyi görünsün diye numune hafifçe aşağı doğru yatırılmıştır.87

Şekil 70. 5 mm kalınlığında, 0°, çift kenar çentikli numune 6 için, 0 cm'deki çentik ucundan yaklaşık 2,3 cm uzaklıktaki bir bölgeden alınan optik mikroskop görüntüleri. Mercek büyütme oranı (a, c) için $0,5 \times 10^4$ (b, d) için ise 1×10^4 kattır. (a, b) eğik çatlak morfolojisine sahip bir bölgeden alınmış görüntülerdir. (c, d)'de ise, eğik çatlak bölgesindeki kanalın yan duvarı gösterilmektedir.88

Şekil 71. 5 mm kalınlığında, 90°, çift kenar çentikli numune 1 için optik mikroskop görüntüleri. 0 cm'deki çentik ucundan yaklaşık: (a-d) 1,2 cm uzaklıktaki bir bölgeden alınan, (e-j) 4,3 cm uzaklıktaki bir bölgeden alınan görüntüler. Mercek büyütme oranı (a, e, i) için $0,5 \times 10^4$ kat, (b, f, j) için 1×10^4 kat, (c, g) için 2×10^4 kat, (d, h) için ise 5×10^4 kattır.89

Şekil 72. 0,5 mm kalınlığında, 0°, tek kenar çentikli bir plaka için TEM görüntüleri. (a) Çatlak kanalının genel görüntüsü. (b) Lifli yapının kanalın (neredeyse) tamamını kapladığı bir bölge. (c) Lifli yapının çok daraldığı bir bölge.91

- Şekil 73.** 0,5 mm kalınlığında, 90°, tek kenar çentikli bir plaka için TEM görüntüleri. (a) Lifli yapının kanalin (neredeyse) tamamını kapladığı bir bölge. (b) Çatlağın eğik ilerlediği bir bölge.91
- Şekil 74.** (a) 1 mm kalınlığında, 0°, tek kenar çentikli bir plaka için çatlak kanalının genel görüntüsü. 1 mm kalınlığında, 90°, tek kenar çentikli bir plaka için (b) çatlak kanalının genel görüntüsü, (c) lifli yapının daraldığı bir bölge, (d) çatlak morfolojisinin değiştiği bir bölgenin panoramik görüntüsü.....92
- Şekil 75.** (a) 3 mm kalınlığında, 0°, tek kenar çentikli bir plaka için çatlak kanalının genel görüntüsü. (b) 3 mm kalınlığında, 90°, tek kenar çentikli bir plaka için bardak-bardaksı iki bölge (sağda ve solda) arasında kalan eğik morfolojiye sahip bir bölge.93
- Şekil 76.** (a) 4 mm kalınlığında, 0°, tek kenar çentikli bir plaka için çatlak kanalının genel görüntüsü. (b) 4 mm kalınlığında, 90°, tek kenar çentikli bir plaka için bardak-bardaksı morfolojiden (solda) eğik morfolojiye (sağda) geçişin panoramik görüntüsü.94
- Şekil 77.** 5 mm kalınlığında, 0°, tek kenar çentikli bir plaka için: (a) çatlağın eğik ilerlediği bir bölge, (b) çatlağın bardak-bardaksı ilerlediği bir bölge, (c) çatlağın sol duvarından büyük bir parçanın kopmuş olduğu bölge ve (d) Şekil (c)'de gösterilen bölgenin merkezi. (e) 5 mm kalınlığında, 90°, tek kenar çentikli bir plakada çatlağın eğik olarak ilerlediği bir bölgenin panoramik görüntüsü.....95
- Şekil 78.** (a) 0,5 mm kalınlığında, 0°, çift kenar çentikli bir plaka için çatlak kanalının genel görüntüsü. 0,5 mm kalınlığında, 90°, çift kenar çentikli bir plaka için: (b) çatlağın bardak-bardaksı ilerlediği bir bölge, (c) çatlağın eğik ilerlediği bir bölge, (d) lifli yapının kanalin (neredeyse) tamamını kapladığı bir bölge.....96
- Şekil 79.** (a) 1 mm kalınlığında, 0°, çift kenar çentikli bir plaka için çatlak kanalının genel görüntüsü. (b) 1 mm kalınlığında, 90°, çift kenar çentikli bir plaka için çatlağın panoramik görüntüsü.97
- Şekil 80.** (a) 3 mm kalınlığında, 0°, çift kenar çentikli bir plaka için çatlak kanalının genel görüntüsü. (b) 3 mm kalınlığında, 90°, çift kenar çentikli bir plaka için çatlağın eğik ilerlediği bölgenin panoramik görüntüsü.98
- Şekil 81.** 4 mm kalınlığında çift kenar çentikli plakalar için, çatlak morfolojisinin değiştiği örnek bölgelerin panoramik görüntüsü: (a) 0° plaka, (b) 90° plaka.99

- Şekil 82.** 5 mm kalınlığında çift kenar çentikli plakalar için, çatlak morfolojisinin değiştiği örnek bölgelerin görüntüsü: (a) 0° plaka, (b) 90° plaka. Şekil (a)'daki üç bölgenin büyütülmüş görüntüleri: (c) A bölgesi, (d) B bölgesi ve (e) C bölgesi.100
- Şekil 83.** (a) 3 mm, (b) 4 mm ve (c) 5 mm kalınlıktaki Al 1050 H14 plakalar için örnek optik mikroskop görüntüleri.101
- Şekil 84.** 5 mm kalınlıktaki Al 1050 H14 plaka yüzeyinin TEM görüntüleri. Kolaylıkla görülebilmeleri için Fe parçacıklar kırmızı daireler içerisine alınmıştır.....101
- Şekil 85.** (a) 4 mm kalınlıktaki Al 1050 H14 paklanın optik mikroskop görüntüsünde parçacık analizi için seçilen (sarı dikdörtgenin içinde kalan) alan ve (b) seçilen alandaki parçacık dağılımı.102
- Şekil 86.** Mekanizma II: (a) yeni kesme kuşağının belirmesi ve (b) bu kesme kuşağında ikincil parçacıklardan peydahlanan boşlukların birleşmesi. Mekanizma III: (c) deformasyonun iki komşu temsili boşluğu bağlayan ligamentte yoğunlaşması ve (d) bu iki boşluğun birleşmesi.105
- Şekil 87.** Yüksek saflıkta (% 99.999) çok kristalli alüminyumdan üretilmiş levha şeklindeki bir numunede çatlak ilerlemesi (Noell vd., 2018).106
- Şekil 88.** (a) Mod I yüklemesine tabi tutulmuş, 5 mm kalınlığında, 0°, çift kenar çentikli bir plakanın iki çentik arasında kalan kısmı. Şekil (a)'da, üstteki çentikten aşağı doğru uzanan bölgenin X-ışını tomografisi kullanılarak ön yüzden çekilmiş (a) iki boyutlu ve (b) üç boyutlu görüntüleri.108
- Şekil 89.** (a, b) Orowan münavebeli sekme (OMS) mekanizmasına (Orowan alternating slip mechanism, bkz. Orowan, 1949) tabi bir boşluğun büyümesinin şematik gösterimi. (c) Şekil 88'de gösterilen bölgenin X-ışını tomografisi kullanılarak üstten çekilmiş görüntüsü.....109



ÖZET

Sünek metal plakaların yırtılması esnasında çatlaklar dört farklı şekilde ilerler: i-) eğik (slanted) çatlak, ii-) bardak-kapaklı (cup-cone) çatlak, iii-) bardak-bardaklı (cup-cup) çatlak ve iv-) bu üçünün karışımı. Çatlak ilerleme mekanizması, plakanın geometrisine, malzeme özelliklerine ve yükleme koşullarına göre değişmektedir. Literatürdeki birçok deneysel çalışma, plaka malzemesinin pekleşme kapasitesinin çatlak ilerleme mekanizmasında etkili olduğunu ortaya konmuştur. Yüksek pekleşme kapasitesine sahip metallerde çatlak ilerlemesinden önce oldukça yoğun çatlak ucu boyun vermesi gerçekleşmektedir. Boyun verme bölgesinin merkezindeki gerilme üç eksenliliği, plakanın yan yüzeylerindeki kiyasla oldukça yüksek değerlere ulaşmakta, dolayısıyla çatlak plakanın merkezinde oluşup, bardak-bardaklı olarak ilerlemektedir. Düşük pekleşme kapasitesine sahip metallerde ise, çatlak ucundaki boyun verme düşük düzeylerde kalmakta, plastik deformasyon kesme kuşaklarında yoğunlaşmakta ve çatlak eğik veya bardak-kapaklı olarak ilerlemektedir. Deney sonuçları ayrıca, düşük yükleme hızlarında (sanki-statik) bardak-bardaklı ilerlemenin, yüksek hızlarda ise eğik veya bardak-kapaklı ilerlemenin daha etkin bir mekanizma olduğunu ortaya koymuştur. Mevcut literatür, daha ziyade plakaların mekanik/geometrik özellikleri üzerine yoğunlaşmıştır; mikro-yapı-çatlak morfolojisi ilişkisi henüz net bir şekilde ortaya konamamıştır.

Bu projenin temel amacı, mikro-yapının çatlak ilerleme mekanizmasına etkilerini ayrıntılı olarak araştırmaktır. Sünek metal ve metal alaşımlarında çatlaklar, temel olarak, büyüklükleri μm mertebesinde olan ikinci faz parçacıkları tarafından peydahlanan boşlukların büyümesi ve birleşmesiyle ilerler. Projenin ana hipotezi, bu parçacıkların/boşlukların sadece oylum oranlarının değil, ortalama büyüklük ve uzaysal dağılımlarının da çatlak ilerleme mekanizmasını etkileyeceğidir. Bu hipotezi test etmek amacıyla, hem nümerik hem deneysel çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalar hipotezi doğrulamış, elde edilen sonuçlar, uzak ve birbirine yakın parçacıkların bardak-bardaklı, büyük ve birbirine yakın parçacıkların ise eğik veya bardak-kapaklı çatlak ilerlemesine yol açtığını göstermiştir. Parçacıkları/boşlukların ortalama büyüklük ve uzaysal dağılımlarının çatlak morfolojisine etkilerinin, orta düzey pekleşme kapasitesine sahip metaller için daha belirgin olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kırılma mekaniği, sünek kırılma, Gurson modeli, plastisite teorisi, plaka ve kabuklar.



ABSTRACT

In ductile metal plate tearing, cracks propagate in four different ways: i-) slanted, ii-) cup-cone, iii-) cup-cup, and iv-) a combination of these three. The crack propagation mechanism depends on the geometry and the material properties of the plate, as well as on the loading conditions. Several experimental studies in the literature reveal that strain hardening capacity affects the crack propagation mechanism. In high strain hardening capacity metals, a severe necking occurs at the crack tip before crack starts to propagate. The stress triaxiality reaches to considerably larger values in the center of the necking zone in comparison to that on the side faces of the plate, and therefore the crack initiates in the center and propagates in a cup-cup morphology. For low strain hardening capacity metals, on the other hand, the necking at the crack tip remains at low levels, plastic deformation localizes at shear bands and the crack propagates in either slanted or cup-cone morphology. Experimental results also show that the dominant crack propagation mechanism is cup-cup at low (quasi-static) loading rates, while it is slanted or cup-cone at high loading rates. The current literature focuses mainly on the mechanical/geometric properties of the plates; microstructure–crack morphology relationship is not yet fully clarified.

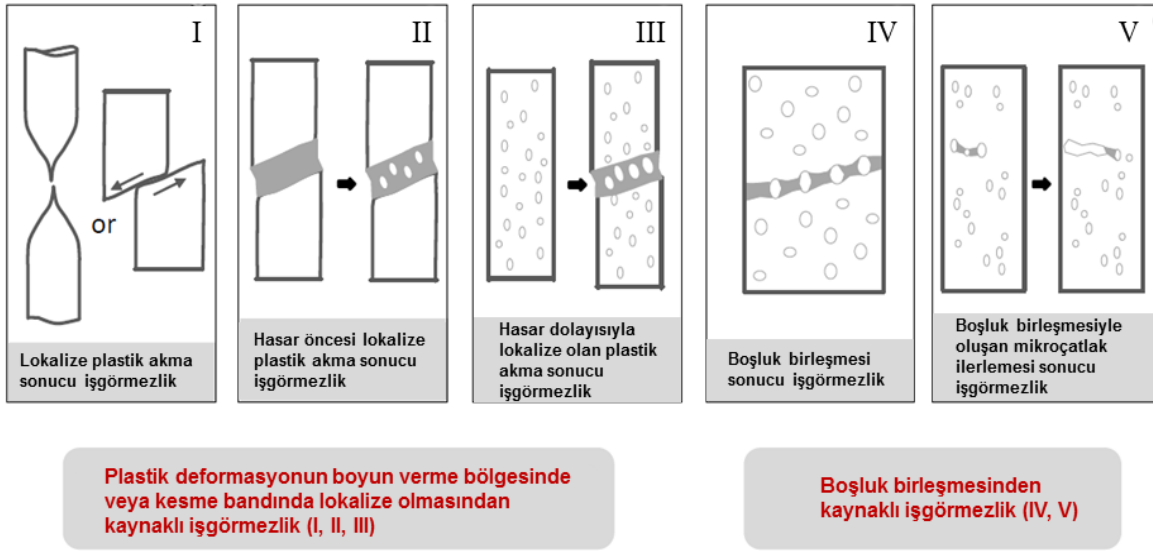
The main aim of this project is to investigate the effects of microstructure on the crack propagation mechanism in detail. In ductile metals and metal alloys, cracks propagate predominantly by the growth and coalescence of voids nucleated by second phase particles whose size are in the order of μm . The fundamental hypothesis of this project is that, not only the volume fraction, but also the average size and spatial distribution of these particles/voids would affect crack propagation. In order to test this hypothesis, both numerical and experimental studies are performed. These studies verified the hypothesis, and the results showed that, small and remotely distributed particles lead to cup-cup crack propagation, while large and closely spaced particles favor slanted or cup-cone crack propagation. It is concluded that the effects of average size and spatial distribution of particles/voids on the crack morphology is more pronounced for metals with an intermediate level of strain hardening.

Keywords: Fracture mechanics, ductile fracture, Gurson model, theory of plasticity, plates and shells.

1. GİRİŞ

Günümüzde, malzeme bilimi ve üretim teknolojilerindeki gelişmeler sayesinde, metal alaşımlarda (ve birçok diğer malzemede) gevrek kırılma; çok yüksek deformasyon hızları, çok düşük sıcaklıklar ve/veya tane sınırlarında (grain boundary) çok yüksek katıskı derişimi (impurity concentration) olması gibi ender durumlarda gözlenir hale gelmiştir. Bu durum, yorulma ve yenim (corrosion) ile birlikte sünek kırılmayı yapısal bütünlük çalışmalarının en önemli unsurlarından biri haline getirmiştir.

Şekil 1, “sünek kırılma” başlığı altında toplanan, pratikte sıklıkla karşılaşılan, iş görmezlikle sonuçlanan beş farklı süreci göstermektedir:



Şekil 1. Pratikte sıklıkla karşılaşılan, iş görmezlikle sonuçlanan beş farklı sünek kırılma süreci (bkz. Tekoğlu vd., 2015).

- I. Lokalize plastik akma sonucu iş görmezlik: Yalnızca çok saf malzemelerde görülür. Malzeme içerisinde ikinci faz parçacıklar bulunmadığı için boşluk çekirdeklenmesi meydana gelmez. Plastik deformasyon boyun verme bölgesinde veya bir kesme kuşağında (shear band) yoğunlaşır ve plastik akma malzeme kırılıncaya kadar devam eder.
- II. Hasar öncesi lokalize plastik akma sonucu iş görmezlik: Öncelikle plastik deformasyon bir kesme kuşağında yoğunlaşır. Ardından, yoğun plastik deformasyona maruz kalan kuşakta, boşluk çekirdeklenmesi, büyümesi ve birleşmesi sonucu sünek kırılma meydana gelir.

- III. Hasar dolayısıyla lokalize olan plastik akma sonucu iş görmezlik: II. sürecin aksine, önce boşluk çekirdeklenmesi gerçekleşir. Boşluk oylum oranı görece yüksek olan ince bir kuşakta görülen yumuşama, malzemenin pekleşme kapasitesini dengeleyecek düzeye geldiğinde, plastik deformasyon kuşak içerisinde yoğunlaşır ve sünek kırılmaya yol açar.
- IV. Boşluk birleşmesi sonucu iş görmezlik: Malzemenin boşluk büyümesinden kaynaklı yumuşaması, deformasyonun bir kuşak içerisinde yoğunlaşmasına sebebiyet verecek düzeye ulaşmaz. Plastik deformasyonun normal veya kesme kuşağı içerisinde yoğunlaşması, boşluk birleşmesi anında meydana gelir.
- V. Boşluk birleşmesiyle oluşan mikro-çatlak ilerlemesi sonucu iş görmezlik: Bu süreç, IV. sürecin alt seti olarak düşünülebilir. IV. süreçte boşluk birleşmesi birçok boşluk arasında aynı anda meydana gelirken, bu süreçte birleşme, öncelikle yalnızca bir kaç boşluk arasında meydana gelmekte ve bir mikro-çatlak oluşmakta, yükleme devam ettikçe mikro-çatlak yeni boşluklarla birleşerek büyümekte/ilerlemektedir. Sünek kırılma süreçleriyle ilgili ayrıntılı bilgi, proje yürütücüsünün yayımladığı Tekoğlu vd. (2015) makalesinde verilmiştir.

Sünek metal plaka ve kabuklarda gözlenen çatlak morfolojileri, çatlak oluşumu/ilerlemesinin yukarıda açıklanan süreçlerden hangisi veya hangileri yoluyla gerçekleştiğine bağlıdır. Bu projenin temel konusu, çatlak içindeki kırılma oluşum bölgesinde (fracture process zone) mikro düzeyde gerçekleşen fiziksel süreçlerle makro düzeyde gözlenen çatlak morfolojisi arasındaki ilişki olarak ifade edilebilir. Projenin temel hedefi ise, plakanın malzeme ve geometri özelliklerinin yanı sıra mikro-yapısının çatlak oluşum/ilerleme mekanizmalarına, dolayısıyla çatlak morfolojisine etkilerini belirlemektir. Proje hedefi doğrultusunda hem nümerik hem de deneysel çalışmalar yapılmıştır. Nümerik çalışmalar kapsamında, sünek metal plakalarda çatlak başlangıcı ve ilerlemesini deneysel gözlemlerle uyumlu bir şekilde simüle edebilecek bir sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Geliştirilen sonlu elemanlar modeli kullanılarak geniş kapsamlı bir parametrik çalışma yapılmış, plaka malzemesinin mikro-yapısının çatlak morfolojisine etkileri ayrıntılı olarak araştırılmıştır. Deneysel çalışmalar kapsamında ise, öncelikle tek ve çift kenar çentikli numunelere mod I yüklemesi uygulayacak iki ayrı deney düzeneği tasarlanıp üretilmiştir. Ardından, tecimsel arılıktaki (commercially pure) alüminyum (1050 H14) plakalardan, farklı kalınlıklarda tek ve çift kenar çentikli numuneler üretilmiş ve mod I yüklemesine tabi tutulmuştur. Farklı kalınlıktaki plakaların her biri için; makroskobik mekanik özellikler, deformasyon öncesi mikro-yapı ve sünek yırtılma sonrası oluşan çatlak morfolojisi tespit edilmiş, malzeme, geometri ve mikro-yapı özelliklerinin çatlak morfolojisine etkileri belirlenmiştir. Bütün bu çalışmalarda kullanılan gereç ve yöntemler, elde edilen bulgular ve ulaşılan sonuçlar, aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

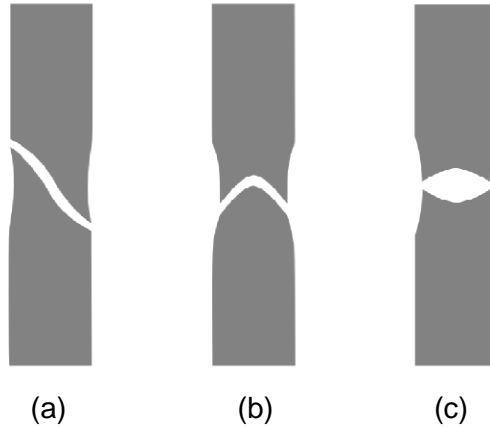
2. LİTERATÜR ÖZETİ

Metal plaka ve kabuklar; özgül esnemezlik (specific stiffness), özgül akma gerilmesi, yük taşıma yetisi ve kırılma mukavemeti gibi önemli mekanik özellikler bakımından yüksek değerlere sahip olmanın yanı sıra görece düşük hacim kaplarlar. Dolayısıyla bu malzemeler; enerji, ulaştırma, savunma, uçak, gemi, otomobil ve inşaat sanayii gibi birçok sanayi dalında yapısal öge (structural component) olarak kullanılırlar. Örnek olarak sayılabilecek başlıca uygulamalar arasında; petrol ve doğalgaz başta olmak üzere her türlü sıvı/gaz aktarımını sağlayan borular, basınçlı kazanlar, nükleer güç santrallerinde kullanılan muhafaza kapları, uçak, araba ve gemi gövdeleri, füze ve roketlerin dış yüzeyleri, köprüler, fabrika türü geniş yapıların çatıları sayılabilir (bkz. örneğin Ventsel ve Krauthammer, 2001; Ugural, 2009). 2017 yılında dünyada toplam çelik üretimi 1689,4 milyon ton, bunun yalnızca plaka üretimine yönelik kısmı 33,1 milyon tondur. Türkiye, 2016 ve 2017 yıllarında, sırasıyla, toplam 33,2 ve 37,5 milyon ton çelik üreterek her iki yılda da dünyada en çok çelik üreten sekizinci ülke olmuştur (bkz. Dünya Çelik Birliği, 2018). Yalnızca demir-çelik üretimi açısından bakıldığında bile plaka ve kabukların ülkemiz ve dünya ekonomisinde oldukça önemli bir yere sahip olduğu görülmektedir.

Metal plaka ve kabuklar, uygulama alanları itibariyle yüksek yatırım maliyeti gerektirir. Çoğu zaman zorlayıcı yüklemeye ve çevre koşullarında işlev gören bu malzemelerde çatlak oluşumu ve ilerlemesi, sıkça görülen, hem ekonomi hem de insan hayatı açısından felaketle sonuçlanan kazalara yol açan sorunlardır (Knott, 1973; Broek, 1986; Ventsel ve Krauthammer, 2001; Sanford, 2002; Anderson, 2005; Yayla 2007; Ugural, 2009). Giriş bölümünde ayrıntılı olarak açıklandığı üzere, malzeme bilimi ve üretim teknolojilerindeki gelişmeler sayesinde, metal alaşımlarda gevrek kırılma ender durumlarda gözlenir hale gelmiş, bu ise yorulma ve yenim ile birlikte sünek kırılmayı yapısal bütünlük çalışmalarının en önemli unsurlarından biri haline getirmiştir. Sünek kırılmada çatlak oluşumu ve ilerlemesi, büyüklükleri mikron mertebesindeki boşlukların (bkz. örneğin Faleskog ve Shih, 1997; Fabrègue ve Pardoën, 2008) çekirdeklenmesi, büyümesi ve birleşmesi sonucu, giriş bölümünde açıklanan süreçlerden (I. süreç hariç) birisi yoluyla gerçekleşir. Boşluk çekirdeklenmesi, çok saf metaller hariç, bütün mühendislik metal ve alaşımlarında bulunan ikinci faz parçacıkların (çökelti—precipitate—, kalıntı—inclusion—ya da mekanik özellikleri iyileştirmek amacıyla malzemeye gömülmüş parçacıklar) kırılması ve/veya bu parçacıklar ile içlerinde gömülü oldukları ana malzeme (matris) arasındaki yüzeylerin ayrılması yoluyla meydana gelir (Argon ve Safoğlu, 1975; Thompson ve Williams, 1977; Chu ve Needleman, 1980; Needleman, 1987; Koplik ve Needleman, 1988; Jun vd., 1990; Tvergaard, 1993; Babout vd., 2004; Berdin, 2004). Plastik deformasyon süresince, malzemede başlangıçta var olan ve/veya çekirdeklenme sonucu

ortaya çıkan boşlukların şekilleri, birbirlerine göre olan konumları ve büyüklükleri değişir. Boşluklar yeterince büyüyüp birbirlerine (yükleme koşullarına ve malzeme özelliklerine göre değişen) kritik bir mesafenin ötesinde yaklaşıncaya, plastik deformasyon birdenbire boşlukları birbirine bağlayan ligamentlerde yoğunlaşır. Plastisitenin bu ani yoğunlaşması, boşluk birleşmesi başlangıcına tekabül eder (Thomason, 1990; Benzerga, 2002; Leblond ve Mottet, 2008; Nahshon ve Hutchinson, 2008; Scheyvaerts vd., 2010, 2011; Tekoğlu vd., 2012, 2015; Tekoğlu, 2014). Birleşen boşluklar mikro-çatlakları oluşturur ve bu çatlaklar yeni boşlukların çekirdeklenmesi-büyümesi-birleşmesi yoluyla ilerler. Çatlak ilerlemesinde çatlak ucu, ya her seferinde en yakındaki tek bir boşlukla birleşerek, ya da çatlak ucunda deformasyonun lokalize olduğu bölgedeki bir boşluk kümesiyle birleşerek ilerler (bkz. örneğin Tekoğlu vd., 2015). Boşlukların; çekirdeklenme, büyüme ve birleşme evreleri için birbirinden bağımsız olarak türetilmiş, mikro-mekanik temelli birçok model bulunmaktadır. Sünek kırılma simülasyonları, bu üç evre için geliştirilmiş modelleri aynı çatı altında toplayarak yapılar (Tvergaard, V. 1990; Gologanu, vd., 1993, 1994; Pardoen ve Hutchinson, 2000; Lassance vd., 2007; Benzerga ve Leblond, 2010; Pardoen vd., 2010; Tekoğlu ve Pardoen 2010; Yerra vd., 2010. Lecarme vd., 2011).

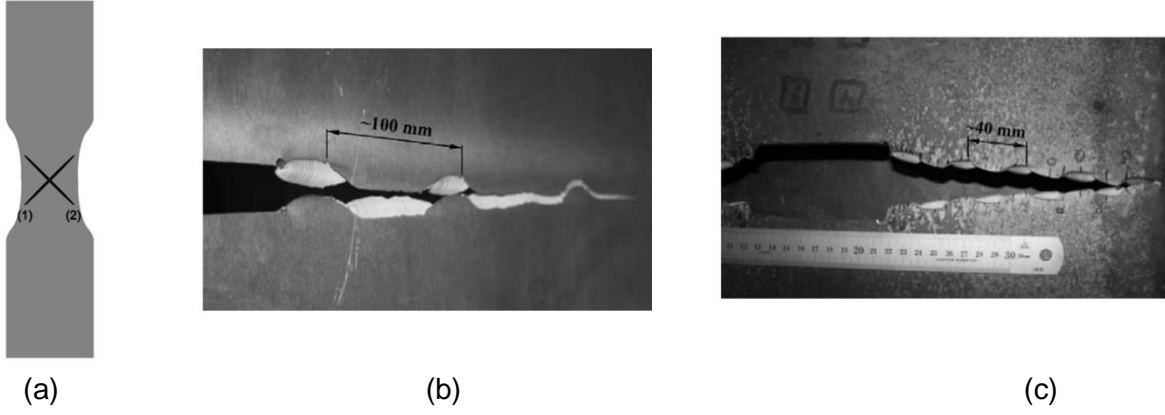
Sünek metal plaka ve kabuklarda çatlaklar, yüklemeye koşullarına ve malzeme özelliklerine bağlı olarak; (a) eğik (slanted), (b) bardak-kapaksı (cup-cone), (c) bardak-bardaksı (cup-cup) veya bu üç mekanizmanın karışımı olarak ilerlemektedir; bkz. Şekil 2 ve örneğin, El-Naaman ve Nielsen (2013). Metal plaka ve kabuklarda çatlak oluşumu/ilerlemesi, hem deneysel hem teorik çalışmaların yoğun bir şekilde devam ettiği zengin bir çalışma alanıdır. Birçok temel kırılma mekaniği kitabında (örneğin Knott, 1973; Anderson, 2005), metal plakalarda daha ziyade eğik çatlak ilerlemesi görüldüğü belirtilmektedir ki bu ifade, yüksek mukavemetli yaşlandırılmış



Şekil 2. Metal plakaların sünek kırılması deneylerinde gözlenen üç temel çatlak ilerleme mekanizmasının şematik olarak gösterimi: (a) eğik (slanted) çatlak, (b) bardak-kapaksı (cup-cone) çatlak ve (c) bardak-bardaksı (cup-cup) çatlak ilerlemesi (El-Naaman ve Nielsen, 2013).

(age-hardened) alüminyum alaşımları (Knott, 1973; Irwin vd., 1958; Li ve Siegmund, 2002) ve yüksek mukavemetli çelikler (Broek, 1986) için yapılmış birçok deney tarafından doğrulanmıştır. Ancak diğer ilerleme mekanizmalarının gözlemlendiği deneysel çalışmalar da mevcuttur. Örneğin Pardoen vd. (1999, 2000), kalınlıkları 0,6 ile 6 mm arasında değişen 6082-O alüminyum plakalarda, mod I testi altında, kırılma yüzeyi Şekil 2(c)'de gösterilene göre nispeten daha düz olsa da bardak-bardaksı sınıfa konulabilecek çatlak ilerlemesi tespit etmiştir. Daha sonra Pardoen vd. (2004), yaptıkları oldukça geniş kapsamlı deneylerde, kalınlıkları 0,6 ile 6 mm arasında değişen, paslanmaz çelik, yumuşak çelik (mild steel), 6082-O ve NS4 alüminyum alaşımları, pirinç, tunç, kurşun veya çinkodan üretilmiş çift kenar çentikli çekme plakalarında çatlak ilerlemesinin sistematik olarak bardak-bardaksı olduğunu göstermiştir. Rivalin vd. (2001), dört ayrı boru hattı çeliğinden üretilmiş, kalınlıkları 10 ile 25,4 mm arasında değişen plakalar üzerinde, hem yüksek hızlı (çatlak ilerleme hızının $40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 'e kadar ulaştığı) dinamik testler hem de sanki-statik testler gerçekleştirmiştir. Bu deneylerde, yüksek hızlarda bütün plakalarda eğik çatlak ilerlemesi gözlenmiştir. Sanki-statik deneylerde ise yalnızca bir çelik çeşidi için eğik çatlak ilerlemesi gözlenirken diğer bütün plakalarda bardak-bardaksı çatlak ilerlemesi görülmüştür. Simonsen ve Tornqvist (2004), kalınlıkları 5 ile 10 mm arasında değişen alüminyum ve çelik plakalar üzerine yaptıkları deneylerde literatürde daha önceden üzerinde durulmamış bir çatlak ilerleme mekanizmasını ortaya koymuştur. Bu mekanizmada, çekme doğrultusuna yaklaşık 45° yaparak ilerleyen eğik çatlaklar, belirli aralıklarla çatlak ilerleme yüzeyinde 90° dönmektedir, bkz. Şekil 3. Şekil 3(a) çatlak ilerleme yüzeyinde oluşabilecek iki muhtemel kesme kuşağını şematik olarak göstermektedir. Şekil 3(b) ve (c)'de görüleceği üzere, bir kesme kuşağı doğrultusunda ilerlemeye başlayan çatlak, belirli bir " d " mesafesi sonra diğer kesme kuşağı doğrultusunda ilerlemeye başlamakta ve bu tersyüz olma hali her bir " d " mesafesinde tekrar etmektedir. Farklı malzemeler için tersyüz olma periyodunun (d mesafesinin) farklı olduğu gözlenmiştir. Bu tür çatlak ilerlemesi literatürde "zig-zag" olarak anılmaktadır (bkz. örneğin Simonsen ve Tornqvist, 2004; El-Naaman ve Nielsen, 2013). Algarnia vd. (2017), nikel temelli bir alaşım olan Inkonel 718 malzemesinden yapılmış silindirik ve düz barlarla yaptıkları düşük gerinim hızındaki testlerde, silindirik barlarda bardak-kapası çatlak ilerlemesi, düz barlarda ise eğik çatlak ilerlemesi gözlemlenmiştir.

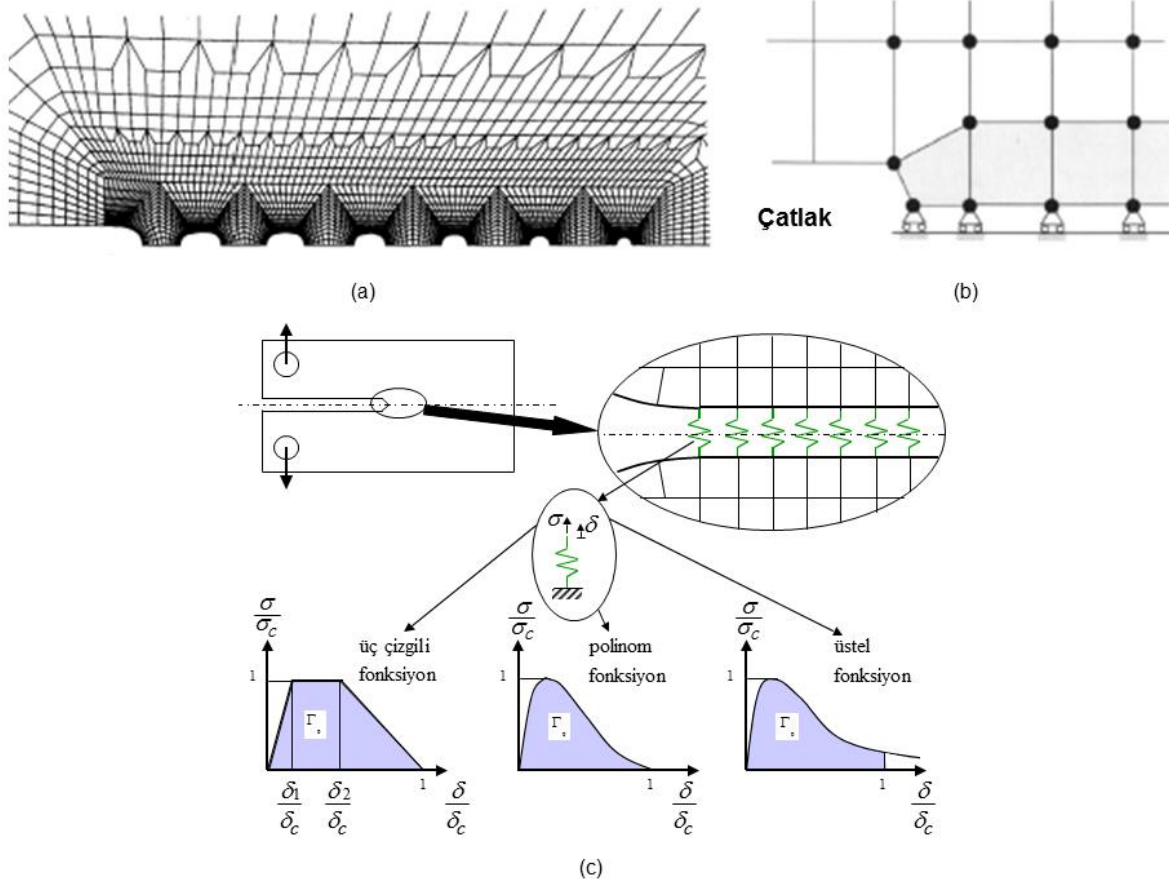
Plaka ve kabukların uygulama koşullarına benzer koşullarda test edilmesi, mümkün olan durumlarda bile oldukça yüksek maliyetlidir. Bu durum, nümerik simülasyon yöntemlerini zorunlu kılmaktadır. Deneyler için küçük boyutlu laboratuvar örnekleri kullanılsa bile, çatlak ucu bölgesinde gerçekleşen karmaşık fiziksel süreçlerin gözlenmesi çok zordur. Deney sonuçlarına anlam verebilmek, nümerik simülasyonlar gerçekleştirilerek hangi parametrenin hangi etkiye sahip olduğunun anlaşılmasını gerektirir. Sonlu elemanlar yöntemi hem bu amaç-



Şekil 3. (a) Çatlak ilerleme yüzeyinde oluşabilecek iki muhtemel kesme kuşağının şematik olarak gösterimi. (b) ve (c), bir kesme kuşağı doğrultusunda ilerlemeye başlayan çatlak, belirli bir “ d ” mesafesi sonra diğer kesme kuşağı doğrultusunda ilerlemeye başladığı, her bir “ d ” mesafesinde tekrar eden, tersyüz olarak ilerlediği “zig-zag” mekanizmasına örnek vermektedir: (b) alüminyum alaşımı (Al 5083 H116), $d = 100$ mm, (c) orta mukavemetli çelik, $d = 40$ mm (Simonsen ve Tornqvist, 2004; El-Naaman ve Nielsen, 2013).

la hem de yapısal ögelerin çatlak ilerleme direncini öngörmek için yaygın olarak kullanılmaktadır (Xue vd., 2010; Woelke vd., 2013). Sünek malzemelerde çatlak oluşumunu/ilerlemesini simüle etmek için kullanılan sonlu elemanlar modelleri, dört ana grupta toplanabilir. Birinci gruptaki modellerde; gerilme, gerinim, gerinim hızı gibi mekanik alan değerleri, sürekli ortam mekaniği kullanılarak hesaplandıktan sonra hasar gelişimi için yapılan ayrı bir hesapta (boşlukların çekirdeklenmesi-büyümesi-birleşmesi hesabı) girdi olarak kullanılmaktadır. Yani, mekanik alan değerleri gelişimi, hasar gelişiminden bağımsızdır (uncoupled). Herhangi bir sonlu elemanda kritik hasar değerine ulaşıldığında yüzey ayrılmasının gerçekleştiği varsayılmakta ve ilgili elemanın yük taşıma kapasitesi (uygun nümerik yöntemler kullanılarak) sıfıra indirilmektedir. Eğer hasar kritik değer altındaysa, hasar gelişiminin mekanik alan değerlerine etkisi yok sayılır. Bu gruptaki modellerde, kırılma, gelişerek ilerleyen bir süreç olarak değil “var-yok davranışı” olarak ele alınır. Diğer gruptaki modellere göre, hem mevcut bir sonlu elemanlar koduna eklenmesi daha kolay hem de daha az hesaplama zamanı gerektiren bu modeller, deneylerle sayısal karşılaştırmadan ziyade nitel karşılaştırma için ve/veya belirli koşullar altında ortaya çıkan eğilimleri tespit etmek için kullanılır (Mackenzie vd., 1977; Norris vd., 1978; Beremin, 1981; Devaux vd., 1989; Pineau, 1990).

İkinci gruptaki modellerde, hasarla ilintili mikro-yapı unsurları (parçacıklar, boşluklar, vb.) doğrudan doğruya sonlu elemanlar modeline dâhil edilmekte, ayrıca bir hasar oluşumu/gelişimi modeli kullanılmamaktadır. Şekil 4(a), çatlak ilerleme yüzeyindeki boşlukların sonlu elemanlar ağına doğrudan dâhil edildiği bir örnek göstermektedir (Pineau ve Pardoën, 2007). Yapılan



Şekil 4. Sırasıyla; (a) ikinci, (b) üçüncü ve (c) dördüncü grupta yer alan modellerin şematik gösterimi (Pineau ve Pardoën, 2007).

hesaplamaların gerçeğe yakınlığı, modele dâhil edilen mikro-yapısal ayrıntıların zenginliği ile artmaktadır. Oldukça yüksek doğruluk düzeyinde sonuçlar üretebilen bu yaklaşım, yüksek hesaplama zamanı/maliyeti gerektirdiği için, mikro-yapı unsurlarının yapısal öge boyutlarına kıyasla çok küçük olduğu durumlarda, özellikle üç boyutlu simülasyonlarda tercih edilmemekte, daha ziyade akademik/bilimsel problemlerin çözümünde kullanılmaktadır (Aravas ve McMeeking, 1985a, 1985b; Needleman ve Tvergaard, 1987, 1991; Tvergaard ve Needleman, 1992; Yan ve Mai, 1997; Tvergaard ve Hutchinson, 2002; Kim vd., 2003; Petti ve Dodds, 2005; Gao vd., 2005).

Üçüncü gruptaki modellerde, boşluk çekirdeklenmesi, büyümesi ve birleşmesi için geliştirilmiş modeller, sonlu elemanlar modelinde kullanılan malzeme bünye denklemlerine doğrudan doğruya dâhil edilmektedir, bkz. Şekil 4(b). Dolayısıyla bu modellerde hem mikro düzeyde gerçekleşen kırılma süreciyle malzemenin mekanik davranımı doğrudan doğruya etkileşim içerisinde (coupled), hem de hesaplama zamanı/maliyeti ikinci gruptaki modellere kıyasla oldukça düşüktür. Yani bu modeller, birinci ve ikinci gruptaki modellerin avantajlarını bir araya toplamıştır. Ancak, doğruluk düzeyi yüksek sonuçlar elde edebilmek için, kırılma oluşum bölge-

sindeki sonlu elemanların büyüklüğü, yaklaşık olarak boşluklar arası uzaklığa eşit olmalı, yani mikron mertebesinde olmalıdır. Bu sebepten ötürü bu gruptaki modeller, metre mertebesindeki yapısal öğelerin analizlerinde tercih edilmezler (Bilby vd., 1993; Xia ve Shih, 1995a, 1995b; Xia vd., 1995; Ruggieri vd., 1996; Gao vd., 1998; Zhang vd., 2000; Chabanet vd., 2003; Negre vd., 2005).

Son olarak, dördüncü grupta, Kohezif Bölge Modeli (KBM; cohesive zone model, CZM) olarak adlandırılan modeller yer almaktadır. KBM’lerde kırılma oluşum bölgesinin davranımı, ilgili bölgeyi modellemek için kullanılan sonlu elemanların bünye denklemlerinde uygun bir gerilme-ayrılma (traction-separation) eğrisi kullanılarak hesaba katılır, bkz. Şekil 4(c). Gerilme-ayrılma eğrisinin altındaki alan, ayrılma enerjisine karşılık gelir. Gerilmenin ayrılmaya göre değişimi ve doruk gerilme (peak stress) değeri, malzemeden malzemeye farklılık göstermektedir. Bu modeller, sonlu eleman büyüklüğüne (genel yakınsaklık kısıtlarına ilaveten) bir kısıt getirmediği için büyük boyutta yapısal elemanların analizinde sıkça kullanılırlar (Tvergaard ve Hutchinson, 1992; Keller vd., 1999; Siegmund ve Brocks, 2000; Roychowdhury vd., 2002; Chen vd., 2005; Scheider vd., 2006; Needleman, 2014). Ancak, hâlihazırda, gerilme-ayrılma yasaları için ihtiyaç duyulan parametrelerin deneysel olarak nasıl belirleneceğine dair standart kurallar mevcut değildir. Bu nedenle, bu parametreler, ikinci veya üçüncü gruptaki sonlu elemanlar simülasyonları ile deneysel sonuçları karşılaştırılarak, deneme yanılma yoluyla, takribi olarak belirlenmektedir (bkz. örneğin Chen vd., 2014).

Proje kapsamında, literatürde Gurson–Tvergaard–Needleman (GTN) olarak anılan sünek kırılma modeli kullanılarak üçüncü gruba ait bir model oluşturulmuştur. GTN modeli, raporun gereç ve yöntem bölümünde ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Literatür taramasından anlaşılacağı üzere, malzemelerin mukavemetinin ve pekleşme kapasitesinin çatlak ilerleme mekanizmasında etkili olduğu deney sonuçlarıyla ortaya konmuştur (bkz. Tablo 1) . Ancak, kırılma oluşum bölgesindeki mikro-yapı dikkate alındığında, çatlak ilerleme mekanizmasında yalnızca bu iki malzeme özelliğinin değil, malzeme, geometri ve mikro-yapıya ilişkin parametrelerden (plaka içerisinde yükleme öncesinde bulunan boşlukların oylum oranları ve çatlak oluşum bölgesindeki dağılımları, yükleme esnasında çekirdeklenen boşlukların oylum oranları ve dağılımları, plaka kalınlığı, vb.) birçoğunun etkin olduğu açıktır. Mevcut literatürde bu etkiler henüz tam olarak anlaşılmaş değildir. Örneğin Rivalin vd. (2001), yukarıda bahsedildiği üzere, dört ayrı boru hattı çeliği üzerinde yaptıkları sanki-statik mod I yüklemesi deneylerinde, üç çelik plakada bardak-bardaksız çatlak ilerlemesi gözlerken, yalnızca bir çelik çeşidi için eğik çatlak ilerlemesi gözlemiştir. Dört çelik için de ikinci faz parçacıklarının oylum oranı ve büyüklüklerinin yaklaşık olarak aynı olduğu çalışmada, çe-

Plaka Malzemesi	σ_0 (MPa)	σ_u (MPa)	E (GPa)	ν	N	t (mm)	H	Çatlak*	Kaynak**
Kurşun	7	18	16	0,42	0,25	0,8 – 1,8	–	b-b	[1]
Inkonel 718	45,1	100,4	200	0,28	0,08	3,048	–	e	[2]
Çinko	100	650	61	0,33	0,15	0,6 – 1,3		b-b	[1]
Pirinç	100	250	110	0,33	0,6	0,9 – 2	–	b-b	[1]
Pirinç	240	350	110	0,33	0,25	0,9 – 2	⊥	b-b	[1]
Pirinç	210	350	110	0,33	0,32	0,9 – 2		b-b	[1]
Tunç	120	280	100	0,34	0,51	0,54 – 1,2	–	b-b	[1]
Tunç	400	540	100	0,34	0,01	0,54 – 1,2	⊥	b-b	[1]
Tunç	410	540	100	0,34	0,01 5	0,54 – 1,2		b-b	[1]
Alüminyum (Al 6082-T0)	50	130	70	0,34	0,17	1 – 6		b-b	[3]
Alüminyum (Al 6082-O)	50	140	70	0,35	0,26	0,6 – 6	–	b-b	[1]
Alüminyum (Al NS4)	80	180	70	0,32	0,2	0,57 – 1,5	–	b-b	[1]
Alüminyum (Al NS4)	140	250	70	0,32	0,17	0,57 – 1,5		b-b	[1]
Alüminyum (Al NS4)	150	250	70	0,32	0,14	0,57 – 1,5	⊥	b-b	[1]
Alüminyum (Al 1050A)	115,5	132,6	70	0,3	0,05	4		b-b	[4]
Alüminyum (Al 1050A)	115,5	132,6	70	0,3	0,05	4	⊥	e	[4]
Alüminyum (Al 5083 H116)	245	334	70,3	0,33	0,2	5 – 10		e	[5]
Alüminyum (Al 5083 H321)	242	375	71	0,33	0,22	10		e	[5]
Alüminyum (Alclad 2024-T3)	285	450	71,4	0,3	0,23	–	–	e	[6]
Alüminyum (Al 2024-T3)	345	485	71,4	0,3	0,23	–	–	e	[6]

Yumuşak çelik	240	841	210	0,3	0,17	0,87 – 1,5	–	b-b	[1]
A316L	310	620	210	0,3	0,48	0,65 – 3	–	e	[1]
Çelik (NS)	160,6	512,3	205	0,3	0,20	4		b-b	[4]
Çelik (NS)	160,6	512,3	205	0,3	0,20	4	⊥	ty	[4]
Çelik (NS)	273	372	205	0,3	0,23	5		b-k	[5]
Çelik (NS)	273	372	205	0,3	0,23	10		b-k	[5]
Çelik (HTS)	558	636	210	0,3	0,17	5		b-k	[5]
Çelik (HTS)	485	542	210	0,29	0,13	25,4	⊥	e	[6]
Çelik (HTS)	532	647	210	0,29	0,15	20	⊥	e	[6]
Çelik (HTS)	553	637	210	0,29	0,15	20	⊥	e	[6]
Çelik (HTS)	665	760	210	0,29	0,15	20	⊥	e	[6]

Tablo 1. Farklı malzeme özelliklerine ve kalınlıklara sahip plakalarda görülen çatlak ilerleme mekanizmaları için literatürden toplanan veriler. σ_0 akma gerilmesini, σ_u çekme gerilmesini, E elastik modülü, ν Poisson oranını, N pekleşme üstelini, t plaka kalınlığını, H ise çatlağın haddeleme doğrultuna göre dik (\perp) mi, paralel ($||$) mi uzandığını ifade etmektedir. İlgili kaynakta bulunamayan değer yerine “–” işareti konmuştur.

***Çatlak Tipleri:** e: eğik (bkz. Şekil 2(a)); b-k: bardak-kapaksı (bkz. Şekil 2(b)); b-b: bardak-bardaksı (bkz. Şekil 2(c)); ty: tersyüz olarak ilerleme (bkz. Şekil 3(b, c)).

****Tablo 1’de atıfta bulunulan kaynaklar:** [1] Pardoen vd. (2004); [2] Algarnia vd. (2017); [3] Pardoen vd. (1999); [4] El-Naaman ve Nielsen (2013); [5] Simonsen ve Törnqvist (2004); [6] Li ve Siegmund (2002).

likleri birbirinden ayıran en temel mikro-yapı farklılıkları, parçacıkların kırılma oluşum bölgesinde uzaysal/boyutsal dağılımları ve boşluk peydahlamaya yatkınlıklarıdır. Proje yürütücüsü ve danışmanları, parçacıkların/boşlukların uzaysal/boyutsal dağılımındaki farklılıkların, çatlak ilerleme mekanizmalarına önemli bir etkisi olduğunu düşünmektedir. Proje yurtdışı danışmanı Dr. Nielsen tarafından kısa süre önce yayımlanan deneysel çalışmalar (El-Naaman ve Nielsen, 2013) bu düşüncüyü daha da pekiştirmiştir. Mevcut literatürde bu alanda



yapılmış sınırlı sayıda deneysel çalışma bulunmakla beraber, proje yürütücüsü ve danışmanları, teorik ve/veya nümerik bir çalışmadan haberdar değildir. Proje kapsamında yapılacak deneysel ve teorik/nümerik çalışmalar aracılığı ile literatürdeki bu boşlukların doldurulması amaçlanmaktadır.

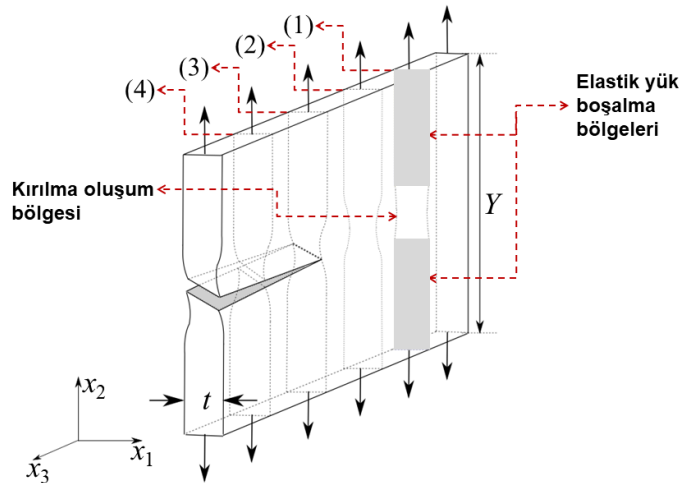
3. GEREÇ VE YÖNTEM

Proje kapsamında hem nümerik hem deneysel çalışmalar yapıldığı için, raporun bu ve bundan sonraki bölümleri iki ana alt başlık altında sunulmuştur. Aşağıda, önce nümerik çalışmalar için, ardından deneysel çalışmalar için kullanılan gereç ve yöntemler ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

3.1 Nümerik Çalışmalar

Şekil 5; yüksekliği Y , kalınlığı t ($Y \gg t$) olan tek kenar çentikli bir plakayı mod I yüklemesi altında göstermektedir. Gerçek hayat uygulamalarında plaka ve kabuklar, genellikle mod I, mod II ve mod III karışımı bir yüklemeye maruz kalırlar. Ancak, mod I yüklemesi altındaki kırılma tokluğu değeri, mod II ve mod III yüklemeleri altındaki değerlere kıyasla her zaman daha düşüktür. Dolayısıyla, kritik olan yükleme mod I'dır (Knott, 1973; Broek, 1986; Ventsel ve Krauthammer, 2001; Sanford, 2002; Anderson, 2005; Yayla 2007; Ugural, 2009). Şekil 5'de çatlak ilerlemesi, x_3 eksenini doğrultusunda, eksi x_3 yönündedir. Plakanın çatlak ucundan farklı uzaklıktaki dik kesitlerindeki deformasyon şekilinde temsili olarak gösterilmiştir. Çatlak ilerledikçe, her bir dik kesitte sırasıyla aşağıdaki 4 aşama gerçekleşmektedir:

1. Çatlak ucundan görece uzak olsa da, çatlak ucundaki gerilme yığılmasından etkilenen bir dik kesitte, şekilde "kırılma oluşum bölgesi (fracture process zone)" olarak adlandırılan bölgede lokal incelme başlar. Plastik deformasyon kırılma oluşum bölgesinde yoğunlaşırken, bu bölgenin alt ve üstünde kalan, plakanın yük uygulanan yüzeylerine doğru uzanan bölgelerde elastik yük boşalması başlar.
2. Çatlak ilerledikçe kırılma oluşum bölgesi gittikçe incir ve bu bölgede boşluklar çekirdeklenmeye başlar. Sünek malzemelerde boşluk çekirdeklenmesi, temel olarak, ikinci faz parçacıkların kırılması ve/veya bu parçacıklar ile içlerinde gömülü oldukları

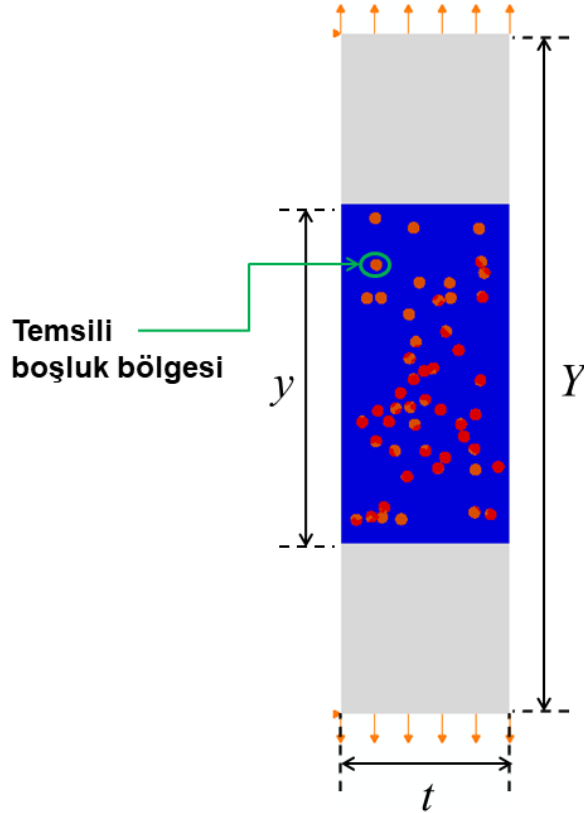


Şekil 5. Yüksekliği Y , kalınlığı t olan, mod I yüklemesi altındaki tek çentikli bir plakanın şematik gösterimi.

matris arasındaki yüzeylerin ayrılması yoluyla meydana gelir.

3. Plastik deformasyon, kırılma oluşum bölgesindeki deformasyon kuşaklarında gittikçe daha fazla yoğunlaşır.
4. Deformasyon kuşaklarındaki boşlukların birleşmesiyle oluşan makro-çatlak ilerler ve söz konusu dik kesit kırılma oluşum bölgesinde yırtılarak iki parçaya ayrılır. Şekil 5'te tek kenar çentikli bir plaka gösterilmiş olmakla birlikte, bu dört aşama çift kenar çentikli bir plakadaki dik kesitler için de geçerlidir.

Kırılma oluşum bölgesinde inceleme başladıktan sonra beliren elastik yük boşalma bölgeleri, çatlak oluşumu/ilerlemesi esnasında hemen hemen hiç deforme olmamaktadır. Bu durum, kırılma oluşum bölgesinin deformasyonunu çatlak ucuna yakın bölgelerde düzlem gerinim yüklemesi oluşacak şekilde sınırlamakta ve sünek plakalarda çatlak ilerlemesinin iki boyutlu düzlem gerinim varsayımına dayalı sonlu elemanlar modelleri ile simüle edilmesine imkân sağlamaktadır (bkz. örneğin Nielsen ve Hutchinson, 2012; Andersen vd., 2018). Şekil 6, mod



Şekil 6. Sünek bir plakada mod I yüklemesi altında kararlı çatlak ilerlemesini simüle etmek için proje kapsamında geliştirilen iki boyutlu düzlem gerinim sonlu elemanlar modeli. Plakanın yüksekliği Y , kalınlığı t , kırılma oluşum bölgesinin (mavi bölge) yüksekliği ise y 'dir. Kırılma oluşum bölgesindeki temsili boşluk bölgeleri (kırmızı renkteki yuvarlak bölgeler), metal ve metal alaşımlarındaki ikinci faz parçacıkları temsil etmektedir.

I yüklemesi altında kararlı durumda (steady state) çatlak ilerlemesini simüle etmek için proje kapsamında geliştirilen sonlu elemanlar modelini şematik olarak göstermektedir. Plakanın yüksekliği Y , kalınlığı t , kırılma oluşum bölgesinin (mavi bölge) yüksekliği ise y 'dir. Şekil 6'da görüleceği üzere, plakanın sağ ve sol yüzeylerine kuvvet uygulanmazken, alt ve üst yüzeyleri dikey doğrultuda çekilmektedir (mod I yüklemesi) Ayrıca, çatlak ilerlemesi başladıktan sonra plakaların çatlağın alt ve üst kısmında kalan parçaları birbirlerine göre yatay doğrultuda hareket etmesinler diye, plakanın sol-alt ve sol-üst köşeleri sabitlenmiştir. Plaka malzemesinin, çoğu metal ve metal alaşımı için kabul edilebilir bir varsayım olan izotropik elastik-plastik bir malzeme olduğu varsayılmıştır. Malzeme özelliklerini karakterize eden parametreler, elastik modül, E ; Poisson oranı, ν ; öz kütle, ρ ; akma gerilmesi, σ_0 ve pekleşme üsteli, N 'dir. Malzemenin gerçek gerilme–gerçek gerinim ilişkisi denklem (1)'de verilmiştir:

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon, & \text{eğer } \varepsilon \leq \varepsilon_0, \\ \sigma_0 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^N, & \text{eğer } \varepsilon > \varepsilon_0. \end{cases} \quad (1)$$

Denklem (1)'de $\varepsilon_0 = \sigma_0/E$ 'dir. Kırılma oluşum bölgesinin yukarı ve aşağısında kalan (gri renkli) elastik yük boşalması bölgelerinin plastik davranımının nasıl modellendiği aşağıda açıklanmıştır. Kırılma oluşum bölgesinin plastik davranımı modellemek için ise, (ikinci faz parçacıklarında) boşlukların çekirdeklenmesini, büyümesini ve birleşmesini hesaba katabilen Gurson–Tvergaard–Needleman (GTN) akma teorisi kullanılmıştır (bkz. örneğin Gurson, 1977; Tvergaard, 1981, 1982; Tvergaard ve Needleman 1994). GTN akma teorisi aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Proje kapsamında geliştirilen model, buraya kadar anlatıldığı şekliyle, literatürde daha önceden geliştirilmiş modellerle aynıdır; ikinci faz parçacıkları modele direkt olarak dâhil edilmemekte, GTN teorisi kullanılarak hesaba katılmaktadır. Literatürdeki çatlak oluşumu/ilerlemesi modelleri, ikinci faz parçacıklarının (ve dolayısıyla bu parçacıkların peydahladığı boşlukların) kırılma oluşum bölgesinde homojen olarak dağıldığını varsaymaktadır. Burada geliştirilen model ise, parçacıkların ortalama büyüklüklerini, sayılarını ve uzaysal dağılımlarını, Şekil 6'da “temsili boşluk bölgesi” olarak adlandırılan (kırmızı) yuvarlak alanlar aracılığıyla hesaba katmaktadır. Temsili boşluk bölgelerindeki boşluk oylum oranı, bu bölgeler arasında kalan (Şekil 6'daki mavi renkli) matristeki boşluk oylum oranına kıyasla oldukça büyüktür. Matriste tanımlanan boşluk oylum oranı, ortalama büyüklükleri temsili boşluk bölgelerince hesaba katılan ikinci faz parçacıklarına kıyasla oldukça küçük olan, ikincil bir parçacık ailesini hesaba katmaktadır. Zira metallerde, ortalama büyüklükleri farklı iki (hatta daha fazla) parçacık ailesinin birlikte bulunması sıkça rastlanan bir durumdur. Geliştirilen modelde, her birinin yarıçapı aynı (R_b) olan temsili boşluk bölgelerinin, kırılma oluşum

bölgesinde rastgele dağıldığı varsayılmıştır. Şekil 6'da gösterilen örnekte toplam 50 tane temsili boşluk bölgesi bulunmaktadır, yani, $S_b = 50$ 'dir.

İkinci faz parçacıkların temsili boşluk bölgesi olarak modellenmesi fikri, literatürdeki sünek kırılma çalışmalarında daha önceden başarıyla kullanılmıştır (bkz. örneğin Srivastava vd., 2014, 2017; Osovski vd., 2015). Ancak, proje ekibinin bildiği kadarıyla, metal plakalarda çatlak ilerlemesi simülasyonlarında bu yaklaşım ilk defa bu proje kapsamında kullanılacaktır. Parçacıklarının kırılma oluşum bölgesinde homojen olarak dağıldığını varsayan geçmiş modeller farklı çatlak morfolojilerini ayırt edememektedir. Kırılma oluşum bölgesinde ince bir ağ kullanıldığı takdirde, bu tür modeller, oldukça geniş bir malzeme özelliği aralığı için çatlağın eğik bir şekilde ilerlediğini tahmin etmektedir ki, bu deneysel gözlemlerle uyumlu değildir (bkz. örneğin Mathur vd., 1996; Felter ve Nielsen, 2017). Bu tür modellerle yapılan çalışmalarda, sonlu elemanlar ağındaki eleman boyutu sabit tutulurken plakanın pekleşme kapasitesini ve/veya başlangıç (yükleme öncesi) boşluk oylum oranını arttırmanın, eğik çatlak morfolojisinden bardak-bardaksı morfolojiye geçişi tetiklediği gözlenmiştir. Ancak bu geçiş, yalnızca sonlu elemanlar ağındaki eleman boyutundan kaynaklı olup, eleman boyutu küçüldükçe çatlak morfolojisi eğik çatlağa dönüşmektedir (bkz. örneğin Besson vd., 2003; Nielsen ve Hutchinson, 2012). Yani proje kapsamında geliştirilen model, sünek plaka yırtılmasında ikinci faz parçacıklarının hem oylum oranlarının hem de uzaysal dağılımlarının çatlak morfolojisine etkilerini hesaba katan ilk çalışmadır.

Proje kapsamında yapılan sonlu elemanlar çalışmalarının tamamında, ABAQUS isimli ticari bir yazılım kullanılmıştır. Sonlu elemanlar formülasyonunun ayrıntılarına geçmeden önce, kırılma oluşum bölgesinin plastik davranımı tanımlamak için kullanılan GTN yapısal yasası tanıtılacaktır. Temel olarak Gurson (1977) çalışmasına dayanan GTN yapısal yasasında bir malzemenin akma yüzeyi, ABAQUS terminolojinde:

$$\Phi = \frac{q}{\sigma_y^2} + 2q_1 f^* \cosh\left(-q_2 \frac{3p}{2\sigma_y}\right) - \left(1 + q_3 (f^*)^2\right) = 0, \quad (2)$$

denklemleriyle tanımlanmıştır. Bu denklemde q von Mises eşdeğer gerilmesini, p hidrostatik basıncı, $\sigma_y[\bar{\epsilon}_m^{pl}]$ ise, plakanın yapıldığı tam yoğun matris malzemesinin, matris içerisindeki eşdeğer plastik gerinime ($\bar{\epsilon}_m^{pl}$) bağlı olarak değişen akma gerilmesini temsil etmektedir. Proje kapsamında kullanılacak pekleşme kanunu denklem (1)'de verilmiştir. Gurson (1977) modelinin yüksek gerilim üç eksenliliği içeren durumlarda deneylerle uyumlu sonuçlar vermesi, fakat düşük gerilim üç eksenliliği için sonuçların pek de iyi olmamasından ötürü, Tvergaard tarafından Gurson modeline (denklem (1)'de gösterildiği üzere) q_1 , q_2 ve q_3 olmak üzere üç

farklı malzeme parametresi eklenmiştir. Bu parametrelerden q_1 , yüklenme boyunca boşluklar arası etkileşiminden kaynaklanan mukavemet kaybını, q_2 , gerilme üç eksenliliğinin boşluk büyümesine etkisini, q_3 ise boşluk şekli değişiminden kaynaklanan mukavemet kaybının temsil etmektedir. Tvergaard, q_1 parametresinin pekleşme üsteli N 'ye bağımlı bir değişken olduğunu bildirmiş, ancak kolay bir hesaplama yapılabilmesi açısından $q_2 = 1,0$ ve $q_3 = (q_1)^2$ şeklinde kullanılabilirliği tavsiyesinde bulunmuştur (Tvergaard, 1981, 1982). Son olarak, boşluk oylum oranı f 'nin bir fonksiyonu olan eşdeğer boşluk oylum oranı $f^*[f]$

$$f^*[f] = \begin{cases} f, & \text{eğer } f \leq f_{kr}, \\ f_{kr} + \frac{\bar{f}_{MEY} - f_{kr}}{f_{MEY} - f_{kr}} (f - f_{kr}), & \text{eğer } f_{kr} < f < f_{MEY}, \\ \bar{f}_{MEY} = \frac{q_1 + \sqrt{q_1^2 - q_3}}{q_3}, & \text{eğer } f \geq f_{MEY}, \end{cases} \quad (3)$$

olarak tanımlanmıştır. GTN modelinde, boşluk oylum oranı, f , kritik değere, f_{kr} , ulaştığında boşluk birleşmesi başlar. f , müsaade edilen en yüksek değeri, f_{MEY} , geçerse ilgili malzeme noktasında mikro çatlak oluşur. Mikro çatlak oluşan malzeme noktasının yük taşıma kapasitesi sıfıra iner. Bütün malzeme (Gauss entegrasyon) noktalarında yük taşıma kapasitesi sıfıra inen eleman, sonlu elemanlar ağından çıkartılır.

GTN modelinde boşluk oylum oranındaki değişim, \dot{f} , çekirdeklenme ve büyümeden kaynaklanan değişimlerin (sırasıyla $\dot{f}_{\check{c}k}$ ve \dot{f}_{by}) toplamına eşittir:

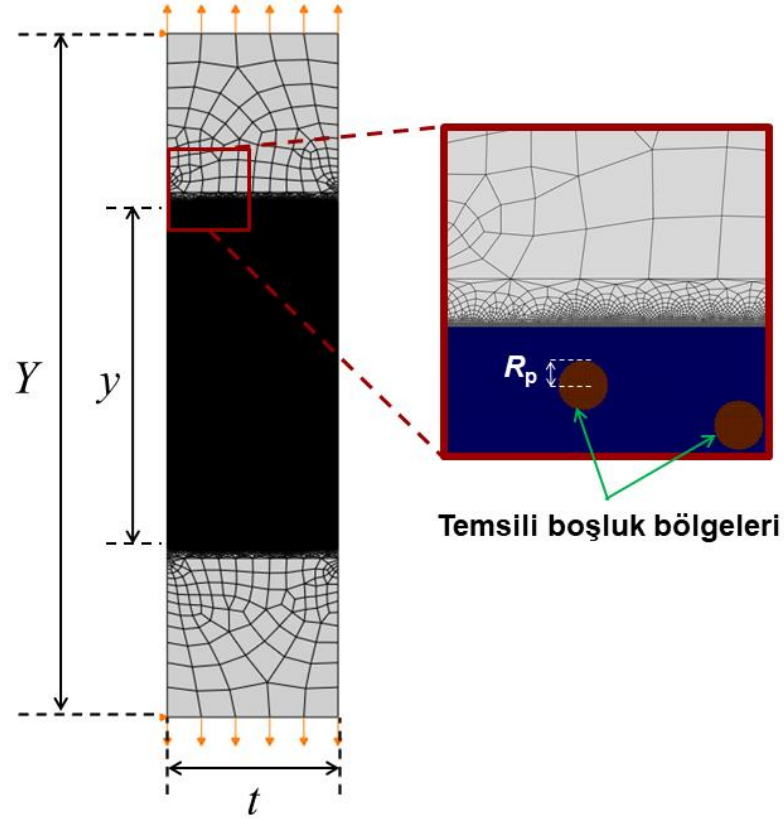
$$\begin{aligned} \dot{f} &= \dot{f}_{\check{c}k} + \dot{f}_{by}, \\ \dot{f}_{by} &= (1-f) \dot{\varepsilon}_{kk}^{pl}, \\ \dot{f}_{\check{c}k} &= f_{\check{c}k} A[\bar{\varepsilon}_m^{pl}] \dot{\bar{\varepsilon}}_m^{pl}, \\ A[\bar{\varepsilon}_m^{pl}] &= \frac{1}{s_{\check{c}k} \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\bar{\varepsilon}_m^{pl} - \varepsilon_{\check{c}k}}{s_{\check{c}k}} \right)^2 \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

Denklem (4)₃ ve (4)₄'den anlaşılacağı üzere, GTN modelinde, boşluk çekirdeklenmesinin matristeki plastik gerinime ($\bar{\varepsilon}_m^{pl}$) bağlı olduğu ve normal dağılım (veya Gauss dağılımı) olarak adlandırılan rastgele (random) bir dağılıma sahip olduğu varsayılmaktadır. $\dot{f}_{\check{c}k}$, çekirdeklenmeden kaynaklı boşluk oylum oranı değişimini, $A[\bar{\varepsilon}_m^{pl}]$ ise önerilen normal dağılım için olasılık yoğunluk fonksiyonunu ifade etmektedir. Denklem (4)₄'deki $\varepsilon_{\check{c}k}$ ve $s_{\check{c}k}$ parametreleri,

sırasıyla, boşluk çekirdeklenmesi gerinim değerinin ortalama değerine ve standart sapmasına karşılık gelmektedir.

GTN modelinde tanımlanması gereken bir diğer parametre, malzemenin yükleme öncesi (başlangıç durumunda) içerdiği boşluk oylum oranıdır, f_0 . ABAQUS yazılımında GTN modeli kullanılırken, sonlu elemanlar ağının her bir entegrasyon noktasında yükleme öncesi bağıl yoğunluk değeri, $r_0 = 1 - f_0$, tanımlanır. $r_0 = 1$ ($\Rightarrow f_0 = 0$) değeri tam yoğun malzemeye karşılık gelmektedir ve bu durumda GTN için tanımlanan akma ölçütü, klasik J_2 akma ölçütüne dönüşmektedir (bkz. denklem (2)). r_0 değeri, elemanların entegrasyon noktaları yerine başlangıç koşulu olarak düğüm noktalarında da belirtilebilir. Bu durumda ABAQUS, düğüm noktalarındaki r_0 değerlerini kullanarak enterpolasyon yapar ve entegrasyon noktalarına karşılık gelen değerleri otomatik olarak hesaplar. Özet olarak, bir malzemenin GTN modeliyle tanımlanabilmesi için denklem (1)'de verilenlere ek olarak toplam dokuz malzeme özelliğine ihtiyaç duyulur: $q_1, q_2, q_3, f_0, f_{\text{çk}}, \varepsilon_{\text{çk}}, s_{\text{çk}}, f_{\text{kr}}$ ve f_{MEY} . Her bir malzeme noktasının değil ama malzemenin tamamının yükleme öncesi içerdiği toplam boşluk oylum oranı, f_0^T , deneysel olarak tespit edilebilir; bahsi geçen dokuz parametrenin deney sonuçlarından birebir elde edilmesi mümkün değildir. Ancak, deneylerle nümerik simülasyonları; numunenin kırılma gerinimi, kırılma yüzeyindeki boşluk oylum oranı ve dağılımı, çatlak oluşum morfolojisi gibi sonuçlar açısından kıyaslayarak, deneylerle en iyi uyumu veren GTN parametreleri tespit edilebilir. GTN parametreleri, birçok farklı araştırmacı tarafından birçok farklı malzeme için kalibre edilmiştir (bkz. örneğin Tvergaard ve Needleman, 1984; Becker vd., 1988, Gao vd., 1998; Benseddiq ve Imad, 2008; Cuesta vd., 2010; Kiran ve Khandelwal, 2014).

Şekil 7, proje kapsamında sünek plaka yırtılması için geliştirilen sonlu elemanlar modelinde (bkz. Şekil 6) kullanılan tipik bir ağı göstermektedir. Başlangıç konfigürasyonunda (yani yükleme öncesinde), incelenen bütün plakalar için; plakanın yükseklik-kalınlık oranı $Y_0/t = 4$, plaka yüksekliğinin kırılma oluşum bölgesi yüksekliğine oranı ise $Y_0/y_0 = 2$ olarak alınmıştır. Kırılma oluşum bölgesinde, nispi kenar uzunlukları $L_{el}/k_0 = 10^{-3}$ olan kare şeklinde elemanlardan oluşan çok ince bir ağ kullanılmıştır. Kırılma oluşum bölgesinin üst ve altında kalan alanlarda ise, boyutu kırılma oluşum bölgesinden uzaklaştıkça artan dört veya üç düğüm noktalı elemanlardan oluşan düzensiz bir ağ kullanılmıştır. Kırılma oluşum bölgesinde bulunan toplam S_b temsili boşluk bölgesinden ikisi, Şekil 7'de verilen ağın büyütülmüş görüntüsünde görülmektedir. Temsili boşluk bölgeleri daire şeklindedir ve bir plakadaki bütün temsili boşluk bölgelerinin yarıçapı aynıdır: $R_b = kL_{el}$; k , değeri plakadan plakaya değişen bir tamsayıdır. Bir plaka içindeki her bir temsili boşluk bölgesi için öncelikle, x_1 ve x_2 koordinatları tekdüze dağılımdan elde edilmiş rassal sayılar olan ve kırılma oluşum bölgesi içinde yer alan bir nokta



Şekil 7. Proje kapsamında sünek plaka yırtılması için geliştirilen sonlu elemanlar modelinde (bkz. Şekil 6) kullanılan tipik bir ağ. İncelenen bütün plakalar için, başlangıç konfigürasyonunda plakanın yükseklik-kalınlık oranı $Y_0/t = 4$, plaka yüksekliğinin kırılma oluşum bölgesi yüksekliğine oranı ise $Y_0/y_0 = 2$ olarak alınmıştır. Kırılma oluşum bölgesinde bulunan toplam S_b temsili boşluk bölgesinden ikisi, sağdaki büyütülmüş şekilde görülmektedir. Daire şeklindeki temsili boşluk bölgelerinin yarıçapı $R_b = kL_{el}$ 'dir.

belirlenir. Belirlenen bu nokta, kırılma oluşum bölgesindeki hangi sonlu elemanın merkezine en yakın konumda ise, o elemanın merkezi temsili boşluk merkezi olarak seçilir. Böylelikle, temsili boşluk bölgelerinin kırılma oluşum bölgesinde rastgele bir dağılıma sahip olması sağlanır. Kırılma oluşum bölgesinde ince bir ağ kullanılması sayesinde, $k \leq 9$ için $S_b = 100$ temsili boşluk bölgesi, birbirleriyle ve kırılma oluşum bölgesinin sınırlarıyla çakışmadan, kolaylıkla rastgele bir şekilde dağıtılabilmektedir.

Sonlu elemanlar ağındaki dört (kırılma oluşum bölgesindekiler dâhil) ve üç düğüm noktalı elemanlar, sırasıyla, ABAQUS kütüphanesinde CPE4R (dört düğüm noktalı, azaltılmış entegrasyon—reduced integration—noktalı, çift doğrusal—bilinear—düzlem gerinim elemanı) ve CPE3 (üç düğüm noktalı, doğrusal, düzlem gerinim elemanı) olarak adlandırılan elemanlardır; bu tip elemler hakkında ayrıntılı bilgi için bkz. ABAQUS (2016).

Yukarıda belirtildiği üzere, geliştirilen sonlu elemanlar modeliyle kararlı durumda çatlak ilerlemesi simüle edilecektir. Yani, plakalara sanki-statik mod I yüklemesi uygulanacaktır. Sanki-statik problemlerin çözümünde, yükleme koşulları ve malzeme özelliklerine bağlı olarak, kimi durumlarda örtülü (implicit) kimi durumlarda açık (explicit) sonlu elemanlar çözüm metodu tercih edilir (bkz. örneğin Gao vd.,1998). Çatlak ilerleme simülasyonlarında, bütün Gauss entegrasyon noktalarında boşluk oylum oranı sıfıra düşen bir elmanın sonlu elemanlar açısından çıkarılması gerekmektedir ve bu özellik ABAQUS/Implicit’de mevcut değildir. Dolayısıyla proje kapsamında yapılan çalışmalarda ABAQUS/Explicit kullanılması daha uygun bulunmuştur. ABAQUS/Explicit, diğer açık çözüm metodu kullanan sonlu elemanlar yazılımları gibi, aslen yüksek hızlı, kısa sürede gerçekleşen, eylemsizlik (inertia) kuvvetlerinin önemli rol oynadığı dinamik problemlerinin çözümü için geliştirilmiştir. Açık sonlu elemanlar metodunda, dinamik dengenin sağlanabilmesi için her bir adımda oldukça küçük bir zaman artırımını kullanılması gerekir. Oysaki sanki-statik problemlerin çözümü, tanımı gereği uzun zaman gerektirir. Dolayısıyla sanki-statik problemlerin açık sonlu elemanlar metoduyla gerçek zaman aralığında çözümü, problemin, her biri kısa bir zaman aralığında gerçekleşen, son derece fazla sayıda adıma bölünmesini gerektirir ki bu da çok yüksek bir hesaplama zamanı/maliyeti demektir. Yapılması gereken, gerçek zaman aralığı yerine, hem dinamik etkilerin ihmal edilebilir düzeyde kaldığı, yakınsak bir çözüm verecek kadar kısa, hem de çözümde kullanılacak toplam adım sayısını makul düzeyde tutmaya imkân verecek kadar uzun bir zaman aralığı kullanmaktır. En uygun zaman aralığını belirlemek için yapılması gereken, aynı soruyu farklı zaman aralıklarında çözmek ve “kabul edilebilir” çözümün hangisi olduğuna sonuçları inceleyerek karar vermektir. Sonuçlar iki koldan incelenir: (1) enerji analizi, (2) deformasyon analizi. Sanki-statik bir simülasyonda, sistem üzerine dış kuvvetler tarafından uygulanan iş, sistemde oluşan iç enerjiye (yaklaşık olarak) eşit olmalıdır. Sistemin toplam kinetik enerjisi, iç enerjisinin %5-10’undan fazla olmamalıdır. Deformasyon analizinde ise, sistemin, gerçek deneylerdekiyle veya mümkünse örtülü sonlu elemanlar metodu kullanılarak yapılan çözümdekiyle aynı/benzer şekilde deforme olup olmadığına bakılır. Eğer problemin örtülü sonlu elemanlar metodu kullanılarak çözümü mümkün değilse, benzer bir problemin çözümüyle de kıyaslama yapılması, fikir vermesi açısından önemlidir. Burada not edilmesi gereken önemli bir husus, en uygun zaman aralığı değerinin malzeme özelliklerine, boşluk oylum oranına, plaka geometrisine, vb. göre değişkenlik gösterdiğidir. Dolayısıyla, raporun bulgular kısmında ayrıntılı olarak anlatıldığı üzere, açık çözümde kullanılması gereken uygun zaman aralıklarının belirlenmesi amacıyla, farklı birçok plaka için ayrıntılı yakınsaklık analizleri yapılmıştır.

Proje kapsamında, yukarıda anlatılan sonlu elemanlar modelinin iki farklı versiyonu kullanılmıştır. Sonlu elemanlar modelinin buraya kadar anlatılan özellikleri açısından aynı olan

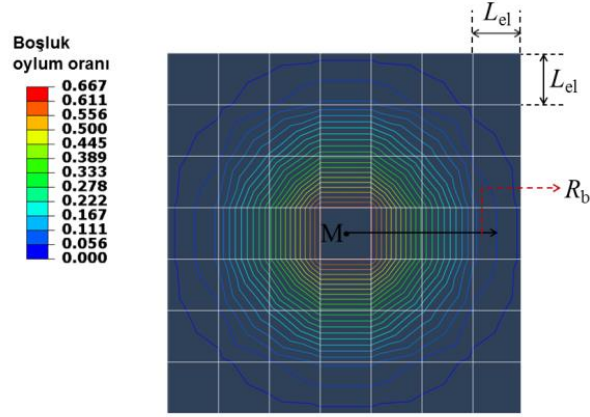
ve “boşluk çekirdeklenmesiz” / “boşluk çekirdeklenmeli” olarak adlandırılan bu iki versiyona has özellikler, aşağıda sunulmuştur.

3.1.1 Boşluk Çekirdeklenmesiz Sonlu Elemanlar Modeli

Geliştirilen sonlu elemanlar modelinin bu versiyonunda, plakanın tamamının (kırılma oluşum bölgesinin dışında, plakanın yukarı ve aşağı kısımlarında kalan elastik yük boşalması bölgeleri dâhil) plastik davranımı, GTN yapısal yasası kullanılarak modellenmiştir. Ayrıca bu versiyonda boşluk çekirdeklenmesi ihmal edilmiş, plakanın her yerinde yükleme öncesi belirli düzeyde boşluk bulunduğu varsayılmıştır. Şekil 8, bu model kullanılarak oluşturulan bir plakada, yarıçapı $R_b = 3L_{el}$ olan bir temsili boşluk civarındaki başlangıç boşluk oylum oranı dağılımını göstermektedir. M noktası, temsili boşluk bölgesinin merkezine karşılık gelmektedir. Farklı renkteki her bir çizgi üzerinde boşluk oylum oranı sabittir. Başlangıç boşluk oylum oranı, temsili boşluk merkezinde en yüksek değere sahiptir, f_0^M . f_0 değeri, merkezden uzaklaştıkça azalır ve R_b tarafından taranan dairesel bölgenin dışında sifıra yakın bir değere düşer. Hem, gerçek malzemelerde görülen, çok küçük boyutlu ikincil bir parçacık ailesini hesaba katmak, hem de çatlakların temsili boşluklar arasında ilerleyebilmesi için, plakanın temsili boşluklar dışında kalan bütün bölgelerinde başlangıç boşluk oylum oranı değeri sifıra yakın düşük bir değer ($f_0^b = 0.001$) alınmıştır. Temsili boşluk merkezi etrafındaki boşluk oylum oranı dağılımı, iki boyutlu Gauss fonksiyonu dağılımına sahiptir:

$$f_0(x_1, x_2) = f_0^M \exp\left(-\frac{(x_1 - x_1^M)^2 + (x_2 - x_2^M)^2}{2\sigma^2}\right) = 1 - r_0(x_1, x_2). \quad (5)$$

Denklem (5)'te, (x_1^M, x_2^M) temsili boşluk merkezinin (M noktasının) koordinatlarını, σ ise $f_0(x_1, x_2)$ fonksiyonundaki standart sapmayı, yani f_0 değerinin temsili boşluk merkezi etrafındaki yayılımını (dispersion) ifade etmektedir. Proje kapsamında yapılan farklı çalışmalarda farklı σ değerleri denemişse de, raporda sunulan sonuçlarda, en uygun değer olduğu tespit edilen $\sigma = R_b/4$ değeri kullanılmıştır. Bölüm 3.1'de açıklandığı üzere, kırılma oluşum bölgesinde, ABAQUS eleman kütüphanesinde CPE4R olarak adlandırılan kare şeklinde elemanlar kullanılmıştır. M noktasını barındıran sonlu elemanın dört düğüm noktası da merkezden eşit uzaklıktadır ve bu düğüm noktalarında tanımlanan başlangıç bağıl yoğunluk değerleri ($r_0 = 1 - f_0$) aynıdır. Dolayısıyla, bu elemanın her noktasında boşluk oylum oranı sabittir ve yaklaşık olarak f_0^M 'ye eşittir. Tekrar altı çizilmesi gereken bir husus, aynı plakada bulunan her bir temsili boşluk bölgesindeki başlangıç boşluk oylum oranı dağılımının aynı olduğudur.



Şekil 8. Yarıçapı $R_b = 3L_{el}$ olan bir temsili boşluk bölgesi civarındaki başlangıç boşluk oylum oranı dağılımı. σ , denklem (5)'de verilen başlangıç boşluk oylum oranı dağılım fonksiyonundaki, $f_0(x_1, x_2)$, standart sapmayı ifade etmektedir.

3.1.2 Boşluk Çekirdeklenmeli Sonlu Elemanlar Modeli

İkinci versiyonun ilk versiyondan iki temel farkı vardır: i-) plakanın elastik yük boşalması bölgelerinde (Şekil 6 ve 7'deki gri bölgeler) parçacık/boşluk olmadığı varsayılmış, bu bölgelerdeki plastik davranım standart J_2 akma teorisi kullanılarak modellenmiştir; ii-) kırılma oluşum bölgesinde boşluk çekirdeklenmesi hesaba katılmıştır. Bu versiyonda yükleme başlangıcında plakanın her yerinde boşluk oylum oranı $f_0 = 0$ 'dır ve elastik yük boşalması bölgelerinde bütün yükleme boyunca $f = 0$ kalmaktadır. Kırılma oluşum bölgesinde ise, denklem (4)'te ifade edildiği gibi, plastik gerinime bağlı olarak boşluk çekirdeklenmesi meydana gelmektedir. Boşluk çekirdeklenmesi, büyümesi ve birleşmesine ilişkin (f_0 , $f_{çk}$, $\epsilon_{çk}$, $s_{çk}$, f_{kr} ve f_{MEY}) parametreler; ilki temsili hacim bölgeleri, ikincisi bu bölgeler arasında kalan matris için olmak üzere, iki farklı set olarak tanımlanır.

Proje başlangıcında geliştirilen ilk versiyon, hesaplama zamanı açısından ikinci versiyona göre çoğu durumda daha avantajlıdır. Ancak, bulgular bölümünde ayrıntılı olarak anlatıldığı üzere, boşluk çekirdeklenmesini hesaba katan ikinci versiyon çatlak morfolojisi açısından daha gerçekçi sonuçlar üretmektedir. Hem ilk versiyon hem ikinci versiyon kullanılarak yapılan hesaplamalarda, plakanın elastik modülü $E = 70$ GPa, Poisson oranı $\nu = 0.3$, yoğunluğu = 2700 kg/m³ ve başlangıç akma gerilmesi $\sigma_0 = 300$ MPa olarak alınmıştır. Bu değerler bir alüminyum alaşımı için uygun değerlerdir. GTN parametrelerinden q_1 , q_2 ve q_3 için, literatürde yaygın olarak kullanılan ve ABAQUS'te varsayılan (default) değerler olan $q_1=1.50$, $q_2=1.00$, $q_3=2.25$ değerleri kullanılmıştır. Diğer GTN parametreleri (f_0 , $f_{çk}$, $\epsilon_{çk}$, $s_{çk}$, f_{kr} , f_{MEY}) ve pekleşme üsteli (N) için ise farklı çalışmalarda farklı değerler kullanılmış olup, bu değerler raporun ilgili kısımlarında belirtilmiştir.

3.1.2 Nümerik Çalışmalar için Geliştirilen Yazılımlar

Raporun bulgular bölümünde ayrıntılı olarak anlatıldığı üzere, plaka malzemesinin ve geometrisinin çatlak oluşum mekanizmasına etkilerini araştırmak amacıyla geniş kapsamlı bir parametrik çalışma yapılmıştır. Parametrik çalışma kapsamında, her defasında plakanın malzeme/geometri/mikro-yapı özelliklerinden birisi değiştirilip, diğer bütün özellikler sabit tutularak sonlu elemanlar hesaplamaları yapılmıştır. Bu tür bir parametrik çalışmada, sonlu elemanlar hesaplamalarının çözüm öncesi (geometri ve ağ oluşturma, malzeme özelliklerini ve sınır koşullarının belirleme, vb.), çözüm ve çözüm sonrası (gerekli durumlarda ek hesaplamaların yapılması ve sonuçların değerlendirilmesi, vb.) işlemlerinin otomatik hale getirilmesi elzemdir. Proje kapsamında bu amaçla geliştirilen bütün yazılımlarda Python programlama dili kullanılmıştır. Python dilinin tercih edilme sebebi, bu dili kullanılarak yazılmış bir kodu ABAQUS altında çalıştırılıp ABAQUS çözüm dosyasına (".odb" uzantılı dosya) ulaşmanın mümkün olmasıdır. Geliştirilen yazılımlar aşağıda açıklanmıştır:

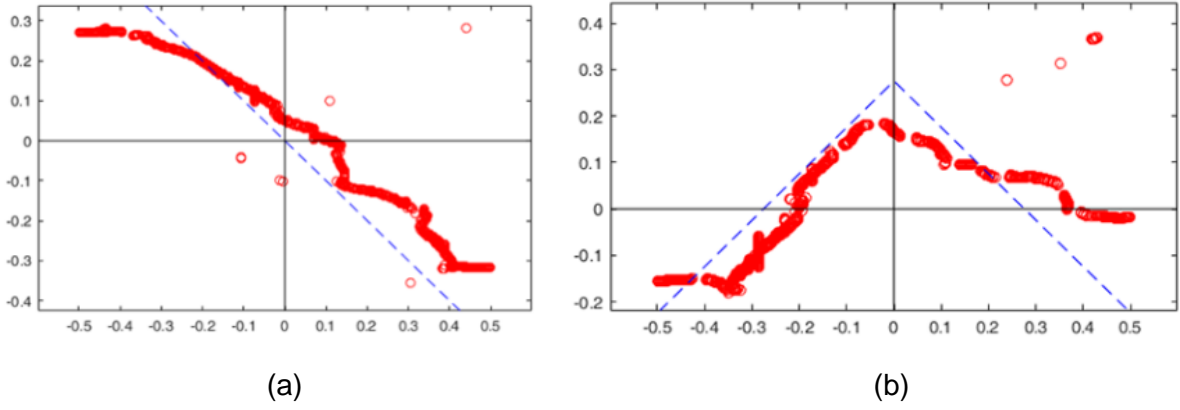
Çözüm öncesi işlemler: Crack adı verilen bir Python kodu, kullanıcı tarafından belirlenen geometrik özelliklere (plakanın boyutları, kırılma oluşum bölgesinin çatlak ilerlemesine dik yüzeyinin yükseklik/kalınlık oranı, kırılma oluşum bölgesinin yüksekliğinin plakanın yüksekliğine oranı, vb.) uygun bir sonlu elemanlar ağı oluşturmakta ve ilgili bütün verileri bir metin dosyasına yazmaktadır. Yani bu kod yalnızca geometri ve ağ oluşturulmasından sorumludur. ABAQUS girdi (input) dosyasını oluşturmak için, "AbalnpCreate" adı verilen ikinci bir Python kodu yazılmıştır. AbalnpCreate, plakanın malzeme ve geometrik özelliklerinin kodun kullanıcısı tarafından girildiği bir veri bloğu içermektedir. Bu kod, öncelikle bir önceki aşamada Crack tarafından oluşturulan sonlu elemanlar ağı dosyasını okur. Ardından, Şekil 6 ve 7'de gösterildiği gibi, kırılma oluşum bölgesine, rastgele bir dağılıma sahip temsili boşluklar atar. Mod I çekme probleminin sınır koşullarını ve çözüm parametrelerini (çözümde kullanılacak toplam adım sayısı ve her bir adım için gerekli zaman aralığı gibi) de belirleyerek ABAQUS girdi dosyasını oluşturur. AbalnpCreate, yazılan bir döngü sayesinde, farklı malzeme/geometri/mikro-yapı özelliklerine sahip birçok plaka için ABAQUS girdi dosyalarını tek seferde oluşturulabilmektedir. Crack ve AbalnpCreate kodlarını birleştirerek ABAQUS girdi dosyalarıyla ilgili bütün işlemleri tek bir yazılımla yapmak da mümkündür. Ancak, geniş kapsamlı yakınsaklık çalışmaları, aynı ağın birçok farklı malzeme özelliği için tekrar tekrar kullanılmasının gerektirmiş, bu durum ise Crack ve AbalnpCreate kodlarının ayrı ayrı kullanılmasını daha avantajlı kılmıştır.

Çözüm işlemleri: "Int" adı verilen bir Python kodu, istenilen sayıda girdi dosyasını birbiri ardına, elle müdahale gerektirmeden, ABAQUS'e yükleyip çözdürmektedir. Bazı plakalar için

çatlak ilerlemesi, belirlenen çözüm adımı sayısından çok daha önce tamamlanmakta, ama ABAQUS çözüm adım sayısını tamamlamak için boşa çalışmaktadır. Bu amaçla “Control” adı verilen ayrı bir Python kodu yazılmıştır. Control, belirli aralıklarla sonlu elemanlar hesabından toplam iç enerji değerini almakta ve bu değer bir önceki çözüm adımına göre ne kadar değiştiğini hesaplamaktadır. İki çözüm adımı arasında iç enerjideki değişiklik belirli bir oranın altına inerse, ilgili hesaplama sonlandırılmakta, bir sonraki plaka hesabına geçilmektedir. Control kodu, Int kodunun içinden çağırılmaktadır.

Çözüm sonrası işlemleri: Bu kısımda yazılan kodlardan ilki, çatlak yolunun, gözle inceleme yapmadan, otomatik olarak tespit edilmesine imkân sağlayan “Crack_Path” isimli koddur. Çatlağın üzerinden geçtiği bir elemanın entegrasyon noktalarında boşluk oylum oranı, müsaade edilen en yüksek boşluk oylum oranı olan f_{MEY} 'e ulaşmaktadır (bkz. bölüm 3.1). Ancak, birçok çalışmada, plaka üzerinde, plakayı ikiye ayıran büyük çatlağın yansıra, yüklemenin belirli aşamalarında bir süre ilerleyip daha sonra duran ufak çatlaklar oluştuğu da gözlenmiştir. Yani f_{MEY} çatlak ilerleme yolunu belirlemek için tek başına yeterli bir parametre değildir. Çatlak yolunu belirlemek amacıyla kullanılacak ikinci parametre olarak eşdeğer plastik gerinim (ABAQUS terminolojisinde “PEEQ”) seçilmiştir. Plakayı ikiye ayıran büyük çatlağın üzerinden geçtiği bir elemanlardaki PEEQ değeri diğer bütün elemanlardakinden daha yüksektir. Bu durum, çatlak ilerleme yolunun iki aşamalı bir işlemle tespit edilmesine imkân vermektedir. Birinci aşamada, boşluk oylum oranı f_{MEY} 'e ulaşmış bütün elemanlar belirlenir. İkinci aşamada ise, PEEQ değeri önceden belirlenen bir eşik değerinin altında kalan elemanlar ayıklanır; geriye kalan elemanlar, çatlak ilerleme yolu üzerindeki elemanlardır. PEEQ eşik değeri, test edilen plaka için deneme yanılma yoluyla belirlenir. Crack_Path kodu, bu iki aşamayı gerçekleştirip çatlak ilerleme yolu üzerindeki elemanları tespit ettikten sonra, öncelikle bu elemanların deformasyon öncesi konfigürasyona karşılık gelen merkez noktası koordinatlarını belirlemektedir. Ardından, belirlediği merkez noktası koordinatlarına (en küçük kareler yöntemini uygulayarak) doğru parçaları uydurmaktadır. Şekil 9(a) ve (b), Crack_Path kodu kullanılarak belirlenen çatlak morfolojilerine dair iki örnek göstermektedir. Şekildeki kırmızı çemberler, sonlu elemanlar hesabından elde edilen çatlak ilerleme yollarına, kesikli mavi çizgiler ise bu çatlak ilerleme yollarına uydurulan doğru parçalarına karşılık gelmektedir: Şekil 9(a)'daki çatlak eğik, Şekil 9(b)'deki çatlak ise bardak-kapaksı bir morfolojiye sahiptir.

Son olarak, ABAQUS tarafından direkt hesaplanmayan, plakadaki toplam boşluk oylum oranı, plakanın gerilme–gerinim eğrisi gibi değerlerin hesaplanması için OdbOutput isimli bir kod yazılmıştır.

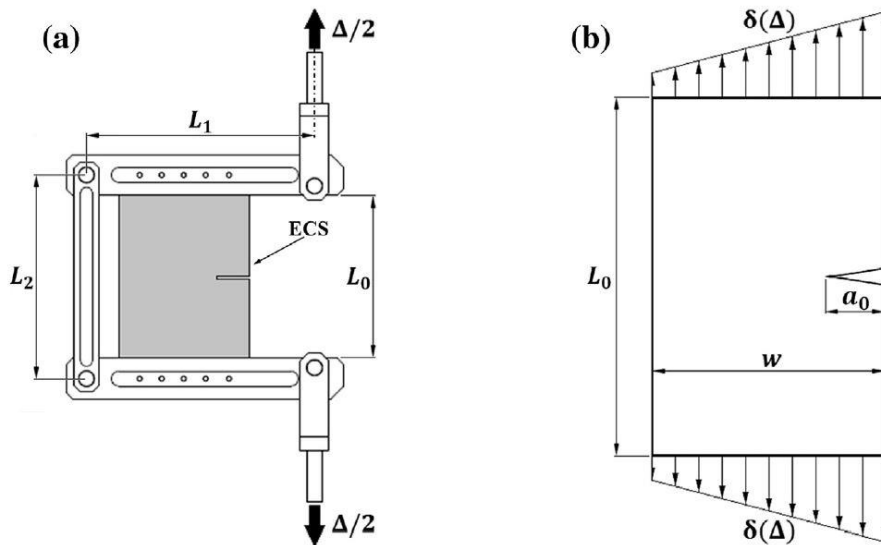


Şekil 9. Proje kapsamında yazılan Crack_Path kodu ile belirlenen çatlak morfolojilerine örnekler: (a) eğik, (b) bardak-kapaksı çatlak.

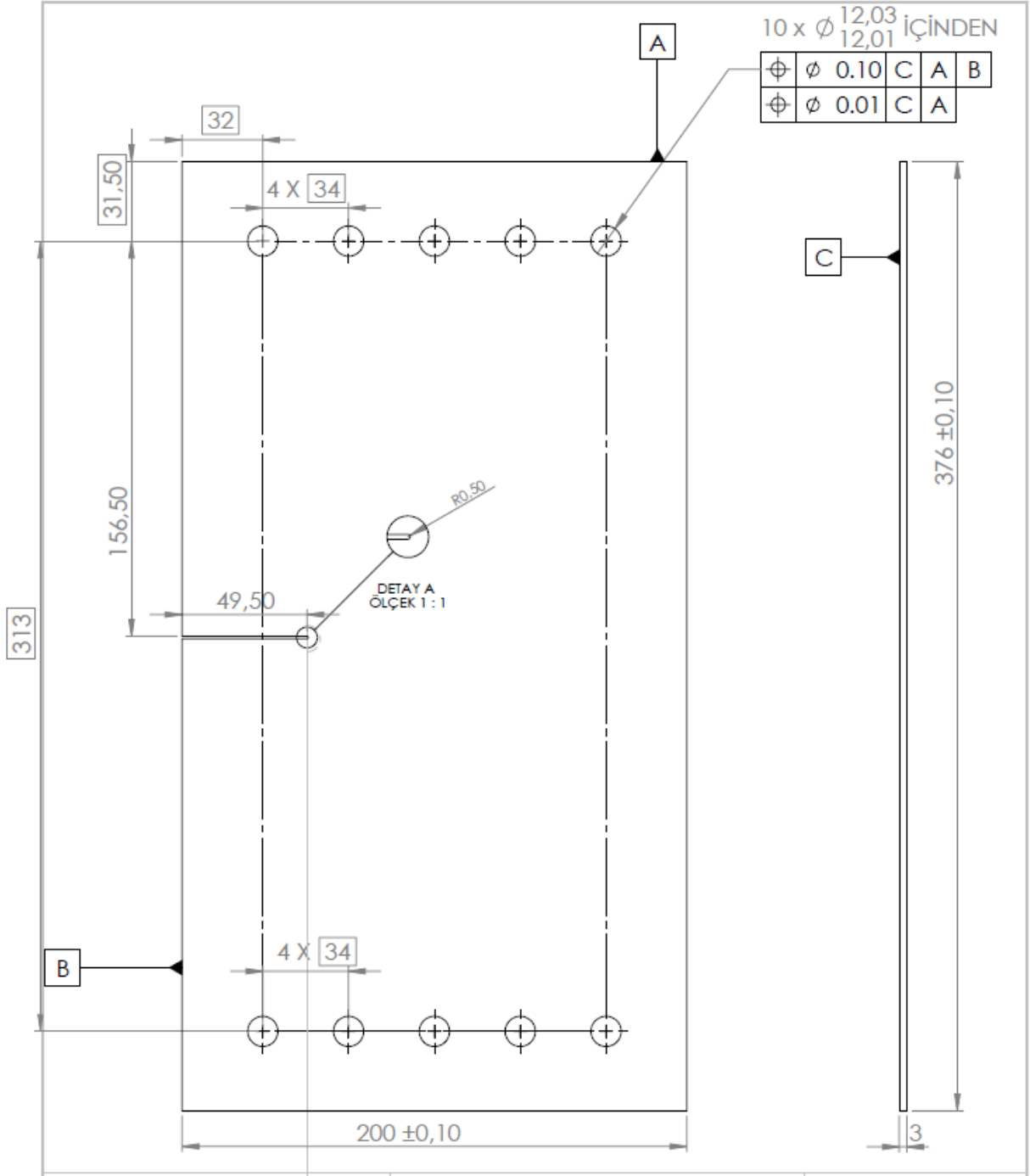
3.2 Deneysel Çalışmalar

Proje kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda, hem tek hem de çift kenar çentikli plakalar, mod I yüklemesi altında test edilmiş, plaka kalınlığının ve ikinci faz parçacıkların çatlak morfolojisine etkileri araştırılmıştır. İki ayrı deney düzeneğinin kullanılmasının sebebi, oluşan çatlak morfolojilerinin düzeneğinden bağımsız, yükleme tipine (mod I) bağlı olduğunun gösterilmek istenmesidir. Raporun bu bölümünde; tasarlanıp üretilen deney düzeneği, test edilen plakaların malzeme/geometri/mikro-yapı özellikleri ve çatlak morfolojisi tespitinde kullanılan gereç ve yöntemler açıklanmıştır.

3.2.1 Tek Kenar Çentikli Plakalar için Deney Düzeneği

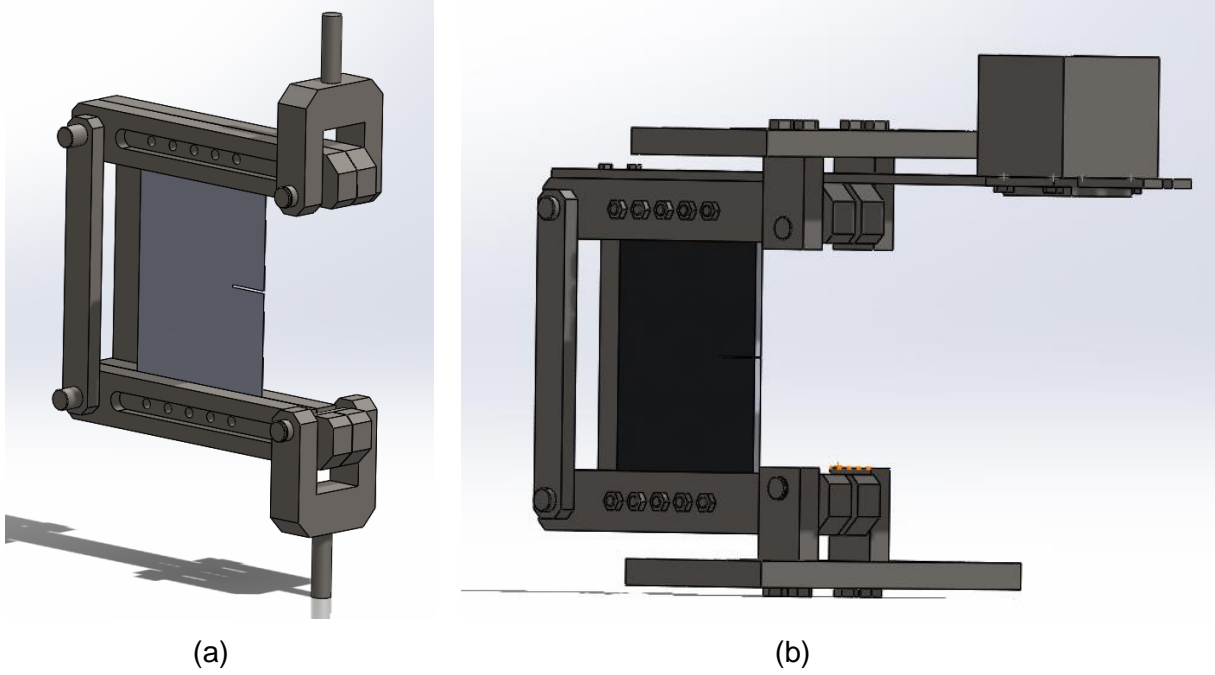


Şekil 10. Mod I yüklemesi altında tek kenar çentikli bir plakanın (a) yükleme düzeneğinin, (b) tabii olduğu yüklerin şematik gösterimi (bkz. El-Naaman ve Nielsen, 2013).



Şekil 11. Proje kapsamında test edilen tek kenar çentikli plakaların teknik çizimi.

Şekil 10(a), tek çentikli bir plakaya mod I yüklemesi uygulamak için kullanılan deney düzeneğini şematik olarak göstermektedir. Şekil 10(b)'de görüleceği üzere, bu düzende test edilen bir plaka, hem çekme hem eğilme yüklerine maruz kalmaktadır. Bu düzenek, Şekil 10(b)'de kullanılan uzunluk parametreleri cinsinden, yüksekliği $L_0 = 820$ mm, çentik uzunluğu $a_0 = 150$ mm, genişliği $w = 580$ mm olan ve kalınlıkları 5–10 mm arasında değişen metal plakaları test etmek için ilk defa Simonsen ve Törnqvist (2004) tarafından geliştirilmiştir. Benzer

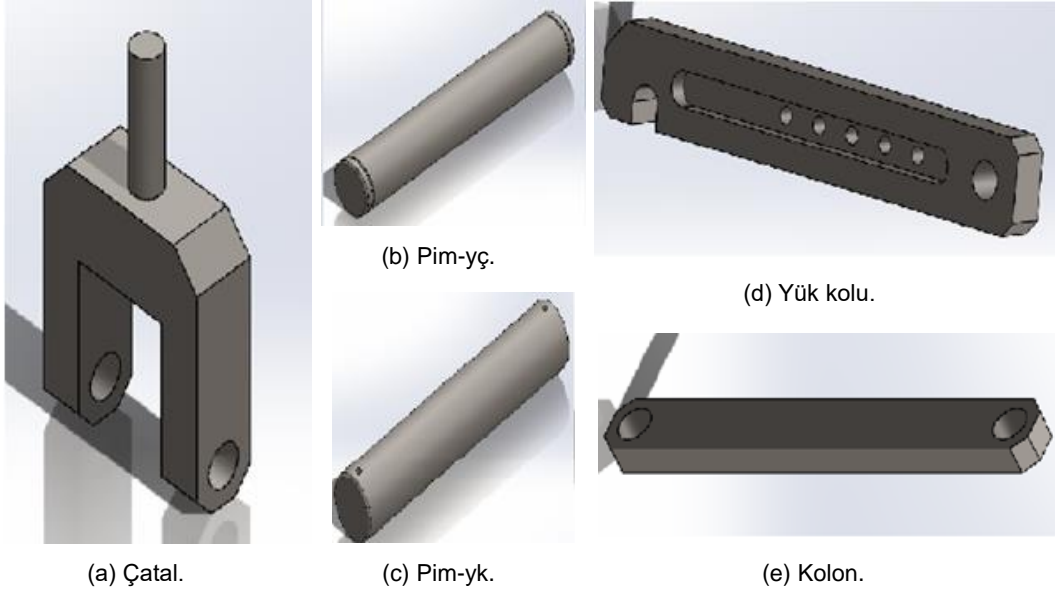


Şekil 12. (a) Projenin yurtdışı danışmanı Dr. Nielsen tarafından tasarlanan ve kullanılan deney düzeneği (düzenek-1, bkz. El-Naaman ve Nielsen, 2013). (b) Proje kapsamında tasarlanan ve kullanılan deney düzeneği (düzenek-2).

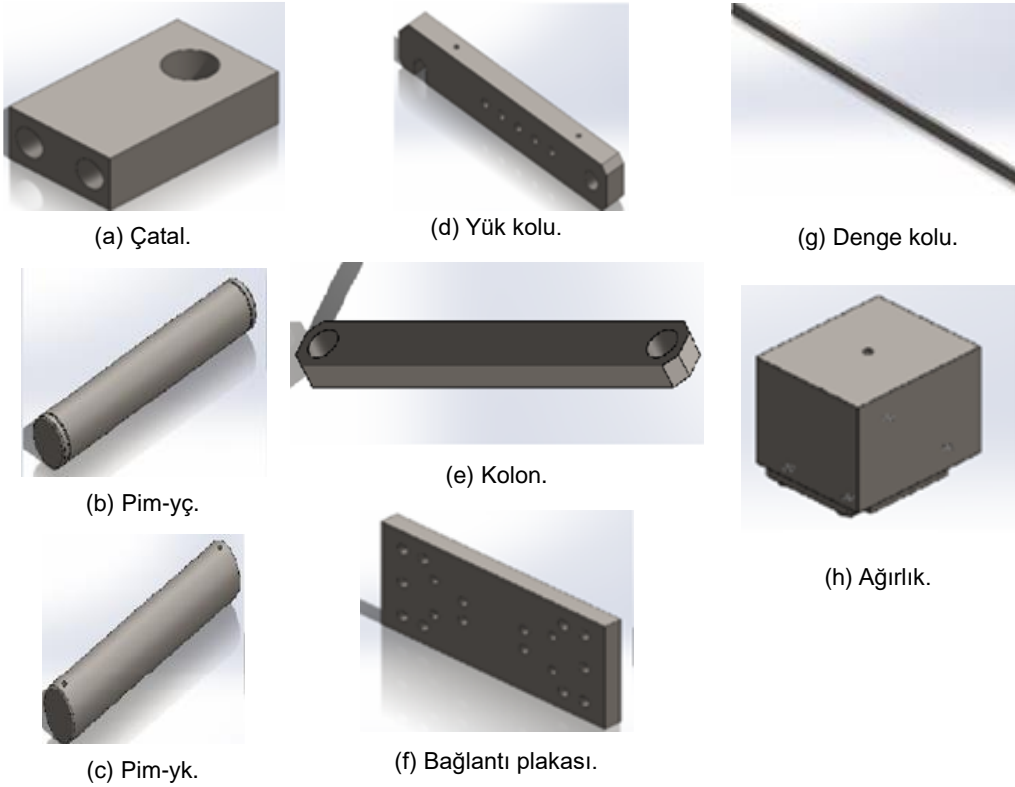
bir düzenek projenin yurt dışı danışmanı Dr. Nielsen tarafından 4 mm kalınlığında ($L_0 = 250$ mm, $a_0 = 50$ mm, $w = 200$ mm) alüminyum plakaları test etmek için kullanılmıştır. Bu proje kapsamında ise, kalınlıkları $t \in \{0,5; 1; 3; 4; 5\}$ mm arasında değişen ve diğer uzunlukları $L_0 = 248$ mm, $a_0 = 50$ mm, $w = 200$ mm olan alüminyum plakalar test edilmiştir. Proje kapsamında test edilen plakaların teknik çizimi Şekil 11’de verilmiştir.

Şekil 12(a), Dr. Nielsen tarafından MTS 100 kN çekme cihazı için tasarlanmış deney düzeneğini (düzenek-1), Şekil 12(b) ise proje kapsamında tasarlanan ve üretilen deney düzeneğini (düzenek-2) göstermektedir. Düzenek-1, maksimum 6 mm kalınlığındaki alüminyum 1050A H14 numuneler için kullanılmıştır. Düzenek-2 ise, proje kapsamında kullanılacak olan Instron 600 LX çekme cihazına uyacak ve en fazla numune kalınlığı 10 mm olacak şekilde tasarlanmıştır.

Şekil 13 ve 14, sırasıyla, Şekil 12(a) ve (b)’de gösterilen düzenek-1 ve düzenek-2’yi oluşturan parçaları ve parçalara verilen isimleri göstermektedir. Her iki düzenek için de; “pim-yç”, yük kolu ile çatal arasında bulunan pimi, “pim-yk” ise yük kolu ile kolon arasında bulunan pimi ifade etmektedir. Düzenek-2’yi elde etmek için düzenek-1’de yapılan değişiklikler aşağıda belirtilmiştir:



Şekil 13. Şekil 12(a)'da gösterilen deney düzeneğini (düzenek-1) oluşturan parçalar. "Pim-yç", yük kolu ile çatal arasında bulunan pimi, "pim-yk" ise yük kolu ile kolon arasında bulunan pimi ifade etmektedir.



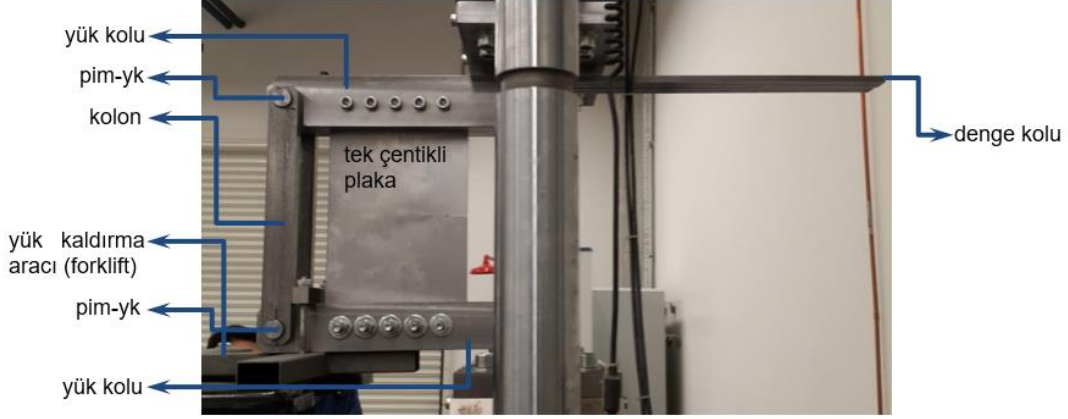
Şekil 14. Şekil 12(b)'de gösterilen deney düzeneğini (düzenek-2) oluşturan parçalar.

- Şekil 13(a)'da gösterilen çatalar, sırasıyla Şekil 14(a) ve (f)'de gösterilen çatal ve bağlantı plakaları ile değiştirildi. Düzenek-2, Şekil 14(f)'deki plakalara Şekil 14(a)'daki

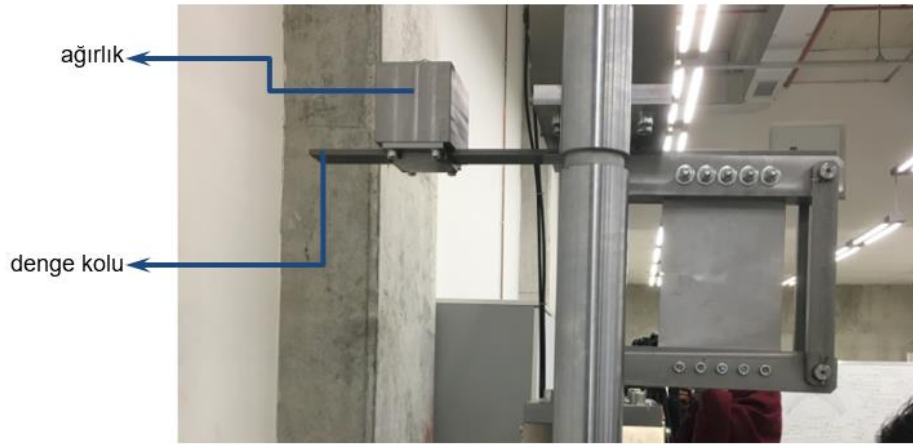
çatallarla bağlanmakta, plakalar ise civatalarla Instron 600 LX cihazına sabitlenmektedir.

- Sürtünmeyi engellemek ve çekme cihazının uyguladığı yükü deney numunelerine direkt olarak iletebilmek için, her iki düzeneğin de bağlantı yerlerinde yağlanmış pimler kullanılmaktadır (bkz. Şekil 12, 13 ve 14). Dolayısıyla, numune koştuktan sonra bu düzeneklerin rijit olarak kalması mümkün değildir. Bu sorun, düzenek-1 için bir makara-ağırlık sistemi kullanılarak çözülmüştür. Düzenek-2 için ise, sırasıyla Şekil 14(g) ve (h)'de gösterilen denge kolu ve ağırlık sistemi kullanılarak çözüldü. Deney düzeneği için geliştirilen denge mekanizması aşağıda açıklanmıştır.
- Şekil 13(d)'de gösterilen yük kolundaki oluk, hem üretimde kolaylık olması hem de sistemin daha dayanıklı hale gelmesi için düzenek-2'de dolduruldu, bkz. Şekil 14(d).
- Düzenek-1'de boyları 141 mm olan pim-yç ve pim-yk parçaları (Şekil 13(b) ve (c)), düzenek-2 için 151 mm boyunda üretildi. Bu sayede deney düzeneğinde test edilebilecek en fazla numune kalınlığı 6 mm'den 10 mm'ye yükseltilmiş oldu.

Şekil 15(a), düzenek-2'nin Instron 600 LX çekme cihazına bağlanmış halini göstermektedir. Şekilde görüleceği üzere, düzeneğin, denge koluna ağırlık bağlanmamış durumda dengede kalabilmesi için bir yük kaldırma aracı (forklift) ile desteklenmesi gerekmektedir. Çünkü yük kolları ve kolonlar, çekme cihazının uyguladığı yükü direkt olarak numuneye iletebilmek (yani sürtünme kuvvetlerini en aza indirebilmek) için yağlanmış pimler etrafında kolaylıkla dönebilmektedir. Ağırlık, civatalar kullanılarak denge koluna monte edildikten sonra ise, düzenek, ek bir desteğe ihtiyaç duymadan dengede kalabilmektedir (bkz. Şekil 15(b)). Denge koluna bağlanan ağırlık sayesinde, düzeneği çekme cihazına bağlayan çatallar ile plakalar arasındaki pimlerden geçen eksen etrafındaki toplam moment, yükleme boyunca sıfır olmakta ve düzenek dengede kalmaktadır. Yani, denge koluna bağlanan ağırlıktan kaynaklanan moment, düzeneğin ve deney numunesinin ağırlıklarından kaynaklanan momentleri dengelemektedir. Deney düzeneğini oluşturan ve moment kolu sıfırdan büyük olan her bir parçanın ağırlığı Tablo 2'de verilmiştir. Ağırlığın denge kolu üzerinde hangi noktaya bağlanması gerektiği, basit bir moment hesabı yapılarak kolaylıkla bulunabilir. Şekil 16(a) ve (b), sırasıyla, üzerinde numune olmayan ve olan deney düzenekleri için ağırlığın denge kolu üzerindeki konumunu göstermektedir. Ağırlığın konumunu tespit etmek için yapılan hesaplamalarda, denge kolunun yeterince uzun olması için, proje kapsamında kullanılacak en ağır numunenin (5 mm kalınlığında alüminyum 1050 H14 plaka yerine) 10 mm kalınlığında AISI 1040 çelik plaka olduğu varsayılmıştır.



(a)

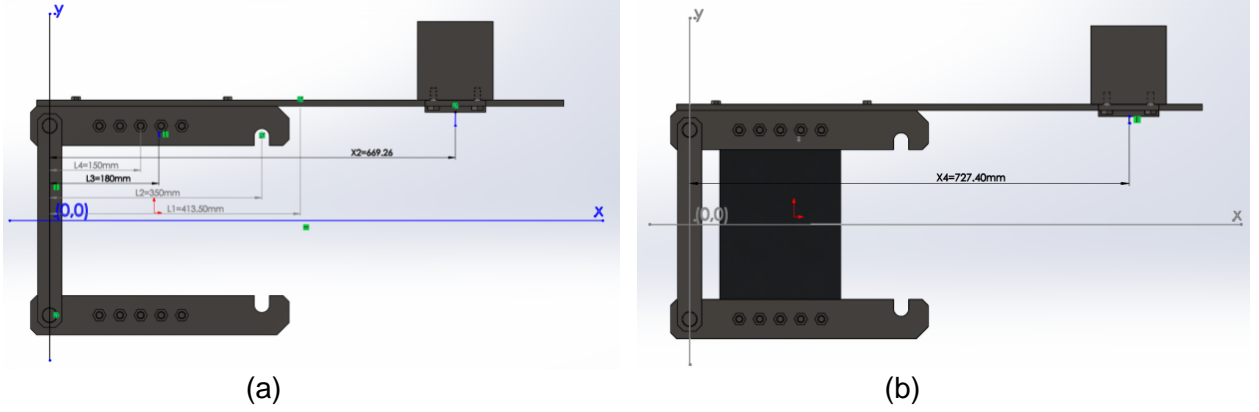


(b)

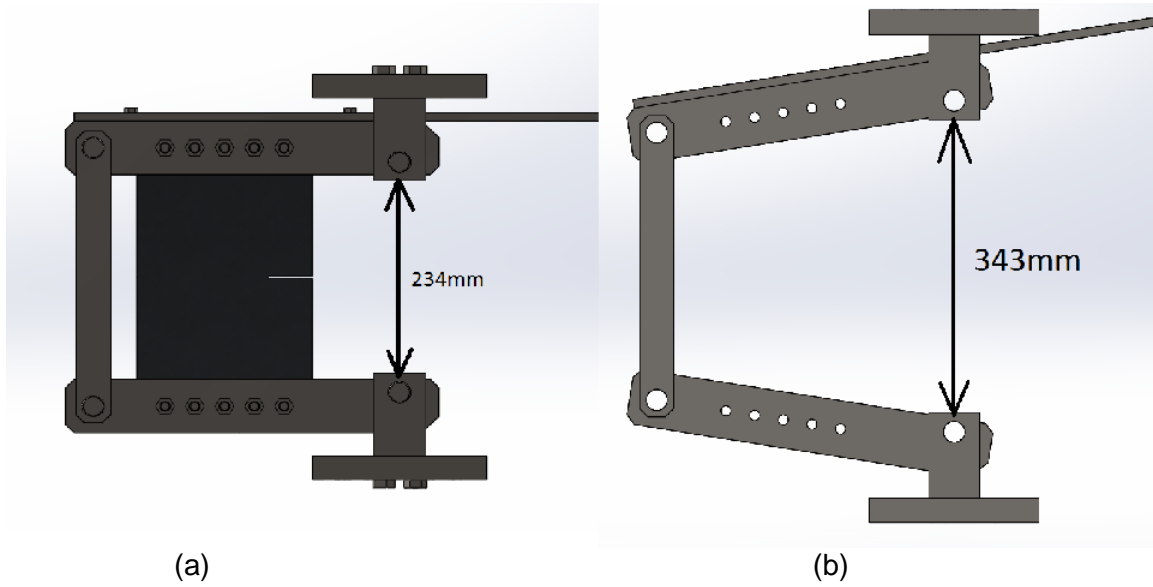
Şekil 15. (a) Proje kapsamında tasarlanan ve üretilen düzeneğin (düzenek-2) Instron 600 LX çekme cihazına bağlanmış hali. Denge kolunda ağırlık bulunmadığı için düzenek bir yük kaldırma aracı (forklift) ile desteklenerek dengede kalabiliyor. (b) Düzenek-2, denge koluna ağırlık bağlandığında, ek bir desteğe ihtiyaç duymadan dengede kalabiliyor.

Parça ismi ve adedi	Adet başına ağırlık (kg)	Toplam Ağırlık (kg)
Ağırlık — 1 adet	20,4	20,4
Denge kolu — 2 adet	2,0	4,0
Kolon — 2 adet	2,0	4,0
Yük kolu — 4 adet	7,025	28,1
Pim-yk — 2 adet	0,5	1,0
Cıvatalar — 10 adet	0,12	1,2

Tablo 2. Düzenek-2'yi oluşturan parçaların ağırlıkları.



Şekil 16. Düzenek-2'nin dengede kalabilmesi için ağırlığın denge kolu üzerinde bulunması gereken konum: (a) düzeneğe plaka bağlı değilken, (b) düzeneğe; 10 mm kalınlığında, 8 g/cm³ yoğunluğunda bir plaka bağlı iken.



Şekil 17. Düzenek-2'nin: (a) yükleme öncesi durumu, (b) en fazla açılabilceği durumu.

Denge kolu-ağırlık sistemi ile ilgili önemli bir diğer nokta, denge kolunun, düzeneğin belli bir mesafenin üzerinde açılmasına engel olmasıdır. Şekil 17'de gösterildiği üzere, düzenek 109 mm'den fazla açıldığında, denge kolu, düzeneği çekme cihazına bağlayan plakaya temas etmektedir. Yani, düzeneğe bağlanan numuneler en fazla 109 mm çekilebilecektir. Dr. Nielsen'in 4 mm kalınlığında, diğer boyutları proje kapsamında kullanılacak numunelerle aynı, alüminyum ve çelik numuneler üzerinde yaptığı deneylerde, plakaların mod I yüklemesi altında tamamen yırtılmaları için en fazla 50 mm çekmenin yeterli olduğu gösterilmiştir (El-Naaman ve Nielsen, 2013). Proje kapsamında yapılan bütün deneylerde de 109 mm çekmenin plaka yırtılması için yeterli ve hatta fazla olduğu görülmüştür. İlerde farklı malzemeden yapılmış plakalar çekilirse ve beklenenin üstünde bir çekme uygulama ihtiyacı hâsıl olursa, düzenek ve numune boyutlarında küçük çaplı değişiklikler yapmak mümkündür. Uygulanabilecek en

Malzeme	Miktar (kg)	Birim Fiyat (TL/kg)	Toplam Fiyat (TL)
Çap 28 mm AISI 1040	3,00	2,25	6,75
30x70 soğuk AISI 1040	7,00	2,55	17,85
40x200 soğuk AISI 1040	52,00	3,00	156,00
20x40 soğuk AISI 1040	5,00	2,55	12,75
10x30 soğuk AISI 1040	5,00	2,55	12,75
20x120 soğuk AISI 1040	3,00	2,25	6,75
40x70 soğuk AISI 1040	39,00	4,10	160,00
140x140 AISI 1040	15,50	3,00	45,50

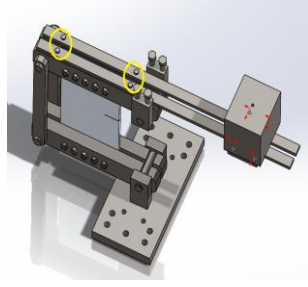
Tablo 3. Proje kapsamında tasarlanan ve üretilen düzeneğin (düzenek-2) imalatında kullanılan malzemeler ve fiyatları.

fazla çekme limitini arttırmak için düzenekte yalnızca kolonların (bkz. Şekil 15 (a)) boylarını kısaltmak yeterli olacaktır.

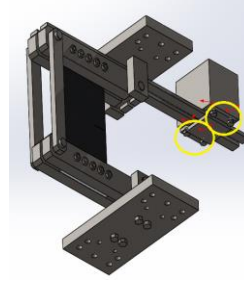
Deney düzeneği imalatı için satın alınan malzemeler ve fiyatları Tablo 3’de verilmiştir. Malzemeler için toplam 493,65 TL ödenmiştir. Buna ek olarak, TOBB ETÜ bünyesinde işlenemeyen büyük boyuttaki parçaların (yük kolu ve bağlantı plakası, bkz. sırasıyla Şekil 14 (d) ve (f)) üretimi için dışarıdan hizmet alınmış ve toplam 413,00 TL ödenmiştir. Deney düzeneğinde kullanılan cıvata, kopilya ve segmanlar ise 20 TL'ye satın alınmıştır. Toplamda deney düzeneğinin imalatı için KDV (%18) dâhil 926,65 TL ödenmiştir. Şekil 18, deney düzeneğindeki parçaların birbirlerine ve düzeneğin Instron 600 LX çekme cihazına nasıl bağlandığı ayrıntılı olarak göstermektedir.

Şekil 13(a)’da gösterilen deney düzeneğinin (düzenek-1) 80 kN’a kadar sorunsuz yük taşıyabildiği, El-Naaman ve Nielsen (2013) tarafından yapılan deneyler esnasında test edilerek görülmüştür. Dr. Nielsen, deneylerin yanı sıra sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak mekanik analiz çalışmaları da yapmış ve düzenek-1’in plastik deformasyona uğramadan 100 kN’a kadar yük kaldırabildiğini belirlemiştir. Ancak Dr. Nielsen tarafından yapılan sonlu elemanlar çalışmalarında parçalar arası sürtünme ve kontak ihmal edilmiştir. Bu nedenle, bu proje kapsamında, düzenek-1 için parçalar arası sürtünme ve kontak da hesaba katan detaylı bir sonlu elemanlar analizi yapılmıştır.

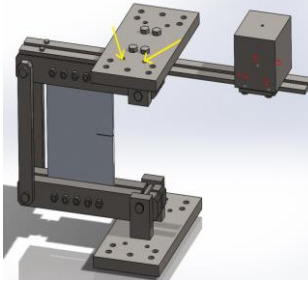
Düzenek-1’in her bir parçası, ticari bir üç boyutlu teknik çizim yazılımı olan SolidWorks kullanılarak çizilmiştir. Sonlu elemanlar ağının kolaylıkla örülebilmesi amacıyla, düzeneğin yük taşıma kapasitesinde önemli bir etkiye sahip olmayan (somun ve cıvataların dişleri gibi) ayrıntı-



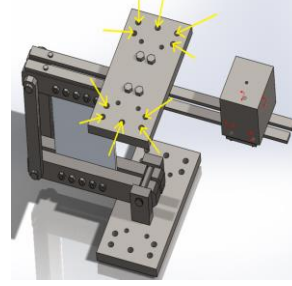
(a) 4 adet M8 × 30 mm



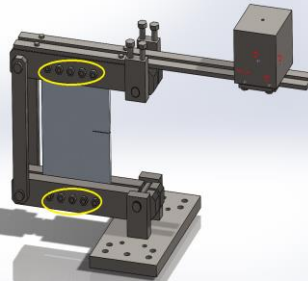
(b) 4 adet M10 × 30 mm



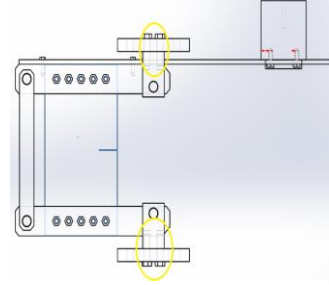
(c) 8 adet M12 × 50 mm



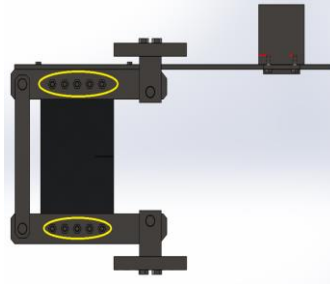
(d) 20 adet M16 × 50 mm



(e) 10 adet M12 × 100 mm

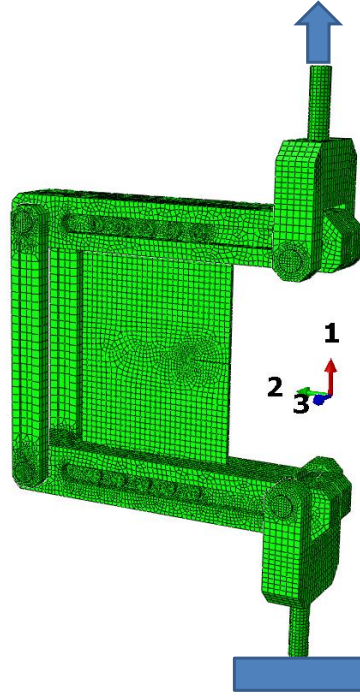


(f) 8 adet M16 × 70 mm



(g) 10 adet M12 (somun)

Şekil 18. (a) Denge kollarını yük kollarına bağlamak için 4 adet M8 × 30 mm civata; (b) ağırlığı denge kollarına bağlamak için 4 adet M10 × 30 mm civata; (c) bağlantı plakalarını çekme cihazına bağlamak için 8 adet M12 × 50 mm ve (d) 20 adet M16 × 50 mm civata; (e) deney numunesini yük kollarına bağlamak için 10 adet M12 × 100 mm civata; (f) bağlantı plakalarını çatalara bağlamak için ise 8 adet M16 × 70 mm civata kullanılmıştır. Ayrıca, deney numunelerini yük kolları arasında sıkıştırmak için 10 adet M12 somun kullanılmıştır.



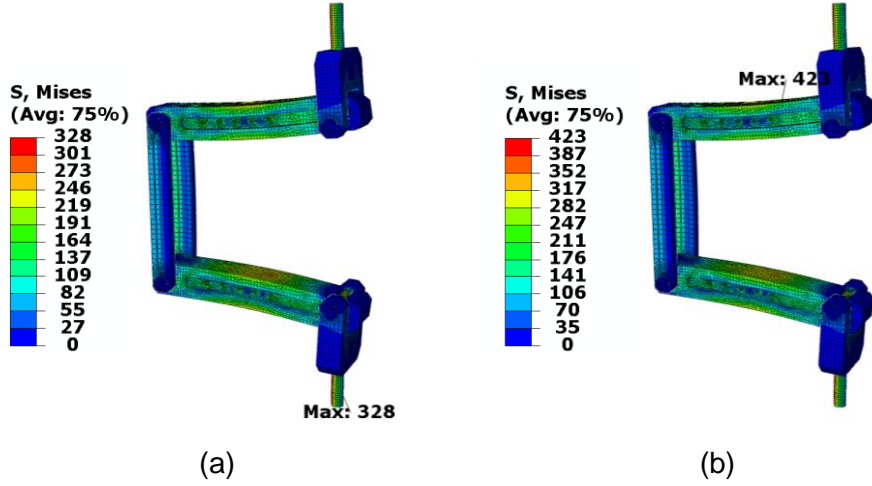
Şekil 19. Şekil 13(a)'da gösterilen düzenek-1 için oluşturulan sonlu elemanlar ağı. Üstteki çatala çekme kuvveti uygulanırken alttaki çatal sabit tutulmaktadır. Düzenek, deformasyon öncesi durumda gösterilmiştir.

ntılar parça geometrileri oluşturulurken dikkate alınmamıştır. SolidWorks kullanılarak çizilen parçalar, sonlu elemanlar modellemesinin yapılacağı ABAQUS CAE yazılımına aktarılmıştır. ABAQUS CAE yazılımının otomatik ağ örme özelliğinden faydalanılarak, Şekil 19'da gösterilen ağ oluşturulmuştur. Bir sonlu elemanlar ağının sorunsuz bir şekilde oluşturulabilmesi parça geometrisine bağlıdır. Parça geometrisinin otomatik ağ örmeye müsaade etmediği durumlarda, parça, ağ örülmesine imkân verecek sayıda bölmelere (ABAQUS terminolojisinde "partition") ayrılmıştır. Deney düzeneği, deney esnasında sanki-statik yüklemeye maruz kalacağı için sonlu elemanlar modeli de sanki-statik yüklemeye varsayılarak geliştirilmiş ve problemin çözümünde ABAQUS/Standart kullanılmıştır. Deney düzeneği için örülen ağda, ABAQUS/Standart eleman kütüphanesinde C3D8R olarak adlandırılan, üç boyutlu, sekiz düğüm noktalı, azaltılmış entegrasyon (reduced integration) noktalı elemanlar kullanılmıştır. Deney numunesi olan plakanın ağı için ise 20 düğüm noktalı C3D20R elemanları kullanılmıştır. Plaka için daha fazla düğüm noktalı eleman kullanılmasındaki amaç, çentikten kaynaklanan gerilme yığılmasını yüksek doğruluk düzeyinde hesaplayabilmektir. Malzeme özellikleri için deney düzeneğinde kullanılan gerçek malzemelerin özellikleri tanımlanmıştır: deney düzeneğinin—8.8 galvanizli çelik civatalar hariç—bütün parçaları AISI 1040 çeliğinden, plaka ise alüminyum 1050A H14'den yapılmıştır. Plaka kalınlığı, proje kapsamında test edilecek en yüksek kalınlık olan 5 mm olarak alınmıştır. Şekil 19'da gösterildiği üzere, düzeneğe deneyler

sırasında uygulanacak yükü simüle etmek için, çatalardan biri sabit tutulurken diğerine çekme kuvveti uygulanmıştır.

Düzeneğin parçaları arasındaki sürtünme etkileşimlerini modellemek için yüzey-yüzey kontağı tanımlanmıştır. ABAQUS'te yüzey-yüzey kontağı tanımlamak için yüzeyler arası sürtünme katsayılarının ve yüzey normal davranışının belirtilmesi gereklidir (bkz. ABAQUS, 2016). Deney düzeneğinde üç farklı yüzey sürtünmesi vardır: 1-) çelik-çelik sürtünmesi (statik sürtünme katsayısı 0,8), 2-) çelik-alüminyum sürtünmesi (statik sürtünme katsayısı 0,61), 3-) düzenekte kullanılan (çelik) pimler yağlandığı için, yağlanmış çelik-çelik sürtünmesi (statik sürtünme katsayısı 0,16). Statik sürtünme katsayısı değerleri "Engineers Edge" isimli internet sitesinden alınmıştır (bkz. Engineers Edge, 2018). Yüzey normal davranışında, iki yüzey arasındaki mesafe sıfıra indiği an kontak başlangıcı olarak kabul edilmiştir. Kontak halindeki yüzeyler arasında oluşan basınç için bir sınır tanımlanmamış, yüzeyler birbirinden ayrıldığında basıncın sıfıra düştüğü varsayılmıştır. Bu davranış ABAQUS terminolojisinde "sert kontak" olarak adlandırılır. Yükleme, düzeneğe iki basamakta (ABAQUS terminolojisinde "step") uygulanmıştır. İlk basamakta, düzeneğin parçalarını birleştiren her bir civataya, civata eksenine dik doğrultuda bir çekme kuvveti uygulanmıştır. Civataların sıkılmasından kaynaklı yüklemeyi temsil eden bu çekme kuvveti, düzene-2'de kullanılan civatalar (M12 × 55 mm, 8.8, galvanizli, çelik) için 32360 N'dur (bkz. Engineering-abc, 2018). İkinci basamakta ise düzeneğe Şekil 19'da gösterilen çekme yükü uygulanmıştır.

Sonlu elemanlar modelinin amacı, belirli bir yüke karşılık deney düzeneğinin herhangi bir parçasında plastik deformasyon olup olmadığına bakmaktır. Eğer bir parçanın herhangi bir noktasında/bölgesinde Von Mises gerilme değeri parçanın akma gerilmesini aşıyorsa, o noktada/bölgede plastik deformasyon var demektir. Amaç, düzeneğe, plastik deformasyona sebep olmadan uygulanabilecek en fazla çekme kuvvetini belirlemektir. Şekil 20(a) ve (b), sırasıyla, 80 kN ve 100 kN çekme kuvvetleri için deney düzeneğindeki Von Mises gerilme dağılımını göstermektedir. Test edilen numune, civata ve somunlar gösterime dâhil edilmemiştir. Zira deneylerin amacı numuneyi yırtmaktır, dolayısıyla numune için bir gerilme sınırlaması yoktur. Civata ve somunlardaki gerilme dağılımı ise aşağıda ayrıca tartışılacaktır. Şekil 20(a)'da görüleceği üzere, 80 kN çekme kuvveti uygulandığında civatadaki en fazla Von Mises gerilmesi 328 MPa'dır. Bu değer, düzene malzemesi olan çeliğin (AISI 1040) akma gerilmesinin (yaklaşık 415 MPa) altındadır. Yani, Dr. Neilsen'in deneysel olarak tespit ettiği sonuçla aynı sonuca ulaşılmış, 80 kN yük altında düzeneğin sorunsuz çalıştığı tespit edilmiştir. 100 kN yük için Von Mises gerilme değeri yük kolanlarında 423 MPa değerine ulaşmakta, yani çeliğin akma gerilmesini aşmaktadır. Dolayısıyla, Dr. Neilsen'in sonlu elemanlar analizinden



Şekil 20. Deney düzeneğine (düzenek-1): (a) 80 kN, (b) 100 kN çekme kuvveti uygulandığında oluşan Von Mises gerilme dağılımı. Düzenek-1’de oluşan en yüksek Von Mises gerilme değeri, 80 kN’luk kuvvet için 328 MPa, 100 kN’luk kuvvet için ise 423 MPa’dır.

elde ettiği sonuçların aksine, 100 kN yük uygulamak düzenek için güvenli değildir. İki sonlu elemanlar modelinin arasındaki farklılığın, Dr. Neilsen tarafından yapılan çalışmalarda parçalar arası sürtünme ve kontakın ihmal edilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Düzenek’in diğer parçalarının aksine, cıvatalardaki en fazla Von Mises gerilme değerinin 80 kN yük için 708 MPa, 100 kN yük için ise 950 MPa değerine ulaştığı görülmüştür. 8.8 galvanizli çelik cıvata için akma gerilmesi 600 MPa, çekme gerilmesi ise 800 MPa civarındadır Yani, sonlu elemanlar sonuçları, her iki yük değeri için de bu tip cıvatalarda plastik deformasyon olacağını göstermektedir.

Düzenek-2, tasarımı itibarıyla düzenek-1’e kıyasla daha sağlam bir yapıya sahip olduğundan, bu düzenek için sonlu elemanlar analizi yapılmamıştır. Düzenek-1 için yapılan analizler esas alınıp, emniyet katsayısı olarak 1.3 kullanılmış ve limit yük 60 kN olarak belirlenmiştir. Ayrıca deneylerde 8.8 galvanizli çelik cıvatalar yerine, akma gerilmesi 900 MPa, çekme gerilmesi ise 1200 MPa civarında olan 12.9 çelik cıvatalar kullanılmıştır. Proje kapsamında yapılan deneylerin tamamında maksimum yük 60 kN’un altında kalmış, üretilen düzenek hasara uğramadan bütün deneyler başarıyla tamamlanmıştır.

Son olarak, üretilen düzeneğin çekme cihazına nasıl bağlandığı açıklanmıştır. Deneyin ilk aşamasında, sırasıyla Şekil 14(a) ve (f)’de gösterilen çatal ve bağlantı plakaları, Şekil 21(a)’da gösterildiği gibi Instron 600 LX çekme cihazının yük hücrelerine bağlanır. Ardından, deneyde kullanacak olan (plaka şeklindeki) numune, Şekil 21(b)’de gösterildiği gibi deney düzeneğine monte edilir. Bu aşamada, düzeneğin üst kısmındaki yük kollarını birleştiren cıvata başlarının, alt kısımdaki yük kollarını birleştiren cıvata başlarına göre ters yönde olmasına dikkat edilmeli-



(a)



(b)

Şekil 21. (a) Şekil 14(a)'daki çatalın ve 14(f)'deki bağlantı plakalarının Instron 600 LX çekme cihazının yük hücrelerine bağlanması. (b) Plakanın deney düzeneğine monte edilmesi.

dir. Zira yüklemenin yalnızca mod I olması (yani mod II ve/veya mod III içeren karma bir yükleme olmaması) için düzeneğin ağırlık merkezinin deney süresince, numuneye paralel ve numuneyi ikiye bölen düzlem üzerinde kalması gerekmektedir. Numune hariç toplam ağırlığı 38,1 kg olan deney düzeneğini insan gücüyle kaldırıp çekme cihazına bağlamak zor ve tehlikeli bir işlemdir. Dolayısıyla, düzeneğin, önce bir yük kaldırma aracına bağlanır, Şekil 22(a); deney esnasında sürtünme kuvvetlerini en aza indirmek için pim yatakları yağlanır, Şekil 22(b); ardından çekme cihazının yük hücreleri arasına yerleştirilir, Şekil 22(c). Deney düzeneğini çekme cihazına sabitlemek için, önce çatallarla yük kollarını birbirine bağlayan pimler (pim-yç, bkz. Şekil 14(b)), çatalların içine geçirilir. Ardından pimlerin segmanları takılır ve deney düzeneğini çekme cihazına bağlayan plakalar üzerindeki civatalar sıkılır. Bu işlemler tamamlandıktan sonra deney düzeneği yük kaldırma aracından ayrılır ve tamamıyla çekme cihazına oturmuş olur, Şekil 23(a). Düzeneğin, çekme cihazına yerleştirildikten sonra, yerleştirme işlemleri esnasında numunenin düzeneğin içerisinde kayıp kaymadığı kontrol edilmelidir. Şekil 23(a)'de gösterildiği gibi, numune, çekme doğrultusuna paralel ve düz durmalı, düzeneğin yük kolları birbirine paralel olmalıdır. Numunede veya yük kollarında kayma olması, yüklemenin yalnızca mod I değil, mod II ve/veya mod III de içeren karma bir yükleme olmasına yol açacağı



(a)



(b)



(c)

Şekil 22. (a) Deney düzeneğinin yük kaldırma aracına bağlanması. (b) Pim yataklarının yağlanması. (c) Deney düzeneğinin, çekme cihazının yük hücreleri arasına yerleştirilmesi.



(a)



(b)

Şekil 23. (a) Deney düzeneğinin yük kaldırma aracından ayrılıp çekme cihazına oturtulması. (b) Düzeneği dengede tutan ağırlığın yerine yerleştirilmesi.



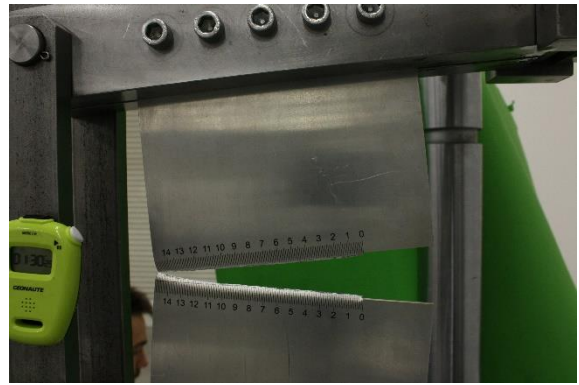
(a)



(b)



(c)



(d)

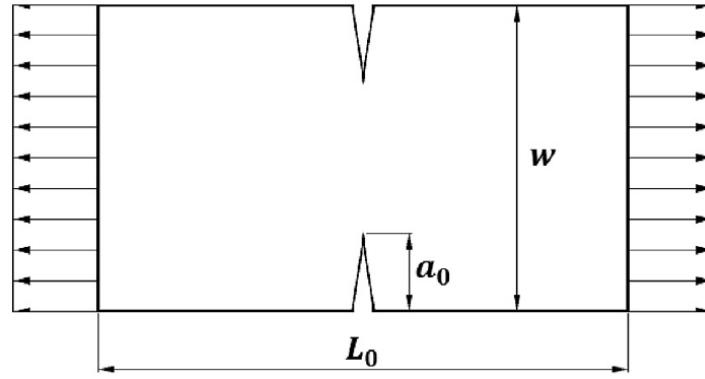
Şekil 24. Tek kenar çentikli bir plakanın yırtılması deneyi süresince, (a) deney başlangıcından, (d) plakanın tamamen ikiye ayrılmasına kadar, farklı aşamalarda çekilmiş fotoğraflar.

için, kesinlikle engellenmelidir. Son aşamada, Şekil 23 (b)'de gösterildiği gibi, düzeneği dengede tutan ağırlık yerine oturtulur ve deneye başlanır.

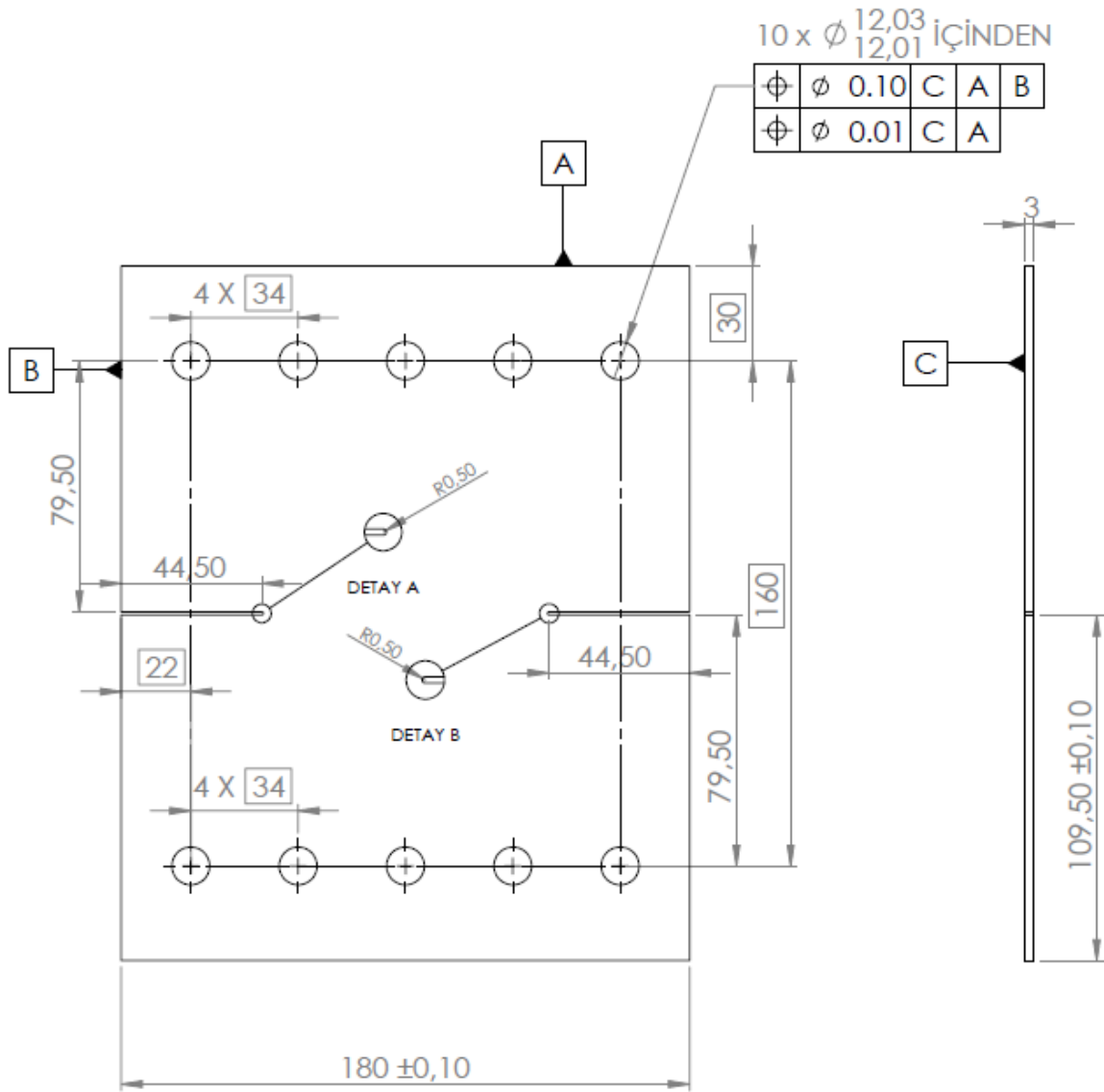
Şekil 24(a-d), deney başlangıcından plakanın tamamen yırtılmasına kadar farklı aşamalarda bir deney numunesini göstermektedir. Çatlak, plakayı tam ortadan ikiye bölecek şekilde ilerlemektedir. Bu durum yüklemenin tam mod I olduğuna, yani yüklemde mod II ve/veya mod III etkilerinin olmadığına ve düzeneğin başarıyla çalıştığına bir işarettir.

3.2.2 Çift Kenar Çentikli Plakalar için Deney Düzeneği

Çift kenar çentikli numunelere, Şekil 25'te gösterildiği gibi basit çekme yükü uygulandığında, numunelerdeki çatlak uçları mod I yüklemesine tabi olurlar (bkz. örneğin bkz. El-Naaman ve Nielsen, 2013; Pardoen vd., 2004). El-Naaman ve Nielsen (2013), proje kapsamında test edilenlerle aynı malzemeye (Al 1050 H14) sahip, 4 mm kalınlığında, Şekil 25'te kullanılan uzunluk parametreleri cinsinden, yüksekliği $L_0 = 90$ mm, çentik uzunluğu $a_0 = 15$ mm, genişliği



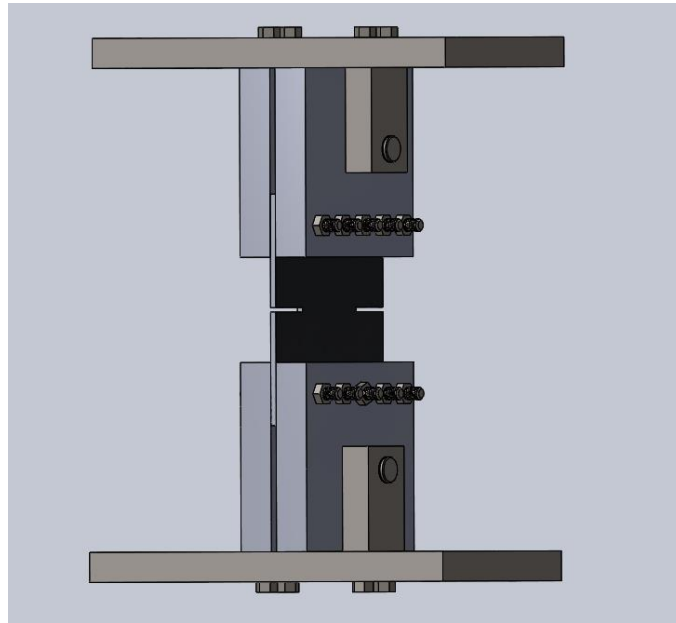
Şekil 25. Mod I yüklemesi altında çift kenar çentikli bir plakanın tabi olduğu yüklerin şematik gösterimi (bkz. El-Naaman ve Nielsen, 2013).



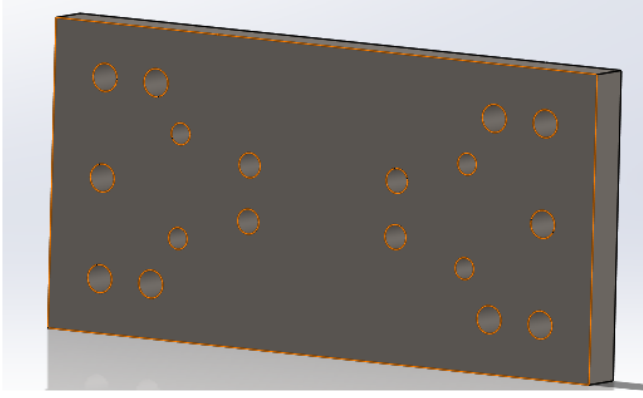
Şekil 26. Proje kapsamında test edilen çift kenar çentikli plakaların teknik çizimi.

$w = 60$ mm olan plakaları test etmişlerdir. Bu proje kapsamında ise, kalınlıkları $t \in \{0,5; 1; 3; 4; 5\}$ mm arasında değişen ve diğer uzunlukları $L_0 = 100$ mm, $a_0 = 45$ mm, $w = 180$ mm olan alüminyum 1050 H14 plakalar test edilmiştir. Proje kapsamında test edilen plakaların teknik çizimi Şekil 26'da verilmiştir. Proje kapsamında test edilen plaka boyutlarının, El-Naaman ve Nielsen (2013)'ün test ettiği plakalara nispeten daha büyük alınmasının sebebi, çatlak morfolojisinin sınır koşullarından bağımsız olmasını garanti etmektir.

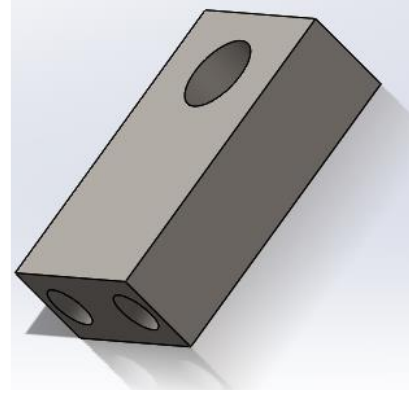
Proje kapsamında yapılan mod I plaka yırtılmasına ilişkin bütün deneylerde Instron 600 LX çekme cihazı kullanılmıştır. Çift kenar çentikli plakalara mod I yükü uygulamak için ilk akla gelen ve en kolay olan yöntem, plakayı direkt çekme cihazına bağlamaktır. Bu yöntem denenmiş, ancak yük hücresi kulplarının numuneleri hareketsiz tutamadığı, numunelerin test boyunca kulplardan yavaş yavaş kaydığı, bunun ise doğru bir yük-yer değiştirme eğrisi elde etmeyi imkânsız hale getirdiği gözlenmiştir. Dolayısıyla, çift kenar çentikli numuneler için Şekil 27'de gösterilen düzenek tasarlanmıştır. Şekil 28, tasarlanan düzeneğin parçalarını göstermektedir. Şekil 28(a-c)'de gösterilen, sırasıyla, bağlantı plakası, bağlantı direği ve pim olarak adlandırılan parçalar, tek kenar çentikli numuneler için tasarlanan düzenekte de kullanılan parçalardır (bkz. Şekil 14). Çift kenar çentikli plakalara özel, yeni tasarlanan parça, Şekil 28(d)'deki, "çatal" ismi verilen parçadır. Çekme yükü plakalara toplam 4 çatal aracılığıyla iletilmekte, bağlantı plakası, bağlantı direği ve pimler ise çataları Instron 600 LX cihazının yük hücrelerine bağlamaktadır (bkz. Şekil 27). Bağlantı direkleri arasındaki mesafe 81 mm, test



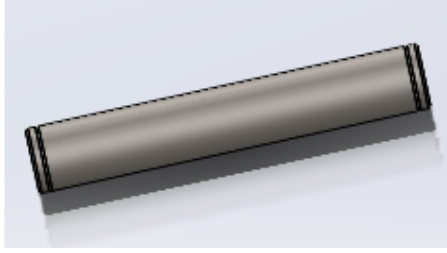
Şekil 27. Çift kenar çentikli plakalara mod I yükü uygulamak için proje kapsamında tasarlanan deney düzeneği.



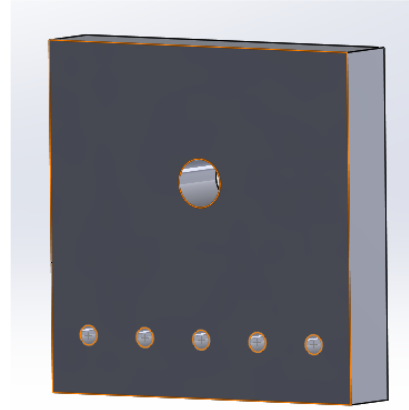
(a)



(b)



(c)

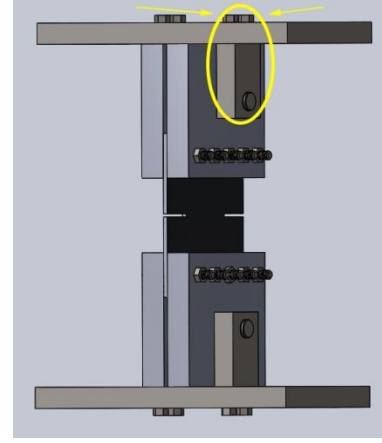
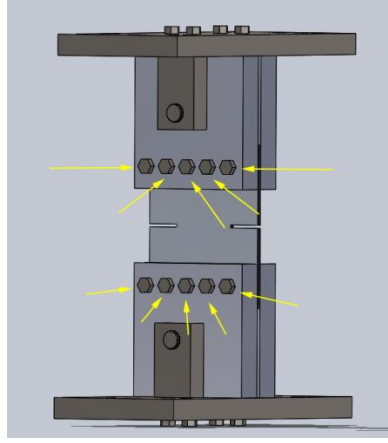
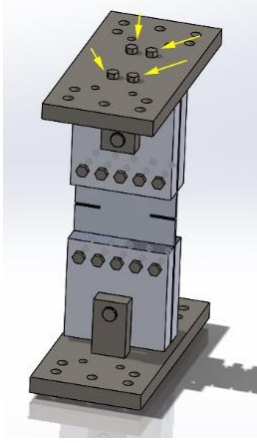


(d)

Şekil 28. Şekil 27’de gösterilen deney düzeneğinin parçaları: (a) bağlantı plakası, (b) bağlantı direği, (c) pim ve (d) çatal.

edilecek en yüksek numune kalınlığı ise 5 mm’dir. Çatal kalınlığı 35 mm olarak belirlenmiş ve böylelikle bu düzenekte test edilebilecek en kalın numune için geometrik sınır 10 mm’ye çekilmiştir. Düzeneğin tasarımında dikkate alınan bir diğer husus, çatalların yükleme esnasında yırtılmasını engelleyebilmek için, çatal üzerinde, pimin içinden geçtiği deliğin çatal kenarlarından yeterince uzak olmasıdır. Ayrıca, plakaların çekme kuvveti yanında eğilme momentine de tabi olmaması, yani tam anlamıyla basit çekme uygulanabilmesi için, çatalların çentik doğrultusundaki uzunlukları, plakaların çentik doğrultusundaki uzunluklarına eşit (180 mm) alınmıştır. Tüm bunlar ve üretim kolaylığı dikkate alınarak, çatalların 35×180×180 mm boyutlarında birer dikdörtgen prizma olmasına karar verilmiştir. Şekil 29, düzenekteki parçaların birbirlerine ve deney düzeneğine nasıl bağlandıklarını, Şekil 30 ise çatalların teknik resmini göstermektedir.

Çatal malzemesi olarak ilk akla gelen malzeme, mukavemeti yüksek, temin edilmesi kolay ve ucuz olduğu için AISI 1040 çeliği olmuştur. Çatalın teknik resminin çizildiği SolidWorks ticari

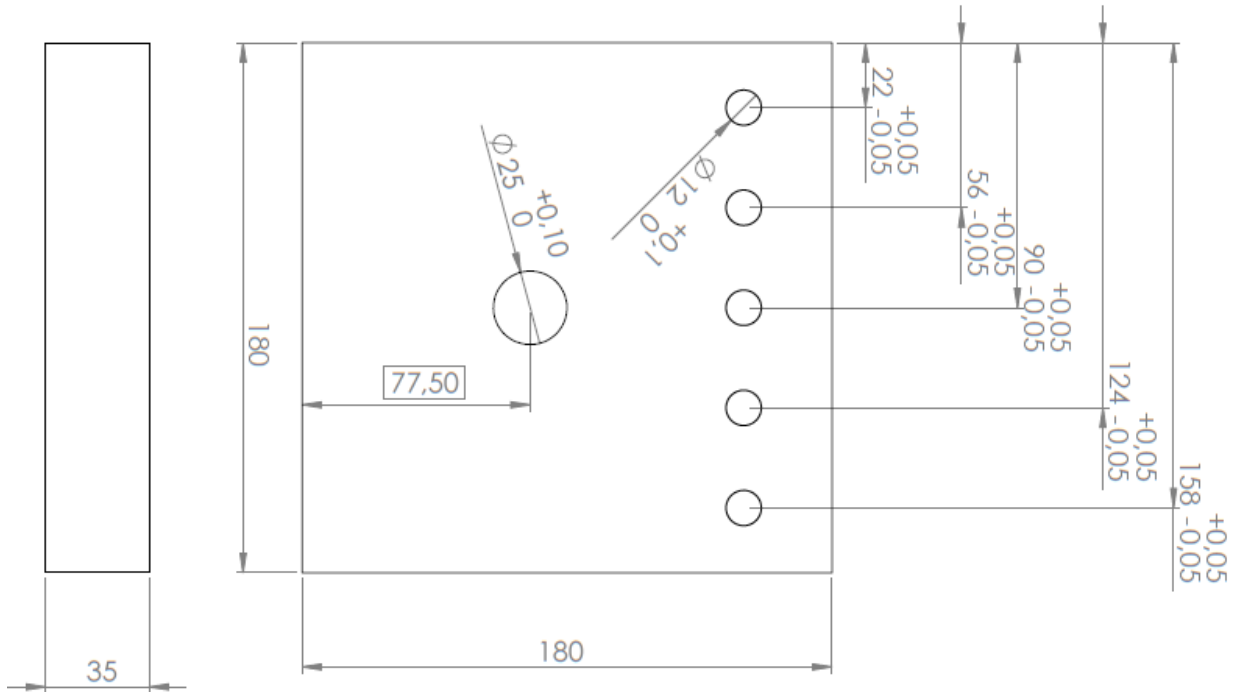


(a) 20 adet M16 × 50 mm

(b) 10 adet M10 × 70 mm

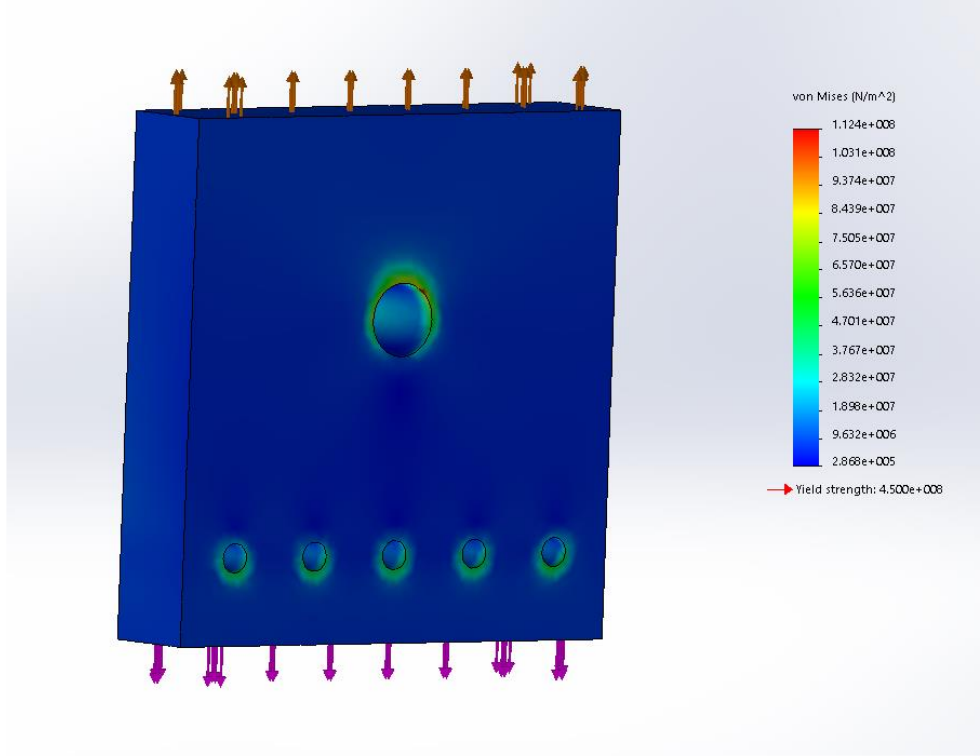
(c) 8 adet M16 × 70 mm

Şekil 29. (a) Bağlantı plakalarını çekme cihazına bağlamak için 20 adet M16 × 50 mm cıvata, (b) deney numunesini çatalara bağlamak için 10 adet M10 × 70 mm cıvata, (c) bağlantı plakalarını bağlantı direklerine bağlamak için ise 8 adet M16 × 70 mm cıvata kullanılmıştır. Ayrıca, deney numunelerini çatalların arasına sıkıştırmak için 10 adet M10 somun kullanılmıştır. Bütün cıvatalar 12.9 çeliktir.



Şekil 30. (a) Çift kenar çentikli plakalara mod I yükü uygulamak için proje kapsamında tasarlanan deney düzeneğindeki çatalların (bkz. Şekil 28(d)) teknik resmi.

yazılımı, basit sonlu elamanlar çalışmalarının yapılmasına imkân vermektedir. SolidWorks yazılımına tasarlanan ölçüler ve seçilen malzeme girilerek, tek bir çatala 100 kN çekme yükü uygulanmıştır. Çatalın deney esnasında tabi olacağı yüke (en fazla 40 kN civarı) kıyasla çok



Şekil 31. Boyutları Şekil 30’da gösterilen, AISI 1040 çeliğinden imal edilmiş bir çatala 100 kN çekme kuvveti uygulandığında oluşan Von Mises gerilme dağılımı.

daha yüksek olan bu yük altında, çataldaki Von Mises gerilme dağılımı, Şekil 30’da gösterilmiştir. Sonlu elemanlar hesaplamasında elde edilen en yüksek Von Mises gerilmesi yaklaşık 115 MPa civarındadır ki, bu değer AISI 1040 çeliğinin akma gerilmesinin (yaklaşık 415 MPa) çok altındadır. Bu sonuçlar, tasarlanan çatal için plastik akmaya karşı emniyet katsayısının 6 civarında olduğunu göstermektedir.

Şekil 32, üretilen düzeneğin çekme cihazına bağlanmış halini göstermektedir. Şekil 33(a-d) ise, deney başlangıcından plakanın tamamen yırtılmasına kadar farklı aşamalarda bir deney numunesini göstermektedir. Tıpkı tek çentikli numunelerde olduğu gibi, çatlak, plakayı tam ortadan ikiye bölecek şekilde ilerlemektedir ki, bu da yüklemenin tam mod I olduğuna ve düzeneğin başarıyla çalıştığına işaret etmektedir. Üretilen düzenele proje kapsamındaki tüm deneyler başarıyla gerçekleştirilmiştir.

3.2.3 Plaka Malzemesi ve Deney Numunelerinin Hazırlanması

Proje kapsamında test edilen tek ve çift kenar çatlaklı bütün plakalar, tecimsel arılıktaki (commercially pure) alüminyumdan (Al 1050 H14) üretilmiştir. Alüminyum 1050’nin kimyasal bileşiminde, ağırlık yüzdesi olarak, en az 99,5 Al ve en fazla 0,40 Fe; 0,25 Si; 0,07 Zn; 0,05 Cu; 0,05 Mn; 0,05 Mg ve 0,05 Ti bulunmaktadır. H14 ibaresi, plaka mukavemetinin, Al 1050 malzemeden üretilmiş bir plakanın sahip olabileceği en yüksek mukavemet değerinin yarısına,

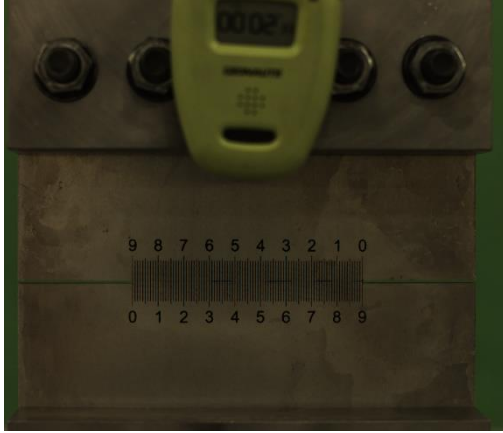


(a)



(b)

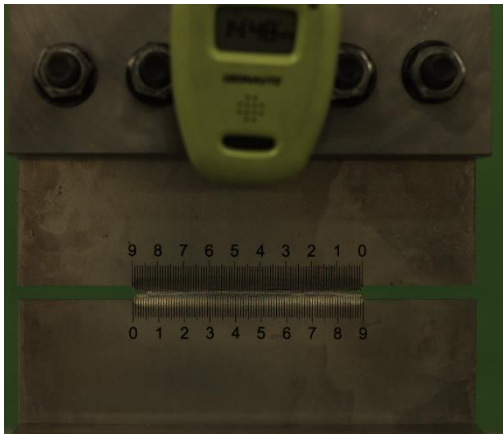
Şekil 32. Çift kenar çentikli plakalara mod I yükü uygulamak için tasarlanıp üretilen deney düzeneğinin: (a) yandan, (b) karşıdan görünümü.



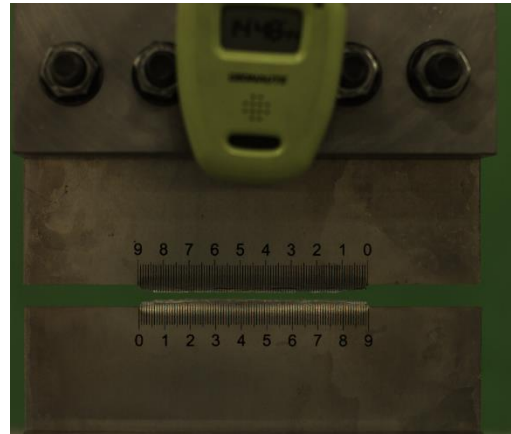
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 33. Mod I yüklemesi altında çift kenar çentikli plaka yırtılması deneyi süresince, (a) deney başlangıcından (d) plakanın tamamen ikiye ayrılmasına kadar, farklı aşamalarda çekilmiş fotoğraflar.

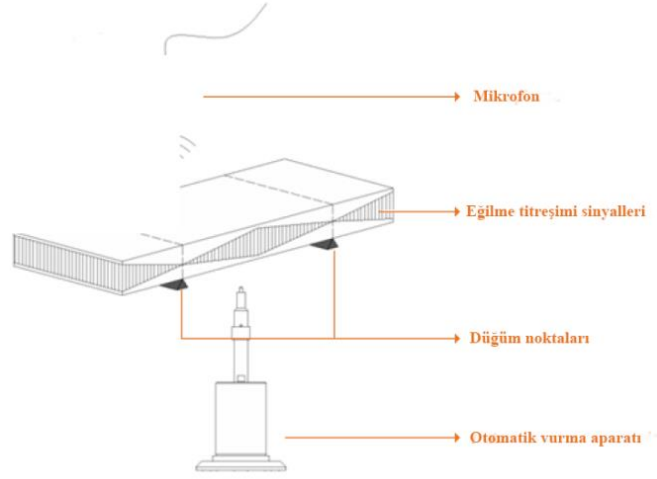
soğuk haddeleme sonrası hiçbir (ısı) işleme tabi olmadan yükseltildiği anlamına gelmektedir.

Metal plaka üreticisi firmalar, yalnızca belirli kalınlık aralıklarındaki plakaları üretmektedir. Örneğin, Türkiye'nin önde gelen alüminyum plaka üreticilerinden Assan Alüminyum firması, 4 mm kalınlığın üzerinde plaka üretmemektedir. Dolayısıyla, kalınlıkları $t \in \{0,5; 1; 3; 4\}$ mm olan plakalar Assan Alüminyum firmasından, 5 mm kalınlığındaki plaka ise Korumaz Kardeşler firmasından satın alınmıştır. 0,5; 1 ve 4 mm kalınlığındaki plakaların yüzey alanları 1×2 m², 3 ve 5 mm kalınlığındaki plakaların yüzey alanları ise $1,2 \times 2,4$ m²'dir. Satın alınan bütün plakaların sertifikaları raporun ekinde (EK-1) verilmiştir.

Satın alınan büyük plakalardan, deney numunesi olarak kullanılacak tek ve çift kenar çentikli küçük plakaları (bkz. sırasıyla Şekil 11 ve 26) üretmek için hizmet alımı yapılmıştır. Numunelerin kenar yüzey pürüzlülüğünün mod I testinde bir önemi yoktur. Dolayısıyla deney numuneleri büyük plakalardan lazerle kesilmiştir. Benzer şekilde, deneylerde direkt bir etkiye sahip olmayan cıvata delikleri lazerle delinmiştir. Ancak, çentik boyutu ve şekli gerilme yığılması büyüklüğünü belirler ve dolayısıyla çatlak oluşumu ve ilerlemesinde çok önemli bir etkiye sahiptir. Dolayısıyla çentikler, oldukça hassas bir üretim yöntemi olan tel erozyon yöntemi ile kestirilmiştir. Her bir tipte (tek veya çift kenar çentikli) ve kalınlıkta plaka için, çentik doğrultusunun haddeleme doğrultusuna dik olduğu en az 6, paralel olduğu en az 6 numune kesilmiş, nihai toplamda 74 tek, 72 çift kenar çentikli deney numunesi plaka üretilmiştir.

Kesim işlemlerinden tamamlandıktan sonra, dışarıdan hizmet alınarak numunelerin ön yüzlerine "ipek baskı" yöntemiyle, Şekil 24 ve 33'teki örneklerde gösterildiği gibi birer "cetvel" çizdirilmiştir. Bu cetvel, raporun bulgular bölümünde anlatıldığı gibi, numuneler üzerinde çatlağın ilerleme yolunu ve hızını tespit edebilmek için gereklidir. İpek baskı yöntemi hem ucuz (proje kapsamında test edilen bütün numuneler için toplam maliyet 354 TL'dir), hem de kaliteli bir yöntemdir. Normalde bu yöntemde, boyanın sürtünmeye karşı dayanıklı ve uzun süre kalıcı olması için, parçalar boyandıktan sonra ısı bir işleme tabi tutulmaktadır. Ancak numunelerin mekanik özelliklerinin etkilenmemesi için ısı işlem yaptırılmamıştır. Yapılan deneylerde numunelerin ön-arka yüzeyleri sürtünmeye tabi olmadığı için, çizilen cetveller bir zarar görmemiştir.

Deney numunelerinin elastik modülünün tespiti için Atılım Üniversitesi Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezi'nden hizmet alınmış, ölçümler, en hassas yöntem olan 'Rezonans Frekansı ve Sönümlenme Analizi' (Resonance Frequency and Damping Analysis, RFDA) yöntemi kullanılarak yapılmıştır. RFDA yönteminde numune iki destek arasına yerleştirilir. Numunenin üst kısmına mikrofon, alt kısmına ise vurma aparatı konur ve teste başlanır, bkz.



Şekil 34. 'Rezonans Frekansı ve Sönümlenme Analizi' yönteminde kullanılan düzenek ve yöntemin temel çalışma prensibi.

	0,5 mm	1 mm	3mm	4mm	5mm
Deney	Elastik Modül [GPa]	Elastik Modül [GPa]	Elastik Modül [GPa]	Elastik Modül [GPa]	Elastik Modül [GPa]
1	65,87	66,07	69,08	70,19	69,8
2	65,85	66,07	69,09	70,2	69,81
3	65,95	66,04	69,1	70,21	69,81
4	65,92	66,04	69,11	70,21	69,82
5	66,11	66,04	69,12	70,22	69,82
6	66,11	66,04	69,13	70,24	69,82
7	66,08	66,02	69,13	70,24	69,82
8	66,25	66	69,13	70,25	69,83
9	66,13	66	69,14	70,26	69,83
10	65,91	65,99	69,14	70,26	69,83
Ortalama	66,018	66,031	69,117	70,228	69,819
St. Sapma	0.127734	0.026627	0.020025	0.024	0.009434

Tablo 4. Proje kapsamında test edilen farklı kalınlıktaki plakaların elastik modülleri.

Şekil 34. Numune üzerinde vurma aparatının oluşturduğu titreşimler, mikrofon aracılığıyla RFDA cihazına aktararak ölçüm gerçekleştirilir. RFDA yöntemi, karmaşık bir numune şekli gerektirmemekte, dikdörtgen şeklinde numunelerle gerçekleştirilmektedir. Her bir kalınlıktaki numune için 10 farklı deney yapılmış, elde edilen sonuçlar Tablo 4'de verilmiştir.

Plakaların plastik bölgedeki mekanik özelliklerinin tespiti için ise çekme testi yapılmıştır. Her bir kalınlıktaki plaka için, 5 tanesi haddelenme doğrultusuna dik, 5 tanesi paralel toplam 10 numune test edilmiştir. Köpek kemiği şeklindeki numuneler, ISO 6892-1:2016 (Metallic materials–Tensile testing–Part 1: Method of test at room temperature) standardına göre boyutlandırılmış ve büyük plakalardan tel erozyon yöntemi ile kesilmiştir. Tablo 5, her bir kalınlık için ortalama sonuçları göstermektedir. Numunelerin pekleşme davranımı, ISO 10275:2007 (Metallic materials – Sheet and strip – Determination of tensile strain hardening exponent) standardı kullanılarak hem Hollomon hem de Ludwick pekleşme yasalarına göre belirlenmiştir. Hollomon pekleşme yasası $\sigma = K \varepsilon^N$, Ludwick pekleşme yasası ise $\sigma = \sigma_0 + K \varepsilon^N$ olarak ifade edilir. Her iki pekleşme yasasında da σ gerçek gerilime, ε gerçek gerinime, N ise pekleşme üsteline karşılık gelir ve K bir katsayıdır. Ludwick pekleşme yasasında σ_0 akma gerilmesi ifade etmektedir. Denklem (1)'de verilen pekleşme yasası, Hollomon yasasının özel bir halidir ve denklem (1)'deki σ_0 değeri Tablo 5'te Hollomon parametreleri arasında gösterilmiştir.

Her bir kalınlık için 8 numune ODTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği malzeme laboratuvarında hiçbir ücret ödenmeden test edilmiş, 2 numune ise Atılım Üniversitesi Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezi'nden hizmet alınarak test ettirilmiştir. Her iki merkezde

Plaka	Akma Gerilmesi (MPa)	Çekme Gerilmesi (MPa)	Hollomon			Ludwick		
			Pekleşme Katsayısı ' N '	K (MPa)	σ_0 (MPa)	Pekleşme Katsayısı ' N '	K (MPa)	
0,5 mm	0°	106,71	112,35	0,03583	131,83	104,64	0,58186	91,76
	90°	112,89	118,16	0,03394	138,56	111,57	0,62180	109,10
1 mm	0°	112,12	117,73	0,03446	137,24	110,09	0,59406	103,39
	90°	118,87	125,25	0,04274	152,79	116,52	0,59330	150,00
3 mm	0°	124,80	131,65	0,05888	175,03	120,41	0,56890	173,21
	90°	141,16	145,19	0,03386	171,87	139,29	0,61128	144,03
4 mm	0°	109,49	118,36	0,03888	140,33	109,13	0,54068	90,77
	90°	120,81	124,55	0,03252	146,18	118,78	0,65634	147,08
5 mm	0°	117,72	120,84	0,03206	141,00	114,81	0,61918	115,62
	90°	122,89	127,52	0,04226	157,29	120,20	0,60780	165,31

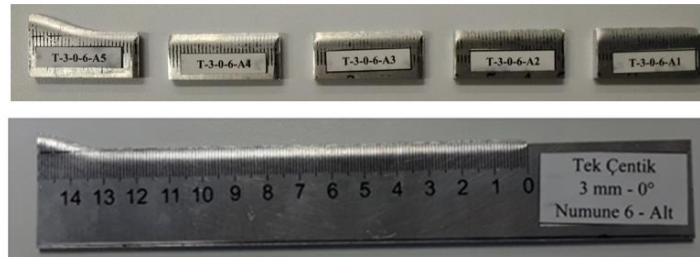
Tablo 5. Proje kapsamında test edilen farklı kalınlıktaki plakaların çekme testi sonuçları.

de gerinim ölçümü için optik ekstensometre kullanılmıştır. Testlerin iki farklı yerde yapılmasının sebebi, sonuçların kullanılan düzenden bağımsız olup olmadığının kontrol edilmek istenmesidir. Çekme testi numunelerinin teknik çizimi ve bütün çekme testi sonuçları raporun ekinde (EK-2) verilmiştir. EK-2’de görüleceği üzere, farklı laboratuvarlarda yapılan testlerin sonuçları uyumludur.

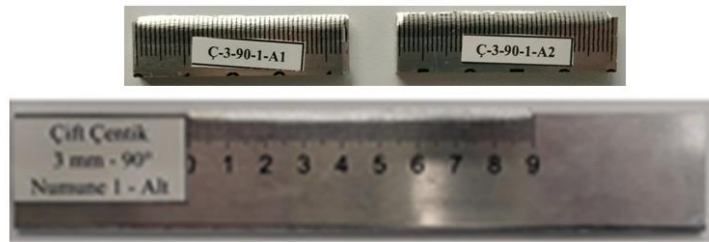
3.2.4 Çatlak Morfolojisinin Belirlenmesi

Plakalar mod I yüklemesine tabi tutulup çatlaklar oluşturulduktan sonra, çatlak morfolojisi belirleme çalışmaları yapılmıştır. Öncelikle, çatlak morfolojisi hakkında genel bir fikir edinmek için TOBB ETÜ malzeme laboratuvarında optik mikroskop (Nikon Eclipse LV150N ve Nikon TU Plan Fluor 100×) analizleri gerçekleştirilmiştir. Büyütme oranları $0,5 \times 10^4$ ile 5×10^4 arasında değişen mercekle kullanıldığı optik mikroskop analizlerinde, her bir kalınlık ve haddeleme doğrultusu için çatlak morfoloji açısından en temsili örnekler seçilmiş, ayrıntılı morfoloji analizleri, seçilen bu örnekler taramalı elektron mikroskobu (TEM, FEI XL-40, 20 kV) altında incelenerek yapılmıştır. TEM analizleri için ODTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü’nden 30 saatlik hizmet alımı yapılmış, hem proje yürütücüsü ve hem de yurt içi danışmanı (Dr. Hatice Duran) bütün TEM çalışmalarına bilfiil katılmıştır.

Şekil 35(a) ve (b), sırasıyla tek ve çift kenar çentikli plakalar için optik mikroskop ve TEM numunelerini göstermektedir. Optik mikroskop numuneleri, test edilen plakalardan giyotinle kesilmiştir. Yükseklikleri yaklaşık 10 mm olan, genişlikleri ise 30 ile 50 mm arasında değişen TEM numuneleri ise, TEM cihazında düz durabilmeleri için tel erozyon yöntemiyle kesilmiştir.



(a)



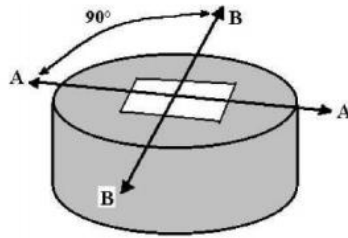
(b)

Şekil 35. (a) Tek kenar, (b) çift kenar çentikli bir plaka için optik mikroskop ve TEM numuneleri.

3.2.5 İkinci Faz Parçacıklarının Büyüklük Dağılımlarının Belirlenmesi

Yukarıda belirtildiği üzere, plaka malzemesi olan Alüminyum 1050'nin kimyasal bileşiminde, ağırlık yüzdesi olarak, en az 99,5 Al ve en fazla 0,40 Fe; 0,25 Si; 0,07 Zn; 0,05 Cu; 0,05 Mn; 0,05 Mg ve 0,05 Ti bulunmaktadır. İkinci faz parçacıkların büyüklük/uzaysal dağılımlarının çatlak ilerlemesine etkilerini araştırmak amacı ile öncelikle spektroskopi analizleri yapılmış, farklı fazların ağırlık yüzdeleri tespit edilmiştir. Spektroskopi analiz sonuçları (bkz. EK-3), hem yukarıda belirtilen değerlerle, hem de plakaların satın alındığı firmaların sağladığı sertifika değerleriyle (bkz. EK-1) uyumludur. Ardından, $t \in \{3, 4, 5\}$ mm kalınlıklarındaki plakalar için, ağırlık yüzdesi en yüksek olan Fe parçacıklarının büyüklükleri optik mikroskop ve TEM analizleri yapılarak belirlenmiştir. Ham metalin yüzeyinde soğuk haddelemeye bağlı tek doğrultuda haddeleme çizgileri ve yüksek yüzey pürüzlülüğü gözle görülebilecek kadar fazladır. Oysaki bir malzemenin mikro-yapısının mikroskopla incelenebilmesi için son derece düzgün bir yüzeye ihtiyaç vardır. Dolayısıyla, yüzeydeki deforme olmuş tabakayı uzaklaştırmak ve ikinci faz parçacıklarını görüntüleyebilmek amacıyla aşağıdaki yüzey hazırlama işlemleri verilen sırayla uygulanmıştır:

- **Kalıplama:** 1 cm × 1 cm boyutunda kesilen numune kalıplama cihazının haznesine yerleştirilip, bakalit tozu numune üzerine dökülmüştür. Hazneye yerleştirilen numune ve bakalit tozu yaklaşık 300°C sıcaklık ve 30 MPa basınçta 3 dakika bekletildikten sonra 2 dakika soğutulup dışarı alınmıştır.
- **Zımparalama:** Zımparalama işlemi; 1 inç² başına 46 µm çapında 320 tane parçacık içeren kalın zımparandan–320 (46 µm)–başlanıp, sırasıyla, 400 (35 µm), 800 (22 µm), 1000 (18 µm) ve 1200 (15 µm) ince zımparaya doğru yapılmıştır. Numunenin ısınmasını engellemek ve numuneden kopan parçacıkları (numune yüzeyini çizmeden) uzaklaştırmak için zımparalama işlemi boyunca su kullanılmıştır. Farklı bir zımparaya geçildiğinde, numune, Şekil 36'da gösterildiği gibi, dış yüzeylerinden merkeze doğru 90° döndürülmüştür. Her bir kalınlıktaki zımparalama işlemine, bir önceki zımparalama aşamasında oluşan çizikler yok edilinceye kadar devam edilmiştir.



Şekil 36. Önerilen zımparalama doğrultuları: AA ilk, BB bir sonraki zımparalama doğrultusu.

- **Parlatma (Polishing):** Parlatma işleminde numune, üzerine özel parlatma kumaşı giydirilmiş döner bir diske bastırılmıştır. Aşındırıcı olarak elmas solüsyonu kullanılan parlatma işlemi, ikisi kaba, biri ince parlatma olmak üzere üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Kaba parlatma işleminde aşındırıcı boyutları sırasıyla 9 ve 6 μm , ince parlatma işleminde ise 3 μm 'dir. Her parlatma işlemi için aşındırıcı boyutlarıyla uyumlu farklı bir parlatma kumaşı kullanılmıştır. Parlatma işlemi, numuneler ayna parlaklığına yaklaşıncaya kadar tekrarlanmıştır (numune, ayna parlaklığına aşağıda açıklanan aktif oksit parlatma işleminde ulaşmaktadır). Parlatmanın yeterli olup olmadığını belirlemek için numuneler, optik mikroskop altında, 100 \times büyütmede incelenmiştir. Mikroskop altında yüzeyinde çizik görülmeyen numuneler için bir sonraki aşamaya geçilmiştir.
- **Aktif Oksit Parlatma (Active Oxide Polishing, OPS):** Bu işleme başlamadan önce parlatma sırasında yüzeyde kalan elmas solüsyonunu temizlemek için numuneler saf suyla yıkanmıştır. OPS işleminde koloidal silika solüsyonu kullanılmış, solüsyon, yaklaşık 10–15 dakika boyunca birkaç dakika aralıklarla parlatma çuhasının üzerine dökülmüştür. Numune yüzeyinde çizik kalmayıp, yüzey ayna parlaklığına ulaştığında OPS işlemi sonlandırılmıştır.
- **Yıkama ve Kurulama:** Bütün işlemler tamamlandıktan sonra numuneler 5 dakika boyunca saf su ile ultrasonik banyoda yıkanmıştır. Böylece zımparalama ve parlatma işlemleri sırasında numune yüzeyinde oluşan parçacıklar uzaklaştırılıp, numune yüzeyi temizlenmiştir. Ultrasonik banyo sırasında numune yüzeyinde oluşan nem, bir saç kurutma makinesiyle yüzeye sıcak hava verilerek kısa sürede uzaklaştırılmıştır.

Yüzey işlemlerinden geçen numunelerden 5 mm kalınlıktaki plakaya ait olanlar, TEM altında incelenmiş ve Fe parçacıklarının elemental analizi yapılmıştır. TEM çalışmaları esnasında parçacıkları topolojik boşluklardan ayırt etmek için, TEM cihazının enerji dağılımlı X-ışını analizi (EDX) fonksiyonu kullanılmıştır. 5 mm kalınlıktaki plaka için alınan TEM görüntülerindeki parçacıkların Fe parçacığı olduğu tespit edildikten sonra, $t \in \{3, 4, 5\}$ mm kalınlıklarındaki her bir plaka için hazırlanan numunelerin farklı bölgelerinden 100 \times mercekle optik mikroskop kullanılarak en az üç görüntü alınmıştır. Alınan optik mikroskop görüntüleri, ImageJ yazılımı kullanılarak analiz edilmiş, her bir plaka kalınlığı için parçacıkların büyüklük dağılımları belirlenmiştir (bkz. ImageJ yazılımının internet sitesi, 2018).

4. BULGULAR

4.1 Nümerik Çalışmalar

Sünek metal plakalarda çatlak ilerlemesini sümüle etmek için öncelikle “boşluk çekirdeklenmesiz” olarak adlandırılan model geliştirilmiştir. Bu modelin yetersizlikleri tespit edildikten sonra “boşluk çekirdeklenmeli” olarak adlandırılan ikinci bir model daha geliştirilmiştir. Her iki model için de elde edilen bulgular aşağıda sunulmuştur.

4.1.1 Boşluk Çekirdeklenmesiz Sonlu Elemanlar Modeli

Mod I yüklemesi altında plaka yırtılması probleminin açık sonlu elemanlar metoduyla gerçek zaman aralığında çözümü, hesaplama zamanı bakımından çok maliyetlidir. Dolayısıyla, parametrik çalışmaya başlamadan önce yakınsaklık çalışmaları yapılmış, hem dinamik etkilerin ihmal edilebilir düzeyde kalacağı kadar uzun, hem de çözümde kullanılacak toplam adım sayısını makul düzeyde tutmaya imkân verecek kadar kısa zaman aralıkları tespit edilmiştir. Nümerik çalışmalar kapsamında kullanılacak plaka malzeme/geometri özelliklerinin GTN parametreleri dışında kalanları bölüm 3.1’de verilmiştir. Boşluk çekirdeklenmesiz sonlu elemanlar modeli için geriye kalan parametreler: plakanın temsili boşluklar dışında kalan bütün bölgelerindeki başlangıç boşluk oylum oranı, f_0^b ; boşluk birleşmesi başlangıç değeri, f_{kr} ; mikro çatlak oluşumu öncesi müsaade edilen en yüksek boşluk oylum oranı, f_{MEY} ; kırılma oluşum bölgesindeki temsili boşluk sayısı, S_b ; temsili boşluk yarıçapı, R_b ; temsili boşluk merkezindeki başlangıç boşluk oylum oranı, f_0^M ve denklem (5)’de verilen σ parametresidir. σ , temsili bir boşlukta başlangıç boşluk oylum oranının dağılımını belirleyen fonksiyonun standart sapmasını ifade etmektedir. Bu parametrelerden S_b ve R_b parametrik çalışmanın konusu olup, bunlar için birçok farklı değer kullanılacaktır. f_0^b , ikincil bir parçacık ailesini hesaba katmak ve çatlak ilerlemesini mümkün kılmak için kullanılan bir değerdir ve $f_0^b \ll 1$ değildir; bu çalışmada $f_0^b = 10^{-4}$ seçilmiştir. Yapılan bütün hesaplamalarda $f_0^M = f_{MEY}$, $\sigma = R_b/4$ alınmıştır. Dolayısıyla, seçilen bir malzeme türü için (bu çalışmada Al 1050) yakınsaklık çalışmaları esnasında en uygun değerlerinin saptanması gereken parametreler f_{kr} ve f_{MEY} ’dir. Altı çizilmesi gereken bir husus, proje kapsamında yapılan nümerik çalışmaların amacı, deneysel çalışmaları kantitatif olarak birebir simüle etmekten ziyade, temel eğilimleri tespit etmektir. Buna rağmen, nümerik çalışmalarda kullanılan parametre değerlerinin mümkün mertebe gerçeğe yakın olması hedeflenmiş, bu amaçla bir literatür taraması yapılmıştır. Yapılan literatür araştırmasında Al 1050 için GTN parametrelerini veren bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bazı farklı alüminyum alaşımları için GTN parametrelerini veren çalışmalar ise Tablo 6’da sunulmuştur. Tablo 6’daki değerler birebir kullanılmamış olsa bile, fikir vermesi açısından değerlidir.

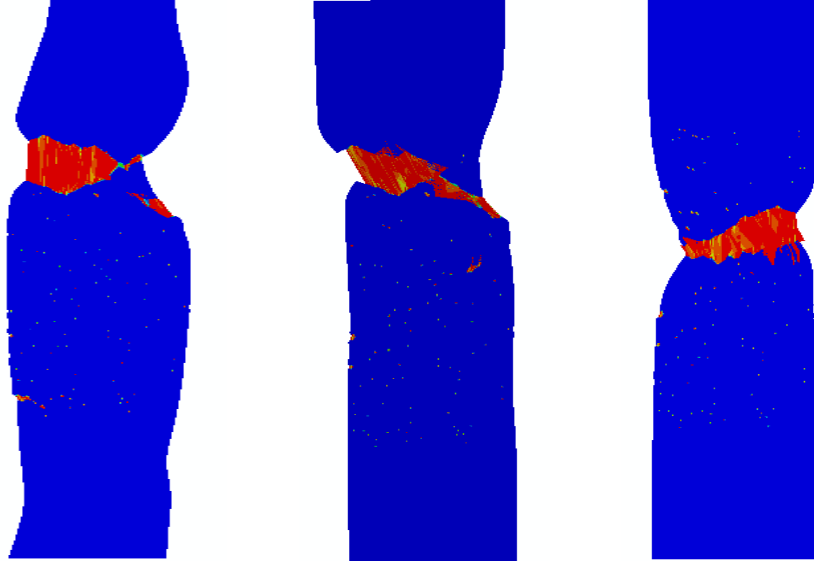
Kaynak	Malzeme	Sıcaklık °C	f_0^T	$f_{\text{çk}}$	f_{kr}	f_{MEY}
Besson vd. (2011)	Al 2000	25	0,0012	0,1	0,018	-
Moud vd. (2012)	Al 7075-T651	25	0,0085	0,04	0,01	0,2
Zhou (2013)	Al 2024-T351	25	0,005	0,0008	0,1	0,25
Yu vd. (2014)	Al 6061-T4	25	0,000125	0,0008	0,013	-
Kami vd. (2014)	Al 6016-T4	25	0,0001	0,001	0,005	0,06
			0,00055	0,0255	0,0275	0,13
			0,001	0,05	0,05	0,2
Liang vd. (2016)	Al 7075-T6	200	0,002	0,0217	0,0274	0,064
		300	0,002	0,024	0,03	0,11
		400	0,0022	0,025	0,301	0,12

Tablo 6. Farklı alüminyum alaşımları için literatürden derlenen GTN parametreleri değerleri.

Yakınsaklık çalışmaları gerçekleştirilen ilk plaka grubu için $f_{kr} = 0,25$, $m f_{MEY} = 0,66$, $S_b = 100$, $R_b = 3L_{el}$ (L_{el} , kırılma oluşum bölgesindeki kare şeklindeki elemanların kenar uzunluğudur; bkz. Şekil 8) ve plaka malzemesinin pekleşme üsteli $N = 0,1$ (bkz. denklem (1)) değerleri kullanılmıştır. Şekil 37(a-c), farklı hızlarda çekmeye tabi tutulan plakaların kırılma oluşum bölgelerindeki boşluk oylum oranı dağılımlarını göstermektedir. Plaka üzerindeki kırmızı bölge, yük taşıma kapasitesini tamamen kaybetmiş, çatlakların ilerlediği yol üzerinde bulunan elemanlara karşılık gelmektedir ve bu bölgedeki elemanlarda boşluk oylum oranı $f = f_{MEY} = 0,66$ değerine ulaşmıştır. Şekil 37(d) ise, bütün malzeme/geometri/mikro-yapı özellikleri aynı olan bu üç plaka için, toplam kinetik enerjinin toplam iç enerjiye oranının (K.E/I.E), zaman artırımını adım sayısına göre değişimini göstermektedir. En yüksek hızla çekilen ilk plaka, bkz. Şekil 37(a), diğer iki plakaya göre oldukça farklı deforme olmakta ve bu plaka için K.E/I.E tüm zaman aralığı boyunca yüksek kalmaktadır. Bu plaka için çekme hızının çok yüksek olduğu ve uygulanan yüklemenin sanki-statik olmadığı aşikârdır. Şekil 37(b) ve (c)'deki plakaların her ikisi için de K.E/I.E oranı yüklemenin neredeyse başlangıcında sifıra düşmekte ve tüm yüklenme boyunca çok küçük bir değerde kalmaktadır. Yalnızca kinetik enerji düzeyi dikkate alınacak olsa, bu iki yüklemenin de sanki-statik olduğu düşünülebilirdi. Ancak Şekil 37(b) ve (c)'de açıkça görüleceği üzere, yüklenme hızındaki farklılık, çatlak morfolojisinde de farklılığa yol açmış, yani henüz sanki-statik yüklenme hızına ulaşılammıştır. Zira eğer Şekil 37(b) için uygulanan yüklenme hızı sanki-statik yüklenme hızına tekabül etseydi, bu hızın daha da düşürülmesinin sonuçlar üzerine bir etkisi olmayacak, yani Şekil 37(b) ve (c)'deki çatlak morfolojileri aynı olacaktı. Özet olarak belirtmek gerekirse, Şekil 37, sanki-statik yüklenme hızı-

Boşluk oylum oranı

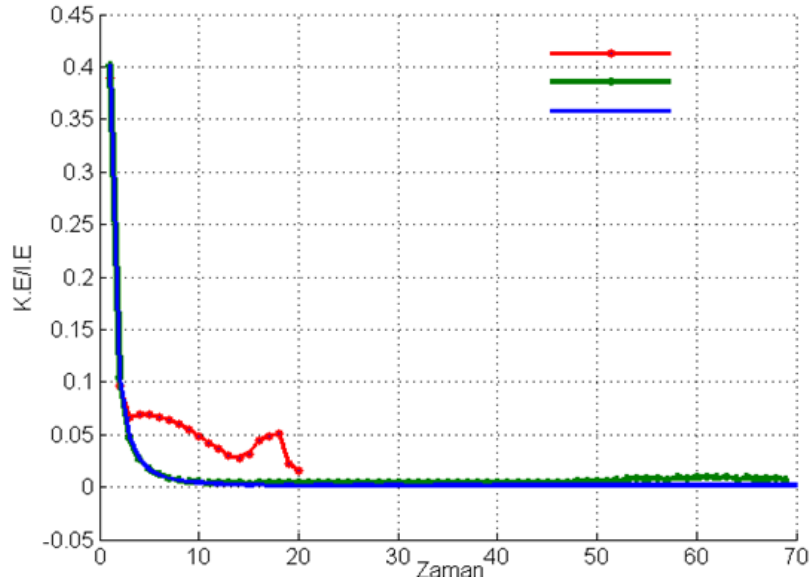
0.660
0.605
0.550
0.495
0.440
0.385
0.330
0.275
0.220
0.165
0.110
0.055
0.000



(a)

(b)

(c)



(d)

Şekil 37. Farklı hızlarda çekmeye tabi tutulan plakaların kırılma oluşum bölgelerindeki boşluk oylum oranı (plakanın deforme olmuş konfigürosyonunda) dağılımı. Hesaplama için toplam zaman aralığı: (a) $\Delta t = 0,025$ s, (b) $\Delta t = 0,125$ s, (c) $\Delta t = 0,200$ s. (d) Şekil (a-c)'de gösterilen plakalar için, toplam kinetik enerjinin toplam iç enerjiye oranının (K.E/I.E) adım sayısına göre değişimi.

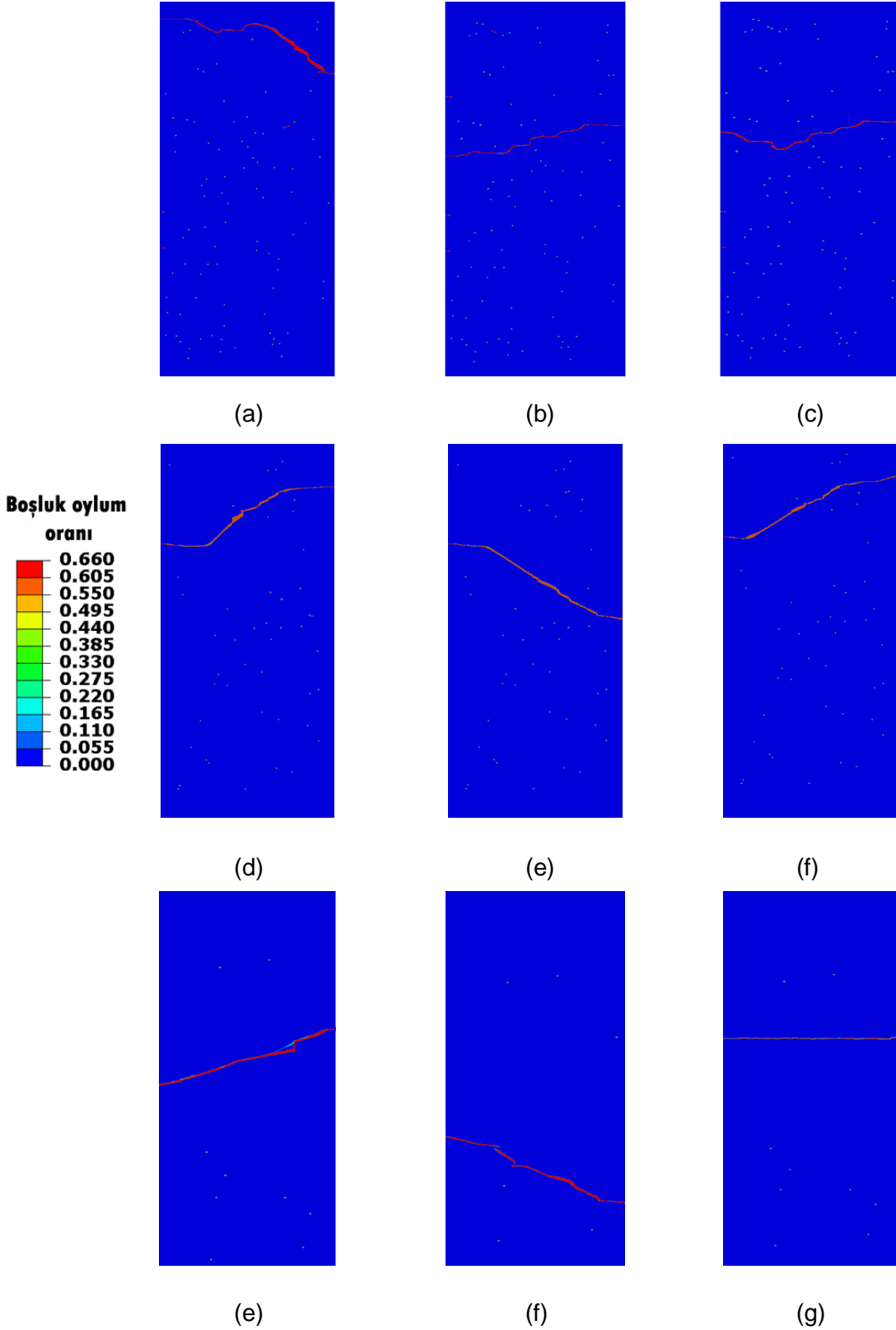
nı bulmak için yapılması gereken yakınsaklık çalışmalarında asıl önemli parametrenin çatlak morfolojisi olduğunu ortaya koymuştur. Bu bilgi doğrultusunda, raporun bundan sonraki bölümlerinde gösterilen yakınsaklık çalışmalarında yükleme hızı kademe kademe azaltılmış, daha fazla azaltmanın çatlak morfolojisine etkisi olmadığı gözlenen yükleme hızı, sanki-statik

yükleme hızı olarak kabul edilmiştir. Bu şekilde seçilen sanki-statik yüklenme hızları için K.E/I.E oranının %5-10 aralığında kaldığı gözlenmiştir.

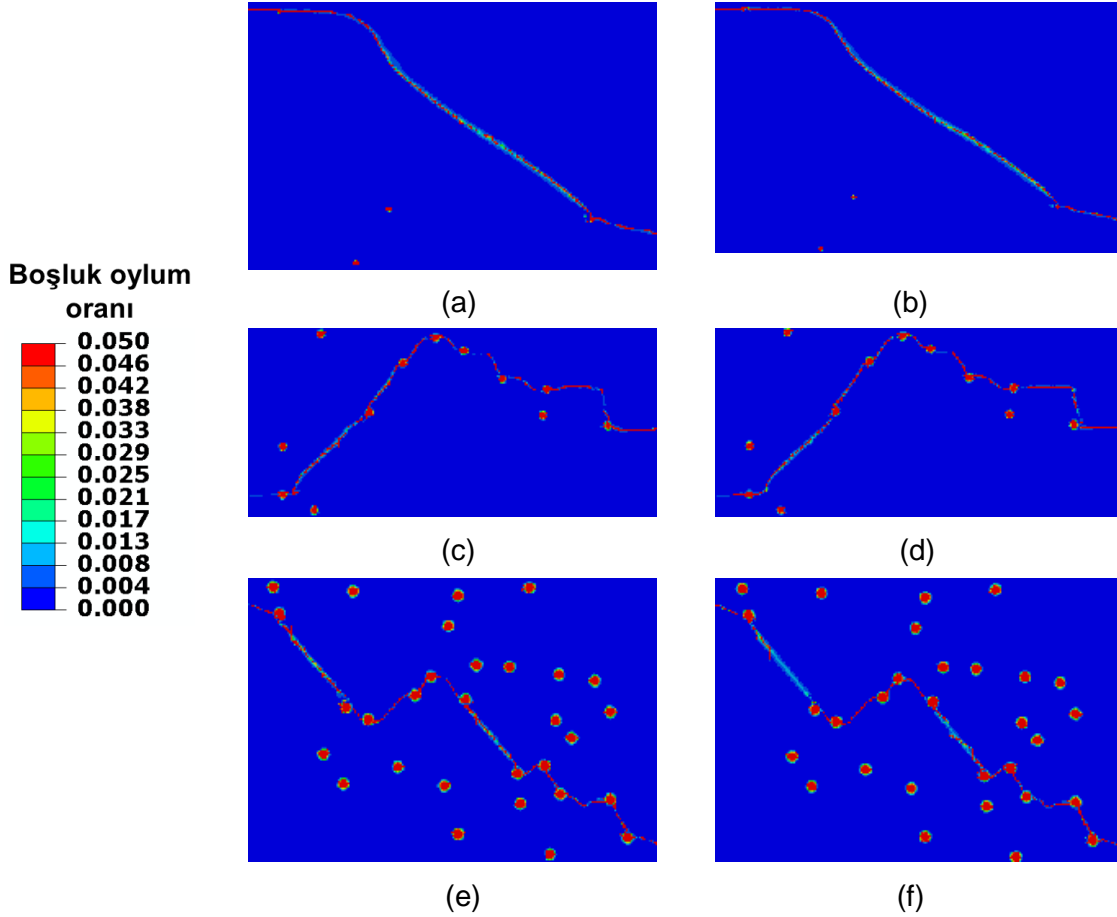
Şekil 38, $f_0^b = 10^{-4}$; $f_{kr} = 0,25$; $f_{MEY} = 0,66$; $S_b \in \{10, 25, 50, 75, 100\}$; $R_b = 3L_{el}$ ve $N = 0,1$ değerlerine sahip plakalar için yapılmış yakınsaklık çalışmalarından örnek sonuçlar göstermektedir. Şekil 38'de gösterilen plakalardaki boşluk sayısı: (a, b, c) için $S_b = 100$; (d, e, f) için $S_b = 50$; (g, h, i) için ise $S_b = 10$ 'dur. Hesaplama için toplam zaman aralığı ise: (a, d, g) için $\Delta t = 0,125$ s; (b, e, h) için $\Delta t = 0,200$ s ve (b, e, h) için $\Delta t = 0,400$ s'dir. $\Delta t = 0,200$ s için yapılan hesaplamalar, kullanılan en güçlü iş istasyonunda (Intel Xeon E5-1650v2 3.50 GHz işlemcili, 16 Gb RAM'e sahip, HP Z420 iş istasyonu) yaklaşık 24 saat (gerçek zaman) sürmesine rağmen, çalışma sonuçları henüz yakınsak bir sonuca işaret etmemekte, zira çatlak morfolojisi, $\Delta t = 0,400$ s için değişmektedir. Hesaplama zaman aralığını (Δt) daha da arttırmak (yani yüklenme hızını daha da azaltmak), hesaplama başına düşen gerçek zamanı da artırır ki bu tercih edilen bir durum değildir. Yakınsak bir çözüm elde etmek için tek çare, f_{kr} ve f_{MEY} değerlerini değiştirmektir. Tablo 6'daki değerlere kıyasla görece yüksek $f_{kr} = 0,25$, $f_{MEY} = 0,66$ değerleri için çatlak oluşum ve ilerlemesi gecikmekte, kırılma oluşum bölgesinde boşluk oylum oranı artmakta ve yırtılma enerjisi bakımından eş değerde birçok farklı çatlak yolu oluşmaktadır. Bu durum ise sanki-statik bir çözümü zor hale getirmektedir. Elde edilen sonuç, çatlak ilerlemesi fiziğiyle uyumludur: **boşluk oylum oranı yüksek, çatlak ilerlemesinin kolay olduğu plakalarda yüklenme hızı çatlak morfolojisini belirleyen en temel faktördür.**

İlk plaka grubu için yapılan yakınsaklık çalışmaları ışığında, birçok farklı f_{kr} ve f_{MEY} değerleri incelenmiştir. Geniş kapsamlı bir parametrik çalışma sonucunda, Tablo 6'da sunulan değerler için alt sınır kabul edilebilecek $f_{kr} = 0,01$ ve $f_{MEY} = 0,05$ değerlerinin kullanılmasına karar verilmiştir. Şekil 39, $f_0^b = 10^{-4}$; $f_{kr} = 0,01$; $f_{MEY} = 0,05$; $S_b \in \{10, 25, 50, 75, 100\}$; $R_b/L_{el} \in \{3, 6, 9\}$ ve $N = 0,1$ değerleri kullanılarak yapılmış yakınsaklık çalışmalarından örnek sonuçlar göstermektedir. Şekil 39'da görüleceği üzere, $\Delta t = 0,5$ s hesaplama zaman aralığı, test edilen bütün plakalar için sanki-statik çözüme imkân veren en düşük zaman aralığı olarak tespit edilmiştir.

Yakınsaklık çalışmalarında elde edilen bilgiler ışığında, boşluk çekirdeklenmesiz model kullanılarak yapılan parametrik çalışmada $f_0^b = 10^{-4}$; $f_{kr} = 0,01$; $f_{MEY} = 0,05$ ve $\Delta t = 0,5$ s değerleri kullanılmıştır. Parametrik çalışma kapsamında, diğer mekanik/geometrik özellikleri yukarıda verilen ve $S_b \in \{10, 25, 50, 75, 100\}$; $R_b/L_{el} \in \{3, 6, 9\}$; $N \in \{0,05; 0,10; 0,15\}$ olan plakalar analiz edilmiştir. Her bir S_b-R_b-N kombinasyonu için hesaplama yapılmış, toplam 45



Şekil 38. $f_0^b = 10^{-4}$; $f_{kr} = 0,25$; $f_{MEY} = 0,66$; $R_b = 3L_{el}$ ve $N = 0,1$ olan plakalar için yakınsaklık testleri. Plakalardaki temsili boşluk sayısı: (a, b, c) için $S_b = 100$, (d, e, f) için $S_b = 50$, (g, h, i) için $S_b = 10$. Hesaplama için toplam zaman aralığı: (a, d, g) için $\Delta t = 0,125$ s; (b, e, h) için $\Delta t = 0,200$ s; (b, e, h) için $\Delta t = 0,400$ s.



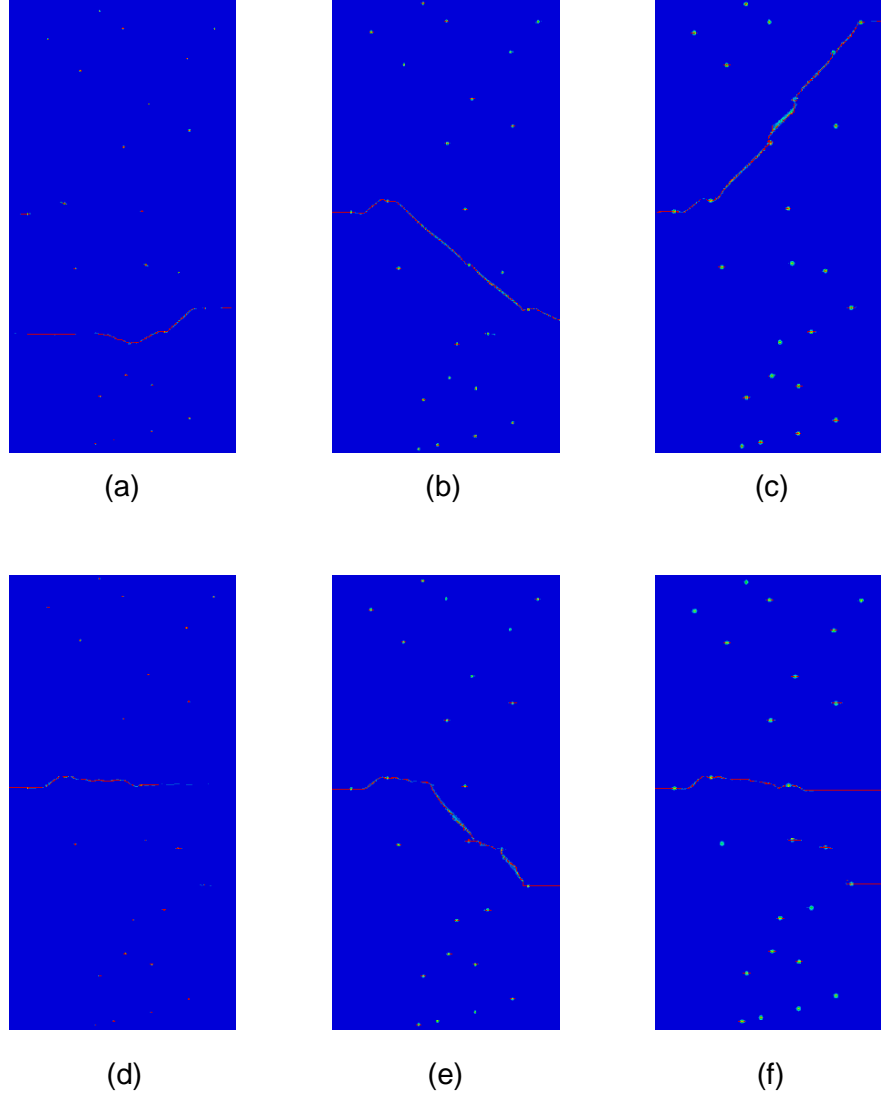
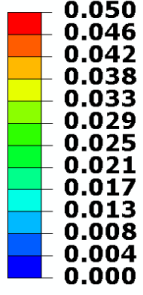
Şekil 39. $f_0^b = 10^{-4}$; $f_{kr} = 0,01$; $f_{MEY} = 0,05$; $R_b = 3L_{el}$ ve $N = 0,1$ olan plakalar için yakınsaklık testleri. Plakalardaki temsili boşluk sayısı ve yarıçapı: (a, b) için $S_b = 10$, $R_b = 3 L_{el}$; (c, d) için $S_b = 50$, $R_b = 6 L_{el}$; (e, f) için $S_b = 75$, $R_b = 9 L_{el}$. Hesaplama için toplam zaman aralığı: (a, c, e) için $\Delta t = 0,5$ s; (b, d, f) için $\Delta t = 1,0$ s.

plaka incelenmiştir. Parametrik çalışma kapsamında yapılan bütün hesaplamalar için çatlak morfolojileri raporun ekinde (EK-4) verilmiştir. Şekil 40, parametrik çalışmanın sonuçlarını özetlemektedir. Şekil 40(a-f)'de gösterilen bütün plakalar için boşluk sayısı ($S_b = 25$) ve boşluk merkezi koordinatları aynıdır; yalnızca R_b/L_{el} ve N değerleri farklıdır. Plakaların yalnızca kırılma oluşum bölgelerinin görüldüğü Şekil 40'ta, çatlak morfolojileri plakanın deforme olmamış konfigürasyonunda gösterilmiştir.

Şekil 40'takiler dâhil, EK-4'te verilen bütün çatlak morfolojileri incelendiğinde, boşluk sayısı/dağılımı ve boşluk boyutunun çatlak morfolojisini etkilediği açıktır. Ayrıca, deney sonuçlarıyla uyumlu bir şekilde, düşük pekleşme kapasitesi ($N = 0,05$) için daha ziyade eğik veya bardak-kapaklı çatlak gözlenirken, pekleşme kapasitesi arttıkça çatlak morfolojisi bardak-bardaksı çatlak tipine doğru evrilmektedir.

Boşluk çekirdeklenmesiz model kullanılarak yapılan çalışmalar, 25-27 Ekim 2017 tarihleri ara-

Boşluk oylum
oranı



Şekil 40. Boşluk çekirdeklenmesiz model kullanılarak yapılan parametrik çalışma sonucuna örnekler: $f_0^b = 10^{-4}$, $f_{kr} = 0,01$ ve $f_{MEY} = 0,05$ olan plakalar için çatlak morfolojileri. Bütün plakalar için $S_b = 25$; (a, d) için $R_b = 3 L_{el}$; (b, e) için $R_b = 6 L_{el}$, (c, f) için $R_b = 9 L_{el}$; (a, b, c) için $N = 0,05$, (d, e, f) için $N = 0,15$ 'dir.

sında Danimarka'da düzenlenen "30th Nordic Seminar on Computational Mechanics (NSCM30)" konferansında sözlü olarak sunulmuştur. İlgili konferans makalesi rapora eklenmiştir (bkz. EK-5).

4.1.2 Boşluk Çekirdeklenmeli Sonlu Elemanlar Modeli

Boşluk çekirdeklenmesiz modelle yapılan parametrik çalışma sonuçları genel eğilimler açısından deney sonuçlarıyla uyumludur. Boşluk çekirdeklenmesiz model, bir plakanın pekleşme kapasitesini yalnızca plaka malzemesinin pekleşme üstelinin belirlemediğini, yükleme öncesi boşluk oylum oranının pekleşme kapasitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu açıkça ortaya koymuştur. Ancak, EK-4'teki sonuçlar dikkatle incelendiğinde, bu modelde çatlak ilerlemesinin daha ziyade eğik veya bardak-kapaklı olduğu, bardak-bardaklı ilerlemenin genelde görece yüksek pekleşme katsayısına sahip plakalarda görüldüğü anlaşılmaktadır. Boşluk çekirdeklenmesiz modelde, plakadaki temsili boşluk sayısı ve yarıçapının en küçük olduğu durumlarda ($S_b = 10$, $R_b = 3L_{el}$) bile boşluk oylum oranı yükleme başlangıcından itibaren görece yüksektir. Bunun sonucu olarak plaka malzemesinin pekleşme üsteli (N) büyük bir değer olsa bile, çatlak ilerlemesi hızlı gerçekleşmekte ve bu da eğik ve bardak-kapaklı morfolojilerin baskın morfolojiler olmasına sebebiyet vermektedir.

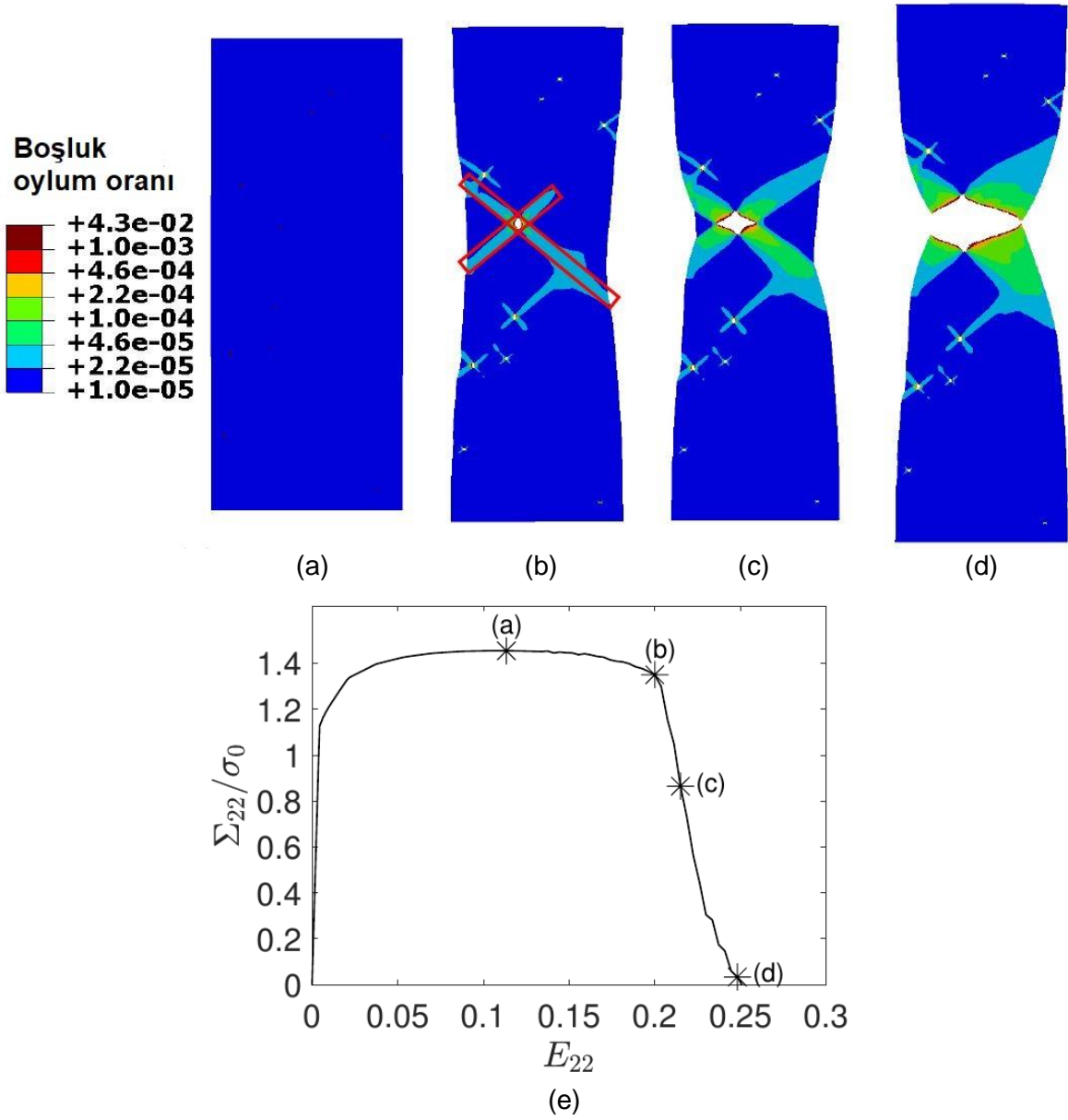
Boşluk çekirdeklenmesiz sonlu elemanlar modelinin yukarıda bahsedilen yetersizlikleri göz önüne alınarak, boşluk çekirdeklenmeli model geliştirilmiştir. Bölüm 3.1.2'de açıklanan bu modelin ilk modelden temel farkı, yükleme başlangıcında plakanın tamamında boşluk oylum oranının sıfır olmasıdır. Ayrıca, plakanın elastik yük boşalması bölgelerinde (Şekil 6 ve 7'deki gri bölgeler) parçacık/boşluk olmadığı ve bu bölgelerde tüm yükleme boyunca boşluk oylum oranının sıfır kaldığı varsayılmıştır. Kırılma oluşum bölgesinde ise boşluk çekirdeklenmesi hesaba katılmıştır; boşluk oylum oranı yüklemeyle beraber artmakta, temsili boşluk sayısı ve yarıçapı plakanın pekleşme kapasitesini direkt olarak etkilemektedir.

Boşluk çekirdeklenmeli model kapsamında yapılan bütün çalışmalarda plaka matrisinin pekleşme üsteli olarak ortalama bir değer olan $N = 0,1$ değeri alınmıştır. Numerik çalışmalar kapsamında kullanılan plaka malzeme/geometri özelliklerinin GTN parametreleri dışında kalanları bölüm 3.1'de verilmişti. Bu model için, boşluk çekirdeklenmesi, büyümesi ve birleşmesine ilişkin ($f_{çk}$, $\varepsilon_{çk}$, $s_{çk}$, f_{kr} ve f_{MEY}) parametreler; ilki temsili hacim bölgeleri, ikincisi bu bölgeler arasında kalan matris için olmak üzere, iki farklı set olarak tanımlanmıştır. Bu parametrelerin tanımlanması için geniş kapsamlı bir yakınsaklık çalışması yapılmış, hem farklı çatlak morfolojilerinin ayırt edilmesine hem de (gerçek) hesaplama zamanının tek bir çalışma için 24 saatten az olmasına müsaade edecek değerler seçilmiştir. Her iki set için de $\varepsilon_{çk} = 10^{-2}$, $s_{çk} = (1/3) \times 10^{-2}$, $f_{kr} = 10^{-2}$, $f_{MEY} = 5 \times 10^{-2}$ alınmıştır. Çekirdeklenmeden kaynaklı toplam boşluk oylum oranı ise, temsili boşluklar için $f_{çk}^b = 5 \times 10^{-3}$, temsili boşlukların çevresini saran matris malzemesi için $f_{çk}^m = 10^{-5}$ olarak alınmıştır. GTN parametrelerinin çatlak morfolojilerine etkileri raporun sonuç ve tartışma bölümünde tartışılmıştır. Bütün hesaplamalarda, boşluk

çekirdeklenmeli model için yapılan yakınsaklık çalışmalarında sanki-statik çözüme imkân veren en düşük zaman aralığı olarak tespit edilen $\Delta t = 0,2$ s değeri kullanılmıştır.

Hatırlatmak gerekir ki, proje kapsamında gerçekleştirilen nümerik çalışmaların temel amacı, boşluk çekirdeklenmesi kaynağı gibi davranan ikinci faz parçacıklarının uzaysal ve boyutsal dağılımlarının, mod I yüklemesi altında plaka yırtılmasında gelişen çatlak morfolojine etkilerini araştırmaktır. Bu amaçla uyumlu olarak, boşluk çekirdeklenmeli model kullanılarak yapılan parametrik çalışmada, plakaların malzeme/geometri özelliklerinden temsili boşluk sayısı S_b ve yarıçapı $R_b = k L_{el}$ dışında kalanlar bütün plakalar aynı için kabul edilmiş, $S_b \in \{10, 25, 50, 75, 100\}$ ve $k \in \{3, 6, 9, 15, 18\}$ setlerindeki bütün S_b-k kombinasyonları analiz edilmiştir. Her bir S_b-k kombinasyonu için, temsili boşluk bölgelerinin uzaysal dağılımlarının farklı olduğu üç farklı plaka oluşturulup, toplamda 75 farklı plaka incelenmiştir. Parametrik çalışmada analiz edilen bütün plakalar için çatlak morfolojileri raporun ekinde (EK-6) verilmiştir. Çatlak morfolojileri, EK-6a'da plakanın deforme olmamış konfigürasyonunda, EK-6b'de ise deforme olmuş konfigürasyonunda gösterilmiştir. Aşağıda, parametrik çalışma sonuçları özetlenmiştir. Öncelikle, temsili boşluk sayısı ve büyüklüğü açısından iki uç durum incelenmiştir: i-) en az sayıda ve en küçük temsili boşluklara sahip plaka, $S_b = 10$, $k = 3$, (bkz. Şekil 41), ii-) en fazla sayıda ve en büyük temsili boşluklara sahip plaka, $S_b = 100$, $k = 18$, (bkz. Şekil 43). Sırasıyla, P1 ve P4 olarak adlandırılan bu iki plaka için çatlak ilerleme mekanizmaları ve çatlak morfolojileri birbirinden tamamıyla farklıdır. Şekil 45-48, değişen temsili boşluk sayı ve büyüklüğüne göre çatlak morfolojisinde gözlenen değişimi göstermektedir.

Şekil 41(a-d), $S_b = 10$, $k = 3$ olan plaka P1 için farklı deformasyon aşamalarında kırılma oluşum bölgesindeki boşluk oylum oranı dağılımını, Şekil 41 (e), ise bu plaka için mühendislik gerilimi-mühendislik gerinimi eğrisini göstermektedir. Mühendislik gerilimi, plakanın üst (veya alt) yüzeyine dik etkiyen kuvvetlerin toplamını, yükleme öncesi yüzey alanına bölerek, $\Sigma_{22} = \Sigma_{i=1}^n (F_2^i/k_0)$, elde edilmiştir. Mühendislik gerinimi ise, plakanın yüksekliğindeki değişimi yükleme öncesi yüksekliğine bölerek hesaplanmıştır, $E_{22} = \Delta Y/Y_0$. Şekil 41(e)'de, gerilme-gerinim eğrisi üzerindeki yıldız (*) işaretleri, Şekil 41(a-d)'de gösterilen deformasyon aşamalarına karşılık gelmektedir. Boşluk çekirdeklenmesi, plastik deformasyonun başlamasıyla beraber, kırılma oluşum bölgesinin her malzeme noktasında aynı anda başlamaktadır. Temsili boşluk bölgelerinde boşluk oylum oranı hızla yükselip, daha plastik deformasyonun ilk adımında, temsili boşluklar arası matristekine kıyasla iki büyüklük kertesine daha yüksek değerlere ulaşmaktadır. Plakaya uygulanan yük artıp en yüksek değere ulaştığında, kırılma oluşum bölgesi incelemeye başlamaktadır (bkz. Şekil 41(a)). Yükleme devam ettikçe kırılma oluşum bölgesi incelemeye devam etmekte, temsili boşluk bölgelerindeki



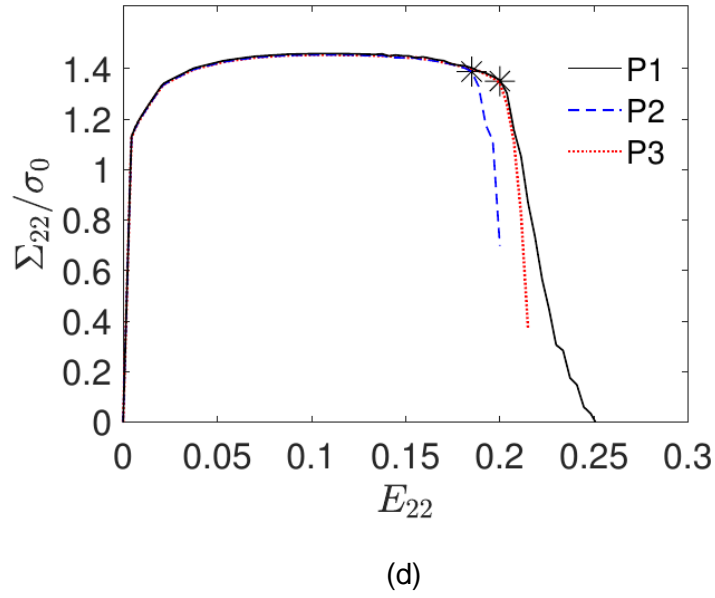
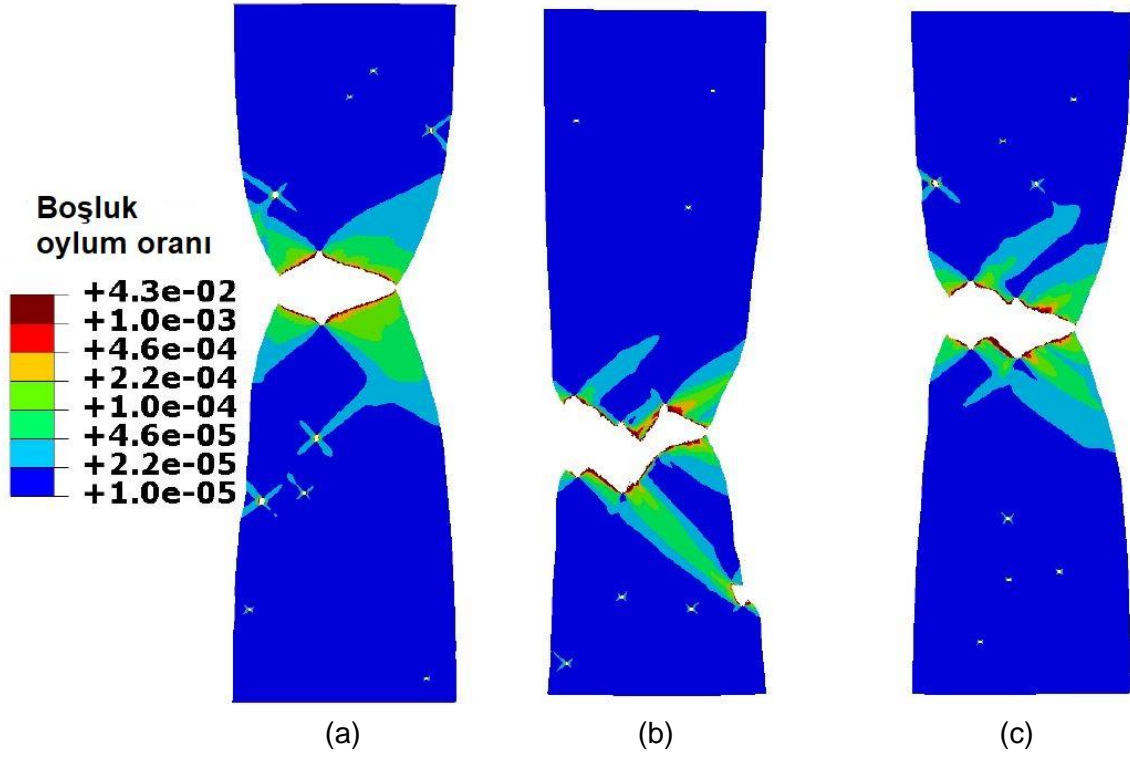
Şekil 41. Temsili boşluk bölgesi sayısı $S_b = 10$, büyüklük parametresi $k = 3$ olan plaka (P1) için farklı deformasyon aşamalarında kırılma oluşum bölgesindeki boşluk oylum oranı dağılımı: (a) kırılma oluşum bölgesinde incelme başladığı anda, (b) makroskobik deformasyon yoğunlaşması başladığı anda, (c) makroskobik deformasyon yoğunlaşması başlangıcı ile nihai yırtılma arasındaki bir anda ve (d) nihai yırtılma anında. (e) Mod I yüklemesi boyunca plakadaki normalize mühendislik geriliminin (Σ_{22}/σ_0) mühendislik gerilimine (E_{22}) bağlı olarak değişimi.

boşluk oylum oranı artmakta ve bu bölgelerin içindeki elemanlar boşluk birleşmesi sonucu yük taşıma kapasitelerini tamamıyla kaybedip çökmektedir. Yüklemin ilerleyen bir aşamasında, kırılma oluşum bölgesinde geniş bir alana yayılı olan incelme bir anda kesilmekte ve deformasyon bir temsili boşluktan yayılan (Şekil 41(b)'de, iki kırmızı dikdörtgenin içindeki) iki kesme kuşağında yoğunlaşmaktadır. Kesme kuşakları yükleme doğrultusuyla yaklaşık $\pm 45^\circ$

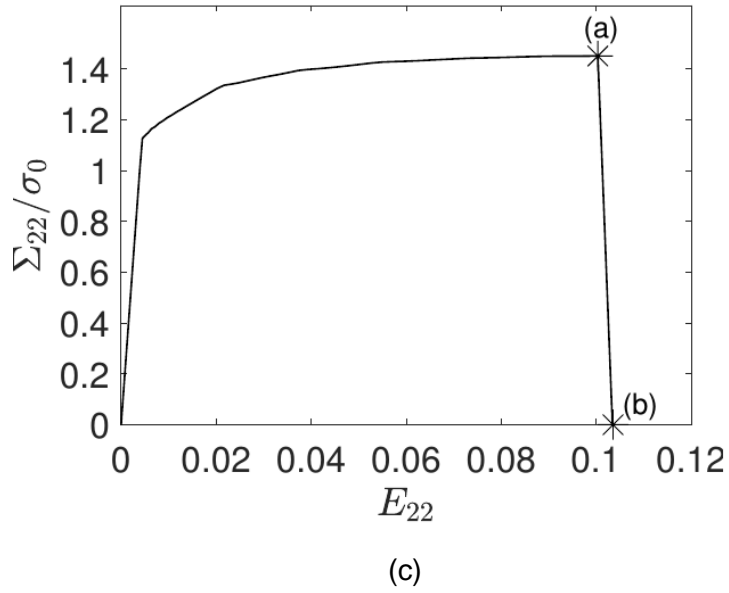
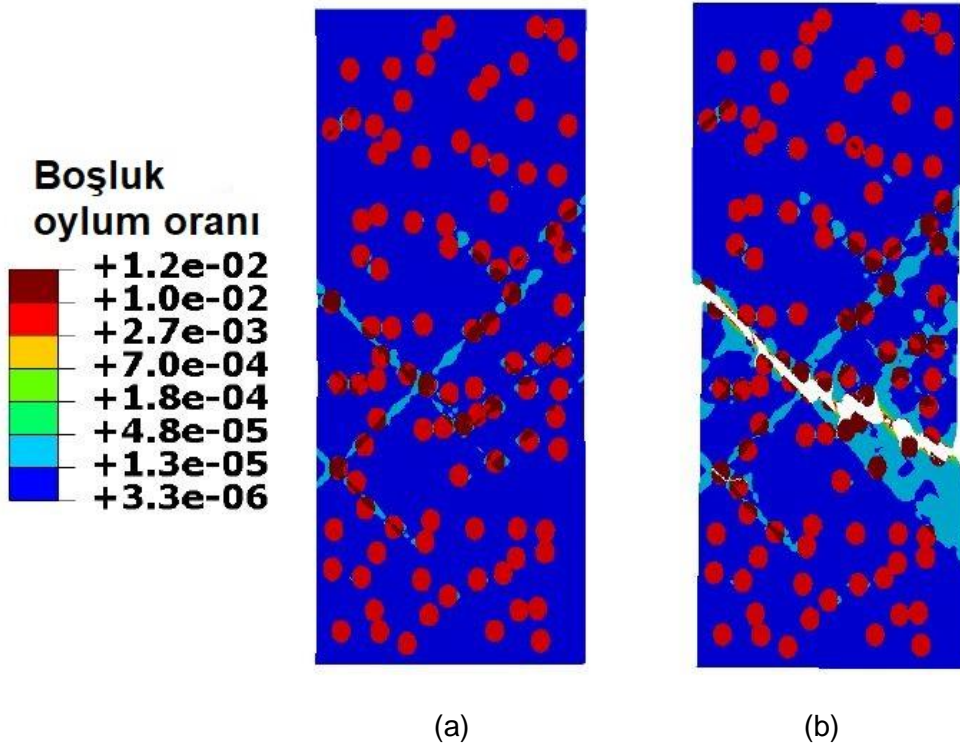
yapan doğrultularda uzanmaktadır. Şekil 41(b-d)'de görüleceği üzere, çöken elemanlar sonlu elemanlar ağından kaldırıldıktan sonra temsili boşluk bölgeleri ağıdaki birer delik olarak gözükmemektedir. Şekil 41(b)–(d) karşılaştırıldığında görülecektir ki, deformasyonun kesme kuşaklarında yoğunlaşmasının ardından, yalnızca bu iki kesme kuşağının doğduğu temsili boşluk büyümekte, diğer temsili boşluklar (neredeyse) aynı büyüklükte kalmaktadır. Zira kesme kuşaklarının dışında kalan bölgelerde elastik yük boşalması gerçekleşmektedir. Plakanın, çatlağın alt ve üst kısmında kalan parçaları çatlak oluşumu sonrası birbirlerine oturmamakta, çatlak, Şekil 2(c)'de gösterildiği gibi bariz bir şekilde bardak-bardaksı ilerlemektedir.

Şekil 42, plaka P1'e ek olarak, diğer bütün özellikleri P1 ile aynı, yalnızca temsili boşluk bölgelerinin uzaysal dağılımları farklı olan iki plaka daha göstermektedir (Şekil 42(b) plaka P2, 42(c) plaka P3). P2 ve P3 için gözlenen deformasyon ve kırılma süreçleri P1'deki süreçlerle aynıdır: her üç plakanın da kırılma oluşum bölgesinde yoğun bir incelleme vardır ve çatlak morfolojisi bardak-bardaksıdır. Bu üç plaka arasındaki temel fark, P2 ve P3'te çatlağın birden fazla temsili boşluk bölgesi üzerinden ilerlemiş olmasıdır. Buna rağmen, her üç plakanın gerilme–gerinim eğrileri, Şekil 42(d)'de yıldız (*) işaretiyle gösterilen lokalize deformasyon başlangıç noktalarına kadar, neredeyse tamamen üst üste oturmaktadır. Ayrıca, P1 ve P3 için lokalize deformasyon başlangıcı aynı noktaya karşılık gelmektedir. Kırılma gerinimi açısından, P2, diğer iki plakanın biraz gerisinde kalmaktadır. Bu küçük farklılıklara rağmen, Şekil 42, $S_b = 10 - k = 3$ kombinasyonu için çatlak ilerleme mekanizmasının temsili boşlukların uzaysal dağılımından pek etkilenmediğini, çatlak morfolojisinin bardak-bardaksı olduğunu göstermektedir.

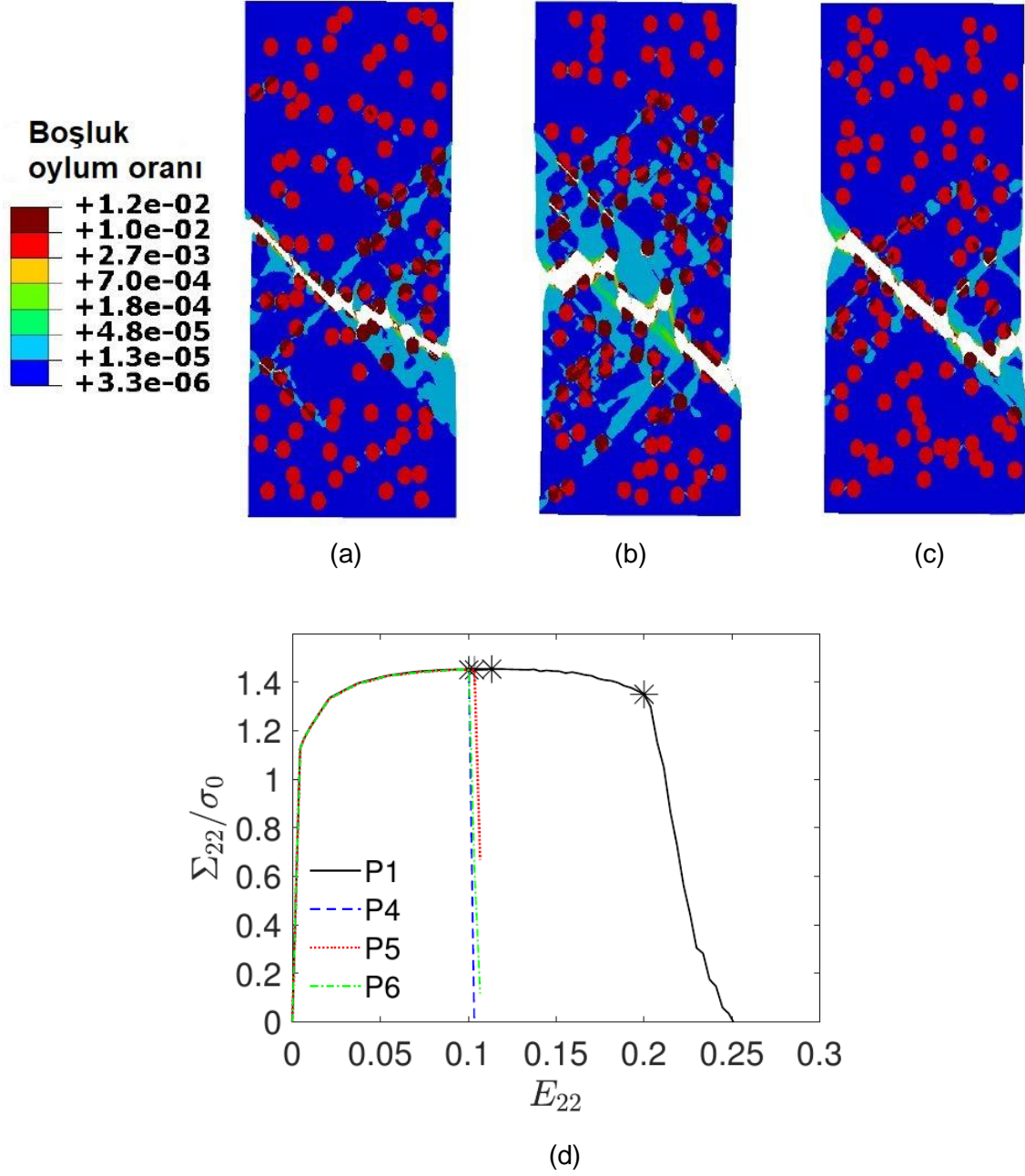
En fazla sayıda ve en büyük temsili boşluklara sahip plaka ($S_b = 100$, $k = 18$) için elde edilen sonuçlar Şekil 43'de sunulmuştur. Çalışma kapsamında incelenen bütün plakalarda olduğu gibi bu plaka için de boşluk çekirdeklenmesi plastik deformasyonla birlikte başlamıştır. Ancak, Şekil 41–42'de gösterilen, en az sayıda ve en küçük temsili boşluklara sahip plakalardan ($S_b = 100$, $k = 18$) farklı olarak, bu plakada deformasyon, kırılma oluşum bölgesinde incelleme başladığı anda, plakanın bir ucundan diğerine uzanan ve birçok temsili boşluk üzerinden geçen makroskobik kesme kuşaklarında yoğunlaşmaktadır (bkz. Şekil 43(a)). Şekil 43(b)'de görüleceği üzere, çatlak, en düşük kırılma enerjisine sahip kesme kuşakları üzerinden eğik bir morfolojiye sahip olarak ilerlemektedir. Şekil 44, diğer bütün özellikler ($S_b = 100$, $k = 18$ dâhil) sabit tutulurken yalnızca temsili boşluk bölgelerinin uzaysal dağılımını değiştirmenin çatlak morfolojisini değiştirmedeğini göstermektedir. Şekil 44(a-c)'de gösterilen üç plakanın çatlak morfolojilerinin aynı olmasının yanı sıra, gerilme–gerinim eğrileri de (neredeyse) üst üste oturmaktadır (bkz. Şekil 44(d)). Bu üç plakanın gerilme–gerinim eğrileri, Şekil 41'de verilen



Şekil 42. Temsili boşluk bölgesi sayısı $S_b = 10$, büyüklük parametresi $k = 3$ olan üç farklı plaka için nihai yırtılma anında kırılma oluşum bölgesindeki boşluk oylum oranı dağılımı: (a) plaka P1, (b) plaka P2 ve (c) plaka P3. Bu üç plaka için, mod I yüklemesi boyunca normalize mühendislik geriliminin (Σ_{22}/σ_0) mühendislik gerinimine (E_{22}) bağlı olarak değişimi.



Şekil 43. Temsili boşluk bölgesi sayısı $S_b = 100$, büyüklük parametresi $k = 18$ olan plaka (P4) için farklı deformasyon aşamalarında kırılma oluşum bölgesindeki boşluk oylum oranı dağılımı: (a) makroskobik deformasyon yoğunlaşması başladığı anda ve (b) nihai yırtılma anında. (c) Mod I yüklemesi boyunca plakadaki normalize mühendislik geriliminin (Σ_{22}/σ_0) mühendislik gerinimine (E_{22}) bağlı olarak değişimi.



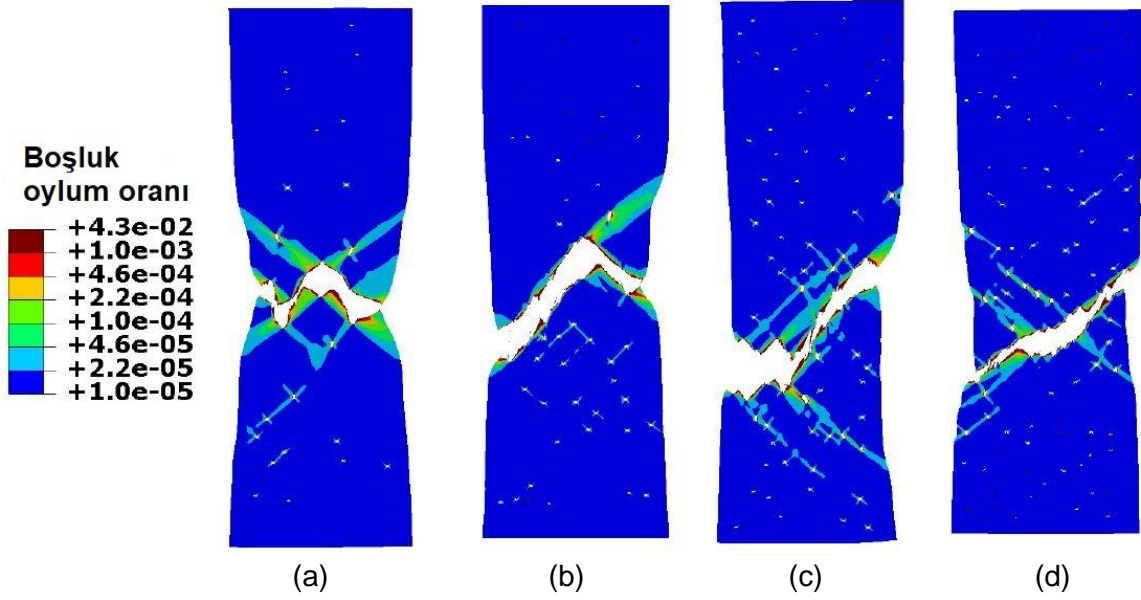
Şekil 44. Temsili boşluk bölgesi sayısı $S_b = 100$, büyüklük parametresi $k = 18$ olan üç farklı plaka için nihai yırtılma anında kırılma oluşum bölgesindeki boşluk oylum oranı dağılımı: (a) plaka P4, (b) plaka P5 ve (c) plaka P6. (d) Bu üç plaka ve Şekil 41’de gösterilen plaka P1 için, mod I yüklemesi boyunca normalize mühendislik geriliminin (Σ_{22}/σ_0) mühendislik gerilimine (E_{22}) bağlı olarak değişimi.

plaka P1'inkiyeye de lokalize deformasyon başlangıcına kadar (neredeyse) çakışmaktadır.

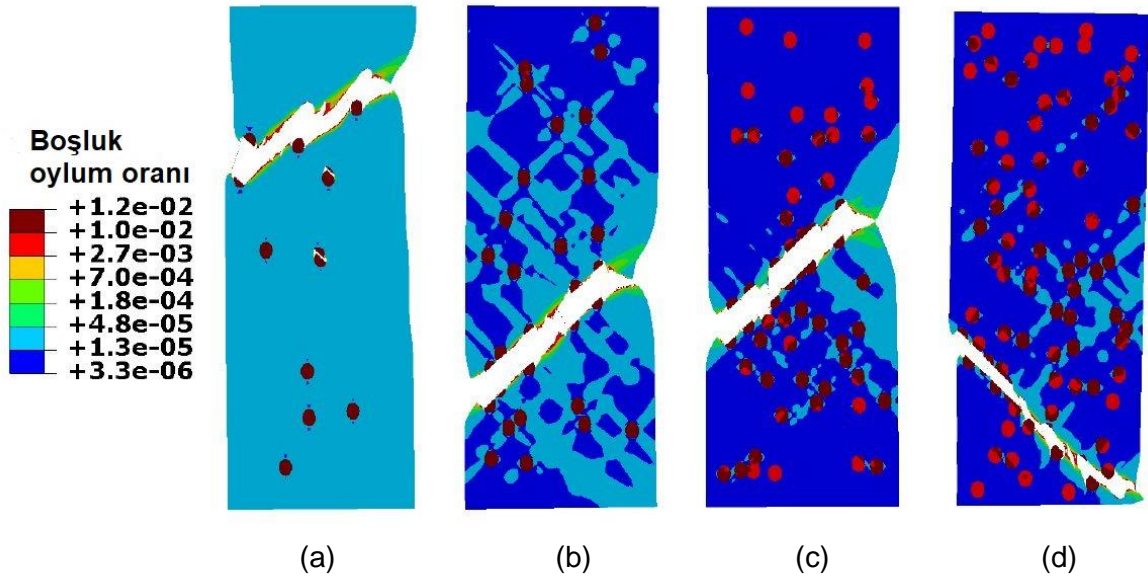
Şekil 45(a-d), her birindeki temsili boşluk bölgesi büyüklüğü aynı ($k = 3$), sayısı ise farklı olan dört farklı plaka için, yüklemenin son adımında, kırılma oluşum bölgesindeki boşluk oylum oranını göstermektedir. Temsili boşluk bölgesi sayıları, sırasıyla, Şekil 45(a) için $S_b = 25$, 45(b) için $S_b = 50$, 45(c) için $S_b = 75$ ve 45(d) için $S_b = 100$ 'dür. Şekil 41'de verilen ($S_b = 10$, $k = 3$) plaka da dikkate alındığında, uzayda rastgele dağılmış temsili boşluk sayısı arttıkça çatlak morfolojisinin önce bardak-bardaksıdan (bkz. Şekil 41 ve Şekil 45 (a)) bardak-kapaklıya (bkz. Şekil 45 (b) ve (c)), ardında da eğik çatlağa (bkz. Şekil 45 (d)) evrildiği görülmektedir. Şekil 45'teki analizin büyük temsili boşluk bölgelerine ($k = 18$) karşılık gelen sonuçları Şekil 46'da verilmiştir. Şekil 46'daki bütün plakalarda eğik çatlak morfolojisi görülmektedir. Yeri gelmişken belirtmek gerekir ki, parametrik çalışma kapsamında incelenen, $k = 18$, $S_b \in \{10, 25, 50, 75, 100\}$ olan toplam 15 plakadan 12 tanesi için çatlak morfolojisinin açıkça eğik, 1 tanesi için açıkça bardak-kapaklı, geriye kalan 2 tanesi için ise üç morfolojinin karışımı şeklinde olduğu görülmüştür (bkz. EK-6). Temsili boşluk bölgesi sayısı arttıkça, hem $k = 3$ hem de $k = 18$ için, kırılma oluşum bölgesinde görülen incelmeye ve kırılma gerinim değeri azalmaktadır.

Şekil 47 ve 48, temsili boşluk bölgesi büyüklüğünün çatlak morfolojisine etkilerini daha da açık hale getirmek amacıyla, boşluk bölgelerinin uzaysal dağılımlarının aynı olduğu plakalara ait sonuçları göstermektedir. Şekil 47, incelenen plakalardan boşluk bölgesi sayısı en küçük olanları ($S_b = 10$), Şekil 48 ise en büyük olanları ($S_b = 100$) göstermektedir. Her iki şekilde de boşluk büyüklüğünü belirleyen k parametresi, $\{3, 6, 9, 15, 18\}$ aralığında değişmektedir. Şekil 47'deki (Şekil 48'deki) plakalar için boşluk bölgelerinin uzaysal dağılımı, Şekil 41'dekiyle (Şekil 43'dekiyle) aynıdır. $k = 3$ için, çatlak morfolojisi hem $S_b = 10$ (bkz. Şekil 41) hem de $S_b = 100$ (bkz. Şekil 48(a)) için bardak-bardaksıdır. Temsili boşluk büyüklüğü (k değeri) arttıkça, $S_b = 10$ için çatlak morfolojisi bardak-bardaksıdan bardak-kapaklıya evrimleşmektedir (bkz. Şekil 47). $S_b = 100$ için ise, çatlak morfolojisi $k = 6$ için eğik morfolojiye dönüşmekte ve artan k değerleri için eğik kalmaktadır (bkz. Şekil 48). Tahmin edileceği üzere, hem $S_b = 10$ hem de $S_b = 100$ için temsili boşluk büyüklüğü arttıkça kırılma oluşum bölgesinde görülen incelmeye ve kırılma gerinim değeri azalmaktadır.

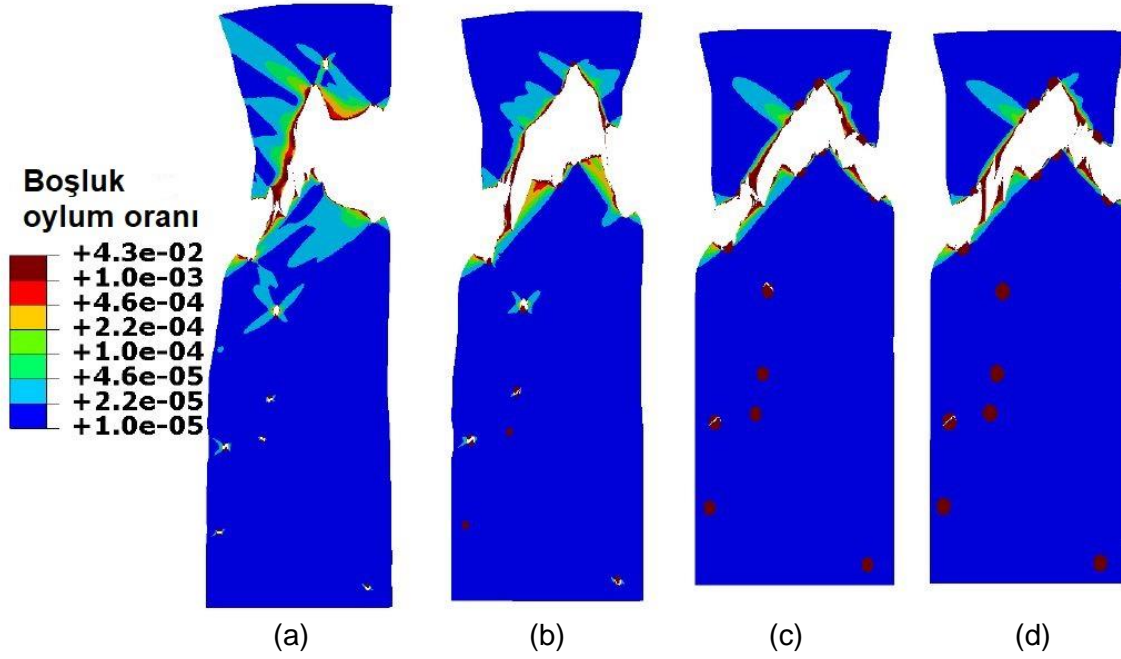
Son olarak belirtmek gerekir ki, parametrik çalışma sonuçları, boşluk oylum oranı dağılımı esas alınarak sunulmuştur. Eşdeğer plastik gerinim dağılımının deformasyon yoğunlaşmasını daha direkt ifade eden bir parametre olduğu düşünülebilir. Ancak, yapılan incelemelerde boşluk oylum oranı ve eşdeğer plastik gerinim dağılımları arasında birebir uyum olduğu görülmüş ve sonuçların, çatlak ilerlemesi açısından temel parametre olan boşluk oylum oranı cinsinden sunulmasına karar verilmiştir. Şekil 49(a-b) ve (c-d), boşluk oylum oranı ve eşdeğer plastik ge



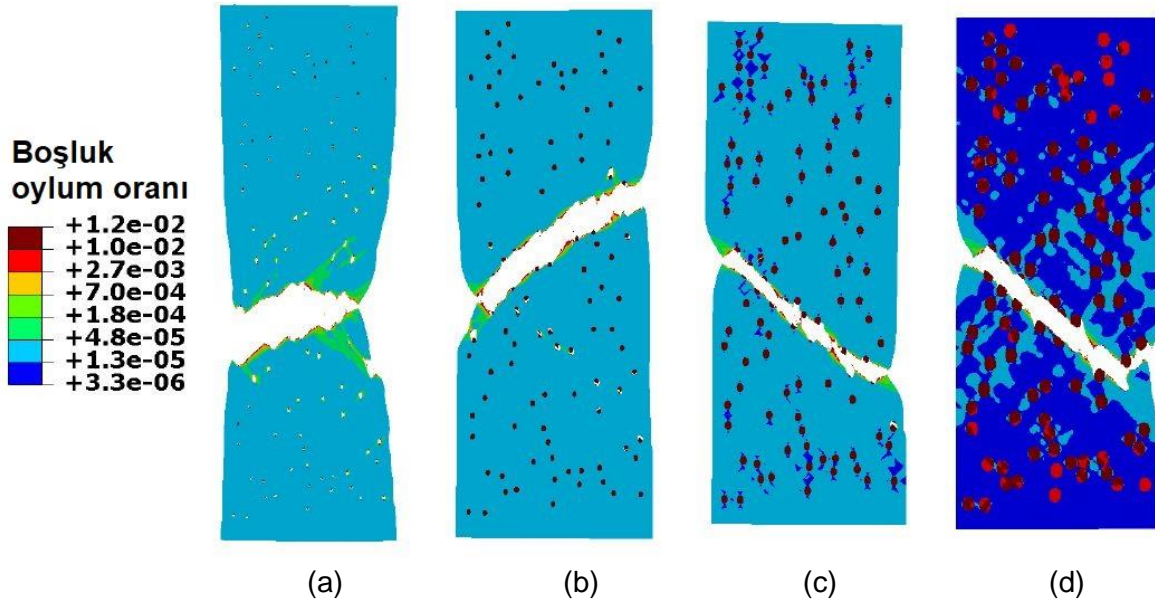
Şekil 45. Temsili boşluk bölgesi büyüklük parametresi $k = 3$ olan dört farklı plaka için nihai yırtılma anında kırılma oluşum bölgesindeki boşluk oylum oranı dağılımı. Temsili boşluk bölgesi sayısı: (a) için $S_b = 25$, (b) için $S_b = 50$, (c) için $S_b = 75$ ve (d) için $S_b = 100$ 'dür.



Şekil 46. Temsili boşluk bölgesi büyüklük parametresi $k = 18$ olan dört farklı plaka için nihai yırtılma anında kırılma oluşum bölgesindeki boşluk oylum oranı dağılımı. Temsili boşluk bölgesi sayısı: (a) için $S_b = 10$, (b) için $S_b = 25$, (c) için $S_b = 50$ ve (d) için $S_b = 75$ 'tir.

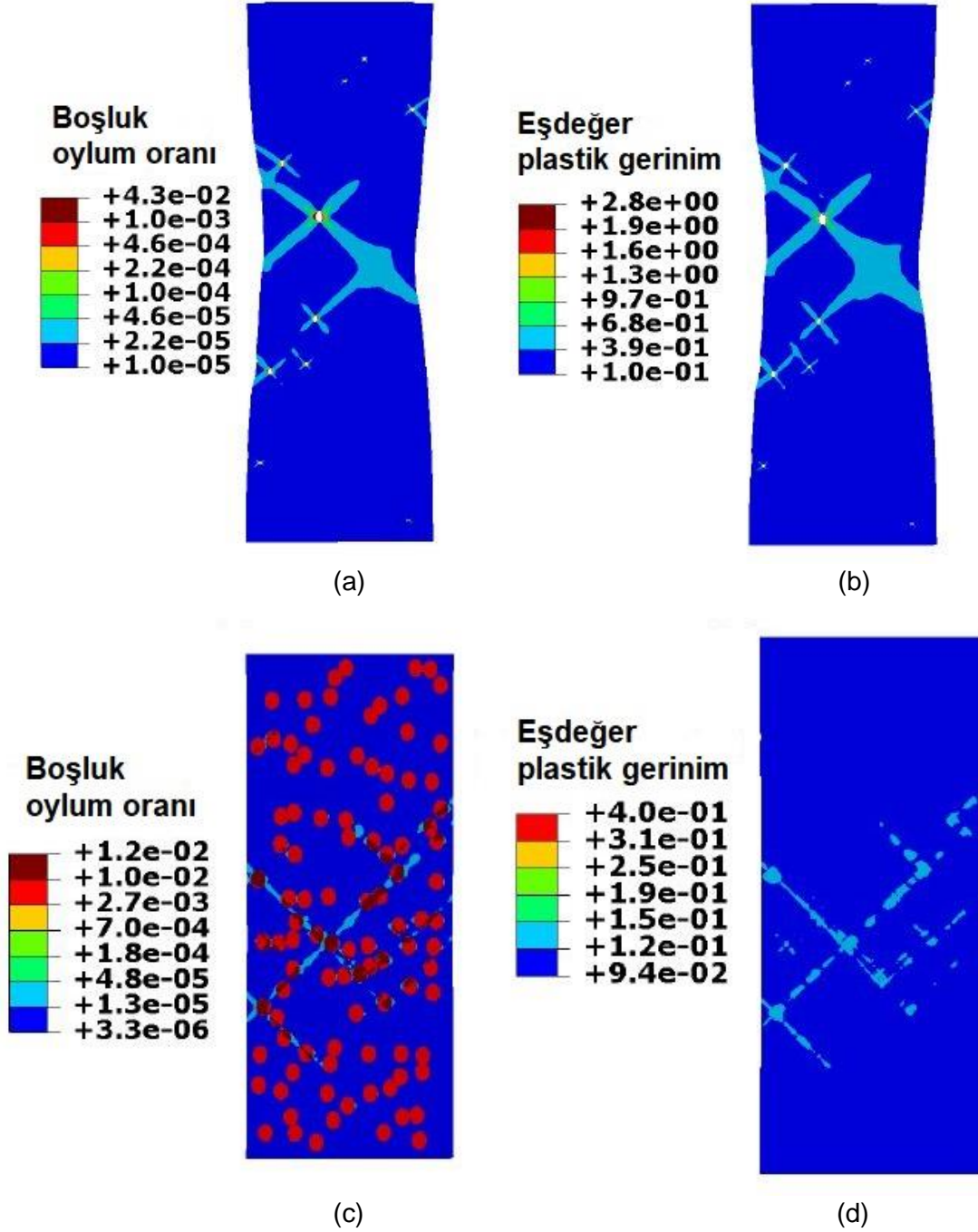


Şekil 47. Temsili boşluk bölgesi sayısı $S_b = 10$ olan dört farklı plaka için nihai yırtılma anında kırılma oluşum bölgesindeki boşluk oylum oranı dağılımı. Temsili boşluk bölgesi büyüklük parametresi: (a) için $k = 6$, (b) için $k = 9$, (c) için $k = 15$ ve (d) için $k = 18$ 'dir. Her dört plaka için de temsili boşlukların uzaysal dağılımı aynıdır.



Şekil 48. Temsili boşluk bölgesi sayısı $S_b = 100$ olan dört farklı plaka için nihai yırtılma anında kırılma oluşum bölgesindeki boşluk oylum oranı dağılımı. Temsili boşluk bölgesi büyüklük parametresi: (a) için $k = 3$, (b) için $k = 6$, (c) için $k = 9$ ve (d) için $k = 15$ 'tir. Her dört plaka için de temsili boşlukların uzaysal dağılımı aynıdır.

gerinim dağılımları arasındaki uyuma iki örnek sunmaktadır. Her dört şekilde de plakaların kırılma oluşum bölgeleri, deformasyonun kesme kuşaklarında yoğunlaşmaya başladığı anda gösterilmiştir. Şekil 49 (a-b)'deki plaka için $S_b = 10$, $k = 3$; Şekil 49 (c-d)'deki plaka için ise $S_b = 100$, $k = 18$ 'dir.



Şekil 49. İki farklı plakanın nihai yırtılma anında kırılma oluşum bölgesindeki (a, c) boşluk oylum oranı dağılımı, (b, d) eşdeğer plastik gerinim dağılımı. Temsili boşluk bölgesi sayısı ve büyüklük parametresi, sırasıyla, (a, b)'de gösterilen plaka için $S_b = 10$, $k = 3$; (c, d)'de gösterilen plaka için ise $S_b = 100$, $k = 18$ 'dir.

Boşluk çekirdeklenmeli model kullanılarak yapılan çalışmalar, “Effect of Damage Related Microstructural Parameters on Plate tearing at Steady State” başlıklı bir özgün araştırma makalesi olarak, 09 Aralık 2018 tarihinde “European Journal of Mechanics – A/Solids” dergisine gönderilmiştir. Makale, rapora eklenmiştir (bkz. EK-7).

4.2 Deneysel Çalışmalar

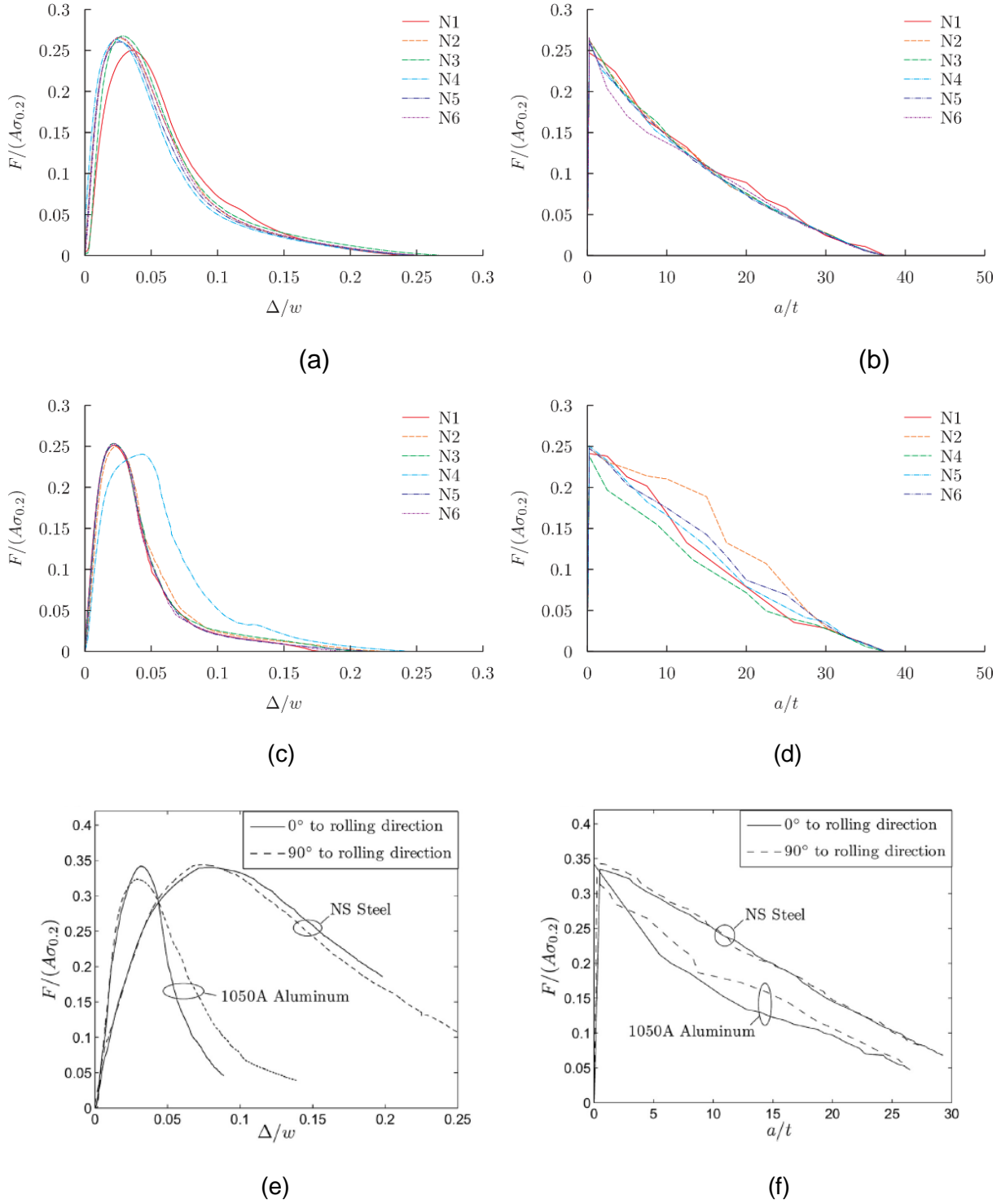
4.2.1 Mod I Yükleme Deneyleri

Kalınlıkları $t \in \{0,5; 1; 3; 4\}$ mm arasında değişen tek ve çift kenar çentikli Al 1050 H14 numuneler, mod I yüklemesi altında yırtılmıştır. Plaka yırtılması için tasarlanıp üretilen deney düzenekleri ve plakaların malzeme/geometri/mikro-yapı özellikleri bölüm 3.2’de ayrıntılı olarak verilmiştir. Her bir plaka kalınlığı ve tipi için en az altı numune olmak üzere, toplam 136 numune test edilmiştir. Çatlak ilerlemesini tespit edebilmek için deney süresince belirli aralıklarla fotoğraf çekilmiştir; Şekil 24 tek, Şekil 33 ise çift kenar çentikli bir numune için deney süresince çekilen fotoğraflara örnekler göstermektedir. Çekilen fotoğraflarla, çekme cihazından elde edilen yük–yer değiştirme eğrisini eşleştirebilmek için, düzeneğe bağlanan süreölçerden faydalanılmıştır. Yükleme hızı, çekme cihazına deney başlangıcında, mm/dakika cinsinden girilen bir değerdir. Dolayısıyla, bir yer değiştirme değerinin deney başlangıcından ne kadar zaman sonra denk geldiği bellidir. Çekilen her fotoğraf karesinde, süreölçer üzerinde yazan zaman görülmektedir. Süreölçer, her deney öncesinde sıfırlanıp, yük uygulamaya başlandığı anda başlatılmıştır. Böylece deney esnasında çekilen bir fotoğrafın, hangi yer değiştirme değerine denk geldiği, yük–yer değiştirme eğrisi ve fotoğraf üzerindeki zaman eşleştirilerek tespit edilmiştir. Numune üzerine çizilen cetvel, hem çatlak düz ilerleyip ilerlemediğini belirlemek, hem de çatlak ilerleme mesafesini ölçmek için kullanılmıştır. Çatlak ilerlemesine ilişkin bütün ölçümler, deneyler tamamlandıktan sonra fotoğraflar bilgisayar ortamına aktarılıp, SolidWorks çizim programı kullanılarak yapılmıştır. Tek ve çift kenar çentikli numuneler için yük uygulama düzenekleri farklı olsa da, çatlak ilerleme yolunu ve hızını tespit etmek için kullanılan yöntem aynıdır. Çatlak ilerleme sürecinin raporu okuyanlar tarafından da gözlemlenebilmesi amacıyla, çekilen fotoğraflar kullanılarak, bir tek bir de çift kenar çentikli numune için iki film oluşturulmuş, raporun ekinde (bkz. sırasıyla EK-8a ve EK-8b) sunulmuştur.

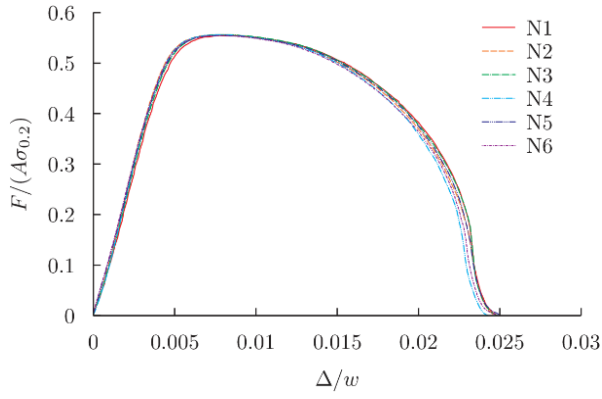
Deneylere başlanmadan önce, sanki-statik yüklemeye karşılık gelecek yüklemeye hızını bulmak için tek kenar çentikli plakalar üzerinde çekme hızı 0,4 mm/dakika ile 1 mm/dakika arasında değişen denemeler yapılmış ve verilen aralıktaki deney sonuçlarının çekme hızından bağımsız olduğu gözlemlenmiştir. Güvenli tarafta kalabilmek için yapılan diğer bütün deneylerde tek kenar çentikli plakalar 0,6 mm/dakika hızla çekilmiştir. Çift kenar çentikli plakalarda yüklemeye kolları arasında kalan plaka boyutu, tek kenar çentikli plakalardakinin yaklaşık yarısı kadardır. Her iki

plaka tipi için de ortalama gerinim hızının aynı olabilmesi için çift kenar çentikli plakalar 0,3 mm/dakika hızla çekilmiştir. Şekil 50 (Şekil 51) 4mm kalınlığında tek çentikli (çift çentikli) numuneler için, hem bu proje kapsamında hem de El-Naaman ve Nielsen (2013) tarafından elde edilen normalize yük–yer değiştirme ve normalize yük–çatlak ilerlemesi eğrilerini göstermektedir. Kuvveti (F) normalize etmek için kullanılan alan, plaka genişliği (w) ve kalınlığı (t) çarpılarak hesaplanmıştır; $A = w \times t$. Tek kenar çentikli plakalar için her iki çalışmada da $A = 200 \times 4 \text{ mm}^2$ 'dir. Çift kenar çentikli plakalar için ise bu proje kapsamında $A = 180 \times 4 \text{ mm}^2$, El-Naaman ve Nielsen (2013) çalışmasında $A = 60 \times 4 \text{ mm}^2$ 'dir. İki çalışma arasındaki bir diğer fark ise plaka adlandırılmasındadır. El-Naaman ve Nielsen (2013), haddeleme doğrultusu çentik doğrultusuna paralel olan plakalara 0° , dik olan plakalara 90° demektedir. Proje kapsamında ise, çekme deneyleriyle uyumlu olarak, haddeleme doğrultusu çekme doğrultusuna paralel olan plakalar 0° , dik olan plakalar ise 90° olarak adlandırılmıştır. Yani bu projede 0° derece olarak adlandırılan plakalar, El-Naaman ve Nielsen (2013) çalışmasında 90° olarak adlandırılmıştır (tersi de doğrudur). Şekil 50 ve 51'de kuvveti normalize etmek için kullanılan diğer parametre, $\sigma_{0.2}$, yüzde 0.2 ötelenmiş akma gerilmesini temsil etmektedir. El-Naaman ve Nielsen (2013) hem 0° hem 90° derece plakalar için $\sigma_{0.2} = 90,2 \text{ MPa}$ değerini kullanmıştır. Proje kapsamında ise çekme deneylerinde belirlenen, Tablo 5'te sunulan veriler kullanılmıştır (0° plakalar için $\sigma_{0.2} = 109,5 \text{ MPa}$, 90° plakalar için $\sigma_{0.2} = 120,8 \text{ MPa}$). Her iki çalışmada da “ Δ ” çekme cihazından alınan yer değiştirme değerini, “ a ” ise çatlak ilerleme uzunluğunu ifade etmektedir. El-Naaman ve Nielsen (2013) çalışmasında çift kenar çentikli plakalar için verilen yük–yer değiştirme eğrilerinde Δ değeri plakanın başlangıç yüksekliğiyle ($L_0 = 90 \text{ mm}$) normalize edilmiştir. Bu çalışmada ise, hem tek hem çift kenar çentikli plakalar için Δ değeri plaka genişliğiyle (w) normalize edilmiştir.

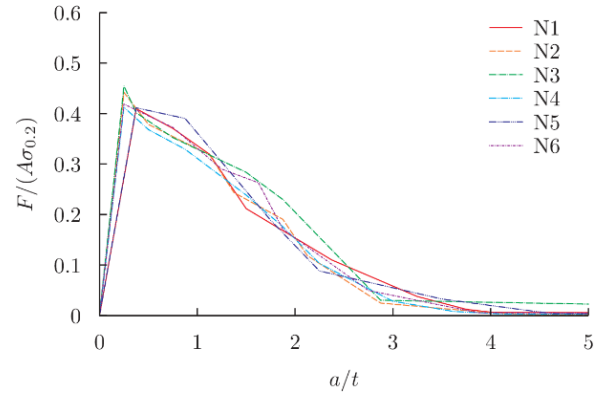
Çift kenar çentikli numunelerde çatlak, plakanın iki ucundan eş zamanlı olarak ilerlediği için, çatlak ilerleme uzunluğu bu iki değerlerin ortalaması alınarak belirlenmiştir. Ayrıca bu numunelerde çatlak plakanın içinden ilerlemiş olsa bile plaka yarılmaması dışardan net olarak görülememektedir. Şekil 51(b, d)'deki maksimum yük değerlerinin, Şekil 51(a, c)'deki değerlerden daha düşük olmasının sebebi, çatlak ilerlemesinin bu numuneler için (özellikle maksimum yük civarındaki bölgede) yüksek doğrulukta tespit edilememiş olmasıdır. Çatlak ilerlemesinin fizikinden kaynaklı bu sorun dışında, Şekil 50 ve 51, proje kapsamında yapılan deneylerde elde edilen yük–yer değiştirme ve yük–çatlak ilerlemesi sonuçlarının farklı numuneler için tam bir uyum içerisinde olduğunu göstermektedir. Proje kapsamında yapılan bütün mod I yüklemesi deneyleri için sonuçlar EK-9'da verilmiştir. Test edilen bütün kalınlıklarda, farklı numuneler için elde edilen sonuçlar tam bir uyum içerisindedir; yapılan deneylerin tekrar edilebilir olduğu kanıtlanmıştır. Ayrıca, proje kapsamında elde edilen sonuç-



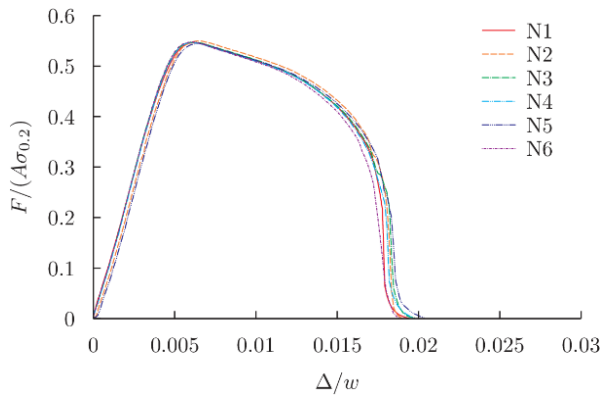
Şekil 50. 4mm kalınlığında, Al 1050 H14 malzemedен üretilmiş, tek kenar çentikli plakalar için: (a, c, e) normalize yük –yer değıştirme eğrileri; (b, d, f) normalize yük–çatlak ilerlemesi eğrileri. Haddemeleme doğrultusu (a, b)'deki numuneler için çekme doğrultusuna paralel (0°), (c, d)'deki numuneler için diktir (90°). (a-d) proje kapsamında yapılan deneylerin sonuçlarını, (e, f) ise El-Naaman ve Nielsen (2013) çalışmasında elde edilen sonuçları göstermektedir.



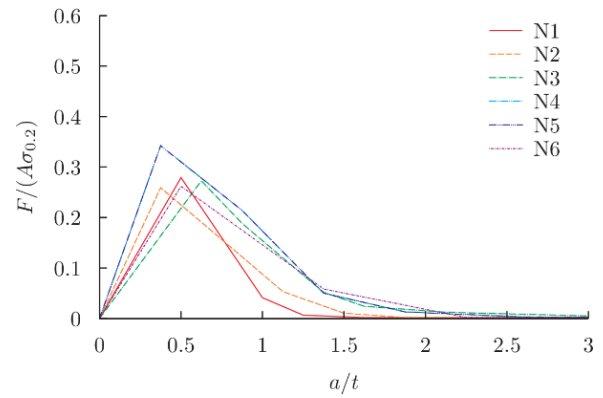
(a)



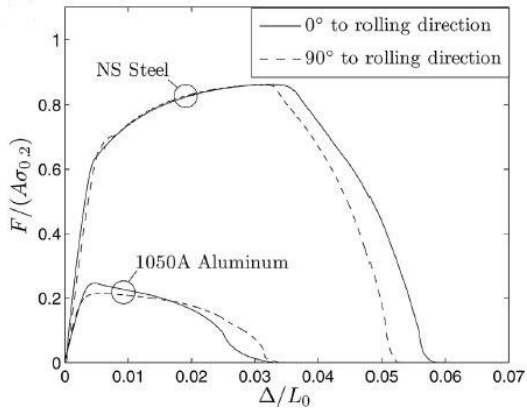
(b)



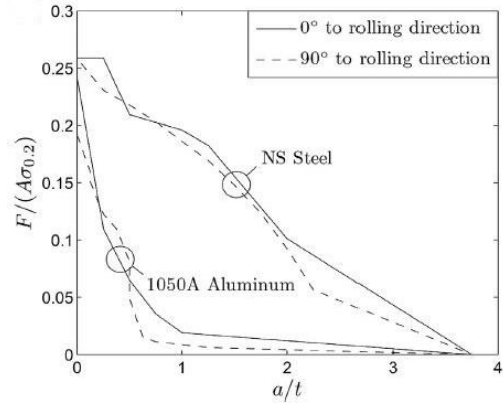
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 51. 4mm kalınlığında, Al 1050 H14 malzemeden üretilmiş, çift kenar çentikli plakalar için: (a, c, e) normalize yük –yer değiştirme eğrileri; (b, d, f) normalize yük–çatlak ilerlemesi eğrileri. Haddeme doğrultusu (a, b)'deki numuneler için çekme doğrultusuna paralel (0°), (c, d)'deki numuneler için diktir (90°). (a-d) proje kapsamında yapılan deneylerin sonuçlarını, (e, f) ise El-Naaman ve Nielsen (2013) çalışmasında elde edilen sonuçları göstermektedir.

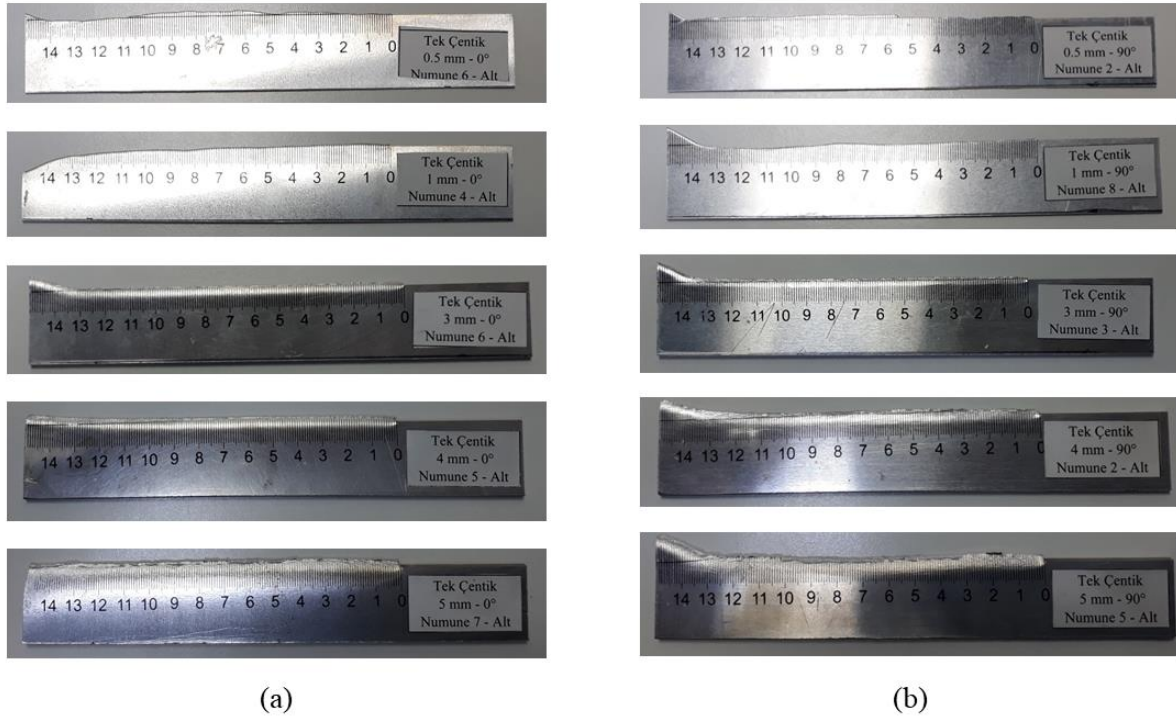
lar El-Naaman ve Nielsen (2013) çalışmasında verilen sonuçlarla da (numune boyutlarındaki ve sonuçları normalize etmek için kullanılan değerlerdeki farklılıklara rağmen) son derece uyumludur.

4.2.2 Çatlak Morfolojileri: Optik Mikroskop Bulguları

Bölüm 3.2.4'te anlatıldığı üzere, çalاک morfolojilerinin ayrıntılı analizleri TEM (FEI XL-40, 20 kV) kullanılarak yapılmıştır. Ancak TEM, hem hizmet satın alma maliyeti hem de zaman açısından oldukça pahalı bir yüzey görüntüleme tekniğidir. Proje kapsamında yırtılan bütün plakaların TEM ile incelenmesi mümkün (ve gerekli) değildir. Test edilen bütün numuneler önce çıplak gözle, ardından optik mikroskopla (Nikon Eclipse LV150N ve Nikon TU Plan Fluor 100×) incelenmiş, hem tek hem çift kenar çentikli numuneler arasından her kalınlık için çatlak morfoloji açısından en temsili birer örnek seçilmiştir.

Tek Kenar Çentikli Numuneler

Şekil 52(a) ve (b), sırasıyla, haddeme doğrultusu çekme doğrultusuna paralel (0°) ve dik (90°) optik mikroskop numunelerine örnekler göstermektedir. 3 ve 4 mm kalınlığındaki numunelerde çatlak, çekme doğrultusuna dik kalacak şekilde, görece düz olarak ilerlemektedir. Diğer kalınlıklardaki, özellikle 0,5 ve 1mm kalınlığındaki ince numunelerde çatlak, Şekil 52'de görül-



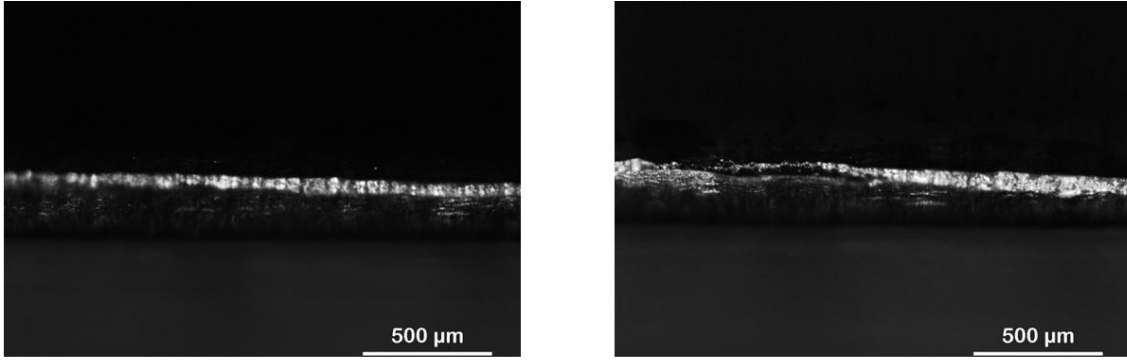
Şekil 52. Optik mikroskopta incelenen, tek kenar çentikli Al 1050 H14 numune örnekleri. Haddeme doğrultusu çekme doğrultusuna (a) paralel (0°), (b) dik (90°) numuneler. (a) ve (b)'de numune kalınlığı yukarıdan aşağı doğru 0,5; 1; 3; 4 ve 5 mm olarak artmaktadır.

düğü gibi, sayfa düzleminde aşağı/yukarı saparak ilerlemektedir. Bütün kalınlıklar için geçerli olmak üzere, özellikle 90° numunelerde çatlak, çentik ucundan 12 -14 cm uzaklıktaki bir noktaya ulaştıktan sonra sayfa düzleminde aşağı veya yukarı doğru bariz bir şekilde saptmaktadır. Bu sapma, deney düzeneğinden kaynaklanan bir etkidir: yükleme ilerleyip düzeneğin kolları açıldıkça numunenin arka (Şekil 52'de çentik ucundan uzak olan) kısımları hafif bir basma yüküne tabi olmaktadır. Bu ise, numunelerin çekme doğrultusundaki düzlemde eğilmelerine sebebiyet vermektedir. Kalınlık azaldıkça sapma noktası 14 cm'ye yaklaşmakta ve hatta çok ince numuneler için 14 cm'yi de geçmektedir. 4 ve 5mm kalınlığındaki 0° numunelerde, bahsedilen sapma hemen hemen hiç yoktur.

0,5 mm Kalınlığındaki Numuneler:

Mod I yüklemesi sırasında hem 0° hem de 90° numunelerin, çekme doğrultusundaki düzlemde hafif bombe yaptığı gözlenmiştir. Deney başlangıcında (görece) düz olan numuneler, çekme yükü artıp çatlak 3-4 cm ilerledikten sonra bombe yapmaya başlamıştır. Numunelerin bombe yapması, tıpkı plakanın çentiksiz kenarı yakınlarında çatlağın sayfa düzleminde aşağı veya yukarı saptması gibi, deney düzeneğinden kaynaklanan bir etkidir. Bombe, diğer kalınlıktaki numunelerde gözle görülür düzeyde değilken, 0,5 mm kalınlığındaki numunelerde bariz bir hal almıştır.

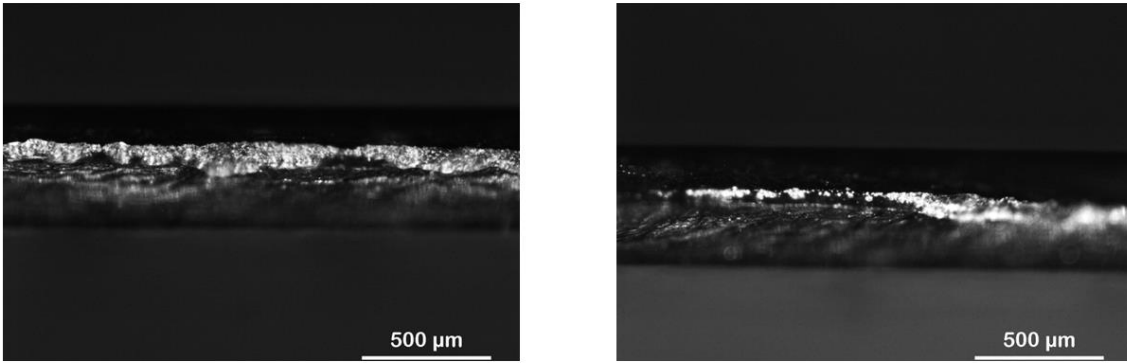
0,5 mm kalınlığındaki numunelerde, çatlağın iç bölgesine, yani kanala, çıplak gözle bakıldığında herhangi bir şey görmek mümkün değildir. Dolayısıyla direkt olarak optik mikroskop incelemelerine geçilmiştir. Şekil 53 ve 54, sırasıyla, 0° ve 90° iki örnek numune için $0,5 \times 10^4$ kat büyüten mercekle alınan optik mikroskop görüntülerini göstermektedir. Optik mikroskop incelmesinde, bütün numunelerde çatlak ilerlemesinin çok benzer bir şekilde olduğu görülmüştür. Şekil 53 ve 54'te gösterilen optik mikroskop görüntülerinde, beyaz bölgeler çatlak kanalını (yani içini), siyah bölgeler ise, plakanın, çatlağın dışında kalan bölümlerini göstermektedir. Optik mikroskop görüntülerinde, plakanın da dışında (altta ve üste) kalan bölgeler, plakaya göre daha açık siyah renkte gözükmektedir. Çatlak kanalının kalınlığıyla plakanın yükleme sonrası toplam kalınlığı kıyaslandığında, çatlağın ilerlediği bölgede oldukça belirgin bir incelmeye olduğu göze çarpmaktadır. Numunelerin bombe yaptığı optik mikroskop görüntülerinde de anlaşılmaktadır: Şekil 53 ve 54'te görüleceği üzere çatlak, sayfa düzleminde aşağı/yukarı saparak ilerlemektedir. Çatlak kanalı, hem 0° hem 90° numunelerde çoğu bölgede bardak-bardaksı gibi gözükse de (bkz. Şekil 53(a) ve 54(a)), kimi bölgelerde eğik bir görünüme kavuşmaktadır (bkz. Şekil 53(b) ve 54(b)). Kanalin eğik görünüme sahip olduğu bölgeler daha ziyade 90° numunelerde görülürken, 0° numunelerde bu bölgeler oldukça azdır. Kanal kalınlığı,



(a)

(b)

Şekil 53. 0,5 mm kalınlığında, 0°, tek kenar çentikli numune 6 için optik mikroskop görüntüleri. Çentik ucundan yaklaşık: (a) 7,3 cm uzaklıktaki bir bölgeden alınan görüntü, (b) 6 cm uzaklıktaki bir bölgeden alınan görüntü.



(a)

(b)

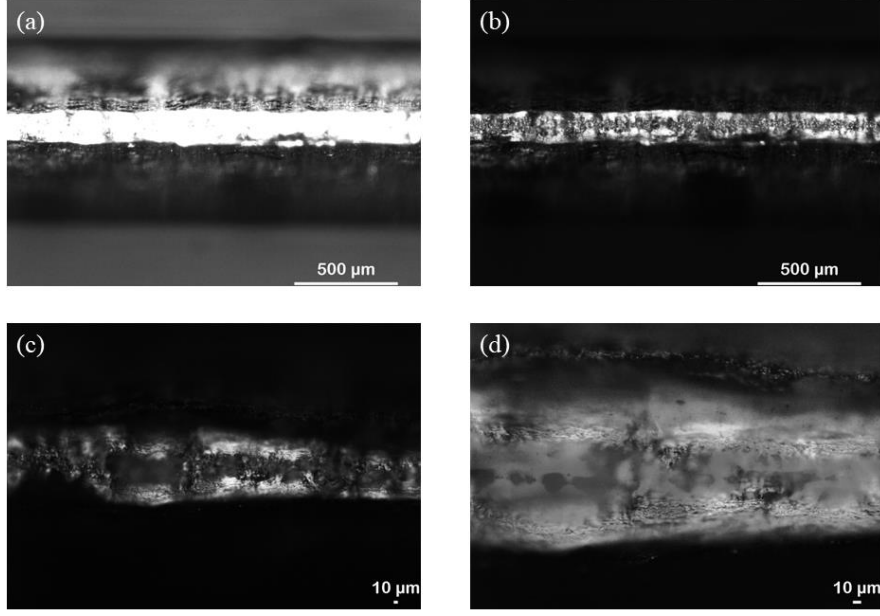
Şekil 54. 0,5 mm kalınlığında, 90°, tek kenar çentikli numune 2 için optik mikroskop görüntüleri. Çentik ucundan yaklaşık: (a) 5 cm uzaklıktaki bir bölgeden alınan görüntü, (b) 7,25 cm uzaklıktaki bir bölgeden alınan görüntü.

0°numunelerde çatlak boyunca hemen hemen sabit kalırken, 90°numunelerde azalıp artmaktadır. 90°numunelerdeki kanal 0° numunelerdekine kıyasla biraz daha kalındır.

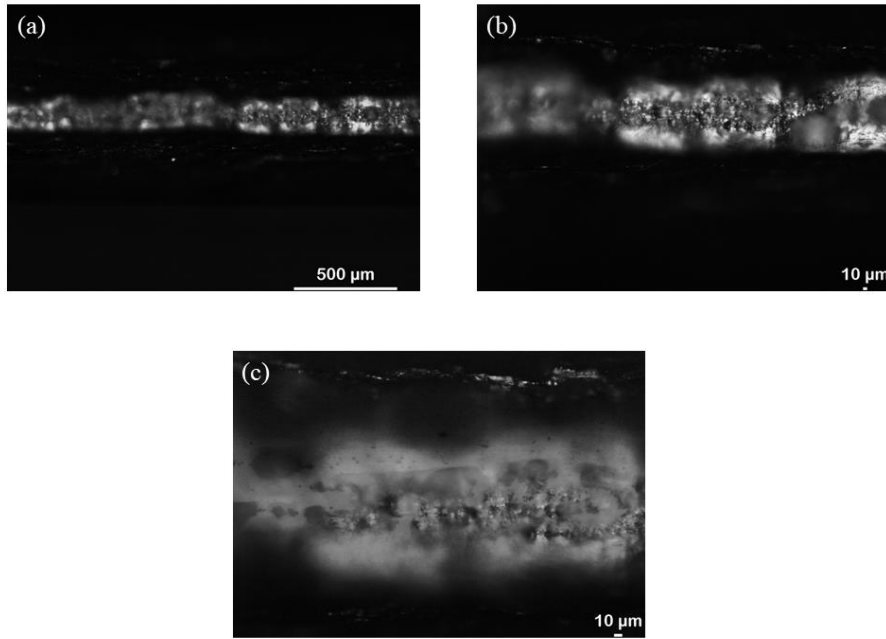
1 mm Kalınlığındaki Numuneler:

Çıplak gözle yapılan incelemelerde, çatlağın sayfa düzlemindeki aşağı/yukarı sapmalarının, 1 mm (özellikle 90°) numuneler için 0,5 mm numunelere kıyasla daha az olduğu tespit edilmiştir (bkz. Şekil 52). Plakanın çentik ucundan 13-14 cm uzaklıktaki kısımlarında gözlenen aşağı veya yukarı sapmalar, 90° numunelerde 0° numunelerdekine kıyasla 14 cm'ye daha yakındır.

Şekil 55 ve 56, sırasıyla, 0° ve 90° iki örnek numune için optik mikroskop görüntülerini göstermektedir. Şekil 55(a)'da çatlak kanalı dışında kalan bölgeye odaklanılarak, Şekil 55(b)'de ise çatlak kanalına odaklanılarak çekilmiş görüntüler sunulmuştur. Şekil 55(a)'da görüleceği üzere, 1 mm kalınlığındaki numunelerde, tıpkı 0,5 mm kalınlığındaki numunelerde-



Şekil 55. 1 mm kalınlığında, 0°, tek kenar çentikli numune 4 için optik mikroskop görüntüleri. Çentik ucundan yaklaşık: (a) 2,5 cm uzaklıktaki bir bölgeden alınan, çatlak kanalı dışındaki bölgeye odaklanmış görüntü, (b-d) 2,5 cm uzaklıktaki bir bölgeden alınan, çatlak kanalına odaklanmış görüntüler. (a) ve (b) için mercek büyütme oranı $0,5 \times 10^4$ kat, (c) için 1×10^4 kat, (d) için ise 2×10^4 kattır.

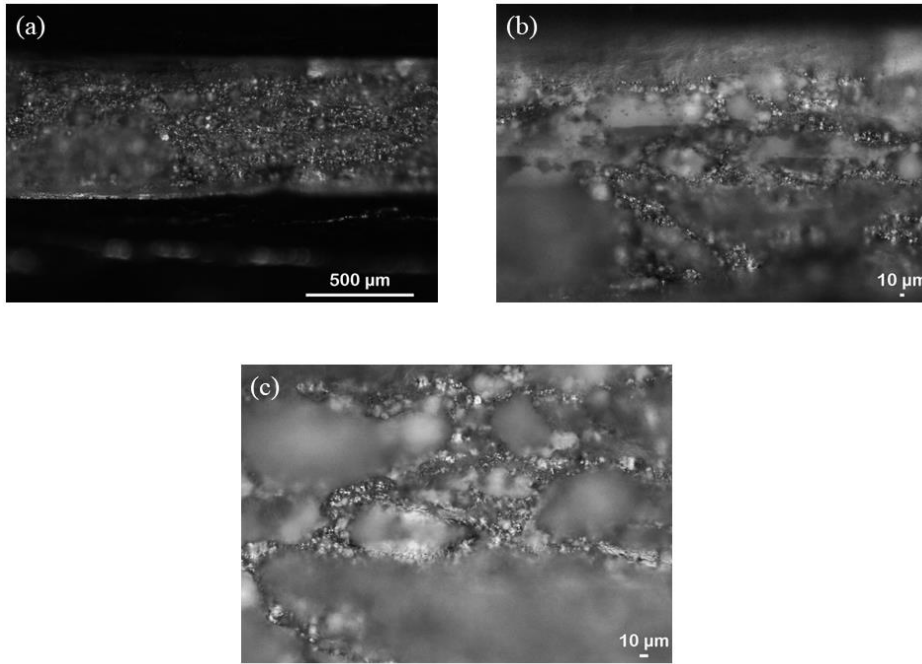


Şekil 56. 1 mm kalınlığında, 90°, tek kenar çentikli numune 8 için, çentik ucundan yaklaşık 8 cm uzaklıktaki bir bölgeden alınan optik mikroskop görüntüleri. Mercek büyütme oranı (a) için $0,5 \times 10^4$ kat, (b) için 1×10^4 kat, (c) için ise 2×10^4 kattır.

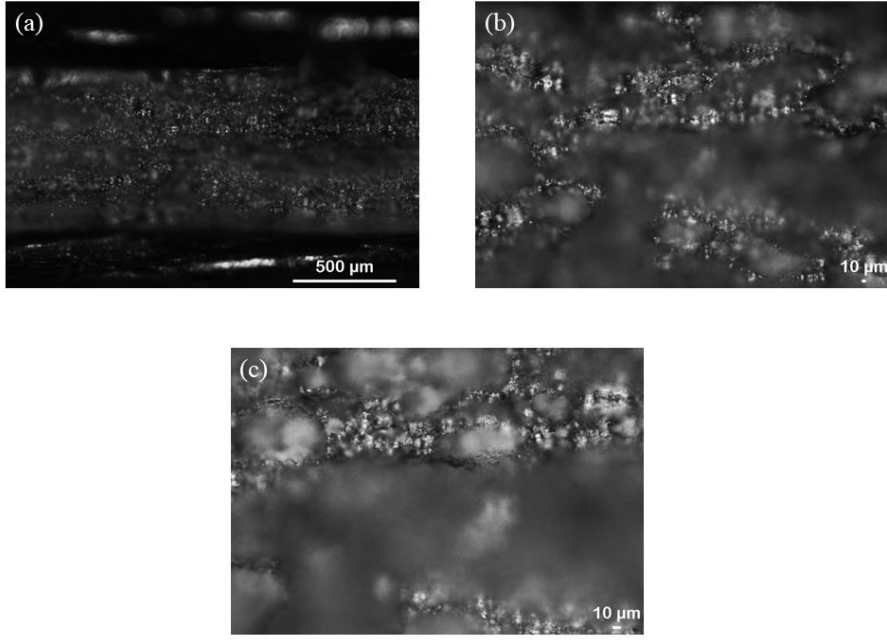
kine benzer şekilde, oldukça belirgin bir incelleme meydana gelmektedir. 0,5 mm numunelerde görülen bombe oluşumu, 1 mm numunelerde çok daha azdır. Bu durum, çatlağın, numune boyunca çekme doğrultusuna dik düzlemde sapma yapmadan ilerlemesinde kendini göstermektedir. Şekil 55(b-d)'de verilen farklı büyütme oranlarındaki optik mikroskop görüntüleri, çatlak kanal bölgesinin, birbirleriyle birleşmiş birçok boşluğun görüldüğü, sünek kırılmanın tipik ifadesi olan pürüzlü bir yüzeye sahip olduğunu göstermektedir. Şekil 56'da verilen, 90° numuneye ait kanal görüntüleri, Şekil 55'te verilenlerle uyum içerisinde. 90° numunelerin 0° numunelerden (ve 0,5 mm numunelerden) temel farkı, kanal kalınlığının daha çok değişmesi, hatta kimi zaman kanalın neredeyse ortadan kaybolmasıdır.

3 mm Kalınlığındaki Numuneler:

Çıplak gözle yapılan incelemelerde, 3 mm kalınlığındaki hem 0° ve hem de 90° numunelerde çatlağın, çekme doğrultusuna dik kalacak şekilde, görece düz olarak ilerlediği görülmüştür. Test edilen bütün numuneler için çatlak ilerlemesinin bardak-bardaksı olduğuna kanaat getirilmiştir. Şekil 57 ve 58'de sunulan, sırasıyla, 0° ve 90° iki örnek numuneye ait farklı büyütme oranlarındaki optik mikroskop görüntüleri de, çıplak gözle edinilen izlenimleri doğrular niteliktedir. Hem 0° hem de 90° numunelerde, bardak-bardaksı sünek kırılma için tipik olan, ortası pürüzlü, yan duvarları görece düz bir çatlak görülmektedir. 0° ve 90° numuneler arasında, çatlak morfolojileri bakımından önemli bir farklılık gözlenmemiştir.

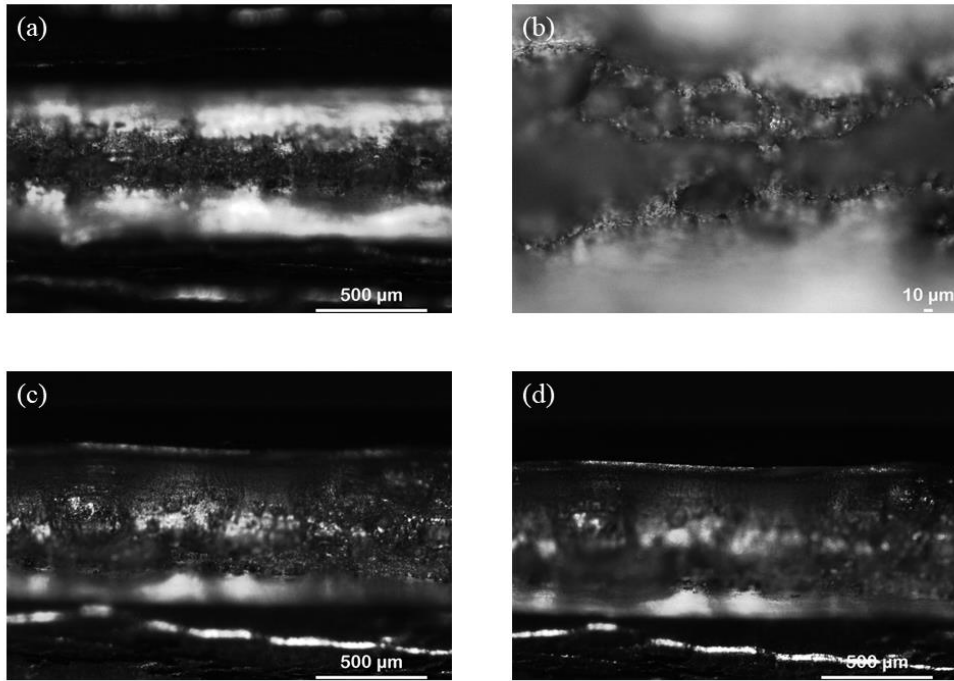


Şekil 57. 3 mm kalınlığında, 0°, tek kenar çentikli numune için, çentik ucundan yaklaşık 2,3 cm uzaklıkta bir bölgeden alınan optik mikroskop görüntüleri. Mercek büyütme oranı (a) için $0,5 \times 10^4$ kat, (b) için 1×10^4 kat, (c) için ise 2×10^4 kattır.



Şekil 58. 3 mm kalınlığında, 90°, tek kenar çentikli numune 3 için, çentik ucundan yaklaşık 2,5 cm uzaklıkta bir bölgeden alınan optik mikroskop görüntüleri. Mercek büyütme oranı (a) için $0,5 \times 10^4$ kat, (b) için 1×10^4 kat, (c) için ise 2×10^4 kattır.

4 mm Kalınlığındaki Numuneler:



Şekil 59. 4 mm kalınlığında, 0°, tek kenar çentikli numune 5 için, çentik ucundan yaklaşık 6 cm uzaklıktaki bir bölgeden alınan optik mikroskop görüntüleri. Mercek büyütme oranı (a, c, d) için $0,5 \times 10^4$ kat, (b) için ise 2×10^4 kattır.

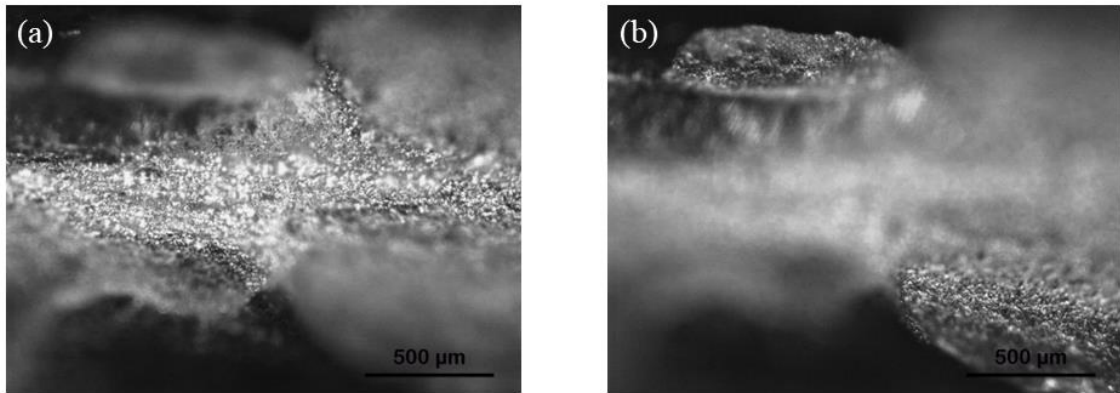
Çıplak gözle yapılan incelemelerde, 0° numuneler için çatlak, çekme doğrultusunu dik kalacak şekilde, görece düz olarak ilerlediği görülmüştür. 90° numunelerde ise çatlak hafifçe aşağı/yukarı sarmaktadır. Hem 0° hem 90° numuneler için çatlak ilerlemesinin genelde bardak-bardaksı olduğu gözlemlense de, bazı 90° numunelerde çatlak kimi bölgelerde eğik olarak ilerlediği kanısı oluşmuştur.

Optik mikroskop incelemeleri, çıplak gözle edinilen izlenimleri doğrular niteliktedir. Şekil 59, 0° örnek bir numune için çatlak kanal bölgesini göstermektedir. Şekil 59(a) ve (b) için mercekle büyütme oranları, sırasıyla, $0,5 \times 10^4$ ve 2×10^4 'tür. Şekil 59(b)'de kanalın orta bölgesindeki farklı büyüklükte boşluklar görülmektedir. Şekil 59(c) ve (d)'deki görüntüler, kanalın yan duvarlarının rahatça görülebilmesi için, numune hafifçe eğilerek çekilmiştir. Şekil 59(c), kanalın ortasına, Şekil 59(d) ise yan duvarlarına odaklanmıştır. Şekil 59(a-d), kanalın ortasının pürüzlü, yan duvarlarının ise görece pürüzsüz bir yapıya sahip olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

5 mm Kalınlığındaki Numuneler:

Çıplak gözle yapılan incelemelerde, hem 0° hem 90° numuneler için çatlak, çentik ucunda bardak-bardaksı başladığı, bardak-bardaksıdan eğik çatlak, eğik çatlaktan bardak-bardaksıya geçiş yaparak ilerlediği, numunenin sonlarına doğru (çentik ucundan yaklaşık 12-14 cm uzaklıktaki bölgede) ise tekrar bardak-bardaksıya döndüğü kanaati oluşmuştur.

Optik mikroskop incelemeleri, çıplak gözle ulaşılan kanaatleri doğrular niteliktedir. Kimi numunelerin bazı bölgelerinde çatlak, literatürde "zig-zag" olarak anılan bir tip eğik çatlak morfolojisine sahip olduğu görülmüştür (bkz. Şekil 3; El-Naaman ve Nielsen, 2013; Simonsen



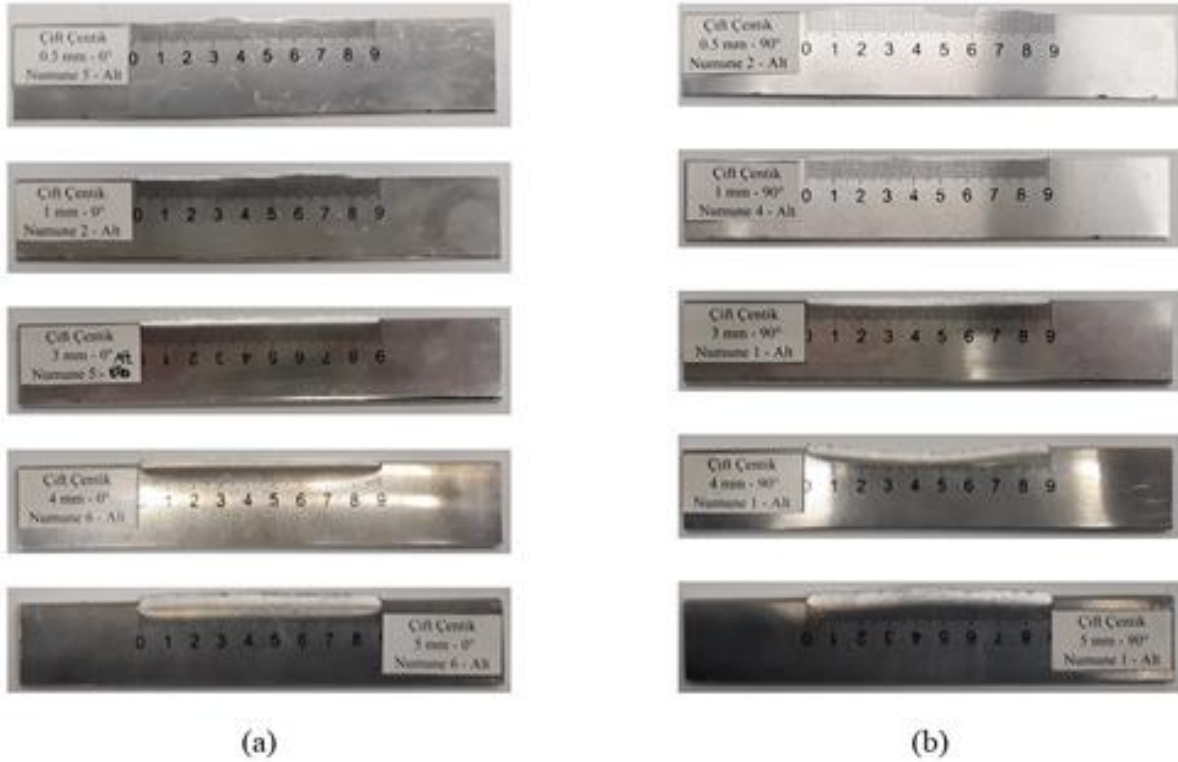
Şekil 60. 5 mm kalınlığında, 0° , tek kenar çentikli numune 5 için, çentik ucundan yaklaşık 8,5–9 cm uzaklıktaki bir bölgeden alınan optik mikroskop görüntüleri. Mercek büyütme oranı her iki şekil için de $0,5 \times 10^4$ kattır.

ve Tornqvist, 2004). Şekil 60, bahsedilen zig-zag mekanizmasına bir örnek göstermektedir. Şekil 60 (a)'da mercek, çatlağın zig-zag yaptığı bölgenin ortasına, Şekil 60 (b)'de ise zig-zag bölgesinin başlangıç ve bitiş kısımlarına odaklanmıştır. Şekil 60'da sağdan sola doğru ilerlendiğinde (yani çentik ucundan uzaklaşıldığında) çatlak eğikliğinin doğrultu değiştirdiği, yani çatlağın zig-zag yaptığı izlenimi oluşmaktadır.

Çift Kenar Çentikli Numuneler

Optik mikroskopla incelemeden önce, her bir numune çıplak gözle incelenmiş ve çatlak ilerlemesi hakkında edinilen genel izlenimler bu paragrafta anlatılmıştır. **0,5 mm kalınlığındaki numunelerde**, çatlak kanalı hakkında çıplak gözle incelemede bilgi edinmek mümkün değildir. Genel itibariyle, 0° ve 90° numunelerde çatlak ilerlemesinin benzer şekilde gerçekleştiği görülmüştür. Şekil 61(a) ve (b)'de görüleceği üzere, hem 0° hem 90° numunelerde çatlak, çekme doğrultusunda aşağı ve yukarı doğru sapmalar yaparak ilerlemektedir. Sapma olan bölgelerde çatlak, örneğin, önce yukarı saptırma, sonra neredeyse dümdüz ilerleyip, tekrar aşağı saptırma eski yüksekliğine ulaşmaktadır. Yani, çatlak boyunca çekme doğrultusunda farklı yüksekliklerde çatlak yüzeyleri oluşmaktadır. Yükseklikleri plaka merkezinden farklı bu yüzeylerin, toplam uzunluğu 90 mm olan çatlak yüzeyine oranı % 50'nin altında, genellikle yüzde % 10 ile 20 civarında kalmaktadır. Ayrıca, tek çentikli numunelerde görülen "numunenin bombe yapması" durumu, çift çentikli numunelerde görülmemiştir. **1 mm kalınlığındaki hem 0° hem 90° numunelerde** çatlak, 0,5 mm kalınlığındaki numunelere kıyasla, çekme doğrultusunda aşağı/yukarı doğru daha yumuşak geçişlerle ve daha az saptırarak ilerlemektedir. Saptırmanın görüldüğü, yükseklik farkının olduğu bu bölgelerin toplam çatlak yüzeyine oranı yüzde % 10 ile 20 civarında kalmaktadır (bkz. Şekil 61). Tıpkı 0,5 mm kalınlığındaki numunelerde olduğu gibi, 1 mm kalınlığındaki numunelerde de çatlak kanalı hakkında çıplak gözle fikir edinmek mümkün değildir. **3 mm kalınlığındaki hem 0° hem 90° numunelerde** çatlak, çekme doğrultusuna dik bir şekilde, aşağı/yukarı saptırmadan, neredeyse dümdüz ilerlemektedir. Çıplak gözle yapılan incelemelerde çatlağın, 0° numuneler için tipik bardak-bardaksı olarak ilerlediği, 90° numuneler için ise kimi bölgelerde eğik bir hal aldığı kanaatine varılmıştır. Gerek 0° gerekse 90° numunelerin hafif bombe yaptığı görülmüştür. **4 mm kalınlığındaki 0° numunelerde** çatlak, tıpkı 3 mm kalınlığındaki numunelerde olduğu gibi, çekme doğrultusuna dik bir şekilde, aşağı/yukarı saptırmadan, neredeyse dümdüz ilerlemektedir. 90° numunelerde ise numunenin orta kısımlarında çatlak, test edilen 6 numuneden dördünde aşağı, birinde yukarı saptırma, bir numunede ise görece düz bir şekilde ilerlemiştir. 3 mm kalınlığındaki numunelere benzer şekilde, 4 mm kalınlığı için de çatlağın, 0° numuneler için tipik bardak-bardaksı olarak ilerlediği, 90° numuneler için ise kimi bölgelerde eğik bir hal aldığı kanaatine varılmıştır. Ancak, 3 mm kalınlığındaki numunelerin aksine, ne 0° ne de 90°

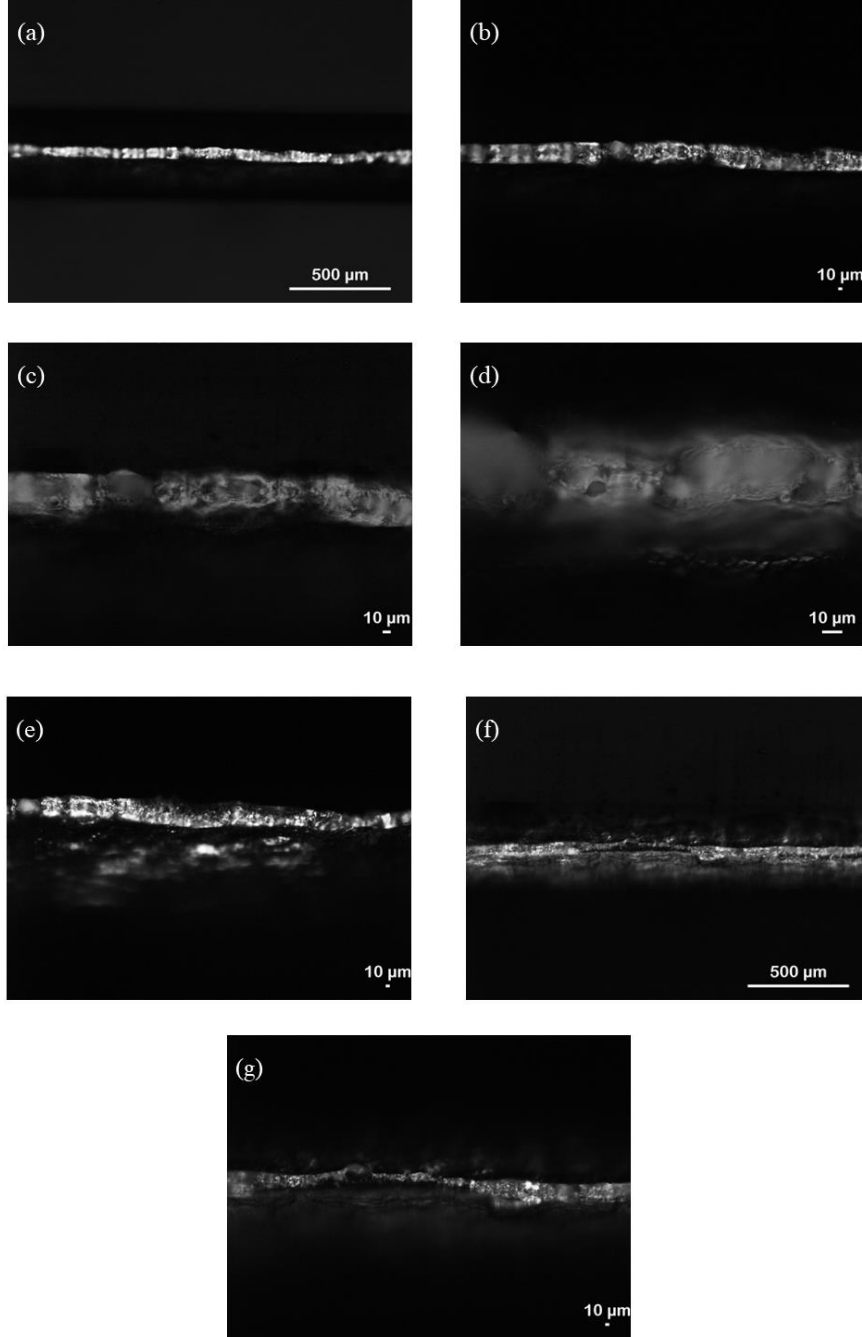
numunelerde bombe görülmüştür. **5 mm kalınlığındaki hem 0° hem 90° numunelerde** çatlak, çekme doğrultusuna dik bir şekilde görece düz olarak ilerlemektedir. Ancak 90° numunelerde çatlağın, kimi bölgelerde çekme doğrultusunda aşağı/yukarı doğru hafifçe saptığı görülmektedir (bkz. Şekil 61 (b)). Hem 0° hem 90° numunelerde, her iki uçtaki çatlak başlangıç bölgelerinde (yani çentikten plaka merkezine doğru uzanan, yaklaşık 10 mm uzunluğundaki bölgelerde) çatlak bardak-bardaksı bir yapıya sahiptir. Çatlağın geriye kalan kısmı, 0° numunelerde eğik bir yapıya sahiptir. Bu numunelerde çatlak numune boyunca plakanın ön veya arka yüzüne yaslanarak eğik bir şekilde ilerlemektedir. 90° numunelerin çoğu için çatlak ilerlemesi benzer şekilde gelişse de bazı numunelerde çatlak, bir bölgede plakanın ön yüzüne yaslanarak ilerlerken diğer bir bölgede plakanın arka yüzüne yaslanarak ilerlemektedir; yani çatlak zig-zag yapmaktadır. Çatlağın eğik olarak ilerlediği bölgelere kıyasla görece uzun olan zig-zag geçiş bölgelerinde ise çatlak, bardak-bardaksı olarak ilerlemektedir. 90° numunelerde gözlenen zig-zag davranışı, literatürde çelikler için tespit edilen zig-zag kadar bariz değildir. Ayrıca, incelenen toplam 6 tane 90° numunedan, yalnızca 2 numunede zig-zag gözlemlenmiştir.



Şekil 61. Optik mikroskopta incelenen, çift kenar çentikli Al 1050 H14 numune örnekleri. Haddeme doğrultusu çekme doğrultusuna (a) paralel (0°), (b) dik (90°) numuneler. (a) ve (b)'de numune kalınlığı yukarıdan aşağı doğru 0,5; 1; 3; 4 ve 5 mm olarak artmaktadır.

Her bir kalınlık ve haddelenme yönü için elde edilen optik mikroskop sonuçları aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

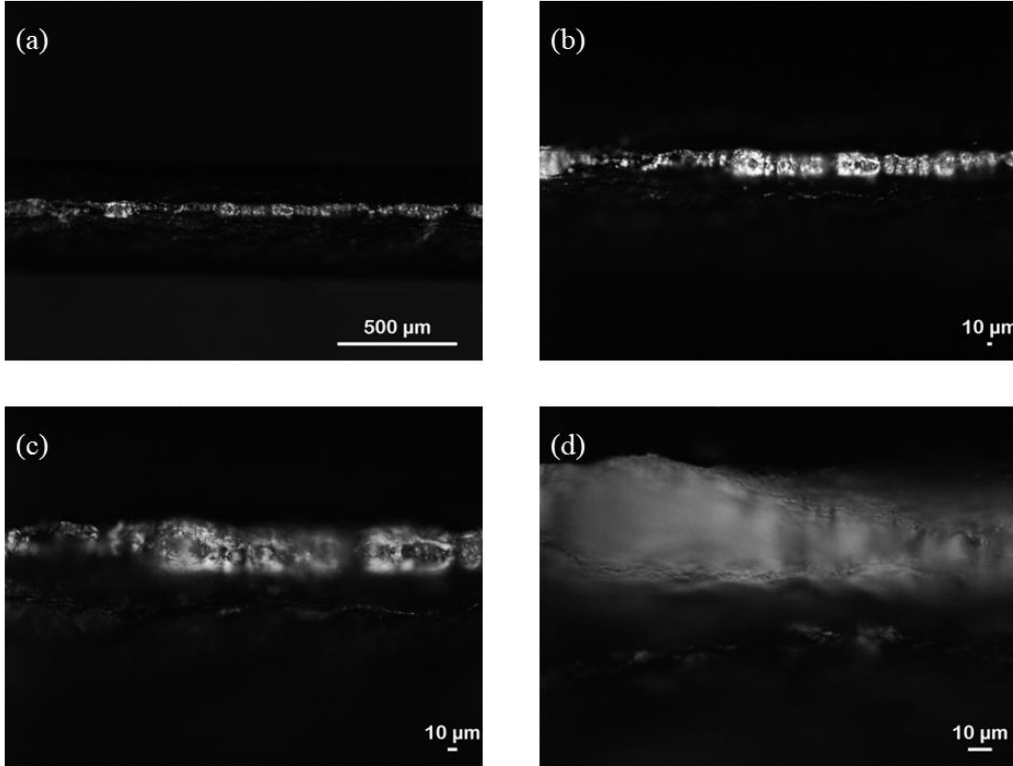
0,5 mm Kalınlığındaki Numuneler:



Şekil 62. 0,5 mm kalınlığında, 0°, çift kenar çentikli numune 5 için optik mikroskop görüntüleri. 0 cm'deki çentik ucundan yaklaşık: (a-e) 4,8 cm uzaklıktaki bir bölgeden alınan, (f, g) 6,0 cm uzaklıktaki bir bölgeden alınan görüntüler. Mercek büyütme oranı (a, f) için $0,5 \times 10^4$ kat, (b, e, g) için 1×10^4 kat, (c) için 2×10^4 kat, (d) için ise 5×10^4 kattır.

Bütün 0° numunelerde çatlak ilerlemesi benzer şekilde gerçekleşmekte, çatlak, çekme doğrultusuna dik düzlemde sağa/sola sapmadan, görece düz bir şekilde ilerlemektedir. Çatlak kanalının orta bölgesinde birbirleriyle birleşmiş irili ufaklı boşluklar görülürken (bkz. Şekil 62(a-d)), kanalın yan duvarları görece pürüzsüz bir yapıya sahiptir (bkz. Şekil 62(e)'deki üst kısım). Yani çatlak ilerlemesi tipik bardak-bardaksı şekilde gerçekleşmektedir. Genel olarak neredeyse sabit kaldığı gözlenen çatlak kanalının genişliği kimi bölgelerde önemli miktarda değişmektedir (bkz. Şekil 62(f, g)).

90° numunelerde de çatlağın tipik bardak-bardaksı şekilde ilerlediği görülmüştür. Çatlak morfolojisi bakımından 90° numuneleri 0° numunelerden ayıran üç temel farklılık göze çarpmıştır. 90° numunelerde: i-) çatlak, çekme doğrultusuna dik düzlemde daha fazla sağa/sola saparak ilerlemekte, ii-) çatlak kanal genişliği daha sık ve daha büyük oranda değişmekte, iii-) bazı bölgelerde kanalın pürüzlü olan orta bölgesi genele göre daha ince, yan duvarlar ise daha yüksek ve daha eğimli olmaktadır. Şekil 63, 90° bir numune için çatlak morfolojisini farklı büyütme oranlarında göstermektedir.

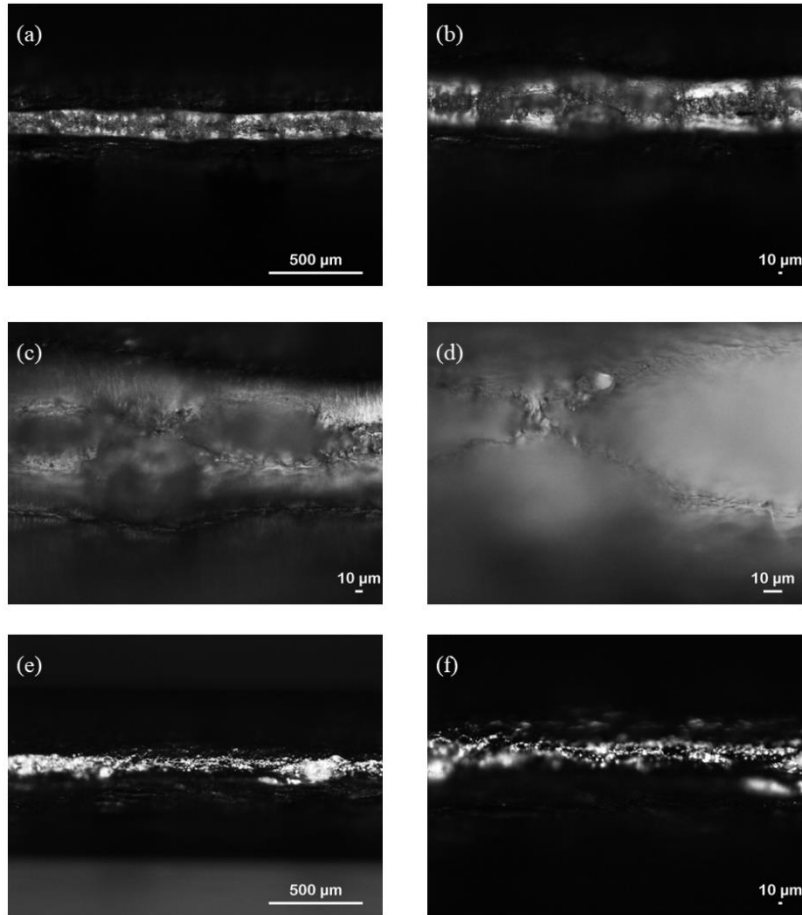


Şekil 63. 0,5 mm kalınlığında, 90° , çift kenar çentikli numune 2 için optik mikroskop görüntüleri. 0 cm'deki çentik ucundan yaklaşık 3 cm uzaklıktaki bir bölgeden alınan görüntüler. Mercek büyütme oranı (a) için $0,5 \times 10^4$ kat, (b) için 1×10^4 kat, (c) için 2×10^4 kat, (d) için ise 5×10^4 kattır.

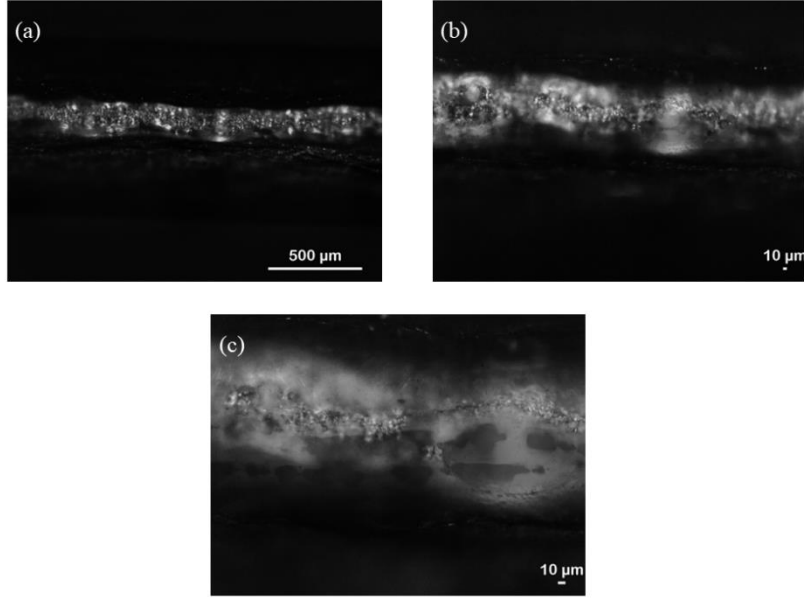
1 mm Kalınlığındaki Numuneler:

Bütün 0° numunelerde çatlak kanalının orta bölgesi pürüzlü, yan duvarları ise görece pürüzsüz bir yapıya sahiptir; çatlak bardak-bardaksı şekilde ilerlemektedir (bkz. Şekil 64(a-d)). Ayrıca çatlak, çekme doğrultusuna dik düzlemde sağa/sola sapmadan, görece düz bir şekilde ilerlemektedir. Çatlak kanalının genişliği genel olarak sabit kalmakla birlikte, bazı numunelerde nadir olarak kanal genişliğinin değiştiği, kanal merkezindeki pürüzlü bölgenin daraldığı görülmüştür (bkz. Şekil 64(e, f)).

90° numunelerde çatlak ilerlemesi genel olarak 0° numunelerdekine benzemektedir (bkz. Şekil 65(a-c)). Temel farklılık, çatlak kanalının genişlik ve derinliğinin bir numune boyunca sıkça değişmesidir. 0° numunelerde nadir olarak görülen kanal merkezindeki pürüzlü bölgenin daralması olayı, 90° numunelerde sıklıkla görülmektedir. Ayrıca çatlak, çekme doğrultusuna dik düzlemde sağa/sola saparak ilerlemektedir.



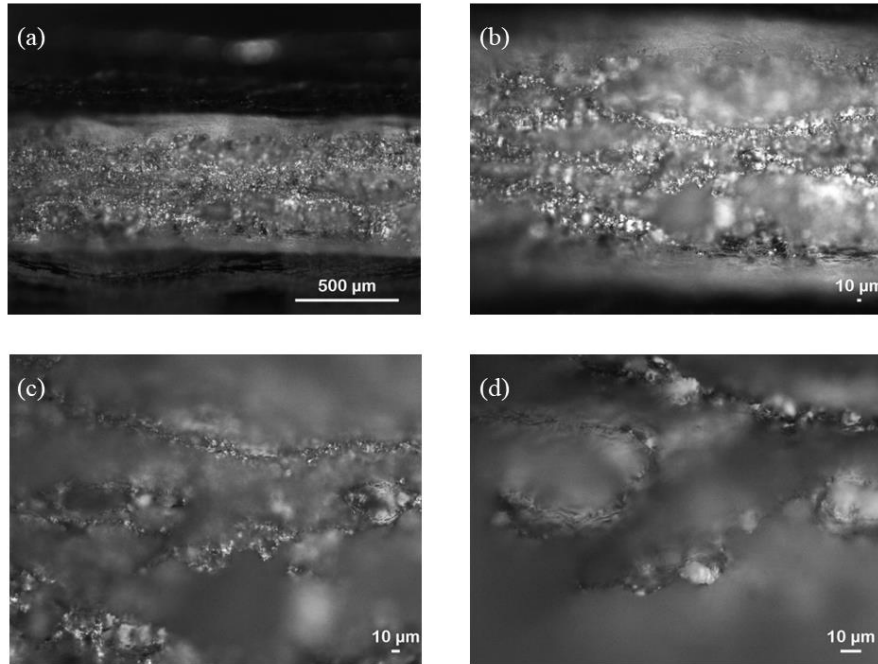
Şekil 64. 1 mm kalınlığında, 0° , çift kenar çentikli numune 2 için optik mikroskop görüntüleri. 0 cm'deki çentik ucundan yaklaşık: (a-d) 1,8 cm uzaklıktaki bir bölgeden alınan, (e, f) 4,2 cm uzaklıktaki bir bölgeden alınan görüntüler. Mercek büyütme oranı (a, e) için $0,5 \times 10^4$ kat, (b, f) için 1×10^4 kat, (c) için 2×10^4 kat, (d) için ise 5×10^4 kattır.



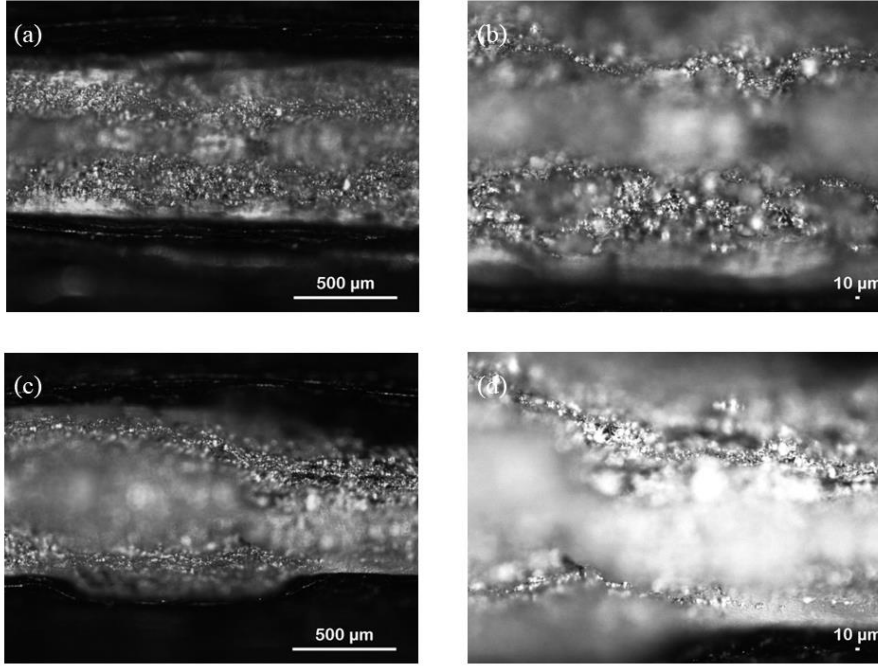
Şekil 65. 1 mm kalınlığında, 90°, çift kenar çentikli numune 4 için, 0 cm'deki çentik ucundan yaklaşık 7,4 cm uzaklıktaki bir bölgeden alınan optik mikroskop görüntüleri. Mercek büyütme oranı (a) için $0,5 \times 10^4$ kat, (b) için 1×10^4 kat, (c) için ise 2×10^4 kattır.

3 mm Kalınlığındaki Numuneler:

Bütün 0° numunelerde çatlak tipik bardak-bardaksı şekilde, çekme doğrultusuna dik düzlemde sağa/sola sapmadan, görece düz bir şekilde ilerlemektedir (bkz. Şekil 66(a-d)). Sınırlı da olsa



Şekil 66. 3 mm kalınlığında, 0°, çift kenar çentikli numune 5 için, 0 cm'deki çentik ucundan yaklaşık 3,3 cm uzaklıktaki bir bölgeden alınan optik mikroskop görüntüleri. Mercek büyütme oranı (a) için $0,5 \times 10^4$ kat, (b) için 1×10^4 kat, (c) için 2×10^4 kat, (d) için ise 5×10^4 kattır.



Şekil 67. 3 mm kalınlığında, 90°, çift kenar çentikli numune 1 için optik mikroskop görüntüleri. 0 cm'deki çentik ucundan yaklaşık: (a, b) 4,6 cm uzaklıktaki bir bölgeden alınan, (c, d) 5,7 cm uzaklıktaki bir bölgeden alınan görüntüler. Mercek büyütme oranı (a, b) için $0,5 \times 10^4$ kat, (b, d) için ise 1×10^4 kattır.

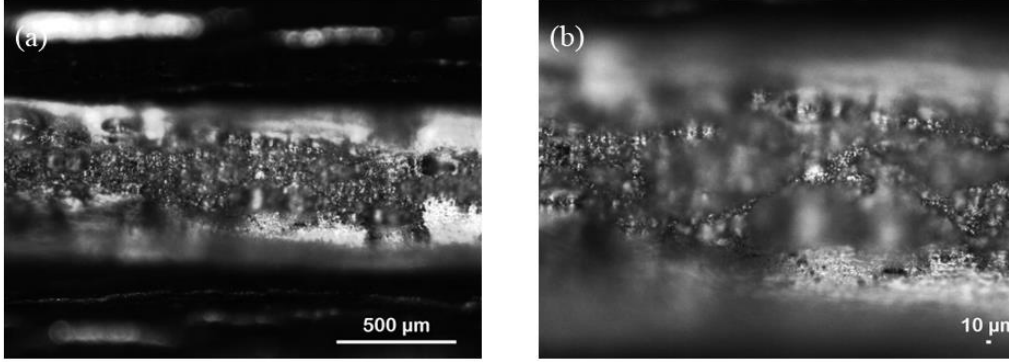
kimi bölgelerde eğik çatlak morfolojisi görülmüştür.

90° numunelerde de çatlak ilerlemesi genel olarak bardak-bardaksı şekilde gerçekleşse de (bkz. Şekil 67(a, b)), eğik çatlak morfolojisine sahip bölgeler 0° numunelerdekine göre daha uzundur. Şekil 67(c), 90° bir numunedeki bardak-bardaksı bölgeden (sol taraf) eğik bölgeye (sağ taraf) geçişi göstermektedir; Şekil 67(d)'de aynı bölge daha yüksek büyütme oranıyla gösterilmiştir. 90° numunelerin 0° numunelerden bir diğer farkı da, bu numunelerde çatlak kanal genişliğinin daha fazla değişmesidir.

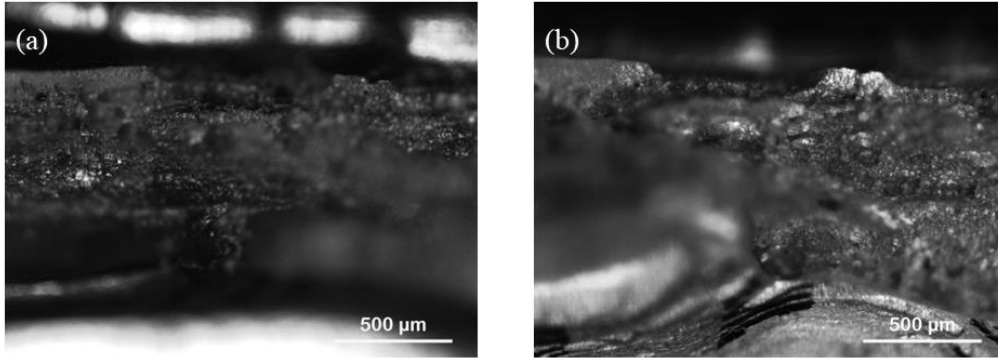
4 mm Kalınlığındaki Numuneler:

Çatlak morfolojisi, 3 mm numunelerdekine son derece benzerdir. 0° numunelerde çatlak tipik bardak-bardaksı şekilde, çekme doğrultusuna dik düzlemde sağa/sola sapmadan, görece düz bir şekilde ilerlemektedir (bkz. Şekil 68). Toplam altı numunenin beşinde, sınırlı da olsa kimi bölgelerde eğik çatlak morfolojisi görülmüştür. Yalnızca bir numunede çatlak tamamen bardak-bardaksı şekilde ilerlemekte, eğik çatlak morfolojisine sahip hiçbir bölge bulunmamaktadır.

90° numunelerin tümünde çatlak benzer şekilde ilerlemektedir (Şekil 69): çatlak, çekme doğrultusuna dik düzlemde sağa/sola sapmakta ve çatlak kanal genişliği sık sık değişmektedir. Çatlak, yer yer bardak-bardaksı, yer yer eğik bir morfolojiye sahiptir. Bardak-bardaksı morfolojiye sahip bölgeler çoğunlukta olsa da, azımsanamayacak ölçüde eğik çatlak bölgesi bulunmaktadır.



Şekil 68. 4 mm kalınlığında, 0°, çift kenar çentikli numune 6 için, 0 cm'deki çentik ucundan yaklaşık 5,2 cm uzaklıktaki bir bölgeden alınan optik mikroskop görüntüleri. Mercek büyütme oranı (a) için $0,5 \times 10^4$ kat, (b) için ise 1×10^4 kattır.



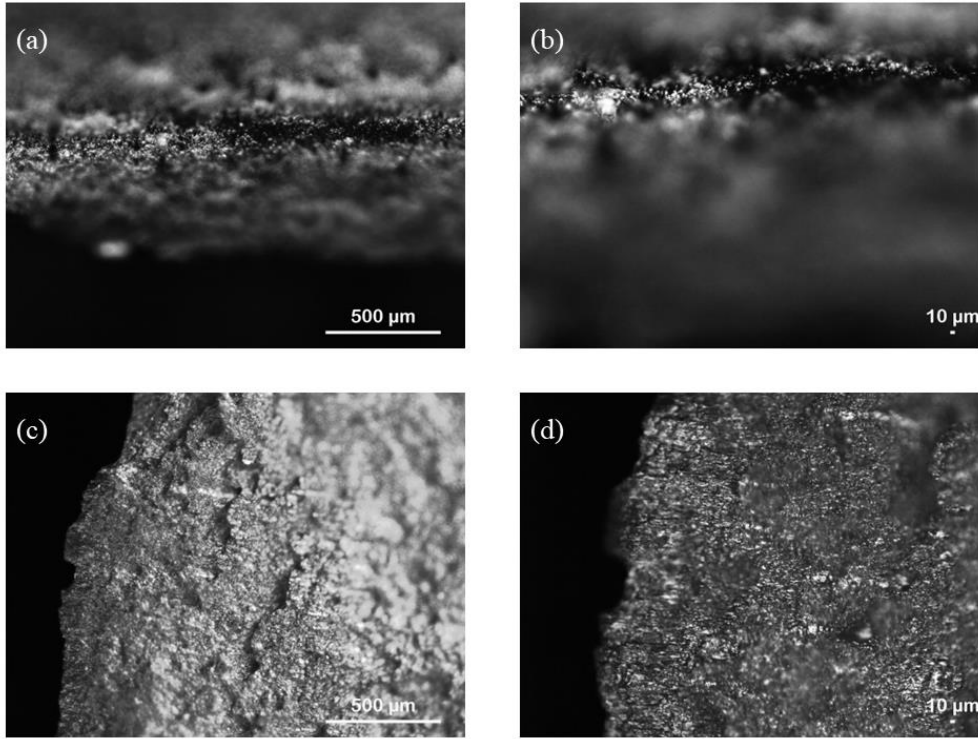
Şekil 69. 4 mm kalınlığında, 90°, çift kenar çentikli numune 1 için, 0 cm'deki çentik ucundan yaklaşık 4,4 cm uzaklıktaki bir bölgeden alınan optik mikroskop görüntüleri. Mercek büyütme oranı hem (a) hem (b) için $0,5 \times 10^4$ kattır. (a) ve (b) aynı bölgeden alınmış görüntülerdir. (b)'de üst duvarlar daha iyi görünsün diye numune hafifçe aşağı doğru yatırılmıştır.

5 mm Kalınlığındaki Numuneler:

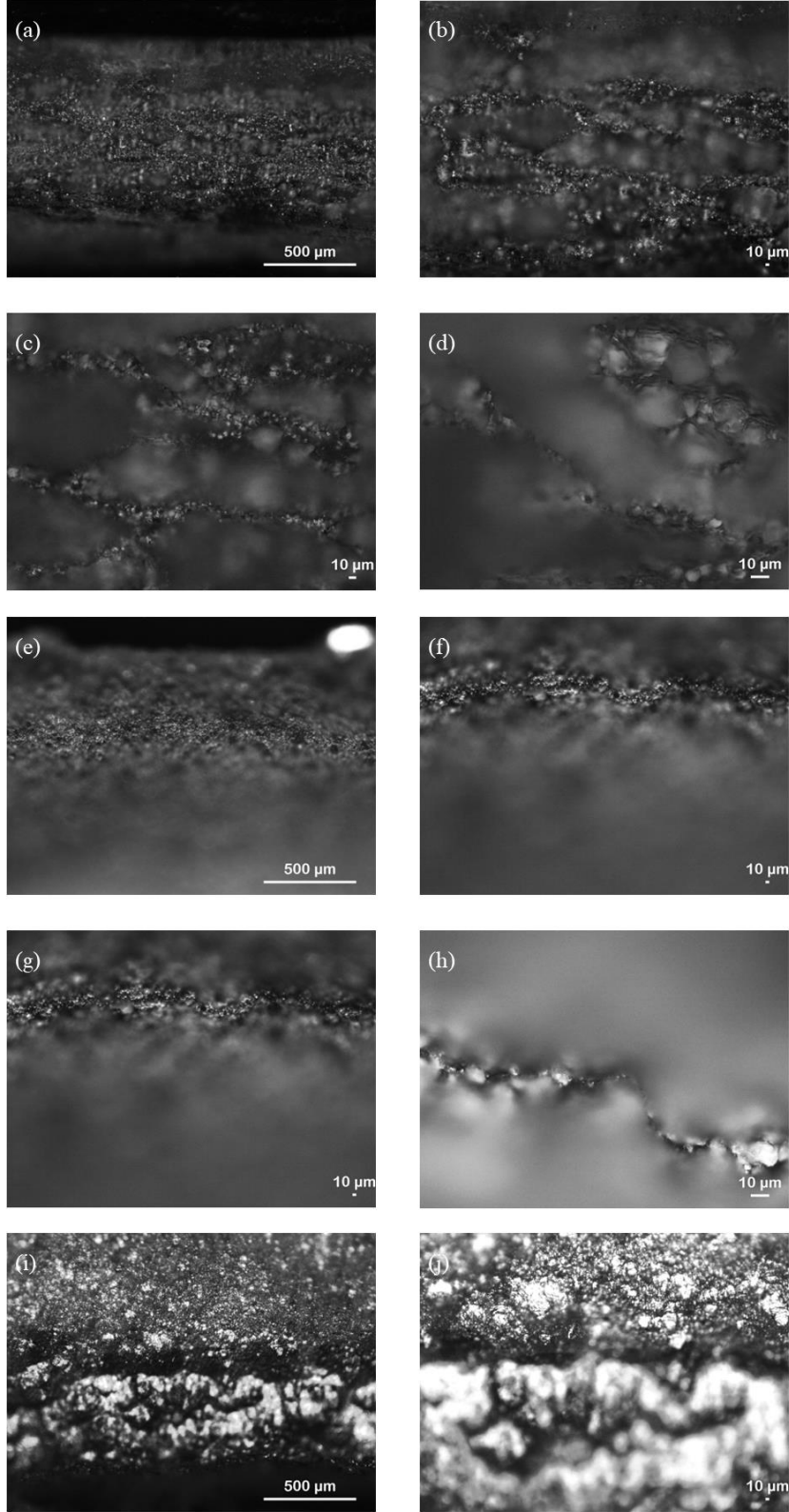
5 mm numuneler için elde edilen optik mikroskop sonuçları, çıplak gözle incelemede ulaşılan kanaatleri doğrular niteliktedir. 0° numunelerde çatlak, iki çentik ucundan uzana yaklaşık 1 cm uzunluğundaki iki bölgede bardak-bardaksı, geriye kalan bölgenin tamamında eğik bir morfolojiye sahiptir. Çatlak, uçlardaki bardak-bardaksı iki bölgenin arasında kalan kısımda, hep

aynı tarafa yaslanarak ilerlemektedir. Şekil 70(a) ve (b), 0° örnek bir numune için eğik çatlak morfolojisine sahip bir bölgeden alınmış görüntüleri, Şekil 70(c) ve (d) ise eğik çatlak bölgesindeki kanalın yan duvarını göstermektedir.

İki çentik ucundaki bardak-bardaksı bölgeler, 90° numunelerde de bulunmaktadır. 90° numunelerin üçü için çatlak, 0° numunelerdekiyle aynı şekilde, yani uçlardaki bardak-bardaksı bölgenin arasında kalan bölgede hep aynı tarafa yaslanarak eğik bir şekilde ilerlemektedir. Geriye kalan üç numune de ise çatlak, eğik olarak ilerlediği bölgede, plakanın önce bir (diyelim ki ön) yüzüne, sonra diğer (diyelim ki arka) yüzüne, sonra tekrar başlangıçta yaslandığı yüzüne yaslanarak, yani zig-zag yaparak ilerlemektedir. Şekil 71(a-d), örnek bir numune için çatlağın bardak-bardaksı morfolojiye sahip olduğu bir bölgeden farklı büyütme değerlerinde alınmış görüntülerini, Şekil 71(e-h) ise, aynı numune üzerinde çatlağın eğik morfolojiye sahip olduğu farklı bir bölgeden alınmış görüntülerini göstermektedir. Şekil 71(i) ve (j)'de, Şekil 71(e-h)'de gösterilen bölge için çatlak kanalının yan duvarı görülmektedir: şeklin üst kısmı yan duvara, alttaki parlak kısmı ise kanal duvarına karşılık gelmektedir.



Şekil 70. 5 mm kalınlığında, 0°, çift kenar çentikli numune 6 için, 0 cm'deki çentik ucundan yaklaşık 2,3 cm uzaklıktaki bir bölgeden alınan optik mikroskop görüntüleri. Mercek büyütme oranı (a, c) için $0,5 \times 10^4$ (b, d) için ise 1×10^4 kattır. (a, b) eğik çatlak morfolojisine sahip bir bölgeden alınmış görüntülerdir. (c, d)'de ise, eğik çatlak bölgesindeki kanalın yan duvarı gösterilmektedir.



Şekil 71. 5 mm kalınlığında, 90°, çift kenar çentikli numune 1 için optik mikroskop görüntüleri. 0 cm'deki çentik ucundan yaklaşık: (a-d) 1,2 cm uzaklıktaki bir bölgeden alınan, (e-j) 4,3 cm uzaklıktaki bir bölgeden alınan görüntüler. Mercek büyütme oranı (a, e, i) için $0,5 \times 10^4$ kat, (b, f, j) için 1×10^4 kat, (c, g) için 2×10^4 kat, (d, h) için ise 5×10^4 kattır.

4.2.3 Çatlak Morfolojileri: TEM Bulguları

Gözle ve optik mikroskopla yapılan incelemelerde; belirli bir plaka kalınlığı, çentik tipi (çift veya tek kenar çentikli) ve haddeleme doğrultusu için çatlak morfolojini en iyi temsil ettiği belirlenen plakalar, TEM (FEI XL-40, 20 kV) altında incelenmiş, çatlak morfolojisinin ayrıntıları (çatlak tipi, boşluk şekli, büyüklüğü ve dağılımı) görüntülenmiştir. TEM görüntüleri, incelenen bütün plakalar için çatlak morfolojisinin ya tamamen bardak-bardaksı (bkz. Şekil 2(c)) ya da plakanın bazı kısımlarında bardak-bardaksı bazı kısımlarında eğik olduğunu (bkz. Şekil 2(a)) ortaya koymuştur.

Bardak-bardaksı ilerleyen çatlaklarda, çatlak kanalı merkezindeki boşlukları çevreleyen plaka malzemesinin çekme doğrultusunda uzadığı ve çatlak merkezinin “lifli (fibrous)” bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Lifli yapı; boşluk çekirdeklenmesi, büyümesi ve birleşmesi aşamalarıyla gerçekleşen sünek kırılma yüzeyleri için tipiktir (bkz. örneğin Anderson, 2005). Kanal merkezindeki lifli bölgenin sağ ve sol yanlarında, çok az sayıda, boyutları küçük ve birbirlerinden uzakta boşlukların bulunduğu pürüzsüz yüzeyler yer almaktadır. Bu pürüzsüz yüzeylere sünek kırılma mekaniği terminolojisinde “kesme dudağı (shear lip)” adı verilmektedir. Eğik ilerleyen çatlaklarda ise, özellikle kanal merkezinden uzak, plaka yüzeylerine yakın bölgelerdeki boşlukların kayma gerilmesi altında yamulduğu açık olarak görülmektedir.

Şekil 35’te gösterildiği gibi, TEM altında incelenen her plaka için çatlak bölgesi, yükseklikleri 10 mm, uzunlukları 30 ile 50 mm arasında değişen parçalara bölünmüştür. Yani bir plaka üzerinde ilerleyen çatlak için farklı bölgeleri temsil eden en az iki en fazla beş numune bulunmaktadır. TEM çalışmaları sırasında her bir numune ayrı ayrı incelenmiş, çatlak morfolojisi hakkında önemli bilgiler sunduğu düşünülen numunelerin farklı kısımlarından görüntüler alınmıştır. Aşağıda, proje kapsamında incelenen her bir plaka tipi için elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

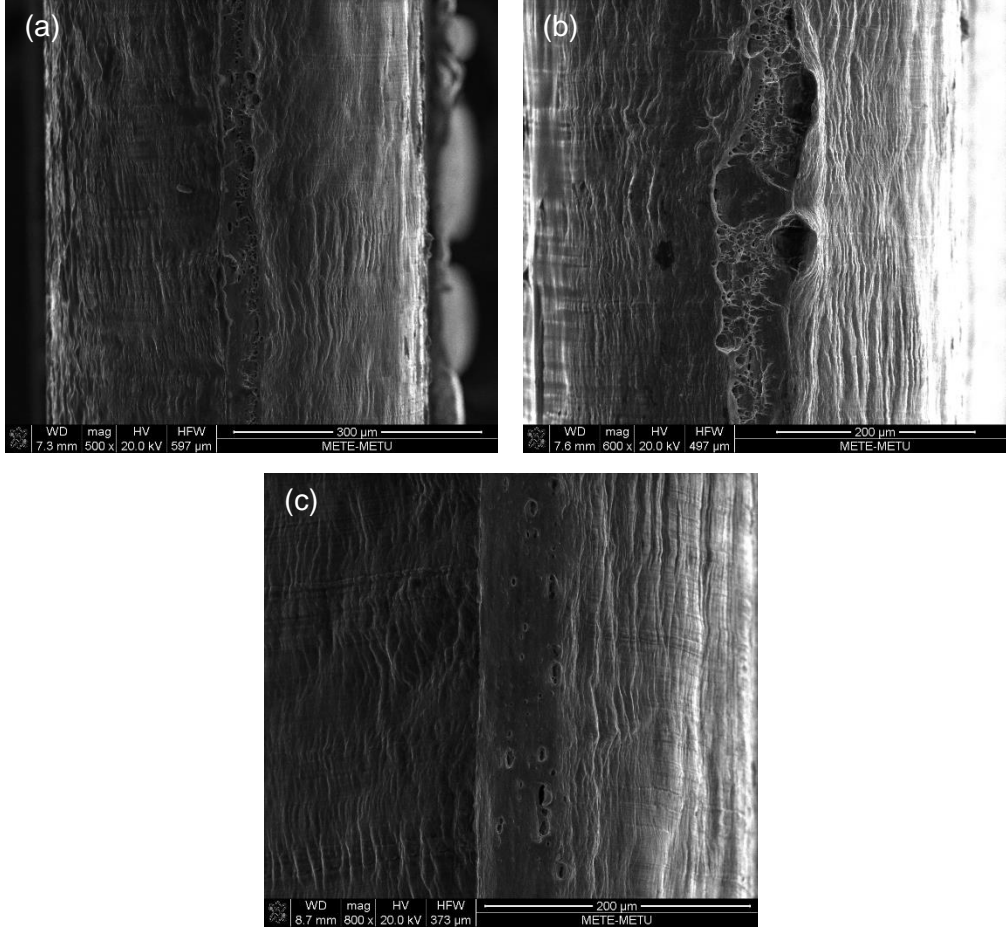
Tek Kenar Çentikli Numuneler

0,5 mm Kalınlığındaki Plakalar:

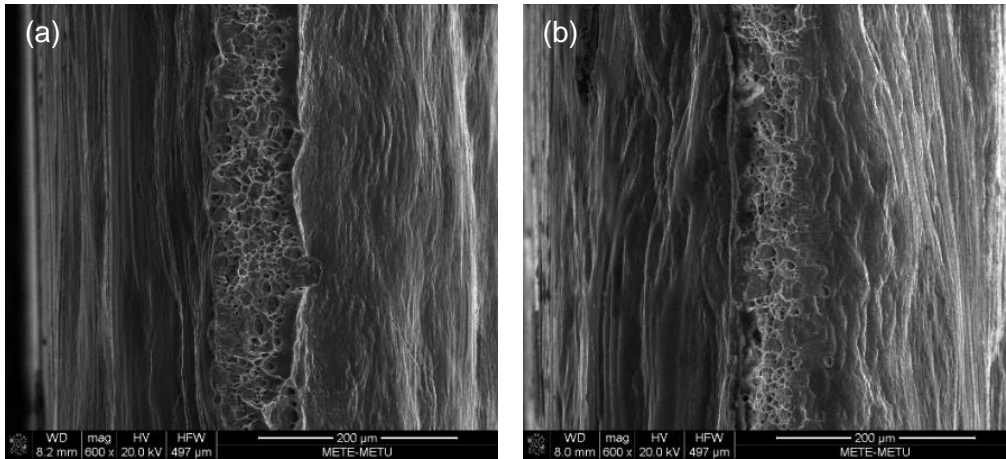
0° plakada çatlak genel olarak bardak-bardaksı morfolojiye sahiptir (bkz. Şekil 72(a)). Ancak lifli yapı, çatlak boyunca kanal merkezinden ziyade sağ kanal duvarına yakın bir hatta ilerlemektedir. Ayrıca lifli yapı çatlak boyunca daralıp genişlemekte kimi zaman neredeyse yok olmaktadır (bkz. Şekil 72(b, c)).

90° plakada da bardak-bardaksı morfoloji baskın olmakla beraber, çatlağın eğik bir yapıya sahip olduğu bölgeler de mevcuttur (bkz. Şekil 73(a, b)). Tıpkı 0° plakada olduğu gibi lifli yapı

çatlak boyunca daralıp genişlemekte, bazı bölgelerde kanalının neredeyse tamamını kaplamaktadır.



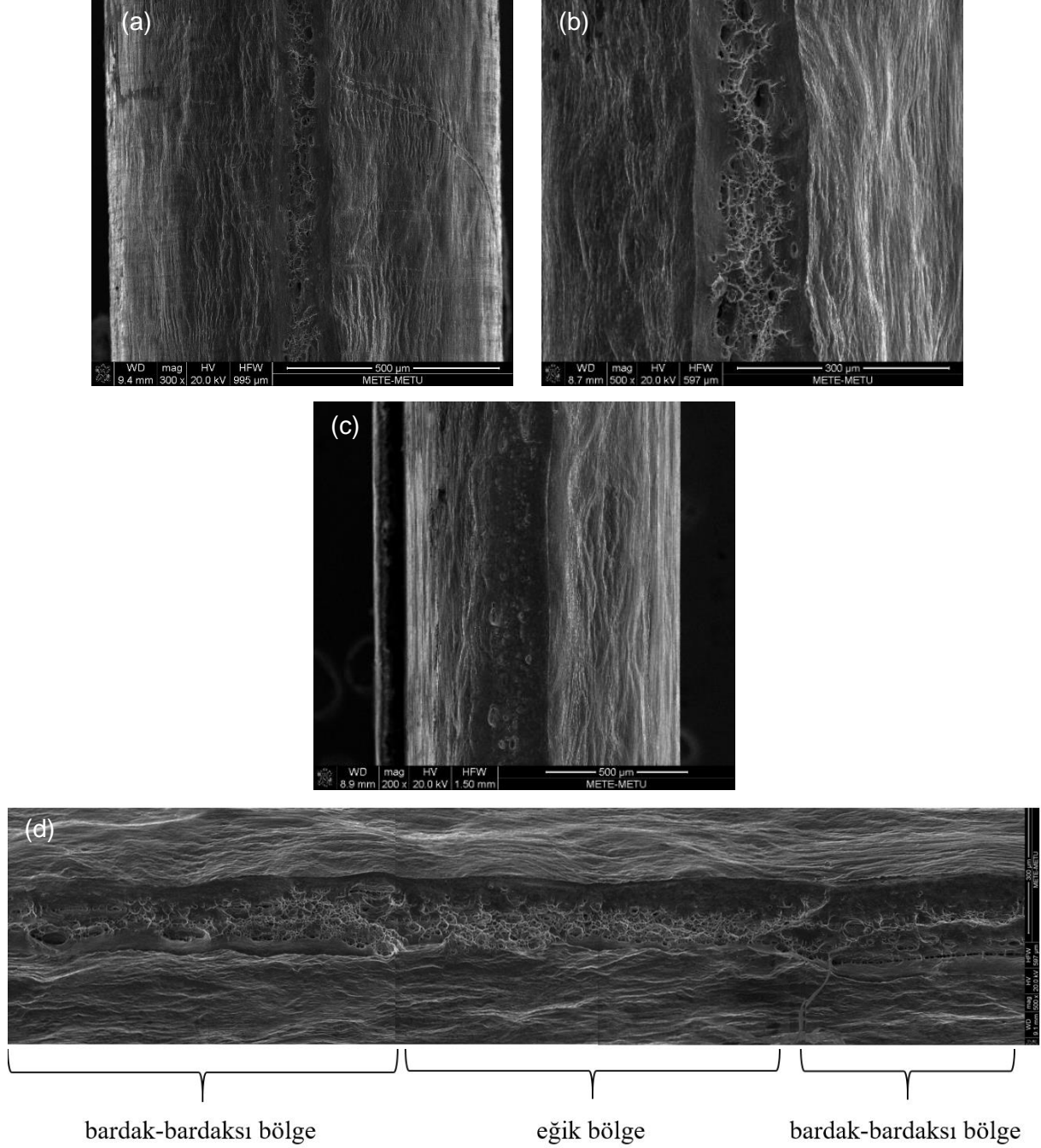
Şekil 72. 0,5 mm kalınlığında, 0°, tek kenar çentikli bir plaka için TEM görüntüleri. (a) Çatlak kanalının genel görüntüsü. (b) Lifli yapının kanalın (neredeyse) tamamını kapladığı bir bölge. (c) Lifli yapının çok daraldığı bir bölge.



Şekil 73. 0,5 mm kalınlığında, 90°, tek kenar çentikli bir plaka için TEM görüntüleri. (a) Lifli yapının kanalın (neredeyse) tamamını kapladığı bir bölge. (b) Çatlağın eğik ilerlediği bir bölge.

1 mm Kalınlığındaki Plakalar:

0° plakada çatlak hemen her bölgede bardak-bardaksı morfolojiye sahiptir. Çatlak boyunca kimi bölgelerde kanal genişliği değişiklik göstermekte ve lifli yapı kanal merkezinden hafifçe sapmaktadır. Şekil 74(a), plaka boyunca uzanan tipik çatlak morfolojisine bir örnek göstermektedir.

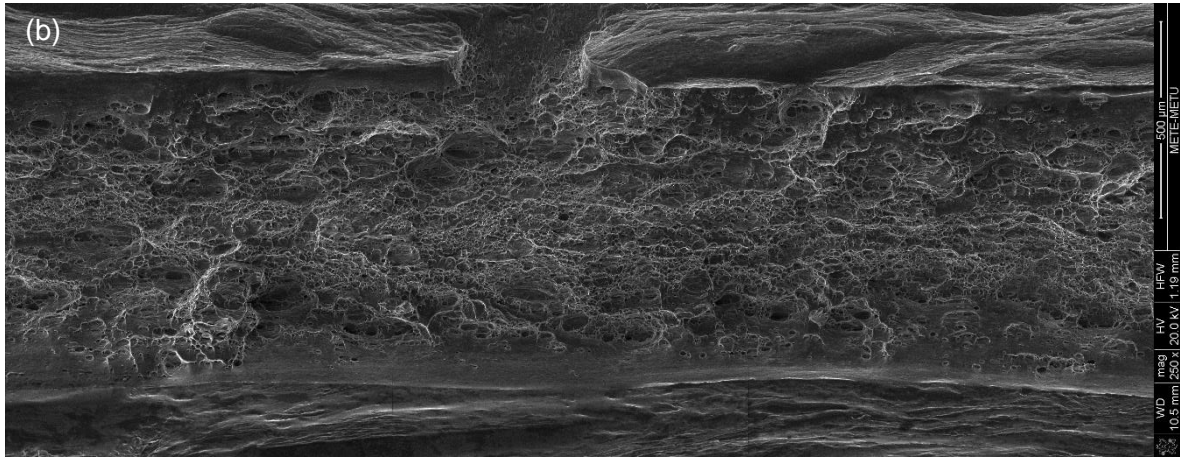
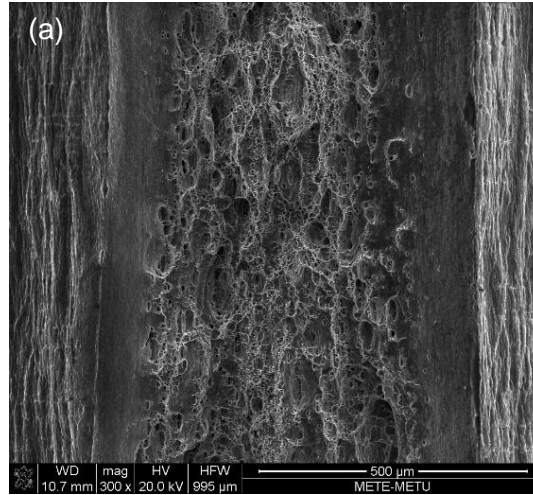


Şekil 74. (a) 1 mm kalınlığında, 0°, tek kenar çentikli bir plaka için çatlak kanalının genel görüntüsü. 1 mm kalınlığında, 90°, tek kenar çentikli bir plaka için (b) çatlak kanalının genel görüntüsü, (c) lifli yapının daraldığı bir bölge, (d) çatlak morfolojisinin değiştiği bir bölgenin panoramik görüntüsü.

Benzer şekilde 90° plaka için de bardak-bardaksı çatlak morfolojisinin baskın olduğu görülmektedir (bkz. Şekil 74(b)). Bu plakada kanal genişliği genel olarak sabit kalırken, lifli bölgenin genişliği sık sık değişmektedir (bkz. Şekil 74(c)). Ayrıca, Şekil 74(d)'de görüleceği üzere, çatlak kimi bölgelerde eğik olarak ilerlemektedir.

3 mm Kalınlığındaki Plakalar:

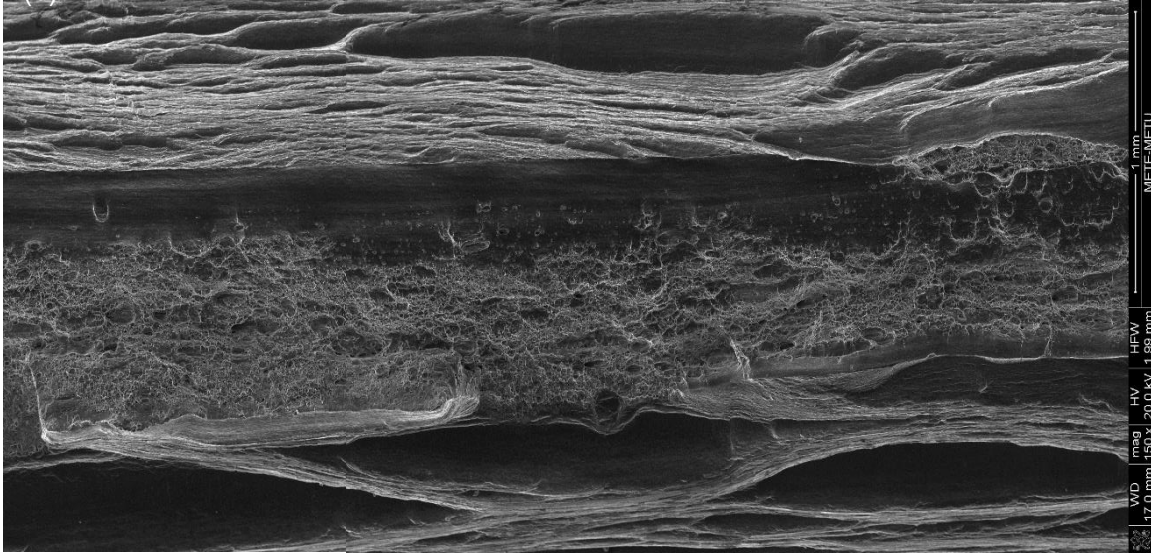
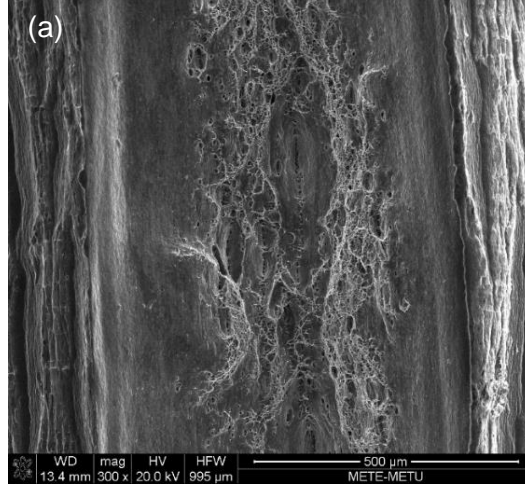
0° plakada çatlak hemen her bölgede tipik bardak-bardaksı morfolojiye sahiptir (bkz. Şekil 75(a)). Çatlak; kanal genişliği, lifli bölgenin konumu ve genişliği itibarıyla 0,5 ve 1 mm plakalara nispeten çok daha kararlı bir şekilde ilerlemektedir. Şekil 75(b)'de görüleceği üzere, 90° plaka için de çatlak genel itibarıyla bardak-bardaksı olarak ilerlese de, kimi bölgelerde eğik morfoloji göze çarpmaktadır.



Şekil 75. (a) 3 mm kalınlığında, 0° , tek kenar çentikli bir plaka için çatlak kanalının genel görüntüsü. (b) 3 mm kalınlığında, 90° , tek kenar çentikli bir plaka için bardak-bardaksı iki bölge (sağda ve solda) arasında kalan eğik morfolojiye sahip bir bölge.

4 mm Kalınlığındaki Plakalar:

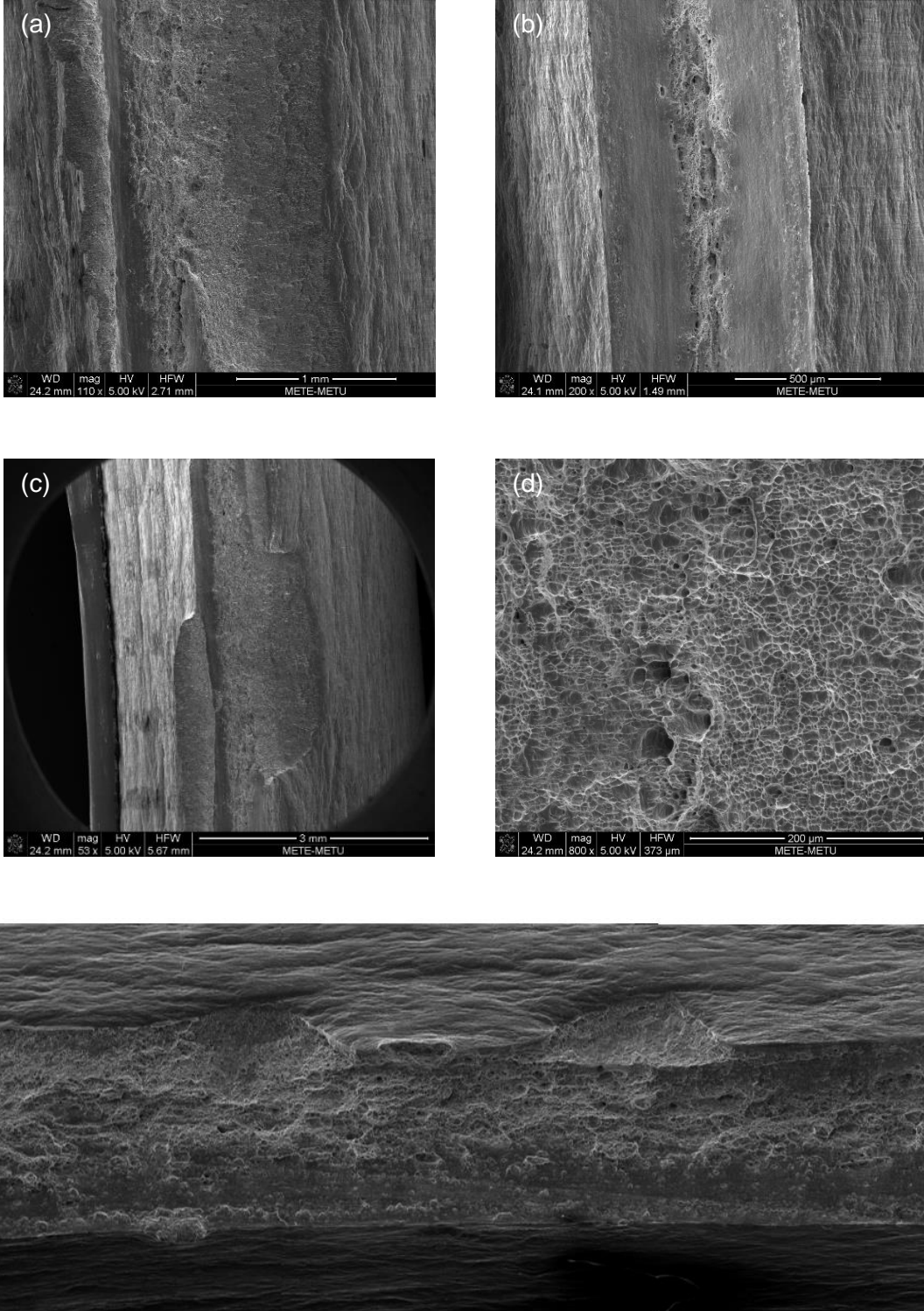
4 mm kalınlığındaki plakalar için çatlak morfolojisi, 3 mm kalınlığındaki plakalardakine çok benzemektedir. Çatlak, 0° plakada her bölgede bardak-bardaksı ilerlerken (bkz. Şekil 76(a)), 90° plakada sınırlı da olsa kimi bölgelerde eğik bir morfolojiye sahiptir (bkz. Şekil 76(b)).



Şekil 76. (a) 4 mm kalınlığında, 0°, tek kenar çentikli bir plaka için çatlak kanalının genel görüntüsü. (b) 4 mm kalınlığında, 90°, tek kenar çentikli bir plaka için bardak-bardaksı morfolojiden (solda) eğik morfolojiye (sağda) geçişin panoramik görüntüsü.

5 mm Kalınlığındaki Plakalar:

Bütün diğer kalınlıktaki plakalardan farklı olarak, 5 mm kalınlığındaki hem 0° hem 90° plakalarda kimi bölgelerde bardak-bardaksı morfolojiye rastlansa da, çatlak genel olarak eğik bir şekilde ilerlemektedir. Şekil 77(a) ve (b) 0° bir numune için sırasıyla eğik ve bardak-bardaksı bölgelere örnek sunmaktadır. Bu plakaları diğer kalınlıktaki plakalardan ayıran bir diğer husus, çatlak ilerlemesi esnasında çatlağın yan duvarlarından büyük parçaların kopmasıdır: Şekil 77



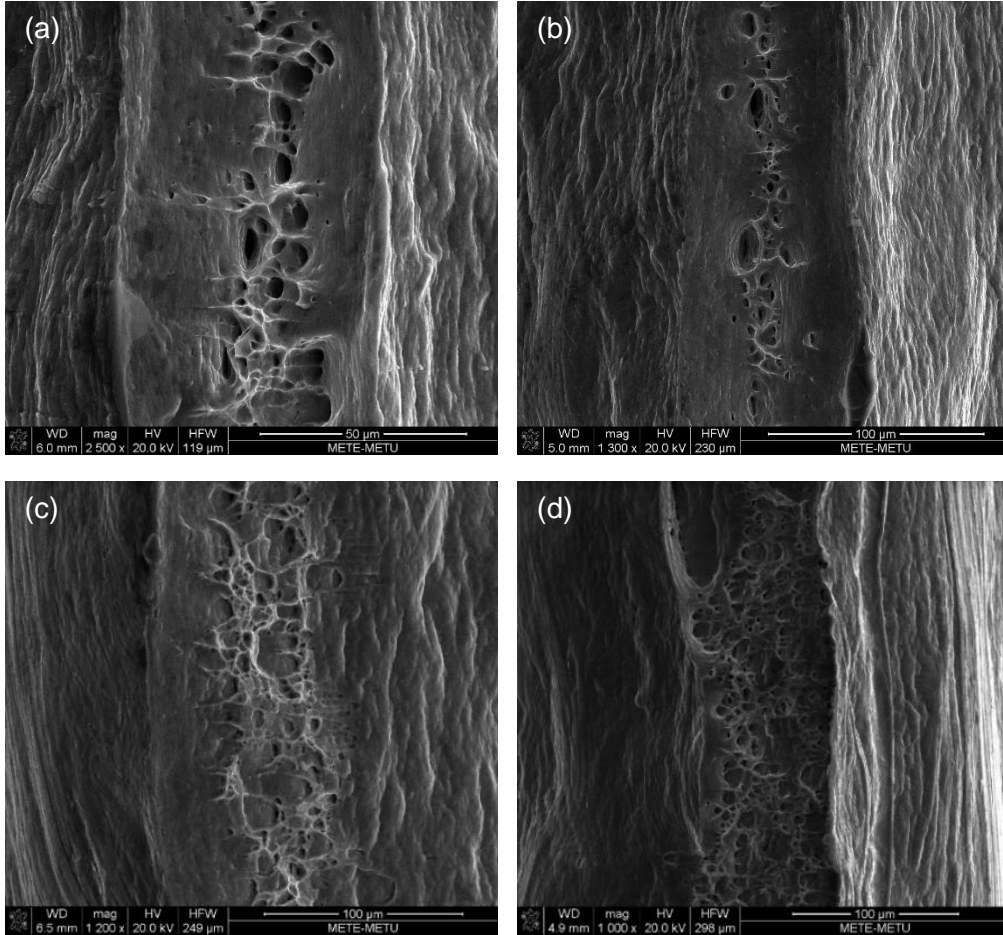
Şekil 77. 5 mm kalınlığında, 0°, tek kenar çentikli bir plaka için: (a) çatlağın eğik ilerlediği bir bölge, (b) çatlağın bardak-bardaksı ilerlediği bir bölge, (c) çatlağın sol duvarından büyük bir parçanın kopmuş olduğu bölge ve (d) Şekil (c)'de gösterilen bölgenin merkezi. (e) 5 mm kalınlığında, 90°, tek kenar çentikli bir plakada çatlağın eğik olarak ilerlediği bir bölgenin panoramik görüntüsü.

(c), 0° plakada çatlağın sol duvarından büyük bir parça kopmuş bölgeyi göstermektedir. Şekil 77(d)'de görüleceği üzere, parça kopan bölgenin merkezinde boşluk büyümesi ve birleşmesinin bariz olduğu lifli bir yapı hâkimdir; parça kopması da sünek kırılma yoluyla gerçekleşmiştir. Şekil 77(e)'de, 90° plakada çatlağın eğik olarak ilerlediği bir bölgenin panoramik görüntüsü verilmiştir.

Çift Kenar Çentikli Numuneler

0,5 mm Kalınlığındaki Plakalar:

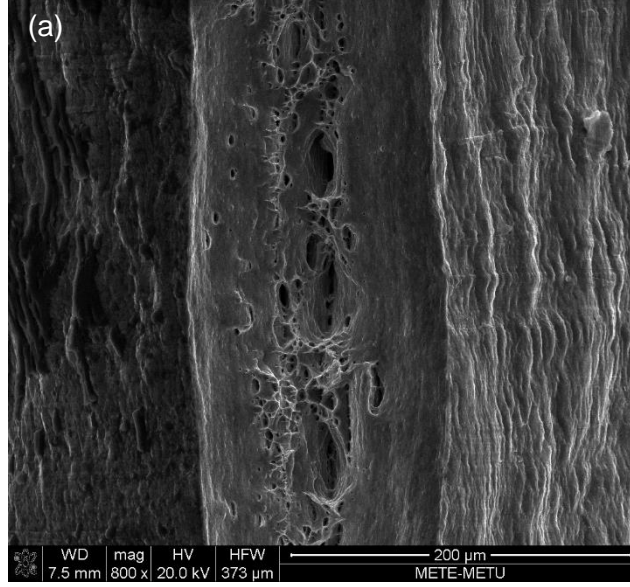
0° plakada çatlak hemen her bölgede tipik bardak-bardaksı morfolojiye sahiptir (bkz. Şekil 78(a)). 90° plakada da hâkim çatlak morfolojisi bardak-bardaksı olmakla birlikte (bkz. Şekil 78(b)), çatlak kimi bölgelerde eğik olarak ilerlemektedir (bkz. Şekil 78(c)). Her iki plakada da lifli yapıdaki boşluk yoğunluğu çatlak boyunca değişse de, bu değişim 90° plakada daha belirgindir (bkz. Şekil 78(d)).



Şekil 78. (a) 0,5 mm kalınlığında, 0°, çift kenar çentikli bir plaka için çatlak kanalının genel görüntüsü. 0,5 mm kalınlığında, 90°, çift kenar çentikli bir plaka için: (b) çatlağın bardak-bardaksı ilerlediği bir bölge, (c) çatlağın eğik ilerlediği bir bölge, (d) lifli yapının kanalın (neredeyse) tamamını kapladığı bir bölge.

1 mm Kalınlığındaki Plakalar:

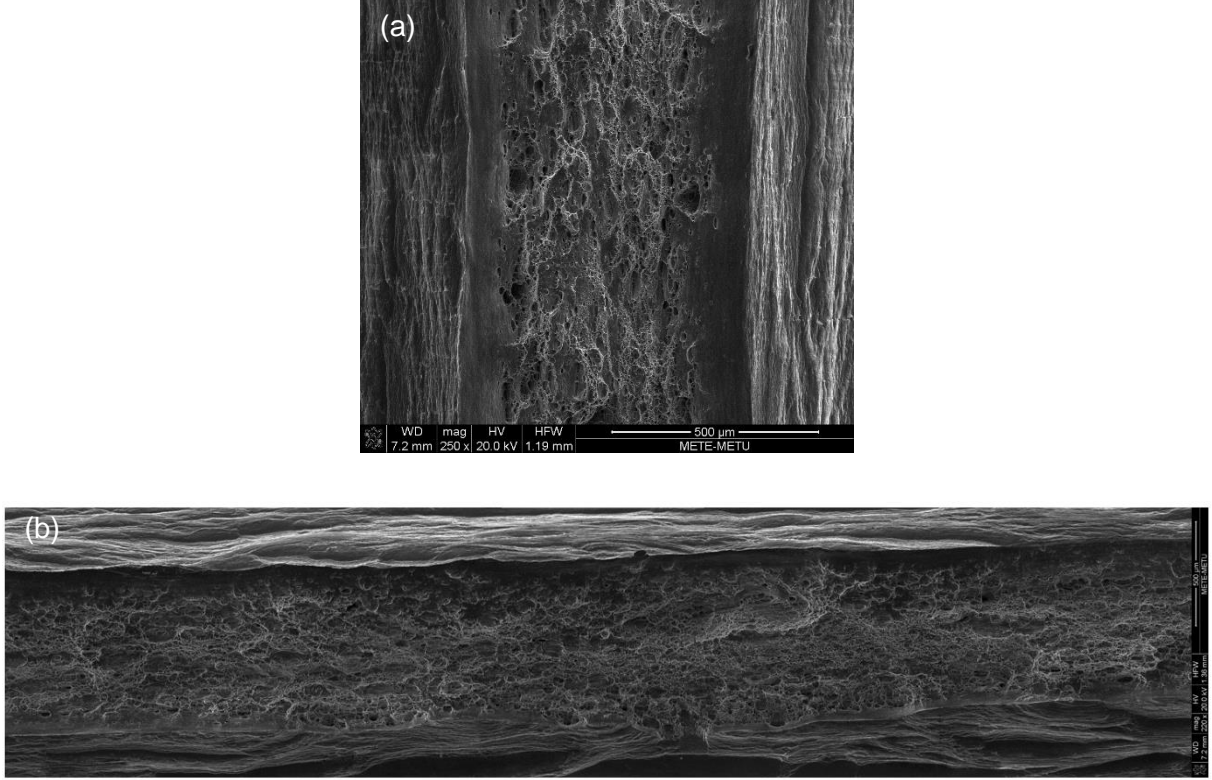
Gerek 0° gerekse 90° plakada çatlak ilerlemesi, 0,5 mm plakalardakine çok benzemektedir. Çatlak, 0° plakanın (neredeyse) tamamında (bkz. Şekil 79(a)), 90° plakanın ise genelinde bardak-bardaksı olarak ilerlemektedir (bkz. Şekil 79(b)).



Şekil 79. (a) 1 mm kalınlığında, 0° , çift kenar çentikli bir plaka için çatlak kanalının genel görüntüsü. (b) 1 mm kalınlığında, 90° , çift kenar çentikli bir plaka için çatlağın panoramik görüntüsü.

3 mm Kalınlığındaki Plakalar:

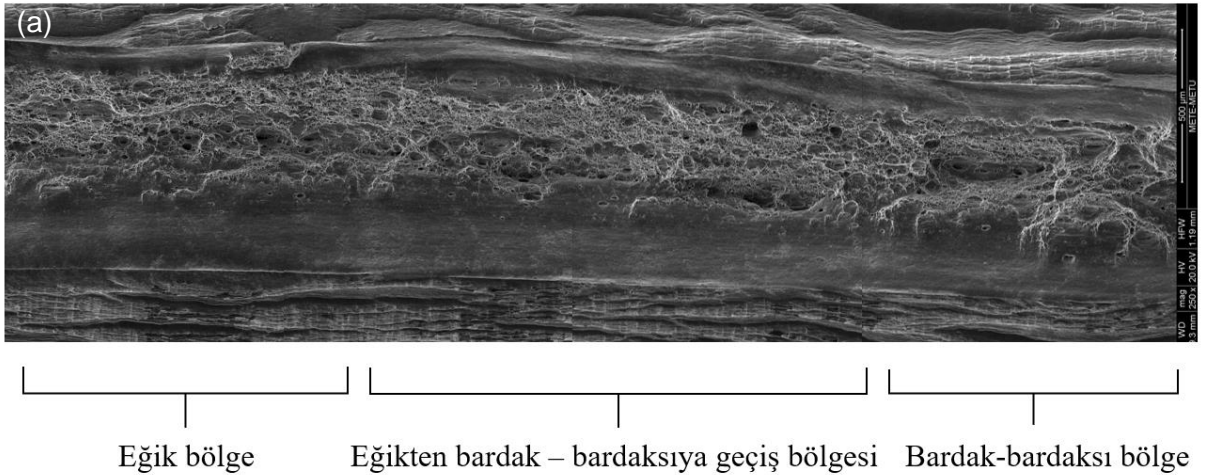
Tıpkı 0,5 ve 1 mm plakalarda olduğu gibi, çatlak, 0° plakanın (neredeyse) tamamında bardak-bardaksı bir şekilde ilerlerken, 90° plakanın sınırlı da olsa kimi bölgelerinde eğik olarak ilerlemektedir. Şekil 80(a) ve (b), sırasıyla, 0° plaka için genel çatlak morfolojisini ve 90° plaka için çatlağın eğik ilerlediği bir bölgeyi göstermektedir. Her iki şekilde de görüleceği üzere, boşlukların yoğun olduğu lifli bölgenin kanalın toplam genişliğine oranı, bu plakalar için 0,5 ve 1 mm plakalardakine oranla daha yüksektir.

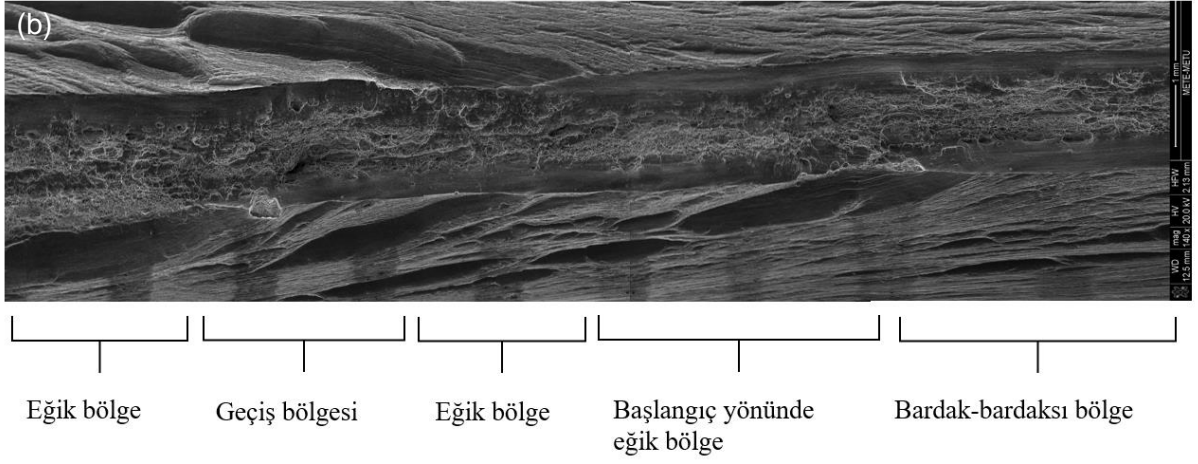


Şekil 80. (a) 3 mm kalınlığında, 0°, çift kenar çentikli bir plaka için çatlak kanalının genel görüntüsü. (b) 3 mm kalınlığında, 90°, çift kenar çentikli bir plaka için çatlağın eğik ilerlediği bölgenin panoramik görüntüsü.

4 mm Kalınlığındaki Plakalar:

Her iki doğrultu için de çatlak genel olarak bardak-bardaksı bir morfolojiye sahip olmakla birlikte, kimi bölgelerde eğik çatlak ilerlemesi de görülmüştür. 90° plakada eğik bölgelerin toplam uzunluğu, 0° plakadakine kıyasla daha fazladır. Şekil 81(a) ve (b), sırasıyla, 0° ve 90° plakalar için, çatlak morfolojisinin değiştiği, örnek bölgeler göstermektedir.

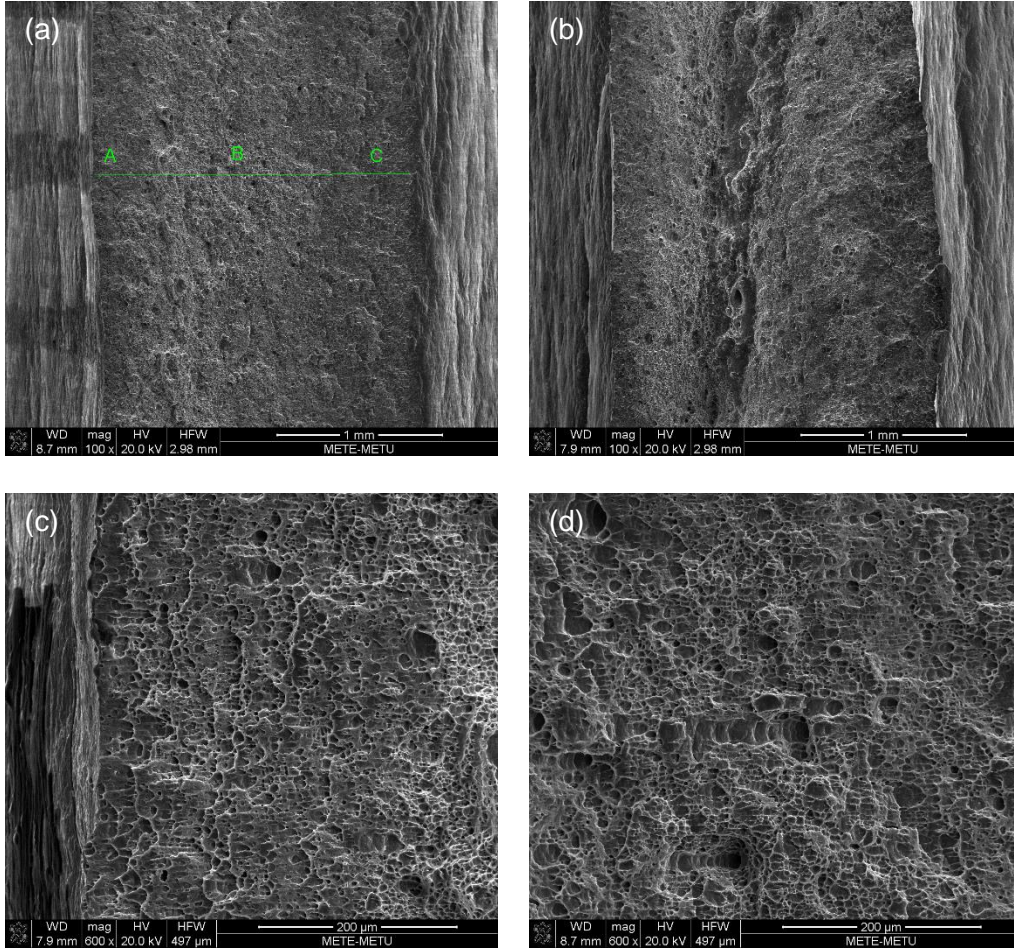


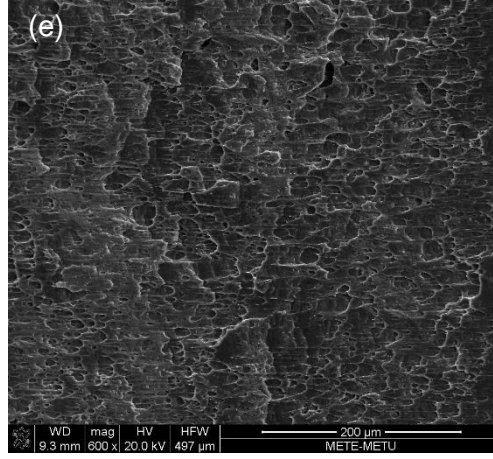


Şekil 81. 4 mm kalınlığında çift kenar çentikli plakalar için, çatlak morfolojisinin değiştiği örnek bölgelerin panoramik görüntüsü: (a) 0° plaka, (b) 90° plaka.

5 mm Kalınlığındaki Plakalar:

5 mm kalınlığındaki plakalarda, diğer bütün kalınlıktaki plakalardan farklı olarak, hem 0° hem 90° için eğik morfolojinin baskın olduğu görülmüştür. Şekil 82(a) ve (b), sırasıyla 0° ve 90°



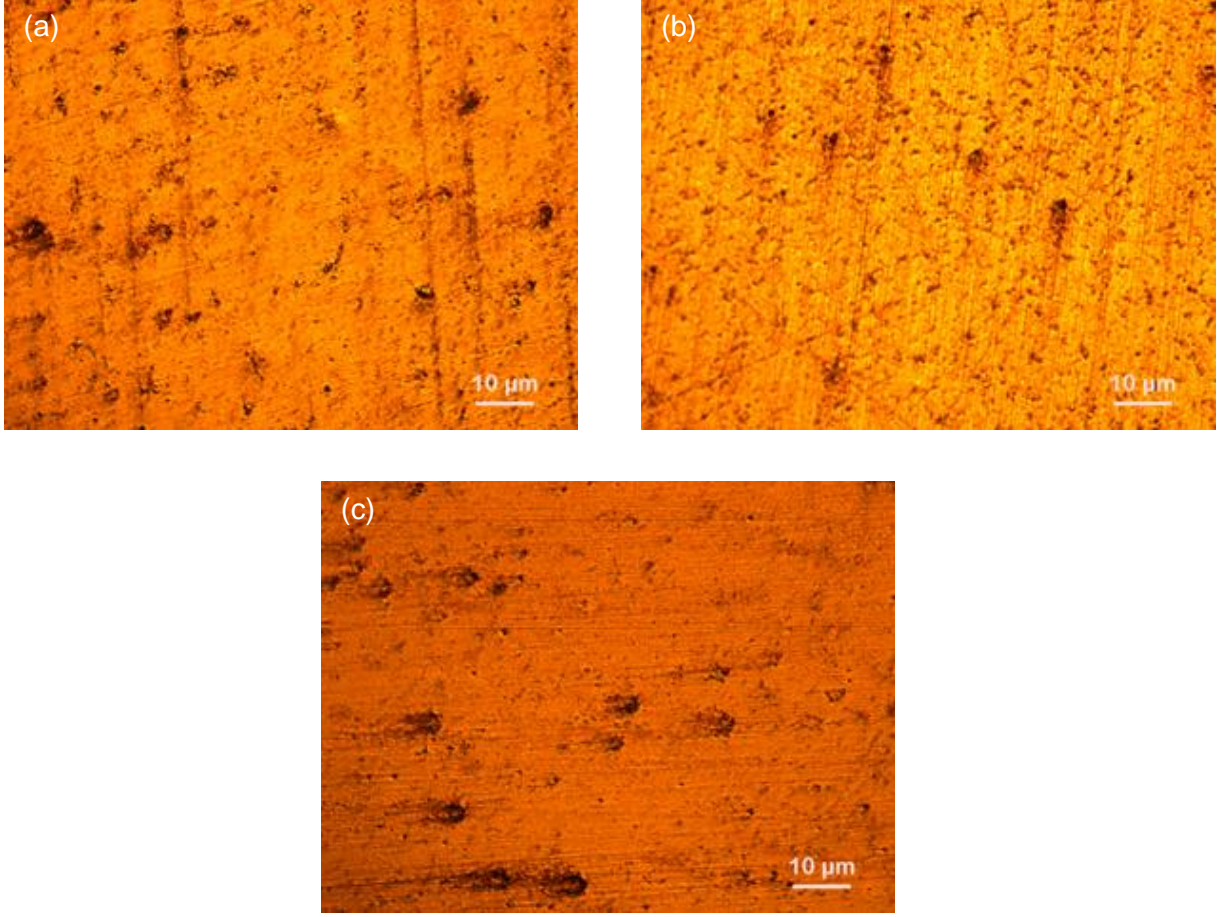


Şekil 82. 5 mm kalınlığında çift kenar çentikli plakalar için, çatlak morfolojisinin değiştiği örnek bölgelerin görüntüsü: (a) 0° plaka, (b) 90° plaka. Şekil (a)'daki üç bölgenin büyütülmüş görüntüleri: (c) A bölgesi, (d) B bölgesi ve (e) C bölgesi.

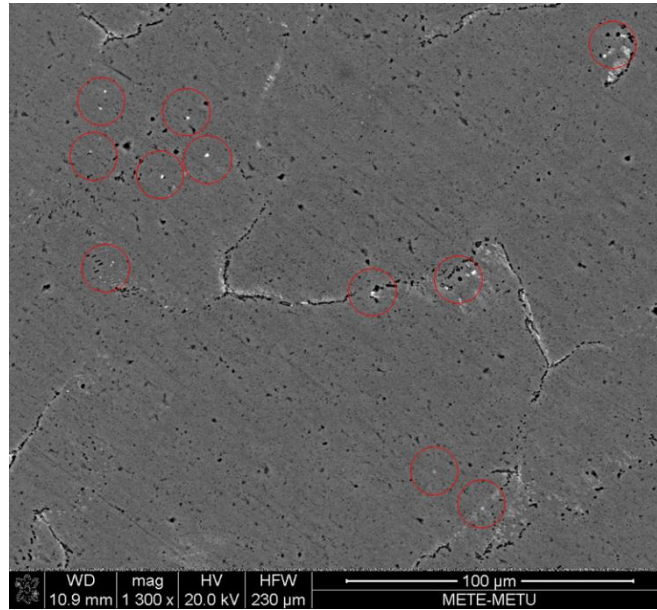
plakalar için baskın eğik çatlak morfolojisini göstermektedir. Her iki plakada da kırılma yüzeyinin neredeyse tamamı boşluklarla doludur. 0° plakada çatlak kanalı, “A, B ve C” olmak üzere üç bölgeye ayrılmıştır. Bu üç bölgenin büyütülmüş görüntüleri, boşlukların, özellikle kanal kenarlarına yakın A ve C bölgelerinde, kesme kuvveti etkisinde yamulduğunu açık bir şekilde göstermektedir (bkz. Şekil 82(c-e)).

4.2.4 İkinci Faz Fe Parçacıklarının Büyüklük Dağılımları

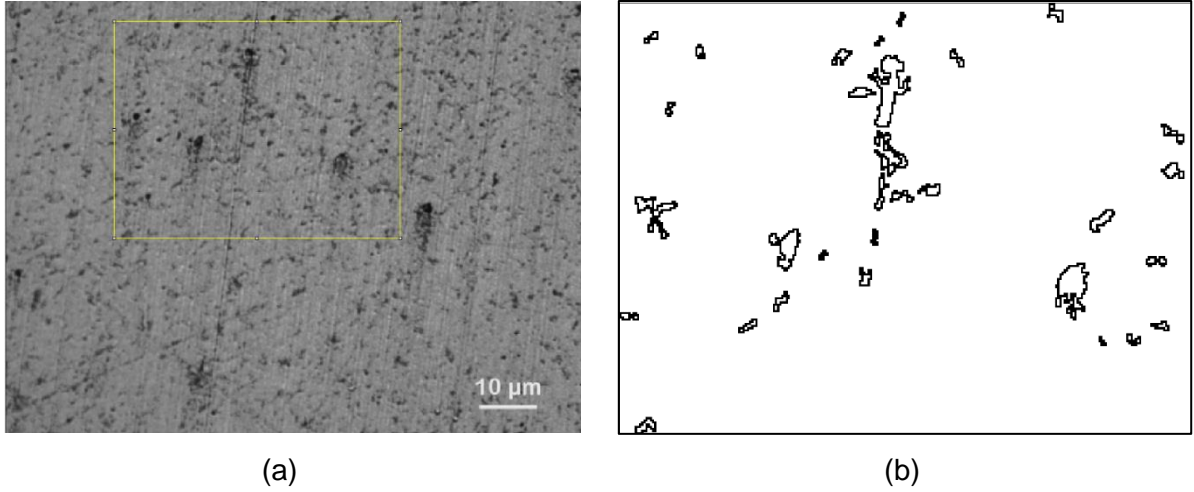
Şekil 83(a-c), proje kapsamında test edilen, sırasıyla 3, 4 ve 5 mm kalınlıktaki Al 1050 H14 plakaların optik mikroskop görüntülerine birer örnek sunmaktadır. Görüntülerdeki turuncu zemin alüminyum yüzeye, siyah noktalar/bölgeler ise ikinci faz Fe parçacıklarına karşılık gelmektedir. Siyah bölgelerin Fe parçacıklara karşılık geldiği, 5 mm kalınlığında bir numune için TEM cihazının enerji dağılımlı X-ışını analizi (EDX) fonksiyonu kullanılarak tespit edilmiştir (bkz. Şekil 84). Bu işlemin ardından, üç farklı kalınlıktaki plaka için farklı bölgelerden alınmış optik mikroskop görüntüleri ImageJ yazılımıyla incelenmiş ve parçacık boyut analizi yapılmıştır. ImageJ yazılımı, öncelikle optik mikroskop görüntüsü içinde seçilen bir bölgedeki parçacıkları tespit etmekte, ardından parçacık boyut analizi yapmaktadır. Örnek olarak, Şekil 85(a) 4mm kalınlıktaki plakanın optik mikroskop görüntüsünde seçilen (sarı dikdörtgenin içinde kalan) bölgeyi, Şekil 85(b) ise bu bölgedeki parçacık dağılımını göstermektedir. Optik mikroskop görüntülerinin çözünürlüğü parçacık boyutuna oranla görece düşük olduğu için, ImageJ birbirine çok yakın parçacıkları tek bir parçacık gibi algılamaktadır. Bu durum proje kapsamındaki çalışmalar açısından bir sorun teşkil etmemektedir. Zira nümerik çalışmalar kısmında da gösterildiği üzere, çatlak morfolojisine etkisi açısından birbirine çok yakın küçük parçacıklar tek bir büyük parçacığa denktir. ImageJ yazılımın bir parçacık için verdiği boyut, o



Şekil 83. (a) 3 mm, (b) 4 mm ve (c) 5 mm kalınlıktaki Al 1050 H14 plakalar için örnek optik mikroskop görüntüleri.



Şekil 84. 5 mm kalınlıktaki Al 1050 H14 plaka yüzeyinin TEM görüntüleri. Kolaylıkla görülebilmeleri için Fe parçacıklar kırmızı daireler içerisine alınmıştır.



Şekil 85. (a) 4 mm kalınlıktaki Al 1050 H14 plakasının optik mikroskop görüntüsünde parçacık analizi için seçilen (sarı dikdörtgenin içinde kalan) alan ve (b) seçilen alandaki parçacık dağılımı.

parçacıkla aynı alana sahip dairenin çapıdır. Tablo 7, ImageJ programı ile tespit edilmiş en büyük, en küçük ve ortalama parçacık boyutlarını vermektedir. 3 ve 4 mm kalınlıktaki plakalarda ortalama parçacık boyutları birbirine yakınken, 5 mm kalınlıktaki plakadaki parçacıklar için bu değer yaklaşık 1.5 kat fazladır. Ayrıca, 5 mm kalınlıktaki plakadaki en büyük parçacık boyutu, diğer iki plakadaki değerlerin iki katından fazladır. Şekil 83(a-c), ImageJ analizlerini doğrular niteliktedir.

Plaka Kalınlığı (mm)	Parçacık (Fe) Büyüklüğü (μm)		
	En Büyük	En Küçük	Ortalama
3	5,42	0,28	0,98
4	3,18	0,36	1,10
5	12,58	0,44	1,55

Tablo 7. Proje kapsamında test edilen farklı kalınlıklardaki Al 1050 H14 plakalardaki ikinci faz Fe parçacıklarının boyutları.

5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Proje kapsamında, Al 1050 H14 malzemeden üretilmiş, beş farklı kalınlıkta ($t \in \{0,5; 1; 3; 4; 5\}$ mm), hem tek kenar hem de çift kenar çentikli plakalar mod I yüklemesi altında yırtılmıştır. Çatlak morfolojileri önce gözle ve optik mikroskopla, ardından TEM altında ayrıntılı olarak incelenmiştir. Tek ve çift kenar çentikli plakalar için elde edilen çatlak morfolojileri tam bir uyum içerisindedir. Deneylerde elde edilen çatlak morfolojileri Tablo 8’de sunulmuştur. Sonuç olarak:

- 0,5–4 mm aralığındaki kalınlıklar için, hem 0° hem 90° plaklarda çatlak ağırlıklı olarak bardak-bardaksı ilerlemektedir. 0° plakaların çoğunda çatlak nerdeyse tamamen bardak-bardaksı ilerlerken, 90° plakalarda (çatlağın toplam uzunluğuna kıyasla kısa bölgelerde) eğik morfolojiye de rastlanmıştır.
- 5 mm kalınlığındaki plakalarda ise her iki haddeme doğrultusu için de eğik çatlak morfolojisi baskındır. Hatta bazı plakalarda çatlak nerdeyse tüm plaka boyunca eğik olarak ilerlemektedir.

t (mm)	Tek Kenar Çentikli Plakalar		Çift Kenar Çentikli Plakalar	
	0°	90°	0°	90°
0,5	Bardak-Bardaksı*/Eğik	Bardak-Bardaksı*/Eğik	Bardak-Bardaksı	Bardak-Bardaksı*/Eğik
1	Bardak-Bardaksı	Bardak-Bardaksı*/Eğik	Bardak-Bardaksı	Bardak-Bardaksı*/Eğik
3	Bardak-Bardaksı	Bardak-Bardaksı*/Eğik	Bardak-Bardaksı	Bardak-Bardaksı*/Eğik
4	Bardak-Bardaksı	Bardak-Bardaksı*/Eğik	Bardak-Bardaksı	Bardak-Bardaksı*/Eğik
5	Bardak-Bardaksı/Eğik*	Bardak-Bardaksı/Eğik*	Bardak-Bardaksı/Eğik*	Bardak-Bardaksı/Eğik*

(*) Baskın çatlak morfolojisi

Tablo 8. Proje kapsamında mod I altında yırtılan Al 1050 H14 plakalarda tespit edilen çatlak morfolojileri.

Çatlak morfolojisi bakımından diğer tüm kalınlıklardaki plakalardan açık bir şekilde farklı olan 5 mm kalınlığındaki plakalar, mekanik özellikler söz konusu olduğunda ortalama değerlere sahiptir (bkz. Tablo 5). Yani, 5 mm kalınlık için görülen çatlak morfolojisi farklılığı, mukavemet ve pekleşme kapasitesi farklılıklarından kaynaklanmamaktadır. Tablo 9, her bir kalınlıktaki plaka için spektroskopi analizi sonuçlarını göstermektedir. İkinci faz parçacıklarının ağırlık o-

t (mm)	Al	Fe	Si	Ti	Cu	Mn	Mg	Zn
0,5	99,4	0,268	0,173	0,0245	< 0,001	< 0,001	< 0,0001	< 0,0050
1	99,4	0,320	0,193	0,0183	< 0,001	< 0,001	< 0,0001	< 0,0050
3	99,4	0,299	0,157	0,0222	< 0,001	< 0,001	< 0,0001	< 0,0050
4	99,3	0,316	0,205	0,0225	< 0,001	< 0,001	< 0,0001	< 0,0050
5	99,5	0,259	0,099	0,0225	< 0,001	< 0,001	< 0,0001	< 0,0050

Tablo 9. Proje kapsamında mod I altında yırtılan Al 1050 H14 plakalar için spektroskopi analizi yapılarak tespit edilen element ağırlık oranları. Ayrıntılı analiz sonuçları EK-3'te verilmiştir.

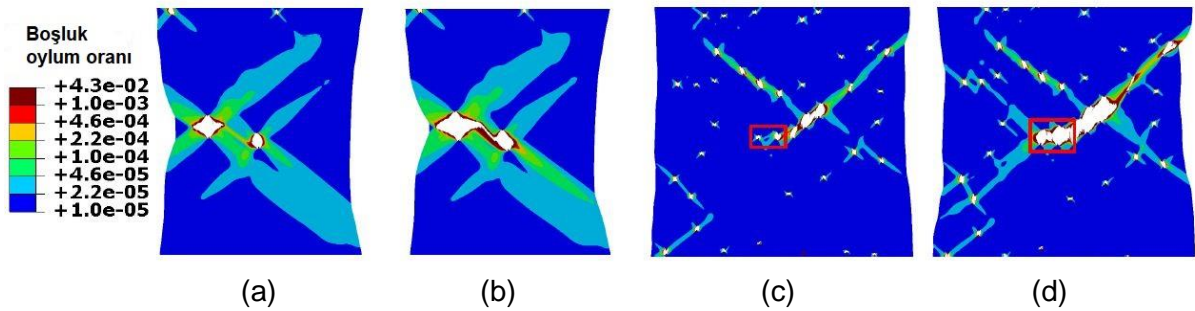
ranları da bütün plakalarda aşağı yukarı aynıdır. 5 mm kalınlığındaki plakaları farklı kılan temel mikro-yapı parametresi, bulgular bölümünde ayrıntılı olarak açıklandığı gibi Fe paracıklarının (ve bir araya toplanmış Fe parçacık gruplarının) boyutlarının diğer plakalardakine oranla daha büyük olmasıdır. Proje kapsamında yapılan numerik çalışmalarda da gösterildiği üzere, çatlak, küçük ve ayırık dağılmış parçacıklar/boşluklar içeren plakalarda bardak-bardaksı, büyük ve birbirlerine yakın dağılmış parçacıklar/boşluklar plakalarda ise eğik olarak ilerlemektedir. Nümerik ve deneysel çalışmaların sonuçları birbirlerini desteklemektedir.

Proje kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda çatlak ilerlemesi plakanın dış yüzeyinden takip edilmekte, çatlak morfolojisi, plaka kırıldıktan sonra mikroskop altında incelenebilmektedir. Nümerik çalışmalar ise çatlak oluşum ve ilerlemesinin her bir aşamasını plaka içinden takip etmeye izin vermektedir. Aşağıda, sünek plaka yırtılmasını gerçeğe uygun bir şekilde simüle ettiği bölüm 4.1.2'de ortaya konan "boşluk çekirdeklenmeli sonlu elemanlar modeli" kullanılarak elde edilen sonuçlar ışığında, çatlak oluşum ve ilerleme mekanizmaları tartışılmıştır. Hatırlanacağı üzere bu modeldeki "temsili boşluk bölgeleri", gerçek malzemelerdeki ikinci faz parçacıklarına karşılık gelmektedir.

Boşluk çekirdeklenmeli model kullanılarak yapılan parametrik çalışma, plakadaki temsili boşlukların toplam sayısı ve büyüklüklerinden bağımsız olarak, içindeki boşluk oylum oranı yaklaşık % 0.1'e ulaşan her temsili boşlukta iki lokal kesme kuşağı oluştuğunu göstermektedir. Temsili boşluk merkezinden dışarı doğru uzanan bu iki lokal kesme kuşağının boylamasına (longitudinal) eksenleri birbirlerine dik olup, çekme doğrultusuyla birisi +45° diğeri -45° açı yapmaktadır. İçerisinde plastik deformasyonun (ve dolayısıyla boşluk oylum oranının)

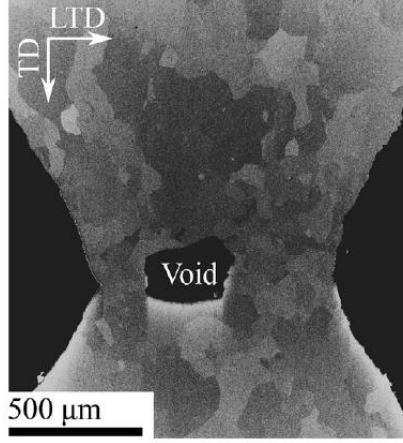
yoğunlaştığı bu lokal kesme kuşakları bölüm 4.1.2'deki şekillerde gösterilen bütün temsili boşluklarda görülebilir. Şekil 41'de, bir temsili boşluktan yayılan kesme kuşakları kırmızı dikdörtgenler içinde gösterilmiştir. Plastik deformasyonun ilk aşamalarında kesme kuşaklarındaki deformasyonun yoğunlaşması cılızdır. Yükleme devam ettikçe plastik deformasyon plakanın her bölgesinde artmakta, ama giderek kesme kuşaklarında yoğunlaşmaktadır. Yüklemenin bir aşamasında temsili boşluklar arası etkileşim başlar. İşte bu etkileşimin ne zaman başlayacağı ve nasıl bir mekanizmayla gerçekleşeceği, hem temsili boşlukların sayısı, büyüklük ve uzaysal dağılımlarına, hem de temsili boşlukları çevreleyen matristeki boşluk oylum oranına bağlıdır¹. Temsili boşluklar arası etkileşim, üç farklı mekanizmayla gerçekleşir: I-) Temsili boşluklarda plastik deformasyonun ilk aşamalarında beliren kesme kuşakları büyüyüp birleşerek, plakanın bir kenarından diğerine uzanan 45°'lik makroskobik bir kesme kuşağı oluşturturlar (bkz. örneğin Şekil 43). II-) Komşu temsili boşluklar arasında, ilk aşamada oluşanların dışında, yeni kesme kuşakları oluşur (bkz. örneğin Şekil 86(a, b)). Literatürde "void sheeting" olarak anılan bu mekanizmada, iki büyük boşluk bir kesme kuşağıyla bağlanır ve bu kesme kuşağındaki ikincil parçacıklar yeni küçük boşluklar peydahlarlar (bkz. örneğin Cox and Low, 1974). III-) Komşu temsili boşluklar, aralarındaki ligamentin boyun vermesiyle birleşirler (bkz. örneğin Şekil 86(c, d)).

Mekanizma I, temsili boşluklar üzerinden geçerek plakayı bir kenarından diğerine bağlayan 45°'lik bir hat olması durumunda aktif hale gelir ki, bu, temsili boşlukların sayıca fazla veya büyük (veya her ikisi birden) olmasını gerektirir. Mekanizma I aktifse, plastik deformasyonun



Şekil 86. Mekanizma II: (a) yeni kesme kuşağının belirmesi ve (b) bu kesme kuşağında ikincil parçacıklardan peydahlanan boşlukların birleşmesi. Mekanizma III: (c) deformasyonun iki komşu temsili boşluğu bağlayan ligamentte yoğunlaşması ve (d) bu iki boşluğun birleşmesi.

¹ Altını çizmek gerekir ki, kırılma oluşum bölgesinde, temsili boşluklar etrafındaki matriste tanımlanan boşluk oylum oranı, gerçek malzemelerdeki ikincil bir parçacık ailesini temsil etmektedir. Bu ikincil parçacıkların büyüklükleri, temsili boşluklara karşılık gelen birincil parçacıklara kıyasla oldukça küçüktür (bkz. örneğin Tekoğlu, 2015 ve o makalede verilen kaynaklar). Nümerik çalışmanın odak noktası birincil parçacıklar olduğu için, ikincil parçacıkların oylum oranının çok düşük olduğu varsayılmıştır (bkz. bölüm 4.1.2). Bu varsayım, deneysel çalışmalarındaki plaka malzemesi Al 1050 H14 için gerçekçi bir varsayımdır.



Şekil 87. Yüksek saflıkta (% 99.999) çok kristalli alüminyumdan üretilmiş levha şeklindeki bir numunede çatlak ilerlemesi (Noell vd., 2018).

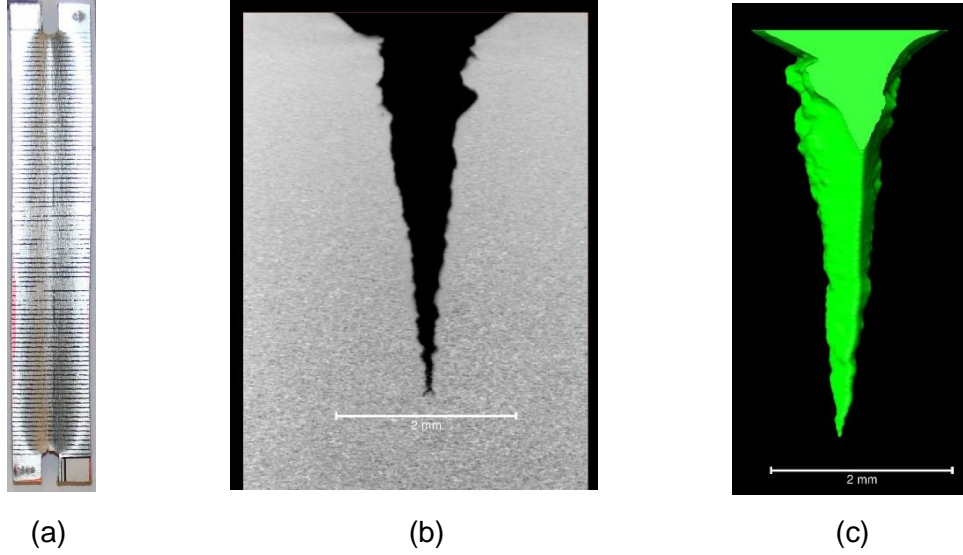
erken aşamalarında, kırılma oluşum bölgesindeki inceltme başlamadan (veya çok azken) kendini gösterir (bkz. Şekil 44). Bu durumun aksine, plakada az sayıda küçük temsili boşluklar varsa, boşluklar arası etkileşim ya hiç gerçekleşmez, ya da kırılma oluşum bölgesi önemli oranda inceldikten sonra gerçekleşir. Şekil 41, temsili boşluklar arası etkileşimin olmadığı, çatlak, boyun verme bölgesindeki tek bir boşluk üzerinden ilerlediği bir plakaya iyi bir örnek sunmaktadır. Çatlak, tek bir boşluk üzerinden ilerlediği sünek kırılma, yüksek saflıkta (% 99.999) çok kristalli alüminyumdan üretilmiş levha şeklindeki numunelerin çekme testlerinde deneysel olarak da gösterilmiştir (bkz. Noell vd., 2018 ve Şekil 87). Ancak, temsili boşlukların uzaysal dağılımlarına bağlı olarak, çatlak birden fazla boşluğun mekanizma II yoluyla birleşmesiyle de ilerleyebilir (bkz. Şekil 42(b, c)). Temsili boşlukların hem sayı hem de büyüklük bakımından ortalama değerlere sahip olduğu plakalarda ise, boşluklar üzerinden geçen 45°'lik bir hat varsa bile bu hat genelde plakayı bir ucundan diğerine bağlayacak kadar uzun değildir. Böylesi bir plakada çatlak, ya birbiriyle kesişen iki 45°'lik kesme kuşağı üzerinde bardak-kapaklı şekilde (bkz. Şekil 45(b)), ya da her üç mekanizmanın eşgüdümlü aktif olduğu bir şekilde ilerler (bkz. Şekil 45(c)). Parametrik çalışma sonuçları, mekanizma III'ün nadiren, birbirine çok yakın boşluklar arasında aktif olduğunu göstermektedir: sünek kırılmada boşluklar arası etkileşim, ağırlıklı olarak deformasyonun kesme kuşaklarında yoğunlaşmasıyla gerçekleşmektedir.

Proje kapsamında gerçekleştirilen gerek deneysel gerek nümerik çalışmalar, literatürdeki sonuçları destekler niteliktedir: pekleşme kapasitesi yüksek plakalarda çatlak temel olarak bardak-bardaksı bir morfolojiye sahiptir. **Projenin ortaya koyduğu özgün sonuç ise, bir malzemenin pekleşme kapasitesinin yalnızca ikinci faz parçacıkları çevreleyen matrisin pekleşme üsteline bağlı olmadığı, ikinci faz parçacıklarının hem oylum oranlarının hem de uzaysal/boyutsal dağılımlarının pekleşme kapasitesinde önemli bir etkiye sahip**

olduğudur. Parçacıkların oylum oranı ve boşluk peydahlama eğilimi arttıkça, parçacıklar büyüyüp birbirlerine yaklaştıkça malzemenin pekleşme kapasitesi azalmaktadır. Nümerik çalışma kapsamında kullanılan GTN parametreleri, yalnızca temsili boşluk sayısını (S_b) ve büyüklüğünü (R_b) değiştirerek, geniş bir pekleşme kapasitesi spektrumuna ait birçok farklı plakayı analiz etmeye imkân verecek şekilde seçilmiştir. Spektrumun bir ucunda, az sayıda ve küçük temsili boşluklar içeren ve dolayısıyla pekleşme kapasitesi çok yüksek plakalar bulunmaktadır. Bu plakalarda bardak-bardaksı çatlak morfolojisi baskındır. Spektrumun diğer ucundaki, çok sayıda ve büyük temsili boşluklara sahip plakalarda ise, düşük pekleşme kapasitesi, çatlağı eğik olarak ilerlemeye zorlamaktadır. Bu iki uç durum için çatlak morfolojisi daha ziyade temsili boşluk oylum oranına bağlıdır. Ortalama değerlerde ise, temsili boşluk dağılımı da oylum oranı kadar önemli bir etkiye sahiptir. Parametrik çalışma kapsamında farklı GTN parametreleri seçilmesi, belirli bir S_b-R_b kombinasyonu için çatlak morfolojisini değiştirebilir; ama bu seçimin proje kapsamında ulaşılan sonuçlar üzerinde bir etkisi olmayacaktır.

Bulgular bölümünde belirtildiği üzere, proje kapsamından yapılan nümerik çalışmalardan bir konferans makalesi yayınlanmış (bkz. EK-5) bir makale de “European Journal of Mechanics – A/Solids” dergisine sunulmuştur (bkz. EK-7). Ayrıca, yapılan (hem nümerik hem deneysel) tüm çalışmalar; “Norwegian University of Science and Technology (NTNU)”de, yürütücünün davetli konuşmacı olarak katıldığı bir çalıştayda, “Orta Doğu Teknik Üniversitesi”nde düzenlenen bir çalıştayda ve yürütücünün projenin tanıtımı amacıyla “TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi”nde düzenlediği bir çalıştayda sözlü bildiri olarak sunulmuştur. NTNU’da düzenlenen çalıştay için bir öz istenmemiş, çalıştayın ajandası raporun ekinde (EK-10) verilmiştir. ODTÜ’deki çalıştayda (bkz. Beyond, 2018) sunulan öz EK-11’de, yürütücünün düzenlediği çalıştayın öz kitapçığı ise EK-12’de verilmiştir. Proje kapsamında yapılan deneysel çalışmaların ağırlıkta olduğu bir dergi makalesi daha yazım aşamasındadır. Ancak, bu yeni makale yazılmadan önce, proje başvurusunda planlanmadığı halde aşağıda ayrıntılı olarak açıklanan ek bir çalışmanın tamamlanması hedeflenmektedir.

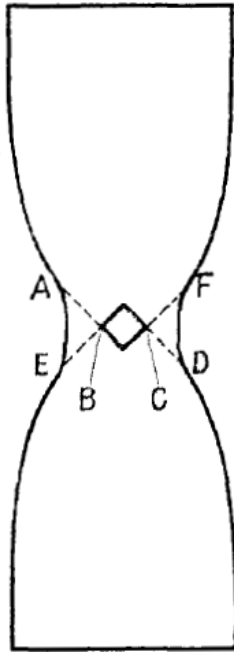
Yukarıda bahsedildiği üzere, proje kapsamında yapılan mod I çekme deneylerinde çatlak ilerlemesi plakanın dış yüzeyinden takip edilmekte, çatlak morfolojisi, plaka kırıldıktan sonra mikroskop altında incelenebilmektedir. Dolayısıyla çatlak morfolojisinin oluşum aşamaları gerçek zamanlı tespit edilememektedir. Şekil 88(a), 5 mm kalınlığında, 0° , çift kenar çentikli bir plaka için iki çentik arasında kalan bölgeyi göstermektedir. Bu plakaya uygulanan mod I yüklemesi, çentik kenarlarında yırtılma başladığı anda durdurulmuş, plaka düzenekten sökülüp, iki çentik arasında kalan bölge şerit testereyle plakadan çıkartılmıştır. Şekil 88(b) ve (c), sırasıyla, üstteki çentikten aşağı doğru uzanan bölgenin X-ışını tomografisi kullanılarak ön



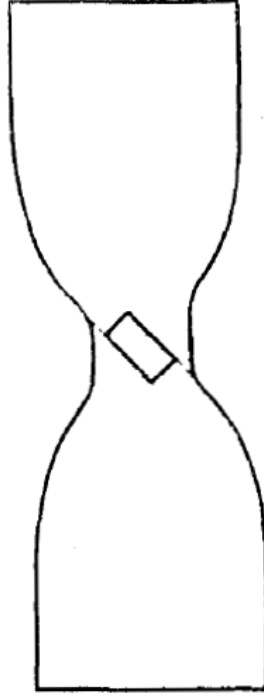
Şekil 88. (a) Mod I yüklemesine tabi tutulmuş, 5 mm kalınlığında, 0° , çift kenar çentikli bir plakanın iki çentik arasında kalan kısmı. Şekil (a)'da, üstteki çentikten aşağı doğru uzanan bölgenin X-ışını tomografisi kullanılarak ön yüzden çekilmiş (a) iki boyutlu ve (b) üç boyutlu görüntüleri.

ön yüzden çekilmiş iki ve üç boyutlu görüntülerini göstermektedir. X-ışını tomografisi çalışmaları, projenin yurt dışı danışmanı Dr. Kim Lau Nielsen tarafından Danimarka Teknik Üniversitesi'nde yaptırılmıştır. Plaka yüzeyinde yırtılma daha yeni başlamışken, çatlağın plaka içerisinde neredeyse plaka kalınlığı kadar ilerlediği görülmektedir. Literatürde “tünelleme (tunneling)” olarak anılan, çatlağın, plaka içinde, dışarıda görülen yırtılmadan daha hızlı ilerlemesi fenomeni, sünek plaka yırtılmasında sıkça görülür. Ancak, proje ekibinin bildiği kadarıyla, bu kadar uzun bir tünel oluşumu başka malzemeler için gösterilmemiştir ve başlı başına ilginç bir durumdur.

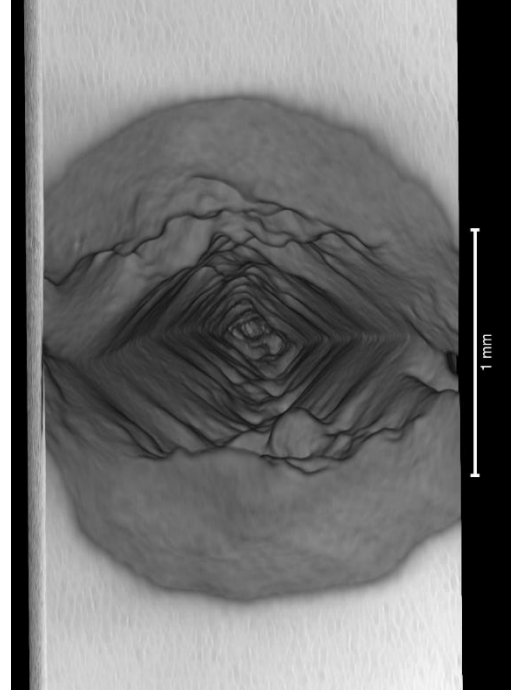
Şekil 89(a, b) literatürde “Orowan münavebeli sekme (OMS) mekanizması (Orowan alternating slip mechanism, bkz. Orowan, 1949)” olarak bilinen plastik deformasyon mekanizmasına tabi bir boşluğun büyümesini şematik olarak göstermektedir. Şekil 89(a)'daki kesik çizgiler sekme düzlemlerine karşılık gelmektedir. OMS mekanizmasında boşluk, AB-CD ve EB-CF sekme düzlemlerinin münavebeli olarak aktif hale gelmesiyle büyüyerek Şekil 89(b)'de verilen hale gelir. Şekil 89(c), Şekil 88'de gösterilen bölgenin X-ışını tomografisi kullanılarak üstten çekilmiş görüntüsünü sunmaktadır: bu bölgede çatlağın OMS mekanizmasıyla ilerlediği açıktır. Proje ekibinin bildiği kadarıyla plaka yırtılmasında OMS mekanizmasının aktif olduğu henüz literatürde gösterilmemiştir. Hâlihazırda devam eden çalışmalarda, yükleme, çatlak ilerlemesinin farklı aşamalarında durdurulup çatlak X-ışını tomografisi ile incelenmektedir. Nihai hedef, sünek çatlak ilerlemesi aşamalarını deneysel olarak göstermektir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 89. (a, b) Orowan münavebeli sekme (OMS) mekanizmasına (Orowan alternating slip mechanism, bkz. Orowan, 1949) tabi bir boşluğun büyümesinin şematik gösterimi. (c) Şekil 88’de gösterilen bölgenin X-ışını tomografisi kullanılarak üstten çekilmiş görüntüsü.

Sonuç olarak, proje kapsamında yapılması planlanan çalışmalar başarıyla tamamlanmıştır. Yürütücü, ilerleyen süreçte, proje kapsamında üretilen deney düzeneklerini kullanarak farklı malzemelerden yapılmış plakaları test etmeyi hedeflemektedir. Projede alüminyum için kazanılan tecrübeler göz önüne alınarak, ilk etapta Al 2017 ve Al 6016 gibi alüminyum alaşımlarının, daha uzun vadede ise, çelik, çinko gibi metallerin test edilmesi planlanmaktadır. Ayrıca, proje kapsamında oluşturulan sonlu elemanlar modelinin, plaka yırtılmasının farklı aşamalarında harcanan enerji miktarlarını hesaplayarak kohezif bölge modellerine (bkz. bölüm 2) girdi sağlayabilecek şekilde geliştirilmesi üzerine çalışılacaktır.



KAYNAKÇA

ABAQUS, 2016. "Abaqus documentation collection", Version 2016, Providence, RI: Dassault Systemes.

Algarnia, M., Choib, Y., Bai, Y. 2017. "A unified material model for multiaxial ductile fracture and extremely low cycle fatigue of Inconel 718", International Journal of Fatigue, 96, 162-177.

Andersen, R., Woelke, P., Nielsen, K., 2018. "Cohesive traction-separation relations for plate tearing under mixed mode loading", Engineering Fracture Mechanics, 71, 199-209.

Anderson, T.L. 2005. Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications (3. Basım). Boca Raton: CRC Press.

Aravas, N., McMeeking, R. M. 1985. "Finite element analysis of void growth near a blunting crack tip", Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 33, 25-37.

Aravas, N., McMeeking, R. M. 1985. "Microvoid growth and failure in the ligament between a hole and a blunt crack tip", International Journal of Fracture, 29, 21-38.

Argon, A. S., Im, J., Safoğlu, R. 1975. "Cavity formation from inclusions in ductile fracture", Metallurgical and Materials Transactions A, 6, 825-37.

Babout, L., Bréchet, Y., Maire, E., Fougères, R. 2004. "On the competition between particle fracture and particle decohesion in metal matrix composites", Acta Materialia, 52, 4517-25.

Becker, R., Needleman, A., Richmond, O., Tvergaard, V. 1988. "Void growth and failure in notched bars", Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 36, 317-51.

Benseddiq, N., Imad, A. 2008. "A ductile fracture analysis using a local damage model", International Journal of Pressure Vessels and Piping, 85, 219-27.

Benzerga, A. A. 2002. "Micromechanics of coalescence in ductile fracture", Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 50, 1331-62.

Benzerga, A. A., Leblond, J.-B. 2010. "Ductile fracture by void growth to coalescence", Advances in Applied Mechanics, 44, 169-305.

BEYOND: Workshop on Computational Science and Engineering, METU, 20-21 October 2018. http://files.iam.metu.edu.tr/workshop_cse/

Son erişim tarihi: 15 Aralık 2018.



Berdin, C. 2004. Sayfa 147-71. "Damage evolution laws and fracture criteria", Local Approach to Fracture. Editör: Besson, J. Paris: Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris.

Beremin, F.M. 1981. "Cavity formation from inclusions in ductile fracture of A508 steel", Metallurgical Transactions A, 12, 723-731.

Besson, J., Brocks, W., Chabanet, O., Steglich, D. 2001. "Ductile Rupture of Aluminum Sheet Materials", European Journal of Finite Elements, 10, 401-415.

Besson, J., Steglich, D., Brocks, W., 2003. "Modeling of plane strain ductile rupture", International Journal of Plasticity, 19, 1517-1541.

Bilby, B. A., Howard, I. C., Li, Z. H. 1993. "Prediction of the first spinning cylinder test using ductile damage theory", Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 16, 1-20.

Broek, D. 1986. Elementary Fracture Mechanics (4. Basım). Dordrecht, Hollanda: Kluwer Academic Publishers.

Chabanet, O., Steglich, D., Besson, J., Heitman, V., Hellmann, D., Brocks, W. 2003. "Predicting crack growth resistance of aluminium sheets", Computational Materials Science, 26, 1-12.

Chen, C. R., Kolednik, O., Heerens, J., Fischer, F. D. 2005. "Three-dimensional modelling of ductile crack growth: Cohesive zone parameters and crack tip triaxiality", Engineering Fracture Mechanics, 72, 2072-94.

Chen, X., Deng, X., Sutton, M. A., Zavattieri, P. 2014. "An inverse analysis of cohesive zone model parameter values for ductile crack growth simulations", International Journal of Mechanical Sciences, 79, 206-15.

Chu, C., Needleman, A. 1980. "Void nucleation effects in biaxially stretched sheets", Journal of Engineering Materials and Technology, 102, 249-56.

Cox, T. B., Low, J. R., 1974. "An investigation of the plastic fracture of AISI 4340 and 18 Nickel-200 grade maraging steels", Metallurgical Transactions, 5, 1457-1470.

Cuesta, I. I., Alegre, J. M., Lacalle, R. 2010. "Determination of the Gurson-Tvergaard damage model parameters for simulating small punch tests", Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 33, 703-13.

Devaux, J.C., Mudry, F., Pineau, A., Rousselier, G. 1989. Sayfa 7–23. “Experimental and numerical validation of a ductile fracture local criterion based on a simulation of cavity growth”, *Nonlinear Fracture Mechanics: Volume II – Elastic-Plastic Fracture*, ASTM STP 995. Editörler: Landes J. D., Saxena, A., Merkle J. G. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.

Dünya Çelik Birliği (World Steel Association). “World Steel in Figures 2018”.

<https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:f9359dff-9546-4d6b-bed0-996201185b12/World+Steel+in+Figures+2018.pdf>

Son erişim tarihi: 24 Kasım 2018.

Engineers Edge

http://www.engineersedge.com/coefficients_of_friction.htm

Son erişim tarihi: 04 Aralık 2018.

Engineering-abc

http://www.tribology-abc.com/calculators/e3_6a.htm

Son erişim tarihi: 04 Aralık 2018.

El-Naaman, S. A., Nielsen, K. L. 2013. “Observations on Mode I ductile tearing in sheet metals”, *European Journal of Mechanics A/Solids*, 42, 54-62.

Felter, C. L., Nielsen, K. L., 2017. “Assisted crack tip flipping under mode I thin sheet tearing”, *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 64, 58-68.

Fabrègue, D., Pardoën, T. 2008. “A constitutive model for elastoplastic solids containing primary and primary and secondary voids”, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 57, 869-870. 2008.

Faleskog, J., Shih, C. 1997. “Micromechanics of coalescence—I. Synergistic effects of elasticity, plastic yielding and multisize-scale voids”, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 45, 21–50.

Gao, F. J., Shih, C. F., Dodds, R. H. 1998. “Ductile tearing in part-through cracks: experiments and cell-model predictions”, *Engineering Fracture Mechanics*, 59, 761-77.

Gao, X. S., Wang, T. H., Kim, J. 2005, “On ductile fracture initiation toughness: effects of void volume fraction, void shape and void distribution”, *International Journal of Solids and Structures*, 42, 5097-5117.



Gao, X., Faleskog, J., Shih, C. F. 1998. "Cell model for nonlinear fracture analysis - II. Fracture-process calibration and verification", *International Journal of Fracture*, 89, 374-386.

Gurson, A., 1977. "Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth part I: yield criteria and low rules for porous ductile media", *ASME Journal of Engineering Materials and Technology*, 99, 2-15.

Gologanu, M., Leblond, J.-B., Devaux, J. 1993. "Approximate models for ductile metals containing non-spherical voids – case of axisymmetric prolate ellipsoidal cavities", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 41, 1723-54.

Gologanu, M., Leblond, J.-B., Devaux, J. 1994. "Approximate models for ductile metals containing non-spherical voids – case of axisymmetric oblate ellipsoidal cavities", *Journal of Engineering Materials and Technology*, 116, 290-7.

Irwin, G. R., Kies, J. A., Smith, H. L. 1958. "Fracture strengths relative to onset and arrest of crack propagation", *American Society for Testing and Materials (ASTM) Transactions*, 58, 640-60.

ImageJ yazılımının internet sitesi

<https://imagej.nih.gov/ij/>

Son erişim tarihi: 07 Aralık 2018.

Jun, S., Zengjie, D., Zhonghua, L., Mingjing, T. 1990. "Fracture strength of spheroidal carbide particle", *International Journal of Fracture*, 42, 39–42.

Kami, A., Mollaei Dariani, B., Sadough Vanini, A., Comsa, D., Banabic, D. 2014. 300–309. "Application of a GTN damage model to predict the fracture of metallic sheets subjected to deep-drawing", *Proceedings of the Romanian Academy, Series A: Mathematics, Physics, Technical Sciences, Information Science*, 15, 300-309.

Keller K., Weihe, S., Siegmund, T., Kroplin, B.1999. "Generalized Cohesive Zone Model: incorporating triaxiality dependent failure mechanisms", *Computational Materials Science*, 16, 267-74.

Kim, J., Gao, X. S., Srivatsan, T. S. 2003. "Modeling of crack growth in ductile solids: a three-dimensional study", *International Journal of Solids and Structures*, 40, 7357-74.

- Kiran, R., Khandelwal, K. 2014. "Gurson model parameters for ductile fracture simulation in ASTM A992 steels", *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 37, 171-83.
- Knott, J. F. 1973. *Fundamentals of Fracture Mechanics*. London: Butterworths.
- Koplik, J., Needleman, A. 1988. "Void growth and coalescence in porous plastic solids", *International Journal of Solids and Structures*, 24, 835-53.
- Lassance, D., Fabrègue, D., Delannay, F., Pardoen, T. 2007. "Micromechanics of room and high temperature fracture in 6xxx Al alloys", *Progress in Materials Science*, 52, 62-129.
- Leblond, J.-B., Mottet, G. 2008. "A theoretical approach of strain localization within thin planar bands in porous ductile materials", *Comptes Rendus Mécanique*, 336, 176-189.
- Lecarme, L., Tekoğlu, C., Pardoen, T. 2011. "Void growth and coalescence in ductile solids with stage III and stage IV strain hardening", *International Journal of Plasticity*, 27, 1203–23.
- Li, W., Siegmund, T. 2002. "An analysis of crack growth in thin-sheet metal via cohesive zone model", *Engineering Fracture Mechanics*, 69, 2073-93.
- Liang, Y., Wen-quan, L., Dan-tong, W., Ping, H., Qi, W. 2016. "Experimental and simulation of damage evolution behavior for 7075-T6 aluminum alloy in warm forming", *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 26, 1383-08.
- Mackenzie, A. C., Hancock, J. W., Brown, D.K. 1977. "On the influence of state of stress on ductile failure initiation in high strength steels", *Engineering Fracture Mechanics*, 9, 167-188.
- Mathur, K., Needleman, A., Tvergaard, V., 1996. "Three dimensional analysis of dynamic ductile crack growth in a thin plate", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 44, 439-464.
- Moud, S. H., Hosseini, S. F. 2012. "Ductile Fracture of 7075-T651 Aluminum Alloy", 19th European Conference on Fracture (ECF19), Kazan, Rusya.
- Nahshon, K., Hutchinson, J. W. 2008. "Modification of the Gurson model for shear failure", *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 27, 1-17.
- Needleman, A. 1987. "A continuum model for void nucleation by inclusion debonding", *Journal of Applied Mechanics*, 54, 525–31.

Needleman, A. 2014. "Some Issues in Cohesive Surface Modeling", *Procedia IUTAM*, 10, Pages 221-246.

Needleman, A., Tvergaard, V. 1987. "An analysis of ductile rupture modes at a crack tip", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 35, 151-183.

Needleman, A., Tvergaard, V. 1991. "A numerical study of void distribution effects on dynamic, ductile crack-growth", *Engineering Fracture Mechanics*, 38, 157-173.

Negre, P., Steglich, D., Brocks, W. 2005. "Crack extension at an interface: prediction of fracture toughness and simulation of crack path deviation", *International Journal of Fracture*, 134, 209-229.

Nielsen, K., Hutchinson, J., 2012. "Cohesive traction-separation laws for tearing of ductile metal plates", *International Journal of Impact Engineering*, 48, 15-23.

Noell, P. J., Carroll, J. D., Boyce, B. L., 2018. "The mechanisms of ductile rupture", *Acta Materialia*, 161, 83-98.

Norris, D. M., Reaugh, J. E., Moran, B., Quinones, D. F. 1978. "A plastic-strain, mean-stress criterion for ductile fracture", *Journal of Engineering Materials Technology*, 100, 270-286.

Orowan, E., 1949. "Fracture and strength of solids", *Reports on Progress in Physics*, 12, 185-232.

Osovski, S., Srivastava, A., Ponsen, L., Bouchaud, E., Tvergaard, V., Ravi-Chandar, K., Needleman, A., 2015. "The effect of loading rate on ductile fracture toughness and fracture surface roughness", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 76, 20-46.

Pardoen, T., Hachez, F., Marchioni, B., Blyth, P. H., Atkins A. G. 2004. "Mode I fracture of sheet metal", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 52, 423-52.

Pardoen, T., Hutchinson, J.W. 2000. "An extended model for void growth and coalescence", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 48, 2467–2512.

Pardoen, T., Marchal, Y., Delannay, F. 1999. "Thickness dependence of cracking initiation criteria in thin aluminum plates", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 47, 2093-2123.

Pardoen, T., Marchal, Y., Delannay, F. 2002. “Essential work of fracture versus fracture mechanics—towards a thickness independent plane stress toughness”, *Engineering Fracture Mechanics*, 69, 617-631.

Pardoen, T., Scheyvaerts, F., Simar, A., Tekoğlu, C., Onck, P. R. 2010. “Multiscale modeling of ductile failure in metallic alloys”, *Comptes Rendus Physique*, 11, 326-45.

Petti, J. P., Dodds, R. H. 2005. “Ductile tearing and discrete void effects on cleavage fracture under small-scale yielding conditions”, *International Journal of Solids and Structures*, 42, 3655-76.

Pineau, A. 1990. Sayfa 197–234. “Global and local approaches of fracture – Transferability of laboratory test results to Components”, *Topics in Fracture and Fatigue*. Editör: Argon, A. S. New York: Springer Verlag.

Pineau, A., Pardoen, T. 2007. 2. cilt, 6. bölüm. “Failure mechanisms of metals”. *Comprehensive structural integrity encyclopedia*. Editörler: Karihaloo, B. ve Knauss, W. G. Amsterdam: Elsevier.

Rivalin, F., Pineau, A., Di Fant, M., Besson, J. 2001. “Ductile tearing of pipeline-steel wide plates - I. dynamic and quasi-static experiments”, *Engineering Fracture Mechanics*, 68, 329-345.

Roychowdhury, S., Roy, Y. D., Dodds, R. H. 2002. “Ductile tearing in thin aluminium panels: experiments and analyses using large-displacement, 3-D surface cohesive elements”, *Engineering Fracture Mechanics*, 69, 983-1002.

Ruggieri C., Panontin T. L., Dodds Jr., R. H. 1996. “Numerical modeling of ductile crack growth in 3-D using computational cell elements”, *International Journal of Fracture*, 82, 67-95.

Sanford, R. J. 2002. *Principles of Fracture Mechanics*. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall.

Scheider, I., Schodel, M., Brocks, W., Schonfeld, W. 2006. “Crack propagation analyses with CTOA and cohesive model: Comparison and experimental validation”, *Engineering Fracture Mechanics*, 73, 252-63.

Scheyvaerts, F., Onck, P. R., Tekoğlu, C., Pardoen, T. 2011. “The growth and coalescence of ellipsoidal voids in plane strain under combined shear and tension”, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 59, 373–97.

Scheyvaerts, F., Pardoën, T., Onck, P. R., 2010. "A new model for void coalescence by internal necking", *International Journal of Damage Mechanics*, 19, 95–126.

Siegmund T., Brocks. W., 2000. "A numerical study on the correlation between the work of separation and the dissipation rate in ductile fracture", *Engineering Fracture Mechanics*, 67, 139-154.

Simonsen, B., Törnqvist, R., 2004. "Experimental and numerical modelling of ductile crack propagation in large-scale shell structures", *Marine Structures*, 17, 1-27.

Srivastava, A., Osovski, S., Needleman, A., 2017. "Engineering the crack path by controlling the microstructure", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 100, 1-20.

Srivastava, A., Ponsen, L., Osovski, S., Bouchaud, E., Tvergaard, V., Needleman, A., 2014. "Effect of inclusion density on ductile fracture toughness and roughness", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 63, 62-79.

Tekoğlu, C. 2014. "Representative volume element calculations under constant stress triaxiality, Lode parameter, and shear ratio", *International Journal of Solids and Structures*, 51, 4544-53.

Tekoğlu, C. 2015. "Void coalescence in ductile solids containing two populations of voids", *Engineering Fracture Mechanics*, 147, 418-430.

Tekoğlu, C., Hutchinson, J. W., Pardoën, T. 2015. "On localization and void coalescence as a precursor to ductile fracture", *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, DOI: 10.1098/rsta.2014.0121.

Tekoğlu, C., Leblond, J.-B., Pardoën, T. 2012. "A criterion for the onset of void coalescence under combined tension and shear", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 60, 1363-81.

Tekoğlu, C., Pardoën, T. 2010. "A micromechanics based damage model for composite materials", *International Journal of Plasticity*, 26, 549-69.

Thomason, P. F. 1990. *Ductile Fracture of Metals* (1. Basım). Oxford: Pergamon Press.

Thompson, A. V., Williams, J. C. 1977. Sayfa 343–8. "Nuclei for ductile fracture in titanium", *Proceedings of the 4th International Conference on Fracture*. Editör: Taplin, M. D. R. Oxford: Pergamon Press.

Tvergaard, V. 1981. "Influence of voids on shear band instabilities under plane strain conditions", *International Journal of Fracture*, 17, 389-407.

Tvergaard, V. 1982. "On localisation in ductile materials containing voids", *International Journal of Fracture*, 18, 237–251.

Tvergaard V., Hutchinson, J. W. 1992. "The relationship between crack growth resistance and fracture process parameters in elastic plastic solids", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 40, 1377-1397.

Tvergaard, V. 1990. "Material failure by void growth to coalescence", *Advances in Applied Mechanics*, 27, 83-151.

Tvergaard, V. 1993. "Model studies of fibre breakage and debonding in a metal reinforced by short fibers", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 41, 1309–26.

Tvergaard, V., Hutchinson, J. W. 2002. "Two mechanisms of ductile fracture: void by void growth versus multiple void interaction", *International Journal of Solids and Structures*, 39, 3581-97.

Tvergaard, V., Needleman, A. 1984. "Analysis of cup-cone fracture in a round tensile bar", *Acta Metallurgica*, 32, 157-169.

Tvergaard, V., Needleman, A. 1992. "Effect of crack meandering on dynamic, ductile fracture", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 40, 447-471.

Ugural, A. C. 2009. *Stresses in Beams, Plates, and Shells* (3. Basım). New York: CRC Press.

Ventsel, E., Krauthammer, T. 2001. *Thin Plates and Shells: Theory: Analysis, and Applications*. New York: Marcel Dekker, Inc.

Woelke, P. B., Shields, M. D., Abboud, N. N., Hutchinson, J. W. 2013. "Simulations of ductile fracture in an idealized ship grounding scenario using phenomenological damage and cohesive zone models", *Computational Materials Science*, 80, 79-95.

Xia L., Shih, C. F. 1995. "Ductile crack growth – I. A numerical study using computational cells with microstructurally based length scales", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 43, 233-259.

Xia L., Shih, C. F. 1995. "Ductile crack growth – II. Void nucleation and geometry effects on macroscopic fracture behavior", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 43, 1953-1981.

Xia, L., Shih, C. F., Hutchinson, J. W. 1995. "A computational approach to ductile crack growth under large scale yielding conditions", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 43, 389–413.

Xue, Z., Pontin, M. G., Zok, F. W., Hutchinson, J. W. 2010. "Calibration procedures for a computational model of ductile fracture", *Engineering Fracture Mechanics*, 77, 492-509.

Yan, C., Mai, W. Y. 1997. "Effect of constraint on ductile crack growth and ductile-brittle fracture transition of a carbon steel", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 73, 167-173.

Yayla, P. 2007. *Kırılma Mekaniği (1. Basım)*. İstanbul: Çağlayan Kitabevi.

Yerra, S. K., Tekoğlu, C., Scheyvaerts, F., Delannay, L., Houtte, P. V., Pardoën, T., 2010. "Void growth and coalescence in single crystals", *International Journal of Solids and Structures*, 47, 1016–1029.

Yu, H., Tieu, K., Lu, C., Lou, Y., Liu, X., Godbole, A., Kong, C. 2014. "Tensile fracture of ultrafine grained aluminum 6061 sheets by asymmetric cryorolling for microforming", *International Journal of Damage Mechanics*, 23, 1077-1095.

Zhang, Z. L., Thaulow, C., Odegard, H. 2000. "A complete Gurson model approach for ductile fracture", *Engineering Fracture Mechanics*, 67, 155-168.

Zhou, J. 2013. "Numerical Modeling of Ductile Fracture", Doktora Tezi.

https://etd.ohiolink.edu/!etd.send_file?accession=akron1384774266&disposition=inline

Son erişim tarihi: 07 Aralık 2018.



EK-1: Satın Alınan Plakaların Sertifikaları

INSPECTION CERTIFICATE
(EN 10204-3.1 / EN 15088)

TARİH / DATE 15.11.2017

 AssanAlüminyum

0002944443

ALAŞIM / ALLOY 1050
KONDİSYON / TEMPER: H14
BOYUTLAR / DIMENSIONS: 0,500mmX1.000,00mmX2.000,00mm
YÜZEY / SURFACE: Düz / Plain

Bobin No	Kimyasal Bileşim / Chemical Composition												Mekanik Özellikler / Mechanical Properties					
	%							ppm				%	Rolling Direction(0)			Transverse Direction(90)		
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ti	Zn	Cr+3	Pb	Cd	Hg	Al	Çekme D. MPa Tensile Str.	Akma D. MPa Yield Str.	Uzama A50% Elongation	Çekme D. MPa Tensile Str.	Akma D. MPa Yield Str.	Uzama A50% Elongation
MIN	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0	0	0	0	99,500				105,0	85,0	2,00
MAX	0,250	0,400	0,050	0,050	0,050	0,050	0,070	100	100	100	100	100,000				145,0		
117041538/D1	0,120	0,257	0,000	0,003	0,001	0,017	0,003	10	10	0	0	99,570				130,0	125,0	3,00

Diğer Test Sonuçları / Others Metal Test Results				
Bobin No Coil No	Yağlılık mg/m ²	Erichsen mm	Sertlik Hardness (HB)	Elektrik İletkenliği Electrical Conductivity (MS/m)
MIN				
MAX				
117041538/D1				

Coils/sheets/tread plates are produced according to EN485-1-2-4, EN573-3, EN546-1-2-3-4, EN1386, ASTM-B209 standards**

* For the purpose of traceability, inspection and test results of incoming raw materials which are related to products can be provided upon request.

** Tests and equipments:

Tensile test : ZWICK Z050 or ZWICK 1478, EN ISO 6892-1 or AA (depending on customers' requests)

Spectral Analysis : ARL 4400, ARL 3400

Hardness test : FUTURE-TECH FM-700, EN ISO 6506

Cupping test : ERICHSEN, DIN 50101

** Materials produced according to customer and/or Assan specifications are exempt from these standards.

ASSAN ALUMİNYUM TESİSLERİ, Yağla mah. D-100 Karayolu Rüya Sok.No:2 34940 Tuzla / İSTANBUL TURKEY

TEL : + 90 (216) 581 12 00 (10 lines) FAX: + 90 (216) 581 16 10*

FR.464 - 4

Kalite Kontrol Yetkilisi / Quality Control

TOLGA SAF

Elektronik Onaylanmıştır/Electronically Approved

CE
2195



INSPECTION CERTIFICATE
(EN 10204-3.1 / EN 15088)

AssanAlüminyum

TARİH / DATE 05.12.2017

ALAŞIM / ALLOY
KONDİSYON / TEMPER:
BOYUTLAR / DIMENSIONS:
YÜZEY / SURFACE:

1050
H14
1,000mmX1.000,00mmX
Düz / Plain

0003016027

Bobin No	Kimyasal Bileşim / Chemical Composition													Mekanik Özellikler / Mechanical Properties					
	%							ppm				%		Rolling Direction(0)			Transverse Direction(90)		
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ti	Zn	Cr+3	Pb	Cd	Hg	Al	Çekme D. MPA Tensile Str.	Akma D. MPA Yield Str.	Uzama A50% Elongation	Çekme D. MPA Tensile Str.	Akma D. MPA Yield Str.	Uzama A50% Elongation	
MIN	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0	0	0	0	99,500				105,0	85,0	4,00	
MAX	0,250	0,400	0,050	0,050	0,050	0,050	0,070	100	100	100	100	100,000				145,0			
117031518/B18	0,112	0,282	0,002	0,008	0,003	0,008	0,008	10	10	0	0	99,553				127,0	123,0	4,00	

Diğer Test Sonuçları / Others Metal Test Results				
Bobin No Coil No	Yağlılık mg/m ²	Erichsen mm	Sertlik Hardness (HB)	Elektrik İletkenliği Electrical Conductivity (MS/m)
MIN				
MAX				
117031518/B18				

Coils/sheets/tread plates are produced according to EN485-1-2-4, EN573-3, EN546-1-2-3-4, EN1386, ASTM-B209 standards**

* For the purpose of traceability, inspection and test results of incoming raw materials which are related to products can be provided upon request.

** Tests and equipments:

Tensile test : ZWICK Z050 or ZWICK 1478, EN ISO 6892-1 or AA (depending on customers' requests)

Spectral Analysis : ARL 4460, ARL 3460

Hardness test : FUTURE-TECH FM-700, EN ISO 6506

Cupping test : ERICHSEN, DIN 60101

** Materials produced according to customer and/or Assan specifications are exempt from these standards.

ASSAN ALUMİNYUM TESİSLERİ, Yayla mah. D-100 Karayolu Rıza Sok.No:2 34940 Tuzla / İSTANBUL TÜRKİYE

TEL : + 90 (216) 581 12 00 (10 lines) FAX: + 90 (216) 581 16 10*

FR.454 - 4

Kalite Kontrol Yetkilisi / Quality Control

TOLGA SAF

Elektronik Onaylanmıştır/Electronically Approved

CE
2195



INSPECTION CERTIFICATE
(EN 10204-3.1 / EN 15088)

IHRACATÇI / EXPORTER:
MÜŞTERİ / CUSTOMER:
SİPARİŞ NO / ORDER NO:
CST.ORDER NO / PART NO:
ÇEKİ LİST NO / PACK NO:

TARİH / DATE 08.05.2017

ALAŞIM / ALLOY 1050
KONDİSYON / TEMPER: H14
BOYUTLAR / DIMENSIONS: 3.000mmX1.200,00mmX2.400,00mm
YÜZEY / SURFACE: Düz / Plain

0002305576

Bobin No	Kimyasal Bileşim / Chemical Composition												Mekanik Özellikler / Mechanical Properties					
	%							ppm				%	Rolling Direction(0)			Transverse Direction(90)		
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ti	Zn	Cr+3	Pb	Cd	Hg	Al	Çekme D. MPa Tensile Str.	Akma D. MPa Yield Str.	Uzama A50% Elongation	Çekme D. MPa Tensile Str.	Akma D. MPa Yield Str.	Uzama A50% Elongation
MIN	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0	0	0	0	99,500				105,0	85,0	4,00
MAX	0,200	0,300	0,030	0,030	0,050	0,030	0,030	100	100	100	100	100,000				145,0		
117010656/B1	0,108	0,264	0,001	0,004	0,005	0,012	0,004	10	10	0	0	99,570				132,0	126,0	9,50

Diğer Test Sonuçları / Others Metal Test Results				
Bobin No Coil No	Yağlılık mg/m ²	Erichsen mm	Sertlik Hardness (HB)	Elektrik İletkenliği Electrical Conductivity (MS/m)
MIN				
MAX				
117010656/B1				

Coils/sheets/thead plates are produced according to EN485-1-2-4, EN573-3, EN586-1-2-3-4, EN1386, ASTM-B209 standards**
* For the purpose of traceability, inspection and test results of incoming raw materials which are related to products can be provided upon request.

* Tests and equipments:
Tensile test : ZWICK Z050 or ZWICK 1478, EN ISO 6892-1 or AA (depending on customers' requests)
Spectral Analysis : ARL 4460, ARL 3460
Hardness test : FUTURE-TECH FM-700, EN ISO 6506
Cupping test : ERICHSEN, DIN 90101

** Materials produced according to customer and/or Assan specifications are exempt from these standards.
ASSAN ALUMİNYUM TESİSLERİ, Yayıla mah. D-100 Karayolu Rüya Sok.No:2 34940 Tuzla / İSTANBUL TÜRKİYE
TEL : + 90 (216) 581 12 00 (10 lines) FAX: + 90 (216) 581 16 10*
FR.454 - 4

Kalite Kontrol Yetkilisi / Quality Control

TOLGA SAF

Elektronik Onaylanmıştır/Electronically Approved

CE
2195



INSPECTION CERTIFICATE
(EN 10204-3.1 / EN 15088)

TARİH / DATE 27.09.2017

ALAŞIM / ALLOY 1050
KONDİSYON / TEMPER: H14
BOYUTLAR / DIMENSIONS: 4,000mmX1.000,00mmX2.000,00mm
YÜZEY / SURFACE: Düz / Plain

0002778678

Bobin No	Kimyasal Bileşim / Chemical Composition												Mekanik Özellikler / Mechanical Properties					
	%							ppm				%	Rolling Direction(0)			Transverse Direction(90)		
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ti	Zn	Cr+3	Pb	Cd	Hg	Al	Çekme D. MPa Tensile Str.	Akma D. MPa Yield Str.	Uzama A50% Elongation	Çekme D. MPa Tensile Str.	Akma D. MPa Yield Str.	Uzama A50% Elongation
MIN	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0	0	0	0	99,500				105,0	85,0	5,00
MAX	0,250	0,400	0,050	0,050	0,050	0,050	0,070	100	100	100	100	100,000				145,0		
117071454/K3	0,115	0,271	0,002	0,011	0,003	0,010	0,004	20	10	0	0	99,553				136,0	131,0	9,70

Diğer Test Sonuçları / Others Metal Test Results				
Bobin No Coil No	Yağlılık mg/m ²	Erichsen mm	Sertlik Hardness (HB)	Elektrik iletkenliği Electrical Conductivity (MS/m)
MIN				
MAX				
117071454/K3				

Coils/sheets/tread plates are produced according to EN485-1-2-4, EN573-3, EN546-1-2-3-4, EN1386, ASTM-B209 standards**

* For the purpose of traceability, inspection and test results of incoming raw materials which are related to products can be provided upon request.

** Tests and equipments:

Tensile test : ZWICK Z050 or ZWICK 1478, EN ISO 6892-1 or AA (depending on customers' requests)

Spectral Analysis : ARL 4460, ARL 3460

Hardness test : FUTURE-TECH FM-700, EN ISO 6506

Cupping test : ERICHSEN, DIN 50101

** Materials produced according to customer and/or Assan specifications are exempt from these standards.

ASSAN ALUMİNYUM TESİSLERİ. Yayıla mah. D-100 Karayolu Rüya Sok.No:2 34940 Tuzla / İSTANBUL TURKEY

TEL : + 90 (216) 581 12 00 (10 lines) FAX: + 90 (216) 581 16 10*

FR.454 - 4

Kalite Kontrol Yetkilisi / Quality Control

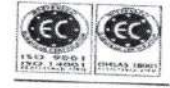
TOLGA SAF

Elektronik Onaylanmıştır/Electronically Approved

CE
2195



KORUMAZ KARDEŞLER ALÜMİNYUM SANAYİ A.Ş.
Merkez Mah.Kavak Sk.No:32 34195 Yenibosna, İSTANBUL
Tel : +90.212.551 13 04- 551 36 41
Fax : +90.212.652 79 79 - 552 04 72
E-mail : info@korumaz.com



Tarih/Date: 12,01,2018

Müşteri/Customer: ÖZEN METAL
Sipariş No:order No:
Material: AA1050

MALZEME TEST SERTİFİKASI / MATERIAL TEST CERTIFICATE

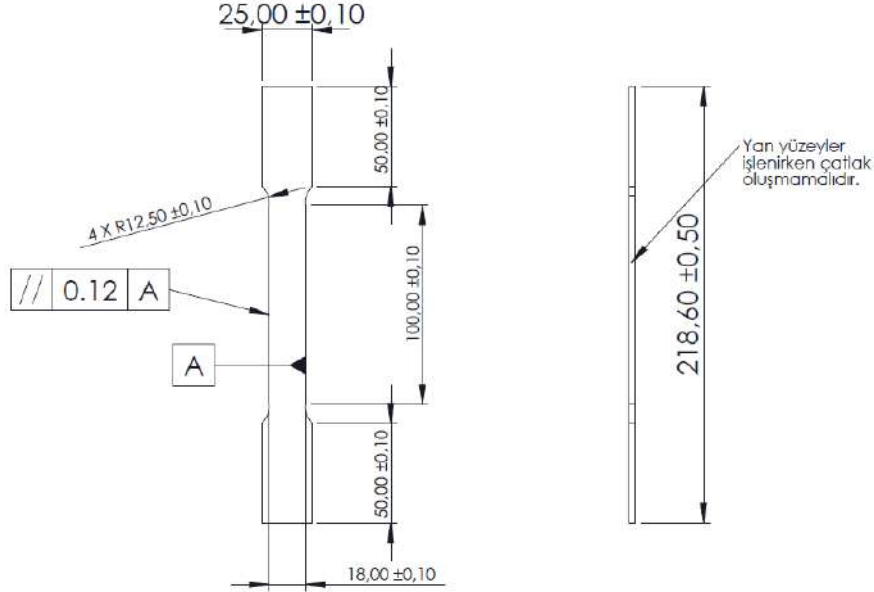
ALAŞIM ALLOY	KONDISYON TEMPER	ÖLÇÜ DIMENSION (mm)	YÜZEY SURFACE	DÖKÜM NO CAST NO	DÖK. TARİH CAST DATE	KİMYASAL BİLEŞİM/ CHEMICAL COMPOSITION(%)								MEKANİK ÖZELLİKLER/ MECHANICAL PROPERTIES			
						Elements	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al	Akma Muk Yield Str. (Mpa)	Çekme Muk. Tensile Str (Mpa)	Uzama Elogation A50(%)
						min											
1050	H-14	5X1200X2400	DÜZ	1963	08,01,2018	max	0,25	0,40	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	99,50	85	105	6
							0,094	0,242	0,009	0,007	0,007	0,007	0,017	99,54	116	125	7,0

Malzemeler onaylanan sipariş özelliklerine istinaden EN485-515-573-10204 3.1, standartlarına göre test edilmiştir
Material conforms to EN 485-515-573-10204 3.1 Specifications
We hereby certify, that the material described above has been tested
with the terms of the confirmation of order

Approved by
Sinan Sali
Material and Metallurgical Eng.

EK-2: Proje Kapsamında Test Edilen Plaka Malzemesi Al 1050 H14 için Çekme Testi Sonuçları

Her bir kalınlıktaki plaka için, 5 tanesi haddeleme yönüne dik, 5 tanesi paralel toplam 10 numune test edilmiştir. Köpek kemiği şeklindeki numuneler, ISO 6892 – 1: 2016 (Metallic materials – Tensile testing – Part 1: Method of test at room temperature) standardına göre boyutlandırılmış ve büyük plakalardan tel erozyon yöntemi ile kesilmiştir.



Şekil EK-3-1. Çekme testi numunelerinin teknik resmi.

Deney Sonuçları:

Numunelerin pekleşme davranımı, ISO 10275: 2007 (Metallic materials – Sheet and strip – Determination of tensile strain hardening exponent) standardı kullanılarak hem Hollomon hem de Ludwick pekleşme yasalarına göre belirlenmiştir. Hollomon pekleşme yasası $\sigma = K \varepsilon^N$, Ludwick pekleşme yasası ise $\sigma = \sigma_0 + K \varepsilon^N$ olarak ifade edilir. Her iki pekleşme yasasında da σ gerçek gerilime, ε gerçek gerinime, N ise pekleşme üsteline karşılık gelir ve K bir katsayıdır. Ludwick pekleşme yasasında σ_0 akma mukavemetini ifade etmektedir. Her bir kalınlık için 8 numune ODTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarında hiçbir ücret ödenmeden test edilmiş, 2 numune ise Atılım Üniversitesi Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezi'nden hizmet alınarak test ettirilmiştir. Her iki merkezde de gerinim ölçümü için optik ekstensometre kullanılmıştır. Testlerin iki farklı yerde yapılmasının sebebi, sonuçların kullanılan düzenekten bağımsız olup olmadığının kontrol edilmek istenmesidir. Aşağıdaki her bir tabloda sonuçları

verilen ilk 4 numune ODTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği malzeme laboratuvarında, beşince numune ise Atılım Üniversitesi Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezi'nde test edilmiştir; farklı üniversitelerde yapılan testlerin sonuçları uyumludur.

Numune	Akma Gerilmesi (MPa)	Çekme Gerilmesi (MPa)	Hollomon			Ludwick		
			Pekleşme Katsayısı 'N'	K (MPa)	σ (MPa)	Pekleşme Katsayısı 'N'	K (MPa)	
0°	1	106.21	111.70	0.0346	131.01	104.82	0.5638	88.39
	2	105.43	111.38	0.0370	131.93	103.91	0.5987	111.56
	3	105.74	112.58	0.0399	135.04	104.40	0.5309	91.27
	4	105.72	112.29	0.0387	133.98	104.39	0.5230	84.56
	5	108.68	112.17	0.0277	127.18	106.43	0.6929	83.00
90°	1	115.67	119.63	0.0313	139.23	114.09	0.5992	100.43
	2	115.34	119.97	0.0340	141.30	113.81	0.6059	104.92
	3	113.85	119.25	0.0385	143.29	112.09	0.6169	119.08
	4	111.92	117.06	0.0369	139.69	110.33	0.6070	109.47
	5	109.03	112.74	0.0290	129.28	107.31	0.6800	111.58

Tablo EK-3-1. 0.5 mm kalınlığındaki numuneler.

0°	1	109.70	115.38	0.0325	134.42	109.16	0.5992	100.43
	2	111.15	116.03	0.0331	135.59	109.70	0.6059	104.92
	3	110.97	116.02	0.0357	137.30	109.24	0.6169	119.08
	4	111.06	116.00	0.0345	136.46	109.41	0.6070	109.49
	5	114.34	121.19	0.0365	142.45	112.89	0.5413	83.05
90°	1	117.54	123.58	0.0441	152.61	115.34	0.6428	182.53
	2	118.66	124.43	0.0431	153.07	118.35	0.6540	189.98
	3	118.45	124.41	0.0433	153.09	116.33	0.6212	160.31
	4	117.82	123.86	0.0422	151.50	115.91	0.6179	157.31
	5	120.35	127.48	0.0410	153.68	118.59	0.4306	59.88

Tablo EK-3-2. 1 mm kalınlığındaki numuneler.

0°	1	123.73	130.44	0.0399	157.31	122.16	0.6195	160.87
	2	125.68	132.84	0.0408	160.81	124.25	0.5887	144.69
	3	125.19	132.16	0.0383	157.98	124.00	0.5949	139.77
	4	124.41	131.15	0.0390	157.37	122.94	0.6207	156.95
	5	97.20	134.86	0.1364	241.68	98.92	0.4207	263.78
90°	1	139.94	144.40	0.0343	171.09	138.25	0.6348	153.71
	2	141.19	145.42	0.0334	171.64	139.72	0.6683	178.88
	3	141.11	145.45	0.0324	170.68	139.60	0.6488	157.45
	4	141.21	145.50	0.0323	170.65	139.66	0.6603	165.74
	5	140.69	146.52	0.0369	175.30	139.42	0.4442	64.37

Tablo EK-3-3. 3 mm kalınlığındaki numuneler.

0°	1	112.19	119.39	0.0373	141.03	110.87	0.5588	99.06
	2	112.65	119.95	0.0383	142.24	111.11	0.5531	96.62
	3	109.53	117.93	0.0413	141.22	108.07	0.5434	100.29
	4	107.86	115.72	0.0374	136.39	107.01	0.4964	75.08
	5	111.07	118.82	0.0401	140.77	108.59	0.5517	82.81
90°	1	122.46	126.24	0.0318	147.72	120.64	0.6786	153.32
	2	120.87	124.02	0.0305	144.36	118.83	0.7360	186.94
	3	120.53	124.67	0.0329	146.23	118.53	0.6996	172.88
	4	119.43	123.25	0.0332	145.04	117.30	0.6867	157.83
	5	119.98	126.05	0.0342	147.55	118.61	0.4808	64.42

Tablo EK-3-4. 4 mm kalınlığındaki numuneler.

0°	1	114.38	120.28	0.0400	145.59	112.57	0.6165	151.35
	2	114.34	119.68	0.0359	142.11	112.83	0.5946	120.60
	3	115.51	119.38	0.0295	137.76	113.00	0.6517	121.74
	4	116.45	120.39	0.0292	138.77	115.09	0.6287	111.01
	5	121.20	124.47	0.0257	140.79	119.53	0.6044	73.41
90°	1	120.52	128.46	0.0574	169.42	117.42	0.6319	243.67
	2	121.10	128.68	0.0512	164.50	118.67	0.6141	203.89
	3	124.07	128.53	0.0378	154.83	121.78	0.6918	203.30
	4	123.41	128.60	0.0438	159.38	120.63	0.7150	270.16
	5	122.65	131.03	0.0466	162.02	120.45	0.6078	165.31

Tablo EK-3-5. 5 mm kalınlığındaki numuneler.



ORTA DOGU TEKNİK UNIVERSITESİ
METALURJİ VE MALZEME MUHENDİSLİĞİ BOLUMU
DOKUM VE KATILASMA LABORATUARI
INONU BULVARI 06531 ANKARA
TEL: (0312) 210 59 29
FAX: (0312) 210 25 18

SPEKTROMETRE ANALİZ SONUÇLARI (%)

Talep Sahibi : Berk AYTUNA

Rutin No: 0,5 mm yy ✓

Tarih: 10.08.2018

Kalite:

	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ni	Ti
1	99,4	0,173	0,260	< 0,0010	< 0,0010	< 0,0001	< 0,0050	0,0049	< 0,0050	0,0240
2	99,4	0,163	0,267	< 0,0010	< 0,0010	< 0,0001	< 0,0050	0,0054	< 0,0050	0,0245
3	99,4	0,184	0,277	< 0,0010	< 0,0010	< 0,0001	< 0,0050	0,0063	< 0,0050	0,0249
Ort	99,4	0,173	0,268	< 0,0010	< 0,0010	< 0,0001	< 0,0050	0,0056	< 0,0050	0,0245

	Be	Ca	Li	Pb	Sn	Sr	V	Na	Bi	Zr
1	< 0,0001	< 0,0005	0,0001	< 0,0020	0,0161	< 0,0001	0,0128	0,0012	< 0,0050	0,0047
2	< 0,0001	< 0,0005	0,0001	0,0030	0,0170	< 0,0001	0,0126	0,0012	< 0,0050	0,0038
3	< 0,0001	0,0014	0,0001	< 0,0020	< 0,0100	< 0,0001	0,0127	0,0014	< 0,0050	0,0061
Ort	< 0,0001	< 0,0005	0,0001	< 0,0020	0,0142	< 0,0001	0,0127	0,0012	< 0,0050	0,0049

	B	Ga	Cd	Co	Ag	Hg	In
1	0,0029	0,0129	0,0018	< 0,0030	0,0022	< 0,0030	< 0,0020
2	0,0027	0,0125	0,0019	< 0,0030	0,0025	< 0,0030	< 0,0020
3	0,0027	0,0126	0,0021	< 0,0030	0,0022	< 0,0030	< 0,0020
Ort	0,0028	0,0127	0,0019	< 0,0030	0,0023	< 0,0030	< 0,0020



Dr. Öğretim Üyesi Mert EFE
 ODTU Metalurji ve Malz. Müh.
 Bölüm Bşk. Yrd.



ORTA DOGU TEKNİK UNIVERSİTESİ
METALURJİ VE MALZEME MUHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ
DOKUM VE KATILASMA LABORATUVARI
İNÖNÜ BULVARI 06531 ANKARA
TEL: (0312) 210 59 29
FAX: (0312) 210 25 18

SPEKTROMETRE ANALİZ SONUÇLARI (%)

Talep Sahibi : Berk AYTUNA

Rutin No: ~~0-5 mm~~ 1 mm

Tarih: 10.08.2018

Kalite:

	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ni	Ti
1	99,4	0,194	0,322	< 0,0010	< 0,0010	< 0,0001	< 0,0050	0,0071	< 0,0050	0,0177
2	99,4	0,194	0,319	< 0,0010	< 0,0010	< 0,0001	< 0,0050	0,0070	< 0,0050	0,0189
3	99,4	0,193	0,320	< 0,0010	< 0,0010	< 0,0001	< 0,0050	0,0060	< 0,0050	0,0183
Ort	99,4	0,193	0,320	< 0,0010	< 0,0010	< 0,0001	< 0,0050	0,0067	< 0,0050	0,0183

	Be	Ca	Li	Pb	Sn	Sr	V	Na	Bi	Zr
1	< 0,0001	< 0,0005	0,0001	< 0,0020	< 0,0100	< 0,0001	0,0112	0,0023	< 0,0050	0,0043
2	< 0,0001	< 0,0005	0,0001	< 0,0020	< 0,0100	< 0,0001	0,0117	0,0040	< 0,0050	0,0048
3	< 0,0001	< 0,0005	0,0001	< 0,0020	0,0157	< 0,0001	0,0105	0,0033	< 0,0050	0,0038
Ort	< 0,0001	< 0,0005	0,0001	< 0,0020	0,0104	< 0,0001	0,0111	0,0032	< 0,0050	0,0043

	B	Ga	Cd	Co	Ag	Hg	In
1	0,0030	0,0093	0,0025	< 0,0030	0,0016	< 0,0030	< 0,0020
2	0,0034	0,0102	0,0027	< 0,0030	0,0021	< 0,0030	< 0,0020
3	0,0037	0,0099	0,0021	< 0,0030	0,0019	< 0,0030	< 0,0020
Ort	0,0034	0,0098	0,0025	< 0,0030	0,0018	< 0,0030	< 0,0020



Dr. Öğretim Üyesi Mert EFE
ODTÜ Metalurji ve Malz. Müh.
Bölüm Bşk. Yrd.



ORTA DOGU TEKNİK UNIVERSITESI
METALURJİ VE MALZEME MUHENDİSLİĞİ BOLUMU
DOKUM VE KATILASMA LABORATUARI
INONU BULVARI 06531 ANKARA
TEL: (0312) 210 59 29
FAX: (0312) 210 25 18

SPEKTROMETRE ANALİZ SONUÇLARI (%)

Talep Sahibi : Berk AYTUNA

Rutin No: 3.00 mm

Tarih: 10.08.2018

Kalite:

	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ni	Ti
1	99,4	0,162	0,297	< 0,0010	< 0,0010	< 0,0001	< 0,0050	0,0074	< 0,0050	0,0217
2	99,4	0,157	0,296	< 0,0010	< 0,0010	< 0,0001	< 0,0050	0,0060	< 0,0050	0,0224
3	99,4	0,153	0,303	< 0,0010	< 0,0010	< 0,0001	< 0,0050	0,0066	< 0,0050	0,0225
Ort	99,4	0,157	0,299	< 0,0010	< 0,0010	< 0,0001	< 0,0050	0,0066	< 0,0050	0,0222

	Be	Ca	Li	Pb	Sn	Sr	V	Na	Bi	Zr
1	< 0,0001	0,0020	0,0001	< 0,0020	0,0248	< 0,0001	0,0139	0,0019	< 0,0050	0,0065
2	< 0,0001	0,0016	0,0001	0,0022	0,0201	0,0001	0,0149	0,0019	< 0,0050	0,0073
3	< 0,0001	0,0016	0,0001	0,0025	0,0238	< 0,0001	0,0139	0,0017	< 0,0050	0,0075
Ort	< 0,0001	0,0017	0,0001	< 0,0020	0,0229	< 0,0001	0,0142	0,0018	< 0,0050	0,0071

	B	Ga	Cd	Co	Ag	Hg	In
1	0,0029	0,0134	0,0017	< 0,0030	0,0029	< 0,0030	< 0,0020
2	0,0027	0,0151	0,0015	< 0,0030	0,0025	< 0,0030	< 0,0020
3	0,0027	0,0141	0,0018	< 0,0030	0,0031	< 0,0030	< 0,0020
Ort	0,0028	0,0142	0,0017	< 0,0030	0,0028	< 0,0030	< 0,0020



Dr. Öğretim Üyesi Mert EFE
ODTÜ Metalurji ve Malz. Müh.
Bölüm Bşk. Yrd.



ORTA DOGU TEKNİK UNIVERSITESI
METALURJİ VE MALZEME MUHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ
DOKUM VE KATILASMA LABORATUVARI
INONU BULVARI 06531 ANKARA
TEL: (0312) 210 59 29
FAX: (0312) 210 25 18

SPEKTROMETRE ANALİZ SONUÇLARI (%)

Talep Sahibi : Berk AYTUNA

Rutin No: 4.00 mm

Tarih: 10.08.2018

Kalite:

	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ni	Ti
1	99,3	0,204	0,319	< 0,0010	< 0,0010	< 0,0001	< 0,0050	0,0080	< 0,0050	0,0223
2	99,3	0,203	0,312	< 0,0010	< 0,0010	< 0,0001	< 0,0050	0,0059	< 0,0050	0,0224
3	99,3	0,206	0,316	< 0,0010	< 0,0010	< 0,0001	< 0,0050	0,0081	< 0,0050	0,0227
Ort	99,3	0,205	0,316	< 0,0010	< 0,0010	< 0,0001	< 0,0050	0,0073	< 0,0050	0,0225

	Be	Ca	Li	Pb	Sn	Sr	V	Na	Bi	Zr
1	< 0,0001	0,0005	0,0001	0,0034	0,0141	< 0,0001	0,0120	0,0030	< 0,0050	0,0056
2	< 0,0001	< 0,0005	0,0001	< 0,0020	< 0,0100	< 0,0001	0,0107	0,0087	< 0,0050	0,0053
3	< 0,0001	< 0,0005	0,0001	< 0,0020	0,0126	< 0,0001	0,0113	0,0033	< 0,0050	0,0060
Ort	< 0,0001	< 0,0005	0,0001	< 0,0020	0,0118	< 0,0001	0,0113	0,0050	< 0,0050	0,0056

	B	Ga	Cd	Co	Ag	Hg	In
1	0,0028	0,0138	0,0019	< 0,0030	0,0032	< 0,0030	< 0,0020
2	0,0026	0,0144	0,0016	< 0,0030	0,0030	< 0,0030	< 0,0020
3	0,0026	0,0138	0,0019	< 0,0030	0,0025	< 0,0030	< 0,0020
Ort	0,0027	0,0140	0,0018	< 0,0030	0,0029	< 0,0030	< 0,0020



Dr. Öğretim Üyesi Mert EFE
ODTU Metalurji ve Malz. Müh.
Bölüm Bşk. Yrd.



ORTA DOGU TEKNİK UNIVERSITESI
METALURJİ VE MALZEME MUHENDİSLİĞİ BOLUMU
DOKUM VE KATILASMA LABORATUVARI
INONU BULVARI 06531 ANKARA
TEL: (0312) 210 59 29
FAX: (0312) 210 25 18

SPEKTROMETRE ANALİZ SONUÇLARI (%)

Talep Sahibi : Berk AYTUNA

Rutin No: 5.00 mm

Tarih: 10.08.2018

Kalite:

	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ni	Ti
1	99,5	0,102	0,262	< 0,0010	< 0,0010	< 0,0001	< 0,0050	0,0097	< 0,0050	0,0239
2	99,5	0,0978	0,267	< 0,0010	< 0,0010	< 0,0001	< 0,0050	0,0069	< 0,0050	0,0226
3	99,5	0,0978	0,250	< 0,0010	< 0,0010	< 0,0001	< 0,0050	0,0065	< 0,0050	0,0236
Ort	99,5	0,0994	0,259	< 0,0010	< 0,0010	< 0,0001	< 0,0050	0,0077	< 0,0050	0,0234

	Be	Ca	Li	Pb	Sn	Sr	V	Na	Bi	Zr
1	< 0,0001	0,0016	0,0001	0,0021	0,0202	< 0,0001	0,0189	0,0016	< 0,0050	0,0061
2	< 0,0001	0,0033	0,0001	0,0033	0,0253	< 0,0001	0,0157	0,0019	< 0,0050	0,0047
3	< 0,0001	0,0006	0,0001	< 0,0020	0,0201	< 0,0001	0,0169	0,0019	< 0,0050	0,0050
Ort	< 0,0001	0,0018	0,0001	0,0024	0,0219	< 0,0001	0,0172	0,0018	< 0,0050	0,0053

	B	Ga	Cd	Co	Ag	Hg	In
1	0,0033	0,0137	0,0017	< 0,0030	0,0033	< 0,0030	< 0,0020
2	0,0028	0,0121	0,0013	< 0,0030	0,0028	< 0,0030	< 0,0020
3	0,0033	0,0122	0,0016	< 0,0030	0,0027	< 0,0030	< 0,0020
Ort	0,0031	0,0126	0,0015	< 0,0030	0,0029	< 0,0030	< 0,0020



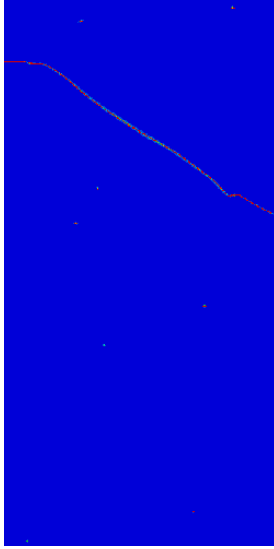
Dr. Öğretim Üyesi Mert EFE
ODTU Metalurji ve Malz. Müh.
Bölüm Bşk. Yrd.



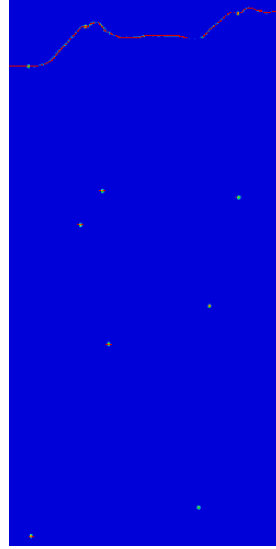
EK-4:

Boşluk Çekirdeklenmesiz Model Kullanılarak Yapılan Parametrik Çalışmada Elde Edilen Çatlak Morfolojileri

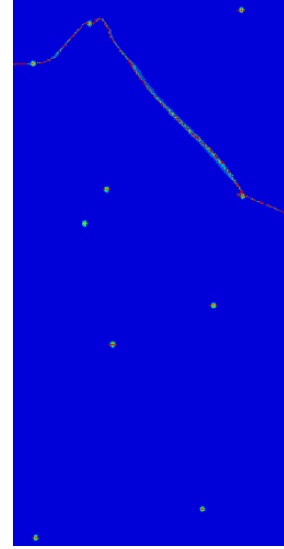
Parametrik çalışmada incelenen plakalar için malzeme özellikleri $E = 70$ GPa, $\nu = 0.33$, $\rho = 2.7$ Mg·m⁻³, $\sigma_0 = 210$ MPa, $q_1=1.50$, $q_2=1.00$, $q_3=2.25$, $f_{kr} = 0.01$, $f_{MEY} = 0.05$, $f_0 = 10^{-4}$ alınmıştır. Hesaplama zaman aralığı olarak $\Delta t = 0.5$ s değeri kullanılmıştır. Hesaplamalar, farklı boşluk sayıları ($N_b \in \{10, 25, 50, 75, 100\}$) ve boşluk boyutları için ($R_b/L_{el} \in \{3, 6, 9\}$) tekrar edilmiş, malzemenin pekleşme kapasitesini değiştirmek için, diğer tüm parametreler sabit bırakılıp sadece pekleşme üsteli $N \in \{0.05, 0.10, 0.15\}$ değiştirilmiştir. Aşağıda, parametrik çalışma kapsamında yapılan tüm hesaplamalar için çatlak morfolojileri, plakanın deforme olmamış konfigürasyonunda gösterilmiştir.



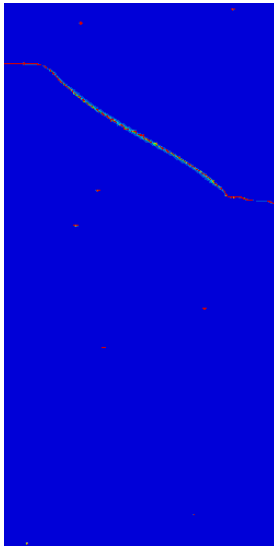
$R_b = 3L_{el}, N = 0.05$



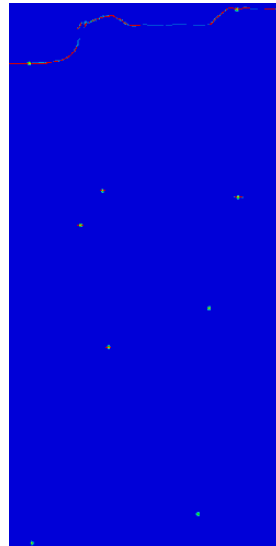
$R_b = 6L_{el}, N = 0.05$



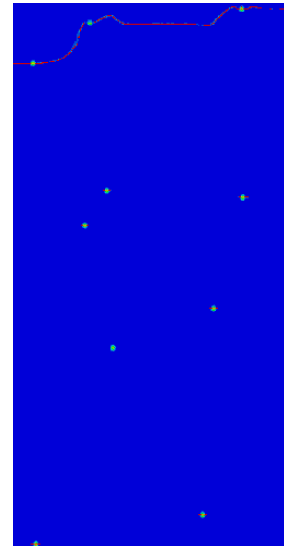
$R_b = 9L_{el}, N = 0.05$



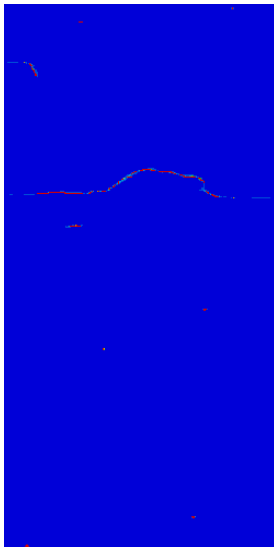
$R_b = 3L_{el}, N = 0.10$



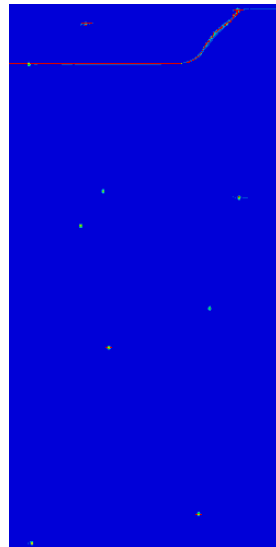
$R_b = 6L_{el}, N = 0.10$



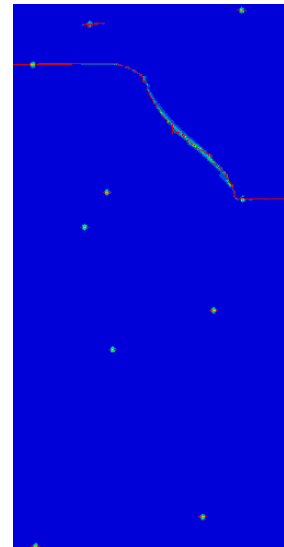
$R_b = 9L_{el}, N = 0.10$



$R_b = 3L_{el}, N = 0.15$

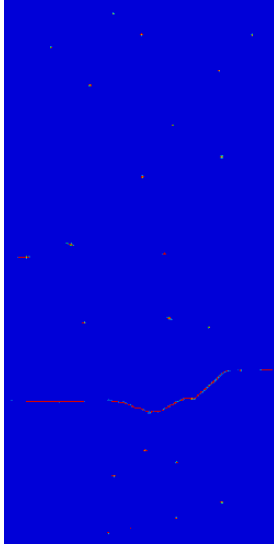


$R_b = 6L_{el}, N = 0.15$

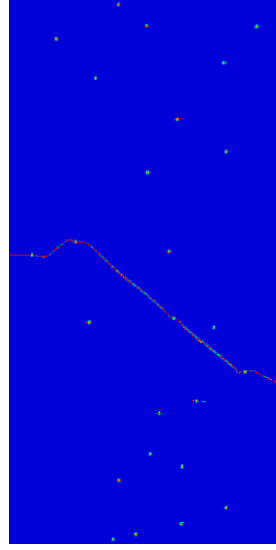


$R_b = 9L_{el}, N = 0.15$

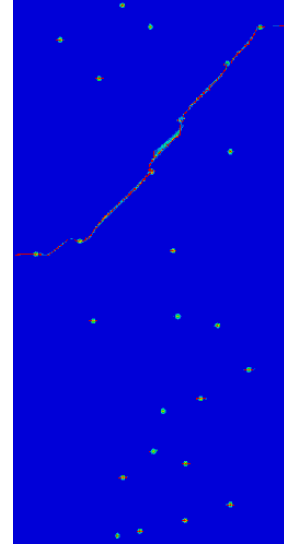
Şekil EK-4.1. Temsili boşluk sayısı $S_b = 10$ için çatlak morfolojileri.



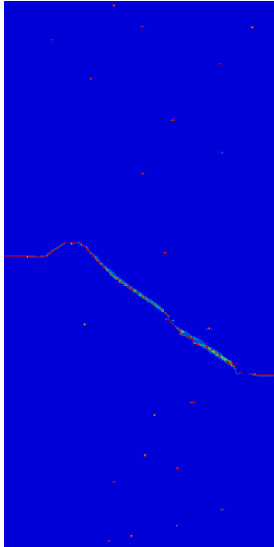
$R_b = 3L_{el}, N = 0.05$



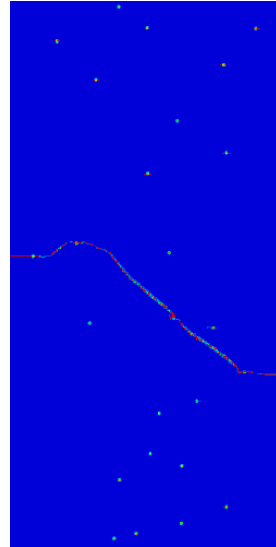
$R_b = 6L_{el}, N = 0.05$



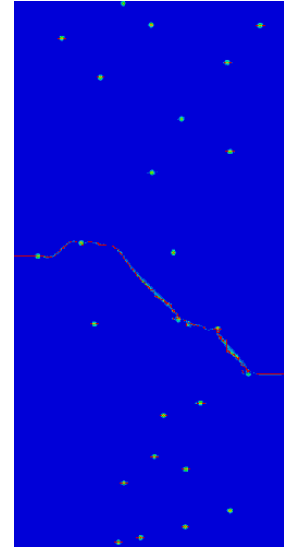
$R_b = 9L_{el}, N = 0.05$



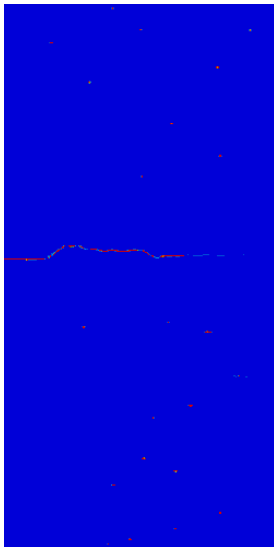
$R_b = 3L_{el}, N = 0.10$



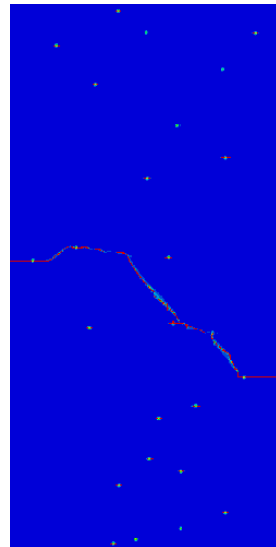
$R_b = 6L_{el}, N = 0.10$



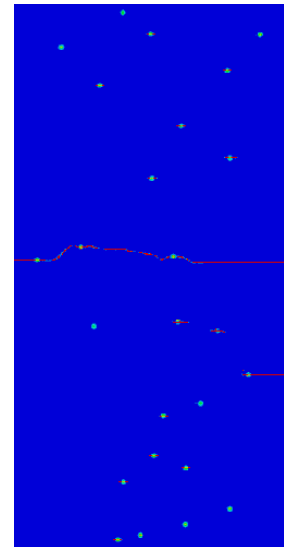
$R_b = 9L_{el}, N = 0.10$



$R_b = 3L_{el}, N = 0.15$

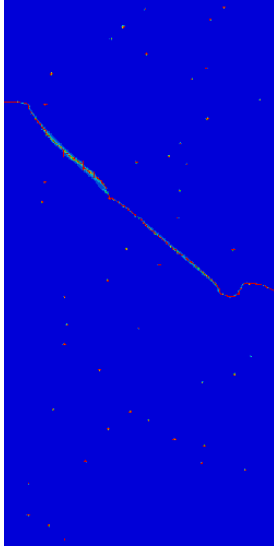


$R_b = 6L_{el}, N = 0.15$

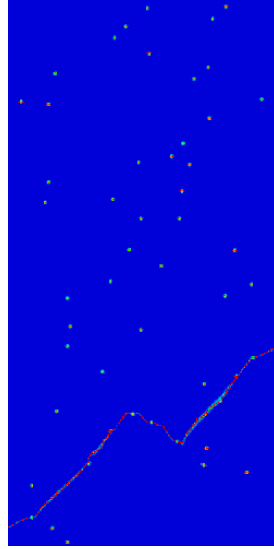


$R_b = 9L_{el}, N = 0.15$

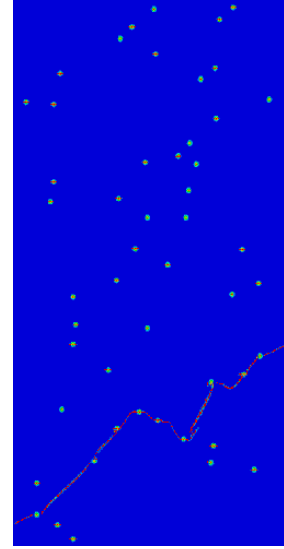
Şekil EK-4.2. Temsili boşluk sayısı $S_b = 25$ için çatlak morfolojileri.



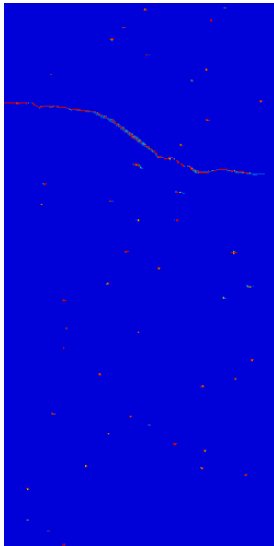
$R_b = 3L_{el}, N = 0.05$



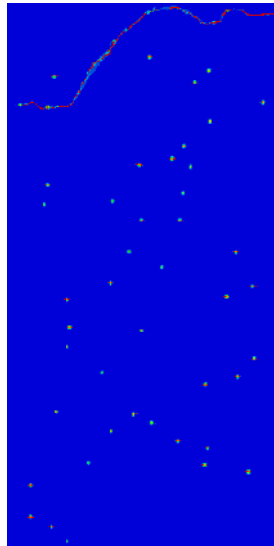
$R_b = 6L_{el}, N = 0.05$



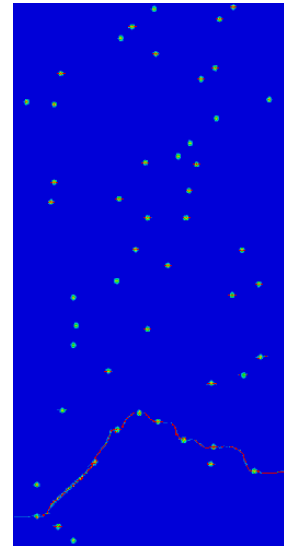
$R_b = 9L_{el}, N = 0.05$



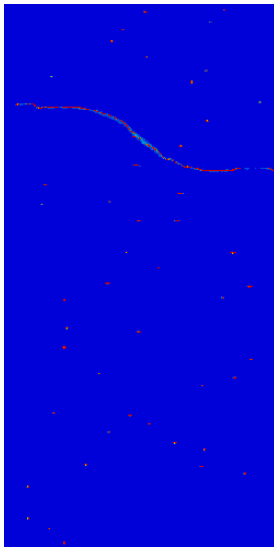
$R_b = 3L_{el}, N = 0.10$



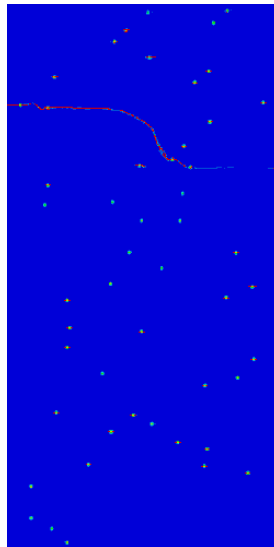
$R_b = 6L_{el}, N = 0.10$



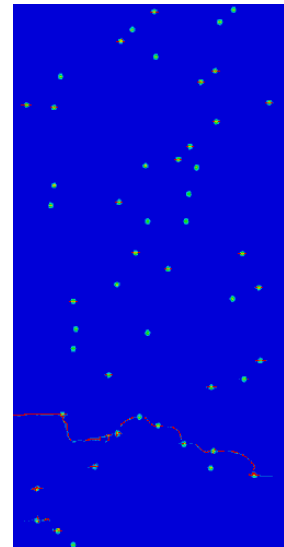
$R_b = 9L_{el}, N = 0.10$



$R_b = 3L_{el}, N = 0.15$

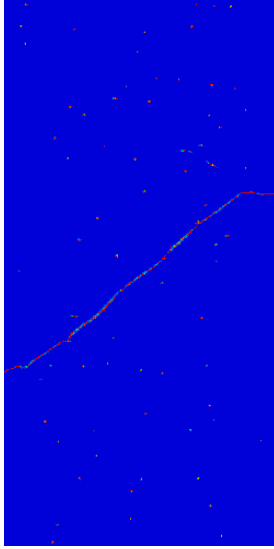


$R_b = 6L_{el}, N = 0.15$

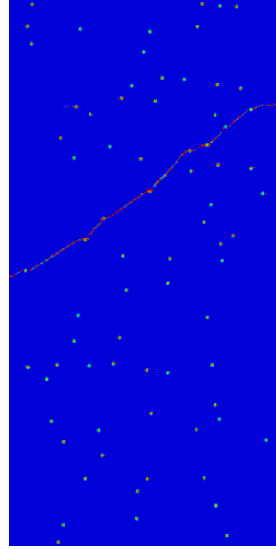


$R_b = 9L_{el}, N = 0.15$

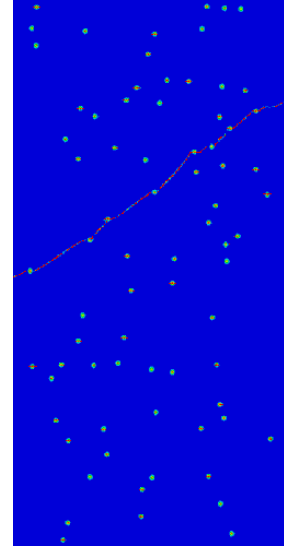
Şekil EK-4.3. Temsili boşluk sayısı $S_b = 50$ için çatlak morfolojileri.



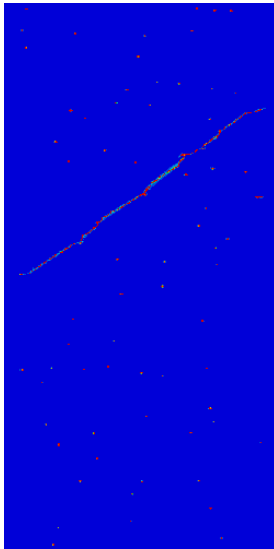
$R_b = 3L_{el}, N = 0.05$



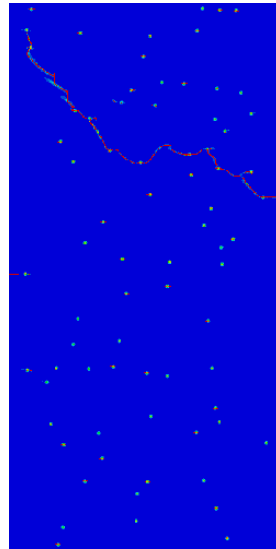
$R_b = 6L_{el}, N = 0.05$



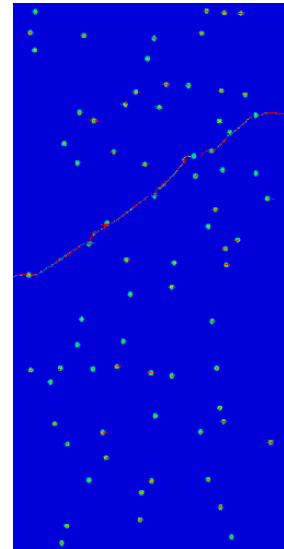
$R_b = 9L_{el}, N = 0.05$



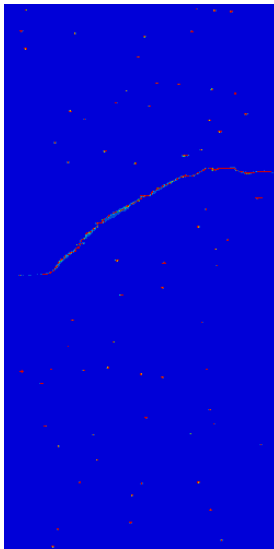
$R_b = 3L_{el}, N = 0.10$



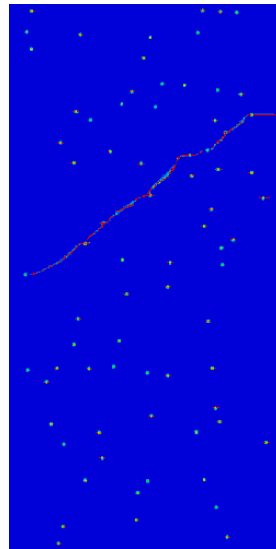
$R_b = 6L_{el}, N = 0.10$



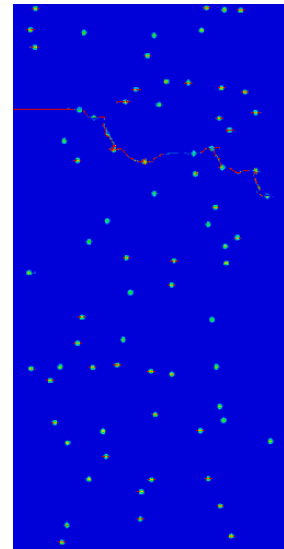
$R_b = 9L_{el}, N = 0.10$



$R_b = 3L_{el}, N = 0.15$

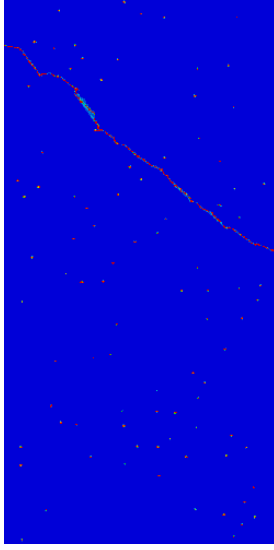


$R_b = 6L_{el}, N = 0.15$

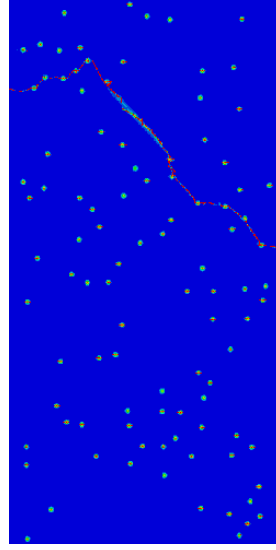


$R_b = 9L_{el}, N = 0.15$

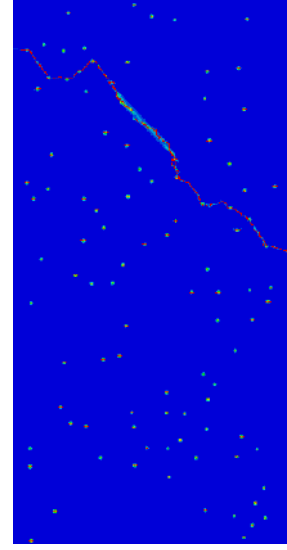
Şekil EK-4.4. Temsili boşluk sayısı $S_b = 75$ için çatlak morfolojileri.



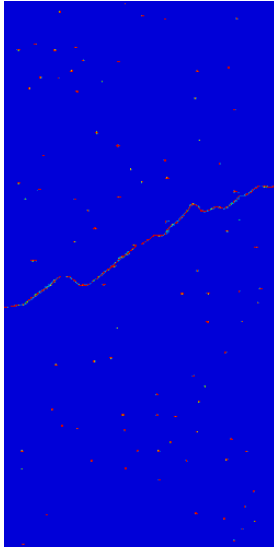
$R_b = 3L_{el}, N = 0.05$



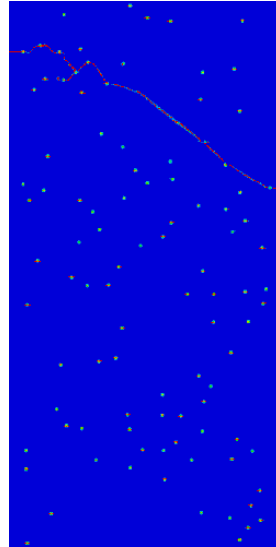
$R_b = 6L_{el}, N = 0.05$



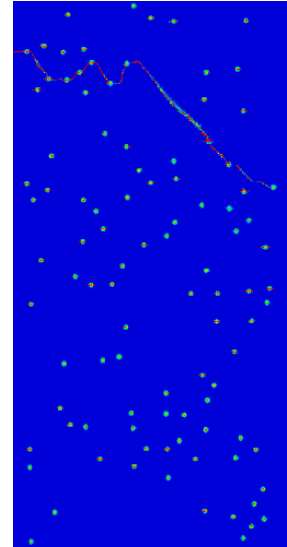
$R_b = 9L_{el}, N = 0.05$



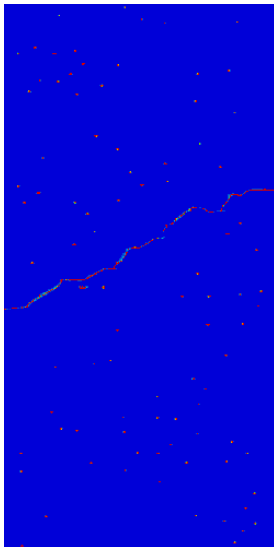
$R_b = 3L_{el}, N = 0.10$



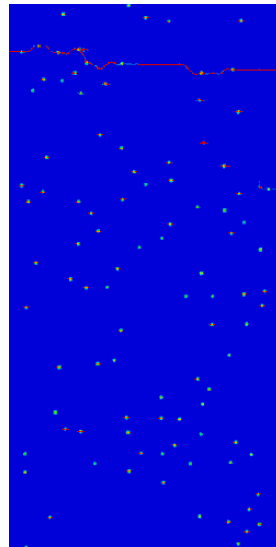
$R_b = 6L_{el}, N = 0.10$



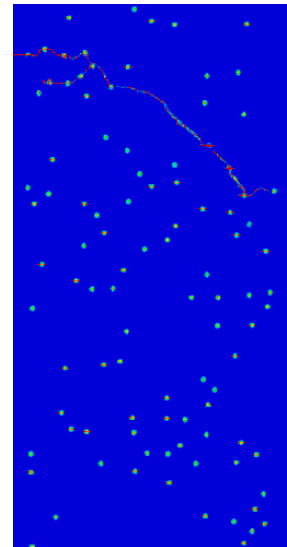
$R_b = 9L_{el}, N = 0.10$



$R_b = 3L_{el}, N = 0.15$



$R_b = 6L_{el}, N = 0.15$



$R_b = 9L_{el}, N = 0.15$

Şekil EK-4.5. Temsili boşluk sayısı $S_b = 100$ için çatlak morfolojileri.

FRACTURE SURFACE MORPHOLOGY UNDER DUCTILE TEARING OF METAL PLATES

MUHAMMET F. KAÇAR^{*}, CİHAN TEKOĞLU^{*} AND KIM L. NIELSEN[†]

^{*} Department of Mechanical Engineering, TOBB University of Economics and Technology, Söğütözü, Ankara, 06560, Turkey
e-mail: c.tekoglu@etu.edu.tr, web page: <http://cihantekoglu.etu.edu.tr>

[†] Department of Mechanical Engineering, Solid Mechanics Section, Technical University of Denmark, DK-2800 Kongens Lyngby, Denmark
Email: kin@mek.dtu.dk - Web page: <http://www.mek.dtu.dk>

Key words: Ductile plate tearing, Microstructure randomness, Void-by-Void, Multiple void interaction, Localization.

Summary. The present work takes as offset the hypothesis that microstructural parameters, related to particle size and distribution, govern the transition between crack surface morphologies observed in experiments. The key question is; why does tearing of a given metal plate leave a specific morphology on the fracture surface?

1 INTRODUCTION

The micro-mechanisms governing ductile plate tearing have been established through decades of research. Fracture of ductile metal plates, subject to mode I tearing, is known to depend heavily on the metal properties, microstructure and plate dimensions. Intermetallic inclusions are often responsible for the nucleation of the micro-voids that, upon loading, grow to coalesce and eventually form micro-cracks. However, distinct crack surface morphologies, such as cup-cup, cup-cone, and slanting are observed for extensive crack growth in metal plates and several investigators report that plates made of high strength age-hardened aluminum alloys, or high strength steels, exhibit slanted crack growth, whereas a cup-cup type fracture is observed for low strength alloys. Despite such insight, the interplay between tearing modes remains to be fully understood, e.g. nowhere is a conclusive answer found to; *why does a propagating crack choose one tearing mode over others?* In the present, work focus is turned to the effect of microstructure - in terms of void nucleation sites, number and distributions. The hypothesis is that; a population of small particle/void nucleation sites, distributed randomly in the material, gives rise to a very different fracture behavior in comparison to a population of randomly distributed large particle/void nucleation sites with the same overall volume fraction. Essentially, a shift in the governing mechanism from multiple void interactions, in a macroscopic deformation band, to a microscopic localization process that occurs as void-by-void interaction, is expected.

2 MODELLING FRAMEWORK

The present work adopts, and modifies, the simplified 2D plane strain model setup considered by Nielsen and Hutchinson (2012). Rather than restricting the analysis to a homogeneous Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN) material (a continuum description), the present work focuses on the effect of introducing a population of “discrete” particles that act as discrete void nucleation sites. Thus, the model setup allows microstructural parameters such as the average initial porosity, the particle size (relative to plate thickness), number and distribution characteristics to enter the analysis. A number of void nucleation sites, N_p , are considered to be distributed randomly and modeled by locally introducing a high level of damage that locally follows a Gaussian bell (see Eq. (1)). Here, with the constraint that no overlapping between neighboring nucleation sites are allowed.

$$f_0(x_1, x_2) = f_0^M \exp\left(-\frac{(x_1 - x_1^M)^2 - (x_2 - x_2^M)^2}{2(R_p/4)^2}\right), \quad (1)$$

with f_0^M being the porosity at center of the nucleation site, x_i^M are the coordinates of the nucleation site center, and R_p is the radius of the nucleation site (with a minimum of 6 elements across each nucleation site). A background porosity is assumed to exist between nucleation sites, f_0^b , which allows neighboring sites to eventually coalesce. The GTN material model is employed to predict the porosity evolving from the nucleation sites as-well as the macroscopic material separation that develops across the plate thickness as voids link up. The employed version of the GTN model reads;

$$\Phi = \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_y}\right)^2 + 2q_1 f^* \cosh\left(\frac{3}{2} \frac{q_2 \sigma_{kk}}{\sigma_e}\right) - (1 + (q_1 f^*)^2), \quad (2)$$

and takes into account void coalescence by the phenomenological f^* -criterion introduced by Tvergaard and Needleman (1984). Thus, the analysis relies on two key void volume fractions; one to define the onset of void coalescence, f_c , and one to define the complete loss of load carrying capacity at a material point, $f_f (= f_0^M)$. The Tvergaard constants are; $q_1 = 1.5$ and $q_2 = 1.0$.

As plastic flow localizes ahead of the crack tip, the domain above and below the fracture process zone elastically unload. This enforces a constraint on the deformation along the x_3 -direction that leads to a near tip plane strain condition (see Fig. 1). That is, a cross-sectional plane, assumed constraint to plane strain in the crack growth direction, is modeled by use of ABAQUS/Explicit and the section considered maintains an initial aspect ratio of $H/W = 3$. Figure 1 outlines the boundary value problem considered. The element size in the finely discretized section is; $L_e/W = 0.001$, with W being the plate thickness. Elements in that region are 4-node and square in the un-deformed configuration (employing reduced Gauss integration, CPE4R). ABAQUS/Explicit is employed to facilitate element erosion when a sufficient damage level is reached, but it is not the intention to enter a regime where inertia plays a role.

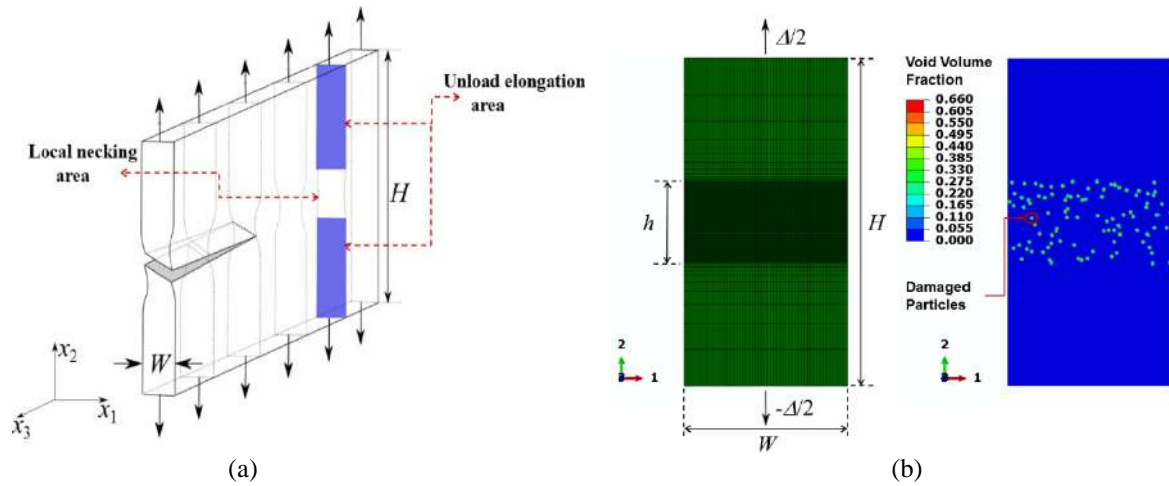


Figure 1: (a) Schematic of the sequential fracture process governing ductile plate tearing under mode I loading, here identifying the domain height, H , and the plate thickness, W . (b) The FE mesh for the 2D plane strain plate section with imposed boundary conditions and illustrated damaged particle distribution.

3 RESULTS

The plate material is assumed to be a typical aluminum alloy in the calculations presented below (with a Young's modulus; $E = 70$ GPa, Poisson ratio; $\nu = 0.3$, density; $\rho = 2700$ kg/m³, initial yield stress; $\sigma_0 = 300$ MPa, and a power-law hardening exponent; $n \in [0.05, 0.15]$). An extensive convergence study has been performed to adjust the model parameters; f_c , f_f , f_0^b , and the imposed macroscopic strain rate, \dot{E}_{22} , such that dynamic effects are eliminated from the results. Here, by ensuring a low kinetic energy and a rate-independent crack surface morphology (the latter proving to be a strict condition). The convergence study showed that with increasing initial porosity in the plate (which depends on f_f , f_0^b , and N_p), the \dot{E}_{22} value required to provide quasi-static results decreases. This is in accordance with the physics of the problem: a larger initial porosity leads to several energetically (more or less) equivalent crack paths and even a small change in \dot{E}_{22} results an alternative crack path to be activated. Also, for f_0^b values on the same order of magnitude as f_c , the crack path evolves through void-by-void coalescence and is rather insensitive to \dot{E}_{22} . Figure 2 shows preliminary results and, as expected, the crack path (here depicted in the undeformed geometry) is indeed sensitive to the number, distribution and size of the damaged discretely modelled particles as well as to the strain hardening capacity of the plate.

4 CONCLUSIONS

A numerical framework is developed to investigate the effects of material/geometric parameters on the crack path morphology in ductile tearing of metal alloys. Although more calculations need to be performed to reach secure conclusions, the initial results suggest that a small (large) strain hardening exponent favors a slanted (cup-cup) crack, in accordance with the experimental results in the literature.

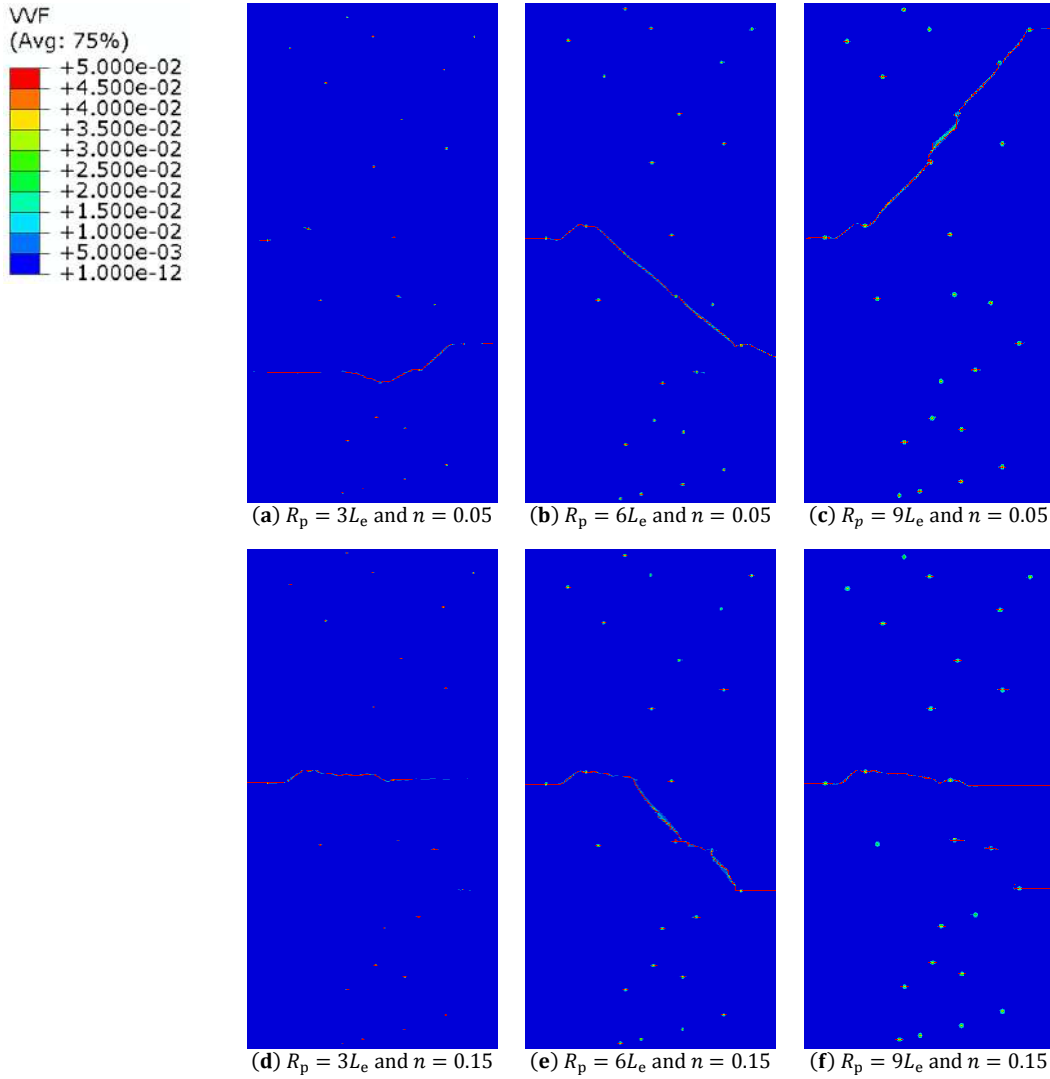


Figure 2: (a-f) Crack path morphologies in the un-deformed geometry for $N_p = 25$, $f_c = 0.01$, $f_f = 0.05$, $f_0^b = 0.0001$, and $\dot{E}_{22} = 0.0008 \text{ s}^{-1}$. The particle radius, R_p , and strain hardening, n , are given below each figure.

ACKNOWLEDGEMENTS

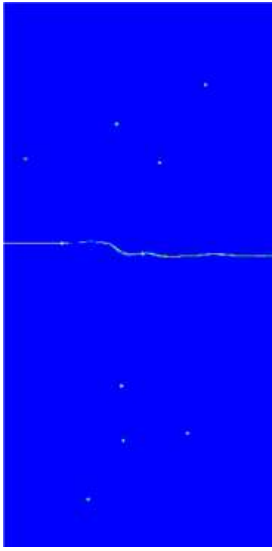
The authors gratefully acknowledge the financial support by TÜBİTAK (project no: 315M133). KLN is financially supported by the VILLUM Foundation Young Investigator Programme, grant VKR023451.

REFERENCES

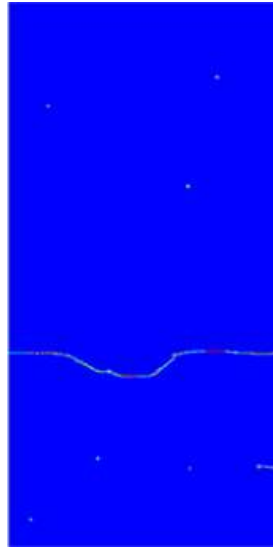
- [1] K.L. Nielsen and J.W. Hutchinson, “Cohesive traction-separation laws for tearing of ductile metal plates”, *Int. J. Impact. Eng.*, **48**, 15-23 (2012).
- [2] V. Tvergaard and A. Needleman, “Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar”, *Acta Metall.*, **32**, 157-169 (1984).

EK-6a: Boşluk Çekirdeklenmeli Modelle Yapılan Parametrik Çalışmada Elde Edilen Çatlak Morfolojileri (Deforme Olmamış Konfigürasyon)

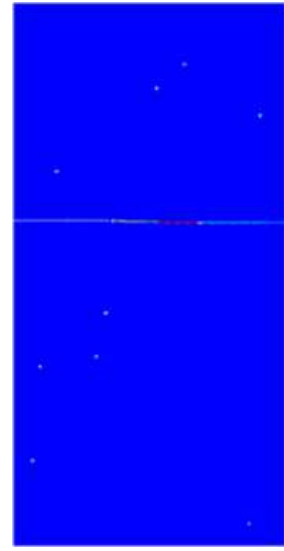
Aşağıdaki şekillerde farklı plakaların kırılma oluşum bölgeleri gösterilmektedir. Plakaların, temsili boşluk büyüklüğü (R_b) ve sayısı (S_b) hariç, tüm mekanik ve geometrik özellikleri aynıdır ve raporda verilmiştir. Her bir $R_b - S_b$ kombinasyonu için, temsili boşluk bölgelerinin üç farklı uzaysal dağılımı incelenmiştir ($D \in \{1, 2, 3\}$). Aşağıdaki şekillerde kırılma oluşum bölgelerinin deforme olmamış konfigürasyonda gösterilmektedir.



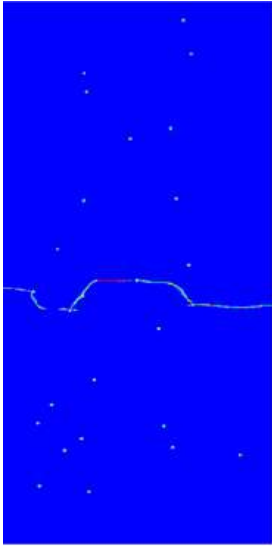
$S_b = 10, D = 1$



$S_b = 10, D = 2$



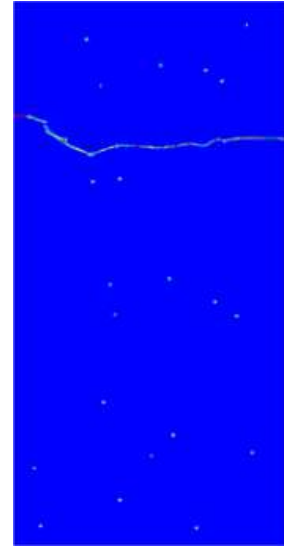
$S_b = 10, D = 3$



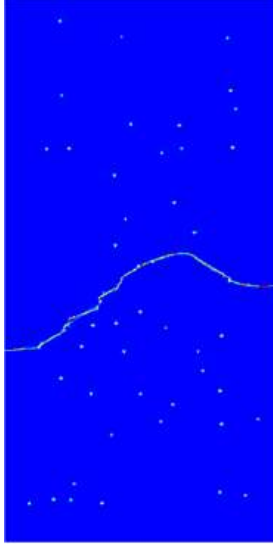
$S_b = 25, D = 1$



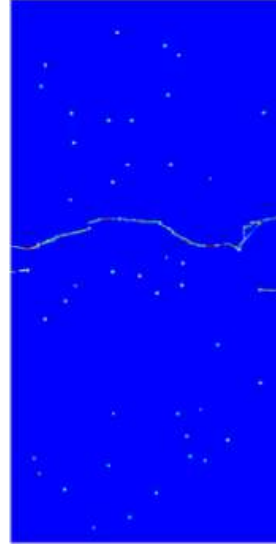
$S_b = 25, D = 2$



$S_b = 25, D = 3$



$S_b = 50, D = 1$



$S_b = 50, D = 2$



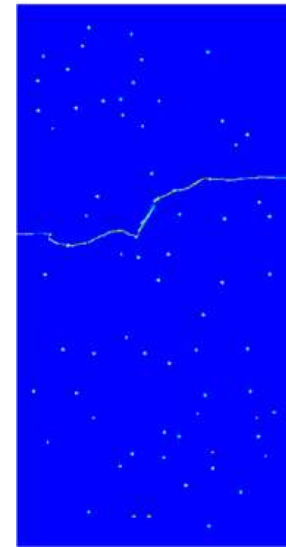
$S_b = 50, D = 3$



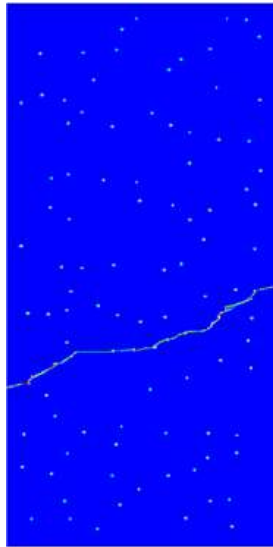
$S_b = 75, D = 1$



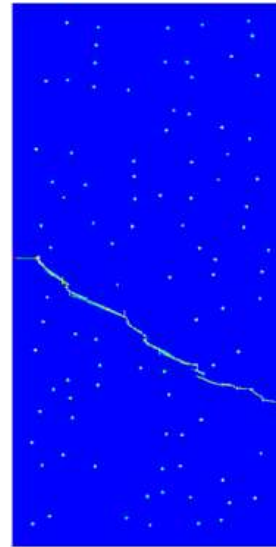
$S_b = 75, D = 2$



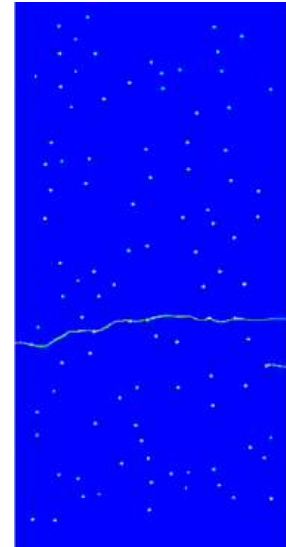
$S_b = 75, D = 3$



$S_b = 100, D = 1$

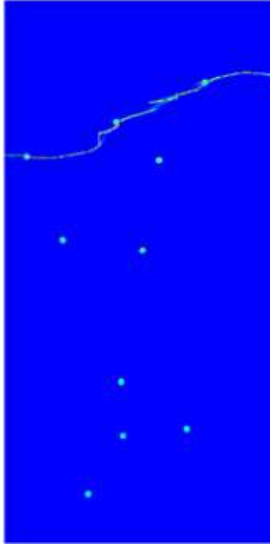


$S_b = 100, D = 2$

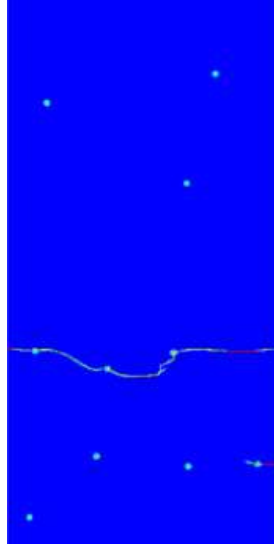


$S_b = 100, D = 3$

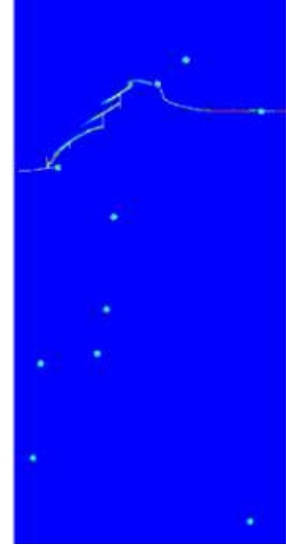
Şekil EK-6a.1. Temsili boşluk sayısı $R_b = 3L_{el}$ için çatlak morfolojileri.



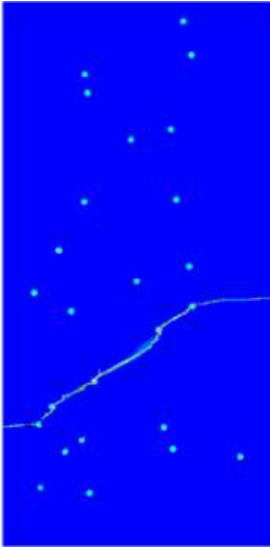
$S_b = 10, D = 1$



$S_b = 10, D = 2$



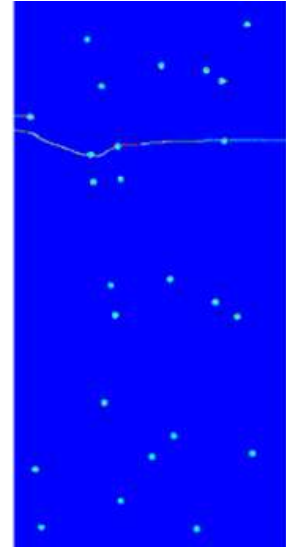
$S_b = 10, D = 3$



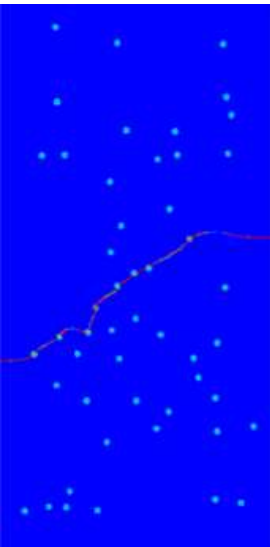
$S_b = 25, D = 1$



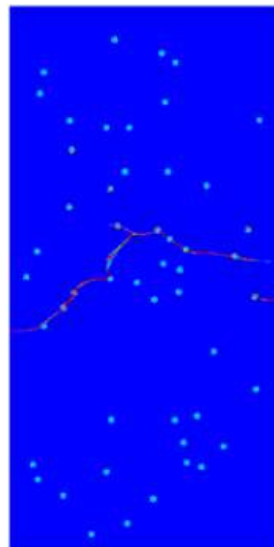
$S_b = 25, D = 2$



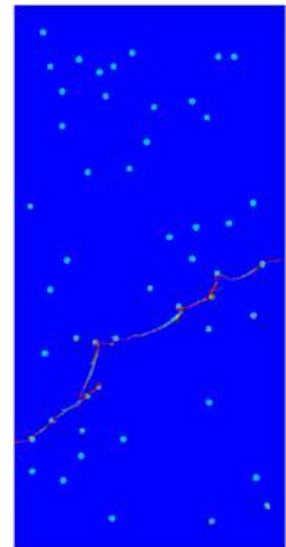
$S_b = 25, D = 3$



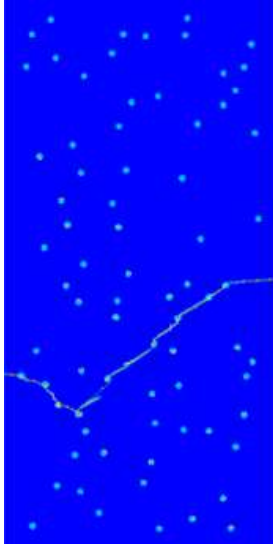
$S_b = 50, D = 1$



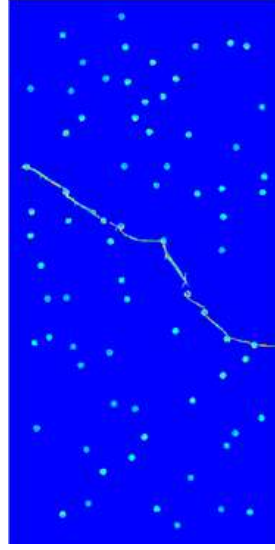
$S_b = 50, D = 2$



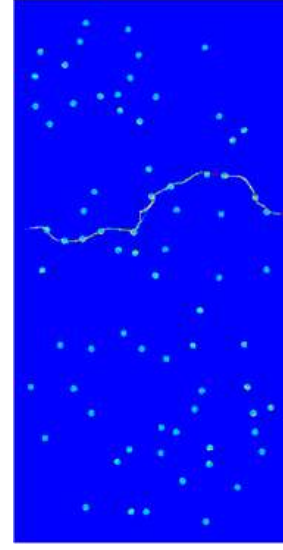
$S_b = 50, D = 3$



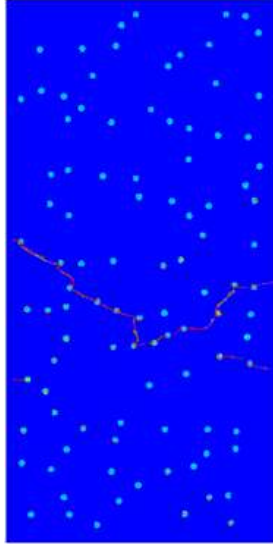
$S_b = 75, D = 1$



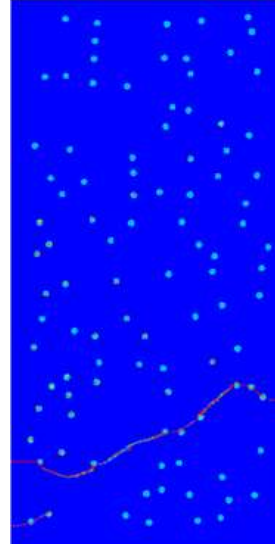
$S_b = 75, D = 2$



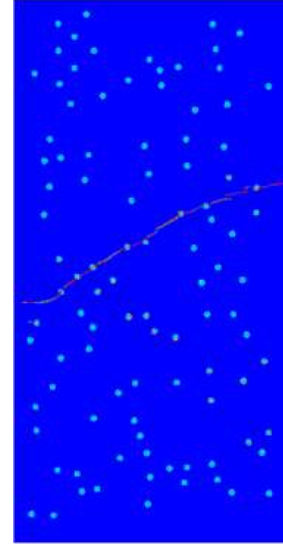
$S_b = 75, D = 3$



$S_b = 100, D = 1$

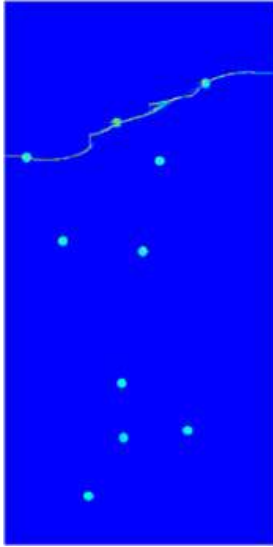


$S_b = 100, D = 2$

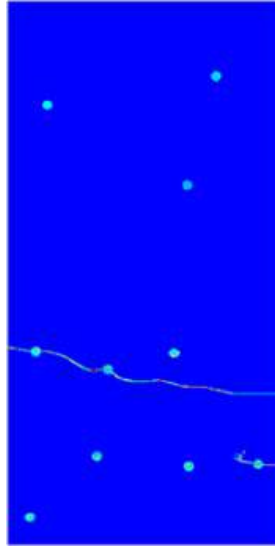


$S_b = 100, D = 3$

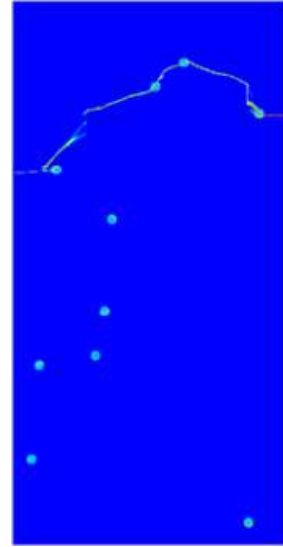
Şekil EK-6a.2. Temsili boşluk sayısı $R_b = 6L_{el}$ için çatlak morfolojileri.



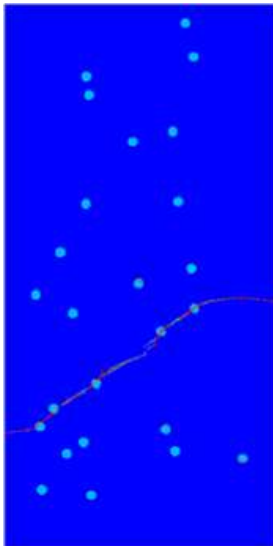
$S_b = 10, D = 1$



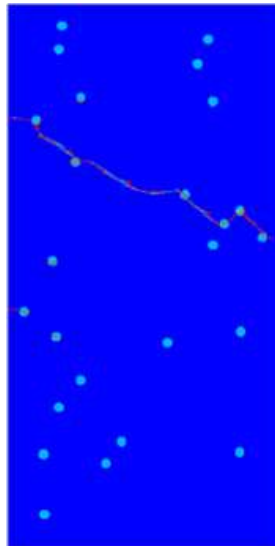
$S_b = 10, D = 2$



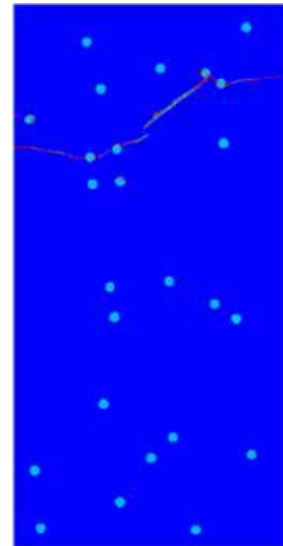
$S_b = 10, D = 3$



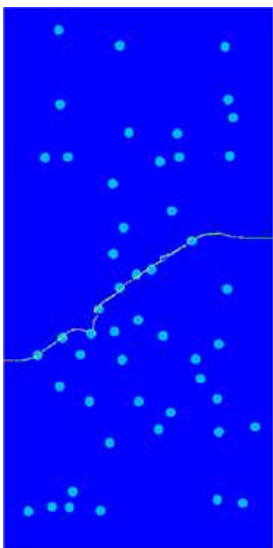
$S_b = 25, D = 1$



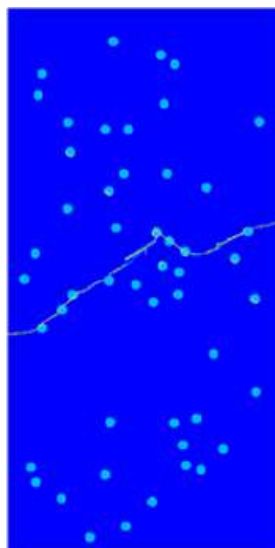
$S_b = 25, D = 2$



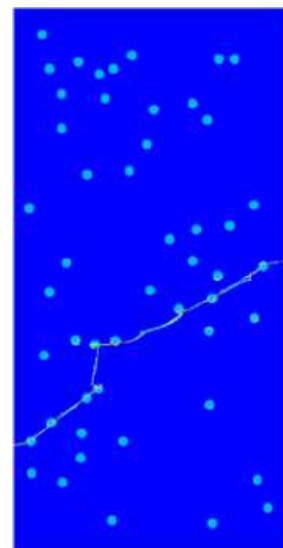
$S_b = 25, D = 3$



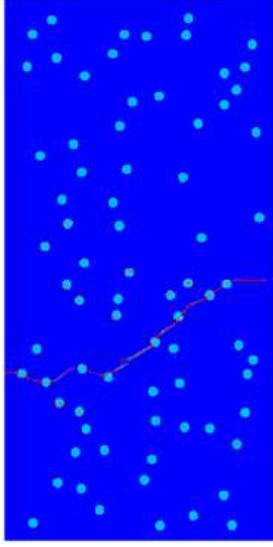
$S_b = 50, D = 1$



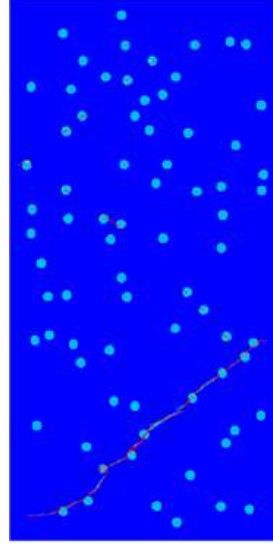
$S_b = 50, D = 2$



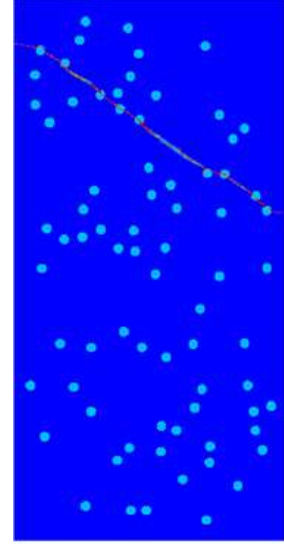
$S_b = 50, D = 3$



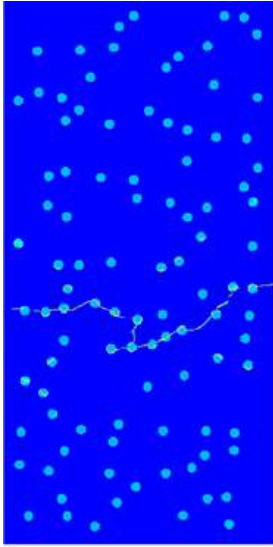
$S_b = 75, D = 1$



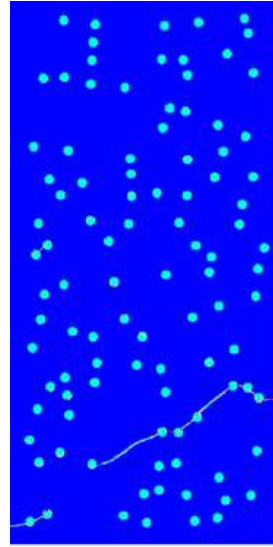
$S_b = 75, D = 2$



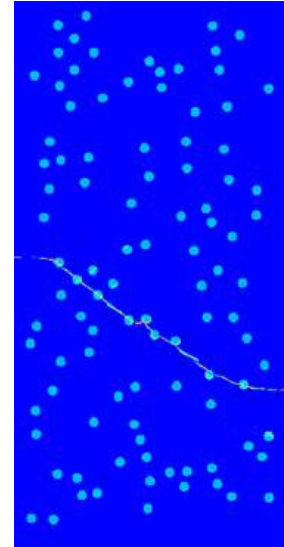
$S_b = 75, D = 3$



$S_b = 100, D = 1$

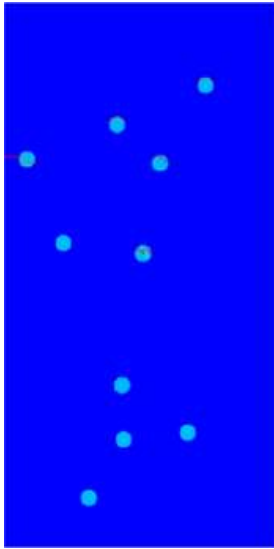


$S_b = 100, D = 2$

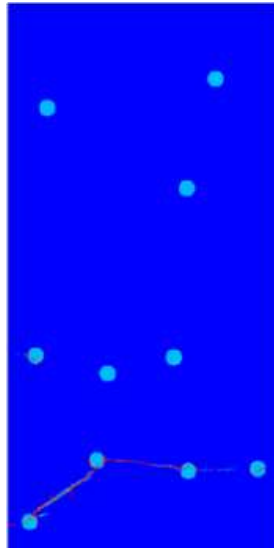


$S_b = 100, D = 3$

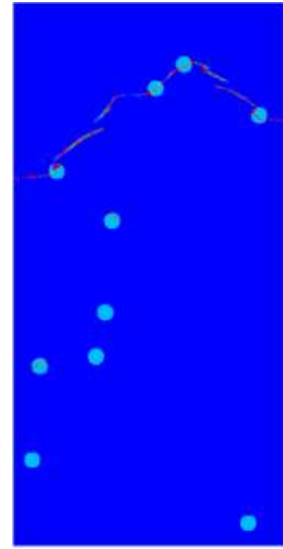
Şekil EK-6a.3. Temsili boşluk sayısı $R_b = 9L_{el}$ için çatlak morfolojileri.



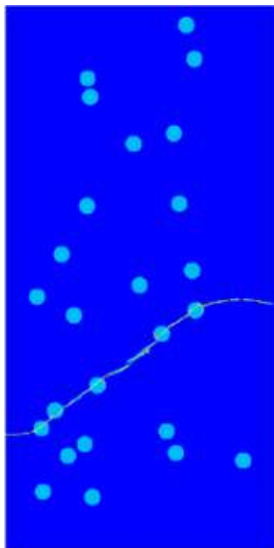
$S_b = 10, D = 1$



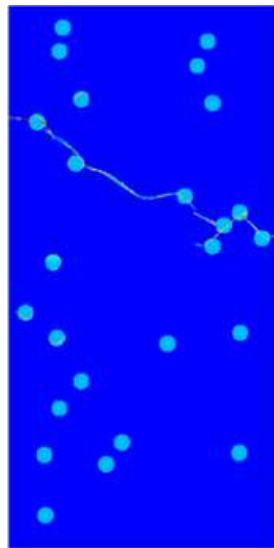
$S_b = 10, D = 2$



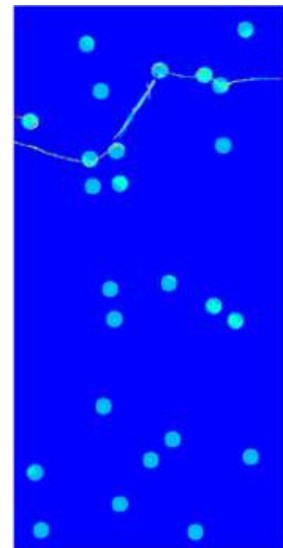
$S_b = 10, D = 3$



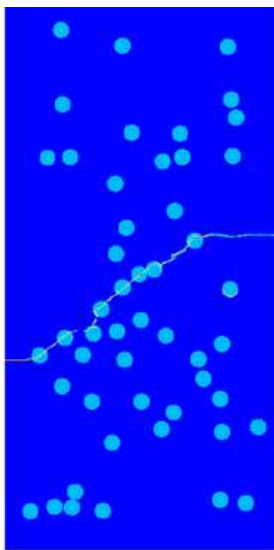
$S_b = 25, D = 1$



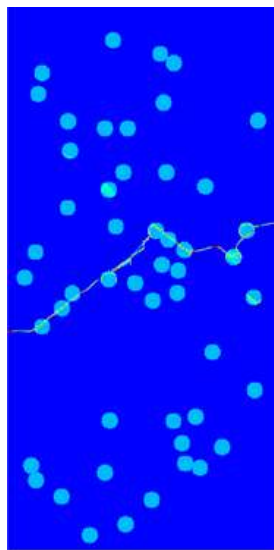
$S_b = 25, D = 2$



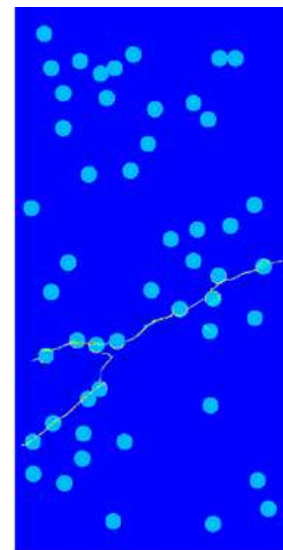
$S_b = 25, D = 3$



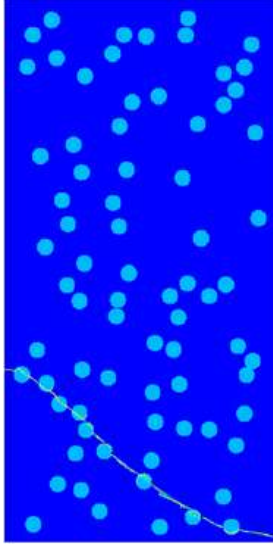
$S_b = 50, D = 1$



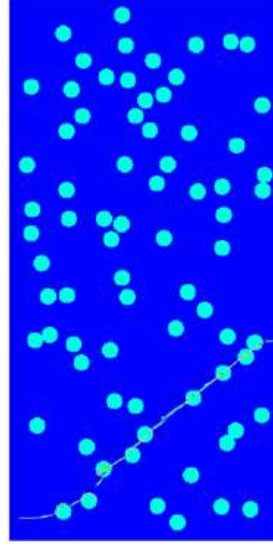
$S_b = 50, D = 2$



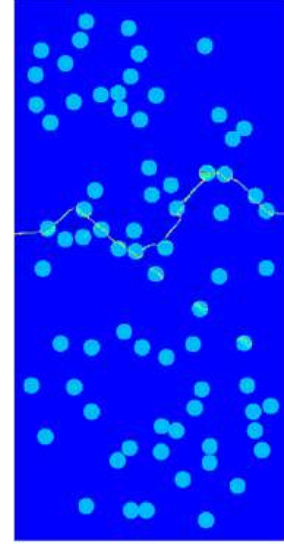
$S_b = 50, D = 3$



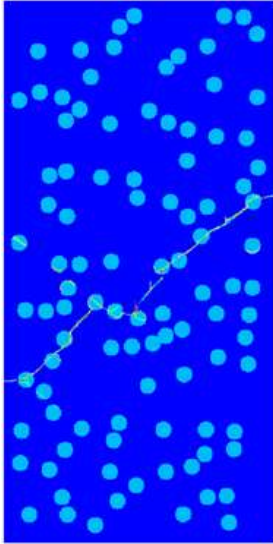
$S_b = 75, D = 1$



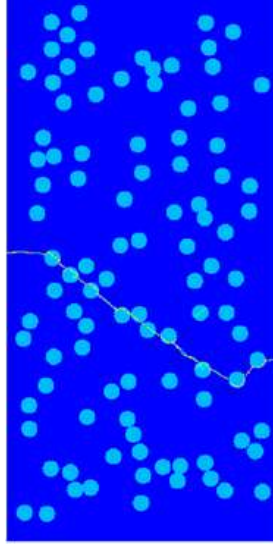
$S_b = 75, D = 2$



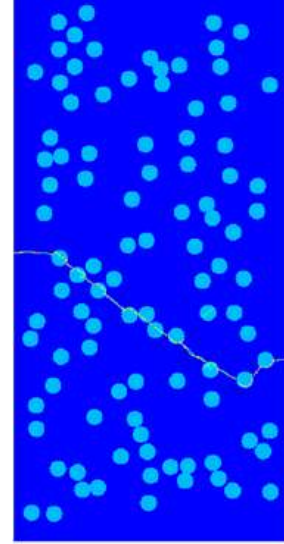
$S_b = 75, D = 3$



$S_b = 100, D = 1$

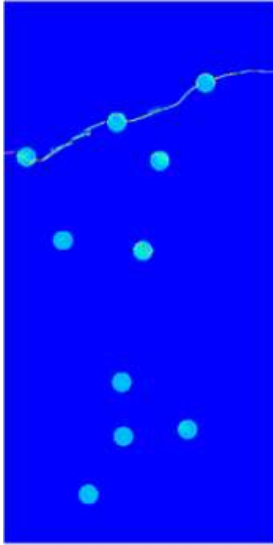


$S_b = 100, D = 2$

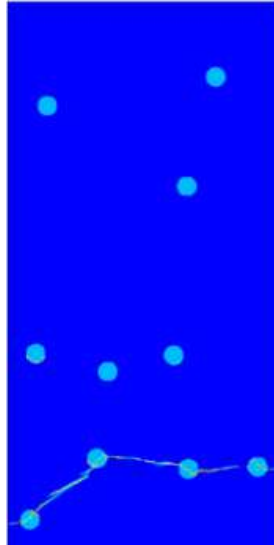


$S_b = 100, D = 3$

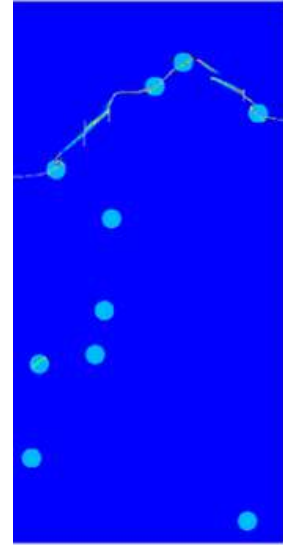
Şekil EK-6a.4. Temsili boşluk sayısı $R_b = 15L_{el}$ için çatlak morfolojileri.



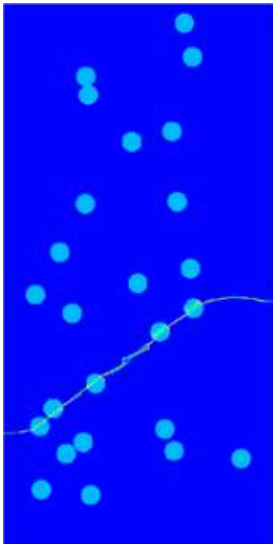
$S_b = 10, D = 1$



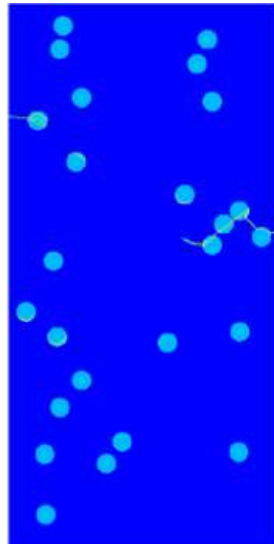
$S_b = 10, D = 2$



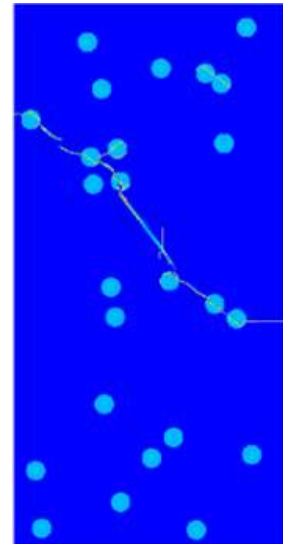
$S_b = 10, D = 3$



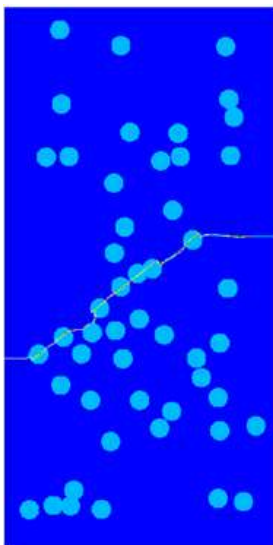
$S_b = 25, D = 1$



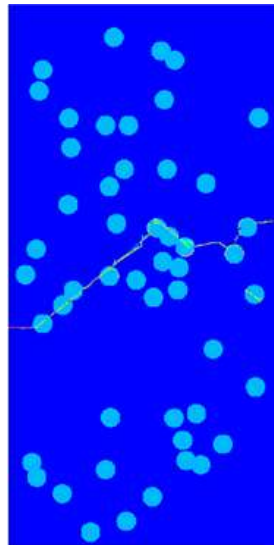
$S_b = 25, D = 2$



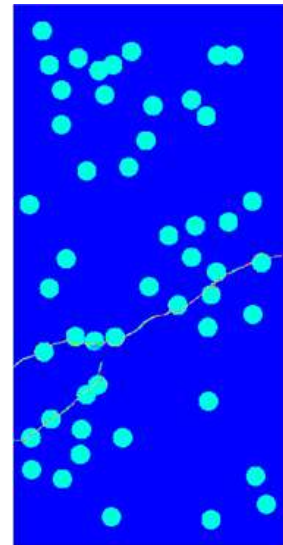
$S_b = 25, D = 3$



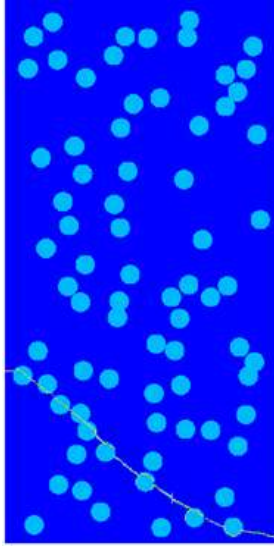
$S_b = 50, D = 1$



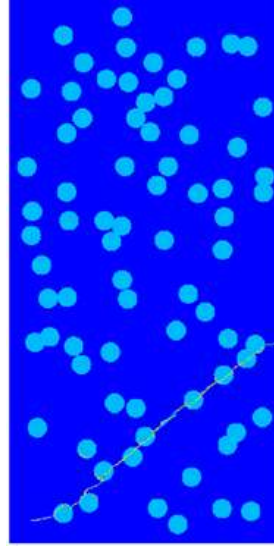
$S_b = 50, D = 2$



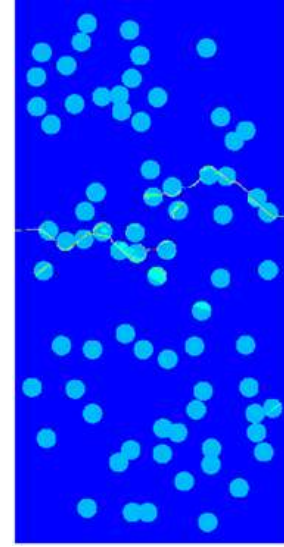
$S_b = 50, D = 3$



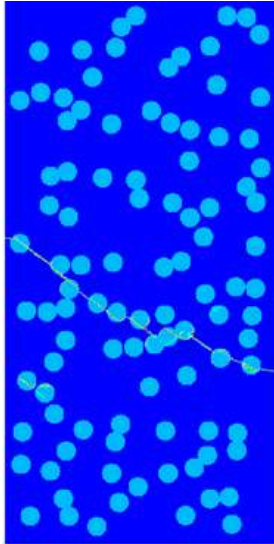
$S_b = 75, D = 1$



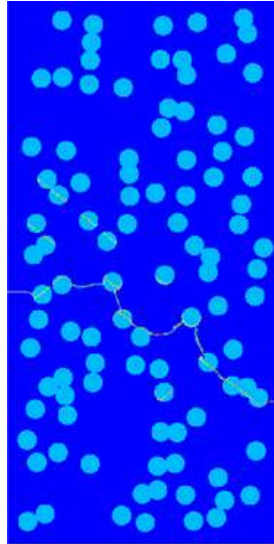
$S_b = 75, D = 2$



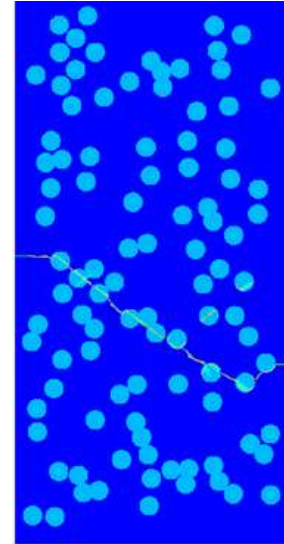
$S_b = 75, D = 3$



$S_b = 100, D = 1$



$S_b = 100, D = 2$



$S_b = 100, D = 3$

Şekil EK-6a.5. Temsili boşluk sayısı $R_b = 18L_{el}$ için çatlak morfolojileri.

EK–6b: Boşluk Çekirdeklenmeli Modelle Yapılan Parametrik Çalışmada Elde Edilen Çatlak Morfolojileri (Deforme Olmuş Konfigürasyon)

Aşağıdaki şekillerde farklı plakaların kırılma oluşum bölgeleri gösterilmektedir. Plakaların, temsili boşluk büyüklüğü (R_b) ve sayısı (S_b) hariç, tüm mekanik ve geometrik özellikleri aynıdır ve raporda verilmiştir. Her bir $R_b - S_b$ kombinasyonu için, temsili boşluk bölgelerinin üç farklı uzaysal dağılımı incelenmiştir ($D \in \{1, 2, 3\}$). Aşağıdaki şekillerde kırılma oluşum bölgelerinin deforme olmuş konfigürasyonda gösterilmektedir.



$S_b = 10, D = 1$



$S_b = 10, D = 2$



$S_b = 10, D = 3$



$S_b = 25, D = 1$



$S_b = 25, D = 2$



$S_b = 25, D = 3$



$S_b = 50, D = 1$



$S_b = 50, D = 2$



$S_b = 50, D = 3$



$S_b = 75, D = 1$



$S_b = 75, D = 2$



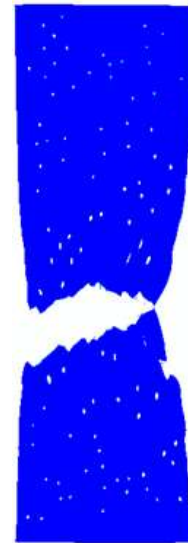
$S_b = 75, D = 3$



$S_b = 100, D = 1$



$S_b = 100, D = 2$



$S_b = 100, D = 3$

Şekil EK-6b.1. Temsili boşluk sayısı $R_b = 3L_{e1}$ için çatlak morfolojileri.



$S_b = 10, D = 1$



$S_b = 10, D = 2$



$S_b = 10, D = 3$



$S_b = 25, D = 1$



$S_b = 25, D = 2$



$S_b = 25, D = 3$



$S_b = 50, D = 1$



$S_b = 50, D = 2$



$S_b = 50, D = 3$



$S_b = 75, D = 1$



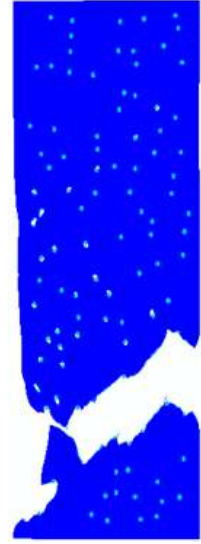
$S_b = 75, D = 2$



$S_b = 75, D = 3$



$S_b = 100, D = 1$



$S_b = 100, D = 2$



$S_b = 100, D = 3$

Şekil EK-6b.2. Temsili boşluk sayısı $R_b = 6L_{e1}$ için çatlak morfolojileri.



$S_b = 10, D = 1$



$S_b = 10, D = 2$



$S_b = 10, D = 3$



$S_b = 25, D = 1$



$S_b = 25, D = 2$



$S_b = 25, D = 3$



$S_b = 50, D = 1$



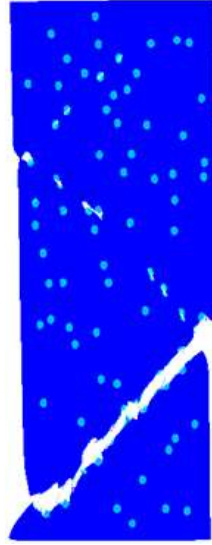
$S_b = 50, D = 2$



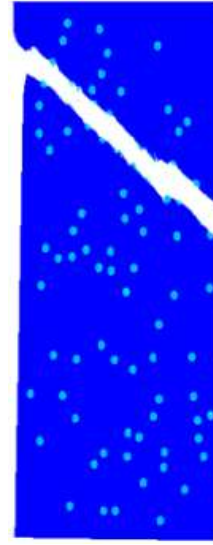
$S_b = 50, D = 3$



$S_b = 75, D = 1$



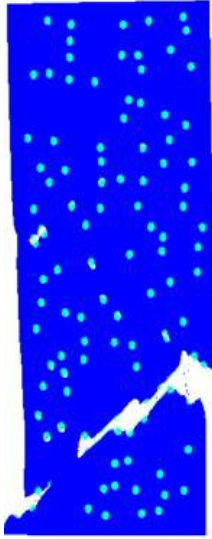
$S_b = 75, D = 2$



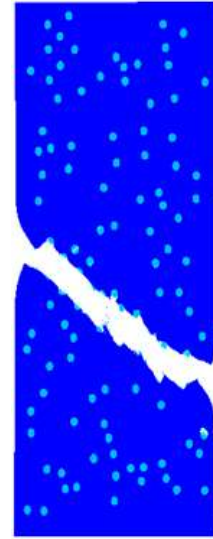
$S_b = 75, D = 3$



$S_b = 100, D = 1$

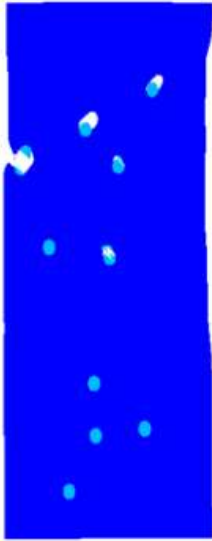


$S_b = 100, D = 2$

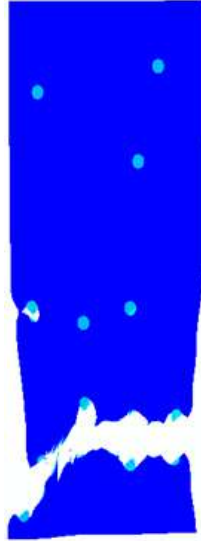


$S_b = 100, D = 3$

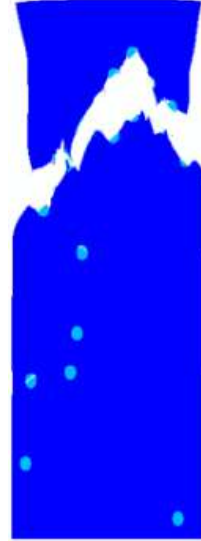
Şekil EK-6b.3. Temsili boşluk sayısı $R_b = 9L_{e1}$ için çatlak morfolojileri.



$S_b = 10, D = 1$



$S_b = 10, D = 2$



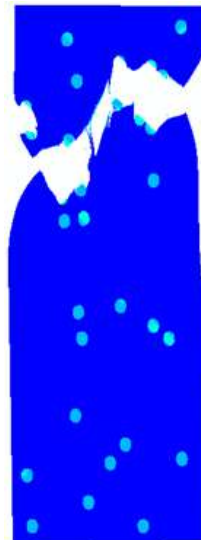
$S_b = 10, D = 3$



$S_b = 25, D = 1$



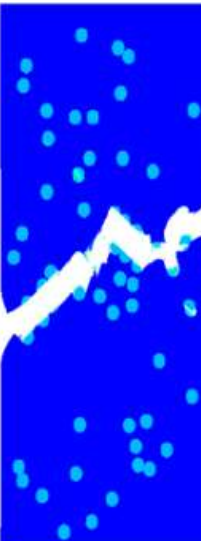
$S_b = 25, D = 2$



$S_b = 25, D = 3$



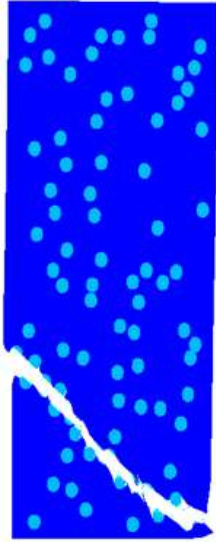
$S_b = 50, D = 1$



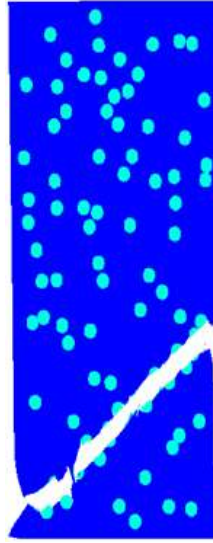
$S_b = 50, D = 2$



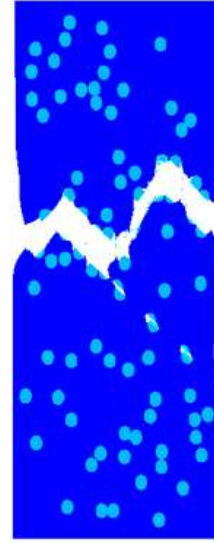
$S_b = 50, D = 3$



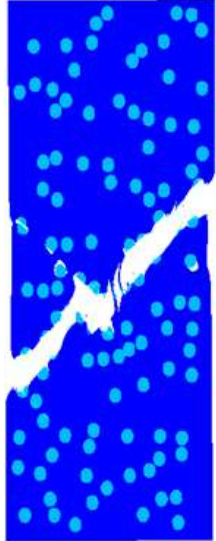
$S_b = 75, D = 1$



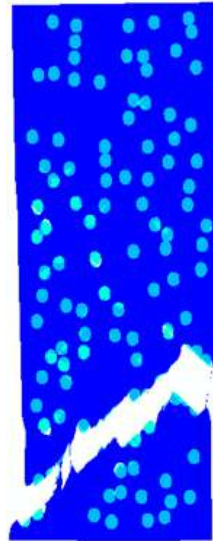
$S_b = 75, D = 2$



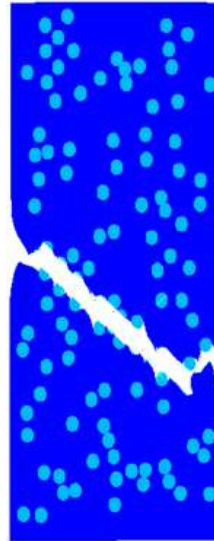
$S_b = 75, D = 3$



$S_b = 100, D = 1$

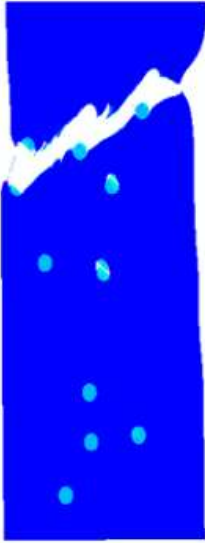


$S_b = 100, D = 2$

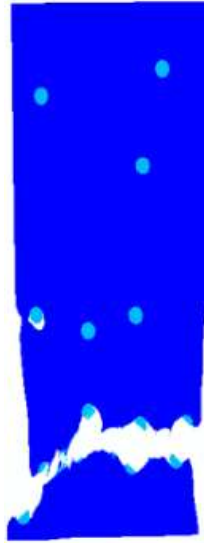


$S_b = 100, D = 3$

Şekil EK-6b.4. Temsili boşluk sayısı $R_b = 15L_{e1}$ için çatlak morfolojileri.



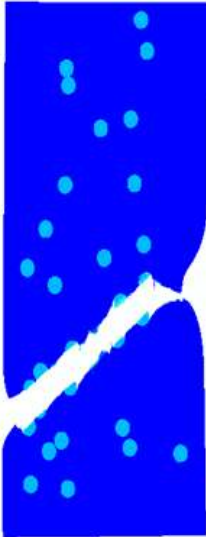
$S_b = 10, D = 1$



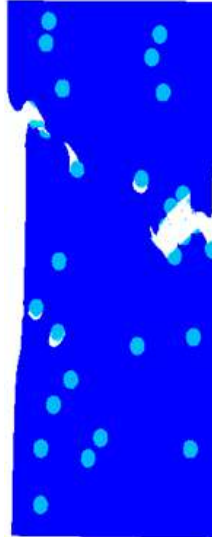
$S_b = 10, D = 2$



$S_b = 10, D = 3$



$S_b = 25, D = 1$



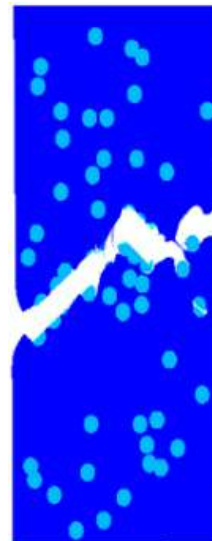
$S_b = 25, D = 2$



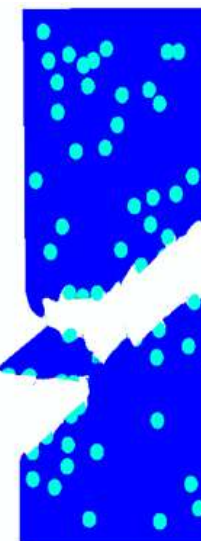
$S_b = 25, D = 3$



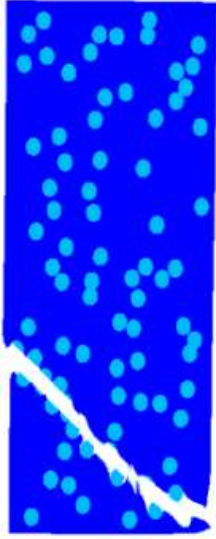
$S_b = 50, D = 1$



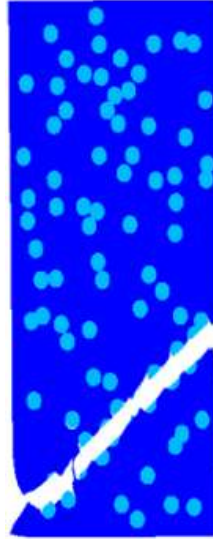
$S_b = 50, D = 2$



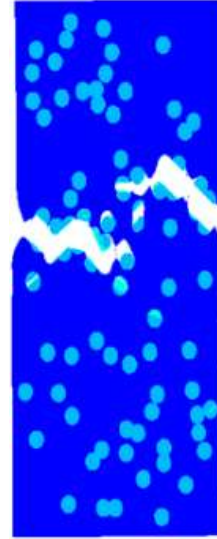
$S_b = 50, D = 3$



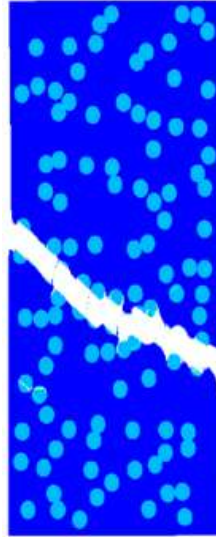
$S_b = 75, D = 1$



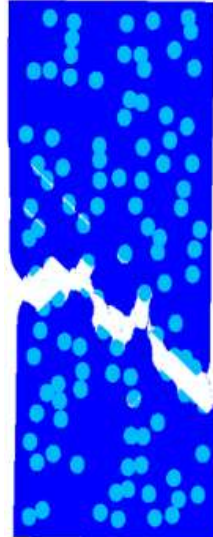
$S_b = 75, D = 2$



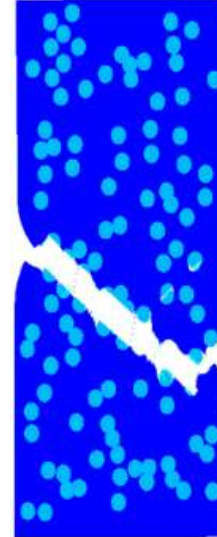
$S_b = 75, D = 3$



$S_b = 100, D = 1$



$S_b = 100, D = 2$



$S_b = 100, D = 3$

Şekil EK-6b.5. Temsili boşluk sayısı $R_b = 18L_{e1}$ için çatlak morfolojileri.

Manuscript Details

Manuscript number	EJMSOL_2018_910
Title	Effect of Damage-Related Microstructural Parameters on Plate Tearing at Steady State
Article type	Full Length Article

Abstract

The tearing of ductile metal plates can take place in three distinctly different modes: cup-cup, cup-cone, and crack slanting, but they are often observed in combination. It is well established that all tearing modes are governed by nucleation, growth, and coalescence of voids at the micron scale. What controls the shift between different tearing modes is, however, unclear and a micro-mechanics-based investigation is launched here to shed light on the issue. The present work takes as a starting point the hypothesis that the volume fraction, (average) size, and distribution of second phase particles, which act as void nucleation sites, are the key microstructural parameters that determine the tearing mode. In accordance with this hypothesis, the plates are modeled here by embedding randomly distributed void nucleation sites in a homogeneous matrix material. A parameter study is performed, and by adjusting the number, size and distribution of the nucleation sites in the fracture process zone, a shift in the tearing mode is achieved: a low number of small (relative to the plate thickness) randomly distributed particles link up in a void-by-void-type failure, whereas bigger particles, or a large number of small particles, can facilitate multiple void interactions. The present work also demonstrates that, for plates with intermediate or low volume fraction of nucleation sites, the localization of deformation in a macroscopic band precedes the microscopic localization that eventually links the voids. However, the two modes of plastic flow localization occur simultaneously for large volume fractions.

Keywords	Ductile failure; Gurson model; Shear band
Corresponding Author	Cihan Tekoğlu
Corresponding Author's Institution	TOBB University of Economics and Technology
Order of Authors	Cihan Tekoğlu, Kim Lau Nielsen
Suggested reviewers	Ankit Srivastava, Thomas Pardoën, Amine Benzerga

Submission Files Included in this PDF

File Name [File Type]

Cover Letter.pdf [Cover Letter]

main.pdf [Manuscript File]

Author_Agreement_Statement.pdf [Author Agreement]

To view all the submission files, including those not included in the PDF, click on the manuscript title on your EVISE Homepage, then click 'Download zip file'.

Editor-in-Chief
Prof. V. Tvergaard
Technical University of Denmark,
Department of Mechanical Engineering
Nils Koppels Alle, build 404, Denmark

December 8, 2018

Submission of manuscript for European Journal of Mechanics A/Solids

Dear Professor Tvergaard,

I would like to submit the manuscript entitled “The Effect of Damage Related Microstructure on Plate Tearing at Steady-State” for publication in *European Journal of Mechanics A/Solids*. The paper has not been published previously and it is not under consideration for publication elsewhere.

I look forward hearing if the work is considered of interest to the Journal.

Yours sincerely,

Cihan Tekoğlu
Associate Prof., Ph.D
Department of Mechanical Engineering,
TOBB University of Economics and Technology
Söğütözü, Ankara, 06560, Turkey
Phone: +90 (312) 292 40 65
Fax: 90 (312) 292 40 91
Email address: c.tekoglu@gmail.com

Effect of Damage-Related Microstructural Parameters on Plate Tearing at Steady State

C. Tekoğlu^{a,*}, K.L. Nielsen^b

^a*Department of Mechanical Engineering, TOBB University of Economics and Technology, Söğütözü, Ankara, 06560, Turkey*

^b*Department of Mechanical Engineering, Solid Mechanics, Technical University of Denmark, DK-2800 Kgs. Lyngby, Denmark*

Abstract

The tearing of ductile metal plates can take place in three distinctly different modes: cup-cup, cup-cone, and crack slanting, but they are often observed in combination. It is well established that all tearing modes are governed by nucleation, growth, and coalescence of voids at the micron scale. What controls the shift between different tearing modes is, however, unclear and a micro-mechanics-based investigation is launched here to shed light on the issue. The present work takes as a starting point the hypothesis that the volume fraction, (average) size, and distribution of second phase particles, which act as void nucleation sites, are the key microstructural parameters that determine the tearing mode. In accordance with this hypothesis, the plates are modeled here by embedding randomly distributed void nucleation sites in a homogeneous matrix material. A parameter study is performed, and by adjusting the number, size and distribution of the nucleation sites in the fracture process zone, a shift in the tearing mode is achieved: a low number of small (relative to the plate thickness) randomly distributed particles link up in a void-by-void-type failure, whereas bigger particles, or a large number of small particles, can facilitate multiple void interactions. The present work also demonstrates that, for plates with intermediate or low volume fraction of nucleation sites, the localization of deformation in a macroscopic band precedes the microscopic localization that eventually links the voids. However, the two modes of plastic flow localization occur simultaneously for large volume fractions.

Keywords: Ductile failure, Gurson model, Shear band, Void coalescence, Finite element method

*Corresponding author. Tel.:+90 312 292 42 29 ; fax:+90 312 292 40 91.

URL: cihantekoglu@etu.edu.tr; c.tekoglu@gmail.com (C. Tekoğlu)
Preprint submitted to Elsevier

30 1. Introduction

31 Intermetallic inclusions are often deemed responsible for the nucleation of the micro-
32 voids that, upon loading, grow to coalesce and eventually form the micro-cracks leading
33 to material separation in ductile plate tearing. Distinct crack surface morphologies such
34 as slanting, cup-cup, and cup-cone are observed for extensive crack growth in metal
35 plates; see Fig. 1. The nucleation, growth, and coalescence of voids have been studied
36 in great detail, and with the increasing computational resources, the chain of events
37 are now being linked in ever more complex numerical analyses (see e.g. the reviews by
38 Tvergaard, 1990; Benzerga and Leblond, 2010, and the references therein). An under-
39 standing of the interplay between different mechanisms and length scales is, however,
40 still in a maturing stage and key details remain to be unraveled and exploited for the
41 creation of new and better materials. It is reported in the literature that plates fab-
42 ricated from high-strength age-hardened aluminum alloys (Irwin et al., 1958; Knott,
43 1973; Li and Siegmund, 2002), and high-strength steels (Broek, 1986) exhibit slanted
44 crack growth, while plates fabricated from low-strength metals such as stainless steel,
45 mild steel, 6082-O and NS4 aluminum alloys, brass, bronze, lead, and zinc systemati-
46 cally show a cup-cup fracture profile (Pardoen et al., 2004), for several different plate
47 thicknesses. Despite this insight, the transition between the tearing modes remains to
48 be fully understood, and nowhere is a conclusive answer found to the question: *why*
49 *does a propagating crack choose one tearing mode over the others?*

50 The current approach to ductile plate tearing in the literature, based on Gurson-like
51 porous plasticity finite element (FE) models with a homogeneous material distribution
52 in the entire fracture process zone (FPZ), cannot provide an unambiguous answer to
53 the above question. For a sufficiently fine discretized plate with a homogenized porosity
54 distribution, the crack propagates in a 45° orientated shear band for a wide range of
55 material properties (Mathur et al., 1996; Felter and Nielsen, 2017; Andersen et al.,
56 2018a). In fact, lowering the initial porosity and/or increasing the hardening capacity
57 of the plate material while keeping the mesh the unchanged can lead to a shift from slant
58 to flat crack propagation. However, this shift is merely an artifact of the discretization;
59 often one can make the crack slant again upon further mesh refinement. Besson et al.
60 (2003) presented a detailed 2D study on the effect of discretization, and demonstrated

61 that the mesh type has a great influence on the Gurson model’s ability to describe
62 slant crack propagation (see also Nielsen and Hutchinson, 2012).

63 In the present work, the non-homogeneous distribution of the damage related mi-
64 crostructure is accounted for in terms of the spatial distribution, number and size of
65 second phase particles, i.e. the void nucleation sites. The hypothesis is that a large num-
66 ber of closely packed nucleation sites will facilitate multiple void interaction, whereas
67 fewer nucleation sites will link up in a void-by-void fashion. Therefore, changing the
68 spatial distribution, number and/or size of the void nucleation sites in a metal plate,
69 while keeping all other mechanical properties and loading conditions unchanged, is ex-
70 pected to lead to a change in the fracture surface morphology. Related to this is the
71 discussion on the sequence of localized deformations at different length scales (also
72 introduced in Tekoğlu et al., 2015). One important finding of the present paper is that,
73 macroscopic band formation does not necessarily occur simultaneously with, but it can
74 precede, microscopic localization at stress triaxialities below 1, unlike the conclusions
75 arrived at in Tekoğlu et al. (2015).

76 The paper is structured as follows. The problem formulation and modeling assump-
77 tions are laid out in Section 2, and the numerical methods are presented in Section 3.
78 Results are given in Section 4, which is followed by a discussion and concluding remarks
79 in Section 5.

80 **2. Problem formulation**

81 The schematic in Fig. 2a shows a ductile plate that tears under mode I loading. The
82 dimensions of the plate in the x_2x_3 -plane are much larger than its thickness in the
83 x_1 -direction, W . All the cross sections perpendicular to the crack growth direction (the
84 x_3 -direction in Fig. 2a) experience the same deformation history at steady state, such
85 that: (1) a local thinning first develops far ahead of the crack tip, while the regions
86 outside the thinning zone unload elastically, (2) the local thinning intensifies and dam-
87 age develops, (3) plastic deformation further localizes in deformation bands contained
88 in the local thinning region, and (4) a macro-crack propagates in the deformation
89 bands through coalescing voids, which finally leads to fracture of the cross section. The
90 mode I tearing problem considered here is similar to that investigated in Nielsen and

91 Hutchinson (2012); Andersen et al. (2018b), where large-scale 3D steady-state plate
 92 tearing is boiled down to an approximate 2D plane strain setup. The elastic unloading
 93 domain above and below the thinning region essentially restricts the deformation in
 94 the FPZ such that a plane strain condition can be assumed near the crack tip (an
 95 assumption supported in a recent full 3D study by Andersen et al., 2018a). Thus, in
 96 the 2D plane strain setup, a cross section in the x_1x_2 -plane with an initial aspect ra-
 97 tio of H_0/W_0 is imagined to be cut from the plate, and loaded in tension along the
 98 x_2 -direction to mimic a far-field mode I loading (see Fig. 2b). The difference in the
 99 present work is that, rather than restricting the analysis to a homogeneous porous
 100 material as in Nielsen and Hutchinson (2012); Andersen et al. (2018b), a population
 101 of “discrete void nucleation sites” which represents the second phase particles in a real
 102 material, are embedded into the FPZ that evolves in the region specified by its initial
 103 height, h_0 , in Fig. 2b. The idea of modeling second phase particles as void nucleation
 104 sites has been successfully implemented in the previous literature, see e.g. Srivastava
 105 et al. (2014); Osovski et al. (2015); Srivastava et al. (2017). The elastic unloading do-
 106 main above and below the FPZ (the light gray regions in Fig. 2b) is assumed to be
 107 non-porous and deforms by J_2 -flow plasticity. In this way, the adopted setup allows
 108 microstructural parameters such as the spatial distribution, number, and relative size
 109 (with respect to the plate thickness) of the second phase particles to enter the analysis.
 110 In Fig. 2b, for example, the number of randomly distributed void nucleation sites, N_p ,
 111 is equal to 50 and all nucleation sites have the same radius, R_p . A background porosity,
 112 which has been introduced to allow neighboring sites to eventually coalesce, is allowed
 113 to nucleate between nucleation sites. In this way, the background porosity represents
 114 a secondary population of particles with a much smaller average size than the pri-
 115 mary population located in the nucleation sites, which is typical for metallic alloys.
 116 The Gurson—Tvergaard—Needleman (GTN) porous plasticity model is employed to
 117 predict the porosity evolving from the void nucleation sites as well as the macroscopic
 118 material separation that develops across the plate thickness. The FE model correspond-
 119 ing to this 2D framework enables a comprehensive parameter study of the changes in
 120 the fracture surface morphology when the damage related microstructural parameters
 121 are varied, see Section 3.

122 **3. Model: constitutive relations and finite element formulation**

123 The FE calculations in this paper are performed by using the commercial software
 124 ABAQUS/Explicit, version 2016. In this section, the constitutive relations and the FE
 125 formulation are only briefly introduced and the reader is referred to ABAQUS (2016)
 126 for further details.

127 *3.1. Constitutive relations*

128 Nucleation, growth, and coalescence of voids in the FPZ are accounted for by the
 129 GTN porous plasticity model (see e.g. Tvergaard, 1981), which is based on the pio-
 130 neering work of Gurson (1977). In the notation of ABAQUS, the yield surface for the
 131 GTN model is given by:

$$\Phi = \left(\frac{q}{\sigma_y} \right)^2 + 2q_1 f^* \cosh \left(-q_2 \frac{3p}{2\sigma_y} \right) - (1 + q_3 (f^*)^2) = 0.$$

132 Here, q is the effective von Mises stress for the Cauchy stresses; $\sigma_y[\bar{\epsilon}_m^{\text{pl}}]$ is the yield
 133 stress of the fully dense matrix material as a function of the equivalent plastic strain in
 134 the matrix, $\bar{\epsilon}_m^{\text{pl}}$; the hydrostatic pressure is p ; and q_1 , q_2 , and q_3 are fitting parameters
 135 introduced by Tvergaard (1981). The three fitting parameters, respectively, account for
 136 the interaction between voids, void shape changes, and the effect of stress triaxiality
 137 on void growth during loading. Finally, $f^*[f]$ is a function of the void volume fraction,
 138 f , and is given by:

$$f^* = \begin{cases} f & \text{if } f \leq f_c, \\ f_c + \frac{\bar{f}_F - f_c}{\bar{f}_F - f_c} (f - f_c) & \text{if } f_c < f < \bar{f}_F, \\ \bar{f}_F = \frac{q_1 + \sqrt{q_1^2 - q_3}}{q_3} & \text{if } f \geq \bar{f}_F, \end{cases}$$

139 where f_c and \bar{f}_F are the two values of the void volume fraction that correspond to the
 140 onset of void coalescence and to the total loss of stress carrying capacity at a material
 141 point, respectively. Once all the material points in an element fail (with $f \geq \bar{f}_F$), the
 142 element is automatically removed from the mesh by ABAQUS/Explicit (see Section 3.2
 143 for details on the element formulation).

144 In the GTN model, the total change in the porosity, \dot{f} , equals the sum of the change
 145 due to newly nucleating voids, \dot{f}_{nucl} , and that due to growth of the existing voids, \dot{f}_{gr} ,
 146 such that: $\dot{f} = \dot{f}_{\text{nucl}} + \dot{f}_{\text{gr}}$. In ABAQUS/Explicit, void nucleation is strain controlled,
 147 $\dot{f}_{\text{nucl}} = A[\bar{\varepsilon}_m^{\text{pl}}] \dot{\varepsilon}_m^{\text{pl}}$, and the probability density function, $A[\bar{\varepsilon}_m^{\text{pl}}]$, represents a Gaussian
 148 bell distribution for the nucleation strain:

$$A[\bar{\varepsilon}_m^{\text{pl}}] = \frac{f_N}{s_N \sqrt{2\pi}} \exp \left[\frac{-1}{2} \left(\frac{\bar{\varepsilon}_m^{\text{pl}} - \varepsilon_N}{s_N} \right)^2 \right],$$

149 where ε_N and s_N are, respectively, the mean value and the standard deviation for the
 150 distribution, and f_N is the total volume fraction of the nucleated voids. The assumption
 151 of a Gaussian bell distribution for void nucleation indirectly accounts for the fact that
 152 the critical strain for void nucleation is a function of the size, shape, and orientation
 153 of the second phase particles giving birth to voids. The growth of existing voids occurs
 154 through the (incompressible) plastic deformation of the surrounding matrix material,
 155 and the void growth equation directly follows from the conservation of mass in the
 156 matrix: $\dot{f}_{\text{gr}} = (1 - f) \dot{\varepsilon}_{\text{kk}}^{\text{pl}}$. For $f^* = f = 0$, the material is fully dense, and the GTN
 157 yield surface is identical to the von Mises yield surface.

158 In the present study, it is assumed that the undamaged material, both in the matrix
 159 and at the nucleation sites, follows a true stress-logarithmic strain power hardening
 160 relationship described as:

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon & \text{if } \varepsilon < \varepsilon_0 \\ \sigma_0 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^N & \text{if } \varepsilon \geq \varepsilon_0 \end{cases}$$

161 where σ_0 is the initial yield stress, E is Young's modulus, N is the hardening exponent,
 162 and $\varepsilon_0 = \sigma_0/E$.

163 3.2. Finite element (FE) formulation

164 The FE calculations are conducted using the commercial software ABAQUS/Explicit,
 165 in a finite strain setting. Fig. 3 shows a typical FE mesh for the plate tearing problem
 166 described in Section 2. Before applying the load, the aspect ratio of the plate section is
 167 $H_0/W_0 = 4$ for all the calculations, where H_0 is the initial height of the plate section and

168 W_0 the initial plate thickness. The domain specified by the initial height, $h_0 = H_0/2$,
 169 where the FPZ will evolve, is finely discretized by using square elements having a nor-
 170 malized edge length of $L_e/W_0 = 10^{-3}$. The mesh size gradually increases outside the
 171 FPZ, toward the top and bottom boundaries, where an unstructured mesh containing
 172 both quadrilateral and triangular elements is accepted. In the domain of the FPZ, there
 173 is a total of N_p void nucleation sites, two of which are visible in the magnified view
 174 given in Fig. 3. The void nucleation sites have a circular shape with radius $R_p = kL_e$,
 175 where k is an integer assumed to be the same for all the nucleation sites in a plate.
 176 It is assumed that the individual void nucleation sites are non-overlapping and do not
 177 intersect the cross-section boundaries. The adopted fine mesh allows a large number of
 178 non-overlapping void nucleation sites in this zone: for $k \leq 9$, $N_p = 100$ non-overlapping
 179 nucleation sites can easily be randomly distributed. The quadrilateral elements in the
 180 mesh, including those in the FPZ, are of type CPE4R (four-noded, bilinear, reduced
 181 integration with hourglass control), while the triangular elements are of type CPE3
 182 (three-noded, linear); see ABAQUS (2016) for detailed element properties.

183 The plate is assumed to be non-porous in the undeformed configuration, with uni-
 184 form mechanical properties throughout, representing a typical aluminum alloy: Young's
 185 modulus, $E = 70$ GPa; Poisson ratio, $\nu = 0.3$; density, $\rho = 2700$ kg/m³; initial yield
 186 stress, $\sigma_0 = 300$ MPa; and a power-law hardening exponent, $N = 0.1$. The elastic un-
 187 loading regions above and below the FPZ are taken to remain non-porous during the
 188 entire loading history, whereas two different sets of porous plasticity parameters are
 189 required inside the FPZ: one for the void nucleation sites (superscript "ns") and one
 190 for the matrix (superscript "m") surrounding them. In this study, all the parameters
 191 in both sets are taken to be the same ($\varepsilon_N^{ns} = \varepsilon_N^m = 10^{-2}$, $s_N^{ns} = s_N^m = (1/3) \times 10^{-2}$,
 192 $f_c^{ns} = f_c^m = 10^{-2}$, $f_F^{ns} = f_F^m = 5 \times 10^{-2}$) except for the total volume fraction of the
 193 nucleated voids, $f_N^{ns} = 8 \times 10^{-3}$, $f_N^m = 10^{-5}$.

194 In the present work, the intention is not to enter the regime where the inertia
 195 effect will become important. Even so, the explicit (but not the implicit) solver of
 196 ABAQUS is used for two reasons: i) it automatically removes failed elements and
 197 allows the simulation to represent the separation of the plate cross section, and ii) the
 198 dynamics helps to stabilize element failure, and by exploiting mass lumping (HRZ),

199 the calculations are easily parallelized. The price to pay for these advantages is that
 200 great care must be taken to perform the analyses at sufficiently low deformation rates
 201 that the model response can be considered quasi-static. It is, here, worth mentioning
 202 that even for very low deformation rates, such convergence has been hard to achieve
 203 for some of the microstructures considered; for convergence, the kinetic energy in the
 204 system has to be much lower than the traditional 10% of the total energy in the system.
 205 In fact, the material parameters as well as the mesh size introduced above are chosen in
 206 a such way that they allow distinguishing between different crack surface morphologies,
 207 while the total CPU time of one FE calculation for a single plate is less than 24 hours.
 208 The FE calculations are performed on an HP Z420 workstation, running four central
 209 processing units in parallel. The effect of material parameters on the results is further
 210 discussed in Section 5.

211 4. Results

212 The main goal of this study is to investigate the effects of the spatial distribution,
 213 number, N_p , and the relative size, $R_p = kL_e$, of the second phase particles (acting as
 214 void nucleation sites) in relation to the fracture surface morphologies observed in plate
 215 tearing. The intervals for these key parameters, considered in the FE calculations, are:
 216 $N_p \in \{10, 25, 50, 75, 100\}$ and $k \in \{3, 6, 9, 15, 18\}$, while all other material and geo-
 217 metrical parameters remain fixed. All possible $N_p - k$ combinations are analyzed, and
 218 three realizations with different spatial distributions of nucleation sites are considered
 219 for each combination (in all 75 FE calculations are conducted). The results are pre-
 220 sented below, by starting first with the detailed results for the two extreme cases with
 221 $N_p = 10, k = 3$ (Figs. 4—5) and $N_p = 18, k = 100$ (Figs. 6—7), for which the frac-
 222 ture surface morphologies are distinctly apart. Attention is hereafter focused on the
 223 transition between the different fracture surface morphologies (Figs. 8-11).

224 Figure 4 shows the distribution of the void volume fraction in the FPZ at different
 225 stages of the deformation history (Figs. 4a-d), together with the corresponding curve of
 226 engineering stress versus engineering strain (Fig. 4e), for a plate with $N_p = 10, k = 3$.
 227 The engineering stress is simply calculated by dividing the total reaction force in the x_2 -
 228 direction at the top (or bottom) boundary by the initial surface area, $\Sigma_{22} = \sum_{i=1}^n (F_2^i/W_0)$,

229 while the ratio between the prescribed displacement at the boundary and the initial
 230 height of the plate section gives the engineering strain, $E_{22} = \Delta H/H_0$. The asterisk (*)
 231 symbols on the stress-strain curve in Fig. 4e indicate the deformation stages depicted in
 232 Figs. 4a-d. The onset of void nucleation coincides with the onset of plastic deformation,
 233 and nucleation starts simultaneously at all nucleation sites in the FPZ. The void volume
 234 fraction rapidly develops at the nucleation sites and the total amount is already two
 235 orders of magnitude larger in the nucleation sites compared to the background porosity
 236 of the surrounding matrix material at the very first plastic strain increment. Upon
 237 further loading, the peak load is reached and diffuse thinning starts (see Fig. 4a). The
 238 void volume fraction of all the nucleation sites subsequently intensifies as the thinning
 239 develops, leading to failure through void coalescence at the length scale of elements.
 240 The diffuse thinning is at some point interrupted by localization of deformation in two
 241 roughly 45° shear bands reaching out from a single nucleation site located in the neck
 242 (see Fig. 4b)¹. It is noteworthy that the nucleation sites appear as discrete holes after
 243 removing the failed elements from the mesh. A comparison of Figs. 4b—d reveals that
 244 only the nucleation site, from which the shear bands emanate, enlarges after the onset
 245 of localized deformation, while the development of the other nucleation sites (nearly)
 246 stops. This is tied to the elastic unloading taking place outside the localization bands.
 247 The fracture surface morphology thus largely resembles the cup-cup mode as the top
 248 and bottom half plates no longer fit together. In fact, this observation is consistent for
 249 different realizations of randomly distributed void nucleation sites (see Fig. 5).

250 Figure 5 shows the void volume fraction for two additional realizations of randomly
 251 distributed void nucleation sites (plate P2 in Fig. 5b and plate P3 in Fig. 5c). Here, all
 252 material parameters are kept constant and $N_p = 10$, $k = 3$. The deformation and the
 253 complex sequence of events leading to fracture for P2 and P3 are the same as for P1;
 254 thinning is visible for all three plates, and they all have a cup-cup-like fracture surface
 255 morphology. The main difference in the fracture process of the three plates appear to
 256 be that, unlike in P1, the crack developed through more than one nucleation site in

¹Throughout the results, attention is focused on the developed void volume fraction as this is a clear indicator of plastic flow localization in the current model setup, see Appendix.

257 P2 and P3. However, the stress-strain curves for the three plates largely overlap until
258 the onset of localized deformation (indicated by an asterisk (*) in Fig. 5c), and even
259 the onset of localized deformation matches up for P1 and P3. In contrast, P2 falls
260 short of reaching the overall strain predicted for P1 and P3, but this is tied to the less
261 pronounced development of the necking region.

262 Detailed results for the extreme case of a large number of big void nucleation sites
263 ($N_p = 100$ and $k = 18$) are presented in Fig. 6. As in any other case analyzed, the
264 void nucleation starts at the onset of plastic deformation. However, in contrast to the
265 case of a few small void nucleation sites ($N_p = 10$, $k = 3$), the deformation quickly
266 localizes in a macroscopic shear band at the onset of thinning, connecting multiple
267 nucleation sites (see Fig. 6a). The tearing crack thereby propagates through the failure
268 of the elements located in the most energetically favorable shear bands, and this leads
269 to an overall slanted fracture surface morphology (see Fig. 6b). It is apparent from
270 Fig. 7 that changing the realization of randomly distributed void nucleation sites while
271 keeping all other material properties fixed (including $N_p = 100$, $k = 18$) does not affect
272 the overall fracture surface morphology, although it shifts the location of the crack.
273 Moreover, the stress-strain response is represented by (nearly) overlapping curves. In
274 fact, the curves largely coincides with the response of P1 (with $N_p = 10$, $k = 3$) until
275 the onset of localized deformation (see Fig. 7d).

276 Figure 8 shows the developed void volume fraction in the FPZ at the final step of
277 fracture for four different plates all with small void nucleation sites ($k = 3$), while the
278 total numbers in each plate are $N_p = 25$ (in Fig. 8a), $N_p = 50$ (in Fig. 8b), $N_p = 75$ (in
279 Fig. 8c), and $N_p = 100$ (in Fig. 8d), respectively. Considering the plates with $N_p = 10$
280 given in Fig. 5 as well, a gradual shift in the fracture surface morphology, first from
281 cup-cup (Figs. 4, 5, and 8a) toward cup-cone (Figs. 8b and 8c), and later toward slanted
282 (Fig. 8d) can be observed when increasing the number of randomly distributed void
283 nucleation sites. Companion results for four different plates with big void nucleation
284 sites ($k = 18$) are shown in Fig. 9. Only the location of the crack is here shifted
285 by changing the random distribution, whereas all the plates display a slanted fracture
286 surface morphology. In fact, among 15 plates with $k = 18$ and $N_p \in \{10, 25, 50, 75, 100\}$
287 analyzed in this study, including those for which the results are not shown here, the

288 crack is predicted to be clearly slanted for 12, clearly cup-cone for 1, and a mixture of
289 the three morphologies for the remaining 2. It is also noteworthy that the amount of
290 diffuse thinning as well as the value of the macroscopic fracture strain decrease with
291 increasing N_p , for both $k = 3$ and $k = 18$.

292 Additional results are presented in Figs. 10 and 11 to further clarify the effect of
293 the size of the void nucleation sites on the fracture surface morphology, by keeping the
294 realization of the random distribution the same for all the plates. The focus is kept on
295 the two extreme cases in terms of the number of nucleation sites, with $N_p = 10$ for
296 Fig. 10 and $N_p = 100$ for Fig. 11, while the size range is $k \in [3, 6, 9, 15, 18]$. For the
297 plates in Fig. 10 (Fig. 11), the spatial distribution of the nucleation sites is also the
298 same as the plate shown in Fig. 4 (Fig. 6). For $k = 3$, the fracture surface morphology
299 is of a cup-cup type both for $N_p = 10$ (Fig. 4) and $N_p = 100$ (Fig. 11a). For larger
300 k values, the fracture surface morphology shifts to a cup-cone form for $N_p = 10$, and
301 the material separation takes place through the same set of interacting nucleation sites
302 (see Fig. 10). For $N_p = 100$, on the other hand, the fracture surface morphology shifts
303 to a slant-like form for small void nucleation sites and remains slanted thereafter (see
304 Fig. 11). As would be expected, the diffuse thinning region fades out and the fracture
305 strain decreases with increasing k for both $N_p = 10$ and $N_p = 100$.

306 5. Discussion and Conclusions

307 The FE framework adopted in this study allows the effects of the size, number, and
308 spatial distribution of second phase particles to enter the analysis of ductile plate
309 tearing by embedding discrete void nucleation sites in the FPZ. The results show that
310 two local shear bands emanate from each void nucleation site as soon as the void volume
311 fraction in the nucleation site reaches approximately 0.1%. The two local shear bands
312 are perpendicular to each other, one aligned at 45° and the other at -45° with respect
313 to the loading direction, and the plastic strain in the local shear bands is only slightly
314 larger than that in the surrounding matrix at this early stage of deformation; just
315 enough to make the shear bands apparent. Upon further monotonic loading, plasticity
316 increases everywhere in the plate, but intensifies the most in the local shear bands
317 spreading out from the void nucleation sites. At some point during the loading, an

318 interaction between the individual void nucleation sites sets in. The mechanism through
319 which this interaction takes place depends greatly on the size, number, and spatial
320 distribution of the nucleation sites, as well as on the porosity in the matrix surrounding
321 the sites.² The interaction mechanisms between void nucleation sites can be classified
322 into three distinct types: ① The existing local $\pm 45^\circ$ shear bands spreading out from
323 several nucleation sites merge with one another in such a way as to form a global
324 45° shear band extending over the entire thickness of the plate; see e.g. Fig. 6. ②
325 New shear bands form to connect neighboring void nucleation sites; see e.g. Figs. 12a
326 and 12b. This mechanism is also known as the “void sheeting mechanism”, where two
327 existing large voids are linked by a shear localization band in which new voids can
328 originate from secondary particles (see e.g. Cox and Low, 1974). ③ Neighboring void
329 nucleation sites merge with one another through local necking of the ligament situated
330 between them; see e.g. Figs. 12c and 12d.

331 Mechanism ① is active only if a path of void nucleation sites exists in the FPZ, and
332 this is most likely to be the case if the number or size (or both) of the void nucleation
333 sites is large enough. If active, mechanism ① sets in early in the deformation history,
334 with no or negligible diffuse thinning of the plate (see e.g. Fig. 7). In contrast, if the
335 FPZ contains only a few small void nucleation sites, a 45° path cannot be achieved
336 yielding a transient in the fracture surface morphology. In such plates, the interaction
337 between nucleation sites, if it ever takes place, is postponed until after considerable
338 diffuse thinning of the FPZ has developed. The plate shown in Fig. 4 is a good ex-
339 ample of the case where no interaction takes place between nucleation sites, and the
340 crack spreads by the growth of a single nucleation site captured in the diffuse necking
341 zone. A fracture process involving only a single void has recently been reported in
342 an experimental study by Noell et al. (2018), for tensile testing of a sheet specimen
343 fabricated from a high-purity (99.999 %) polycrystalline aluminum. Depending on the
344 spatial distribution, however, more than one void nucleation site might be involved in

²Note again that the background porosity in the matrix represents the presence of a secondary population of particles with much smaller sizes compared to the primary population of particles represented by the nucleation sites, see Section 2. In this study, the focus is on the primary population, and therefore the volume fraction of the secondary particles is assumed to be very small.

345 crack propagation, joining together through mechanism (II) (see Figs. 5b and 5c). For
346 intermediate levels of both the number and size of the void nucleation sites, even if
347 there exists a 45° path extending over some nucleation sites, the path is usually not long
348 enough to extend the entire plate thickness. The tearing crack can thereby propagate
349 either through two intersecting global 45° shear bands, leading to a cup-cone morphol-
350 ogy (see Fig. 8b), or by a combination of all three micro-mechanisms (see Fig. 8d).
351 Clear examples of mechanism (III) are only observed between void nucleation sites lo-
352 cated in close proximity, which reveals that the interaction between void nucleation
353 sites in relation to plate tearing predominantly occurs via shear bands.

354 A issue that is closely related to the crack tearing mechanisms is the question of
355 whether macroscopic localization occurs prior to microscopic localization, or whether
356 the two occur simultaneously. In macroscopic localization, in either a normal band or a
357 shear band, the softening giving rise to localized deformation is linked to the nucleation
358 and growth of the voids. In microscopic localization, however, the softening is due to
359 the coalescence of the voids where plastic strain is confined in the ligaments connecting
360 neighboring voids. Tekoğlu et al. (2015) addressed this question by modeling an infinite
361 planar band containing a doubly periodic array of initially spherical voids, embedded
362 between two semi-infinite blocks of uniform, void-free material, in a three-dimensional
363 FE setting. In Tekoğlu et al. (2015) it was concluded that; macroscopic localization
364 precedes microscopic localization (or void coalescence) at stress triaxilities larger than
365 1, as microscopic localization requires additional plastic straining in the deformation
366 band. At lower stress triaxiality, however, the two modes of plastic flow localization
367 occur simultaneously. In the present FE simulations of steady-state ductile tearing, the
368 stress triaxiality is approximately 0.6 in the FPZ and it is clearly observed that macro-
369 scopic localization will precede microscopic localization. Only if failure takes place by
370 the first mechanism, as discussed above, will the localized deformation in a macroscopic
371 shear band occur simultaneously with the onset of void coalescence.³ However, this is

³It is worth noting that void coalescence within the elements inside a nucleation site, which occurs prior to macroscopic localization, is not the microscopic localization discussed here. The formation of a hole at a void nucleation site through coalescing voids simply mimics void nucleation at a particle, which, in reality, occurs either via brittle fracture of the particle, or the separation of the interface

372 the case only when the number and/or size of the nucleation sites are large enough.
373 For intermediate configurations of the damage related microstructure, macroscopic lo-
374 calization precedes microscopic localization, which usually takes place through void
375 sheeting (mechanism (II)), and rarely through coalescence of neighboring nucleation
376 sites (mechanism (III)). With decreasing number and/or size of nucleation sites, the
377 additional plastic straining in the localization band required to trigger microscopic lo-
378 calization increases, and the separation between the two modes of localization becomes
379 increasingly clear. As discussed in Tekoğlu et al. (2015), in their FE model: i) the voids
380 are highly aligned, which possibly advances void coalescence, and ii) the outer blocks
381 are void free, which postpones macroscopic localization; the combination of both ef-
382 fects leads to simultaneous occurrence of the two modes at stress triaxialities below
383 1. If these two restrictions are removed, as is the case for the present FE framework,
384 macroscopic localization precedes microscopic localization even at triaxiality values as
385 low as 0.6, except if the strain hardening capacity of the material is very low (in the
386 present study, due to a large volume fraction of void nucleation sites).

387 In essence, what determines the fracture surface morphology is the strain hardening
388 capacity of the plate material. This study emphasizes the fact that the strain hardening
389 capacity of a material depends not only on the strain hardening exponent of the matrix,
390 but also on the volume fraction and spatial distribution of the second phase particles,
391 as well as on the ease of void nucleation at particle sites. Increasing the volume fraction
392 of void nucleating particles would lower the hardening capacity of a material, the effect
393 being more pronounced for easily void nucleating particles. The material parameters
394 in this study are chosen in such a way to cover a broad spectrum of hardening ca-
395 pacities, by only changing the number, N_p , size, R_p , and spatial distribution of the
396 void nucleation sites, while keeping the remaining parameters the same. At one end of
397 the spectrum stand the plates with a low number of small nucleation sites, for which
398 the hardening capacity is large and the crack predominantly propagates in a cup-cup
399 morphology. At the other end are the plates with a large number of big nucleation
400 sites, whose low hardening capacity forces the crack to slant. At these extremes of the

between the particle and the surrounding matrix.

401 spectrum, the crack profile depends mainly on the volume fraction of the nucleation
402 sites; in the intermediate range, however, the spatial distribution is as important as
403 the volume fraction. Employing a different set of material parameters could obviously
404 lead to a different fracture surface morphology for a specific $N_p - R_p$ combination, but
405 would not change the conclusions.

406 **6. Acknowledgments**

407 The authors gratefully acknowledge the financial support by TÜBİTAK (Project No:
408 315M133). KLN is financially supported by the VILLUM FOUNDATION Young In-
409 vestigator Programme in the project “A New phenomenon Yet to be resolved in ductile
410 PLATE tearing”, grant VKR023451.

411 **References**

- 412 ABAQUS, 2016. Abaqus documentation collection, Version 2016, Providence, RI: Das-
413 sault Systmes.
- 414 Andersen, R., Felter, C., Nielsen, K., 2018a. Micro-mechanics based cohesive zone mod-
415 eling of full scale ductile plate tearing: from initiation to steady state. Submitted for
416 publication.
- 417 Andersen, R., Woelke, P., Nielsen, K., 2018b. Cohesive traction-separation relations for
418 plate tearing under mixed mode loading. *Eng. Frac. Mech.* 71, 199–209.
- 419 Benzerga, A. A., Leblond, J.-B., 2010. Ductile fracture by void growth to coalescence.
420 *Adv. Appl. Mech.* 44, 169–305.
- 421 Besson, J., Steglich, D., Brocks, W., 2003. Modeling of plane strain ductile rupture.
422 *Int. J. Plasticity* 19, 1517–1541.
- 423 Broek, D., 1986. *Elementary Engineering Fracture Mechanics*. Kluwer Academic Pub-
424 lishers, Netherlands.
- 425 Cox, T. B., Low, J. R., 1974. An investigation of the plastic fracture of AISI 4340 and
426 18 Nickel-200 grade maraging steels. *Metall. Trans.* 5 (6), 1457–1470.

427 Felter, C. L., Nielsen, K. L., 2017. Assisted crack tip flipping under mode I thin sheet
428 tearing. *Eur. J. Mech. A/Solids* 64, 58–68.

429 Gurson, A., 1977. Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth
430 - part I: yield criteria and flow rules for porous ductile media. *ASME J. Eng. Mater.*
431 *Technol.* 99, 2–15.

432 Irwin, G. R., Kies, J. A., Smith, H. L., 1958. Fracture strengths relative to onset and
433 arrest of crack propagation. In: *Proceedings of ASTM International*. Vol. 58. pp.
434 640–60.

435 Knott, J. F., 1973. *Fundamentals of Fracture Mechanics*. Butterworths, London.

436 Li, W., Siegmund, T., 2002. An analysis of crack growth in thin-sheet metal via a
437 cohesive zone model. *Engineering Fracture Mechanics* 69, 2073 – 2093.

438 Mathur, K., Needleman, A., Tvergaard, V., 1996. Three dimensional analysis of dy-
439 namic ductile crack growth in a thin plate. *J. Mech. Phys. Solids* 44 (3), 439–464.

440 Nielsen, K., Hutchinson, J., 2012. Cohesive traction-separation laws for tearing of duc-
441 tile metal plates. *Int. J. Imp. Eng.* 48, 15–23.

442 Noell, P. J., Carroll, J. D., Boyce, B. L., 2018. The mechanisms of ductile rupture.
443 *Acta Mater.* 161, 83 – 98.

444 Osovski, S., Srivastava, A., Ponson, L., Bouchaud, E., Tvergaard, V., Ravi-Chandar,
445 K., Needleman, A., 2015. The effect of loading rate on ductile fracture toughness
446 and fracture surface roughness. *J. Mech. Phys. Solids* 76, 20 – 46.

447 Pardoen, T., Hachez, F., Marchioni, B., Blyth, P., Atkins, A., 2004. Mode I fracture of
448 sheet metal. *J. Mech. Phys. Solids* 52, 423 – 452.

449 Srivastava, A., Osovski, S., Needleman, A., 2017. Engineering the crack path by con-
450 trolling the microstructure. *J. Mech. Phys. Solids* 100, 1 – 20.

451 Srivastava, A., Ponson, L., Osovski, S., Bouchaud, E., Tvergaard, V., Needleman, A.,
452 2014. Effect of inclusion density on ductile fracture toughness and roughness. *J.*
453 *Mech. Phys. Solids* 63, 62 – 79.

454 Tekoğlu, C., Hutchinson, J., Pardoën, T., 2015. On localization and void coalescence
455 as a precursor to ductile fracture. *Phil. Trans. R. Soc.* A373.

456 Tvergaard, V., 1981. Influence of voids on shear band instabilities under plane strain
457 condition. *Int. J. Fract. Mech.* 17, 389–407.

458 Tvergaard, V., 1990. Material failure by void growth to coalescence. *Adv. Appl. Mech*
459 27, 83–151.

460 **Appendix**

461 Rather than considering the equivalent plastic strain, the evolution of damage is used
 462 as an indicator of localization throughout the present work. This choice is motivated by
 463 the fact that the localized deformation regions are clearly visible in both contour plots:
 464 compare Figs. A-1a and A-1b, or Figs. A-1c and A-1d. All four figures correspond to the
 465 onset of macroscopic localization, Figs. A-1a and A-1b for a plate with $N_p = 10, k = 3$,
 466 and Figs. A-1c and A-1d for a plate with $N_p = 100, k = 18$.

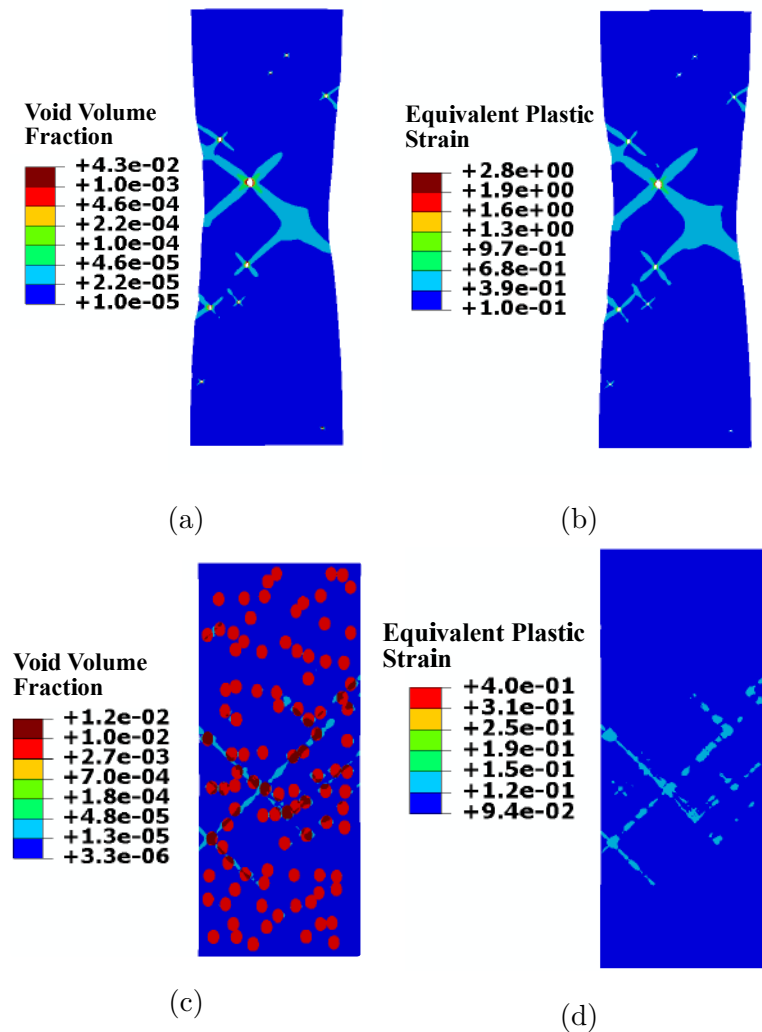


Figure A-1: Developed (a,c) void volume fraction and (b,d) equivalent plastic strain in the fracture process zone at the onset of macroscopic localization. The plate in (a,b), with $N_p = 10, k = 3$, is also shown in Fig. 4, and the plate in (c,d), with $N_p = 100, k = 18$, is also shown in Fig. 6.

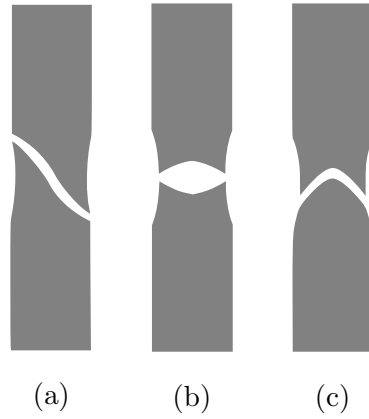


Figure 1: Schematic showing cross sections of cracked plate cross sections with the crack growing toward the reader: (a) the slanted crack growth, (b) the cup-cup crack growth (or bath tub), and (c) the cup-cone crack growth (or double slant).

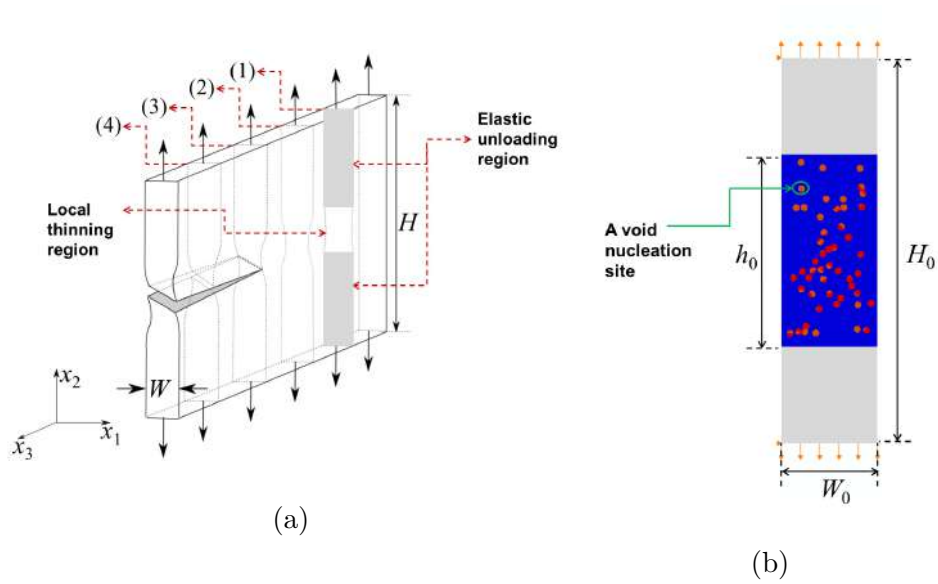


Figure 2: Schematic illustrating (a) a ductile plate under mode I loading, and (b) a 2D plane strain FE model for the plate in the undeformed configuration. Void nucleation sites in the fracture process zone (with a height of h_0) represent the second phase particles in a real material.

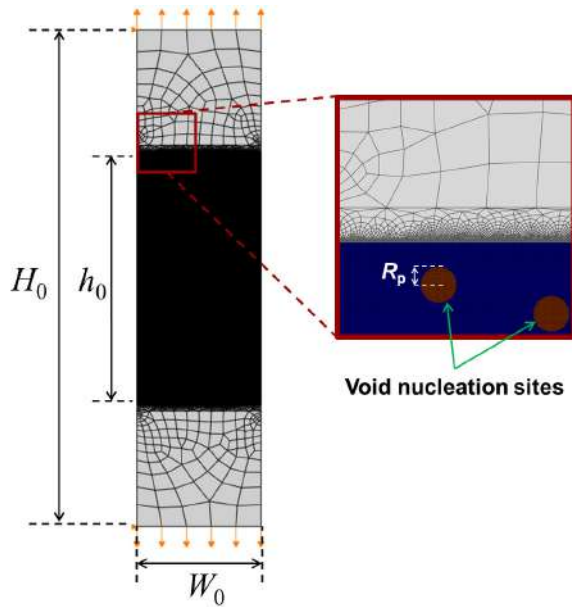


Figure 3: Schematic showing the boundary conditions and a typical mesh for the 2D plane strain FE model for a ductile plate under mode I loading. Void nucleation sites have an initial circular shape with a radius of R_p , as shown in the magnified view at the right. Mode I loading is imposed on the plate by pulling the top and bottom boundaries in the vertical direction, while letting them remain traction free in the horizontal direction. Moreover, the horizontal displacements of the two nodes located at the top-left and bottom-left corners are fixed, so that the top and bottom parts of the plate do not move in the horizontal direction with respect to one another once the crack starts to propagate.

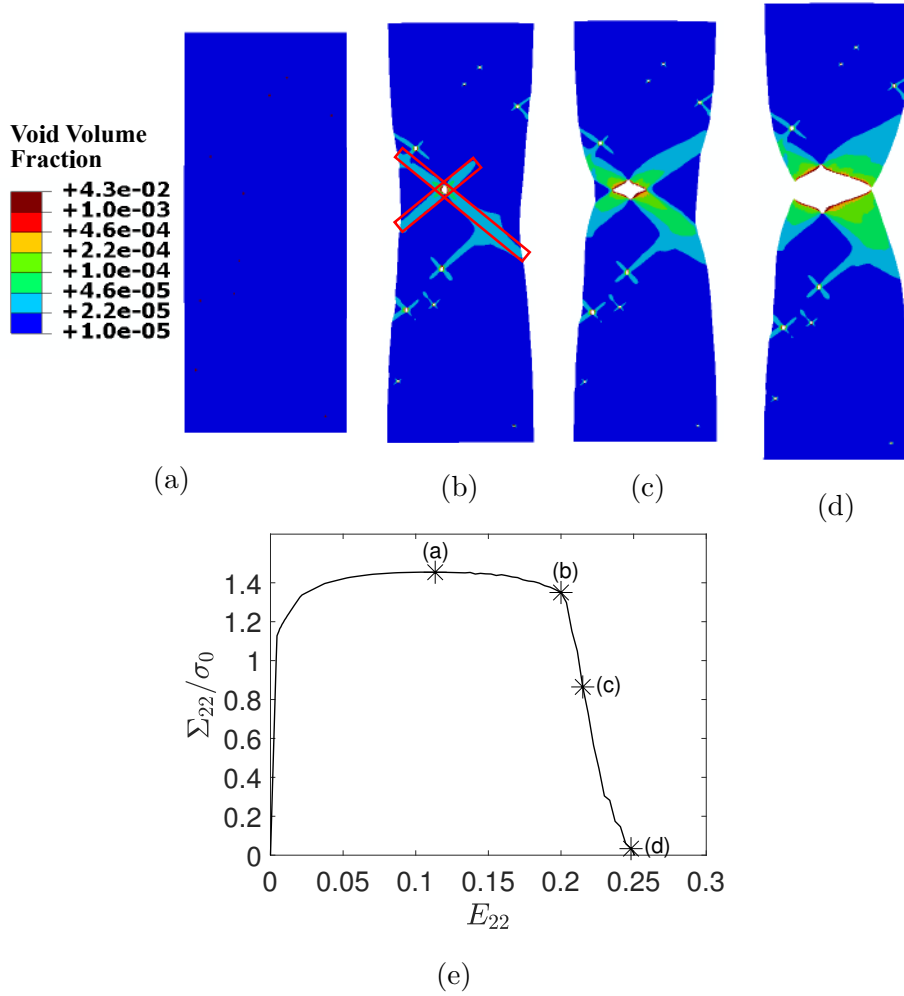


Figure 4: Developed void volume fraction in the fracture process zone for a plate with $N_p = 10$, $k = 3$, at (a) the onset of diffuse thinning, (b) the onset of macroscopic localization, (c) an intermediate deformation stage between the onset of macroscopic localization and final failure, and (d) the final failure. (e) Variation of the normalized engineering stress Σ_{22}/σ_0 with the engineering strain E_{22} for the plate.

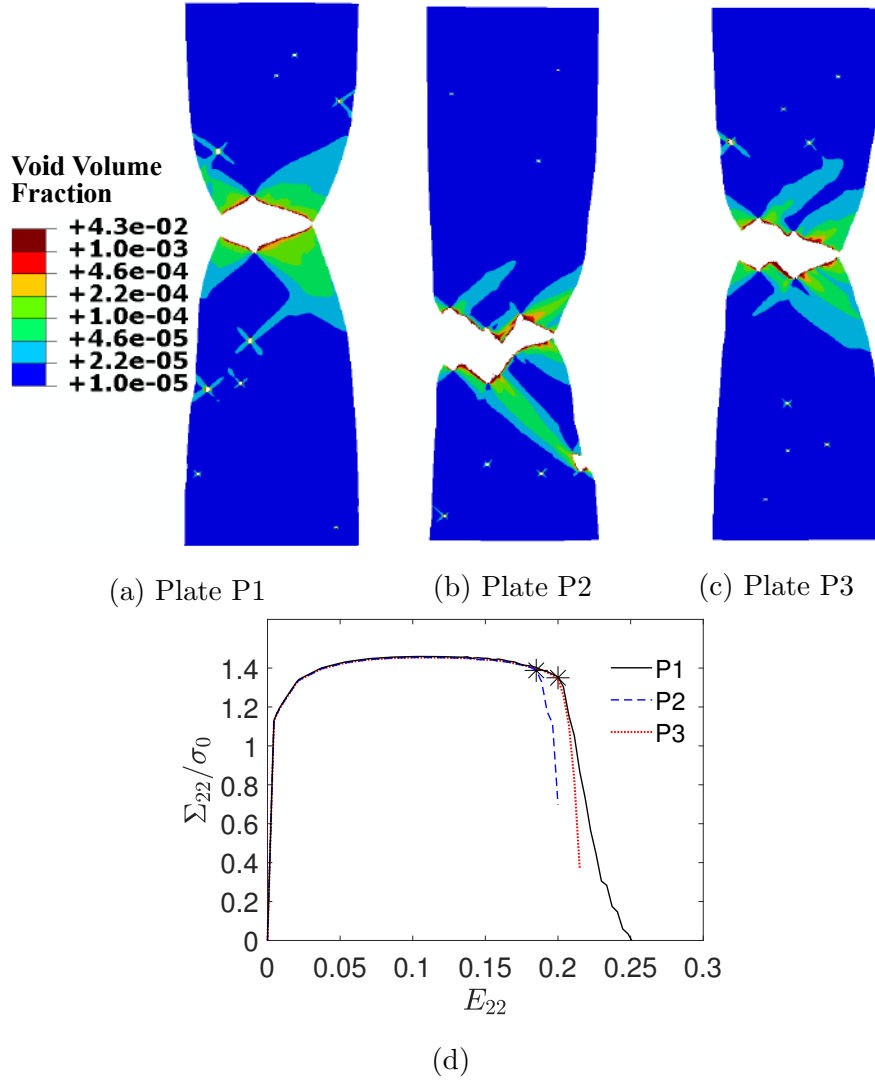


Figure 5: Developed void volume fraction in the fracture process zone for three plates with $N_p = 10, k = 3$ at the final failure: (a) plate P1, (b) plate P2, and (c) plate P3. Plate P1 is also shown in Fig. 4. All the material parameters for these three plates are the same, the only difference being the realization of randomly distribution void nucleation sites. (d) Variation of the normalized engineering stress Σ_{22}/σ_0 with the engineering strain E_{22} for the three plates.

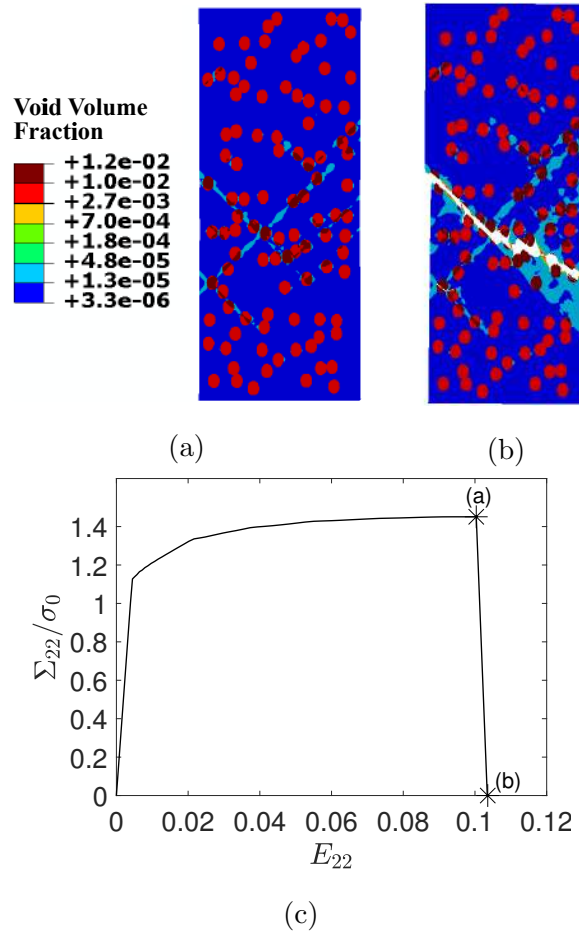


Figure 6: Developed void volume fraction in the fracture process zone for a plate with $N_p = 100$, $k = 18$ at the (a) onset of macroscopic localization, and (b) final failure. (c) Variation of the normalized engineering stress Σ_{22}/σ_0 with the engineering strain E_{22} for the plate.

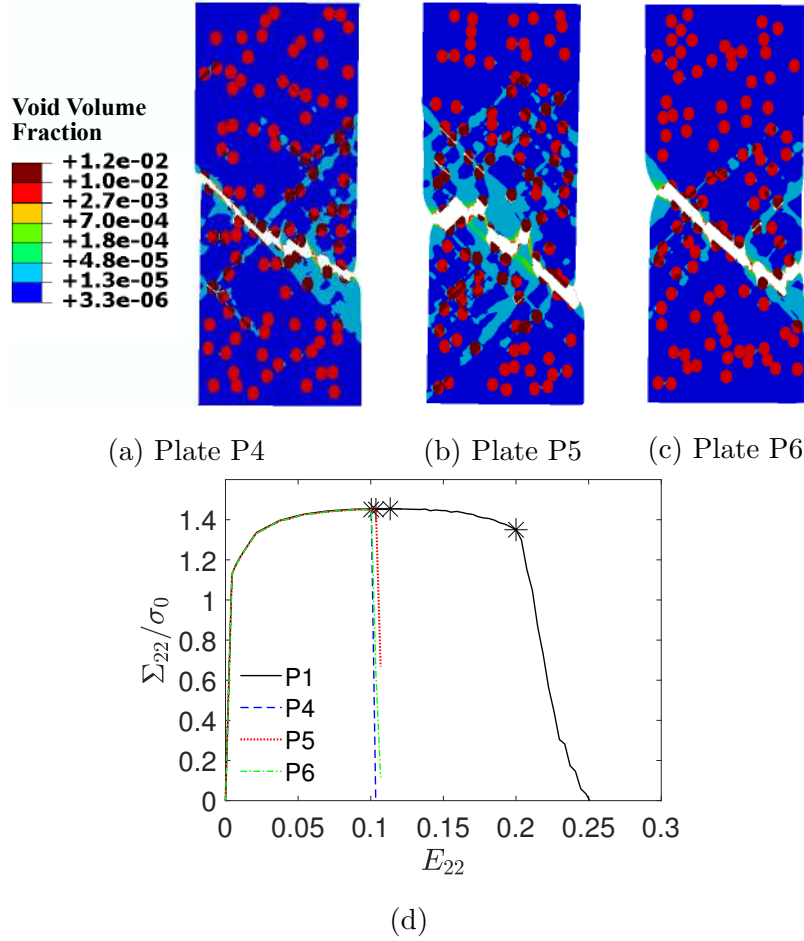


Figure 7: Developed void volume fraction in the fracture process zone for three plates with $N_p = 100, k = 18$ at the final failure: (a) plate P4, (b) plate P5, and (c) plate P6. Plate P4 is also shown in Fig. 6. All the material parameters for these three plates are the same, the only difference being the spatial distribution of the void nucleation sites. (d) Variation of the normalized engineering stress Σ_{22}/σ_0 with the engineering strain E_{22} for the plates P4, P5, P6 and the plate P1 (with $N_p = 10, k = 3$) shown in Fig. 4.

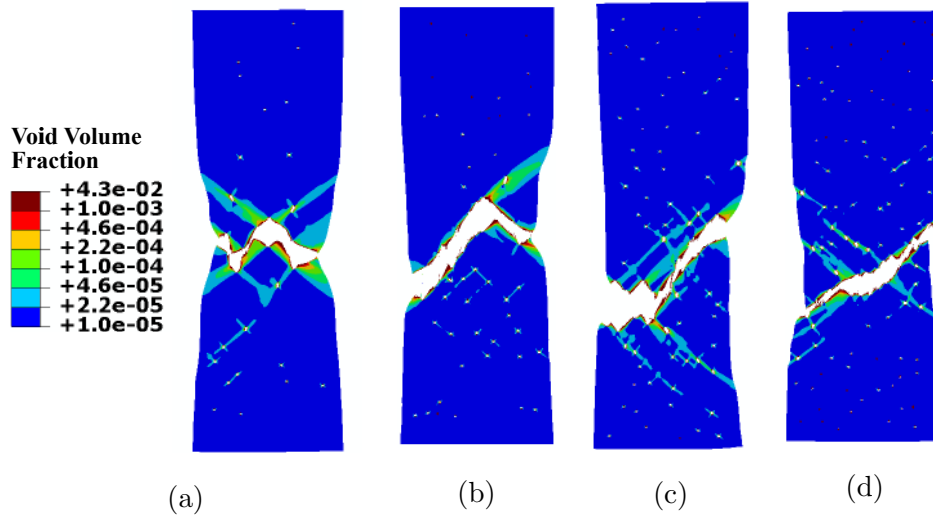


Figure 8: Developed void volume fraction in the fracture process zone for four different plates. The size of the void nucleation sites is the same for all the four plates ($k = 3$), while their number is different: (a) $N_p = 25$, (b) $N_p = 50$, (c) $N_p = 75$, and (d) $N_p = 100$.

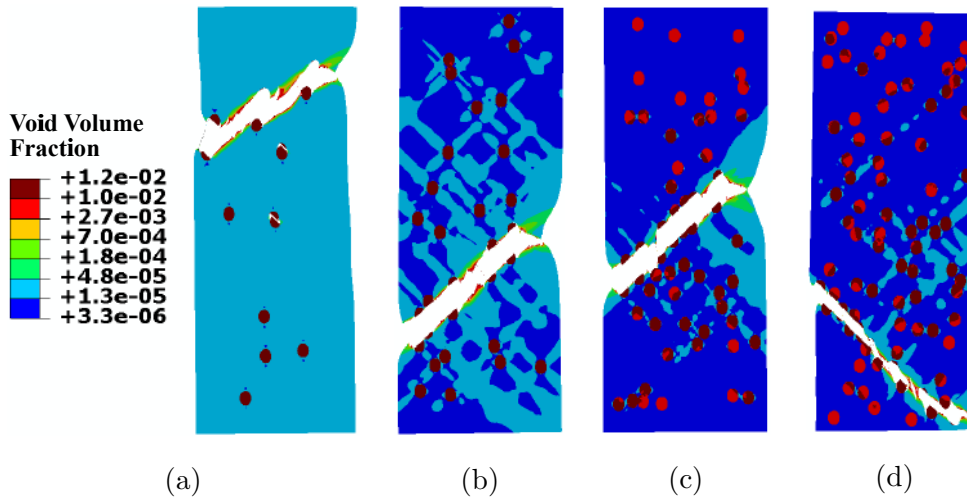


Figure 9: Developed void volume fraction in the fracture process zone for four different plates. The size of the void nucleation sites is the same for all the four plates ($k = 18$), while their number is different: (a) $N_p = 10$, (b) $N_p = 25$, (c) $N_p = 50$, and (d) $N_p = 75$.

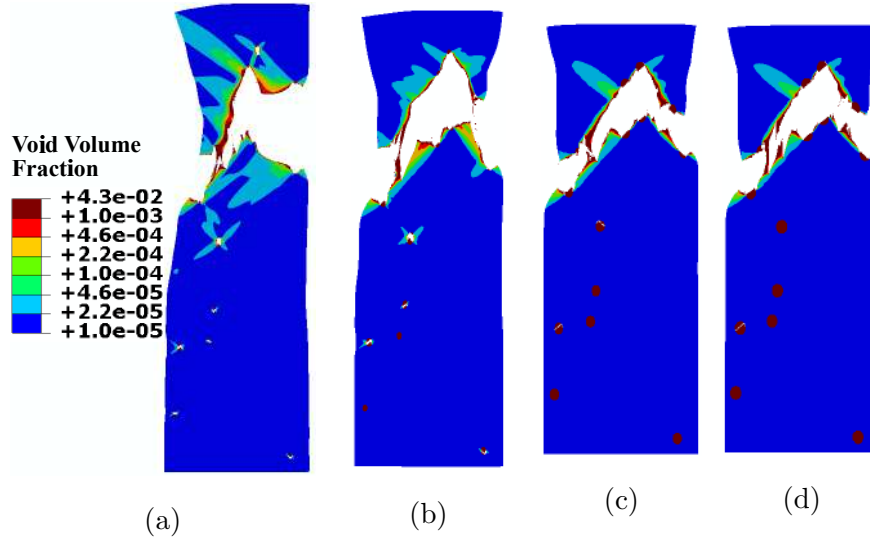


Figure 10: Developed void volume fraction in the fracture process zone for four different plates. The spatial distribution and the number of the void nucleation sites are the same for all the four plates ($N_p = 10$), while their size is different: (a) $k = 6$, (b) $k = 9$, (c) $k = 15$, and (d) $k = 18$.

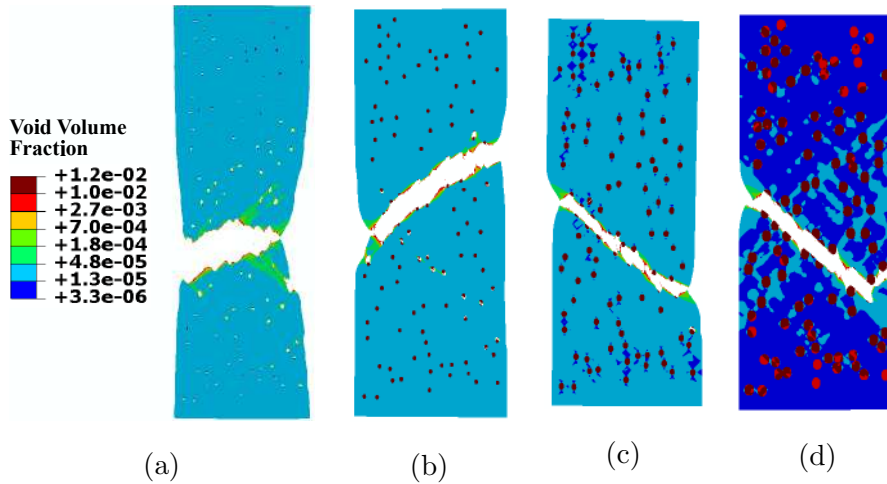


Figure 11: Developed void volume fraction in the fracture process zone for four different plates. The spatial distribution and the number of the void nucleation sites are the same for all the four plates ($N_p = 100$), while their size is different: (a) $k = 3$, (b) $k = 6$, (c) $k = 9$, and (d) $k = 15$.

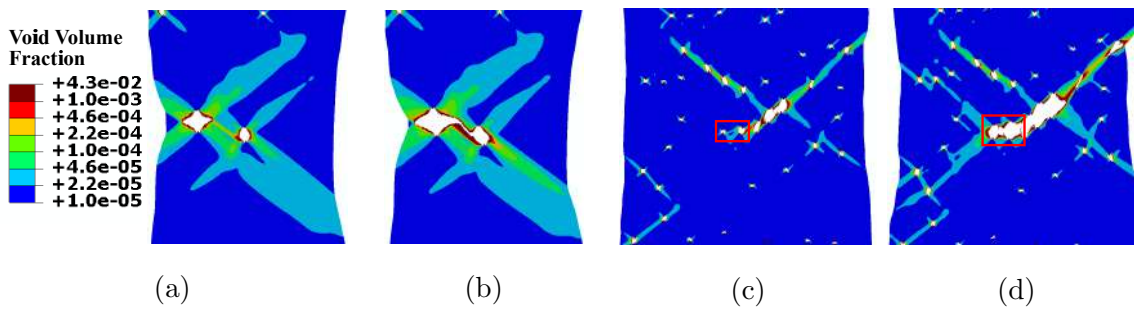


Figure 12: (a) Onset of void sheeting and (b) separation of the matrix through void sheeting between two void nucleation sites. (c) Onset of coalescence and (d) internal necking of the ligament between two void nucleation sites. The plate in (a,b) is also shown in Fig. 5c, and the one in (c,d) is also shown in Fig. 8d.

Author Agreement Statement

We the undersigned declare that this manuscript is original, has not been published before and is not currently being considered for publication elsewhere.

We confirm that the manuscript has been read and approved by all named authors and that there are no other persons who satisfied the criteria for authorship but are not listed. We further confirm that the order of authors listed in the manuscript has been approved by all of us.

We understand that the Corresponding Author is the sole contact for the Editorial process. He/she is responsible for communicating with the other authors about progress, submissions of revisions and final approval of proofs.

Signed by all authors as follows:

Cihan Tekoğlu



Kim Lau Nielsen





EK-8a

Proje Kapsamında Üretilen Düzenekte Mod I Yüğü Uygulanan Tek Kenar Çentikli Bir Plakanın Yırtılmasını Gösteren Film (ARDEB-PTS'ye Video Dosyası Olarak Yüklendiştir)

EK-8b

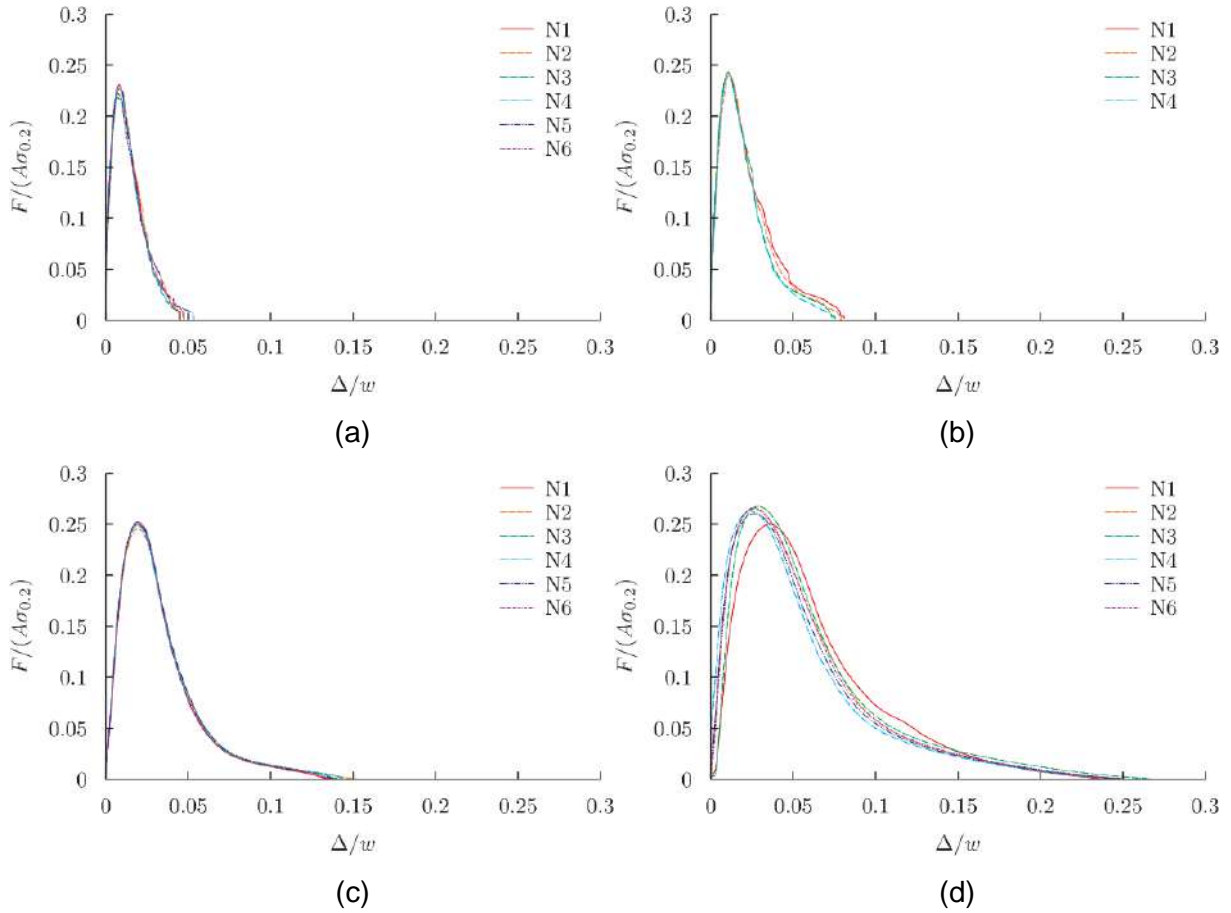
Proje Kapsamında Üretilen Düzenekte Mod I Yüğü Uygulanan Çift Kenar Çentikli Bir Plakanın Yırtılmasını Gösteren Film (ARDEB-PTS'ye Video Dosyası Olarak Yüklendiştir)

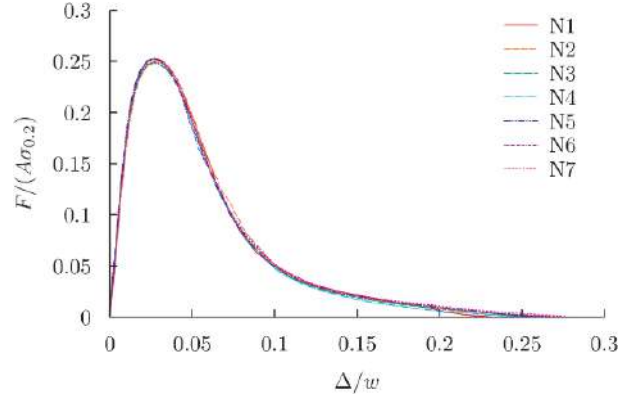
EK-9: Mod I Yüklemesi Altında Plaka Yırtılması Deneylerine Ait Grafikler

Kalınlıkları $t \in \{0.5, 1, 3, 4\}$ mm arasında değişen tek ve çift kenar çentikli Al 1050 H14 numuneler, mod I yüklemesi altında yırtılmıştır. Plaka yırtılması için tasarlanıp üretilen deney düzenekleri ve plakaların malzeme/geometrik özellikleri bölüm 3.2’de ayrıntılı olarak verilmiştir. Her bir plaka kalınlığı ve tipi için en az altı numune olmak üzere, toplam 136 numune test edilmiştir. Tüm deneylerde tek kenar çentikli plakalar 0.6 mm/dakika hızla, çift kenar çentikli plakalar ise 0.3 mm/dakika hızla çekilmiştir. Kuvveti (F) normalize etmek için kullanılan alan, plaka genişliği (w) ve kalınlığı (t) çarpılarak hesaplanmıştır; $A = w \times t$. Tek kenar çentikli plakalar için $A = 200 \times 4 \text{ mm}^2$, çift kenar çentikli plakalar için ise $A = 180 \times 4 \text{ mm}^2$ ’dir. “ t ” plaka kalınlığını, “ Δ ” çekme cihazından alınan yer değiştirme değerini, “ a ” çatlak ilerleme uzunluğunu, ifade etmektedir. Haddelme doğrultusu çekme doğrultusuna paralel olan plakalar 0° , dik olan plakalar ise 90° olarak adlandırılmıştır.

Normalize Yük–Yer Değiştirme Eğrileri

Tek Kenar Çentikli Numuneler (0°):

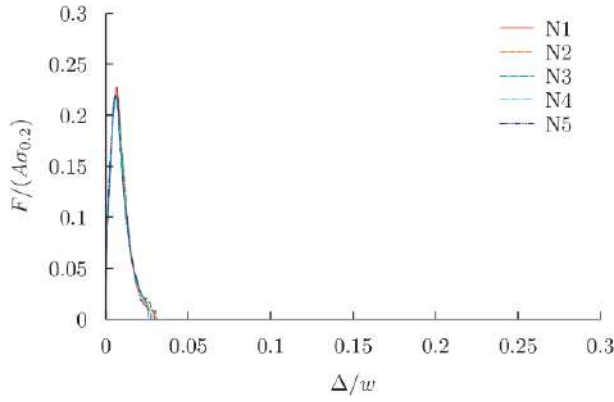




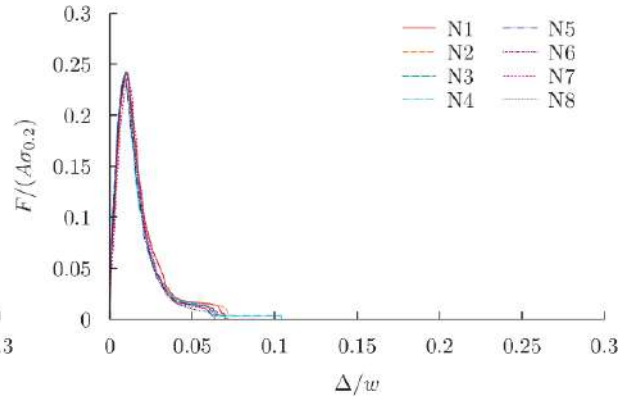
(e)

Şekil EK-9.1. 0°, tek kenar çentikli plakalar için normalize yük–yer değiştirme eğrileri. Plaka kalınlıkları: (a) $t = 0.5$ mm, (b) $t = 1$ mm, (c) $t = 3$ mm, (d) $t = 4$ mm, (e) $t = 5$ mm.

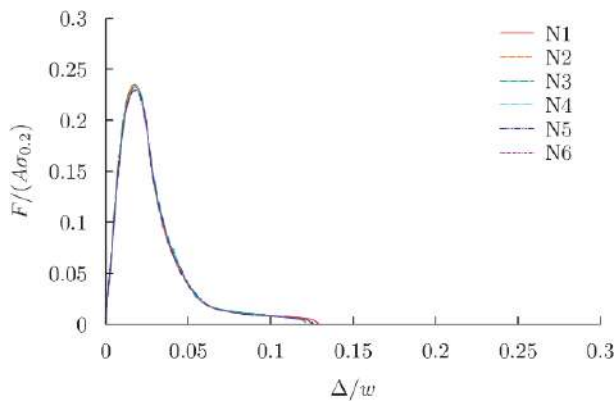
Tek Kenar Çentikli Numuneler (90°):



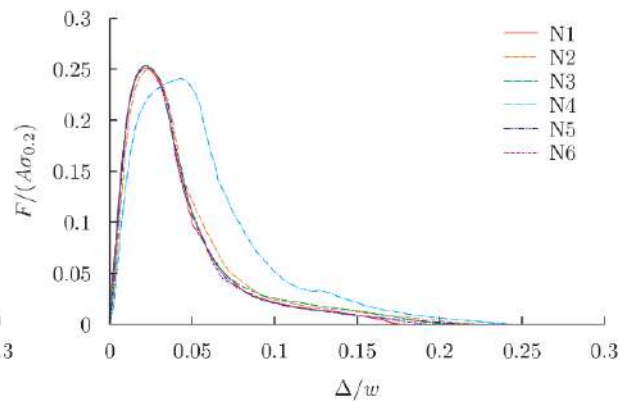
(a)



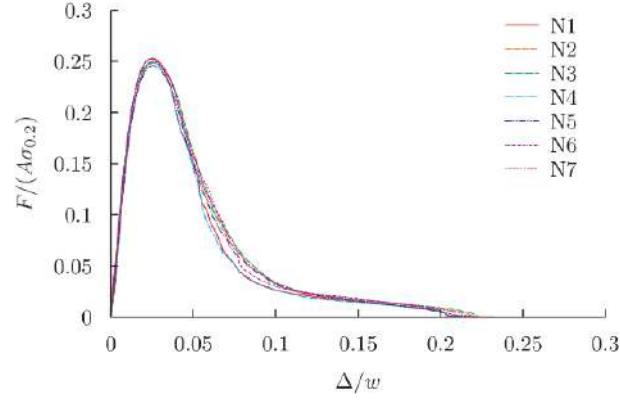
(b)



(c)



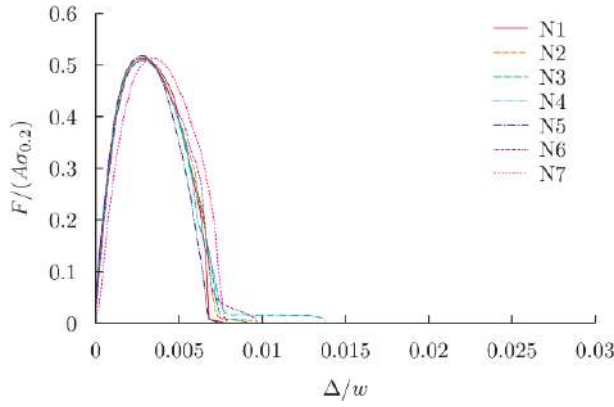
(d)



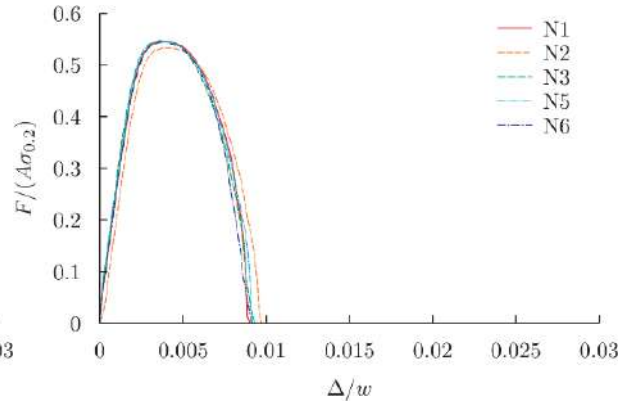
(e)

Şekil EK-9.2. 90°, tek kenar çentikli plakalar için normalize yük–yer değiştirme eğrileri. Plaka kalınlıkları: (a) $t = 0.5$ mm, (b) $t = 1$ mm, (c) $t = 3$ mm, (d) $t = 4$ mm, (e) $t = 5$ mm.

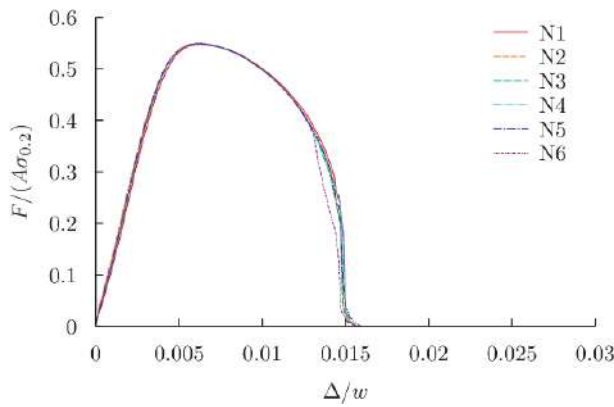
Çift Kenar Çentikli Numuneler (0°):



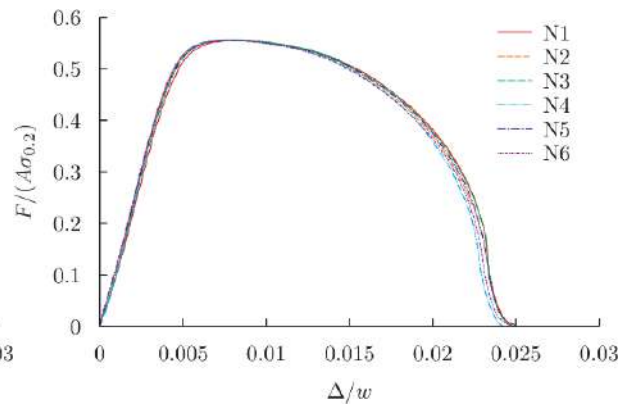
(a)



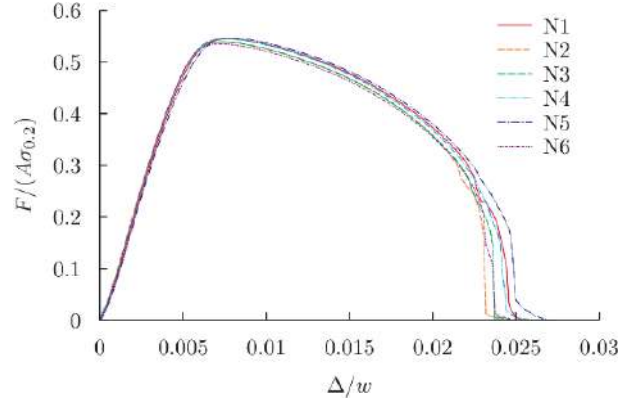
(b)



(c)



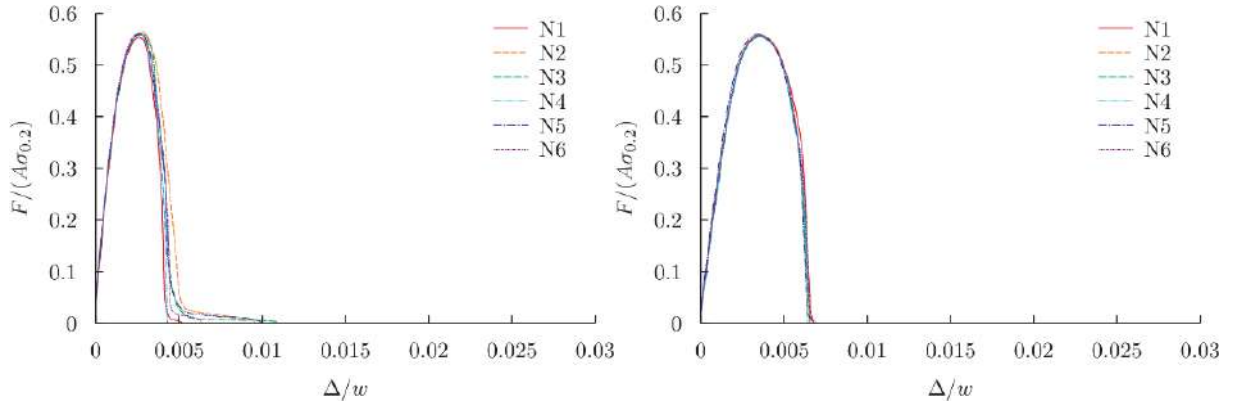
(d)



(e)

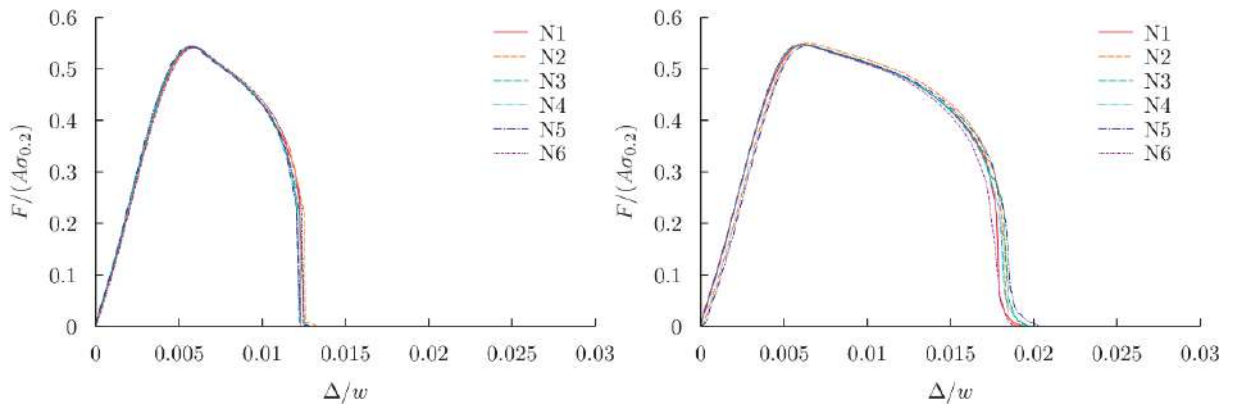
Şekil EK-9.3. 0°, çift kenar çentikli plakalar için normalize yük–yer değiştirme eğrileri. Plaka kalınlıkları: (a) $t = 0.5$ mm, (b) $t = 1$ mm, (c) $t = 3$ mm, (d) $t = 4$ mm, (e) $t = 5$ mm.

Çift Kenar Çentikli Numuneler (90°):



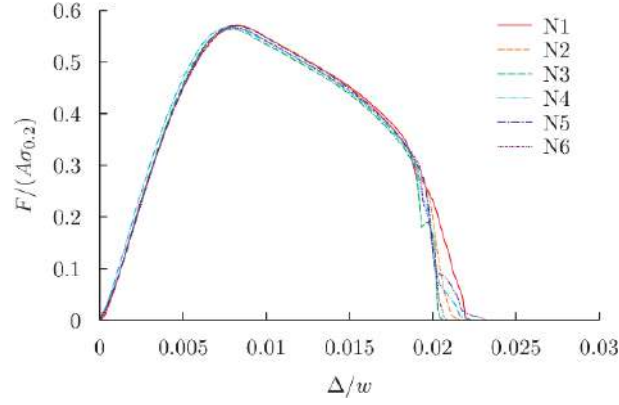
(a)

(b)



(c)

(d)

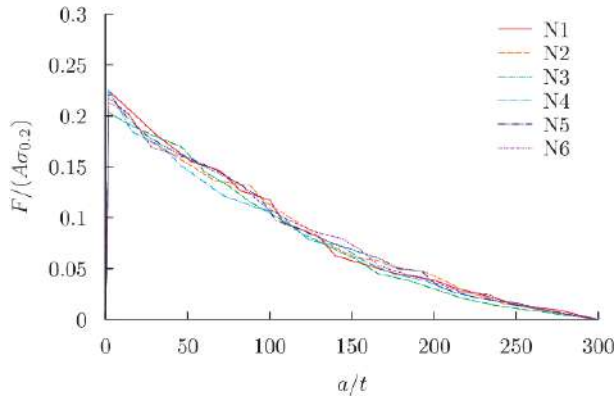


(e)

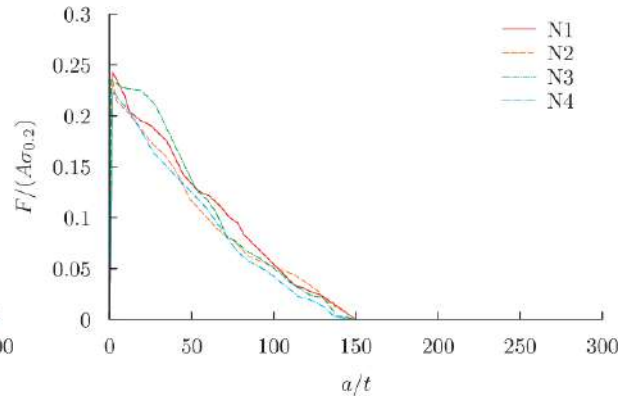
Şekil EK-9.4. 90°, çift kenar çentikli plakalar için normalize yük–yer değiştirme eğrileri. Plaka kalınlıkları: (a) $t = 0.5$ mm, (b) $t = 1$ mm, (c) $t = 3$ mm, (d) $t = 4$ mm, (e) $t = 5$ mm.

Normalize Yük–Çatlak İlerlemesi Eğrileri

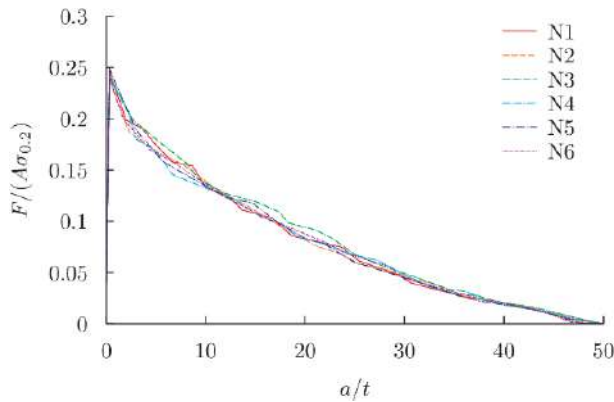
Tek Kenar Çentikli Numuneler (0°):



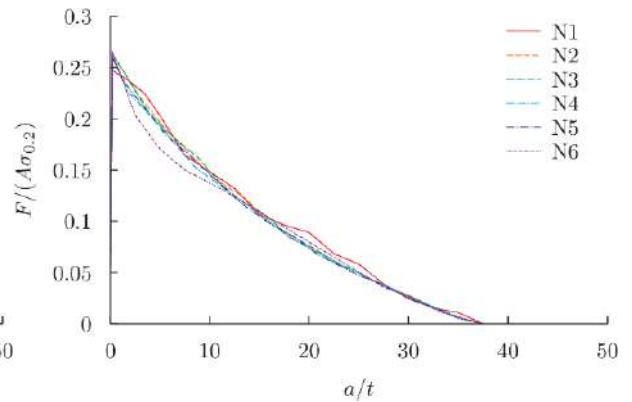
(a)



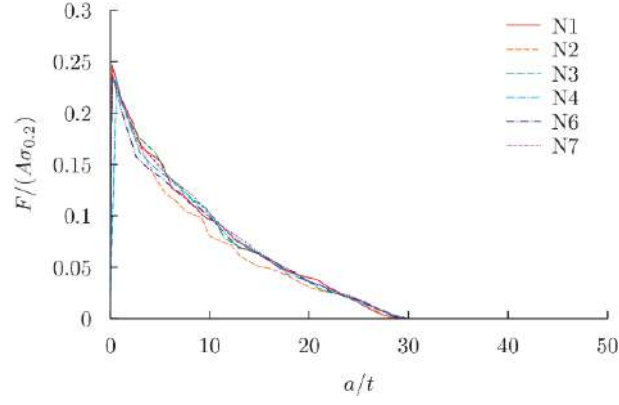
(b)



(c)



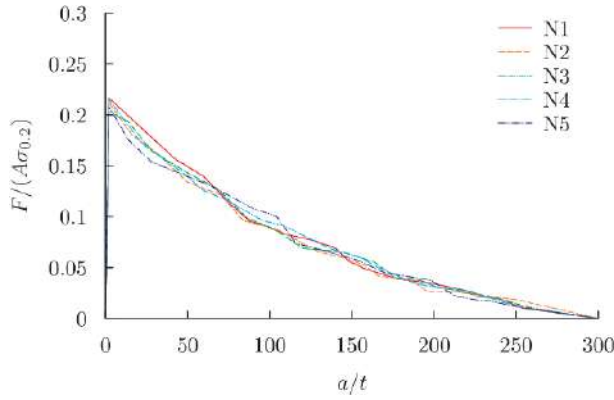
(d)



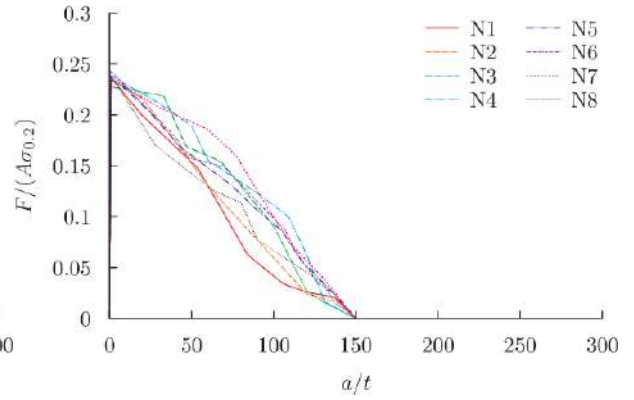
(e)

Şekil EK-9.5. 0°, tek kenar çentikli plakalar için normalize yük-çatlak ilerlemesi eğrileri. Plaka kalınlıkları: (a) $t = 0.5$ mm, (b) $t = 1$ mm, (c) $t = 3$ mm, (d) $t = 4$ mm, (e) $t = 5$ mm.

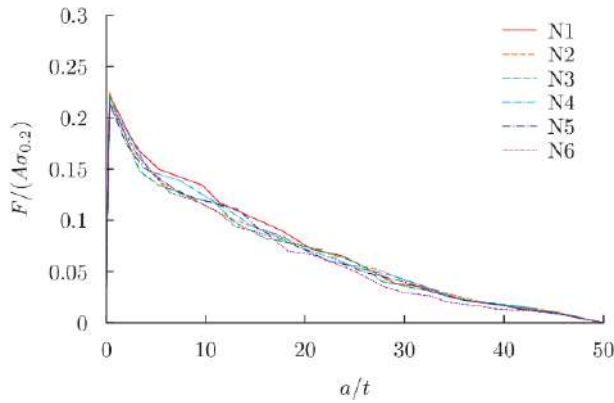
Tek Kenar Çentikli Numuneler (90°):



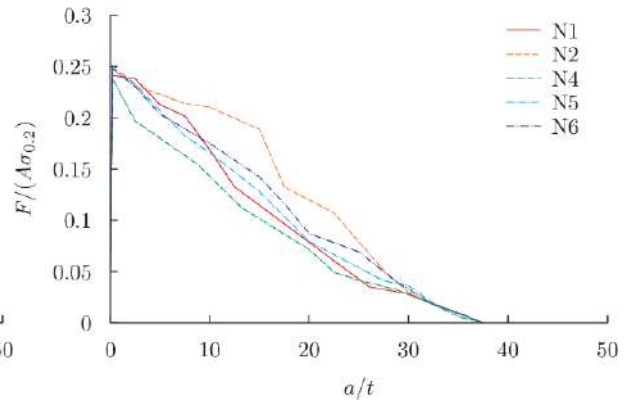
(a)



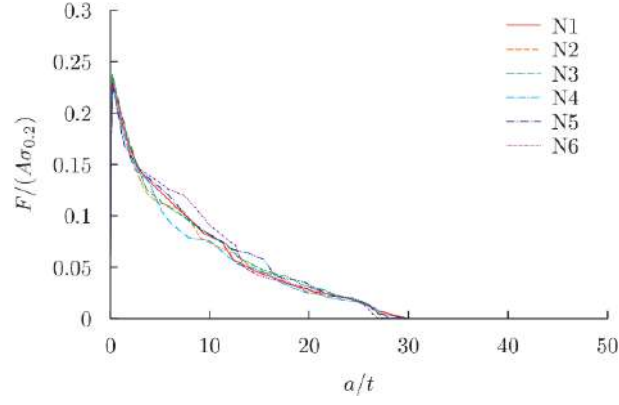
(b)



(c)



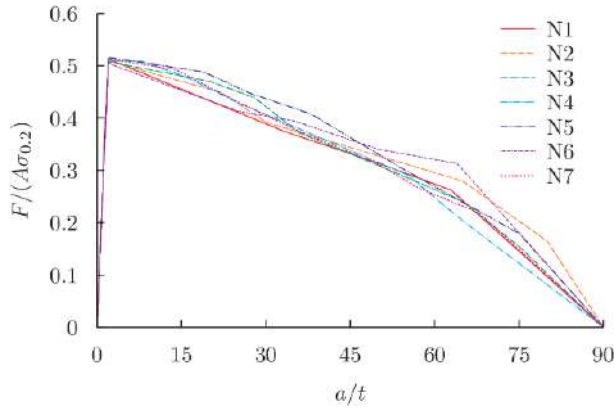
(d)



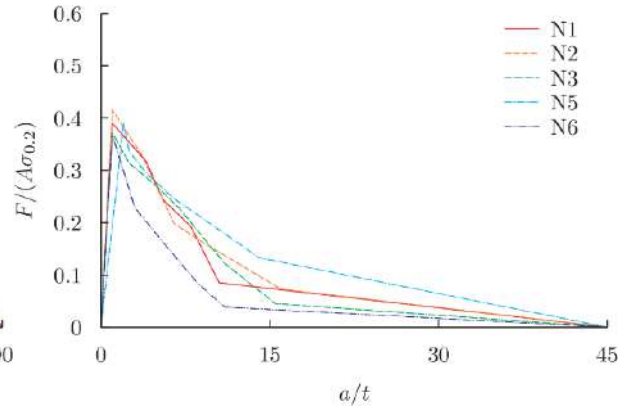
(e)

Şekil EK-9.6. 90°, tek kenar çentikli plakalar için normalize yük-çatlak ilerlemesi eğrileri. Plaka kalınlıkları: (a) $t = 0.5$ mm, (b) $t = 1$ mm, (c) $t = 3$ mm, (d) $t = 4$ mm, (e) $t = 5$ mm.

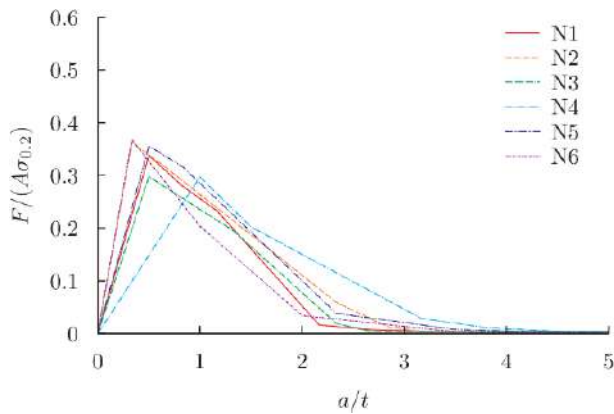
Çift Kenar Çentikli Numuneler (0°):



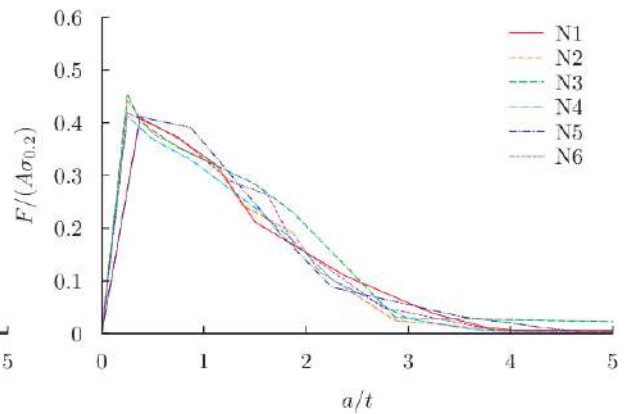
(a)



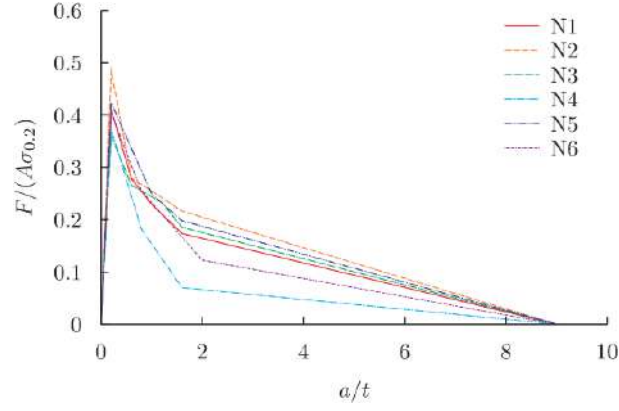
(b)



(c)



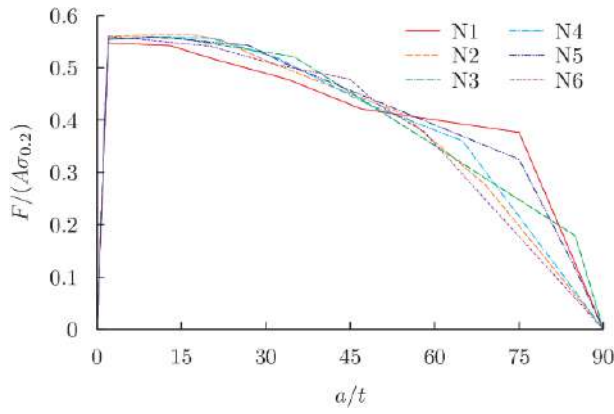
(d)



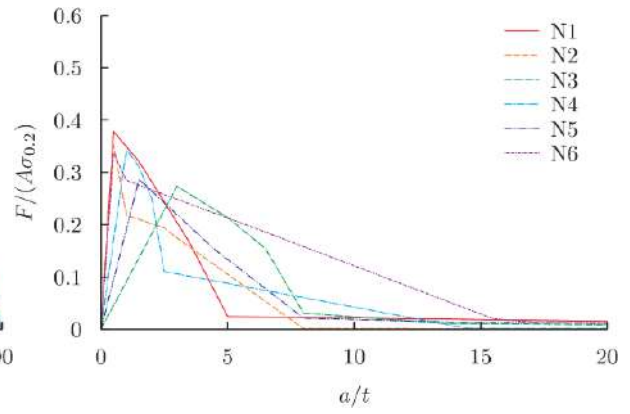
(e)

Şekil EK-9.7. 0°, çift kenar çentikli plakalar için normalize yük-çatlak ilerlemesi eğrileri. Plaka kalınlıkları: (a) $t = 0.5$ mm, (b) $t = 1$ mm, (c) $t = 3$ mm, (d) $t = 4$ mm, (e) $t = 5$ mm.

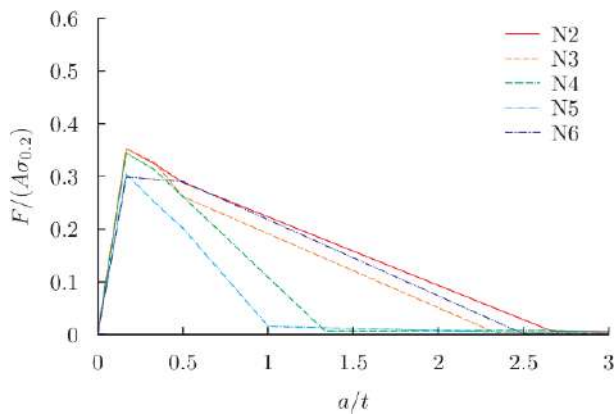
Çift Kenar Çentikli Numuneler (90°):



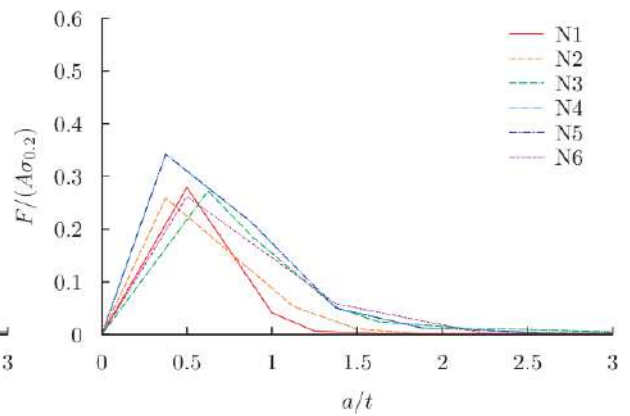
(a)



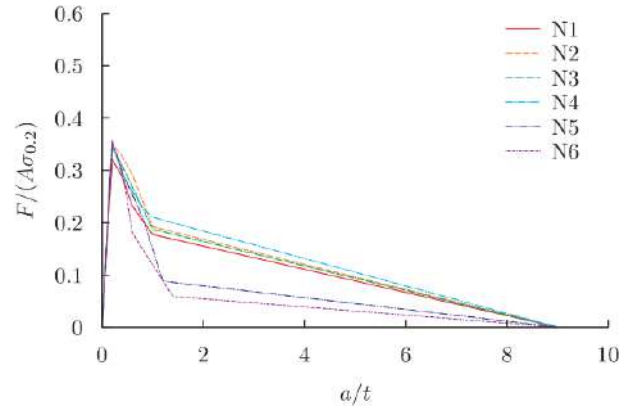
(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil EK-9.8. 90°, çift kenar çentikli plakalar için normalize yük-çatlak ilerlemesi eğrileri. Plaka kalınlıkları: (a) $t = 0.5$ mm, (b) $t = 1$ mm, (c) $t = 3$ mm, (d) $t = 4$ mm, (e) $t = 5$ mm.

Workshop on “*Topics in ductile fracture of metals*” at Hotel Scandic Nidelven,
Trondheim, October 17-18, 2018

Tuesday, October 16:

20:00: Dinner at *Una Pizzeria e Bar*, Beddingen 14, 7014 Trondheim.

Wednesday, October 17:

09:00-09:30 Odd S Hopperstad

Welcome & A brief description of FractAl and CASA

09:30-10:00 David Morin:

Failure by strain localization

10:00-10:30 Thomas Pardoën:

Microstructure heterogeneity dominated ductile fracture

10:30-11:00 Coffee break

11:00-11:30 Lars Edvard Dæhli:

Influence of yield surface curvature on the macroscopic yielding and ductile failure of isotropic porous plastic materials

11:30-12:00 Cihan Tekoğlu:

Ductile tearing of aluminum plates

12:00-13:00 Lunch

13:00-13:30 Emil Christiansen

Lattice rotations in precipitate free zones in an Al-Mg-Si alloy

13:30-14:00 Christian Niordson:

Modeling size-effects in porous metals

14:00-14:30 Dirk Mohr:

Fracture and plasticity of aluminum 7075 during hot stamping: experiments and modeling

14:30-15:00 Coffee break

15:00-15:30 Kim Lau Nielsen :

Ductile plate tearing: from micromechanics to large-scale modeling

15:30-16:00 Bjørn Håkon Frodal:

Ductile failure of textured aluminium alloys under compression-tension loading: experiments, modelling and simulations

16:00-16:30 Thilo Morgeneyer:

Strain localization and damage interactions in aluminium alloys: 3D in situ measurements and FE simulations

19:00 Dinner at Hotel Scandic Nidelven

Thursday, October 18:

09:00-09:30 Mikhail Khadyko:

Anisotropic plasticity and fracture of extruded aluminium alloy AA6063 in different tempers: experiments and crystal plasticity modelling

09:30-10:00 Ahmed Benallal:

Anisotropic constitutive equations for ductile porous materials

10:00-10:30 Coffee break

10:30-11:00 Jonas Faleskog:

Application of a non-local porous plasticity model to ductile fracture – modelling of the length parameter in the low to high triaxiality regime

11:00-11:30 Tore Børvik:

Microstructure based simulations of protective structures in aluminium

11:30-12:30 Discussions

12:30-13:30 Lunch

A numerical and experimental investigation of crack propagation mechanisms in ductile metal plates

C. Tekoğlu¹, H. Duran², M. Efe³, K. L. Nielsen⁴

¹ *Department of Mechanical Engineering, TOBB University of Economics and Technology, Söğütözü, Ankara, 06560, Turkey* cihantekoglu@etu.edu.tr

² *Department of Materials Science and Nanotechnology Engineering, TOBB University of Economics and Technology, Söğütözü, Ankara, 06560, Turkey* hduran@etu.edu.tr

³ *Metallurgical and Materials Engineering, Middle East Technical University, Ankara, Turkey* mefe@metu.edu.tr

⁴ *Department of Mechanical Engineering, Solid Mechanics, Technical University of Denmark, DK-2800 Kgs. Lyngby, Denmark* kin@mek.dtu.dk

Ductile fracture mainly occurs through the stages of nucleation, growth and coalescence of micron scale voids. The micro cracks that initiate through coalescence of micro voids propagate and lead to overall failure of structural components. Measuring the crack growth resistance of large structural components under approximated service conditions is an expensive and difficult task, if possible. Consequently, predicting the crack growth resistance of structural members requires numerical simulations. The finite element method (FEM) is widely used for that purpose.

The three experimentally observed crack propagation mechanisms in the ductile failure of metal plates are: i-) slanted, ii-) cup-cone, and iii-) cup-cup crack growth. In real life applications, cracks usually show a mixture of different propagation modes. The present work investigates the effects of volume fraction, size, and distribution of second phase particles on the crack propagation mechanisms. Both experimental and numerical (FE analysis) analyses are performed for this purpose. In the FE calculations, the plate is subjected to quasi-static uniaxial tensile loading by imposing displacements boundary conditions on its top and bottom surfaces. The random spatial/dimensional distribution of the voids (nucleated by the second phase particles) in the fracture process zone of the plate are represented by using the Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN) porous plasticity, see e.g. [1]. The results show that, a few number of small particles tend to lead to cup-cup crack growth, while the presence of a large number of big particles leads to slanted or cup-cone crack morphologies.

References

- [1] V. Tvergaard, 1981. "Influence of Voids on Shear Band Instabilities under Plane Strain Conditions", *International Journal of Fracture Mechanics*, 17, 389-407.

Acknowledgements

C. Tekoğlu, H. Duran, and K. L. Nielsen gratefully acknowledge the financial support by TÜBİTAK (project no: 315M133).

PLASTICITY DAMAGE FRACTURE

9:00AM TO 5:00PM

TOBB ETU, Social Facilities Building, Room 3

THURSDAY
OCTOBER 25

EK-12: Yürütücünün Proje Sonuçlarını Paylaşmak Amacıyla
Düzenlediği Çalıştayın Öz Kitapçığı

Workshop on
***"Plasticity, Damage and Fracture of
Engineering Materials"***

25 October 2018, TOBB University of Economics and
Technology, Social Facilities Building, Room 3

The main limits in engineering design and production are plasticity, damage, and fracture. Ever increasing demand for materials with usually contradicting properties such as high strength and high ductility makes it vital to develop new approaches to these limits. In this workshop, recent theoretical, numerical and experimental work concerning plasticity aspects of damage, failure and fracture mechanics will be discussed.

This workshop is organized by Cihan Tekoğlu and Tuncay Yalçınkaya, with the financial support of [TÜBİTAK](#), for the project no: 315M133.

Agenda

- 09:05 – 09:05** **Welcome**
Murat Aktaş (TOBB ETU, Mechanical Engineering)
- 09:30 – 10:00** **Ductile Tearing of Metal Plates**
Cihan Tekoğlu (TOBB ETU, Mechanical Engineering)
- 10:00 - 10:30** **A Comparison of Strain Localization Behavior in BCC, FCC, and HCP Metals**
Mert Efe (METU, Metallurgical and Materials Engineering)
- 10:30 - 11:00** **Inter-Granular Cracking through Micro-Plasticity and Cohesive Zone Modeling**
Tuncay Yalçınkaya (METU, Aerospace Engineering)
- 11:00 - 11:30** **Coffee Break**
- 11:30 - 12:00** **Experimental and Numerical Investigation of Elastic-Plastic Behavior of Additively Manufactured Lattice Materials**
Recep Grglaslan (TOBB ETU, Mechanical Engineering)
- 12:00 - 12:30** **A Comparative Study on the Hyperelastic Constitutive Models for Rubber**
Hsn Dal (METU, Mechanical Engineering)
- 12:00 - 12:30** **Effect of Welding Parameters on the Fatigue Strength of CMT Welded Lap Joints**
Mehmet Okan Görtan (Hacettepe Univ., Mechanical Engineering)
- 12:30 - 14:00** **Lunch**
- 14:00 - 14:30** **Polymer Nanomechanics: Enhanced interfacial rigidity of 1D Thermoset Nanostructures**
Hatice Duran (TOBB ETU, Materials Sci. & Nanotechnology)
- 14:30 - 15:00** **Computational Modeling of Durability Phenomena in Concrete**
Serdar Göktepe (METU, Civil Engineering)
- 15:00 - 15:30** **Fiber/Matrix Interface Debonding in Steel-Fiber Composites**
Barış Sabuncuođlu (Hacettepe Univ., Mechanical Engineering)
- 15:30 - 16:00** **Coffee Break**
- 16:00 - 16:30** **Computation of Macroscopic Response of Multiphase Materials with Planar Interfaces**
Ercan Gürses (METU, Aerospace Engineering)
- 16:30 - 17:00** **Static and Fatigue Failure Mechanisms in Curved Composite Laminates**
Demirkan ker (METU, Aerospace Engineering)

Table of Contents

Ductile Tearing of Metal Plates Cihan Tekoğlu, Hatice Duran, Mert Efe, Kim Lau Nielsen	1
A Comparison of Strain Localization Behavior in BCC, FCC, and HCP Metals Mert Efe	2
Inter-granular Cracking Through Micro-plasticity and Cohesive Zone Modeling Tuncay Yalçınkaya, İzzet Özdemir, Ali Osman Fırat	3
Experimental and Numerical Investigation of Elastic-Plastic Behavior of Additively Manufactured Lattice Structures Recep M. Gorguluarslan	4
A Comparative Study on the Hyperelastic Constitutive Models for Rubber K. Açıkgöz, F. Denli, Y. Badienia, H. Dal	5
Effect of Welding Parameters on the Fatigue Strength of CMT Welded Lap Joints Mehmet Okan Görtan, Benat Koçkar	6
Polymer Nanomechanics: Enhanced Interfacial Rigidity of 1D Thermoset Nanostructures Hatice Duran	7
Computational Modeling of Durability Phenomena in Concrete Mehran Ghasabeh, Serdar Göktepe	8
Fiber/Matrix Interface Debonding in Steel-Fiber Composites Barış Sabuncuođlu	9
Computation of Macroscopic Response of Multiphase Materials with Planar Interfaces H. Emre Oktay, Ercan Gürses, Serdar Göktepe	10
Static and Fatigue Failure Mechanisms in Curved Composite Laminates Demirkan Coker	11

Ductile Tearing of Metal Plates

C. Tekođlu¹, H. Duran², Mert Efe³, K. L. Nielsen⁴

¹Department of Mechanical Engineering, TOBB University of Economics and Technology, Söğütözü, Ankara, 06560, Turkey

²Department of Materials Science and Nanotechnology Engineering, TOBB University of Economics and Technology, Söğütözü, Ankara, 06560, Turkey

³Department of Metallurgical and Materials Engineering, Middle East Technical University, Ankara, 06800, Turkey

⁴Department of Mechanical Engineering, Solid Mechanics, Technical University of Denmark, DK-2800 Kgs. Lyngby, Denmark

cihantekoglu@etu.edu.tr, hduran@etu.edu.tr, mefe@metu.edu.tr, kin@mek.dtu.dk

Abstract: The aim of this study is to investigate the effects of microstructure on the crack morphologies in ductile metals (see Fig. 1). In metals and metal alloys, cracks propagate predominantly by the growth and coalescence of voids nucleated by the second phase particles whose size are in the order of μm . The fundamental hypothesis of this study is that, not only the volume fraction, but also the average size and spatial distribution of these particles/voids would affect crack propagation. In order to test this hypothesis, both numeric and experimental studies are performed. These studies verified the hypothesis, and the results showed that, small and remotely distributed particles lead to cup-cup crack propagation, while large and closely spaced particles favor slanted or cup-cone crack propagation. The effects of average size and spatial distribution of particles/voids on the crack morphology is more pronounced for metals with an intermediate level of strain hardening.

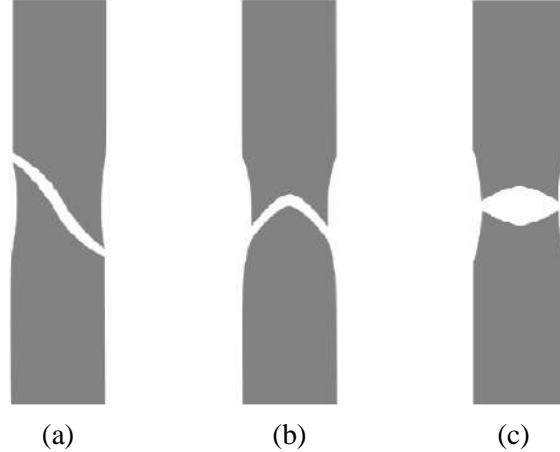


Fig. 1: (a) Slanted, (b) cup-cone, and (c) cup-cup crack morphology (see e.g. (El-Naaman ve Nielsen, 2013)).

References

El-Naaman, S. A., Nielsen, K. L. 2013. “Observations on Mode I ductile tearing in sheet metals”, *European Journal of Mechanics A/Solids*, 42, 54-62.

Acknowledgements

C. Tekoğlu, H. Duran and K. L. Nielsen gratefully acknowledge the financial support by TÜBİTAK (project no: 315M133).

A Comparison of Strain Localization Behavior in BCC, FCC, and HCP Metals

Mert Efe

Department of Metallurgical and Materials Engineering, Middle East Technical University,
Ankara, 06800, Turkey

mefe@metu.edu.tr

Abstract: This presentation compares the heterogeneous deformation behavior of selected alloys from materials having bcc, fcc, and hcp crystal structures. For this purpose, macro- and micro-scale deformation heterogeneities in a DC04 deep-drawing steel, a 6061-T6 aluminum alloy, and a AZ31 magnesium alloy are investigated under both uniaxial tension and biaxial stretching. Strain maps from the tests and microstructure and texture data are overlapped in order to identify the sources of the localizations. Three materials show remarkably different deformation behavior. Strain localizes into the grains with α fiber texture in the steel, with limited effects to the macro-scale formability. In 6061 aluminum alloy, strain localization to the grain boundaries is evident with possible risks of fracture initiation at these locations. Twinning activity controls the deformation in magnesium, where severe localizations to the tensile twins limit both the micro- and macro-scale formability. Both magnesium and aluminum alloys also show sensitivity to the strain path. The presentation will end with a suggestion of possible solutions to the heterogeneous deformation, and underline the material specific challenges and strategies.

Inter-granular Cracking Through Micro-plasticity and Cohesive Zone Modeling

Tuncay Yalçinkaya^a, İzzet Özdemir^b, Ali Osman Fırat^a

^aDepartment of Aerospace Engineering, Middle East Technical University,
Ankara 06800, Turkey

^bDepartment of Civil Engineering, Izmir Institute of Technology, Section of Materials Technology,
Urla, Izmir 35430, Turkey

yalcinka@metu.edu.tr, izzetozdemir@iyte.edu.tr

Abstract: Even though inter-granular fracture phenomenon is generally regarded as a macroscopically brittle mechanism, there are various cases where the fracture occurs at the grain boundaries with considerable plastic deformation at the macroscopic scale. There are several microstructural reasons for grain boundaries to host crack initiation. They can interact with impurities and defects, can provide preferential location for precipitation, can behave as a source of dislocations and can impede the movement of dislocations as well. The understanding of the crack initiation and propagation at the grain boundaries requires the analysis of the grain boundary orientation and the orientation mismatch between the neighboring grains and the related the stress concentration, which is only possible through the combination of micromechanical plasticity and fracture mechanics. For this reason, the current work studies the evolution of plasticity in three dimensional Voronoi based microstructures through a strain gradient crystal plasticity framework (see e.g. Yalcinkaya et al. (2011), Yalcinkaya et al. (2012), Yalcinkaya (2017)) and incorporates a potential based cohesive zone model (see Park et al. (2009), Cerrone et al. (2014)) at the grain boundaries for the crack initiation and propagation. The numerical examples consider the effect of the orientation distribution, orientation of grains and the grain boundary conditions on the inter-granular fracture behavior of micron-sized specimens.

References

- Yalcinkaya, T., Brekelmans, W. A. M., Geers, M. G. D., 2011. Deformation patterning driven by rate dependent non-convex strain gradient plasticity. *J. Mech. Phys. Solids* 59, 1–17.
- Yalcinkaya, T., Brekelmans, W. A. M., Geers, M. G. D., 2012. Non-convex rate dependent strain gradient crystal plasticity and deformation patterning. *Int. J. Solids Struct.* 49, 2625–2636.
- Yalcinkaya, T., 2017. Strain gradient crystal plasticity: Thermodynamics and implementation. *Handbook of Nonlocal Continuum Mechanics for Materials and Structures* 1, 1–32.
- Park, K., Paulino, G. H., Roesler, J. R., 2009. A unified potential-based cohesive model of mixed-mode fracture. *J. Mech. Phys. Solids* 57, 891–908.
- Cerrone, A., Wawrzynek, P., Nonn, A., Paulino, G. H., Ingraffea, A., 2014. Implementation and verification of the park-paulino-roesler cohesive zone model in 3d. *Eng. Fract. Mech.* 120, 26–42.

Experimental and Numerical Investigation of Elastic-Plastic Behavior of Additively Manufactured Lattice Structures

Recep M. Gorguluarslan

Department of Mechanical Engineering, TOBB University of Economics and Technology,
Söğütözü, Ankara, 06560, Turkey

rgorguluarslan@etu.edu.tr

Abstract: Lattice structures, which consist of interconnected strut members in micro- and millimeter scales, recently gained popularity to attain a lightweight structure while maintaining the high specific mechanical properties such as strength and energy absorption due to the advancements in additive manufacturing (AM) techniques. However, the irregularities and uncertainties, introduced by the AM techniques on the geometry and material of the lattice structures, result in differences between the simulated behavior and the manufactured behavior of the lattice structures. In this study, the plastic behavior and energy absorption of various lattice structure designs of a crush box geometry are investigated experimentally under compression. It has been observed that the crush box designs with lattice structures provide much higher energy absorption compared to a hollow crush box with square profile. The nonlinear material behavior of the AM-fabricated specimens is characterized based on the experiments and used in the nonlinear finite element analysis (FEA) of the experimented designs. Results indicate that a close prediction can be made by the nonlinear FEA compared to the experimental results, but further investigation is needed to effectively account for the microscale uncertainties in the FEA of the lattice structures.

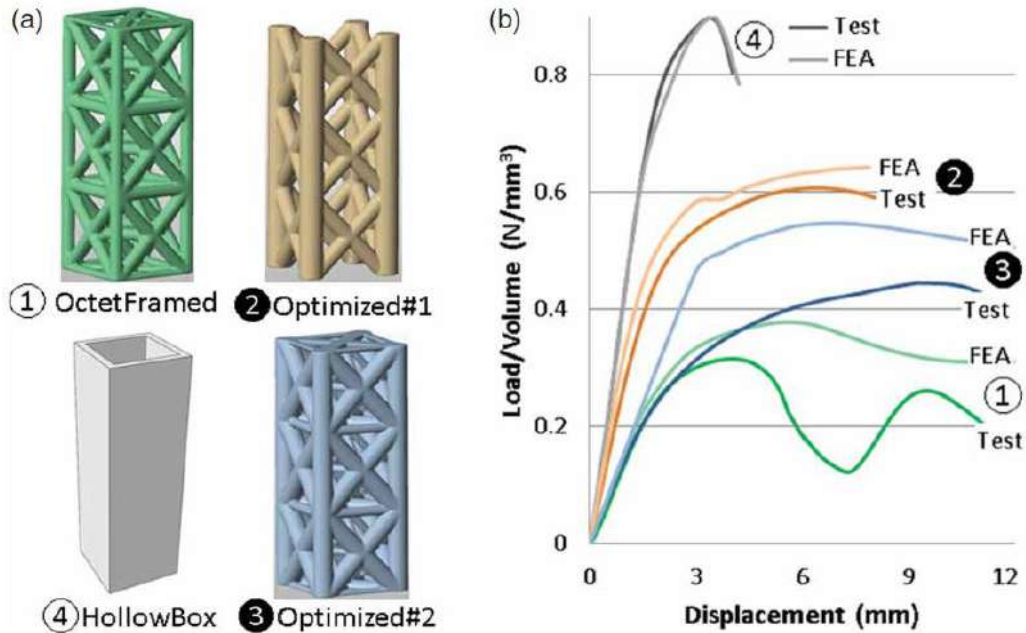


Fig. 1: a) Crush box designs with lattice structures and hollow box, b) FEA and experiment results of these structures in compression.

A Comparative Study on the Hyperelastic Constitutive Models for Rubber

K. Açıkgöz, F. Denli, Y. Badienia, H. Dal

Department of Mechanical Engineering, Middle East Technical University, Çankaya, Ankara, 06800, Turkey

dal@metu.edu.tr

Abstract: This paper presents a novel approach for comparison of constitutive models for rubber. Model parameters are identified by simultaneous fitting of a given data of a set of homogeneous experiments (uniaxial tension, equibiaxial tension, and pure shear, **Figure 1**) by multiobjective optimization. Using these parameters, fitting error can be calculated. In this study, however, quality of fit parameter, which represents the amount of error normalized by the data, is calculated for unbiased comparison of models. 40 different constitutive models for rubber-like materials from the literature are compared based on their quality of fit values [1]. Among these models, micro-sphere [2] and Alexander's model [3] gives the best results for simultaneous fitting. However, some models work in low or moderate stretch levels. The stretch values up to which a model performs reasonably good (in terms of quality of fit) is called validity range. It allows ranged comparison of models and provides insight for model selection in engineering practice. Quality of fit values, validity ranges and errors are presented for all 40 models.

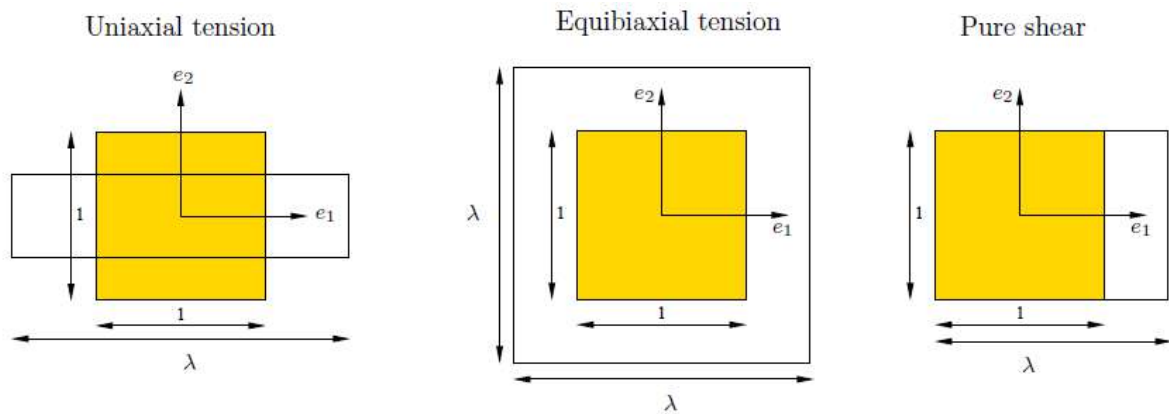


Fig. 1: The homogeneous deformation states of a unit-cube element.

References

- Dal, H., Badienia, Y., Açıkgöz, K., & Denli, F. A. 2017. A Novel Parameter Identification Toolbox for the Selection of Hyperelastic Constitutive Models from Experimental Data. 7th GACM Colloquium on Computational Mechanics for Young Scientists from Academia and Industry, 11(P11), 2.
- Miehe, C., Göktepe S., and Lulei, F. A. 2004. A micro-macro approach to rubber-like materials—part I: the non-affine micro-sphere model of rubber elasticity. *J. Mech. Phys. Solids*, 52 (11), 2617-2660.
- Alexander, H. 1968. A constitutive relation for rubber-like materials. *International Journal of Engineering Science*, 6(9), 549-563.
- Treloar, L. R. G. 1944. Stress-Strain data for vulcanised rubber under various types of deformation. *Transactions of the Faraday Society*, 40. 59-70.

Effect of Welding Parameters on the Fatigue Strength of CMT Welded Lap Joints

Mehmet Okan Görtan, Benat Koçkar

Department of Mechanical Engineering, Hacettepe University, Beytepe, Ankara, 06800, Turkey

okangortan@hacettepe.edu.tr, benat@hacettepe.edu.tr

Abstract: Sheet metal suspension arms are usually manufactured by stamping of blanks and welding of those to a final product. Thanks to their low weight and high fatigue strength, these are widely used in passenger cars where weight is of high importance. However, due to the characteristics of suspension systems, suspension arms are subjected to dynamic loading which may cause fatigue failure. In the current study, effects of end current during cold metal transfer (CMT) welding of steel sheets on weld profile and fatigue strength of joints are investigated. For that purpose, a lap joint sample has been designed. Samples have been robotic CMT welded with different end current parameters. The effect of aforementioned parameters on weld profile has been investigated on the weld cross section. Moreover, fatigue strength of the weld joints has been determined using axial testing.

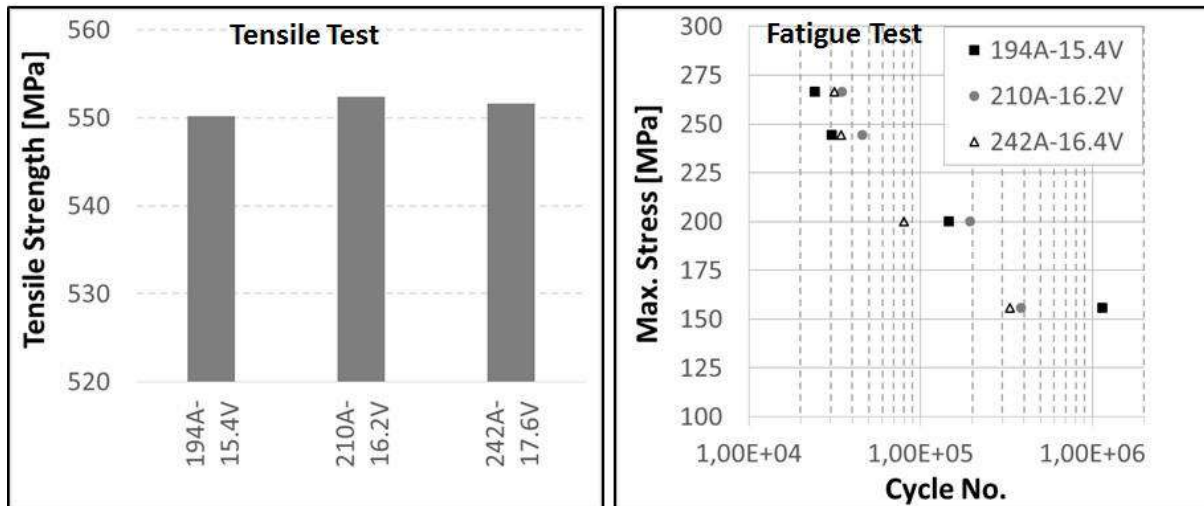


Fig. 1: Tensile and fatigue test results of investigated CMT welded specimens.

Polymer Nanomechanics: Enhanced Interfacial Rigidity of 1D Thermoset Nanostructures

Hatice Duran

Department of Materials and Nanotechnology Engineering, TOBB University of Economics and Technology, Söğütözü, Ankara, 06560, Turkey

hduran@etu.edu.tr

Abstract: Plastic deformation of polymers is a complex phenomena, involving both the crystalline and amorphous phases. In this talk, the strength, toughness and their interconnection will be addressed with particular emphasis on cavitation, crystal plasticity and plastic deformation of crystalline and amorphous phase, which leads to high molecular orientation of both phases. We will focus on and compare two extreme cases; mechanical deformation of i) intrinsically crystalline polymer nanofibers (Fig.1a) and ii) nanoconfinement induced crystallization of amorphous polymers (Fig.1b). Understanding the influence of hard confining interfaces on the physical and mechanical properties of thermosets is central to the rational design and performance optimization of thermoset resins. Polycyanurate networks (PCNs), which form random networks in the bulk, are representative of an important class of thermosetting materials. We showed that free surfaces of PCNs exhibit rigidity enhanced by one order of magnitude (quantified by Young's modulus) if they are initially synthesized in the presence of hard confining interfaces, such as the pore walls of nanoporous anodic aluminum oxide (AAO). The mechanical properties (i.e. Young's modulus) of single PCNs were tested using Nanointendation Atomic force microscopy measurements. Young's modulus of nanorods were 22 GPa¹. Strikingly, this value is one order of magnitude higher than that of bulk polymer (3.46 GPa)². An impressive increase of the Young's modulus of polymeric nanorods was correlated with interface induced molecular orientation of aromatic groups, taking advantage of carbon-carbon bonds strength.

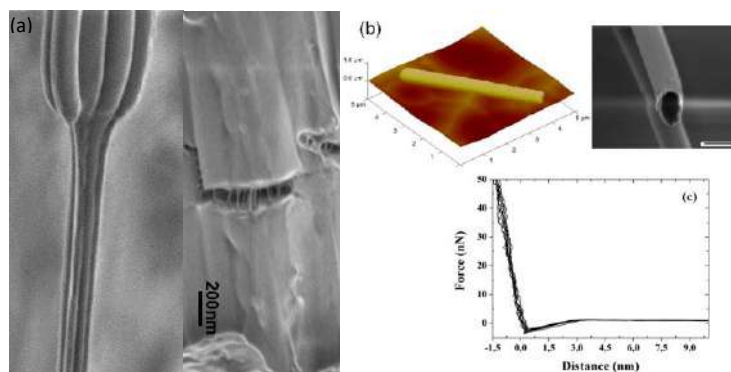


Fig. 1: (a) SEM image of crystalline polymer (b) AFM/SEM images of a single PCN and (c) Force-distance curves performed on PCN during cantilever's approach and retract scans.

References

H. Duran; B. Yameen; M. Geuss; M. Kappl; M. Steinhart and W.Knoll, Enhanced Interfacial Rigidity of 1D Thermoset Nanostructures by Interface-Induced Liquid Crystallinity. *J. Mater Chem. C*, 2013, 1, 7758-7765.

B. Yameen, H. Duran, A. Best, U. Jonas, W. Knoll, Ambient temperature processable thermosets with high thermal, mechanical and hydrolytic stability based on cyanate esters with bisphenol A and bisphenol AF units. *Macromol. Chem. Phys.* 209 (16), 2008

Computational Modeling of Durability Phenomena in Concrete

Mehran Ghasabeh, Serdar Göktepe

Department of Civil Engineering, Middle East Technical University, Ankara, 06800, Turkey

mehran.ghasabeh@metu.edu.tr, sgoktepe@metu.edu.tr

Abstract: In this contribution, coupled constitutive models furnished by robust computational framework are developed to address the durability problems that arise due to the uneven chemical heating through hydration in mass concrete [4] and the non-uniform shrinkage by means of the reduction in relative humidity [5]. In the case of mass concrete structures such as dams, the coupling between the hydration reaction, temperature evolution, and deformation at early ages may lead to cracking. In many hydraulic and building structures, located in a region with high temperature variations between day and night, the humidity diffusion leading to a highly heterogeneous shrinkage strain distribution is observed. The parameters governing shrinkage can be classified in three groups: (i) environmental parameters (relative humidity, temperature, rate of moisture loss, duration of moisture loss), (ii) geometry of the concrete element (surface area to volume ratio, thickness), (iii) cementitious paste parameters (water-cementitious material ratio, amount and composition of the cementitious material, degree of hydration). Hence, the proposed approaches account for the chemo-thermo-mechanical coupling to investigate the cross effects between the evolution of temperature due to hydration and stresses through the deformation in mass concrete for the former problem. While the latter class of problems are tackled by the coupled hygro-thermo-mechanical models incorporating shrinkage-induced stress concentrations either in hardening or hardened concrete within the framework of Reactive Porous Media [1] based on the coupled problem of Darcy-Biot-type fluid transport. These coupled models are further supplemented by the Phase Field models [2], [3] to predict the crack initiation and propagation under the considered coupled effects.

References

- O. Coussy, *Poromechanics* John Wiley & Sons, 2004.
- C. Miehe, F. Welschinger, and M. Hofacker, “Thermodynamically consistent phase-field models of fracture: Variational principles and multi-field fe implementations,” *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 83, no. 10, pp. 1273–1311, 2010.
- J.Y. Wu, “A unified phase-field theory for the mechanics of damage and quasi-brittle failure,” *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 103, pp. 72–99, 2017.
- M. Ghasabeh and S. Göktepe, “Phase-field modeling of thermomechanical cracking in early-age concrete”, to be submitted.
- M. Ghasabeh and S. Göktepe, “Computational prediction of shrinkage-induced cracking in concrete”, to be submitted.

Fiber/Matrix Interface Debonding in Steel-Fiber Composites

Bariş Sabuncuođlu

Mechanical Engineering Department, Hacettepe University,

Beytepe Campus, 06800, Beytepe, Ankara, Turkey

barissabuncuoglu@hacettepe.edu.tr

Abstract: Steel fiber composites have recently become available as a remedy to the low ductile behavior of composites made of conventional fibers such as glass and carbon. Due to the high stiffness contrast between polymer matrix and these steel fibers, they are open to high stress concentrations under transverse loading [1]. The two main failure modes in transverse loading are the crack formation in the matrix and the fiber /matrix debonding. In this study, the latter one was analyzed for steel fibers with a representative volume element and the definition of cohesive surfaces (Fig.1). Initially the behavior was compared with the conventional composite types. Then the effects of the material parameters, the surface coating of steel fibers were investigated. The results revealed the importance of surface coating to prevent the debonding behavior. The cross-section of fibers and the strength of interface were determined to be the major contributors of the early fiber/matrix debonding whereas the stress concentrations do not change this behavior significantly. There was also an interesting result that a slight decrease in the evolution of maximum principle stress was captured as soon as debonding starts.

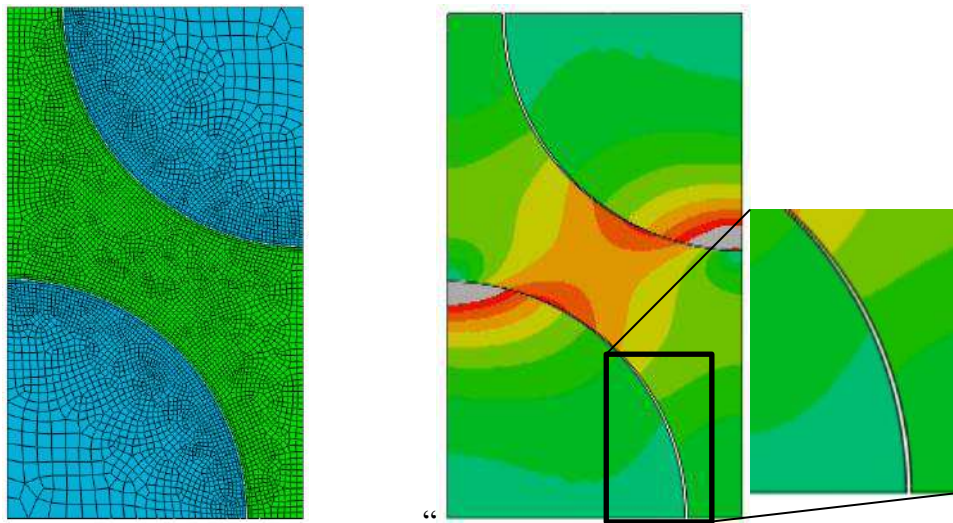


Fig. 1: (a) Finite element mesh of the unit cell; (b) debonding of matrix from fibers.

References

B. Sabuncuođlu, S. Orlova, L. Gorbatikh, S. V. Lomov, and I. Verpoest, "Micro-scale finite element analysis of stress concentrations in steel fiber composites under transverse loading," *Journal of Composite Materials*, vol. 49, pp. 1057-1069, April 1, 2015.

Computation of Macroscopic Response of Multiphase Materials with Planar Interfaces

H. Emre Oktay* Ercan Gürses† Serdar Göktepe††

* Department of Civil Engineering, Middle East Technical University, Çankaya, Ankara, 06800, Turkey

† Department of Aerospace Engineering, Middle East Technical University, Çankaya, Ankara, 06800, Turkey

†† Department of Civil Engineering, Middle East Technical University, Çankaya, Ankara, 06800, Turkey

emre.oktay@metu.edu.tr, gurses@metu.edu.tr, sgoktepe@metu.edu.tr

Abstract: Apparent mechanical properties strongly depend on the structure and morphology of a material, since these regulate the micro-mechanisms that operate during the deformation. Therefore, morphology is an important factor that should be considered in micromechanical models. To this end, a method that could be employed to construct micromechanically based models for different morphologies is proposed. In the proposed method, a geometry representing the microstructure is discretized into arbitrary number of regions where each region is in contact with either one or two regions. Similar to the lamination theory [1], a planar interface lies between two neighboring regions, and deformation gradient field of each region is assumed to be uniform. It is well-known that in rank-1 laminates there exists a single interface where both force equilibrium and deformation continuity are present. In the proposed method, there are multiple interfaces at the same scale, but the force equilibrium and the deformation continuity are not satisfied simultaneously on these interfaces. Instead, one of these physical requirements is replaced with an energetically motivated condition that minimizes an energy expression. However, as the number of regions increases and the consecutive interfaces approach each other, the neglected condition is better satisfied, since the energetically motivated condition approaches to the neglected physically motivated condition. In classical lamination theory, it is well-known that the Hill–Mandel condition is satisfied. In the proposed method, it can be shown by relaxing the force equilibrium or the deformation continuity (or both) that the Hill–Mandel condition is trivially satisfied as well.

Using the proposed method, we model the disk-like spherulite morphology that is observed in thin film samples of semi-crystalline polymers. The disk-like spherulite is composed of alternating amorphous and crystalline phases. The crystal plasticity with orthotropic elasticity and the isotropic 8-chain rubber elasticity constitutive models are employed in the regions that belong to these phases. Results under different deformation modes are compared with a FE model [2] that also models the disk-like spherulite morphology with identical constitutive models and material parameters.

References

Milton, G.W. 2002. The theory of composites. Cambridge, Cambridge University Press.

Oktay, H.E. and Gürses, E. 2015. Modeling of spherulite microstructures in semicrystalline polymers, *Mechanics of Materials*, 90(SI), 83-101.

Static and Fatigue Failure Mechanisms in Curved Composite Laminates

Demirkan Coker

Department of Aerospace Engineering, Middle East Technical University

Ankara, 06800, Turkey

coker@metu.edu.tr

Abstract: Results of an experimental study on the damage progression in curved CFRP composite laminates under static and fatigue loadings are presented in this paper. Two different cross-ply laminate thicknesses are examined with grouped plies to elucidate the failure mechanisms: thick $[0_3/90_3/0_3/90_3/0_3]_s$ and thin $[0_3/90_3/0_3]_s$. A new test fixture is designed to apply moment/axial combined loading to curved specimens and DIC method is used to obtain the strain distribution in the curved region until failure. Our major finding is that under fatigue loading, the failure location and mechanism are different from that under static loading. Fatigue failure is observed to form in the group of 90° plies where the radial stress is maximum whereas static failure is observed to form in the group of 90° plies where the combined radial, tangential and shear stresses attain a maximum value, in the form of Tsai-Wu failure criterion. For fatigue failure, micro-cracks existing in the maximum radial stress location in the group of 90° layers grow under cyclic loading and coalesce into one major matrix crack which reaches the $0/90$ interface gradually to continue as a delamination. On the other hand, static failure initiates inside the group of 90° layers with a dominant crack growing dynamically and jumps to the $0/90$ interface near the arms abruptly with a $40\text{-}50^\circ$ angle to continue as a delamination. With the damage mechanisms in cross-ply cornered laminates identified clearly, design improvements can be suggested for structures using composite curved beams that are more durable and operate for a longer lifetime.

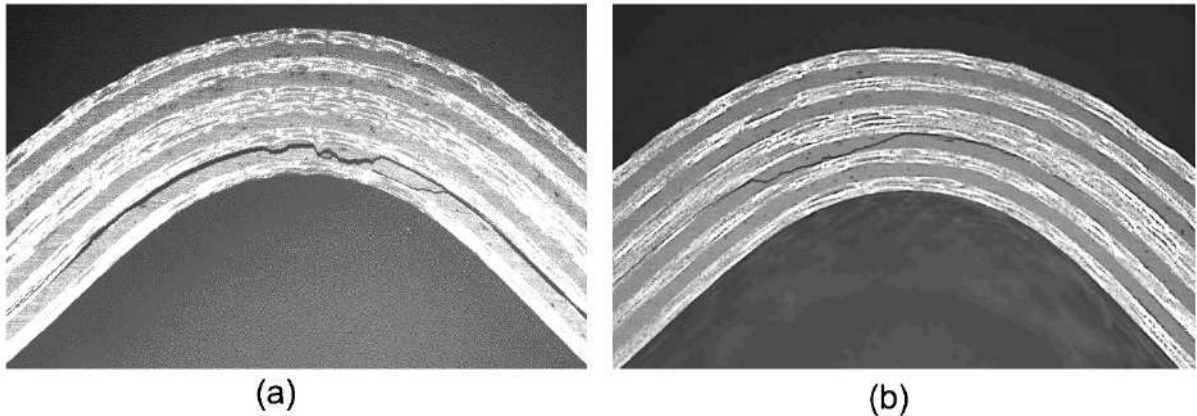


Fig. 1: Micrographs of the curved laminate along the thickness direction showing the failure (a) in the first 90° ply group under static loading, (b) in the second 90° ply group under fatigue loading.

References

Tasdemir, B. and Coker, D., "Comparison of damage mechanisms in curved composite laminates under static and fatigue loading," Submitted to Composite Structures, 2018.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Doç. Dr. CİHAN TEKOĞLU
Proje No:	315M133
Proje Başlığı:	Sünek Metal Plakalarda Çatlak İlerleme Mekanizmalarının Nümerik Ve Deneysel Metotlarla İncelenmesi
Proje Türü:	1001 - Araştırma
Proje Süresi:	30
Araştırmacılar:	
Danışmanlar:	HATİCE DURAN DURMUŞ, KİM LAU NIELSEN (Yurt Dışı)
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ Ü. MÜHENDİSLİK F. MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/05/2016 - 01/11/2018
Onaylanan Bütçe:	376552.0
Harcanan Bütçe:	240464.97
Öz:	<p>Sünek metal plakaların yırtılması esnasında çatlaklar dört farklı şekilde ilerler: i-) eğik (slanted) çatlak, ii-) bardak-kapaklı (cup-cone) çatlak, iii-) bardak-bardaklı (cup-cup) çatlak ve iv-) bu üçünün karışımı. Çatlak ilerleme mekanizması, plakanın geometrisine, malzeme özelliklerine ve yükleme koşullarına göre değişmektedir. Literatürdeki birçok deneysel çalışma, plaka malzemesinin pekleşme kapasitesinin çatlak ilerleme mekanizmasında etkili olduğunu ortaya konmuştur. Yüksek pekleşme kapasitesine sahip metallerde çatlak ilerlemesinden önce oldukça yoğun çatlak ucu boyun vermesi gerçekleşmektedir. Boyun verme bölgesinin merkezindeki gerilme üç eksenliliği, plakanın yan yüzeylerindeki kıyasla oldukça yüksek değerlere ulaşmakta, dolayısıyla çatlak plakanın merkezinde oluşup, bardak-bardaklı olarak ilerlemektedir. Düşük pekleşme kapasitesine sahip metallerde ise, çatlak ucundaki boyun verme düşük düzeylerde kalmakta, plastik deformasyon kesme kuşaklarında yoğunlaşmakta ve çatlak eğik veya bardak-kapaklı olarak ilerlemektedir. Deneysel sonuçları ayrıca, düşük yükleme hızlarında (sanki-statik) bardak-bardaklı ilerlemenin, yüksek hızlarda ise eğik veya bardak-kapaklı ilerlemenin daha etkin bir mekanizma olduğunu ortaya koymuştur. Mevcut literatür, daha ziyade plakaların mekanik/geometrik özellikleri üzerine yoğunlaşmıştır; mikro-yapı/çatlak morfolojisi ilişkisi henüz net bir şekilde ortaya konamamıştır.</p> <p>Bu projenin temel amacı, mikro-yapının çatlak ilerleme mekanizmasına etkilerini ayrıntılı olarak araştırmaktır. Sünek metal ve metal alaşımlarında çatlaklar, temel olarak, büyüklükleri μm mertebesinde olan ikinci faz parçacıkları tarafından peydahlanan boşlukların büyümesi ve birleşmesiyle ilerler. Projenin ana hipotezi, bu parçacıkların/boşlukların sadece oylum oranlarının değil, ortalama büyüklük ve uzaysal dağılımlarının da çatlak ilerleme mekanizmasını etkileyeceğidir. Bu hipotezi test etmek amacıyla, hem nümerik hem deneysel çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalar hipotezi doğrulamış, elde edilen sonuçlar, uzak ve birbirine yakın parçacıkların bardak-bardaklı, büyük ve birbirine yakın parçacıkların ise eğik veya bardak-kapaklı çatlak ilerlemesine yol açtığını göstermiştir. Parçacıkları/boşlukların ortalama büyüklük ve uzaysal dağılımlarının çatlak morfolojisine etkilerinin, orta düzey pekleşme kapasitesine sahip metaller için daha belirgin olduğu sonucuna ulaşılmıştır.</p>
Anahtar Kelimeler:	Kırılma mekaniği, sünek kırılma, Gurson modeli, plastisite teorisi, plaka ve kabuklar.
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır
Projeden Yapılan Yayınlar:	1- Fracture Surface Morphology under Ductile Tearing of Metal Plates (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),