

**Çift Kademeli (Ezilme Kutusu, Konik Deformasyon Bileziği) Enerji
Absorbe Edici Sistem Tasarımı ve İmalatı**

Program Kodu: 1001

Proje No: 115M583

Proje Yürütücüsü:

Prof. Dr. Kenan GENEL

Araştırmacılar:

Yrd. Doç. Dr. Osman Hamdi METE

Yrd. Doç. Dr. Yaşar KAHRAMAN

Bursiyerler:

Arş. Gör. Muhammet YALÇIN

Halil KAYAR

EKİM 2017

SAKARYA

ÖNSÖZ

Araçlarda çarpışma esnasında sürücü ve yolcuların kazadan etkilenmesi pasif koruma amaçlı rol oynayan parçaların çarpışma anında sergiledikleri performansla (ezilme enerjisi) doğrudan ilişkilidir. Bu amaçla kullanılan ince cidarlı ezilme kutularının eksenel yükler altındaki deformasyon davranışı oldukça ilgi çekicidir. Bu yapılarda çarpışma enerjisi, cidarın plastik deformasyonla birbiri üzerine katlanması sırasında harcanmakta ve ideal bir ezilme kutusunda, korunması öngörülen yapıya aşırı kuvvetleri ileilmeksizin enerjyi önemli oranda absorbe etmesi beklenir. Buna ek olarak, deformasyonun kontrollü bir şekilde gerçekleşmesi ve de yapının basit, düşük maliyetli, hafif, küçük hacimli ve değişimi kolay olması da diğer önemli noktaları oluşturmaktadır.

Bu proje kapsamında, iki kademededen oluşan, yüksek enerji absorbe etme kabiliyetine sahip bir yapının tasarım ve imalatına çalışılmıştır. Farklı takviye unsurlarından yararlanılan ezilme kutusu ile radyal plastik deformasyon kabiliyetinden yararlanılan konik deformasyon bileziğinin birlikte çalıştırılması sayesinde absorbe edilen enerji değerinde ciddi oranda iyileştirmelerin sağlanabileceği belirlenmiştir. TÜBİTAK Mühendislik Araştırma Destek Grubu (MAG) tarafından 115M583 numaraya 01/09/2015 ile 01/09/2017 tarihleri arasında 24 ay süre ile desteklenmiş olan proje çalışmalarından elde edilen sonuçlar, yapılacak yeni araştırma ve geliştirme çalışmalarına hız kazandıracak olmasından dolayı, başta TÜBİTAK olmak üzere bu projeye katkı sağlayan herkese teşekkürü bir borç biliriz.

Prof. Dr. Kenan GENEL, Yrd. Doç. Dr. O. Hamdi METE, Yaşar KAHRAMAN, Arş. Gör. Muhammed YALÇIN, Müh. Halil KAYAR

İÇİNDEKİLER

Önsöz.....	ii
İçindekiler.....	iii
Tablo Listesi.....	v
Şekil Listesi.....	vi
Özet.....	xii
Abstract.....	xiii
1. Giriş.....	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 Amaç ve Kapsam.....	5
2. Ezilme Kutusu Tasarımı ve İmalatı.....	8
2.1 Ezilme Kutusu, Deformasyon Bileziği, Takviye Elemanlarının Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi ve Deneylerde Kullanılan Test Düzenekleri.....	9
3. Ezilme Kutusu Modellerinin Ezilme Durumlarının Deneysel Olarak İncelenmesi.....	16
3.1 Takviyesiz ve Herhangi Bir Ezme İşlemi Uygulanmamış Bir Tüp Yapının Temel Katlanma Davranışının İncelenmesi.....	16
3.1.1 Farklı Ölçü ve Sertlikte Tüplerin Deneyleri.....	20
3.2 Farklı Ezilme Kutusu Tasarımlarına Ait Numunelerin Katlanma Davranışının İncelenmesi... 23	
3.2.1 Çevresel Ezme İşlemi Uygulanmış Numuneler.....	24
3.2.2 İçeriden (PVC Köpük) Takviyeli Numuneler.....	34
3.2.3 Dışarıdan Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Numuneler.....	48
3.2.4 Çoklu Takviye Edilmiş Numuneler.....	52
4. Sonlu Elemanlar Çalışmaları.....	63
4.1 Alüminyum Tüplerin SE Analizleri.....	65
4.1.1 Solid Model Analizi.....	66
4.1.2 Shell Model Analizi.....	70
4.2 Alüminyum Tüplerin SE Analizlerinin Doğrulanması.....	73
4.3 Çevresel Ezme İşlemi Uygulanmış Numunelerin SE Analizi.....	78
4.4 İçeriden (Pvc Köpük) Takviyeli Numunelerin SE Analizi.....	90
5. Deformasyon Bileziği Tasarımı ve İmalatı.....	96
5.1 Deformasyon Bileziği Malzemelerinin Mekanik Özellikleri.....	96

5.2 Deformasyon Bileziği Modellerinin SE alışmaları.....	98
5.2.1 SE Analizine Ait Model.....	98
5.3 Deformasyon Bileziği Modellerinin Deneysel alışmaları.....	107
5.4 Deformasyon Bileziğinin Se Analizlerinin Doğrulanması.....	110
6. Ezilme Kutusu Ve Deformasyon Bileziğinin Birlikte Test Edilmesi.....	125
6.1 Deneysel alışma.....	125
6.2 SE Analiz alışmaları.....	129
7. Genel Sonuçlar Ve neriler.....	133
Referanslar.....	135

Tablo Listesi

Tablo 1 Tüp malzemesinin akma dayanımı, sertlik, geometrik büyüklükleri ve katlanma durumu ve F_{ort} , F_{maks} değerleri.....	21
Tablo 2 Sabit yoğunluklu, fonksiyonel dereceli ve sandviç yapılı köpük takviyesi için katman kalınlıkları ve deney sonucu edilen enerji değerleri (D=40, t=1, L=80 mm).....	39
Tablo 3 Sabit yoğunluklu, fonksiyonel derecelendirilmiş ve sandviç yapılı köpük takviyesi için katman kalınlıkları ve deney sonucu edilen enerji değerleri (58 mm, t=1,5 mm).....	43
Tablo 4 Ezilme kutusu tasarımları için elde edilen karşılaştırma kombinasyonları.....	60
Tablo 5 Deneysel sonuçlarla Shell ve Solid model sonuçlarının kuvvet ve katlanma sayısı açısından karşılaştırılması.....	74
Tablo 6 D=40 mm olan tüp için deneysel olarak ve her iki modele göre analiz sonuçlarından elde edilen katlanma boyu (deformasyon sonrası kat genişliği) mesafeleri.....	75
Tablo 7 Ezme işlemi uygulanmış numunelerin katlanma davranışına ait büyüklükler.....	84
Tablo 8 Malzeme ve geometri özellikleri.....	105
Tablo 9 Analiz sonuçları içerisinde çalışma şartları için uygun olduğu kabul edilen başlıca kombinasyonlar.....	106

Şekil Listesi

Şekil 1 Ezilme kutusu, (a) konstrüksiyondaki yeri (b) çarpışma sonrası oluşan deformasyon.....	2
Şekil 2 (a) Numune sıkıştırma aparatı 40 mm ve üstü çaplar için (b) Numunenin çenelere yerleştirilmesi.....	9
Şekil 3 Malzeme özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan Instron çekme cihazı.....	10
Şekil 4 (a) D= 40 (t=1 mm) (b) 58 (t=1,5mm) çaplı 6063 boru için elde edilen çekme eğrileri.....	10
Şekil 5 Deneylerde kullanılan farklı yoğunluktaki PVC köpük 60,80 ve 100 kg/m ³	11
Şekil 6 Farklı yoğunluktaki PVC köpük malzemelerin basma deney sonucuna ait eğrileri.....	12
Şekil 7 Şekil 7. (a) Dokuma cam ve (b) karbon elyaf kumaştan üretilen kompozit çekme numuneleri.....	12
Şekil 8 Şekil 8. (a) Dokuma cam ve (b) karbon elyaf kumaş takviyeli kompozit numunelerin çekme verileri.....	13
Şekil 9 Miktar ve konumu ayarlanabilen çevresel ezme cihazı.	14
Şekil 10 Bilgisayar kontrollü hidrolik pres (25 ton kapasiteli)	14
Şekil 11 Ağırlık-düşürme darbe test cihazı.....	15
Şekil 12 Bir grup pilot deneye ait kuvvet-deplasman eğrileri (D=40, t=1, L=80 mm)	17
Şekil 13 Kuvvet-deplasman grafiği üzerinde tüp deformasyon durumunun eşleştirilerek gösterilmesi.....	19
Şekil 14 (a) Katlanma ve plastik mafsall oluşumu (b) kat genişliğinin hesaplanması (D=40, t=1 mm)	20
Şekil 15 Farklı sertlik ve çaplardaki numunelerin aksenal basma zorlanması altındaki davranışı	22
Şekil 16 Deneylerde gözlenen deformasyon modları.....	22
Şekil 17 Elmas modda deforme olmuş bir numunenin üst görüntüsü (D=48, t=1, L=106 mm)....	23
Şekil 18 Numune üzerinde yukarıdan aşağıya ezme sıklığı artırılmış ve eş aralıklı ezilmiş (ezmeler arası mesafe 10 mm) numunelerin örnek görüntüsü. Çap (D)= 58 mm, cidar kalınlığı (t): 1,5 mm, ezme miktarı yaklaşık 0,50 mm.....	24
Şekil 19 Çapı 58 mm olan tüpte çevresel ezme işlem kademesi.....	25
Şekil 20 0,25 mm ezme miktarı için eşit mesafeli ve azalan aralıklı ezme işlemi uygulanmış numunelerin kuvvet-deplasman grafikleri.....	26
Şekil 21 0,5 mm ezme miktarı için eşit mesafeli ve azalan aralıklı ezme işlemi uygulanmış numunelerin kuvvet-deplasman grafikleri.....	29
Şekil 22 0,25 mm ezme miktarı ve eşit aralıklı ezme durumu için deformasyon davranışı.....	30

Şekil 23 0,25 mm ezme miktarı ve azalan aralıklı ezme durumu için deformasyon davranışı.....	31
Şekil 24 0,50 mm ezme miktarı ve eşit aralıklı ezme durumu için deformasyon davranışı.....	32
Şekil 25 0,5 mm ezme miktarı ve azalan aralıklı ezme durumu için deformasyon davranışı.....	33
Şekil 26 0,25 mm ezme derinliğine sahip tüpe ait kuvvet-deplasman grafiği.....	34
Şekil 27 Farklı yoğunluktaki PVC köpük ile takviye edilen numunelerin kuvvet-deplasman grafiği	35
Şekil 28 Farklı yoğunluktaki PVC köpük ile takviye edilen numunelerin deney sonrası görünümü	36
Şekil 29 (a-b) 60 ve (c) 100 kg/m ³ yoğunluktaki PVC köpük ile içeriden takviye edilen numunelerin deney sonrası kesit görünümü.....	36
Şekil 30 (a) Fonksiyonel derecelendirilmiş, (b) ve (c) sandviç yapıllı köpük takviyeli tüplerin kuvvet- deplasman grafiği.....	37
Şekil 31 Farklı yoğunluktaki PVC köpük ile takviye edilen numunelerin kuvvet-deplasman grafiği	41
Şekil 32 (a) Fonksiyonel derecelendirilmiş, (b) ve (c) sandviç yapıllı köpük takviyeli tüplerin kuvvet- deplasman grafiği. Not: tüm enerji değerleri 6 kat adedi için belirlenmiştir.....	41
Şekil 33 10 numaralı kombinasyona ait (30/40/30) köpüklerin (a) kuvvet-deplasman grafiği (b) deney sırasında köpüğün deformasyon görüntüsü.....	45
Şekil 34 Köpük katman geçişlerindeki şekil değişimi. (a) deney sırasında yük altında (b) yük kaldırıldıktan sonra.....	45
Şekil 35 PVC köpükle birlikte kauçuğun kullanıldığı numunelerin görünümü.....	46
Şekil 36 PVC köpük ve kauçuk tabakanın eş ve azalan aralıklarla yerleştirildiği numunelerin deney sonrası görünümü.....	47
Şekil 37 PVC köpük ve kauçuk tabakanın (a) eş, (b) azalan aralıklarla yerleştirildiği numunelerin deney sonrası görünümü.....	47
Şekil 38 (a) D=58 mm (t=1,5 mm) tüp, 2 ve 4 kat cam elyaf takviyeli (b) D=59 mm (t=2 mm) olan boş ve 2 kat elyaf cam elyaf takviyeli numunelerin kuvvet eğrileri.....	48
Şekil 39 Dışarıdan cam elyaf takviye edilmiş kompozit numunenin yük altında ara yüzeyde hasar oluşumu (gerilme beyazlığı-stress whitening).....	49
Şekil 40 Özdeş iki numunede dışarıdan yapılan takviyenin katlanma moduna olan etkisi.....	50
Şekil 41 2 ve 3 kat karbon elyaf sarılmış alüminyum tüpler.....	51
Şekil 42 2 ve 3 kat karbon elyaf sarılmış alüminyum tüplerin kuvvet-deplasman grafikleri.....	51
Şekil 43 2 ve 3 kat karbon elyaf sarılmış alüminyum tüplerin deney sonrası görüntüleri.....	52

Şekil 44 Dışarıdan takviye edilmiş tüpün kuvvet-deplasman grafikleri.....	53
Şekil 45 (a) orijinal tüp (b) ilk katlanma başlangıç kuvvetini düşürmede tetikleme amaçlı uygulanan şekil verme.....	53
Şekil 46 İçeriden ve dışarıdan (cam elyaf) takviye edilmiş, tetikleyici ve tetiklemenin bulunmadığı numunelere ait kuvvet-deplasman grafikleri.....	55
Şekil 47 Takviyeli numunelerin deney sonrası görüntüleri. (a) dışarıdan takviyeli numune tetikleme yok b) dışarıdan takviyeli numune tetikleme var c) dışarıdan ve içeriden takviyeli numune tetikleme yok, d) dışarıdan ve içeriden takviyeli numune tetikleme var.....	56
Şekil 48 Cidarına 10 mm eşit aralıkla ezme işlemi uygulanmış, içeriden ve dışarıdan (cam elyaf) takviyeli, tetikleyici ve tetiklemenin bulunmadığı numunelere ait kuvvet-deplasman grafikleri.....	57
Şekil 49 Cidarına 10 mm eşit aralıkla ezme işlemi uygulanmış, içeriden ve dışarıdan (karbon elyaf) takviyeli, tetikleyici bulunan numuneye ait kuvvet-deplasman grafiği.....	58
Şekil 50 Karbon elyaf sarılı numunelerin deney öncesi ve sonrası görüntüleri.....	59
Şekil 51 Cidar ezme işlemi uygulanmış, takviyeli numunelerin deney sonrası görüntüleri (a) dışarıdan takviyeli numune tetikleme yok b) dışarıdan takviyeli numune tetikleme var, c) dışarıdan ve içeriden takviyeli numune tetikleme yok, d) dışarıdan ve içeriden takviyeli numune tetikleme var.....	61
Şekil 52 a) takviyesiz numune, b) içeriden en iyi performansı veren sıralı PVC köpük takviyeli numune, c) dışarıdan cam elyaf takviyeli numune, d) dışarıdan cam elyaf ve içeriden en iyi performansı veren sıralı PVC köpük takviyeli numune.....	62
Şekil 53 a) Deneysel düzeneği b) matematiksel modeli c) hazırlanan sonlu eleman modeli.....	63
Şekil 54 Üst tablanın hız-zaman grafiği.....	64
Şekil 55. Alüminyum tüpün (a) Shell, (b) Solid yapısının sonlu eleman ağ yapı görüntüsü.....	65
Şekil 56 D=40 mm, t=1 mm olan numunenin Solid model için elde edilen kuvvet-deplasman grafiği.....	66
Şekil 57 Numunede tüm deplasmanlar için gerçekleşen şekil değişimi, kuvvet-deplasman grafiğinde karşılık gelen noktalarıyla birlikte verilmiştir.....	68
Şekil 58 Tüpün aksenal kuvvet altındaki kat oluşum safhası.....	69
Şekil 59 Tüpün aksenal kuvvet altındaki kat oluşum safhası.....	69
Şekil 60 Shell model kullanılarak, D=40 mm, t=1 mm olan numune için elde edilen kuvvet-deplasman grafiği.....	70
Şekil 61 Shell Numunede tüm deplasmanlar için gerçekleşen şekil değişimi, kuvvet-deplasman grafiğinde karşılık gelen noktalarıyla birlikte verilmiştir.....	71

Şekil 62 Tüpün Eksenel kuvvet altındaki kat oluşum safhası.....	72
Şekil 63 (a) Tüpün katlanma bölgesinde katların iç ve dış yüzeyleri arasındaki çap değerleri (b) Shell numunenin kalınlık konturu.....	72
Şekil 64 (a) Solid model SE analizi-deney kuvvet-deplasman grafiği (b) Shell model SE analizi-deney kuvvet-deplasman grafiği.....	73
Şekil 65 Tüpün katlanması sırasında cidarda dışa burkulmanın meydana geldiği noktaların belirlenmesi.....	74
Şekil 66 40 mm çaplı ($t=1$ mm) ölçülerinde tüpte (a) deney sonrası kesiti alınan (b) solid modelin (c) Shell modelin kullanıldığı analiz sonucunu elde edilen numunenin kesit görünümü.....	75
Şekil 67 Takviyesiz tüp yapının deney ve SE analiz sonuçları, (kuvvet-deplasman grafiği).....	77
Şekil 68 Ezme işlemine ait (a) şematik (b) sonlu eleman modeline ait görünüm.....	78
Şekil 69 (a) serbest burkulma boyunun katlanma olan etkisinin incelendiği numune (b) farklı boyda serbest bölgeli numune ölçüleri.....	79
Şekil 70 Cidarında 0,2 mm derinlikte ezme işleminin gerçekleştirilen numunede plastik birim şekil değişimi dağılımı.....	79
Şekil 71 Farklı burkulma serbest boyuna sahip numunelerde katlanma davranışı.....	80
Şekil 72 Burkulma serbest boyunun ilk katlanma kuvveti (F_{maks}) üzerine olan etkisi.....	81
Şekil 73 Burkulma serbest boyunun ikinci katlanma başlangıç kuvveti ve deplasmanına olan etkisi.....	82
Şekil 74 (a) Serbest burkulma boyunun tüp yapının iç ve dış yönde katlanmasına etkisi (b) 20 mm serbest burkulma boyuna sahip numunede katlanma safhaları (c) iç ve dışa doğru katlanma yüzdesi hesabında kullanılan büyüklüklerin belirlenmesi.....	83
Şekil 75 Bir numunenin farklı serbest burkulma boylarına sahip olması halinde katlanma sırası (Burkulma boyu sayısı: bir tane 20 mm, bir tane 16 mm, bir tane 12 mm ve bir tane 10 mm)...	85
Şekil 76 Farklı serbest burkulma boylarında cidar ezme işleminin tüp yapının kuvvet-deplasman grafiğine etkisi.....	87
Şekil 77 Serbest burkulma boyu (a) 10 ve (b) 20 mm olacak şekilde cidarı dıştan ezilen numunelerin deneye ve analize ait görüntüleri.....	88
Şekil 78 Serbest burkulma boyu 10 ve 20 mm olacak şekilde cidarı dıştan ezilen numunelere ait deneysel olarak elde edilen kuvvet-deplasman grafikleri.....	89
Şekil 79 Cidarı ezilmiş takviyesiz tüp yapının ezilme sonrası görüntüsü (a) deneysel (b) analiz sonucu.....	90
Şekil 80. SE analizine ait tam model ve kesit görüntüsü.....	91

Şekil 81. (a) 60 kg/m ³ , (b) 80 kg/m ³ ve (c) 100 kg/m ³ yoğunluklarına sahip PVC köpüklerin SE yöntemiyle elde edilmiş basma analiz eğrileri.....	91
Şekil 82. (a) 60 kg/m ³ , (b) 80 kg/m ³ ve (c) 100 kg/m ³ yoğunluğa sahip köpüklerle takviye edilmiş alüminyum tüplerin kuvvet-deplasman grafikleri.....	93
Şekil 83. Alüminyum tüp içerisindeki PVC köpüğün aksenal kuvvet altında sergilediği deformasyon davranışı.....	95
Şekil 84 Deformasyon bileziği ve muylu (1045) için kullanılan çeliklerin çekme eğrileri.....	97
Şekil 85 (a) öngörülen iki kademeli enerji absorbe edici yapının şematik görünümü (b) konik parça ve bilezik yapıya ait katı model (a'da "K" ve "D" ile gösterilen parçalar.....	98
Şekil 86 (a) Modeli oluşturan yapının mesh yapısı. 20 mm deplasman değeri için konik kovandaki (b) eşdeğer gerilme (Von Mises) (c) en büyük asal gerilme dağılımı.....	100
Şekil 87 Çeliklerin analizlerde kullanılan çekme eğrileri.....	101
Şekil 88 Reaksiyon kuvveti ve enerjinin, deplasmanla değişimi.....	102
Şekil 89 Reaksiyon kuvveti ve deplasman değerinin koniklik açısıyla değişimi.....	103
Şekil 90 Deformasyon bileziği-konik yapı (katı model) ve analizlerde kullanılan parametrelerin gösterimi. D : bilezik dış çap, d : bilezik iç çapı, t_b : bilezik kalınlığı, b : bilezik genişliği θ : koniklik açısı.....	104
Şekil 91 Tasarıma ait SE modeli ve sınır şartları.....	105
Şekil 92 Makine imalat çeliğine ait çekme eğrisi.....	106
Şekil 93 Deformasyon bileziği deney düzeneği.....	107
Şekil 94 $b=6$ ve 10 mm genişliğinde 60/40 ölçülerindeki deformasyon bileziklerine ait kuvvet-deplasman grafiği.....	108
Şekil 95 (a) Deney sırasında hasarlanmış deformasyon bileziği (b) iki farklı genişlikteki hasarlanan bileziklerin görünümü.....	110
Şekil 96 6 ve 10 mm genişliğinde 60/40 ölçülerindeki deformasyon bileziği için deneysel ve analiz sonuçlarından elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri.....	111
Şekil 97 Kuvvet deplasman grafiği üzerinde belirli deplasmanlar için deformasyon bileziğinde oluşan eşdeğer gerilme (Von Mises) dağılımı. Çeliğin akma sınırı 360 MPa. Deplasman değerleri, 1: 1,5, 2: 15 mm, 3: 30 mm, 4: 40 mm.....	112
Şekil 98 Deformasyon bileziğine ait en büyük asal gerilme dağılımı. Deplasman değeri (a) 4,2 mm, (b) 6,2 mm ve (c) 11 mm.....	113
Şekil 99 1,5 derece konik açılı 60/40 mm ölçülerinde 10S20 çeliği ile gerçekleştirilen deneye ait kuvvet-deplasman grafiği.....	114

Şekil 100 Farklı genişlikteki 1,5 derece konik açılı 60/40 ölçülerindeki 10S20 çeliğinden işlenmiş deformasyon bileziği için analiz sonuçlarından elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri.....	115
Şekil 101 S355 (St 52-3) çeliğinden işlenmiş 1,5 derece koniklikte farklı genişlikteki 60/40 ölçülerinde, bileziklerin deney sonuçlarına ait kuvvet-deplasman grafikleri.....	116
Şekil 102 Paslanmaz çelikten işlenmiş konikliği 1,5 derece olan farklı genişlikteki 60/40 ölçülerinde, deformasyon bileziklerine ait kuvvet-deplasman grafiği (yağlayıcı: makine yağı)....	117
Şekil 103 Paslanmaz çelikten işlenmiş konikliği 1,5 derece olan farklı genişlikteki 60/40 ölçülerinde (b=8 mm), deformasyon bileziklerine ait kuvvet-deplasman grafiği (yağlayıcı: gres).....	118
Şekil 104 Bilezik iç yüzeyinin (a) deney öncesi ve (b) sonrası görünümü.....	119
Şekil 105 Paslanmaz çelikten işlenmiş konikliği 1,5 derece olan farklı genişlikteki 60/40 (b=8 mm) ölçülerinde, deformasyon bileziklerine ait kuvvet-deplasman grafiği (yağlayıcı: gres).....	120
Şekil 106 Bilezik kesitinde plastik birim şekil değişiminin deplasmana bağlı olarak değişimi.....	121
Şekil 107 Bilezik kesitinde Von-Mises gerilmesinin deplasmana bağlı olarak değişimi.....	121
Şekil 108 Paslanmaz çeliğin akma eğrisi.....	122
Şekil 109 Bilezik kesitinde asal gerilmelerin deplasmana bağlı olarak değişimi.....	122
Şekil 110 (a) 100 mm deplasman için şekil değiştirmiş bileziğin iç kısmındaki sertliğin mesafe ile değişimi, (b) plastik şekil değiştirmiş bilezik üzerinde sertlik ölçüm yeri ve doğrultusu.....	123
Şekil 111 Yarı-statik deney öncesinde ezilme kutusu ve deformasyon bileziğinin görünümü....	126
Şekil 112 Yarı-statik deney sonrasında ezilme kutusu ve deformasyon bileziğinin hasarlanmış görüntüsü.....	126
Şekil 113 İki farklı ezilme kutusunun deformasyon bileziğiyle birlikte test edilmesi sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman grafiği.....	127
Şekil 114 Ezilme kutusu ve deformasyon bileziğinin ağırlık-düşürme darbe test cihazında deney öncesi görüntüsü.....	128
Şekil 115 Ezilme kutusu ve deformasyon bileziğinin deney sonrası görüntüsü.....	129
Şekil 116. Ezilme kutusu ve deformasyon bileziğinin SE model görünüm.....	130
Şekil 117. SE analizinde kullanılan modelin (a) analiz öncesinde, (b) ezilme kutusunun deformasyonun sonlandığı ve (c) bileziğin deformasyonunun sonlandığı aşamalara ait görüntü.....	131
Şekil 118. SE modeline kuvvet-deplasman eğrisi.....	131

Çift Kademeli (Ezilme Kutusu, Konik Deformasyon Bileziği) Enerji Absorbe Edici Sistem Tasarımı ve İmalatı

ÖZET

Bilindiği gibi, araçlarda pasif koruma elemanlarının kaza esnasında ortaya çıkan çarpışma enerjisini absorbe ederek araç ana gövdesinin hasara uğramasını önlenmesi ya da hasar seviyesinin minimize edilmesi amaçlanmaktadır. Bu çalışmada, ezilme kutusu ve konik deformasyon bileziğinden oluşan iki kademeli bir yapının tasarımı ve imalatı üzerine çalışmalar yürütülmüştür. 6063 alüminyum alaşımı ezilme kutusunun cidarda çevresel ezme işlemine ek olarak, içeriden ve dışarıdan takviye edilerek deformasyon esnasında enerji absorbe etme kabiliyeti arttırılmaya çalışılmıştır. Çarpışma enerjisinin bilezikte plastik şekil değişimine harcadığı konik deformasyon bileziğinde ise konik muylu ve bilezik yapısının tasarım ve imalatı gerçekleştirilmiştir. İki kademeli sistemle ilgili yapılan 330 adeti aşkın deneyden, ezilme kutusu için özgül enerji absorbe değeri dikkate alınarak elde edilen en iyi kombinasyonla, 4330-4370 J aralığında değişen bir enerji değeri ile proje hedefleri aşılmıştır. Belirtilen takviye modellerinden çevresel ezmenin, malzeme bünyesinde mikro çatlığa yol açmayacak şekilde uygulanması, içeriden yapılacak köpük takviyesinin köpük yoğunluğu dikkate alınarak oluşturulan sandviç modelde olması ve son olarak dışarıdan karbon elyaf takviyesi uygulanması maksimum özgül enerji absorbe etme kabiliyeti açısından kritik bir öneme sahiptir. Deformasyon bileziğinin 60-65 kN mertebelerinde harekete geçmesi ve kuvvetin 68-70 kN bandını aşmaması temel kısıtları oluşturmuş, bu çerçevede farklı malzeme ve farklı geometrik ölçülerde üretimi kolay deformasyon bileziği tasarımına gidilmiştir. Yapılan deneysel ve sonlu eleman çalışmaları neticesinde 304 kalite paslanmaz çelik ile hedeflenen enerjinin parçada kırılma veya çatlama yolu açmaksızın alt proje hedefi olan 2660 J değeri 60 mm deplasmanda 3000 J olarak elde edilmiştir. Tasarımı yapılan bileziğin 100 mm deplasmana zorlanması durumunda absorbe edilen enerji yaklaşık 5600 J değerine ulaşmaktadır. 125 mm uzunluğundaki ezilme kutusunun ve çakılmış bileziğin kullanıldığı deneylerde ise enerji değeri 8975-10010 J arasında değiştiği tespit edilmiştir. Ağırlık-düşürme darbe test cihazıyla yapılan deneylerden de önerilen iki kademeli yapının uyumlu bir şekilde çalıştığı çarpışma enerjisinin ezilme kutusu ve deformasyon bileziği tarafından başarılı bir şekilde absorbe edildiğini gözlenmiştir.

Design and Manufacturing of Two-Stage (Crash Box and Conical Deformation Ring) Energy Absorption System

ABSTRACT

It is known that passive protection elements in vehicles are intended to absorb crash energy generated during an accident so as to prevent or minimise damage to the vehicle body. In this study, studies were carried out on the design and manufacture of a two-stage structure consisting of crushing box and conical deformation ring. In addition to annular rolling of 6063 aluminium alloy tube, it has been tried to increase its ability to absorb energy during deformation by reinforcing it from inside and outside. In the conical deformation ring, where the collision energy is spent on the plastic deformation of the ring, the design and manufacture of the conical pin and ring structures have been realized. From the over 330 tests carried out on the crusher box, the project targets were overcome with a changing energy value in the range of 4330 J - 4370 J with the best combination obtained by considering the specific energy absorption value. The application of the annular rolling process mentioned above must be done in a such a way that does not lead to micro crack in the material wall has a critical prescription. Also; in foam reinforcement, sandwich model formed by considering the foam density and order are critical items in inner reinforcement. Finally in order to maximize the ability to absorb maximum specific energy by applying fiber reinforcement, carbon fiber usage is appropriate choice. Starting movement of deformation ring in 60-65 kN range and force value not exceeding the 68-70 kN band are the basic constraints. In this circumference, design of the deformation rings were made with different materials and as well as geometric dimensions. As a result of the experimental and finite element studies, project target of 2660 J can be exceeded as 3000 J by using 304 grade stainless steel without breaking or cracking for 60 mm of displacement. If the designed ring is forced to displace 100 mm, the energy absorbed reaches about 5600 J. From the experiments using a 125 mm crusher box, it was found that energy value changed between in the range 8975 and 10010 J. It has been observed from the weight-drop impact tests that these (two-stage- crush box and the deformation ring) structures worked compatibly and they can successfully absorb impact energy.

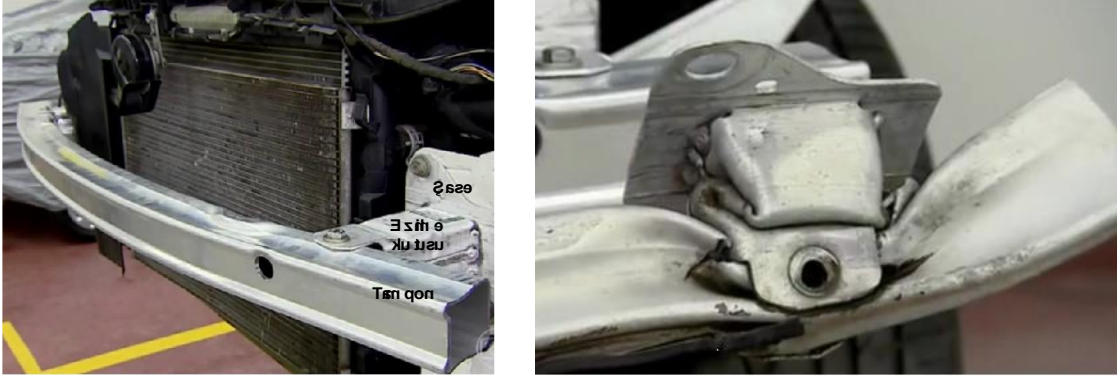
1. GİRİŞ

Kazalarda sürücü ve yolcuların can güvenliğinin sağlanması amacıyla, gelişen teknolojiyle paralel olarak çeşitli önlemler geliştirilmiştir. Bunlar, özellikle can güvenliğini sağlamak üzere tasarlanmış aktif güvenlik elemanları (hava yastığı, emniyet kemeri gibi) ve hem can güvenliği hem de aracın hasarlanmasını engellemek için tasarlanmış pasif güvenlik elemanları (ezilme kutusu, tampon gibi) olmak üzere iki ana grupta incelenmektedir. Pasif koruma elemanlarından olan ezilme kutuları, kaza esnasında ortaya çıkan çarpışma enerjisini absorbe ederek araç ana gövdesinin hasara uğramasını önlenmesi ya da seviyesinin minimize edilmesini sağlamaktadır. Ezilme kutuları çarpışma sırasında kendi cidarı üzerinde katlanarak deforme olmakta ve bu sayede çarpışma enerjisini absorbe etmektedir. Bu yapılar çoğu zaman takviye edilerek enerji değerleri arttırılmaya çalışılır. Bu çalışmada farklı takviye yöntemleri ile enerji absorbe etme kabiliyetinin arttırılmış ezilme kutusuna ilave ikinci kademe olarak kullanılacak deformasyon bileziği ile daha yüksek hızlarda meydana gelebilecek çarpışmaların minimum hasar ile atlatılmasını sağlayacak, enerji absorbe etme kabiliyeti yüksek iki kademeli bir sistem önerilmiştir.

1.1 Literatür Özeti

Bilindiği gibi kazalarda sürücü ve yolcuların güvenliğinin sağlanması birinci öncelikte yer almakta ve sürekli detaylandırılan uluslararası çarpışma testleriyle de konunun önemi gün geçtikçe artmaktadır. Hayati kayıpların ve/veya yaralanmaların minimize edilmesinde pasif koruma amaçlı rol oynayan parçaların (ezilme kutusu-crash box, tampon, b-pillar v.b.) çarpışma anında sergiledikleri performans (absorbe edilen ezilme enerjisi) oldukça önemlidir. Ezilme kutuları pasif koruma amaçlı kullanılan yapılardan birisi olup, absorbe edilen enerji, parçanın geometrik özelliklerinin yanı sıra kullanılan malzeme özellikleriyle doğrudan ilişkilidir (Şekil 1a). Çarpışma esnasında korunması gereken yapıya en düşük oranda kuvvetin iletilmesi için, çarpışma enerjisinin ezilme kutusunda absorbe edilmesi esastır. Dolayısıyla absorbe edilen enerji değerini arttırıcı yönde etkiye sahip özel imalat yöntemi, özel tasarım ya da yeni bir teknolojik uygulama araca ait yaşam güvenliğini doğrudan katkı sunacaktır. Dairesel ya da prizmatik geometriye sahip ezilme kutularında enerji absorbe etme verimliliğini arttırmak amacıyla genelde ince cidarlı

parçalardan yararlanılmaktadır. Bu parçaların (ince cidarlı yapıların) aksenal yükler altındaki deformasyon davranışı oldukça ilgi çekici olup, çarpışma enerjisi cidarın düzgün bir şekilde birbiri üstüne katlanması sırasında harcanmaktadır (Şekil 1b).



Şekil 1. Ezilme kutusu, (a) konstrüksiyondaki yeri (b) çarpışma sonrası oluşan deformasyon

İdeal bir ezilme kutusunda aşağıdaki özellikler beklenmektedir;

- Çarpışma sırasında korunması öngörülen yapıya aşırı kuvvetlerin iletilmemesi için, ezilme kutusu için gerekli deformasyon kuvvetlerinin çok yüksek olmamalıdır.
- Ezilme esnasında absorbe edilen toplam enerjinin, ezilme deplasman değerine oranlanmasıyla belirlenen **ortalama ezilme kuvvetinin (OEK)** başlangıçta nispeten düşük, ancak deplasmanla uygun bir hızda artan karakterde olmalıdır.
- Deformasyonun kontrollü bir şekilde gerçekleştiği bir yapı tasarlanmalıdır.
- Yapı basit, düşük maliyetli, hafif, küçük hacimli ve değişimi kolay olmalıdır.

Otomotiv sektöründeki çarpışmaya karşı emniyet istemlerine bağlı olarak, metalik ve kompozit parçaların aksenal zorlanma altındaki enerji absorbe etme davranışı araştırmacıların dikkatine çekmekte ve artan ilgiyle birlikte üzerinde en çok çalışan konular arasına girmiştir. Ezilme kutularının görevi her ne kadar araçların düşük hızla (15 km/h) statik durumdaki rijit bir engele çarpışması hali için koruma sağlamak olsa da, araç güvenliği değerlendirme kuruluşlarının (NCAP) yayınladığı raporlardan ezilme kutularının halen geliştirilmeye ihtiyacı olduğu anlaşılmaktadır. Literatürde farklı geometri ve malzeme bileşenleri için ezilme davranışının incelendiği çalışmaların sayısı 2.600 adet üzerinde olup, bunların sadece 540 tanesi son üç yılda yayınlanmıştır.

İnce cidarlı yapıların kullanıldığı ezilme kutularında, parçanın enerji absorbe etme kapasitesi temel olarak tüp geometrisi ve ebatları, şekli ve yükleme türüne ait parametrelerle doğrudan ilişkilidir [1-4]. T.Wierzbicki ve W. Abramowicz yaptıkları çalışmalarda, dairesel kesitli, kare kesitli ve çok köşeli ince cidarlı yapıların aksenal zorlanma altındaki kuvvet ve absorbe edilen enerji değerlerindeki değişimi ve de parçaların deformasyon davranışlarını detaylı olarak incelemiştir [5,6]. Absorbe edilen enerjinin maksimize edilmesi için kompozit yapı tasarımı son zamanlarda üzerinde çalışılan konular arasında yer almaktadır.

Numunelerin aksenal yükler altında, yarı statik deney koşulları için davranışları incelendiği gibi, çarpma koşulları için de deneysel ve sayısal çalışmaların bulunduğu görülmektedir. Çalışmalar sadece farklı çap ve cidar kalınlığı oranlarındaki (D/t) takviyesiz yapılarla sınırlı kalmamış, nispeten daha düşük yoğunluktaki ve daha çok dolgu amaçlı malzemeler ve elyafın kullanıldığı kompozit ve de hibrit yapıları da kapsamaktadır. Bu çalışmalarda genelde, tüp geometrinin içine ve/veya dışına yapılan malzeme takviyesinden mekanik açıdan yararlanılmak istenmiştir. Parça ağırlığının minimize edilmesi bir diğer önemli konu olması nedeniyle, takviye malzemesi yoğunluğunun düşük olmasına dikkat edilmiş ve çoğu zaman gözenekli yapıya sahip metal veya polimerik malzemelerden yararlanılmıştır [2,7-11]. M. Güden ve ark. dışarıdan ve içeriden takviyeli, takviyesiz ve sadece kompozit tüplerin aksenal yükleme altındaki davranışlarını detaylı olarak incelemiştir. Yapılan çalışmalar neticesinde, takviyenin ortalama ezilme kuvvetini arttırdığı ve bu artışa paralel olarak özgül enerji absorbe etme kabiliyetinin de iyileştiği gözlenmiştir [8].

Ezilme kutusunun deformasyon ucundan itibaren farklı özellikteki polimerik malzemelerin dizilimi ile fonksiyonel derecelendirilmenin amaçlandığı bazı çalışmalar da bulunmaktadır [12,13]. Ortalama ezilme kuvvetinin arttırılmaya çalışıldığı bir diğer araştırmada, parça cidarında yerel olarak oluşturulan ve nominal çaptan bir miktar büyük tutularak elde edilen kaburga yapısının, ezilme kuvvetinde kabaca %30 artış sağladığı ve bunun cidardaki katlanma davranışının değişmesinden kaynaklandığı dikkat çekilmiştir [14]. Benzer etkinin cidarda talaşlı imalat ile açılan oluklarla sağlandığı çalışmalara da rastlamak mümkündür [15-17]. Ancak bu tür yöntemlerin belirli cidar kalınlığındaki yapılara uygulanabilir olması, ilave işlemlerle gerektirmesi ve de malzeme kaybı oluşturularak gerçekleştirilmiş olması ciddi anlamda maliyet ve imalat sürelerine yol açacağı açıktır. Ayrıca bu çalışmalardaki temel kıstas enerji artışından ziyade tüplerin katlanma modellerinin kontrol edilebilmesidir

Bazı çalışmalarda cidarın içeriden ve dışarıdan desteklenmesi halinde ortaya çıkan etkileşimden dolayı, enerji absorbe etme davranışının dikkat çekici oranda iyileştiği ifade edilmiştir. Bu durum Guillo ve ark. tarafından PVC köpük takviye edilmiş 6060 Al alaşımı tüpler üzerinde yapılan deneylerde de gözlenmiştir [1]. Deplasman ile ezilme kuvvetinin arttırılabilmesi için köpük takviye malzemesinden yararlanıldığı kadar, tüp yapının konik kesitli olmasının da etkili olduğu anlaşılmaktadır [12,18-20]. Doğrusal olmayan malzeme davranışının dikkate alındığı sonlu elemanlar çalışmalarının, gerek deformasyon mekanizmasının irdelenmesine, gerekse tasarıma ait karar verme süreçlerine önemli katkı sunduğu anlaşılmaktadır. Analiz çalışmalarının farklı geometrideki tüp kesitli parçaların enerji absorbe etme performans tahmininde ve en uygun geometrinin belirlenmesinde başarıyla kullanıldığı anlaşılmaktadır [13]. Özellikle kare kesitli kutuların aksel yükler altındaki katlanma safhaları, katlanmayı başlatacak tetikleyici geometri ile kuvvetin deplasmanla değişimi, sonlu eleman analizleriyle tahmin edilebilmektedir [21-25]. Literatürde sözü edilen takviye bileşenlerine ait enerji değerlerinin toplamı, takviyeli yapı için (yani birlikte deforme edilme durumunda) elde edilen enerji miktarına göre daha düşük değerler sunduğu, bir anlamda sinerjik etkileşimin varlığı dikkat çekicidir.

Uygulamada otomobiller için ezilme kutusunun kontrollü bir şekilde ve kısa deplasman değerlerinde yüksek miktarda enerji absorbe etmesi istenmekte ve kural olarak 10-15 km/h hızındaki aracın duran cisme önden tam çarpma hali için sadece ezilme kutularının değiştirilmesi, yani aracın diğer bileşenlerinde önemli bir hasar oluşmaması öncelikli hedeftir [26]. Ancak araç genişliğinin %40'ına karşılık gelen genişlikteki bir engele çarpma (köşeden çarpma) testi için bir tek ezilme kutusu ezilmeye zorlanmakta ve araç ağırlığına bağlı olarak ezilme kutusunun performansı çoğunlukla yetersiz kalabilmektedir. US-NCAP ve AMUS test verilerine göre, özellikle de çarpışma hızının 56 km/h gibi nispeten daha yüksek hızlara çıkartılması durumunda, B segmentinde yer alan 1000 kg ağırlığındaki bir aracın ezilme kutusunun absorbe ettiği enerji miktarı, absorbe edilen toplam enerjinin %5'ine, ezilme kutusunu destekleyen ön şase kolonuna ait enerji değeri ise, toplam enerjinin %40'ına karşılık geldiği rapor edilmektedir [27].

Yukarıda özetlenen iki çarpışma koşulu için hizmet verebilecek bir yapının geliştirilmesi pasif koruma bakımından ciddi bir kazanım sağlayacaktır. Proje kapsamında önerilen sistem, birinci kademesi enerji absorbe etme kabiliyeti geliştirilmiş, düşük hızlarda çarpışma için tasarlanmış ezilme kutusundan, ikinci kademesi ise nispeten yüksek hızlarda aktif hale geçerek enerji absorbe

etme kabiliyeti daha yüksek olan konik deformasyon bileziğinden oluşmaktadır. Sistemdeki kritik nokta: deformasyon bileziğine ait maksimum kuvvetin, ön şase kolunun direncinden (deformasyona başlatacak kuvvet) daha düşük olma zorunluluğudur, aksi durumda çarpışma yükü doğrudan şaseye ve diğer elemanlara iletilmiş olacaktır ki bu enerji absorbe etme açısından bir anlam ifade etmeyecektir.

Ayrıca, yukarıda ideal yapı için sıralanan özellikler dikkate alınarak literatürde rapor edilen çalışmalar irdelendiğinde, bu çalışmaların bir kaçı hariç ana tema itibariyle birbirlerinden çok farklılık göstermediği; malzeme özelliklerinin değiştirildiği (yoğunluk, tür) ve deney yönteminde bazı farklılıklar dışında (tam ekselel, farklı açılı çarpma gibi), metal tüp yapı geometrisinin değiştirildiği (çevresel oluşun ikame edildiği ve birden fazla tüp kullanılmış ise yerleşiminin değiştirildiği), takviye malzemesinin türü ve takviye şeklinin, (örn. elyaf yönlenmesinin) değiştirilerek verilerin üretildiği anlaşılmaktadır. Diğer taraftan, bu yayınlarda absorbe edilen enerjiyi arttıracak şekilde deformasyon mekanizmasının geciktirildiği, birden fazla etkinin bir araya getirilerek konunun irdelendiği yayın sayısı oldukça sınırlıdır. Bunun yanında, sinerjik etki doğurabilecek değişkenlerin tespit edildiği ve bunların uygun kombinasyonlar altında etkilerinin sistematik olarak incelendiği çalışmalara rastlanmamıştır.

1.2 Amaç ve Kapsam

Projenin amacı, ideal bir ezilme kutusundan beklenen tüm özelliklere sahip, bunun yanında mevcut ezilme kutularına göre çok daha yüksek enerji absorbe etme kabiliyetinde (dolayısıyla ortalama ezilme kuvveti yüksek) kompozit yapı da dahil olmak üzere bazı tasarımlar ortaya koymaktır. Proje kapsamında gerek deformasyon mekanizmasının irdelenmesi, gerekse de tasarımda doğru kararların alınması aşamalarında sonlu elemanlar analizlerinden yararlanılacaktır. Buna göre, ezilme kutusunun basit, düşük maliyetli, hafif, küçük hacimli ve değiştirilmesi kolay olması da ayrıca irdelenecektir. Bu kapsamda;

- Öncelikli olarak deformasyon mekanizmasına ait safhaların net bir şekilde ortaya konulması ve sonrasında ilave malzeme kullanılarak gerilme durumunu ve burkulma boyunun faydalı yönde değiştirildiği, ilave malzemenin de yük taşımaya ortak edildiği, tasarım kombinasyonların belirlenmesi hedeflenmektedir. İdeal ezilme kutusundan beklenen tüm

özeliklerde, bunun yanı sıra mevcut ezilme kutularına göre çok daha yüksek enerji absorbe etme kabiliyetinde kompozit yapı da dahil olmak üzere alternatif tasarımlar ortaya konulacaktır. Ayrıca birden fazla faydalı etkinin birlikte oluşturulmasıyla ortaya çıkması beklenen sinerjik etkileşim sayesinde, enerji absorbe etme kabiliyeti en yüksek seviyeye çekilmiş kombinasyonlar araştırılacaktır. Bu amaç doğrultusunda, deformasyon mekanizmasını kontrollü olarak geciktirecek tedbirlerin belirlenmesi diğer bir hedefi teşkil etmektedir. 50 mm çaplı 1 mm cidar kalınlığında ($D/t=50$) 6063-T1 alüminyum tüp malzemelerle gerçekleştirilen ön çalışmalardan, absorbe edilen enerji değerinin takviyesiz tüpte 45 mm deplasman için 506 J olduğu tespit edilmiştir. Proje kapsamında parçanın farklı cidar kalınlığı/çap değerleri, farklı takviye bileşenleriyle de bu değer 4000 J mertebelerine çıkarılması hedeflenmektedir. Bu değer "B" segmentinde yer alan bir otomobilin (1000 kg ağırlığında) en fazla 15 km/h hızla önden rijit bir engele tam çarpışması durumu için yeterli olmaktadır.

Elde edilecek tüm kombinasyonlar arasında (i) kabul edilebilir düzeyde enerji absorbe kabiliyetine sahip, düzgün katlanma deformasyonu gösteren, (ii) üretimi kolay, (iii) küçük hacimli ve mümkünse düşük maliyetli olan seçenekler belirlendikten ve optimize edildikten sonra bu ürünün, nispeten yüksek enerjili çarpışma şartlarında devreye girecek bir diğer enerji absorbe edici yapıyla birlikte çalıştırılması hedeflenmektedir.

- Bu ikinci kademe enerji absorbe edici yapının esas olarak radyal deformasyon bileziklerinin şekil değiştirmesi prensibi üzerine bina edilecektir. İki kademeli bu sistemin performansının, klasik ezilme kutularında ulaşılamayacak derecede yüksek enerjileri absorbe etmesi, projenin temel başarı kriterini oluşturmaktadır. Geliştirilecek iki aşamalı sistem sayesinde bir otomobilin 56 km/h hızla, duran rijit bir engele köşeden çarpması durumunda standart pasif koruma amaçlı konstrüksiyona göre çok daha yüksek enerji miktarlarının absorbe edilebilmesi mümkün olacaktır.

Sistemin bir otomobilde uygulama alanı bulabilmesi için, toplam hacmin minimize edilmesi ayrıca ele alınacak bir diğer önemli konuyu oluşturmaktadır. Bu amaçla önerilecek sistemin muhtemel iyileştirme noktaları ve yapılacak müdahaleler belirlenerek efektif ve gerçekçi olanlar hayata geçirilecek ve gerekli doğrulama deneyleri yapılacaktır.

Proje kapsamında oluşturulacak deney matrisinde, iki temel nokta mutlaka göz önünde bulundurulacaktır; (1) mümkün mertebe yurtiçinden temin edilecek malzemelerin kullanılması (2) alınacak bazı tedbirlerle parçanın seri üretime uygun olması.

2. EZİLME KUTUSU TASARIMI VE İMALATI

Ezilme kutusu tasarımlarında 6063-T5 serisi ekstrüzyon yöntemiyle üretilmiş alüminyum borulardan belirli boylarda kesilerek elde edilen tüpler kullanılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan alüminyum tüpler iki ana gruba ayrılabilir. Birinci grup numuneler, katlanma davranışı ve mekanizmasının anlaşılması için kullanılması öngörülen 40 mm çaplı ve 1 mm et kalınlığına sahip tüplerdir. İkinci grup numuneler ise, proje başvurusunda belirtilmiş olan enerji absorbe değerlerine ulaşmakta kullanılan yaklaşık 58 mm çaplı ve 1,5 mm et kalınlığına sahip tüplerdir. Ana deney numuneleri olarak da adlandırılabilir ikinci grup numuneler, alüminyum borudan belirli boylarda kesildikten sonra içeriden ve dışarıdan talaş kaldırılmak suretiyle homojen et kalınlığına sahip olacak şekilde imal edilmiştir. Deneyler her bir numune modeli için tekrarlanmıştır.

Numunelerin deneye hazır hale getirilmesi ve malzeme ile ilgili iki önemli konu ön plana çıkmıştır. Bunlar;

- 1- aksenal yük altında tüp kenarlarının birbirlerine tam paralel olmaması ya da yüzeyde bulunabilecek küçük çapların kuvvetin numuneye homojen bir şekilde iletilmesini engellemesi nedeniyle, tüp kenarlarında ve cidarda küçük dalgalanmaların önüne geçmek için numuneler tornada talaş kaldırma işlemine tabi tutulmuştur.
- 2- 6063 alaşım boruların temininde sertlik değeri özellikle kontrol edilmiştir. Nispeten sert borulardan çıkartılan tüplerin deneylerinde, kat uçlarında gözle görünür derecede çatlakların varlığı tespit edilmiştir. Problemin özellikle 14 *WH* (Webster sertlik) mertebesindeki sertlik değeri için ciddi sonuçlar doğurduğu görülmüştür. Buna göre ön deneyler sonrasında çalışılacak ana boru çapı için malzeme sertliğinin bu değer altında olmasına özen gösterilmiştir.

2.1 Ezilme Kutusu, Deformasyon Bileziği, Takviye Elemanlarının Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi ve Deneylede Kullanılan Test Düzenekleri

Yapılan ön deneylede 40 mm çaplı ve 1 mm et kalınlığına sahip 6063-T5 serisi alüminyum tüpler kullanılmıştır. Ezilme kutusuna ait ana deneylede de 58 mm çaplı ve 1,5 mm et kalınlığına sahip alüminyum borulardan imal edilen tüpler kullanılmıştır. Kullanılan alüminyum malzemeye ait mekanik özelliklerin belirlenebilmesi amacıyla çekme deneyle yapılması planlanmıştır.

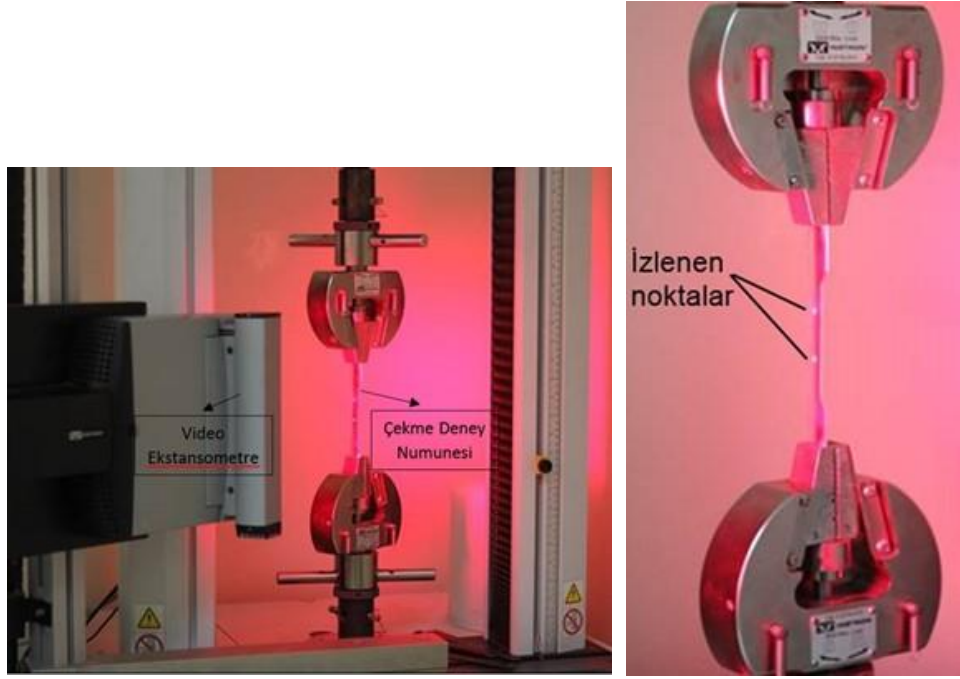
ASTM-E8/E8M-09 standartları, çapı 25 mm den büyük borular için boru doğrultusunda çekme numunesi çıkartılarak çekme deneylenin yapılması öngörmektedir. Buna göre, borudan çıkartılan çekme numunesi Şekil 2'de verilen sıkıştırma aparatı kullanılarak deneyle yapılmıştır. Deneyle sırasında video-ekstansometrenin numunedeki uzamayı hassas bir şekilde izleyebilmesi, hesaplamalarda ölçü boyu olarak kullanılmak üzere numune üzerine düşey doğrultuda noktalama işlemleri yapılmıştır, daha sonra genel görünümü Şekil 3'de verilen Instron marka çekme cihazı kullanılarak çekme deneyleleri gerçekleştirilmiştir.



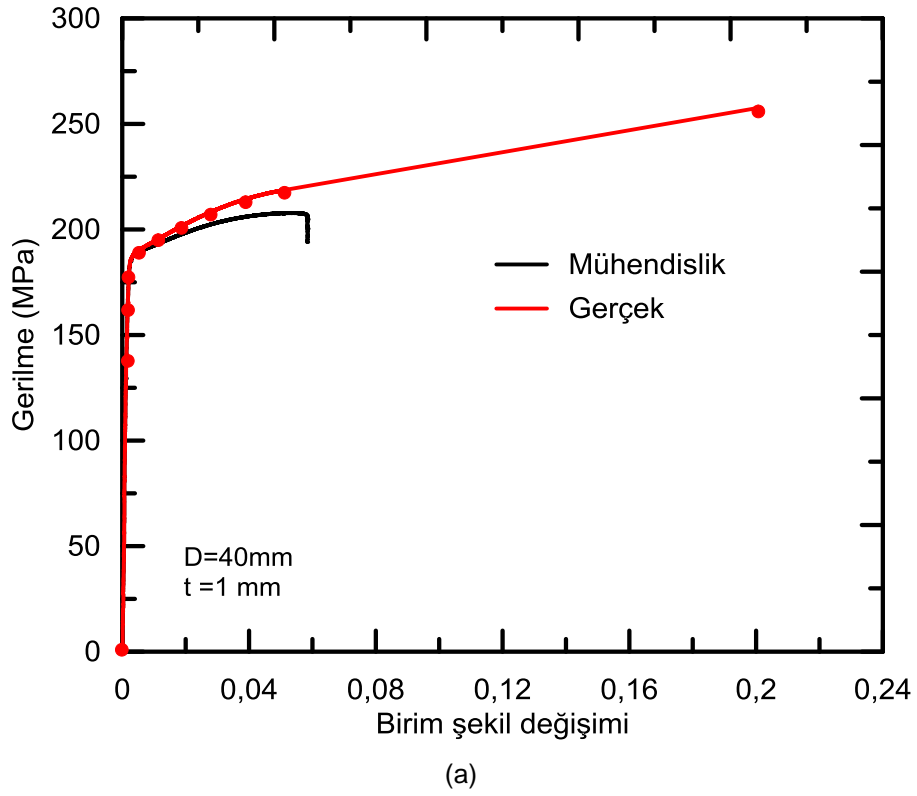
Şekil 2. (a) Numune sıkıştırma aparatı 40 mm ve üstü çaplar için (b) Numunenin çenelere yerleştirilmesi.

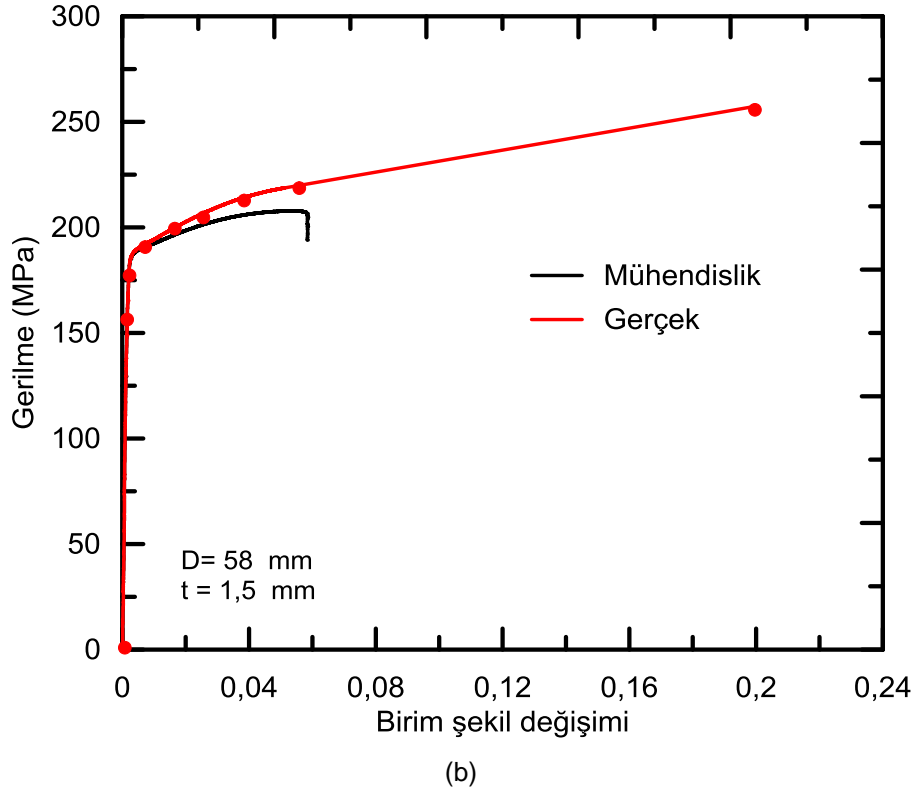
Ön deneyleler için kullanılan 6063-T5 malzemedan 40 mm çaplı boru ve ana deneyleler için kullanımı planlanan 58 mm çap 1,5 mm cidar kalınlığındaki tüplere ait çekme eğrileri Şekil 4'de verilmiştir. Bu malzeme için %0,2 akma sınırınının 188 MPa olduğu tespit edilmiştir. Grafikte eğrinin nihai noktası için birim şekil değışimi hesaplanırken aşağıdaki denklemden (Denklem 1) yararlanılmıştır.

$$\epsilon_g = \ln\left(\frac{A_0}{A}\right) \quad (1)$$



Şekil 3. Malzeme özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan Instron çekme cihazı





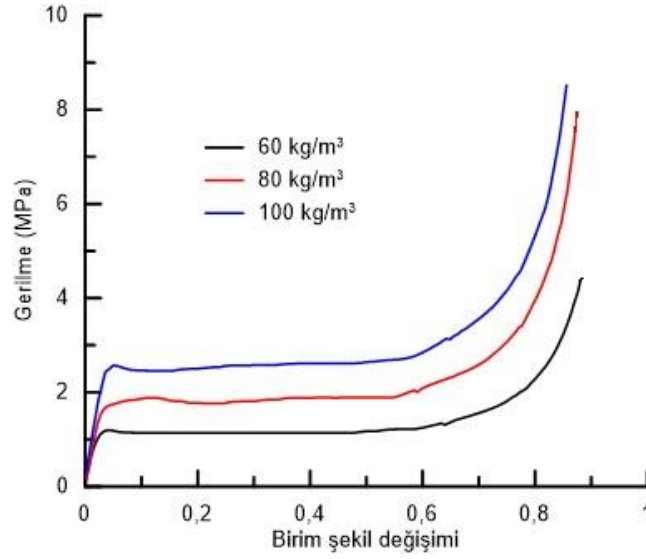
Şekil 4. (a) D= 40 (t=1 mm) (b) 58 mm (t=1,5mm) çaplı 6063 boru için elde edilen çekme eğrileri

İçeriden yapılacak takviye işlemlerinde üç farklı yoğunlukta (60 kg/m^3 , 80 kg/m^3 ve 100 kg/m^3) PVC köpük kullanımı planlanmıştır (Şekil 5). Bu malzemelerden çıkartılan basma deneyi numuneleri üzerinde üniversal çekme cihazında (Instron) basma deneyi gerçekleştirilmiş olup, elde edilen deney sonuçları Şekil 6'de verilmiştir.



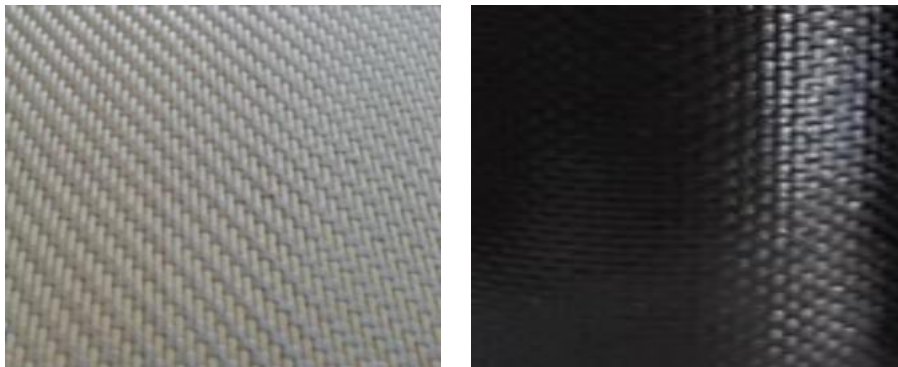
Şekil 5. Deneylerde kullanılan farklı yoğunluktaki PVC köpük $60,80$ ve 100 kg/m^3

Şekil 11'den anlaşılacağı üzere PVC köpükte, ezilme dayanımının yoğunluk ile orantılı olarak arttığı ve tam ezilme durumu için de daha yüksek dayanım değerlerine ulaşıldığı görülmektedir. PVC köpüklerin sergilediği bu deformasyon davranışının literatürde belirtilen sonuçlarla birebir örtüştüğü anlaşılmıştır.

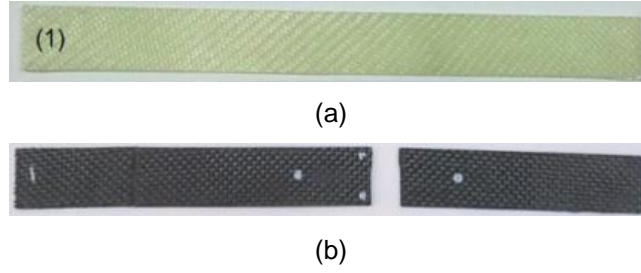


Şekil 6. Farklı yoğunluktaki PVC köpük malzemelerin basma deney sonucuna ait eğrileri.

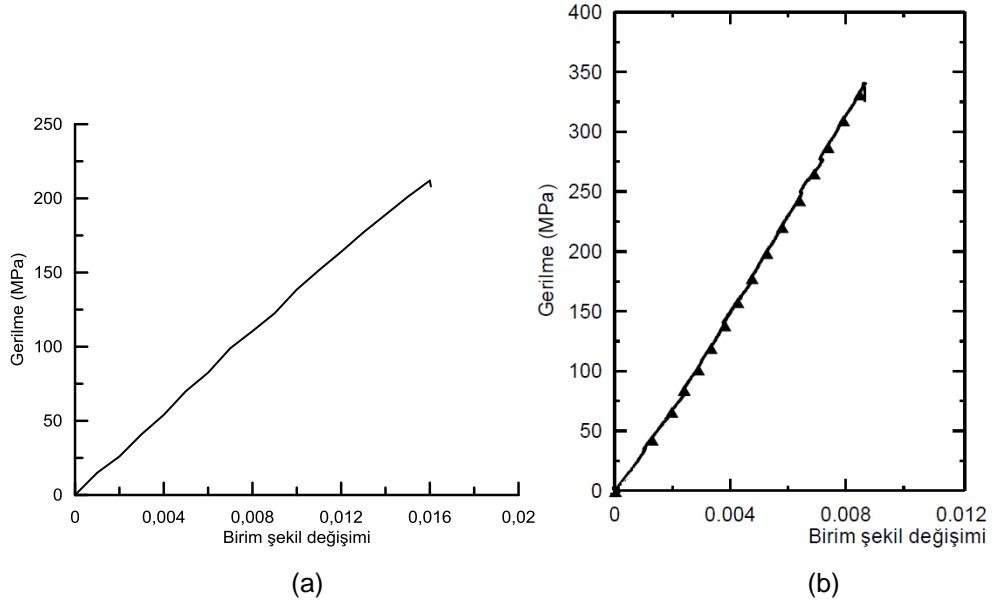
Bu grup numunelerin deneylerinde cam ve karbon olmak üzere iki tip dokuma elyaf kullanılmıştır. Her iki elyaf türü içinde çap ve elyaf oranı birbirine uygun olması nedeniyle önceki proje çalışmalarında satın alınan ve laboratuvarımızda bulunan twill tip dokuma cam ve karbon elyaf tan faydalanılmıştır (Şekil 7a). Hacimce %50 epoksi ve sertleştiriciden oluşan karışım kullanılarak, dokuma elyaf ıslatma problemi yaşanmayacak şekilde numune imalatında kullanılmıştır. Şekil 8a'da bu elyaf dokumalardan cam elyaf ile takviyeli edilmiş kompozit numunelerin çekme ve basma deneyi grafikler, Şekil 8b'de ise karbon elyaf takviyeli kompozit numunelerin çekme ve basma eğrileri verilmiştir. Çekme yükü altında dokuma cam elyaf takviyeli kompozitin elastiklik modülünün 14.260 MPa, çekme dayanımının 222 MPa, basma dayanımı ise 96 MPa olarak belirlenmiştir. Karbon elyaf için bu değerler elastiklik modülü için 42.000 MPa, çekme dayanımı için 340 MPa ve basma dayanımı için ise 118 MPa değerdedir.



(a)

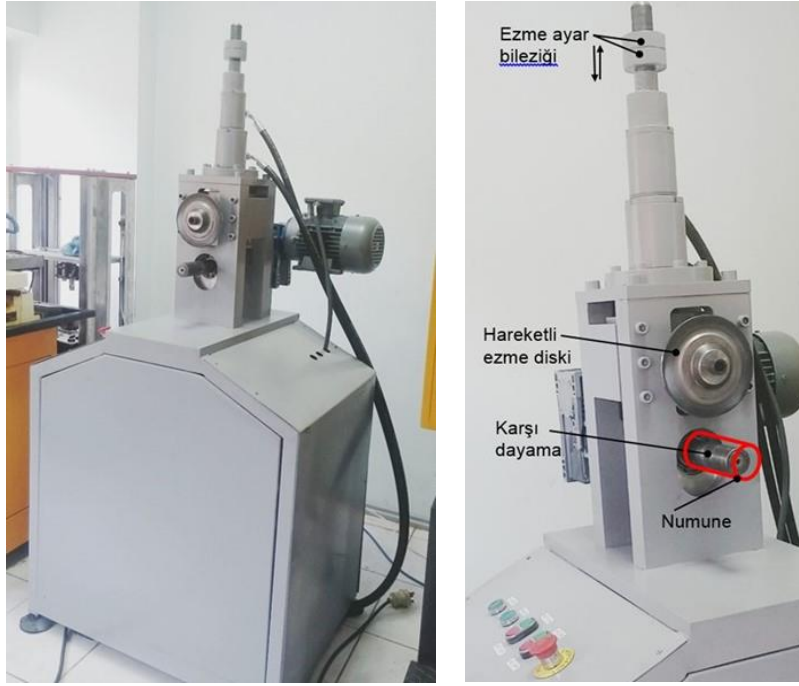


Şekil 7. (a) Dokuma cam ve (b) karbon elyaf kumaştan üretilen kompozit çekme numuneleri

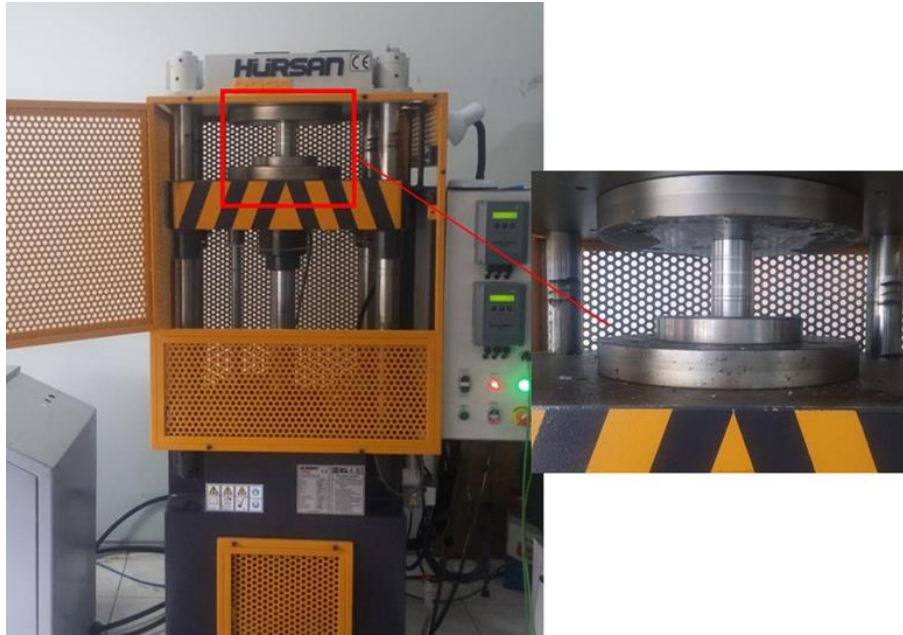


Şekil 8. (a) Dokuma cam ve (b) karbon elyaf kumaş takviyeli kompozit numunelerin çekme verileri

Tasarım ve imalatı proje kapsamında gerçekleştirilen çevresel ezme işlemlerinde kullanılan cihaz ile basma deneylerinde kullanılan hidrolik test düzeneği, yarı statik basma deneylerinde kullanılan bilgisayar kontrollü hidrolik presi ve ağırlık-düşürme darbe test cihazı aşağıda sırasıyla verilmiştir.



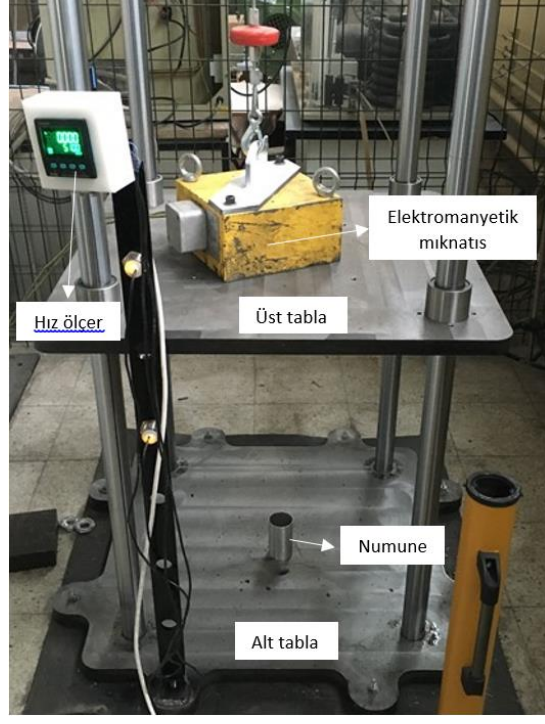
Şekil 9. Miktar ve konumu ayarlanabilen çevresel ezme cihazı.



Şekil 10. Bilgisayar kontrollü hidrolik pres (25 ton kapasiteli)



(a)



(b)

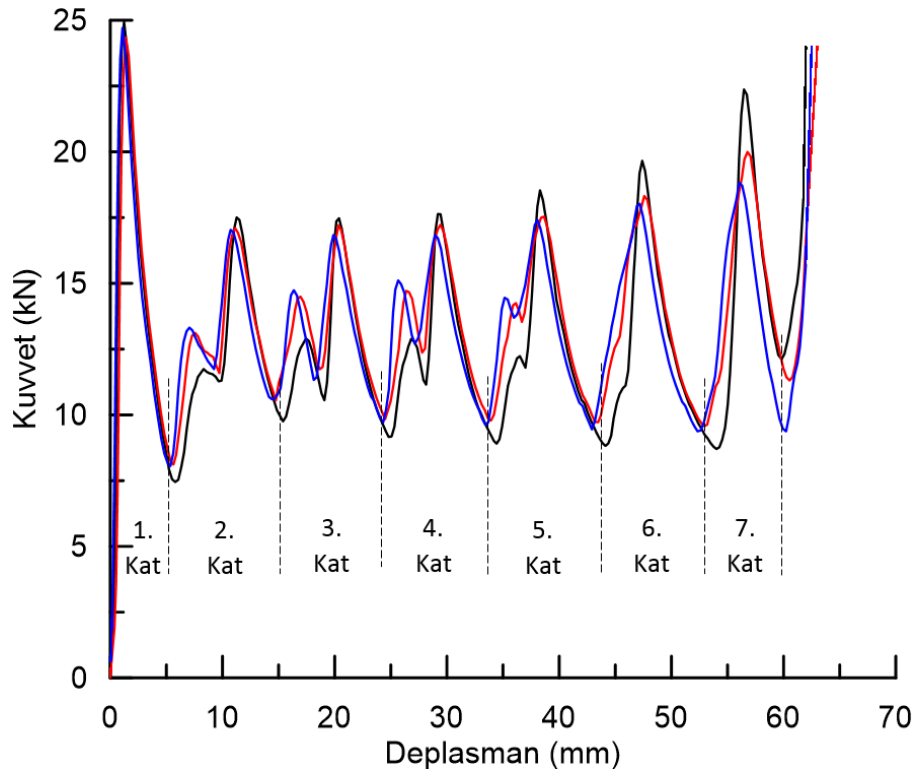
Şekil 11. Ağırlık-düşürme darbe test cihazı

3. EZİLME KUTUSU MODELLERİNİN EZİLME DURUMLARININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Bu bölümde takviyesiz ve takviyeli tüplerin aksenel ezme durumlarına ait deneysel sonuçlara yer verilecektir. Takviyesiz tüplerde küçük çaplı (40 mm) ve büyük çaplı (58 mm) tüplere ait sonuçlar bulunmaktadır. Ayrıca takviyesiz bir alüminyum tüpe ait katlanma davranışı detaylı bir şekilde bu kısımda incelenmiştir. Takviyeli tüplerle alakalı kısımlarda ise çevresel ezme işlemi uygulanmış, içeriden PVC köpük takviye edilmiş ve dışarıdan cam ve karbon dokuma elyaf takviye edilmiş tüplere ait sonuçlar bulunmaktadır. Ayrıca takviye durumlarının çoklu kullanıldığı durumlara ait deneysel sonuçlarda bu kısımda verilmiştir.

3.1 Takviyesiz ve Herhangi Bir Ezme İşlemi Uygulanmamış Bir Tüp Yapının Temel Katlanma Davranışının İncelenmesi

Aynı sertlikteki $D=40$, $t=1$, $L=80$ mm ölçülerinde alüminyum tüpler üzerinde yapılan deneylerden, genel olarak deformasyon davranışı aynı karakterde olan, birbirlerine çok benzer kuvvet-deplasman grafikleri elde edilmiştir. Aşağıda örnek olarak sunulan üç deneye ait kuvvet-deplasman eğrisi aynı grafikte verilmiştir (Şekil 12). Şekilden anlaşılacağı gibi, her bir eğrinin kuvvet piklerinde çok küçük sapmalar olmakla birlikte, genel olarak katlanma başlangıç ve bitiş deplasmanlarının birbirine çok yakın olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 12. Bir grup pilot deneye ait kuvvet-deplasman eğrileri ($D=40$, $t=1$, $L=80$ mm)

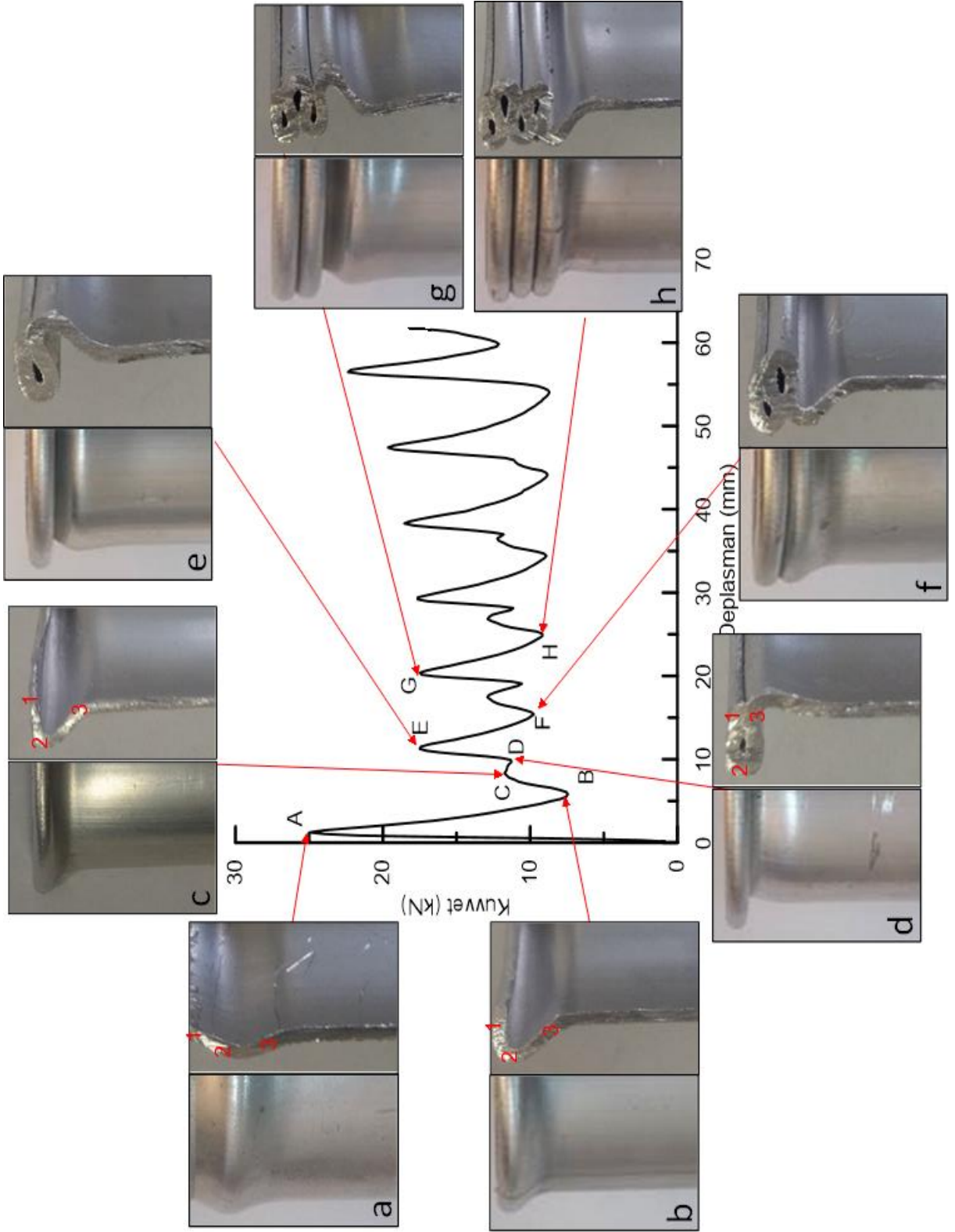
Eğriler incelendiğinde, genel olarak katlanma bir maksimum kuvvet (F_{maks}) ile başlamakta ve belirli bir ortalama kuvvet etrafında, bir üst ve alt kuvvet seviyesi arasında değişerek katlanmanın devam ettiği anlaşılmaktadır. Deneyin sonuna doğru, aşırı deformasyonun etkisiyle tüpün yığılması (tam ezilme durumu-densification) sonucu eğrinin hızlı bir şekilde yükselerek deney son bulmaktadır (Şekil 12). Katlanma sürecinde elde edilen tüm üst kuvvet değerlerinin, tüpün yığılma durumu dışında, her zaman için F_{maks} değerinden daha düşük kaldığı, ancak artan deplasmanla pik kuvvetin bir miktar artış gösterdiği dikkat çekmektedir. Burada her bir kuvvet artışı tüp üzerinde oluşan katlanmayı işaret ettiği ve oluşan kuvvet piklerinden, tüp yapının deney sonuna doğru toplam 7 adet katlanma gösterdiği anlaşılmaktadır (Şekil 12). Bu davranış metal tüplerin aksel yük altında deformasyonu sırasında gösterdikleri tipik bir davranış olup, konuyla ilgili geniş bir literatür yer almaktadır.

Tüm deplasmanlar için gerçekleşen katlanma oluşum safhalarına ait görüntüler, kuvvet-deplasman grafiğinde ilgili deplasman değerlerine karşılık gelen noktalarla birlikte Şekil 13'de verilmiştir. İlk kat oluşumu, uygulanan kuvvetin etkisiyle lokal burkulmaya bağlı olarak tüp cidarının

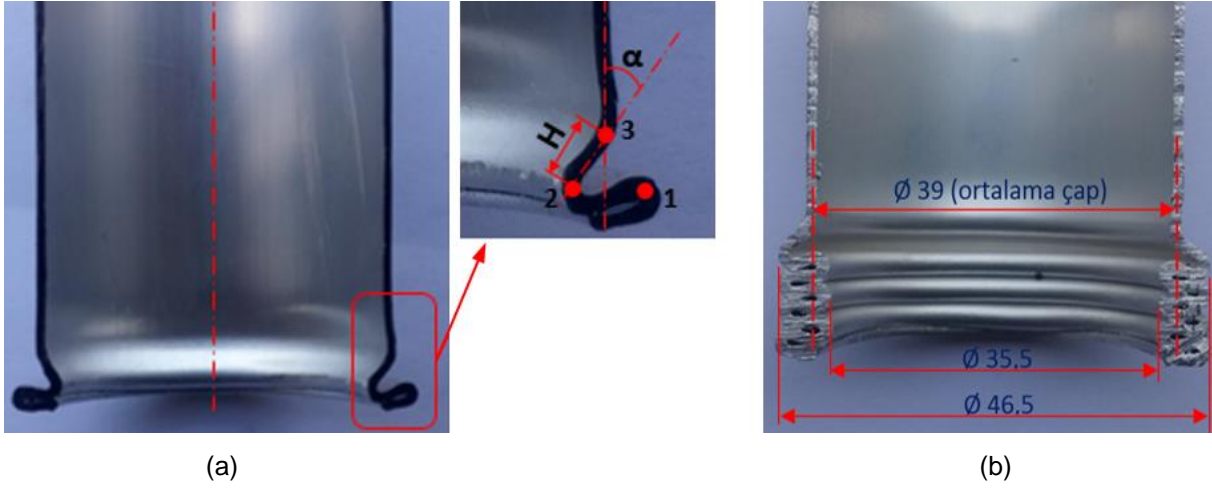
dışa doğru yönlendiğiyle gerçekleşmektedir. Lokal burkulma, hareket serbestliği nedeniyle genelde tüpün her iki ucunda kendini göstermektedir.

Grafikte, OA: burkulmayı başlatacak kuvvet değerine ulaşılmaya, tüp üst ucuna ait cidar dışa doğru harekete zorlanmakta (Şekil 13a), AB: üst kenarın (1 noktası) içeriye doğru hareket etmesi katlanmayı kolaylaştırması nedeniyle, kuvvet hızlı bir şekilde azalmakta (Şekil 13b). BC: deplasmanla birlikte radyal yönde iç kısma harekete zorlanan cidarın (3 noktası) göstermiş olduğu dirençten dolayı kuvvet bir miktar yükselmekte, CD: eğilme/katlanma etkisiyle kuvvetin tekrar kısmi düşüş göstermesi. Burada 1 ve 3 numaralı cidarlar birbirlerine yaklaşmaktadır. Şekil 13d dışa burkulmuş cidarın alt ve üst kenarlarının birbirine temas edecek şekilde birbirleri üzerine katlanmış durumunu göstermektedir. DE: yeni bir kat oluşum safhası; cidarın dışa doğru burkulması için kuvvetin tekrar yükselmesi şeklinde devam etmektedir. İlk katlanma sonrası tüp cidarları yeni kat oluşumunu kolaylaştırıcı, moment etkisi doğuracak tarzda şekillenmesi, yani tüm cidarın ilk başlangıçtaki gibi tüp eksenine paralel olmaması nedeniyle, katlanma için gerekli kuvvet pikleri, ilk katlanmadaki F_{maks} 'dan daha düşük kalmaktadır.

Eksenel yükleme sonucu oluşan her bir kat, metalik borunun çap ve et kalınlığının bir fonksiyonu olup, iki eşit parça ($2H$) olarak kabul edilen bir katlanma boyundan oluşmaktadır (Şekil 14). Şekilden de anlaşılacağı üzere katlanma olayı, kat boyunu (1-3 uzunluğu) oluşturan iki eşit parçanın (1-2 ve 2-3 uzunlukları) 2 noktasında olduğu kabul edilen bir mafsal etrafında hareket ederek birbirleri üzerine temas ederek tamamlanmış olur. 40 mm ($t=1$ mm) çaplı (ortalama çapı 39 mm olan) tüp numunenin deney sonrası kesit görüntüsü Şekil 14'de verilmiştir. Şekilde, 46,5 ve 35,5 çapları, kat genişliğinin 5,5 mm olduğu ve ortalama çap dikkate alınarak yapılacak hesaplama sonucu cidarın dışarıya yönelme miktarının kat genişliğinin %68, dolayısıyla içeriye yönelme miktarının ise kat genişliğinin %32'sine karşılık geldiği anlaşılmaktadır.



Şekil 13. Kuvvet-deplasman grafiği üzerinde tüp deformasyon durumunun eşleştirilerek gösterilmesi



Şekil 14. (a) Katlanma ve plastik mafsall oluşumu (b) kat genişliğinin hesaplanması ($D=40$, $t=1$ mm)

Tüp yapının içeriye ve dışarıya yapmış olduğu katlanma miktarı, daha önce benzer deformasyon için rapor edilen miktarlar ile örtüşmektedir. Genel olarak ortalama kuvvet de dahil olmak üzere, maksimum kuvvet, katlanma modu gibi özelliklerin çap, cidar kalınlığı ve de malzemeye ait sertlik değerlerinden ne ölçüde etkilediğinin incelenmesi faydalı olacaktır.

3.1.1 Farklı Ölçü ve Sertlikte Tüplerin Deneyleri

Katlanma davranışının tüp ölçüleriyle ilişkisinin görülebilmesi amacıyla farklı ölçülerdeki tüplerle deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde tüp ölçülerinin katlanma modeli üzerindeki etkisi ve tüp sertliğinin çatlamadan katlanma için alabileceği üst değer belirlenmeye çalışılmış, deneyler sırasında yetmiş adedin üstünde numune kullanılmıştır (Tablo 1). Deneylere ait grafiklerden elde edilen en büyük kuvvet (F_{maks}) değerini, eğri altında kalan alan deformasyon boyunca harcanan enerji olup, bunun deplasman değerine oranı ortalama kuvvet (F_{ort}) değeri olarak hesaplanmıştır (Denklem 2).

$$F_{ort} (kN) = E (J) / L \text{ mm} \quad (2)$$

Tablo 1 Tüp malzemesinin akma dayanımı, sertlik, geometrik büyüklükleri ve katlanma durumu ve F_{ort} , F_{maks} değerleri. (Not: ilk sırada yer alan deney $D=40$ mm tüpler Instron cihazında deney esnasında hassas olarak görüntü alınan numuneye aittir.)

Malzeme Özellikleri		Numune boyutları (mm)					Deney çıktıları				F_{ort} tahmin edilmesine yönelik üç yaklaşım		
σ_{Ak}	WH*	t	D	L	D/t	L/D	F_{maks} (kN)	F_{ort} (kN)	F_{maks}/F_{ort}	Deformasyon (kat) Modu	F_{ab-jon}	F_{wi}	F_{sing}
188	12	1	40	76	40,0	1,9	22,1	12,1	1,83	7 Simetrik	8,21	10,47	6,88
170	10	2	60	80	30,0	1,33	67,4	38,1	1,77	4 simetrik	26,06	32,79	21,68
188	12	2,5	55	105	22,0	1,9	99,0	56,1	1,77	Numune parçalandı	39,19	48,52	32,32
188		2	54	100	27,0	1,85	68,4	37,4	1,83	4 tam + 1 yarım simetrik	27,48	34,40	22,80
188		1,5	53	100	35,3	1,9	49,1	26,7	1,84	6 simetrik	17,45	22,14	14,59
188		1	52	100	52,0	1,9	27,8	11,8	2,36	2 elmas (Sonra mix-mode)	9,26	11,93	7,81
170	9,5	1	50	71	50,0	1,4	26,2	13,3	1,97		8,22	10,58	6,93
180	11	1	48	96	48,0	2,0	10,1	8,1	1,25	6 düzgün (İlk kat oluşturulmuştu)	8,54	10,98	7,19
180		1	48	106	48,0	2,2	26,0	12,2	2,12	3 simetrik 2 elmas	8,54	10,98	7,19
180		1	48	106	48,0	2,2	23,9	16,9	1,42	elmas	8,54	10,98	7,19
180		1	48	96	48,0	2,0	26,8	18,7	1,44	2 simetrik 2 elmas	8,54	10,98	7,19
195	14,5	2	33	68	16,5	2,06	63,94	28,51	2,24	Numune parçalandı	22,93	27,89	18,73
195		1,4	31,5	68	22,5	2,16	33,83	18,49	1,83	Numune parçalandı	12,88	15,96	10,63
195		1	30,5	68	30,5	2,23	18,34	11,29	1,62	Numune parçalandı	7,53	9,48	6,27
190	13	1,5	25	60	16,7	2,4	27,5	20,5	1,34	3 simetrik (çatlama)	12,62	15,36	10,31
190		1,5	25	50	16,7	2,0	27,52	19,49	1,41	Mix-mode (yırılma)	12,62	15,36	10,31
190		1,5	25	50	16,7	2,0	27,5	20,34	1,35	3 düzgün (Üstte kısımda bombe ve çatlama)	12,62	15,36	10,31
190		1	24	48	24,0	2,0	21,47	13,87	1,55	2 simetrik 2 elmas	6,59	8,19	5,45
190	12,5	1,5	20	50	13,3	2,5	23,88	19,95	1,20	2 simetrik 1 elmas (yırılma)	11,46	13,74	9,29
190		1,5	20	40	13,3	2,0	24,05	19,79	1,22	3 simetrik (yırılma)	11,46	13,74	9,29

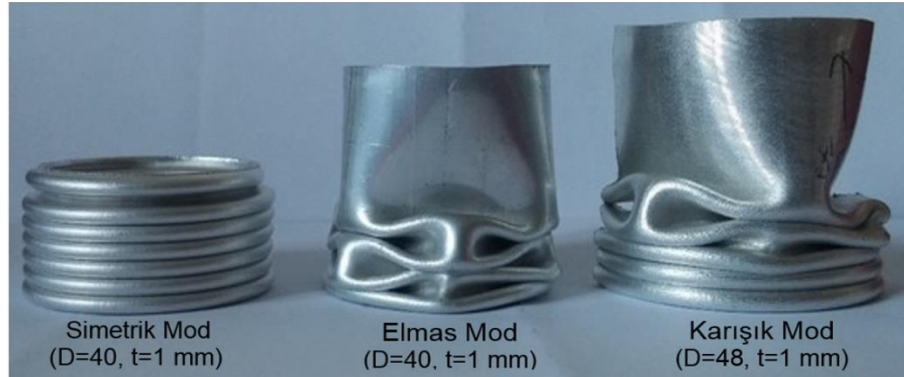
WH: Webster sertlik değeri.

Sertliği 13 *WH* tüplerin 1,5 mm cidar kalınlığında 14,5 *WH* sertliktekilerin ise 1 mm cidar kalınlığında çatlama eğilimi gösterdiği tespit edilmiştir. Özellikle yüksek sertlikteki bazı numunelerin deney başlangıcında, tam katlanma oluşmadan tamamen parçalandığı gözlenmiştir (şekil 15). Bu nedenle, numune çıkartılacak her bir boru boyu için çift taraf ve orta noktadan sertlik ölçümü (Webster) yapılmıştır.



şekil 15. Farklı sertlik ve çaplardaki numunelerin aksenal basma zorlanması altındaki davranışı

Uygun sertlikteki numunelerle yapılan deneylerden, numunelerin üç farklı moda göre deformasyon davranışı gösterdiği anlaşılmıştır; bunlar (a) tüp eksenine göre düzgün (simetrik) katlanma (b) elmas (c) simetrik başlayıp sonrasında elmas deformasyonla devam eden karışık moddur (şekil 16). Karışık moddaki deformasyonun yük iletimini etkileyen cidardaki homojensizlikten kaynaklandığı ancak L/D oranı 2'nin üzerinde olan numunelerde deformasyonun tamamen elmas mod ile başlayıp, aynı şekilde devam ettiği tespit gözlenmiştir. şekil 17'de deformasyonun elmas modda gerçekleştiği bir numunenin üst görünüşü verilmiştir.



şekil 16. Deneylerde gözlenen deformasyon modları



Şekil 17. Elmas modda deforme olmuş bir numunenin üst görüntüsü (D=48, t=1, L=106 mm)

3.2 Farklı Ezilme Kutusu Tasarımlarına Ait (Takviyeli Ve Ezme İşlemi Uygulanmış) Numunelerin Katlanma Davranışının İncelenmesi

Bu bölümde farklı ezilme kutusu tasarımlarına ait numuneler ve bu numunelere ait deney sonuçları verilmiştir. Tasarımı yapılan ezilme kutusu numuneleri, hidrolik pres altında yarı-statik deneylere tabi tutulmuştur. Bu deneyler neticesinde en uygun tüp geometrisinin yanı sıra en verimli takviye modeli de belirlenmeye çalışılmıştır. (a) Cidar ezme işleminde en uygun ezme derinliği ve aralığı, (b) içeriden yapılan PVC köpük takviyelerinde en verimli köpük kombinasyonu ve (c) dışarıdan takviye durumunda ise en uygun takviye malzemesi ve sarım sayısı belirlenmeye çalışılmıştır. Bu takviye durumları için belirlenen en verimli modellerin birlikte kullanılması ile nihai ezilme kutusu tasarımı oluşturulmaya çalışılacaktır.

Tasarımı yapılan takviyeli veya takviyesiz ezilme kutuları, çalışma şartlarında sergileyecekleri davranışların yaklaşık belirlenebilmesi amacıyla düşürme deney düzeneğinde de dinamik teste tabi tutulmuştur. Ağırlığı ve serbest düşme yüksekliği değiştirilebilen parçanın ezilme kutusu üzerine düşürülmesiyle, ezilme kutusunun dinamik yük altındaki davranışı belirlenmeye çalışılmıştır.

3.2.1 Çevresel Ezme İşlemi Uygulanmış Numuneler

Çevresel ezme işlemi ile metalik tüpte bölgesel dayanım artışları sağlanmış ve aynı zamanda da katlanma boyu (burkulma boyu) kısıtlanmıştır. Dayanımı artırılan bölgelerin katlanmaya katılması ve burkulma boylarının kısıtlanması ile enerji absorbe değerinde artış sağlanmaya çalışılmıştır. Bu grup numuneler için ezme makinasının muylu ve ezme disk büyüklüğünün küçük çaplı parçalara uygun olmaması nedeniyle, denemeler için projede çalışılacak olan ana büyüklük 58 mm çap seçilmiştir. Bu kapsamda aşağıda sıralanan noktalara dikkat edilerek kombinasyonlar tespit edilmiştir;

- **ezme miktarı/şiddeti:** cidarda çatlak oluşmamalı, beraberinde ortaya çıkan süneklik düşüşü katlanma esnasında da çatlaklara yol açmamalıdır.

- **ezme aralığı:** ortalama kuvvette deplasmanla düzgün artış sağlayacak şekilde uygun aralıkta olmalıdır.

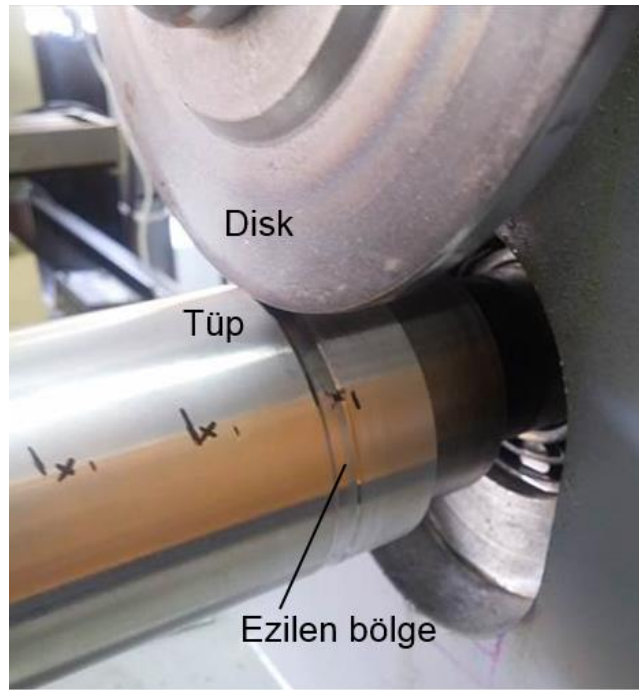
Buna göre öncelikle cidarda ezmenin malzemede neden olduğu davranışın belirlenmesi için farklı ezme şiddetleri öngörülmüştür. Yapılan çalışmalardan 0,50 mm'den daha fazla ezme şiddetinin cidarda çatlak oluşturduğu ya da deney sırasında erken çatlamalara yol açtığı belirlenmiştir. 0,25 ve 0,50 mm ezme derinlikleri için eş aralıklı ve uçtan itibaren ezme sıklığı arttırılmış numuneler hazırlanmıştır.



Şekil 18. Numune üzerinde yukarıdan aşağıya ezme sıklığı arttırılmış ve eş aralıklı ezilmiş (ezmeler arası mesafe 10 mm) numunelerin örnek görüntüsü. Çap (D)= 58 mm, cidar kalınlığı (t): 1,5 mm, ezme miktarı yaklaşık 0,50 mm.

Şekil 18'te 58 mm çap ve 1,5 mm cidar kalınlığına sahip alüminyum numunelerde yukarıdan aşağıya ezme sıklığı arttırılmış ve eş aralıklı ezilme durumun ait örnek görüntü verilmiştir. Söz konusu çap ve cidar kalınlığı için teorik hesaplamalardan ortalama katlanma boyunun ($2H$) 18,7 mm olduğu hesaplanmıştır. Eş aralıklı ezilen numunede serbest katlanma boyunun ezme etkisiyle azaltılması amacıyla iki ezme bölgesi arası 10 mm olarak alınmıştır.

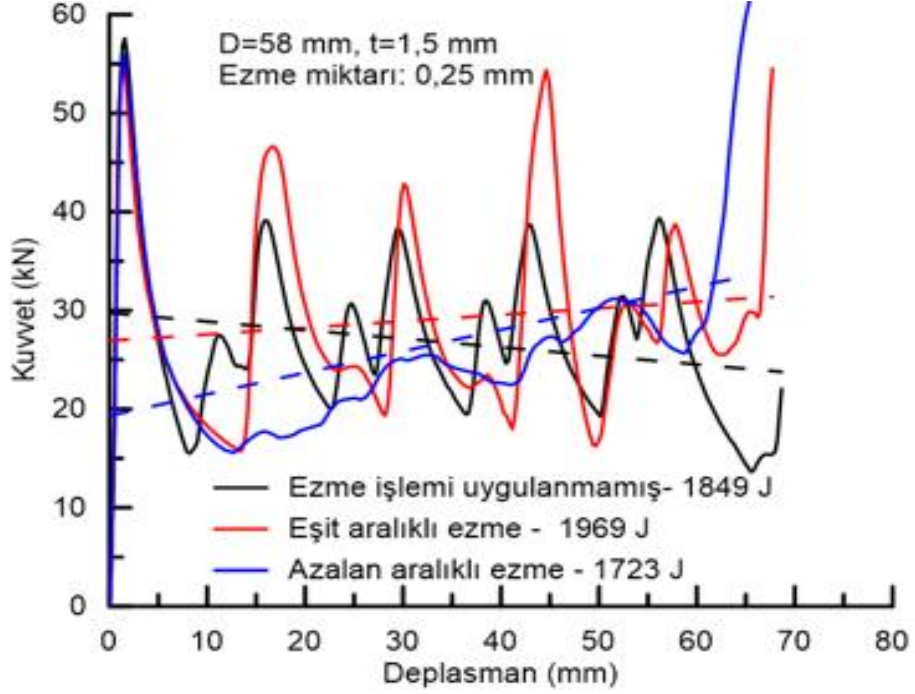
58 mm çaplı ($t=1,5$ mm) tüpün çevresel olarak ezme işlemi için öncesinde belirlenen ezme yeri ve ezilen bölgelerin ara mesafesi tüp üzerine işaretlenerek malafa desteğinde ezme işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 19).



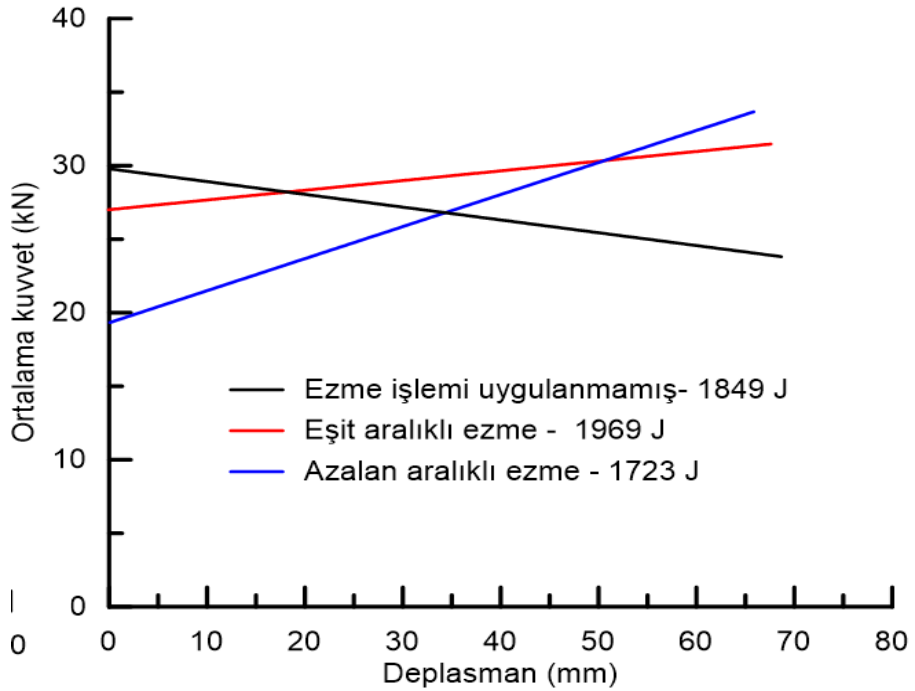
Şekil 19. Çapı 58 mm olan tüpte çevresel ezme işlem kademesi

Aşağıda sırasıyla 0,25 ve 0,50 mm ezme miktarına sahip eş mesafeli ve fonksiyonel derecelendirme işlemi (azalan aralıklı ezme işlemi) uygulanmış numunelerin kuvvet-deplasman grafikleri sırasıyla sunulmuştur. Şekil 20 'de 0,25 mm ezme miktarı için verilen eğriler incelendiğinde; tüm numuneler için ilk katlanma kuvvetinin değişmediği, eşit mesafede ezme işlemi uygulanmış numunenin son pik eğrisi hariç genel olarak yükselme eğilimi gösterdiği görülmektedir. Buna karşın azalan aralıklı ezilme işleminin numunenin katlanma/deformasyon direncine kötüleştirerek, işlem görmemiş duruma göre daha düşük performans sergilediği anlaşılmaktadır. Şekil 20a'da ortalama kuvvetin değişimi Şekil 20b'de daha açık bir şekilde görülmektedir. Buna göre, işlem görmemiş numunenin ortalama kuvveti, en yüksek başlangıç

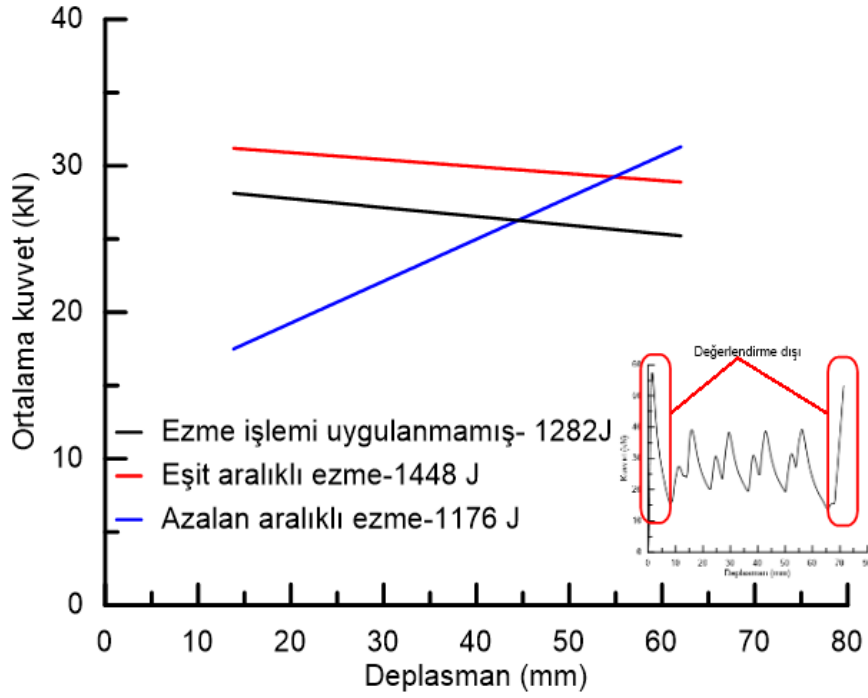
değerine sahip olmakla birlikte artan deplasmanla azalmakta, diğer numunelerde ise tersine artış söz konusudur. Azalan aralıklı numune için deplasmanla ortalama kuvvetin artış hızı en yüksek olup, başlangıç kuvvet değeri en düşüktür. Enerji absorbe etme açısından eşit mesafe ile ezme işleminin tercih edilebilir olduğu anlaşılmıştır.



(a)



(b)



(c)

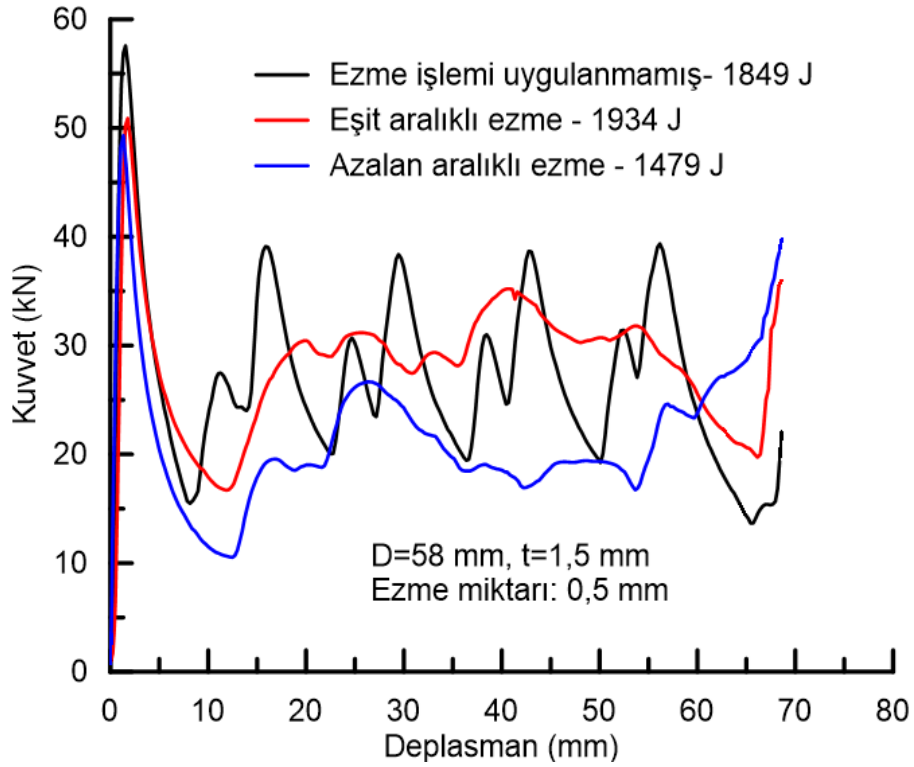
Şekil 20. 0,25 mm ezme miktarı için eşit mesafeli ve azalan aralıklı ezme işlemi uygulanmış numunelerin kuvvet-deplasman grafikleri

Numunenin nominal katlanma rejimi için yani eğrinin başlangıç ve son kısımdaki pik kısımların değerlendirme dışı tutulduğu aralık için incelemenin yapılması yerinde olacaktır (Şekil 20c). Buna göre, eşit mesafeli ezilen numunenin eğrisi, işlem görmemişe göre neredeyse paralel olarak uzanmasına rağmen, başlangıç ortalama kuvvet değeri daha yüksektir. Dolayısıyla numunede katlanma benzer şekilde cereyan etmiş ancak 10 mm olarak bırakılan serbest burkulma boyunda katlanma için gerekli kuvvetin daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır.

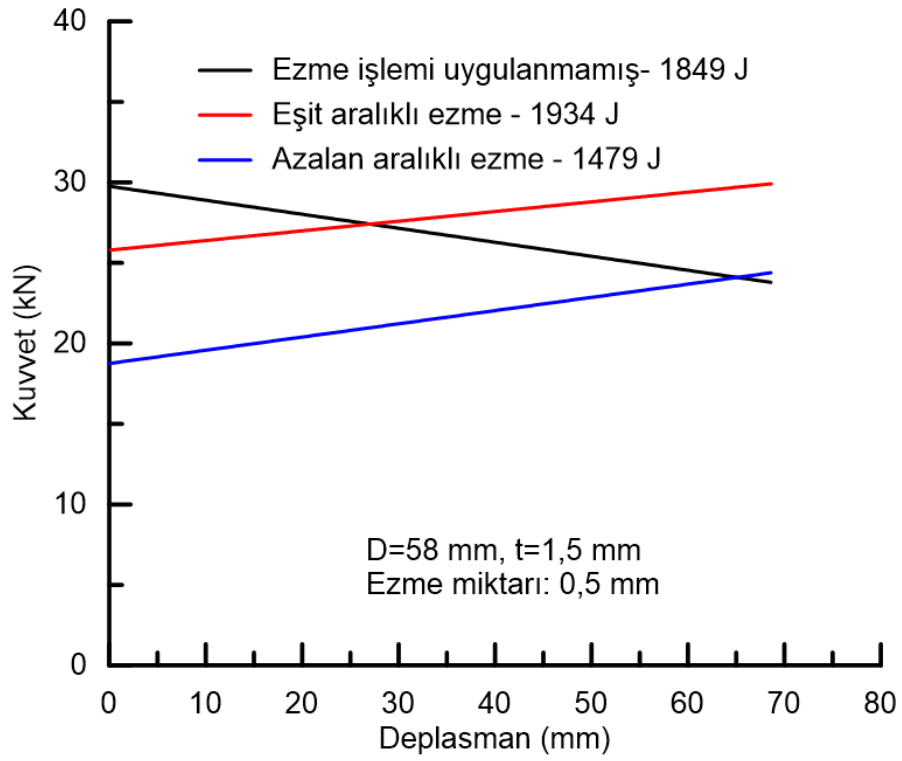
Şekil 21'de 0,5 mm ezme miktarı için eş aralıklı ezilmiş (serbest burkulma mesafesi 10 mm) ve azalan aralıklı ezme işlemi numunelerin kuvvet-deplasman grafiği verilmiştir. Görüldüğü gibi, her iki numune için deformasyonun simetrik türde gerçekleşmediği, azalan aralıklı ezilmiş numunenin en kötü performansı sergilediği dikkat çekmektedir. Eğride dikkat çeken diğer bir nokta, azalan aralıklı ezilmiş tüpün 65 mm deplasman sonrası aşırı deformasyon etkisiyle, yığılma durumunu işaret eden eğrideki yükselişin diğerlerine göre daha hızlı olmasıdır (Şekil 21). Bu durum, tüpün daha fazla ezme işleminden kaynaklanan pekleşme ve düzgün olmayan katlanmayla etkisiyle (yığılma) şekil değişimine daha fazla direnç göstermesiyle açıklanabilir. Eş aralıklı ezme işlemi uygulanmış numunenin nispi olarak ortalama kuvvetinin bir miktar yüksek olduğunu söylemek

mümkündür. Bu numune için aynı deplasman değeri için ezilme enerjisinin 85 J artarak, yaklaşık %5'lik bir iyileşme söz konusudur.

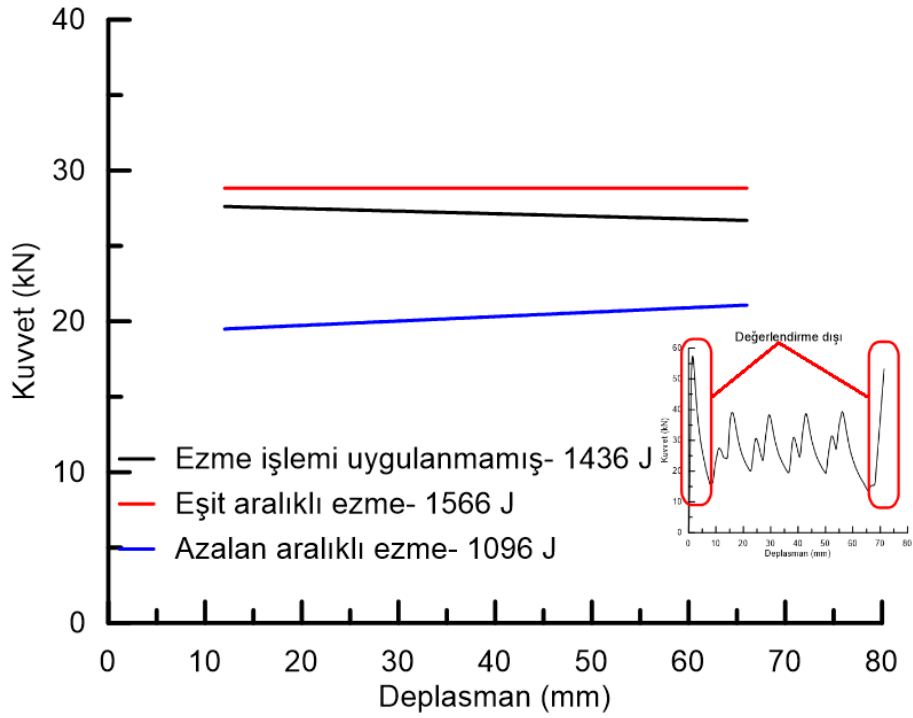
Şekil 21b'de ortalama kuvvetin değişimi daha açık bir şekilde görülmektedir. Buna göre, işlem görmemiş numunenin ortalama kuvveti, nispeten daha yüksek başlangıç değerine sahip olmakla birlikte artan deplasmanla azalmakta, diğer numunelerde ise tam tersine artış söz konusu olup, artış hızı yaklaşık olarak aynıdır.



(a)



(b)

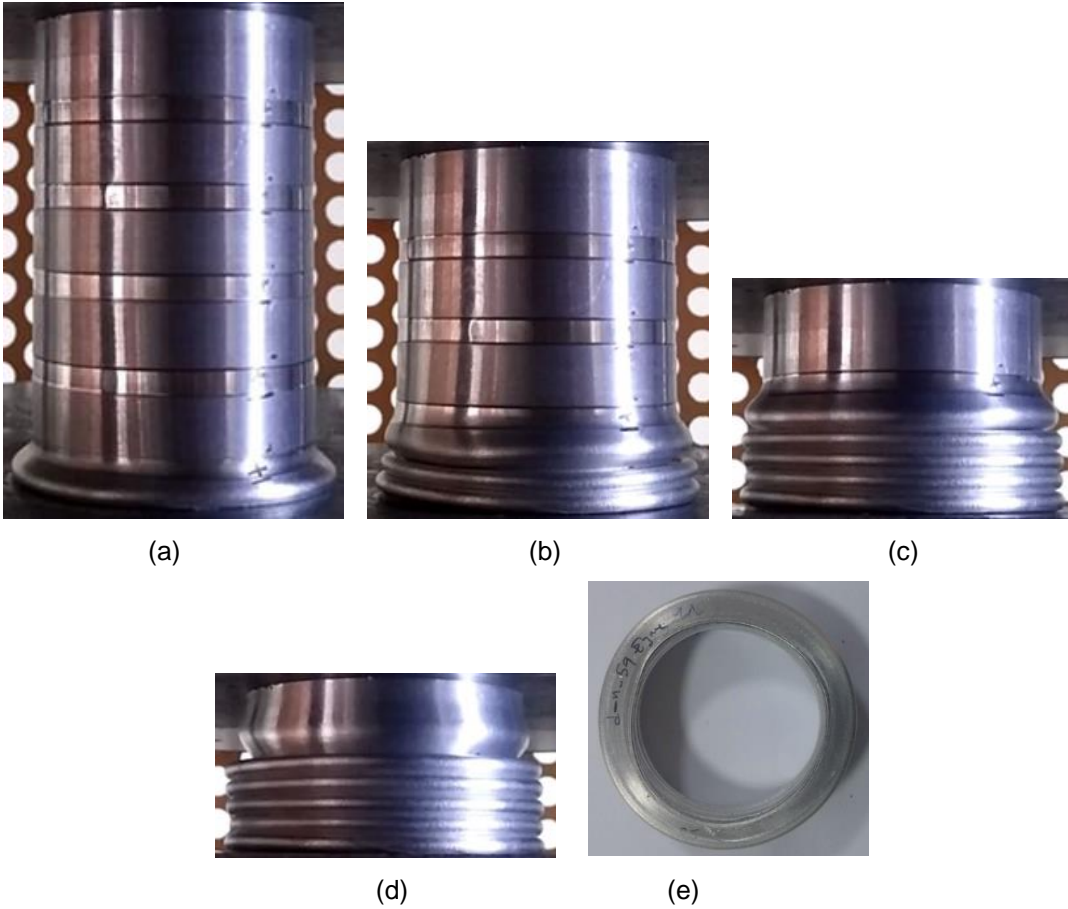


(c)

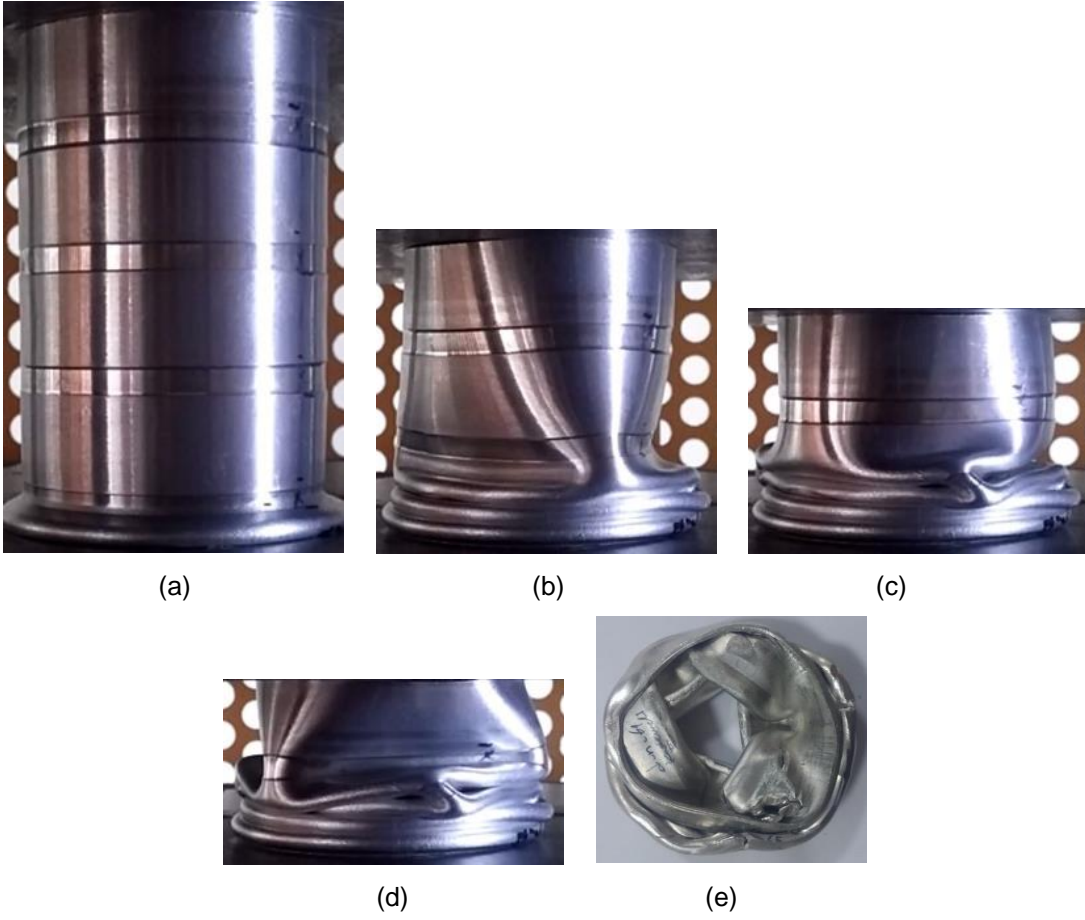
Şekil 21. 0,5 mm ezme miktarı için eşit mesafeli ve azalan aralıklı ezme işlemi uygulanmış numunelerin kuvvet-deplasman grafikleri

Azalan aralıklı numuneye ait başlangıç ortalama kuvvet değeri en düşük olanıdır. Bu grup numuneler için de enerji absorbe etme açısından eşit mesafe ile ezme işleminin tercih edilebilir olduğu anlaşılmıştır. Şekil 21c'de eğrinin başlangıç ve son kısmına ait piklerin değerlendirme dışı tutulduğu grafik verilmiştir. Grafikten, eşit mesafeli ezilen numunenin işlem görmemişe göre ortalama kuvvet değeri bir miktar daha yüksek olup, artan deplasmanla değerini koruduğu ve genel olarak en iyi performansı sağladığı görülmektedir.

Şekil 22'de 0,25 mm ezme miktarı ve eşit aralıklı ezme durumu için deformasyon davranışına ait görüntüler verilmiştir. Şekilden anlaşılacağı üzere, simetrik katlanmanın etkin olduğu, katlanma başlangıcının tüpün alt kısmı olduğu görülmektedir. Aynı ezme şiddetinin azalan aralık için uygulandığı numunenin katlanma davranışı simetrik olarak başlamasına rağmen, bir buçuk kat oluşumu sonrasında deformasyon elmas modda devam ettiği gözlenmektedir (Şekil 23).

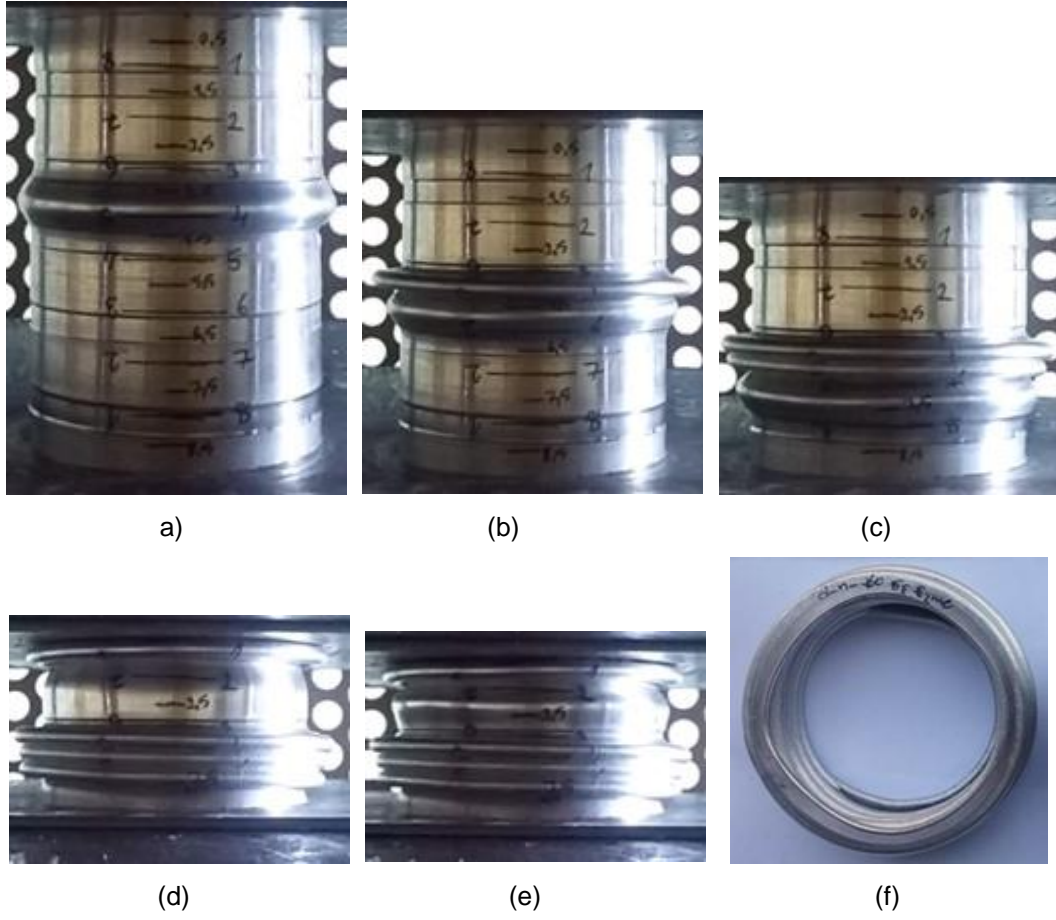


Şekil 22. 0,25 mm ezme miktarı ve eşit aralıklı ezme durumu için deformasyon davranışı.



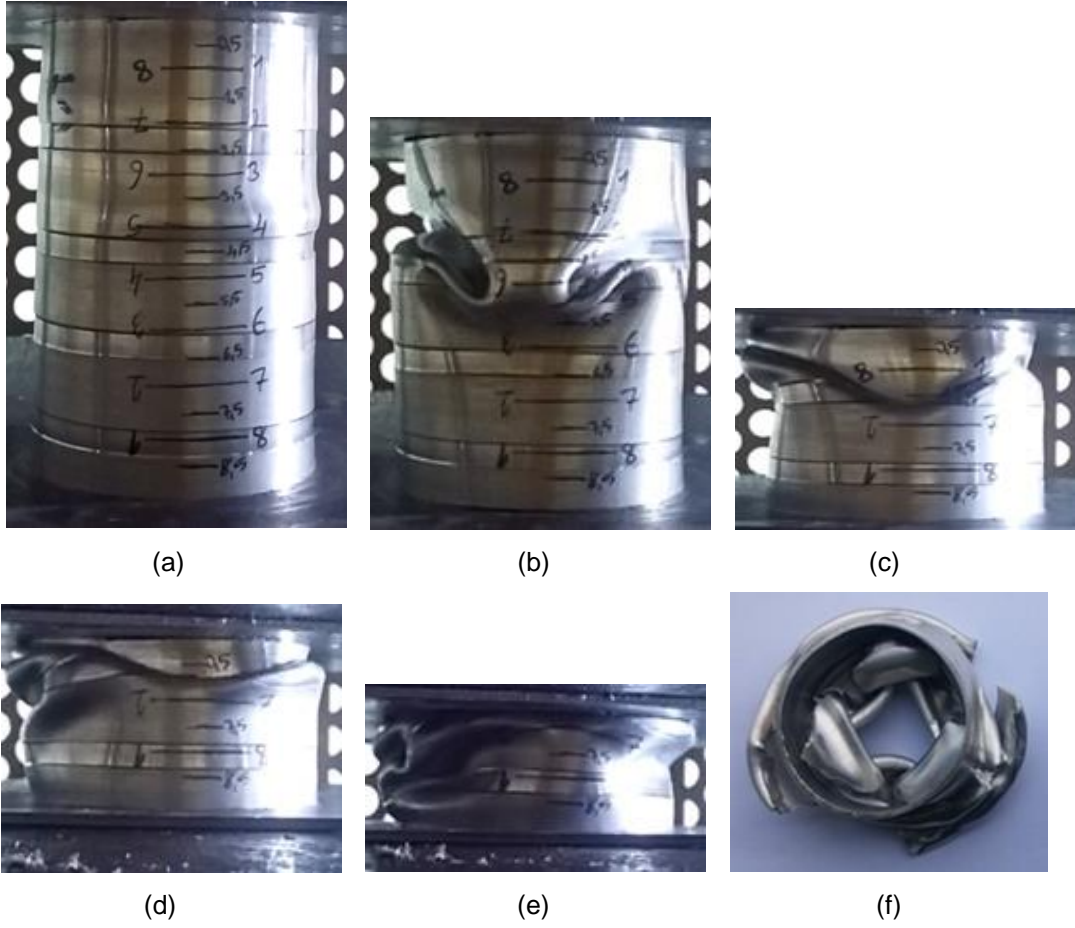
Şekil 23. 0,25 mm ezme miktarı ve azalan aralıklı ezme durumu için deformasyon davranışı

Şekil 24'de 0,50 mm ezme miktarı için eşit mesafeli ezme durumu için verilen görüntülerden, cidarda ilk burkulmanın tüpün orta kısmında başladığı oluşan ilk katlanmaya ilave olarak simetrik kat sayısının artarak deformasyonun devam ettiği görülmektedir. Tüpte oluşan katlanmanın simetrik türde gerçekleşmesi, ezilen iki bölge arası yani serbest burkulma mesafesinin tüm tüp kesiti için düzgün bir şekilde sağlandığının önemli bir göstergesidir. Kuvvet-deplasman grafiğinin formu da bu davranışı destekleyen bir diğer bulguyu oluşturmaktadır.



Şekil 24. 0,50 mm ezme miktarı ve eşit aralıklı ezme durumu için deformasyon davranışı

Aynı ezme miktarı (0,5 mm) ancak azalan aralıklı ezme durumu için elde edilen deformasyon davranışı Şekil 25’de verilmiştir. Bu grup numunelerde, katlanmanın elmas moda göre gerçekleştiği, tekrarlanan deneylerle ispat edilmiştir.

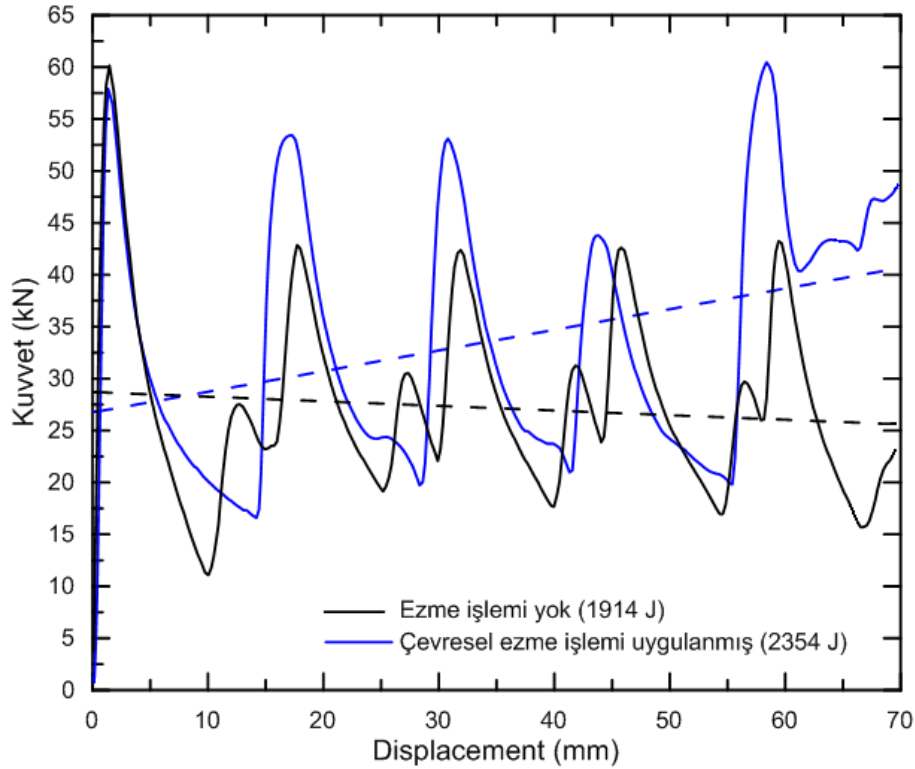


Şekil 25. 0,5 mm ezme miktarı ve azalan aralıklı ezme durumu için deformasyon davranışı.

Çevresel ezme işlemi metalik malzemeye ön şekil vererek pekleştirme ve bu sayede bölgesel dayanım artışları sağlanmasına olanak sağlayan bir işlemdir. Aynı zamanda burkulma şeklinde gerçekleşen katlanma davranışını, burkulma boyunu kısaltarak zorlaştırmaktadır. Bu iki bileşik etkiyle metalik tüpün absorbe edebileceği enerji seviyelerinde artış sağlanabilmektedir. Ancak alüminyum gibi pekleşme oranının düşük olduğu (çekme dayanımı/akma dayanımı oranı düşük olan) malzemelerde ezme derinliği üzerinden çok daha hassas durulması gereken bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır.

Ezme aralığının, azalan ezme durumunda numunelerde düzgün katlanmanın bozulmasına, numunede deney sonlarına doğru yığılmaya sebep olduğu tespit edildiğinden ezme aralığı olarak optimum değer olan 10 mm belirlenmiştir. Ancak Şekil 14'te verilen cidar ezme makinesiyle çok sayıda ezme işlemi yapılması nedeniyle numunenin yerleştirildiği dönen milde bir miktar deformasyon gerçekleştiği gözlenmiştir. Bu deformasyon ezme işleminin tüm cidarda homojen

olmasını engellemekte, katlanma davranışının dolayısıyla enerjinin verimli şekilde artmasına mani olmaktadır. Ezme cihazında revizyon yapılarak dönen mil değiştirilmiş ve ezme derinli daha hassas ayarlanacak şekilde tekrar düznelenmiştir. Bu iyileştirmelerden sonra tüp cidarlarında daha homojen bir ezme gerçekleştirilmiş ve Şekil 26'de verilen kuvvet-deplasman grafiğinden de görülebileceği üzere 0,25 mm ezme derinliğinde yaklaşık %23 değerinde bir enerji artışı sağlanmıştır.



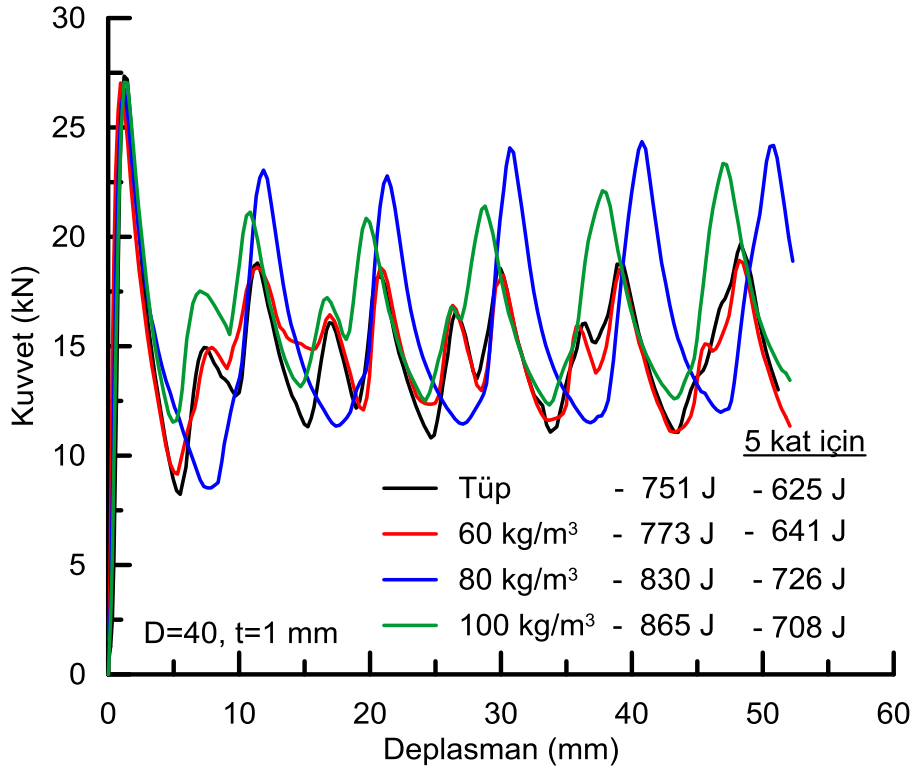
Şekil 26. 0,25 mm ezme derinliğine sahip tüpe ait kuvvet-deplasman grafiği

3.2.2. İçeriden (PVC Köpük) Takviyeli Numuneler

Bu bölümde içeriden PVC köpükler ile takviye edilen alüminyum tüplerin deney verileri bulunmaktadır. Deneyler kullanılan alüminyum tüplerin boyutlarına göre iki gruba ayrılmaktadır. İlk grup, 40 mm çaplı ve 1 mm et kalınlığında, PVC köpüğün alüminyum tüple birlikte sergilediği deformasyon davranışını ve enerji absorbesine yaptığı katkının araştırıldığı numunelerdir. İkinci grup ise 58 mm çaplı ve 1,5 mm et kalınlığındaki numunelerdir.

Alüminyum tüplerin PVC köpüklerle takviye edilmeleri durumu kendi içerisinde üç ana kısımda incelenmiştir;

- 1- Tek tip yoğunluklu PVC köpüklerle takviye durumu
- 2- Fonksiyonel derecelendirilmiş (sıralı yoğunluklu) PVC köpüklerle takviye durumu
- 3- Sandviç model PVC köpüklerle takviye durumu

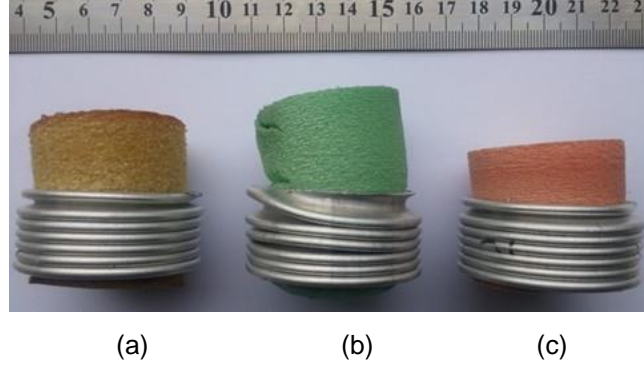


Şekil 27. Farklı yoğunlukta PVC köpük ile takviye edilen numunelerin kuvvet-deplasman grafiği

İlk grup numunelerin farklı yoğunlukta PVC köpük ile içeriden takviye edilme durumuna ait kuvvet-deplasman grafiğinden (Şekil 27), genel olarak katlanma bitiş noktalarının sağa doğru ötelendiği ve katlanma pik kuvvetleri artmıştır. Dolayısıyla absorbe edilen enerji değerlerinde iyileşme sağlandığı görülmektedir. İncelemenin beş kat sayısı için yapılması durumunda, katlanma için harcanması gereken enerji değerinin yoğunluğu 80 kg/m³ olan köpük için en iyi olduğu anlaşılmaktadır.

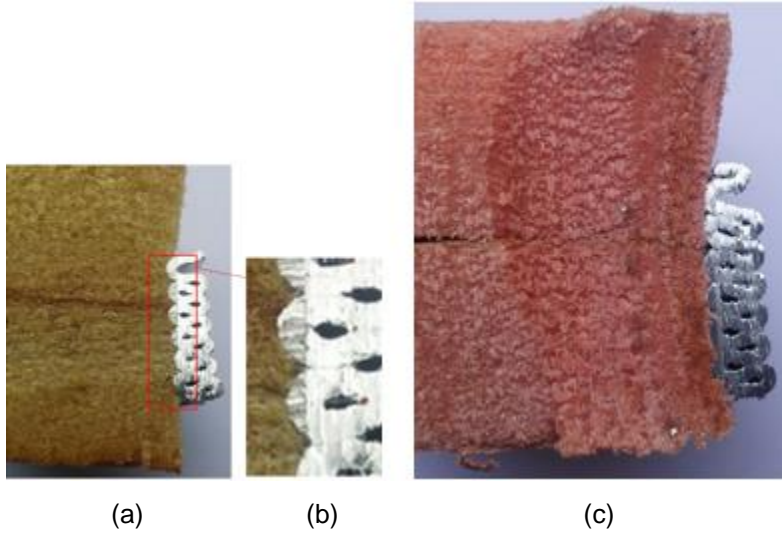
Şekil 28'de farklı yoğunlukta PVC köpük ile içeriden takviye edilen numunelerin deney sonrası görünümü verilmiştir. Yükün kaldırılması sonrasında, köpüğün sıkışmış olmasına rağmen bir

kısımının dışarıya çıkmaya çalışması, köpüğün sergilediği elastik davranıştan kaynaklanmakta ve genelde kat aralarına sıkışan kısım ise numune içinde kalmaktadır.



Şekil 28. Farklı yoğunluktaki PVC köpük ile takviye edilen numunelerin deney sonrası görünümü

Şekil 29'da verilen 60 kg/m^3 ve 100 kg/m^3 yoğunluk için numunelerin deney sonrası kesit görünümünden, katlanma esnasında kat arasına girmenin düşük yoğunluklu köpükte daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. Elde edilen görüntülerin deney sonrası, yani yük kaldırıldıktan sonra elde edilmiş olması, köpüğün katlanma esnasında ne oranda kat arasına sıkıştığı sorusuna tam olarak cevap vermemektedir. Bu konu büyük çaplı (58 mm) tüpler ile yapılan çalışmalarda daha da detaylı ele alınmıştır.

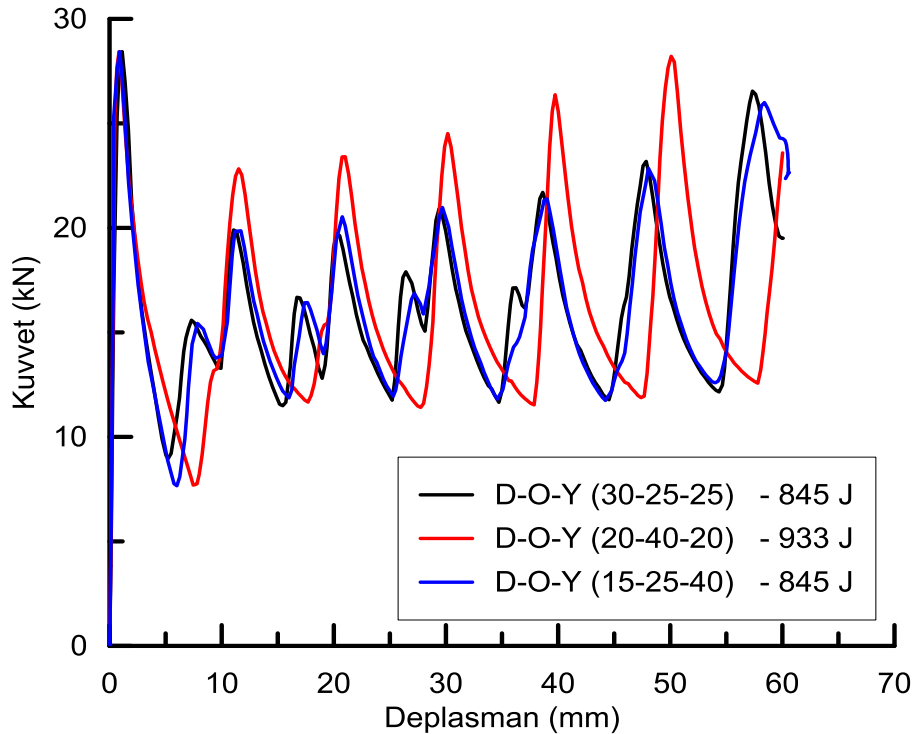


Şekil 29. (a-b) 60 ve (c) 100 kg/m^3 yoğunluktaki PVC köpük ile içeriden takviye edilen numunelerin deney sonrası kesit görünümü

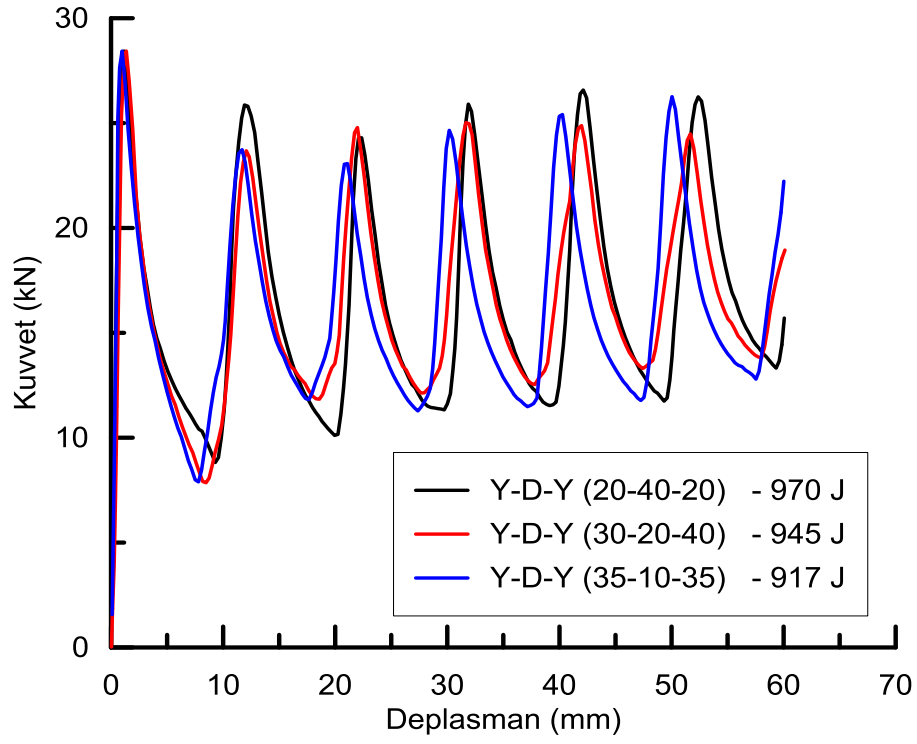
Fonksiyonel derecelendirilmiş (sıralı) PVC köpük takviyeli numunelerde üç farklı yoğunlukta, üç tabaka köpük bulunmaktadır. Bu köpüklerin tüp içerisindeki yoğunluk sırasıysa düşük, orta ve

yüksek olacak şeklindedir. Fonksiyonel derecelendirilmiş şekilde takviye edilmiş numunelerde değişken parametre, köpük tabakalarının yükseklikleridir. Köpük yükseklikleri değiştirilerek en yüksek enerji absorbe seviyesinin hangi yükseklik kombinasyonunda elde edileceği araştırılmıştır. Sandviç yapıllı takviye modelde, köpüklerin fonksiyonel derecelendirilmiş numunelere benzer şekilde üç katman olarak tüp içerisine yerleştirildiği numunelerdir. Ancak bu modelde köpük yoğunlukları sıralı değil de alt ve üst tabaka aynı yoğunlukta orta tabaka farklı yoğunlukta olacak şekilde sıralanmıştır.

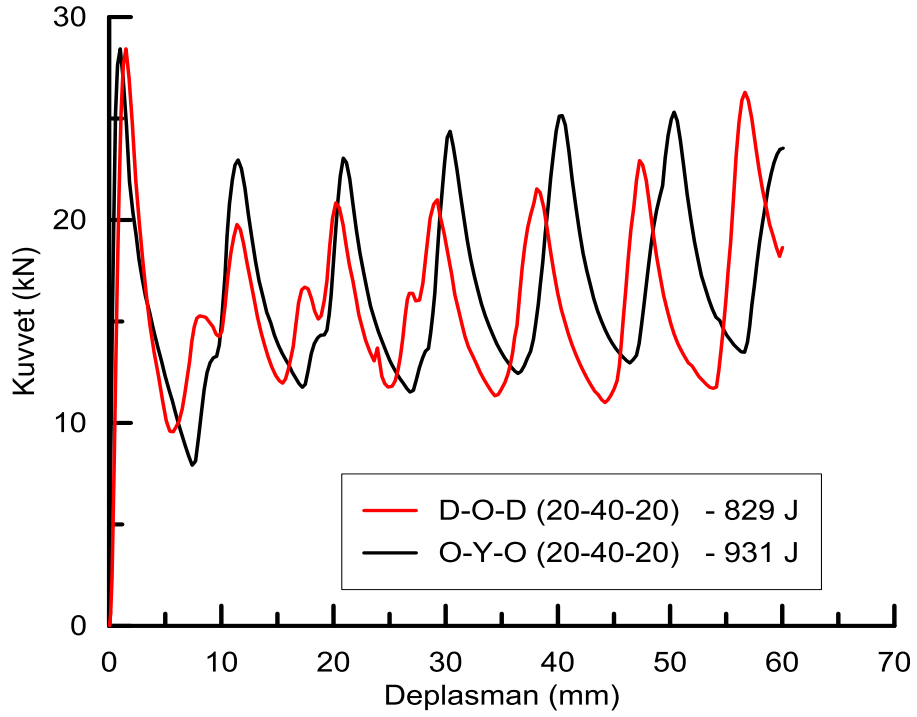
Fonksiyonel dereceli ve sandviç yapıllı numunelerin, alüminyum tüpün kuvvet-deplasman grafiğine olan etkisi Şekil 30'de görülmektedir. Buna göre, fonksiyonel derecelendirilmiş yapının, tek tip köpük takviyesi için DOY (D:düşük, O:orta, Y:yüksek) yoğunluk sırası için en iyi durum, 20-40-20 mm kalınlıklar için 933 J ile elde edilmiştir. Katlanmanın düşük yoğunluklu kısımda başlaması, artan deplasmanla 20 mm sonuna doğru sıkışarak yoğunluğu ve sertliği artan ilk katman, daha sonra son katman ile kendisi arasında ortada yer alan köpük katmanını ezmeye zorlamaktadır. Orta yoğunluk için en iyi enerji değeri, kat arasına sıkışma olayı ile daha da belirginleşmektedir. Sandviç yapıda ortada düşük yoğunluklu ve katman kalınlığı mümkün olduğunca yüksek olan (40 mm) Y-D-Y sıralı kombinasyon 970 J ile en yüksek enerjini sunmaktadır. (Şekil 30b). Eş kalınlıkta ancak D-O-D ve O-Y-O yoğunluk sırası için grafikler Şekil 30c'de verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 30. (a) Fonksiyonel derecelendirilmiş, (b) ve (c) sandviç yapıli köpük takviyeli tüplerin kuvvet-deplasman grafiği. *Not: tüm enerji değerleri 6 kat adedi için belirlenmiştir.*

Tablo 2’de sabit yoğunluklu, fonksiyonel dereceli ve sandviç yapılı köpük takviyesi için katman kalınlıkları ve deney sonucu edilen enerji değerleri verilmiştir. Enerji değerlerinin hesaplanmasında her numune için eşit katlanma sayısı esas alınmıştır. Buna göre en yüksek enerji değerinin 80 kg/m³ (orta sertlik) yoğunluktaki PVC köpükte elde edildiği görülmüştür. Yüksek yoğunluklu köpükte, yüksek ezilme plato değeri nedeniyle, tüpün ezilme direncine olan katkısının daha yüksek olması beklenen bir sonuç olmakla birlikte, tam sıkışma durumunun söz konusu olduğu, kat arasında ezilen köpüğün numunenin ezilme direncine ilave katkı sağlaması da mümkündür. Burada mutlaka göz önünde tutulması gereken nokta, yoğunluk ile kat arasına sıkışmanın tüm çap ve cidar kalınlıkları için genelleme yapılamayacağıdır. Küçük çaplı ve ince cidarlı tüpler için kat boyunun kısa olması nedeniyle, köpük yapının kat arasına sıkışması çok daha önemsiz kalacaktır.

Tablo 2. Sabit yoğunluklu, fonksiyonel dereceli ve sandviç yapılı köpük takviyesi için katman kalınlıkları ve deney sonucu edilen enerji değerleri (D=40, t=1, L=80 mm).

D=40 mm t=1 mm		Köpük katman kalınlıkları (mm)			Toplam köpük kalınlığı (mm)	Absorbe edilen enerji (J)
		1.	2.	3.		
Sabit yoğunluklu	1	40	0	40	80	641
	2	40	0	40	80	726
	3	30	20	30	80	708
Fonksiyonel Dereceli	4	30	25	25	80	845
	5	20	40	20	80	933
	6	15	25	40	80	845
Sandviç	7	20	40	20	80	829
	8	20	40	20	80	931
	9	20	40	20	80	970
	10	30	20	30	80	945
	11	35	10	35	80	917

Not: Tüm kombinasyonlar için katlanma “1” numaralı katmanın bulunduğu tarafında başlamaktadır.

Tablo 2’de verilen enerji değerleri incelendiğinde, artan yoğunluk sırası (60-80-100 kg/m³) ile belli kalınlıklarda fonksiyonel olarak derecelendirilmiş köpük takviyeli numuneler için orta sertlikteki köpüğün katman kalınlığındaki artış ile enerji değerinin orantılı olarak arttığı görülmektedir. Üst ve alt kısımda aynı, orta kısımda ise farklı yoğunlukta köpüğün bulunduğu sandviç takviyeli numunelerdeyse, ortada en düşük yoğunluklu, üst ve altta ise en yüksek yoğunluklu köpük katmanının ikame edilmesi halinde ortadaki katman kalınlığı ile enerji değeri artarak maksimum değere ulaşmaktadır (9-11). 9 numaralı kombinasyonda, düşük yoğunluklu köpük katmanı daha

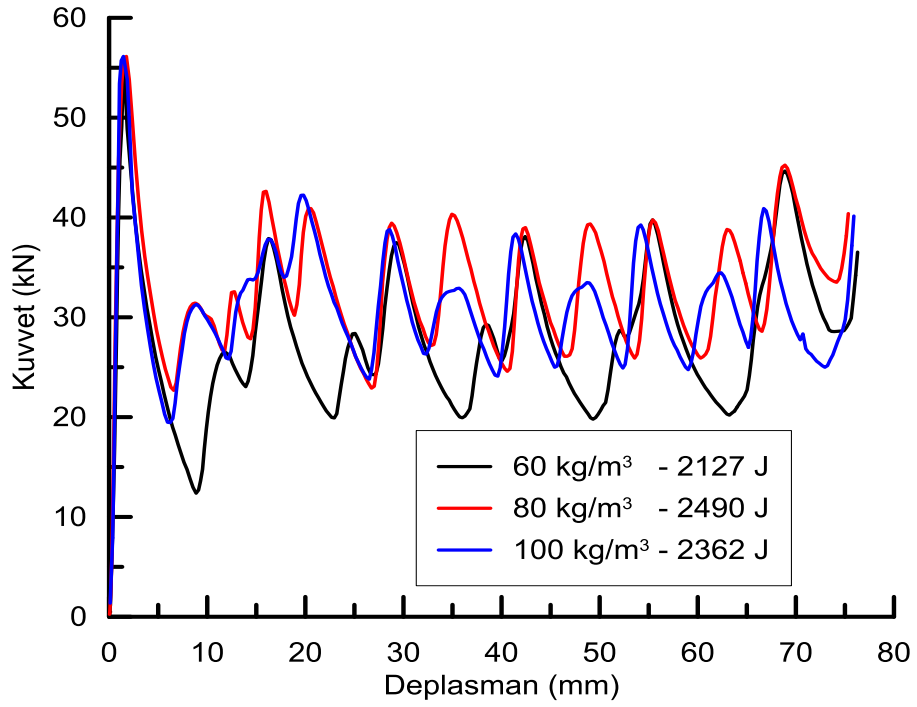
sert ve rijit davranan iki yüksek yoğunluklu katman arasında sıkışmaya zorlanmakta ve bu zorlanma köpüğün yanal doğrultudaki hareketini kolaylaştırdığı düşünülmektedir. Dolayısıyla kat arasında sıkışma daha etkin bir şekilde kendisini hissettirmektedir. Bu yaklaşımı doğrulayan bir diğer bulgu, 7-11 kombinasyonlarından ilk üçü için düşük yoğunluklu katman kalınlığı eşit olmasına rağmen, sıralamanın etkisi, 7 numaralı için yoğunluk da davranışı etkilediği görülmektedir.

Bu deney verileri göz önüne alınarak, farklı köpük yoğunluğu kalınlık ve sırasının etkisi ana çaplı tüpler için daha detaylı bir şekilde ele alınmış, özellikle sandviç yapıda elde edilen artışın nedenleri köpük üzerinde yapılan deneylerle araştırılmıştır. Burada ilk olarak açığa kavuşturulması gereken soru, köpüğün kat arasına sıkışmasının deformasyon başlangıcından itibaren mi başladığı, yoksa tam ezilme durumu sonrası ezilen numunenin hacmi arasında hapsolmesinden mi kaynaklandığıdır.

58 mm Çaplı Tüplerin İçeriden Takviye Edildiği Durum

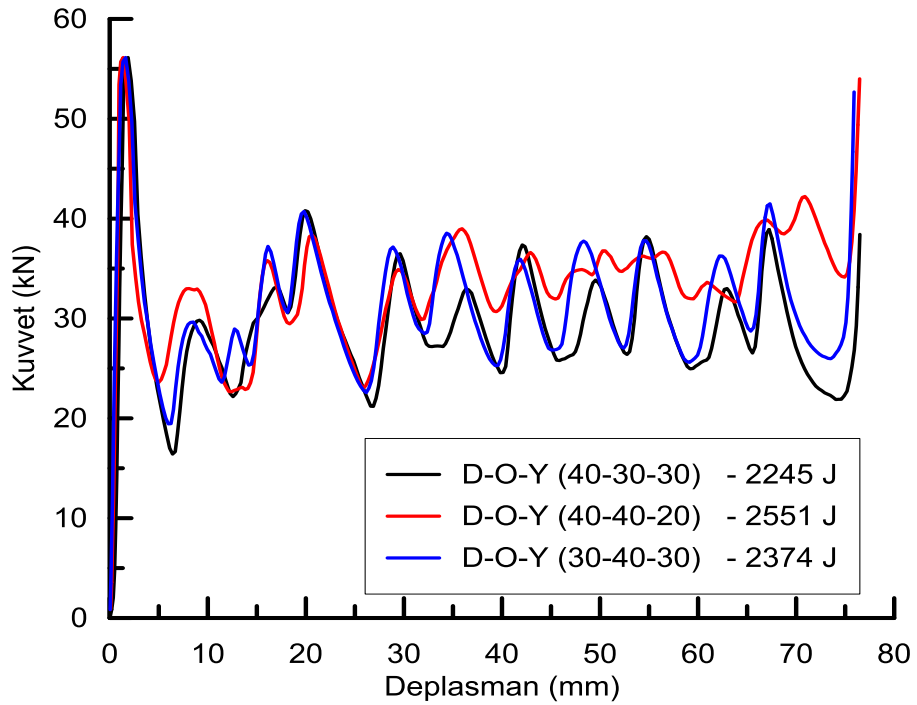
PVC köpüklerle yapılan takviye işlemlerinde kullanılan bir diğer tüp çapı 58 mm'dir. Bu tip tüpler için yukarıda 40 mm çapındaki tüplerde kullanılan köpük takviye modelleri kullanılmıştır. Ancak tüp çapının artması ve köpük katman kalınlıklarının tüp uzunluğu arttığı için artması, köpüğün tüpe sağladığı takviyenin daha verimli olduğunu göstermiştir. Bu bağlamda bu tip tüplerde sırasıyla tek tip yoğunluklu köpük takviyeli, fonksiyonel (sıralı) köpük takviyeli ve sandviç model köpük takviyeli olarak ezme yükü altında deneye tabi tutulmuştur. Elde edilen enerji artışları 40 mm tüplerde elde edilen verilerle paralellik göstermektedir.

Farklı yoğunluktaki PVC köpükler ile tek tip olarak içeriden takviye edilen numunelerin kuvvet-deplasman grafikleri aşağıda verilmiştir. Grafikten anlaşılacağı üzere, 6 katlanma adedi için absorbe edilen enerji 80 kg/m^3 olan orta yoğunluktaki köpükle takviye edilen numunelerde en yüksektir (Şekil 31).

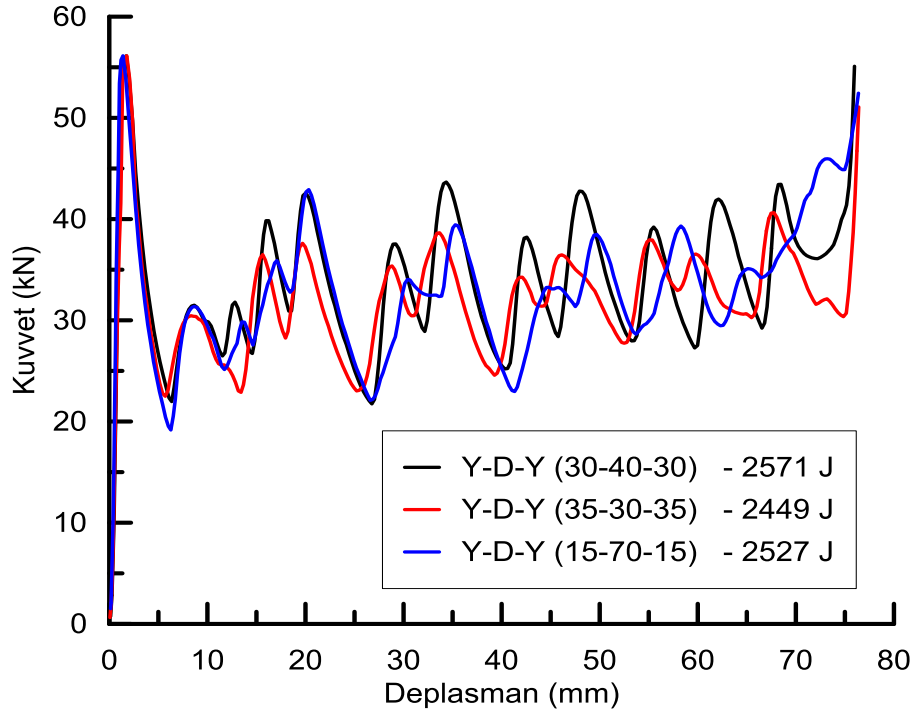


Şekil 31 Farklı yoğunluktaki PVC köpük ile takviye edilen numunelerin kuvvet-deplasman grafiği

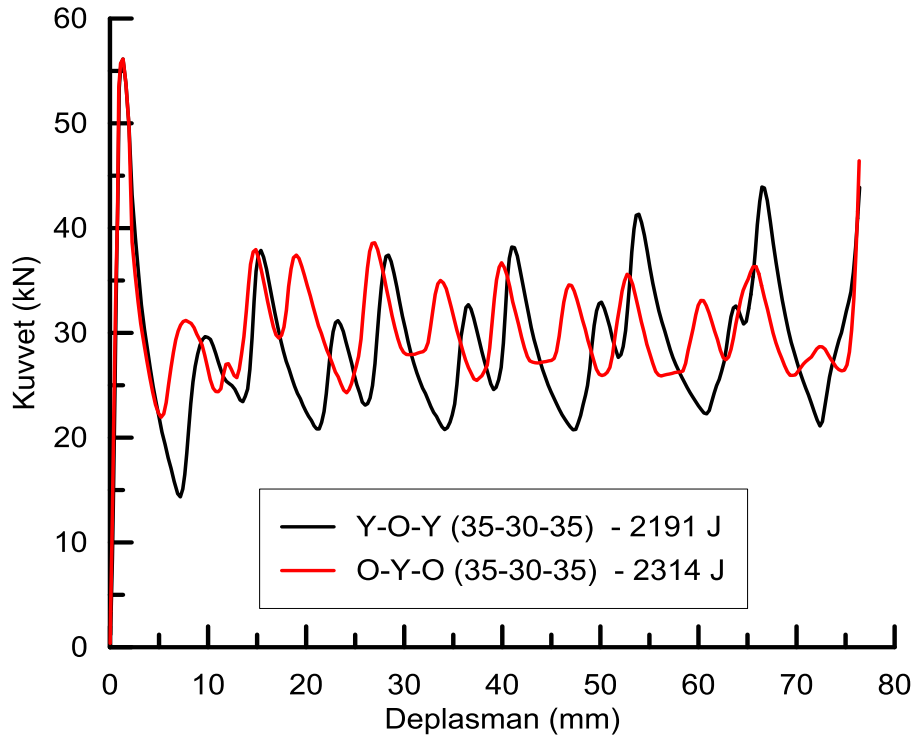
Aşağıdaki Şekil 32a'da fonksiyonel derecelendirilmiş numunelere ait kuvvet-deplasman grafikleri, Şekil 32b ve Şekil 32c'de ise sandviç modele ait kuvvet-deplasman grafikler verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 32. (a) Fonksiyonel derecelendirilmiş, (b) ve (c) sandviç yapıli köpük takviyeli tüplerin kuvvet-deplasman grafiği. *Not: tüm enerji değerleri 6 kat adedi için belirlenmiştir.*

Tablo 3’de 58 mm çaplı ($t=1,5$ mm) tüpe içeriden sabit yoğunluklu, fonksiyonel dereceli ve sandviç yapılı köpük takviyesine ait katman kalınlıkları ve deney sonucu edilen enerji değerleri verilmiştir. Bu çap için de elde edilen sonuçlar genel olarak ön deney sonuçlarıyla örtüşmektedir. Orta yoğunluktaki köpüğün eş kat sayısı için daha tercih edilebilir enerji absorbe etme kabiliyetine sahip olduğu görülmektedir. Artan yoğunluk sırası ($60-80-100$ kg/m^3) ile belli kalınlıklarda fonksiyonel olarak derecelendirilmiş köpük takviyeli numuneler için orta sertlikteki köpüğün katman kalınlığındaki artış ile enerji değerinin orantılı olarak arttığı görülmüştür (5 ve 6 numaralı kombinasyon). 5 numaralı kombinasyon 2551 J ile en yoğun köpük için sağlanan enerjiden oldukça yüksek olduğu görülmektedir.

Tablo 3. Sabit yoğunluklu, fonksiyonel derecelendirilmiş ve sandviç yapılı köpük takviyesi için katman kalınlıkları ve deney sonucu edilen enerji değerleri (58 mm, $t=1,5$ mm).

D=58 mm t=1,5 mm		Katman kalınlıkları (mm)			Toplam köpük kalınlığı (mm)	Absorbe edilen enerji (J)
		1.	2.	3.		
Yekpare	1	40	20	40	100	2127
	2	50	0	50	100	2490
	3	38	24	38	100	2362
Fonksiyonel dereceli	4	40	30	30	100	2245
	5	40	40	20	100	2551
	6	30	40	30	100	2374
Sandviç	7	35	30	35	100	2314
	8	35	30	35	100	2191
	9	15	70	15	100	2527
	10	30	40	30	100	2571
	11	35	30	35	100	2449

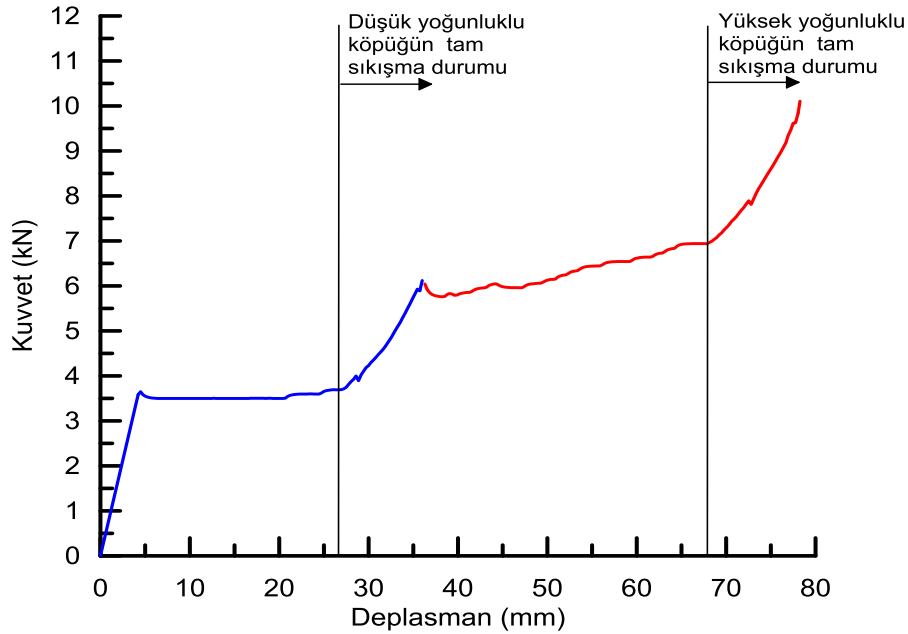
Not: deney sırasında hareketli plaka “1” numaralı katman tarafında olup, katlanma da söz konusu taraftan başlamıştır.

Sandviç yapılı köpük takviyesi için, alt ve üst katmanların yüksek yoğunluk, orta katmanın ise en düşük yoğunluklu köpük kullanımı genelde en iyi sonucu vermektedir. Sabit yoğunluk için en iyi enerji değeri 2490 J dikkate alınırsa, 9-11 numaralı üç kombinasyonun tercih edilebilir olduğu görülmektedir. Enerji değerlerindeki artışın nedeni, 40 mm çaplı tüp deneylerinde tespit edilen kat aralarına sıkışma olayı ile ilgili olduğu düşünülmektedir.

Tüp yapı içerisinde köpüğün davranışını daha kolay irdeleyebilmek için, “10” numaralı kombinasyonda kullanılan köpüklerin deneyi yapılmış ve elde edilen kuvvet-deplasman grafiği

aşağıda verilmiştir (Şekil 33). Şekilde görüldüğü deney başlangıcında öncelikle düşük yoğunluklu köpük deformasyona başlamakta, yaklaşık 3,5 kN'da kuvvette plato değerini ulaşmakta ve 25 mm sonrasında tam ezilme (densification) rejimine girmektedir. Sonrasında 6 kN değerinden sonra yüksek yoğunluklu köpük deformasyona başlamakta ve nihayet 7 kN sonrası tam ezilme hali grafikte kendini hissettirmektedir. Şekil 33b'de deformasyonun alt ve üstte yer alan, yoğun dolayısıyla daha rijit iki köpüğün arasındaki düşük yoğunluklu köpükte yoğunlaştığı anlaşılmaktadır. İlerleyen deformasyonla kalınlıklar dikkat edilecek olursa, deformasyonun ortadaki düşük yoğunluk köpükte üzerinden devam ettiği anlaşılmaktadır. Ortadaki köpüğün tam ezilme durumundan, bir anlamda rijitleşmesi sonrası yüksek yoğunluklu köpükler dönüşümlü olarak deformasyona uğramaktadır.

Şekil 34'de görülen çapraz köşelerdeki şişme veya daralma olayı burkulmadan kaynaklandığı ve bu olayın tüp içinde gerçekleşmeyeceği düşünülmektedir. Diğer taraftan, ortada düşük yoğunluklu köpük ile alt ve üstteki köpük birleşim kısımlarında hem yük altında, hem de yük kaldırıldıktan sonra gözlenen, radyal yönde dışarıya doğru olan şişme hareketi, köpüğün kat arasına sıkışmasına teşvik edici bir etken olduğunu söylemek mümkündür. Dolayısıyla farklı yoğunluklu köpüklerle tasarlanmış bir sandviç yapının enerji değerinin yükselmesinin nedeni (a) deformasyonun öncelikle belirli bölgede başlatılması/yoğunlaştırılması (b) farklı yoğunluklu köpük geçişlerinde dışa şişme olayının gerçekleşmesi gibi etkenlere bağlanabilir.

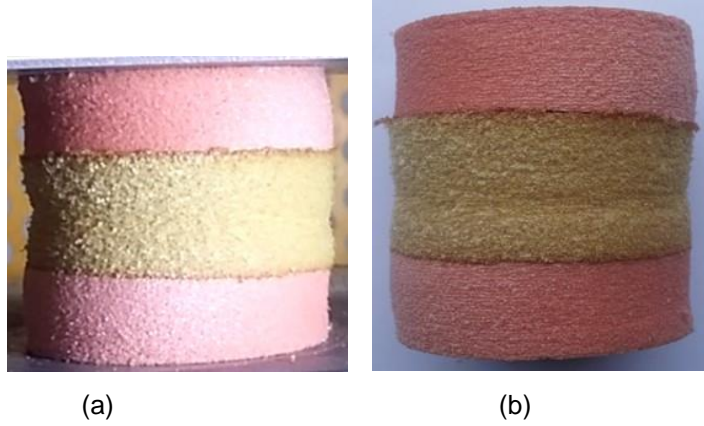


(a)



(b)

Şekil 33. “10” numaralı kombinasyona ait (30/40/30) köpüklerin (a) kuvvet-deplasman grafiği (b) deney sırasında köpüğün deformasyon görüntüsü



(a)

(b)

Şekil 34. Köpük katman geçişlerindeki şekil değişimi. (a) deney sırasında yük altında (b) yük kaldırıldıktan sonra.

İçeriden PVC Köpük ve Kauçuğun Birlikte Takviye Edildiği Numuneler

Azalan ve eş aralıklı köpük katmanları arasına, yerleştirilen 4 mm kalınlığındaki kauçuk plakaların (70 shore) kullanıldığı içeriden takviye için hazırlanan numunelerin görünümü Şekil 35’da verilmiştir. Eş aralıklı numunede 10 mm sabit köpük kalınlığı için 6 katman kauçuk plaka yerleştirilmiştir. Azalan aralıklı takviye durumunda ise köpük katmanlarının kalınlığı sırasıyla 20-15-15-10-10 şeklindedir (Şekil 35b).

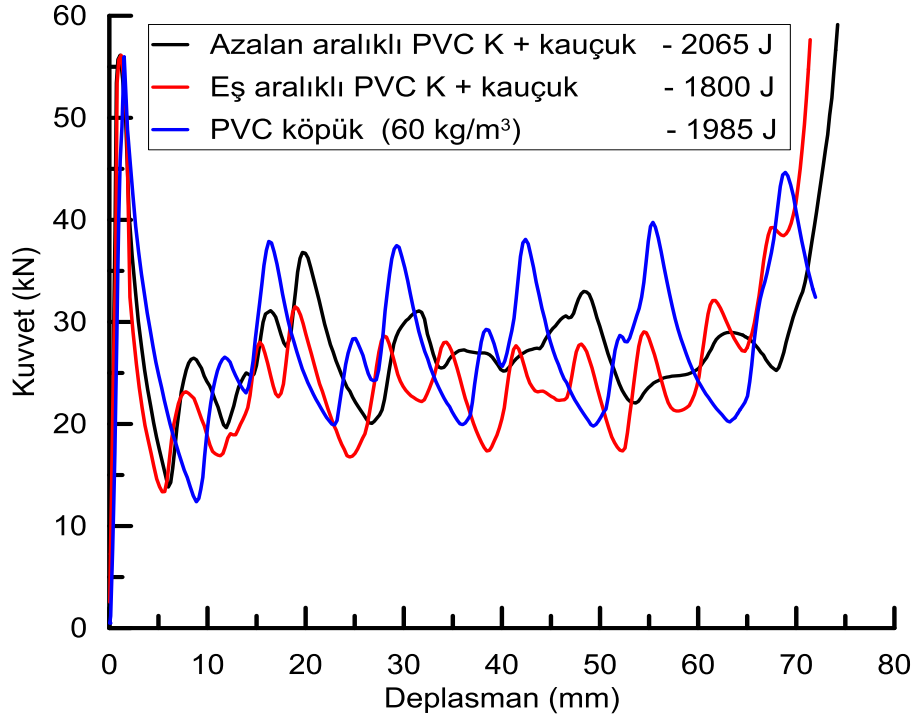


(a)

(b)

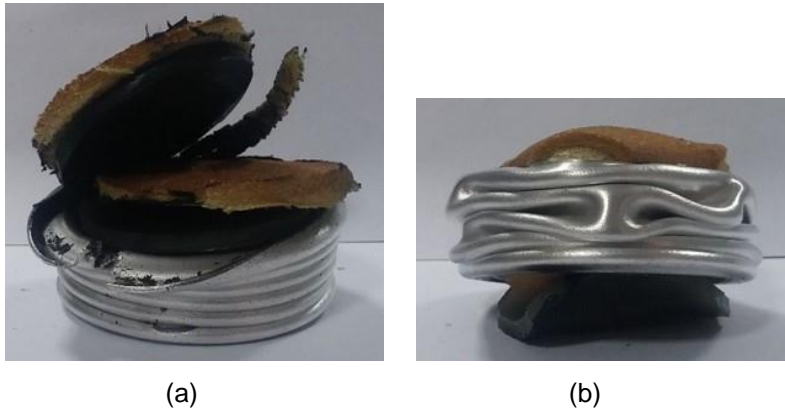
Şekil. 35 PVC köpükle birlikte kauçuğun kullanıldığı numunelerin görünümü.

Şekil 36'de PVC köpük ve kauçuk tabakanın eş ve azalan aralıklarla yerleştirildiği numunelerin kuvvet-deplasman grafiği verilmiştir. Eğrilerden, kauçuk tabaka ikamesinin genel olarak daha kısa deplasmanlarda yığılma etkisi oluşturarak grafikte hızlı yükselmesine neden olduğu görülmektedir. Eş aralıklı köpük-kauçuk takviyeli numuneler, sadece köpüğün kullanıldığı numuneler gibi simetrik katlanma göstermesine rağmen, eğrilerdeki alt ve üst kuvvetleri daha düşük mertebelerde seyrettiği dikkat çekmektedir (Şekil 36). Cidarın içeriye ve dışarıya hareketinin bir sonucu olarak ortaya çıkan alt ve üst kuvvet değerleri arasındaki farkın da azaldığı görülmektedir. Bu durum muhtemelen kauçuk katmanın, PVC köpük kadar direnç göstermemesi ve daha da önemlisi Poisson oranının yüksek olmasına bağlı olarak aksenal yük altında radyal yönde daha fazla malzeme akışı göstererek lokal burkulmayı kolaylaştırması yada tetiklemeyle açıklanabilir.



Şekil 36. PVC köpük ve kauçuk tabakanın eş ve azalan aralıklarla yerleştirildiği numunelerin deney sonrası görünümü

Radyal yönde malzeme akışının, deney sonuna doğru daha şiddetlenmesi numunede, daha önce rastlanmamış türde parçalanmalara yol açmıştır (Şekil 37a). Azalan aralıklı köpük ve kauçuk takviyeli numunede ise, katlanma simetrik türde başlamasına rağmen, daha sonra ilerleyen deplasmanlarda, kauçuk katman miktarındaki artışa bağlı olarak elmas modda dönmüştür (Şekil 37b). Bu numunenin kauçuk kullanılmayan duruma göre 80 J gibi düşük bir iyileşme sağladığı görülmektedir.

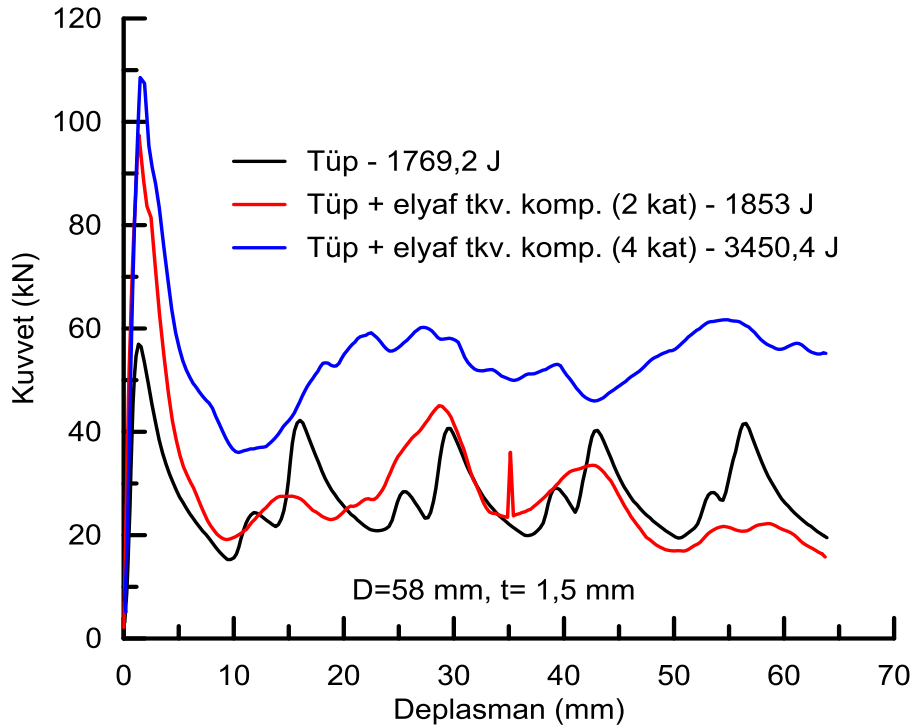


Şekil 37. PVC köpük ve kauçuk tabakanın (a) eş, (b) azalan aralıklarla yerleştirildiği numunelerin deney sonrası görünümü

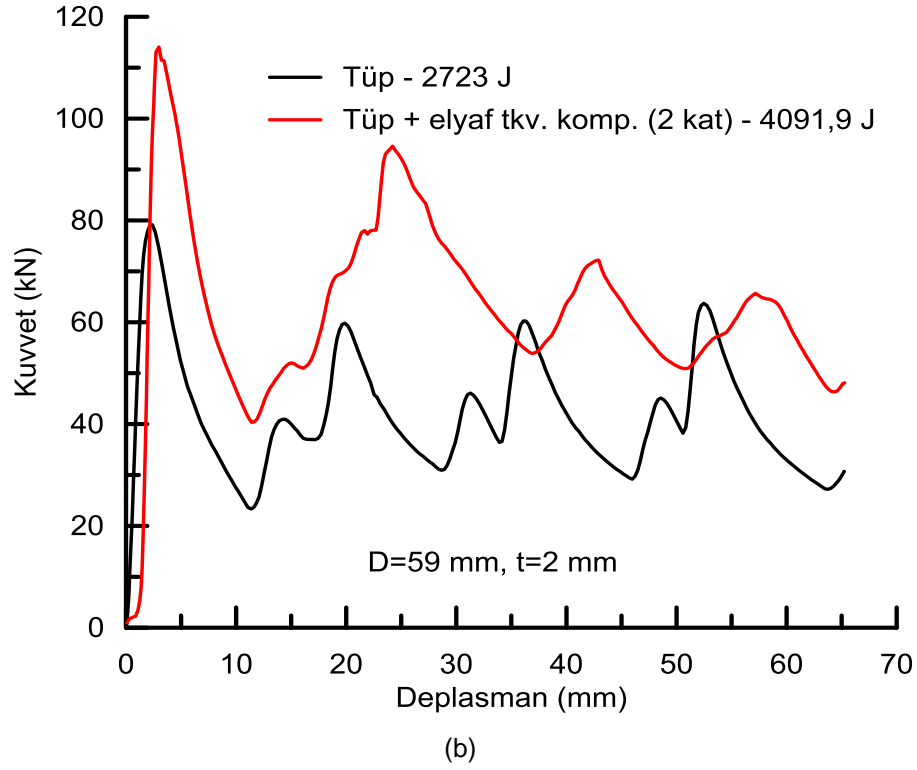
Bu grup numunelerde kauçuğun yüksek Poisson oranından kaynaklanan deformasyon hızlandırıcı etkisinden dolayı ciddi bir üstünlüğü bulunmadığı ancak buna rağmen, kauçuğun sertliği artırılması sonuçlarda ne denli değişikliğe neden olacağı ayrıca incelenecektir.

3.2.3 Dışarıdan Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Numuneler

Daha önce küçük çaplı tüplerin deneylerinde kullanılan üretim tekniğiyle elde edilen 58 ve 59 mm çaplı tüplerin dışarıdan 2 ve 4 kat cam elyaf takviye edilmesi durumu için numune üretilmiş ve deneyleri gerçekleştirilmiştir. Grafikte gereksiz karmaşıklığa neden olmamak için her bir gruba ait sadece bir temsili eğriye yer verilmiştir (Şekil 38). Dışarıdan yapılan takviye tüpün başta F_{max} değeri olmak üzere ortalama kuvvet değerlerini, beklendiği üzere ciddi oranda arttırmaktadır. 40 mm çaplı numunelerde görülen katlanma modelindeki değişiklik burada da gözlenmiştir. Proje çıktılarında belirtilen kuvvet değerinin aşılması için 4 katlı elyaf takviyenin kullanılması uygun görülmemektedir (Şekil 38a).

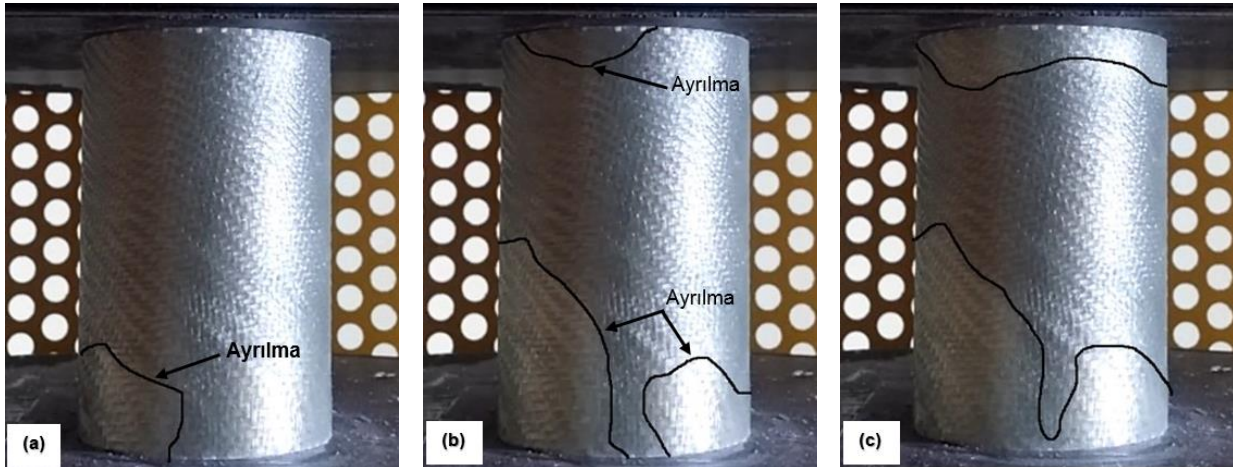


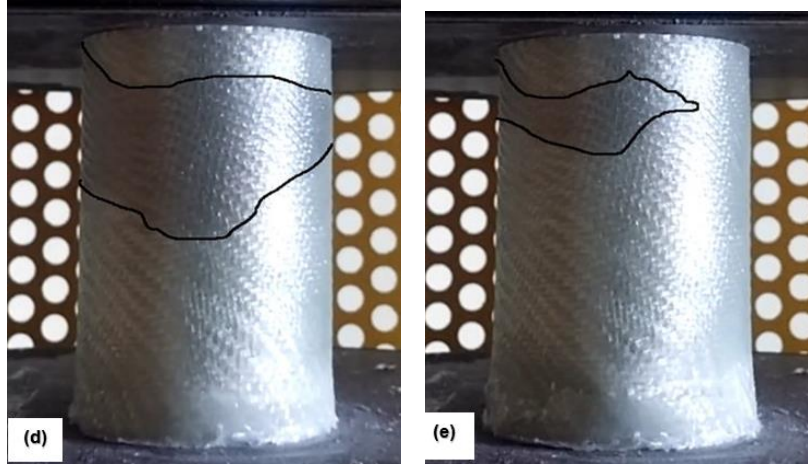
(a)



Şekil 38. (a) D=58 mm (t=1,5 mm) tüp, 2 ve 4 kat cam elyaf takviyeli (b) D=59 mm (t=2 mm) olan boş ve 2 kat elyaf cam elyaf takviyeli numunelerin kuvvet eğrileri

Normal şartlar altında simetrik katlanma gerçekleşmesi beklenen numunelerin dışarıdan elyaf takviye edilmesi durumunda, deformasyon esnasında metal epoksi arası ayrılmaların gerçekleşmesi ve ilerleyen deplasmanlarda elyafta görülen lokal hasarlanmaların kuvvet-deplasman grafiğinde düzensizliklere yol açtığı (Şekil 39) ve deney sonunda katlanma modelinin elmas moda dönüştüğü görülmüştür (Şekil 40).





Şekil 39. Dışarıdan cam elyaf takviye edilmiş kompozit numunenin yük altında ara yüzeyde hasar oluşumu (gerilme beyazlığı-stress whitening)

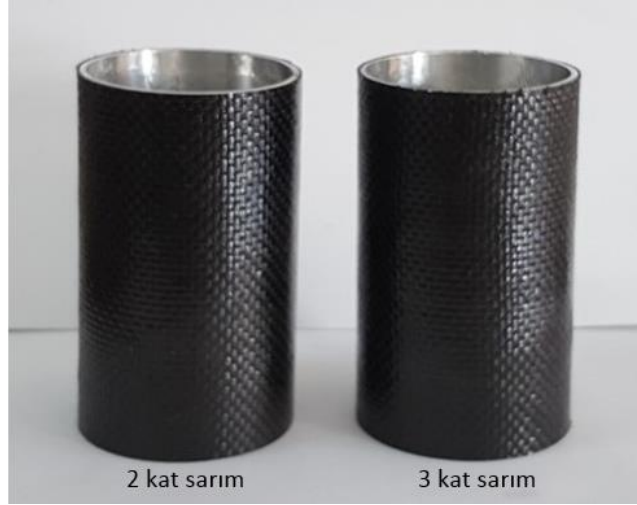
Dahası bu tür takviyenin çok küçük deplasmanlar altında hasarlandığı, bununla birlikte daha çok metal tüpün elastik kararlılığını katkı sunduğu dikkat çekmektedir. Şekilden nihai deformasyon sonrası cidarın iç kısmı elmas modu oluşturmak üzere yönlendirmesinden, içeriden yapılacak takviyenin numunenin katlanma sırasında enerji absorbe etme kabiliyetini arttıracığı açıktır. Diğer taraftan, dışarıdan elyaf takviye kullanılarak yapılan iyileştirme kuvvet değerleri üzerinde etkin olmakla birlikte, takviye fazının (cam elyaf) gevrek davranması, F_{max} kuvvetini aşağı çekmeye yönelik tetikleme hedefleyen (numune ucuna yapılacak) müdahalelerin yapılmasını önemli oranda kısıtlamaktadır.



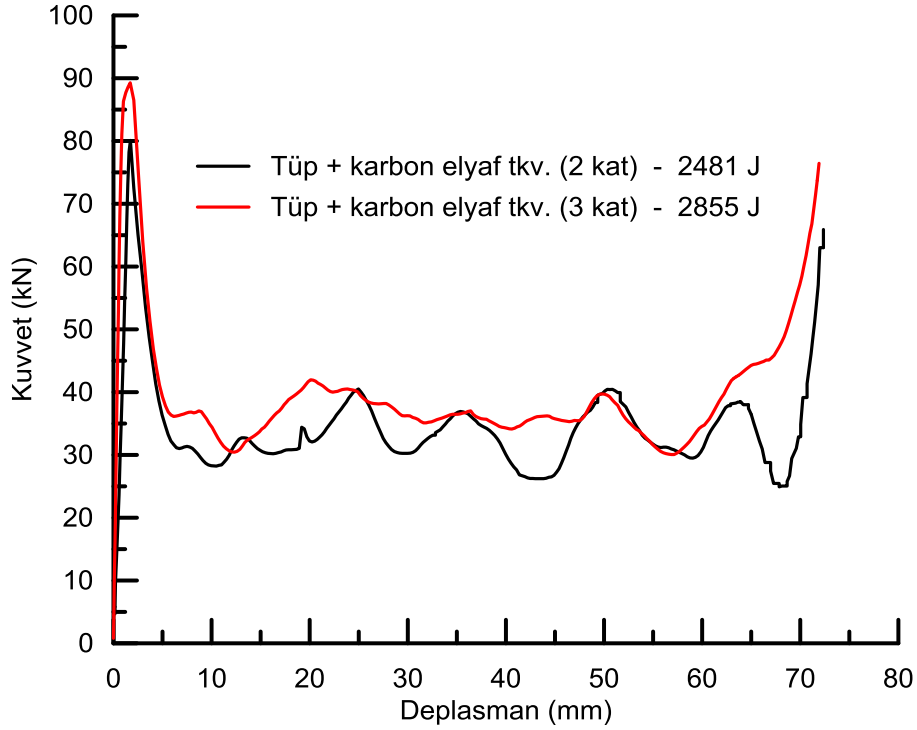
Şekil 40. Özdeş iki numunede dışarıdan yapılan takviyenin katlanma moduna olan etkisi

Şekil 41'de dışarıdan sırasıyla iki ve üç kat karbon elyaf sarılmış tüpler verilmiştir. Karbon elyafın alüminyum tüpe uygulanmasında cam elyaftakine benzer şekilde ıslatma problemi olmayacak şekilde ve fazla epoksi uzaklaştırılarak tüpler sarılmıştır. Şekil 42'de bu numunelere ait kuvvet-

deplasman eğrileri görülmektedir. Eğriler incelendiğinde 3 kat sarımda ilk pik kuvvetin aha yüksek olması dışında ortalama kuvvette çok fazla farklılık yoktur. Her iki numunenin de İlk pik kuvvetinin proje kısıtlarının çok üstünde olduğu ancak iki kat sarımın tetiklemeyle daha düşük seviyelere çekilmesi daha isabetli olacağı düşünülmüştür. Ayrıca özgül enerji verimliliği (birim ağırlık başına düşen enerji absorbe değeri) açısından daha düşük ağırlıkta olduğundan iki kat karbon elyaf sarılmış numunenin kullanılması tercih edilmiştir.

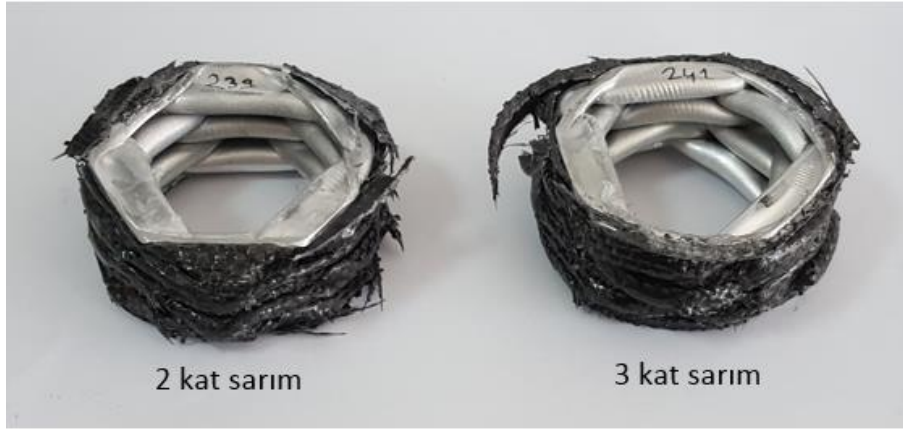


Şekil 41. 2 ve 3 kat karbon elyaf sarılmış alüminyum tüpler



Şekil 42. 2 ve 3 kat karbon elyaf sarılmış alüminyum tüplerin kuvvet-deplasman grafikleri

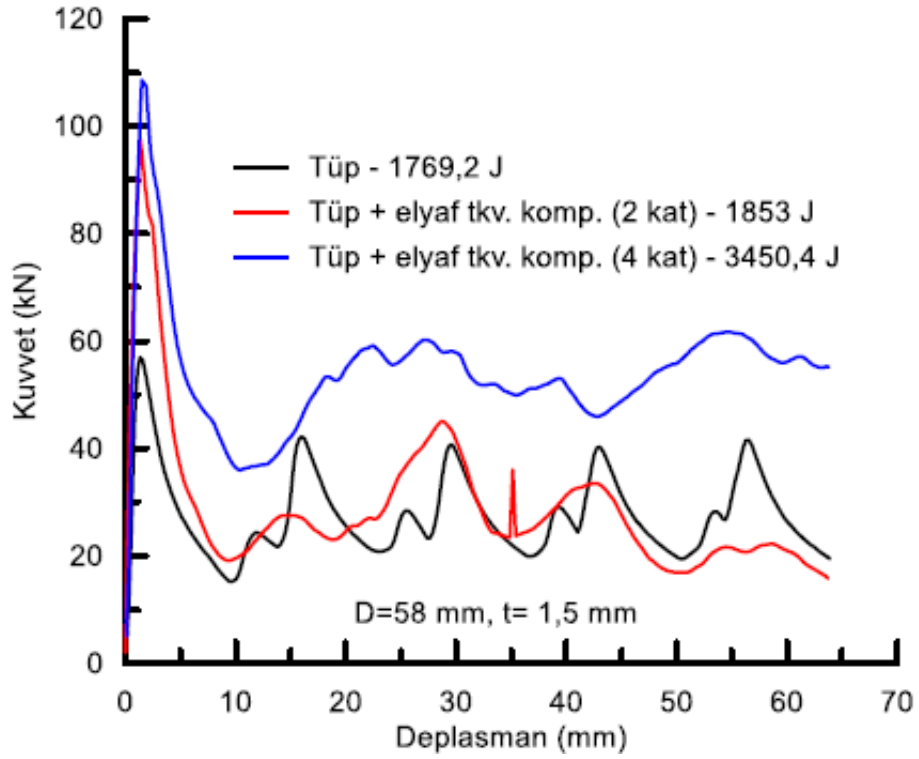
Şekil 43'de iki ve üç kat karbon elyaf sarılmış tüplerin aksenal ezme sonrası görüntüleri verilmiştir. Katlanma davranışlarının her iki numune içinde benzer olduğu görülmektedir. Ancak üç kat elyaf sarılı tüplerle yapılan bazı deneylerde, elyaf ve tüp yüzeyindeki etkileşimin iki kat sarımlı numunelere göre daha yüksek olup, alüminyum tüpte yırtılma olduğu görülmüştür. Bu durum iki kat elyaf sarılı tüplerin tercih edilmesi için bir başka sebep olmuştur.



Şekil 43. 2 ve 3 kat karbon elyaf sarılmış alüminyum tüplerin deney sonrası görüntüleri

3.2.4. Çoklu Takviye Edilmiş Numuneler

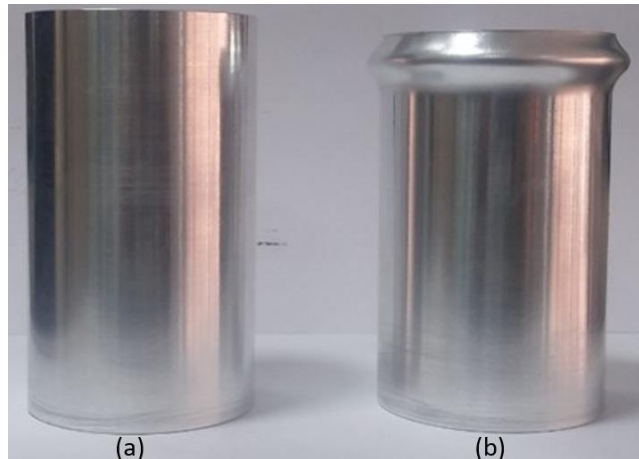
Alüminyum tüpe dışarıdan iki ve dört kat kat cam elyaf kullanılarak gerçekleştirilen takviyenin, iki katman da dahil olmak üzere, F_{maks} değerini aşırı artırmış olduğu, dört kat takviyenin sadece maksimum kuvvette değil, ortalama kuvvette de uygun olmayan değerlere yol açması nedeniyle (Şekil 44), üç katmanlı takviyenin çalışmasına karar verilmiştir.



Şekil 44. Dışarıdan takviye edilmiş tüpün kuvvet-deplasman grafikleri

Deney tasarımında, F_{maks} değerinin makul seviyeye (55-60 kN) çekilmesi için;

- Katlanmanın düşük kuvvette başlatılabilmesi amacıyla alüminyum gövdeye tetikleme amaçlı ön şekil verilme (Şekil 45)
- Elyaf takviye edilen numunelerde, tetikleme bölgesi elyaf sarılmayarak çıplak bırakılması, ayrıca köpük takviyesinin tetikleme bölgesi ve numune tam boyu kadar olmak üzere iki durum için deneyler planlanmıştır.

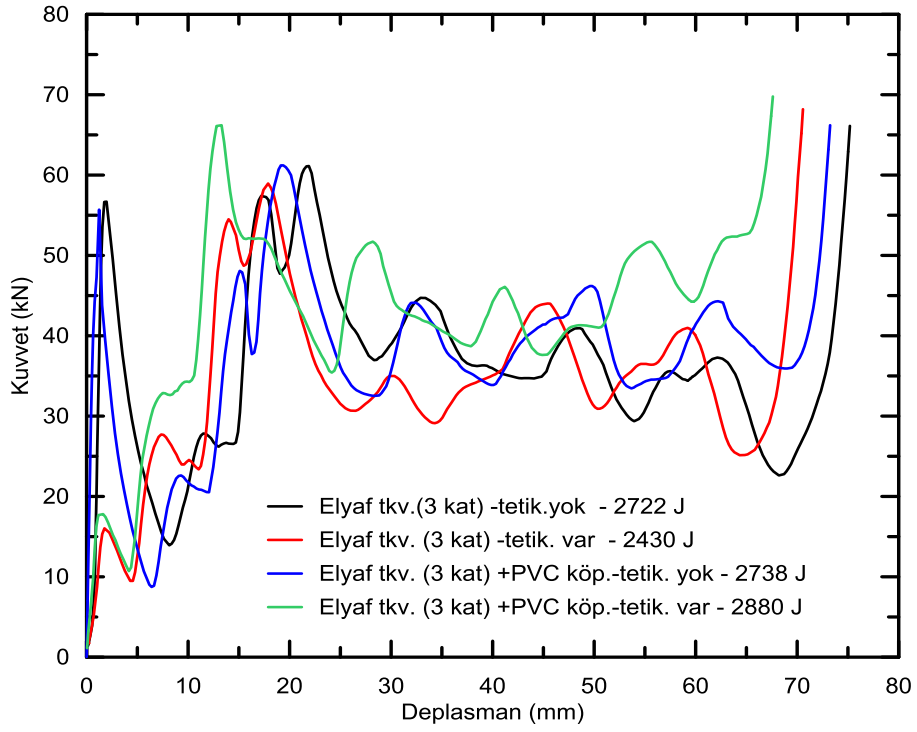


Şekil 45. (a) orijinal tüp (b) ilk katlanma başlangıç kuvvetini düşürmede tetikleme amaçlı uygulanan şekil verme.

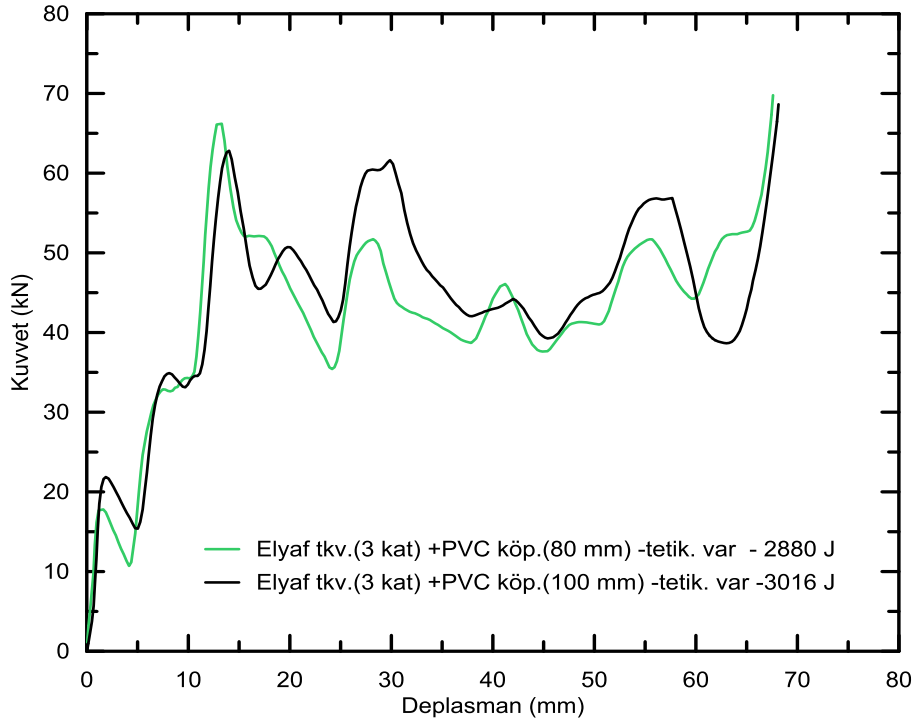
Tüp yapının içeriden takviyesinde, en iyi köpük kombinasyonu (ortada düşük yoğunluklu köpük 70 mm, alt ve üstte ise yüksek yoğunluklu köpük 15'er mm) kullanılmıştır. İçeriden ve dışarıdan takviye edilmiş, katlanmayı düşük kuvvette başlatması için tetikleyici içeren ve de tetikleyicinin bulunmadığı numunelere ait kuvvet-deplasman grafikleri toplu olarak Şekil 46a'da verilmiştir. Grafikten, tetikleyicinin bulunmadığı numune için ilk katlanmanın 55 kN'nu aşan kuvvetlerde başladığı, tetikleme bulunan numunede ise 15 kN'un bir miktar üstünde başladığı, dolayısıyla katlanma başlangıç kuvvetini düşürmek amacıyla uygulanan şekil verme işleminin bu anlamda başarılı olduğu anlaşılmaktadır.

İçeriden köpük takviye edilen numuneler için de benzer bir durumun söz konusudur (Şekil 46a). Dahası tüm numuneler için köpük takviyesi ezme deplasman değerini azaltmış, kuvvet değerlerini nispi olarak yükseltmiştir. Ayrıca elyaf takviye, içeriden yapılan köpük takviyesine rağmen, tüpün simetrik katlanma davranışını bozarak genelde deformasyonun düzensiz katlanma ile devam etmesine neden olmuş, bunun sonucu olarak köpük takviyesinin, yapının toplam enerji absorbe etme kabiliyetine olan katkısı nispeten azalmıştır. Diğer taraftan, elyaf ve köpük takviyeli numunelerde, tetiklemenin varlığı, tetiklemenin bulunmadığı duruma göre enerji değerinde bir miktar artış sağlamıştır. Bu durum, eğriden de anlaşılacağı üzere, katlanma davranışındaki düzensizlikle ilgilidir (Şekil 46a). Numunenin yüksek kuvvet değerine zorlandığında, ilk kat başlayınca dek hem üst hem de alt uçunda bir miktar burkulmanın başladığı, daha sonra zayıf olan ucun katlanmayı devam etmesiyle sürecin işlediği daha önce belirtilmişti. Tetikleyici bulunan numunede sadece bir ucun cidarında burkulma ile düzensizlik oluştuğundan, genel olarak numunede deformasyon sırasında yığılma olasılığı, her iki ucun cidarında kısmi burkulma başlangıcı olan numuneye göre nispi olarak azalmaktadır.

Şekil 46b'de ise köpük takviyesinin tetikleyici bölgeyi kapsamadığı, köpük boyunun 80 mm olduğu ve numune tam boyunu kapsayan 100 mm köpük boyları için de gerçekleştirilen deney sonuçları verilmiştir. Genel olarak kuvvet piklerinin şekli ve sayısı itibarıyla önemli bir fark görülmemekle birlikte, içeriden takviyenin numune tam boyda yapılması enerji değerinde kabaca %5'lik bir iyileşme sağlamıştır. Bu davranış, literatürde vurgulanan eğilimle uyumludur. Tüp yapıda köpük miktarının gerek deformasyon esnasında cidarların burkulmaya karşı kararlılığını desteklemesi, gerekse kısmen kat aralarına sıkışması gibi nedenlerden dolayı enerjiyi absorbe etmektedir.



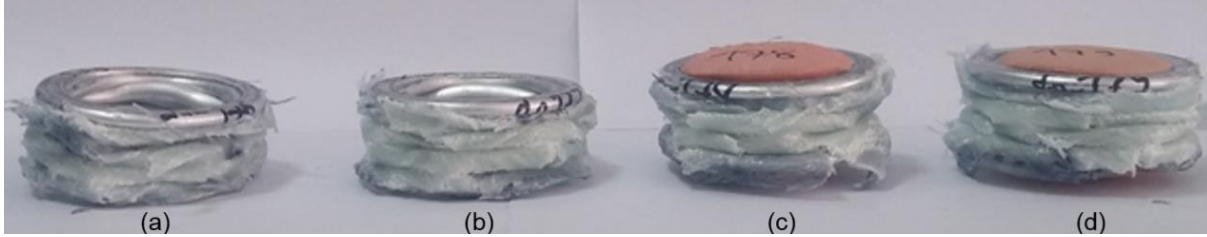
(a)



(b)

Şekil 46. içeriden ve dışarıdan (**cam elyaf**) takviye edilmiş, tetikleyici ve tetiklemenin bulunmadığı numunelere ait kuvvet-deplasman grafikleri

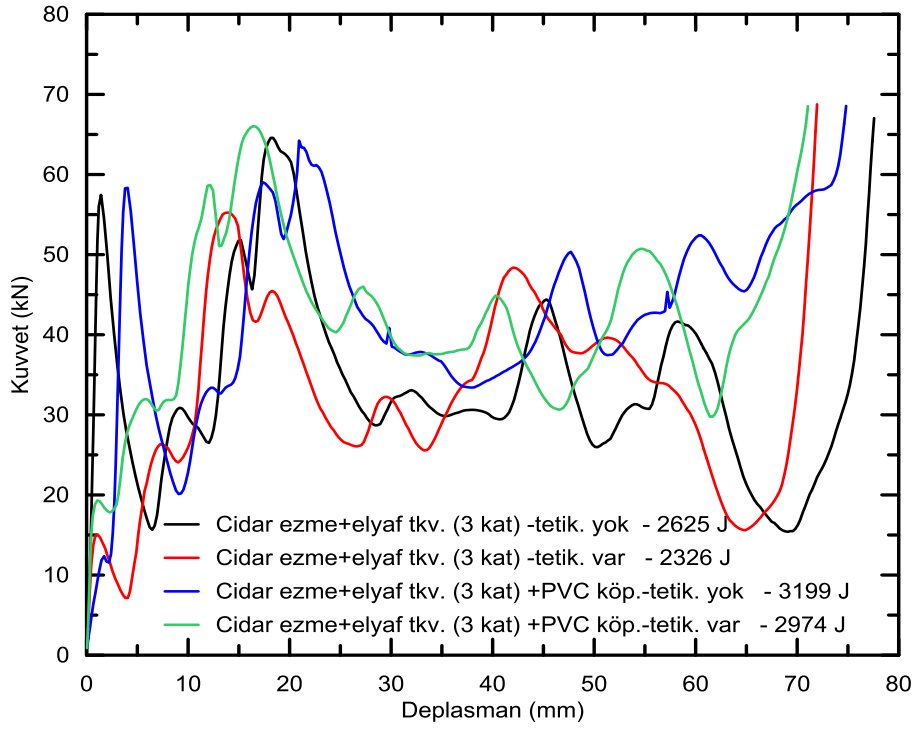
Bu grup numunelerin deney sonrası görüntüleri Şekil 47’de verilmiştir. İçeriden takviye edilmeyen parçaların genel olarak daha erken düzgün olmayan katlanma davranışına girdiği, ancak içeriden desteklenen numunelerde de yığılma etkisi görülmüştür.



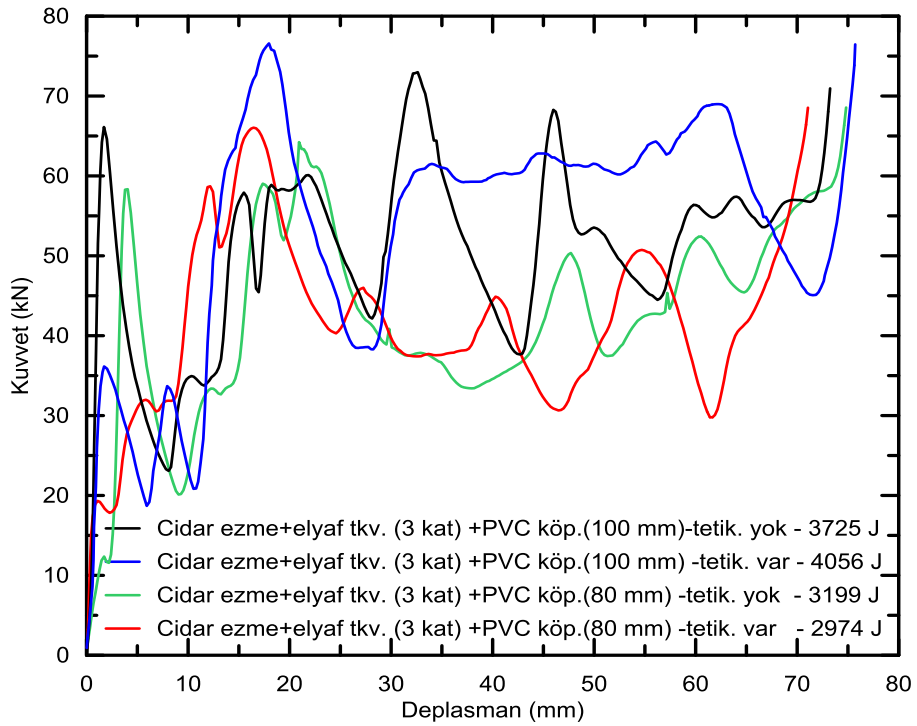
Şekil 47. Takviyeli numunelerin deney sonrası görüntüleri. (a) dışarıdan takviyeli numune tetikleme yok b) dışarıdan takviyeli numune tetikleme var c) dışarıdan ve içeriden takviyeli numune tetikleme yok, d) dışarıdan ve içeriden takviyeli numune tetikleme var.

Şekil 48’de verilen cidarına ezme işlemi uygulanmış (10 mm eşit aralıklı ezilmiş), içeriden ve dışarıdan takviyeli, tetikleyici ve tetiklemenin bulunmadığı numunelerin kuvvet-deplasman grafiklerinde ilk göze çarpan farklı davranışlar; katlanma başlangıcının içeriden yapılan köpük takviyesinden belirgin bir şekilde etkilendiği, ikinci kat başlangıcının nispeten daha yüksek kuvvetten başladığı ve ortalama kuvvetin nispeten daha yüksek olmasıdır. Diğer önemli bir sonuç ezme işleminden tam olarak yararlanılabilmesi, tetiklemenin varlığı ile ilişkilidir. Tetiklemenin olmadığı durumda, elyaf katman deneyin başlangıcında uygulanan yüksek kuvvetin etkisinde birçok noktadan mikro düzeyde, temas bölgesinde ise belirgin bir şekilde hasarlanmaktadır. Dolayısıyla, cidarın dışarıya, radyal yönde hareketini sınırlayan elyafın hasara uğraması takviyenin katkısını doğrudan etkileyecektir.

Ayrıca cidarı ezilmiş parçaların, diğerlerine göre daha fazla dışa doğru katlanma davranışı göstermesi, elyaf takviyenin önemini arttırmakta ancak elyafın katkısı, elyafın ilk yüklemedeki eksenel kuvvetin etkisiyle ne kadar hasarlandığına bağlı olmaktadır. Elyafın cidar hareketini kısıtlaması, sadece tüp yapının ezilmesini sınırlamamakta, aynı zamanda içe doğru elmas katlanmaya teşvik ederek, köpüğün daha fazla sıkışmasını sağlamakta, sonuç olarak iyileşmenin etkinliğini arttırmaktadır. Cidarı ezilen parçaların katlanma davranışındaki bu farklılık sonlu eleman analiz sonuçlarının verildiği kısımda sebep-sonuç ilişkisi kurularak irdelenmiştir.



(a)

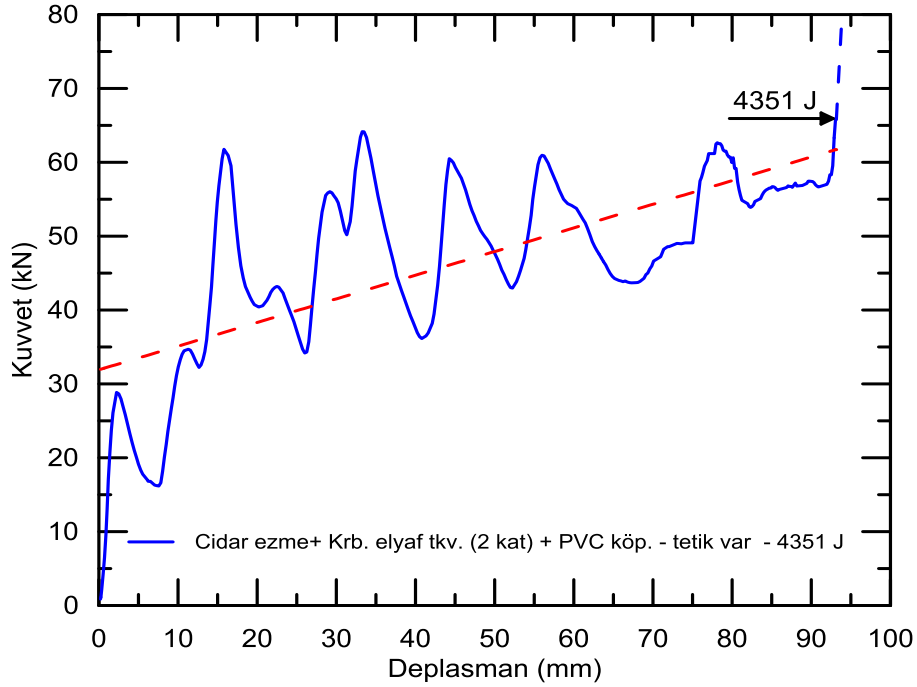


(b)

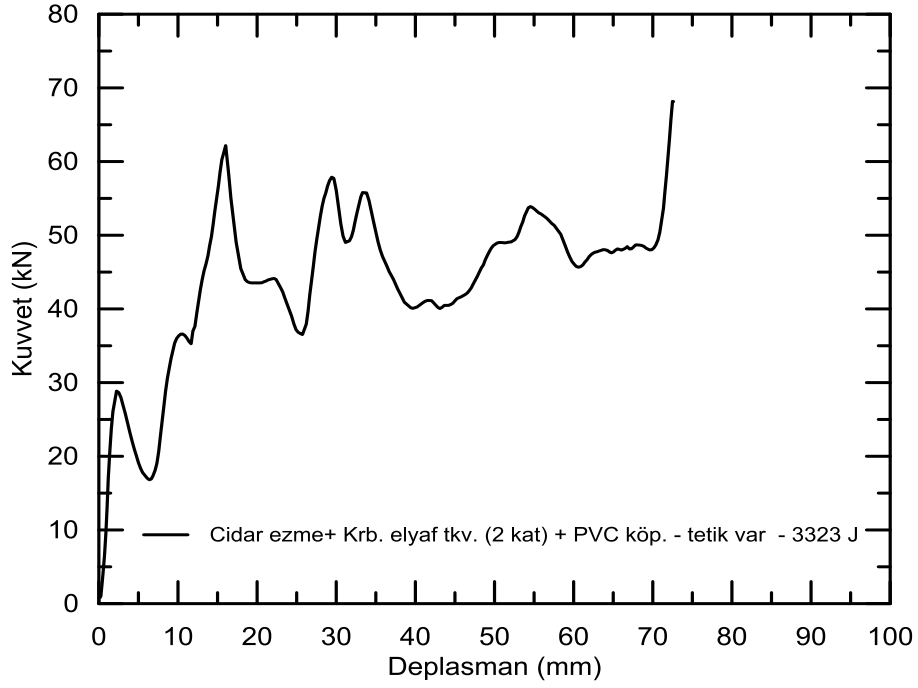
Şekil 48. Cidarına 10 mm eşit aralıkla ezme işlemi uygulanmış, içeriden ve dışarıdan (**cam elyaf**) takviyeli, tetikleyici ve tetikleminin bulunmadığı numunelere ait kuvvet-deplasman grafikleri.

Şekil 48b'de köpük takviyesinin tetikleme bölgesi kapsayan (100 mm) ve kapsamayan (80 mm) boyları için verilen deney sonuçlarından, deformasyonun ilerleyen safhalarında genel olarak köpük boyunun etkisi belirgin bir şekilde (örn: siyah ve yeşil renkli eğriler) görülmektedir.

Proje hedefi (ve de kısıtları) gözetilerek ve şimdiye kadar elde edilen deney sonuçlarından hareketle **tetikleme, çevresel ezme, sandviç köpük ve elyaf takviyenin karbon olarak iki adet sarım sayısı** uygulandığı yapı ile en uygun enerji absorbe değerlerine ulaşılmıştır (Şekil 49a). Deneyler sonucunda absorbe edilen enerji değerinin, yaklaşık 93 mm deplasman değerinde basılan 125 mm uzunluğundaki ezilme kutusunda 4330 J ile 4370 J arasında değiştiği tespit edilmiştir. Bu durum ezilme kutusu tasarımı için belirlenen proje hedefinin sağlandığını göstermekle birlikte, numune aksenal ezilme miktarının artırılması durumunda, örneğin 100 mm deplasman için 4700 J değerinin kolaylıkla elde edilmesi mümkündür. Şekil 49b'de ise aynı takviye kombinasyonuna sahip 100 mm uzunluğundaki (70-75 mm ezilen) ezilme kutusuna ait kuvvet-deplasman grafiği verilmiştir.



(a)



Şekil 49. Cidarına 10 mm eşit aralıkla ezme işlemi uygulanmış, içeriden ve dışarıdan (**karbon elyaf**) takviyeli, tetikleyici bulunan numuneye ait kuvvet-deplasman grafiği. (Not: doğrulama amacıyla yapılan tekrar deney eğrileri grafiğe eklenmemiştir.)

Şekil 50'de yukarıdaki grafikte (Şekil 49a) kuvvet-deplasman değeri verilen numuneye ait deney öncesi ve sonrasına ait görüntüler verilmiştir.



Şekil 50. Karbon elyaf sarı numunelerin deney öncesi ve sonrası görüntüleri

Ezilme Kutusunda Kombinasyonların Karşılaştırması

DeneySEL çalışmalar neticesinde uygun olduğu kabul edilebilen ezilme kutusu kombinasyonları Tablo 4'de verilmiştir. Proje hedefleri itibariyle uygun kombinasyon belirlenmesinde kuvvet ve enerji değerleri kriter olarak göz önünde bulundurulmuştur. Bir numaralı sırada takviyesiz boş tüpün özgül enerji absorbe (ÖEA) değeri referans kabul edilerek karşılaştırma yapıldığında, sadece 4, 8, 16-19 numaralı kombinasyonların tercih edilebilir olduğu görülmektedir. Ancak 4 ve 8 numaralı kombinasyonlar başlangıç kuvvet değerlerinin çok yüksek olması nedeniyle uygun değildir. 16 ve 17 numaralı kombinasyonlar ile 15 numaralı kombinasyonda ise ezilme sonrası ulaşılan kuvvet mertebesinin (şekil 48) hedeflenen değerin bir miktar üstünde seyretmesi nedeniyle, enerjinin yaklaşık olarak korunarak kuvvet değerlerini bir miktar aşağıya çekmek üzere elyaf takviyesinin sıralı artan yapıda uygulanmasının faydalı olacağı sonucuna ulaşılmıştır. 19 numaralı kombinasyon gerek kuvvet gerekse ÖEA değerleri itibari ile en iyi durumdur.

Tablo 4. Ezilme kutusu tasarımları için elde edilen karşılaştırma kombinasyonları.

No	Takviye durumu	Kombinasyon	Tetik durumu	F_{maks} (kN)	F_{ort} (kN)	Enerji (J)	Ağırlık (gr)	ÖEA (J/gr)
1	Takviyesiz	Tüp	-	56,02	27,25	2044	72	28,38
2		Tüp	Var	20,30	26,43	1982	72	27,52
3	Dışarıdan takviye	2 kat cam elyaf tkv.	-	98	24,71	1853	85	21,80
4		4 kat cam elyaf tkv.	-	109	46,00	3450	103	33,48
5		3 kat cam elyaf tkv.	-	56,69	36,29	2722	98	27,78
6		3 kat cam elyaf tkv.	Var	16,02	32,40	2430	101	24,06
7		2 kat karbon elyaf tkv.	-	80,08	33,08	2481	88	28,20
8		3 kat karbon elyaf tkv.	-	89,25	38,7	2855	88	32,44
9	Dışarıdan + İçeriden takviye	3 kat cam elyaf tkv. + 80 mm PVC köpük	-	47,33	36,51	2738	118	23,20
10		3 kat cam elyaf tkv. +80 mm PVC köpük	Var	17,80	38,40	2880	117	24,62
11		3 kat cam elyaf tkv. +100 mm PVC köpük	Var	21,86	40,21	3016	123	24,52

12	Ezme + Dış takviye	Ezme işlemi + 3 kat cam elyaf tkv.	-	57,46	35,00	2625	103	25,49
13		Ezme işlemi + 3 kat cam elyaf tkv.	Var	15,07	31,02	2326	102	22,80
14	Ezme + Dışardan + İçeriden takviye	Ezme işlemi + 3 kat cam elyaf tkv. + 80 mm PVC köpük	-	58,34	42,65	3199	120	26,66
15		Ezme işlemi + 3 kat cam elyaf tkv.+ 80 mm PVC köpük	Var	19,32	39,65	2974	117	25,42
16		Ezme işlemi + 3 kat cam elyaf tkv.+ 100 mm PVC köpük	-	66,13	49,67	3725	125	29,80
17		Ezme işlemi + 3 kat cam elyaf tkv.+ 100 mm PVC köpük	Var	36,15	54,08	4056	125	32,45
18		Ezme işlemi + 2 kat karbon elyaf tkv.+ 100 mm PVC köpük	Var	32,15	43,10	3233	105	30,8
19		Ezme işlemi + 2 kat karbon elyaf tkv.+ 100 mm PVC köpük*	Var	27,96	46,28	4351	131	33,21

ÖEA: Özgül enerji absorbe etme kabiliyeti. Ezme işlemi: 10 mm serbest burkulma boyuna sahip eşit aralıklı.

* 125 mm uzunluğa sahip numune ile yapılan deneylere ait ortalama sonuç.

Numunelerin deney sonrası genel görüntüsü Şekil 51’de verilmiştir. Bu numunelerde görülen ortak davranış, simetrik katlanmaya takiben, takviye durumuna bağlı olarak elmas ya da düzensiz katlanma türüne dönüşmüş olmasıdır. Tetikleme bulunmayan (a)’da verilen parçada elyaf takviyedeki hasarlanma/dağılıma miktarının daha fazla olduğu dikkat çekicidir.

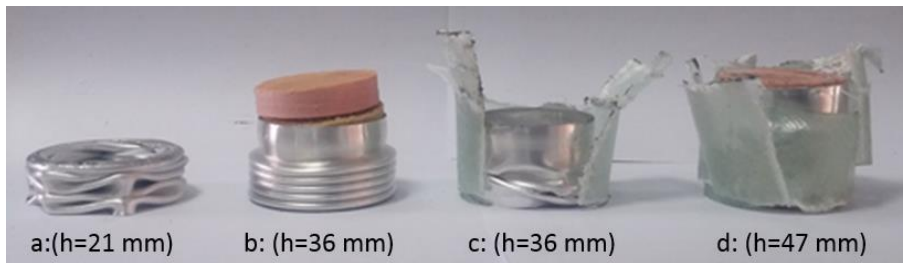


Şekil 51. Cidar ezme işlemi uygulanmış, takviyeli numunelerin deney sonrası görüntüleri. (a) dışarıdan takviyeli numune tetikleme yok b) dışarıdan takviyeli numune tetikleme var, c) dışarıdan ve içeriden takviyeli numune tetikleme yok, d) dışarıdan ve içeriden takviyeli numune tetikleme var.

Darbe Test Cihazında Ezilme Kutusu ile Yapılan Deneylere Ait Sonuçlar

Darbe deneyleri, numuneler arasında karşılaştırma yapılabilmesi için öncelikle takviyesiz yapıda deformasyona yol açan 2000 J değeri dikkate alınarak deneyler gerçekleştirilmiştir. 150 kg'lık ağırlığın yüksekliği kontrollü olarak ayarlanabilen ve çarpma hızının ölçülebildiği test düzeneğinde deneyler gerçekleştirilmiştir. 1,5 mm cidar kalınlığı, 58 mm çap ve 100 mm yüksekliğindeki tüpün, dışarıdan cam elyaf takviyeli (3 kat) içeriden ise daha önce tespit edilmiş olan ve katlanma sırasında en iyi performans sağlayan köpük kombinasyonu (ortada düşük yoğunluklu köpük 70 mm, alt ve üstte ise yüksek yoğunluklu köpük 15'er mm) ile takviye gerçekleştirilmiştir.

Şekil 52'den, takviyesiz tüpte tamamen ezilmeye yol açan enerji değeri altında; sadece dışarıdan yapılan takviyenin parçanın deformasyonuna nispeten azalttığı, ancak hem içeriden, hem dıştan takviyeli numunenin beklendiği gibi en az deformasyona uğradığı tespit edilmiştir. Deney sonrası numune yüksekliklerinin takviyesiz yapıdan itibaren sırasıyla, 21, 36, 36 ve 47 mm olarak ölçülmüştür. Burada da, statik deneylerde olduğu gibi, elyaf kompozit ile metal arasında ayrılmaya bağlı olarak hasarın oluştuğu, ancak elyaf kompozit kısmın nispeten daha az parçalandığı dikkat çekmektedir. Darbe etkisi altında statik duruma göre, baskın olan çatlakların hızla ilerlemek suretiyle katma bir iki noktadan boyuna yarılmasına neden olduğu, statik yüklemde ise kademeli olarak deplasmandaki artışla birçok noktadan başlayan çatlakların, çoklu yarılmalara yol açtığı düşünülmektedir.



Şekil 52 a) takviyesiz numune, b) içeriden en iyi performansı veren sıralı PVC köpük takviyeli numune, c) dışarıdan cam elyaf takviyeli numune, d) dışarıdan cam elyaf ve içeriden en iyi performansı veren sıralı PVC köpük takviyeli numune. *Not: Parantez içindeki değerler deney sonrası numunelerin yüksekliğini göstermektedir.*

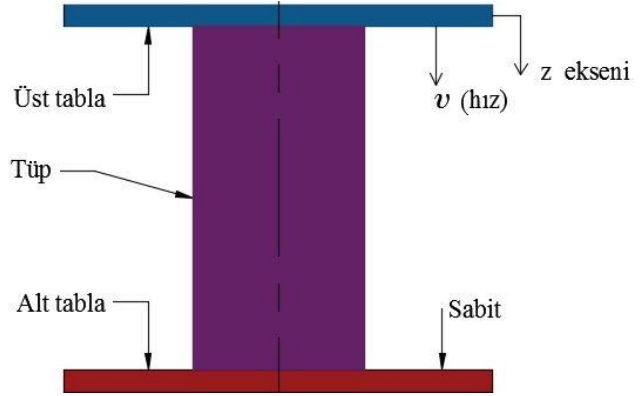
4. SONLU ELEMENLAR ÇALIŞMALARI

Sonlu elemanlar çalışmaları LS-Dyna programı kullanılarak yapılmıştır. Deneysel çalışmalar ile aynı sınır şartlara sahip olarak geliştirilen SE modeli ilk olarak 40 mm çaplı tüpler için kullanılmıştır. SE analiz sonuçları ile deneysel veriler arasındaki uyum sağlandıktan sonra mevcut SE modeli sadece geometrik ölçüler değiştirilerek 58 mm çaplı tüplere uyarlanmıştır.

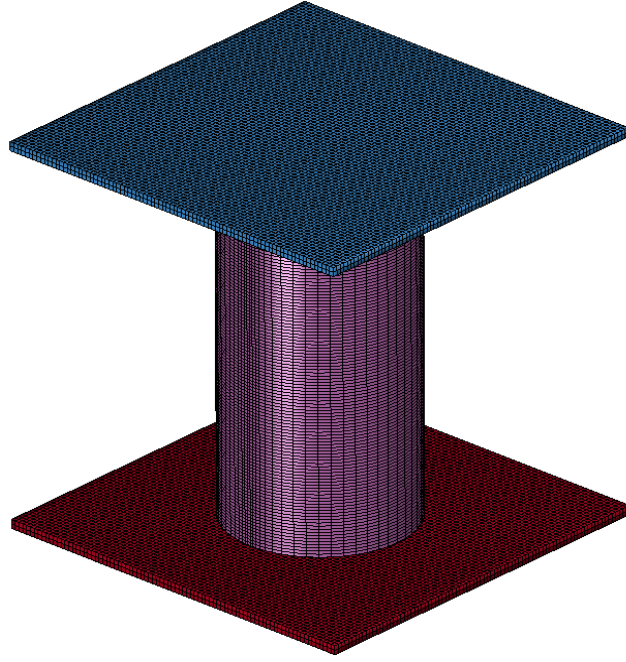
SE modeli üç parçadan oluşmakta olup, bunlar sırasıyla üst tabla, numune (tüp) ve alt tabladır. Alt tablanın tüm serbestlik dereceleri kısıtlanmıştır (Şekil 53). Tüp numuneye ait herhangi bir sınırlama verilmemiştir. Diğer taraftan üst tabla sadece tek (düşey) ekseninde öteleme hareketi yapılabilecek şekilde düzenlenmiştir. Üst tablanın deplasmana bağlı olarak hız değeri atanmaktadır. Eksenel deformasyona maruz kalan tüp, sabit tabla üzerinde z yönündeki hareket edecek şekilde deformasyona zorlanmaktadır. Şekil 53'de kullanılan deney düzeneği, ilgili matematik modeli ve hazırlanan sonlu eleman modeli verilmiştir.



(a)



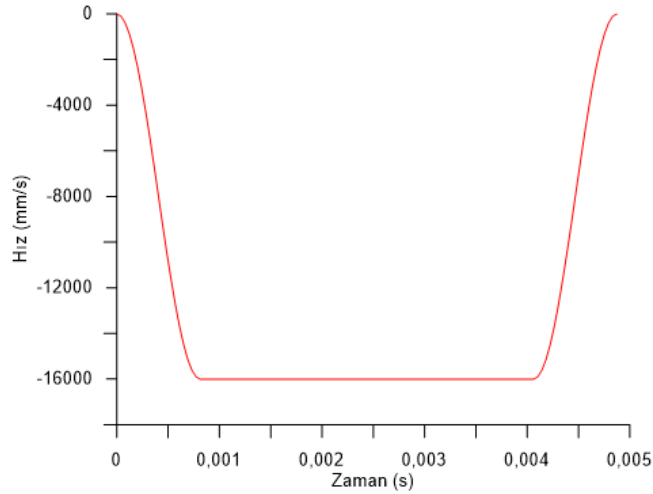
(b)



(c)

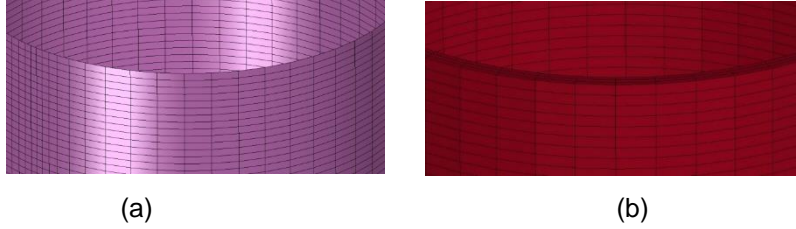
Şekil 53. a) Deneysel düzeneği b) matematiksel modeli c) hazırlanan sonlu eleman modeli

Sonlu elemanlar modelinde üst tablanın z yönündeki hızının zamana bağlı olarak değişimi Şekil 54'da verilmiştir. Şekilden anlaşılacağı üzere, üst tablanın 16.000 mm/s (57,6 km/h) hıza kısa sürede ulaşmaktadır.



Şekil 54. Üst tablanın hız-zaman grafiği

Modelleme çalışmalarında Shell ve solid eleman kullanılarak her ikisi için deformasyon davranışı elde edilmiştir Şekil 55’de alüminyum tüp yapının Shell (Kabuk) ve Solid yapısına ait sonlu eleman görüntüsü verilmiştir.



Şekil 55. Alüminyum tüpün (a) Shell (Kabuk), (b) Solid yapısının sonlu eleman ağ yapı görüntüsü

Modelde, alüminyum tüpün kendi yüzeyleri arasında (katlanma safhası için), tüpün ayrı ayrı alt ve üst tabla ile arasında sürtünmeli temas tanımlanmıştır. Parçaların birbirleri arasında statik sürtünme 0,2 ve dinamik sürtünme katsayısı ise 0,18 alınmış olup, doğrulama çalışmalarında bu değerlerin etkisi sistematik olarak göz önüne alınmıştır.

LS-Dyna çözücüsünde (solver) *CONTACT AUTOMATIC NODES TO SURFACE temas algoritması kullanılmıştır. Ls-Dyna programına ait malzeme kütüphanesinde *MAT_18 malzeme model (*MAT POWER LAW PLASTICITY) kartı kullanılmıştır. Bu kartta malzemenin çekme deneyinden elde edilen akma eğrisinin (gerçek gerilme-gerçek birim şekil değişimi) tanımlanmasında Hollomon denkleminin gerektirdiğinden, denkleme ait büyüklükler belirlenmesi için regresyon analizi yapılmıştır. Kullanılan alüminyum alaşıma ait ampirik denklem (Denklem 3) aşağıdaki şekildedir.

$$\sigma = 295 \varepsilon^{0.097} \quad (3)$$

4.1 Alüminyum Tüplerin SE Analizleri

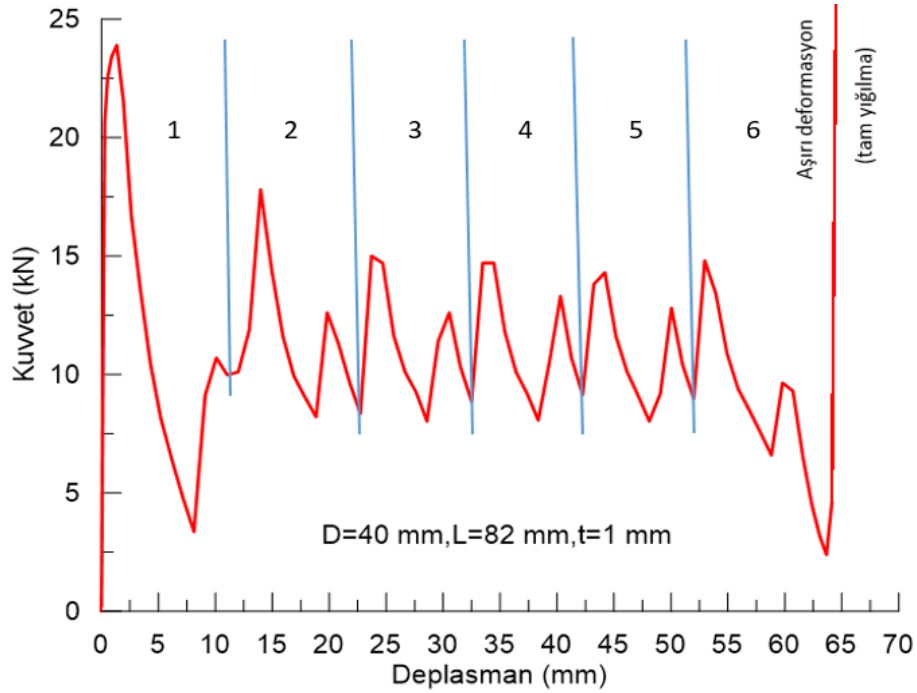
Alüminyum tüplerin SE analizlerinde ilk önce 40 mm çaplı tüpler kullanılmıştır. 40 mm çaplı tüpler de elde edilen SE sonuçlarının deneysel verilerle uyumlu olduğu tespit edildikten sonra ana tüp olan 58 mm için SE analizleri yapılmıştır. Ayrıca takviye durumları için yapılan SE analizlerinde yine 58 mm çaplı numuneler kullanılmıştır. Takviyesiz tüplerin ve çevresel ezme işlemi uygulanan

tüplerde elde edilen SE analiz sonuçlarının deneysel verilerle uyumluluğundaki yüksek oran SE analizlerinin başarılı bir şekilde gerçekleştirildiğinin kanıtı olmuştur.

SE analizlerinde alüminyum tüplerin cidarları için iki farklı model kullanılmıştır. Bunlardan ilki olan solid model de cidar kalınlığı SE analizlerde göz önünde bulundurulan ana parametre olarak kabul edilirken, ikinci model olan Shell modelde ise cidar kalınlığı ikincil unsur olarak kabul edilmektedir. Aşağıda her iki modele ait SE analiz verileri bulunmaktadır.

4.1.1 Solid Model Analizi

40 mm çaplı, 1 mm cidar kalınlığına sahip numunenin Solid model kullanılarak elde edilen kuvvet-deplasman grafiği Şekil 56'da verilmiştir.

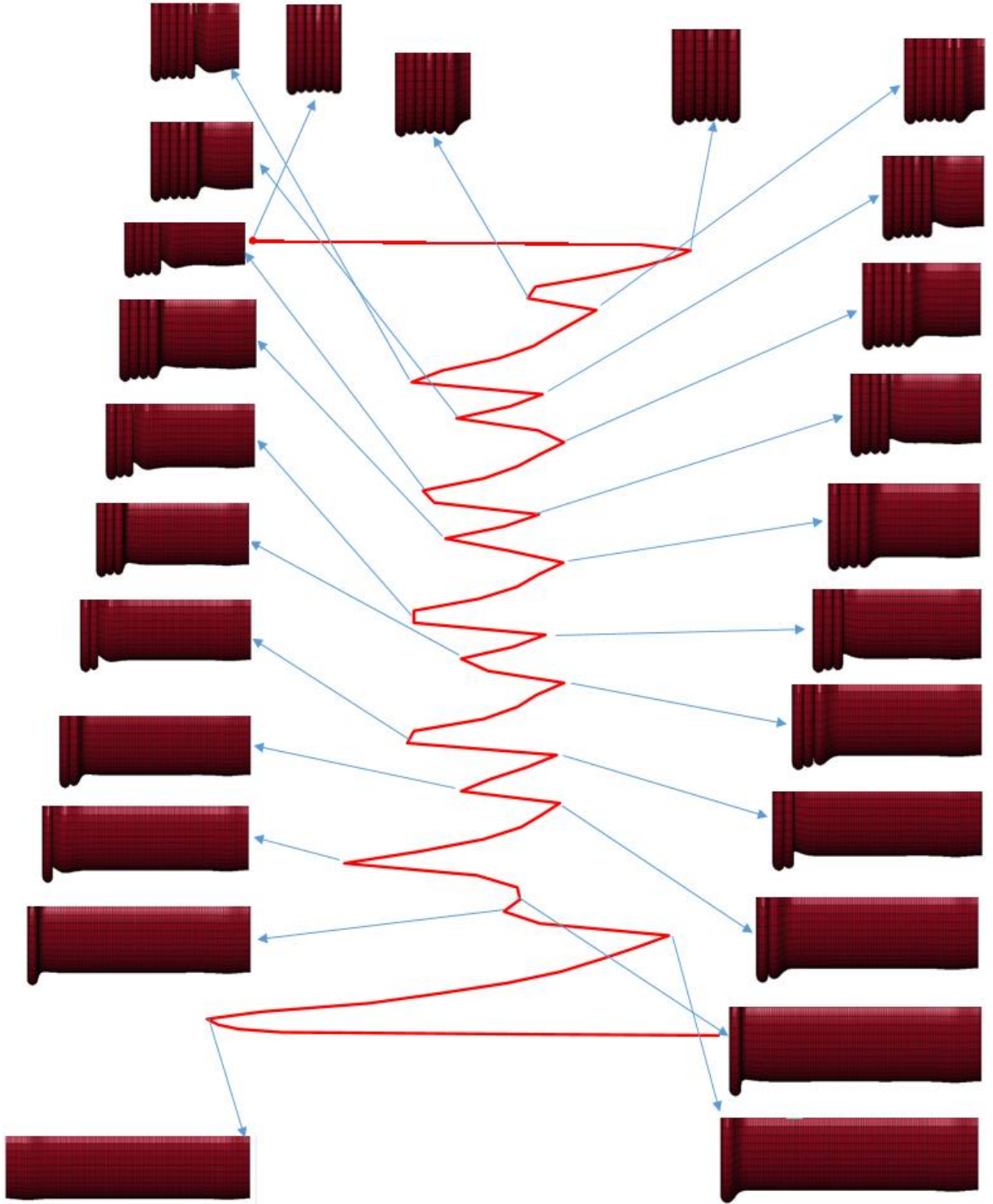


Şekil 56. D=40 mm, t=1 mm olan numunenin Solid model için elde edilen kuvvet-deplasman grafiği

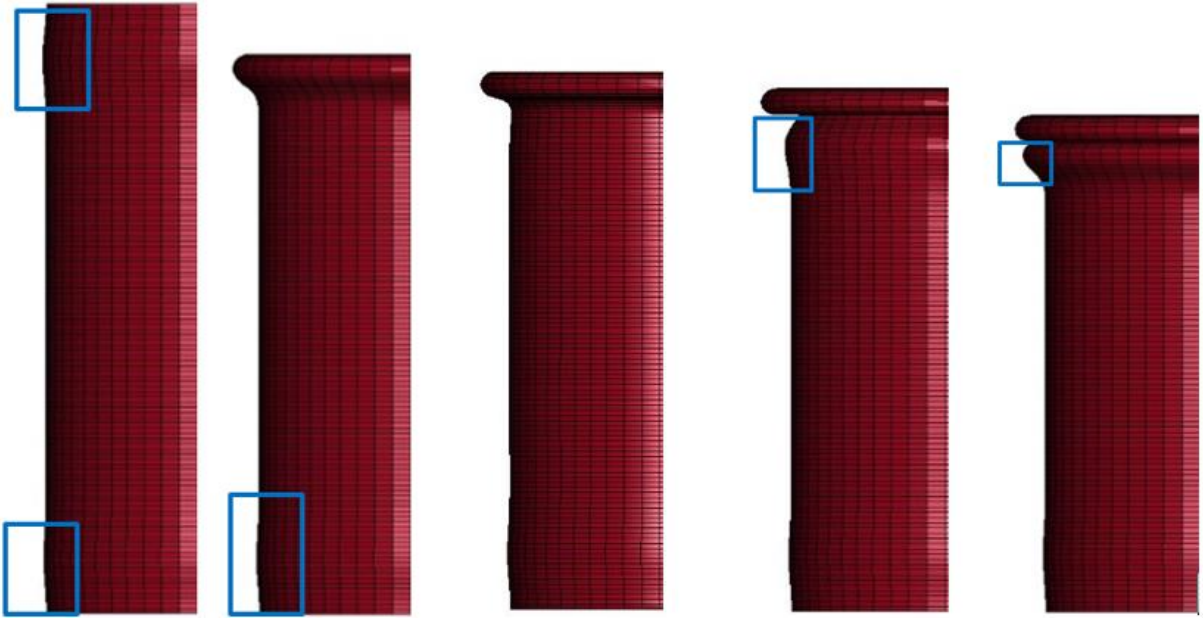
Şekilden de anlaşılacağı üzere, eksene göre simetrik altı katlanmanın söz konusu olduğu numunede, katlanma bir maksimum kuvvet ile başlamakta, ilerleyen deplasmanlarda cidarın lokal burkulma davranışı sonucu (cidarın kuvvet etkisi altında dış – iç kısma doğru yönelmesi) belirli

bir ortalama kuvvet etrafında artış ve azalma gösterecek şekilde katlanma devam etmektedir. Burada kuvvet artışlarının her biri tüp üzerinde gerçekleşen katlanmayı işaret etmektedir. Deplasmanın sonlarına doğru katlanmanın sona ermesiyle tam yığılma durumu için kuvvette ani yükselme kendini göstermektedir (Şekil 56). Tüm deplasmanlar için gerçekleşen katlanmanın oluşum şekli, kuvvet-deplasman grafiğinde ilgili deplasman değerleri için karşılık gelen noktalarıyla birlikte Şekil 57’de verilmiştir.

Şekil 58’de katlanma olayının irdelenebilmesi amacıyla, sadece iki kat oluşumuna ait detay görüntüler sunulmuştur. Şekilde (a) numunede ilk katlanmanın hazırlık safhası durumunda, yani grafikte maksimum kuvvetin görüldüğü deplasmanda cidarda lokal burkulma başlangıcını görmek mümkündür. Aynı zamanda numunenin alt kısmında da şiddeti diğerine göre nispeten daha az olan bir ikinci oluşum da söz konusudur. (b) artan deplasmanla, cidarın radyal yönde dışa ve hemen alt kısımda ise ters yönde yani içe doğru olan hareketiyle birlikte katlanma cereyan etmekte ve bunun sonucu numunenin yük taşıma kabiliyeti hızlıca azalmaktadır. Bu durum kuvvet-deplasman grafiğindeki (Şekil 57) minimum kuvvet değerinin görüldüğü deplasmana karşılık gelmekte olup, bu aynı zamanda katlanmanın tamamlandığı deplasmandır. (c) bir sonraki safhada kısmen pekleşmiş ve de radyal yönde daha fazla iç kısma harekete zorlanan cidarın göstermiş olduğu dirençten dolayı kuvvet kısmen yükselmekte ancak bükülme etkisiyle rahatlama kuvvetin tekrar kısmi düşüş göstermesine neden olmaktadır. (d) Cidarda ikinci kat oluşumu için gerekli radyal yönde (dışarıya) cidar hareketi oluşmaktadır. Burada da tekrarlanan lokal burkulma nedeniyle, kuvvetin yükselmesi söz konusudur. (e) cidarın lokal burkulma sonrası eğme durumuna geçerek katlanmanın gerçekleşmesi, numunenin deformasyon direncinin yani yük taşıma kabiliyetini düşürmesi neden olmaktadır. Bu durum benzer şekilde kuvvetin tekrardan hızlı bir şekilde düşmesine yol açmaktadır.

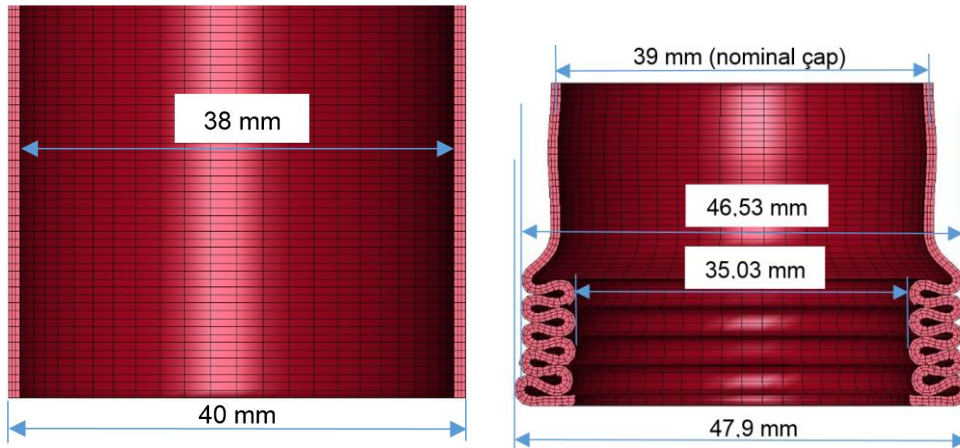


Şekil 57. Numunede tüm deplasmanlar için gerçekleşen şekil değişimi, kuvvet-deplasman grafiğinde karşılık gelen noktalarıyla birlikte verilmiştir



Şekil 58. Tüpün aksenal kuvvet altındaki kat oluşum safhası

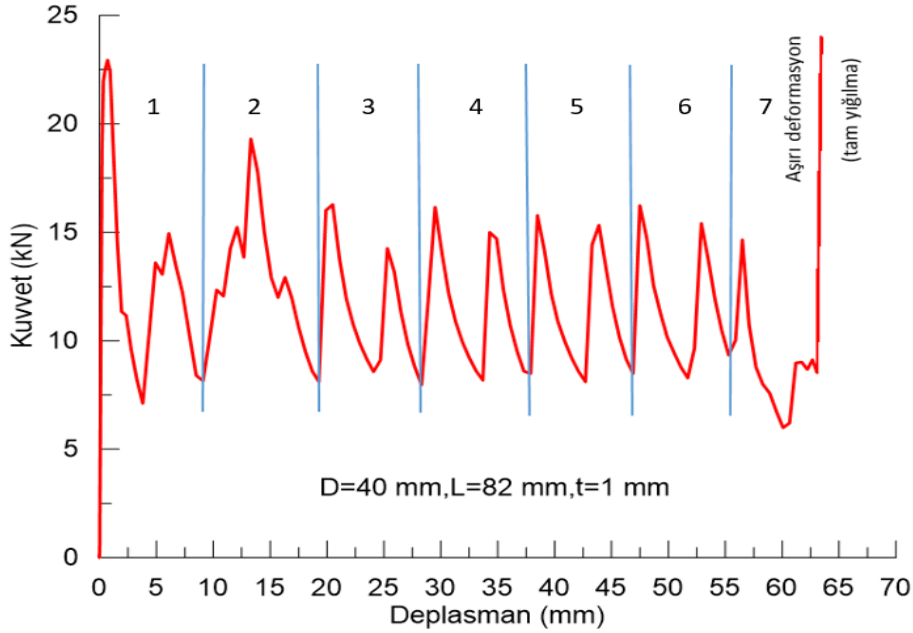
Şekil 59'da dış ve iç çap değerleri sırasıyla 40 ve 38 mm olan tüpün deformasyon sonrası kesit görünümünü vermektedir. Birbiri üzerine katlanan cidarların (kat) genişliği tek taraftan 5,75 mm olup, bunun 3,76 mm dışarıya, 1,99 mm ise içeriye cidar hareketinin söz konusu olduğu anlaşılmaktadır. 39 mm'lik çap değeri referans kabul edildiğinde, kat genişliğinin %65,4'ünün dışarıya, % 34,6'sının içeriye hareket ettiği sonucuna varılmaktadır.



Şekil 59. Tüpün aksenal kuvvet altındaki kat oluşum safhası

4.1.2 Shell Model Analizi

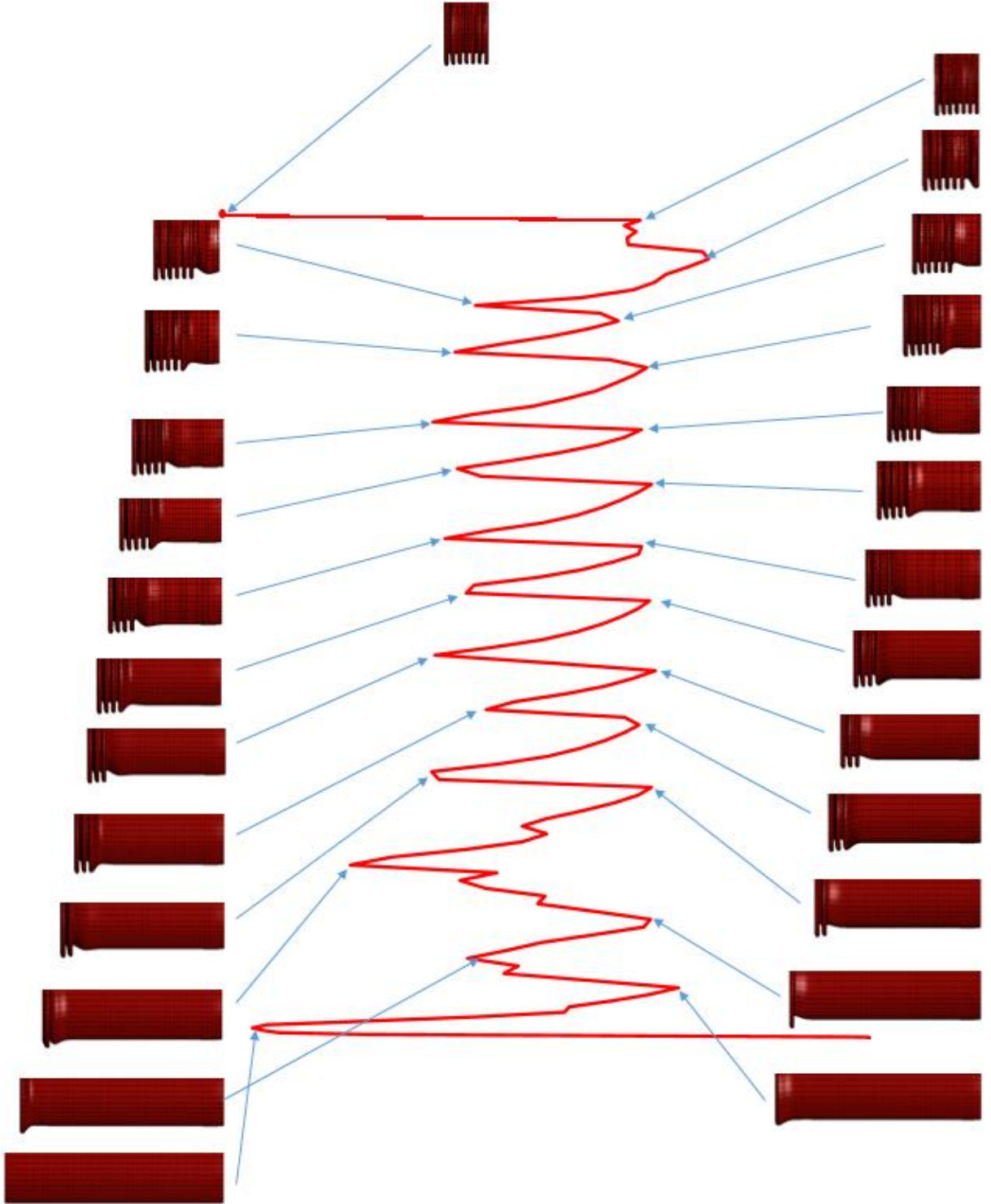
40 mm çaplı, 1 mm cidar kalınlığına sahip numunenin Shell model kullanılarak elde edilen kuvvet-deplasman grafiği Şekil 60'da verilmiştir.



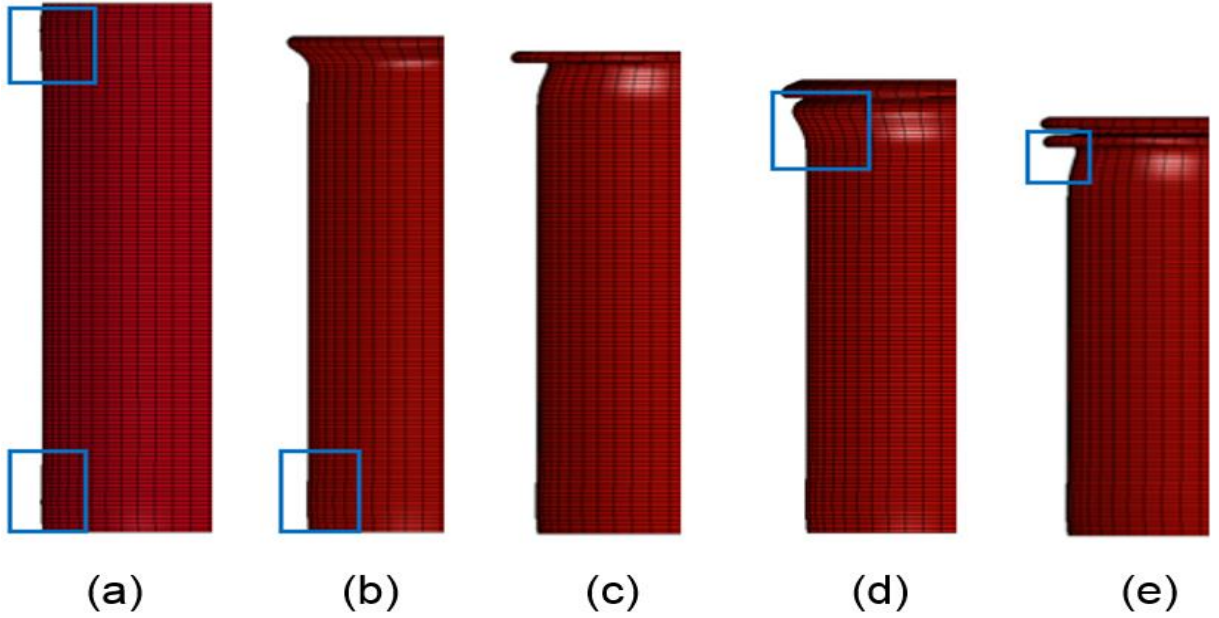
Şekil 60. Shell model kullanılarak, D=40 mm, t=1 mm olan numuneye ait kuvvet-deplasman grafiği

Şekilden de anlaşılacağı üzere, eksene göre simetrik yedi katlanmanın söz konusu olduğu numunede, katlanma bir maksimum kuvvet ile başlamakta, ilerleyen deplasmanlarda cidarın lokal burkulma davranışı sonucu (cidarın kuvvet etkisi altında dış-ıç kısma doğru yönelmesi) belirli bir ortalama kuvvet etrafında artış ve azalma gösterecek şekilde katlanma devam etmektedir. Burada da kuvvet artışlarının her biri tüp üzerinde gerçekleşen katlanmayı işaret etmektedir. Deplasmanın sonlarına doğru katlanmanın sona ermesiyle tam yığılma durumu için kuvvette ani yükselme kendini göstermektedir (Şekil 60). Burada da, kat oluşumuna ait solid modelde verilen gösterim Shell model için de yapılmış ve tüm deplasmanlara ait kat oluşum şekli kuvvet-deplasman grafiğinde ilgili deplasman değerleri için karşılık gelen noktalarıyla birlikte Şekil 61'de gösterilmiştir.

Şekil 62'de katlanma olayının irdelenebilmesi amacıyla, sadece iki kat oluşumuna ait detay görüntüler sunulmuştur. Daha önce Solid model için yapılan kat oluşumuna ait irdellemeler burada Shell model için de geçerlidir.

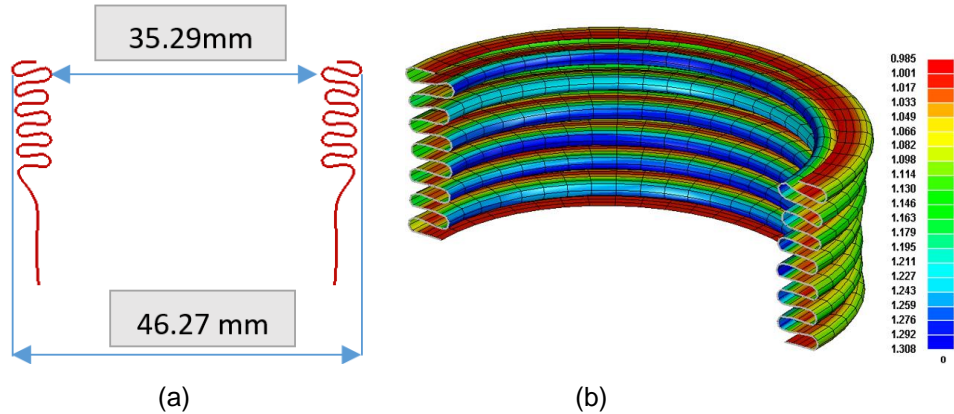


Şekil 61. Shell Numunede tüm deplasmanlar için gerçekleşen şekil değişimi, kuvvet-deplasman grafiğinde karşılık gelen noktalarıyla birlikte verilmiştir.



Şekil 62. Tüpün Aksenal kuvvet altındaki kat oluşum safhası

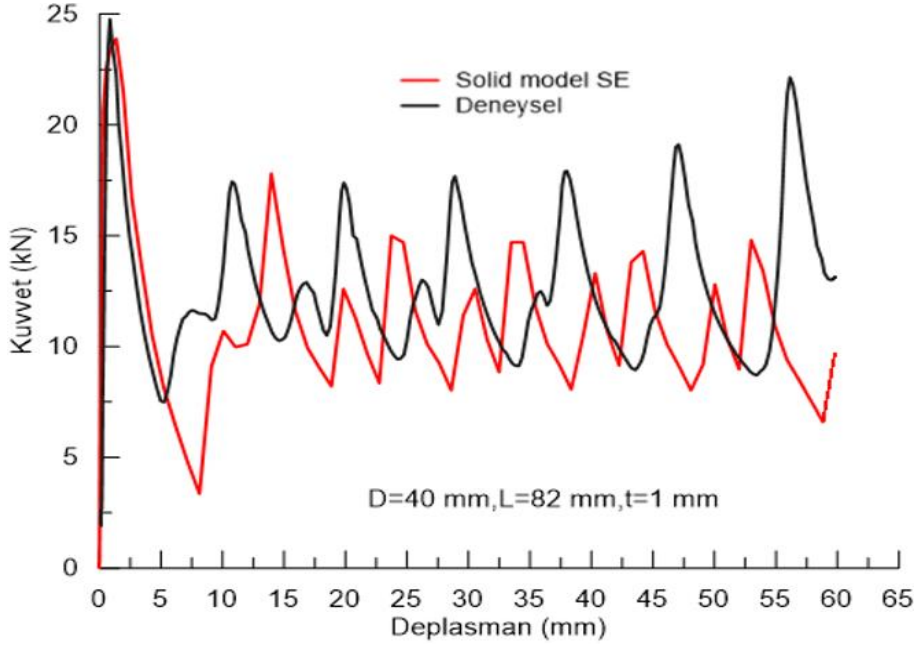
Şekil 63'de Shell model yaklaşımı ile tüpün deformasyon sonrası kesit görünümünü verilmektedir. Katlanmanın sonucunda numunenin katlanan cidarlarındaki değişimin ölçülebilmesi ve daha sonra yapılacak hesaplamalarda kullanılabilmesi için kalınlık değişim konturu içeren Şekil 43b elde edilmiştir. Görüldüğü gibi, tüpün iç ve dış tarafına katlanan kısımlarda farklılık dikkat çekmektedir. Cidardaki bu değişim göze alınarak yapılan değerlendirmeden sonucunda; katlanan cidarların (kat) genişliği 5,49 mm olup, bunun 3,63 mm dışarıya, 1,86 mm ise içeriye cidar hareketinin söz konusu olduğu anlaşılmaktadır. 39 mm' lik çap değeri referans kabul edildiğinde, kat genişliğinin %66 dışarıya, % 34'sinin içeriye hareket ettiği sonucuna varılmaktadır.



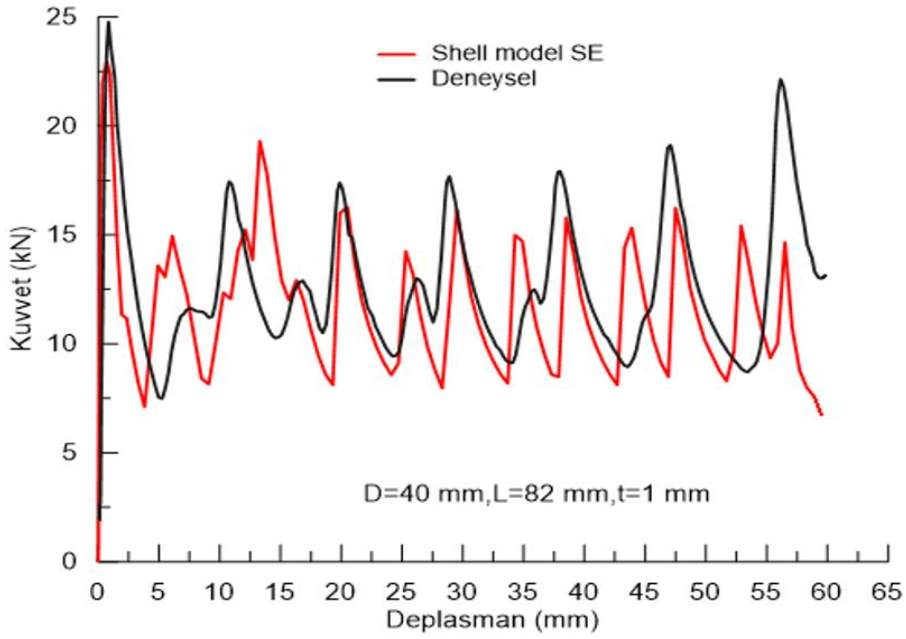
Şekil 63. (a) Tüpün katlanma bölgesinde katların iç ve dış yüzeyleri arasındaki çap değerleri (b) Shell numunenin kalınlık konturu.

4.2 Alüminyum Tüplerin SE Analizlerinin Doğrulanması

Analizlerden elde edilen kuvvet-deplasman grafikleri Şekil 64'de, bu grafikleri karakterize eden büyükler ise Tablo 5'de verilmiştir.



(a)



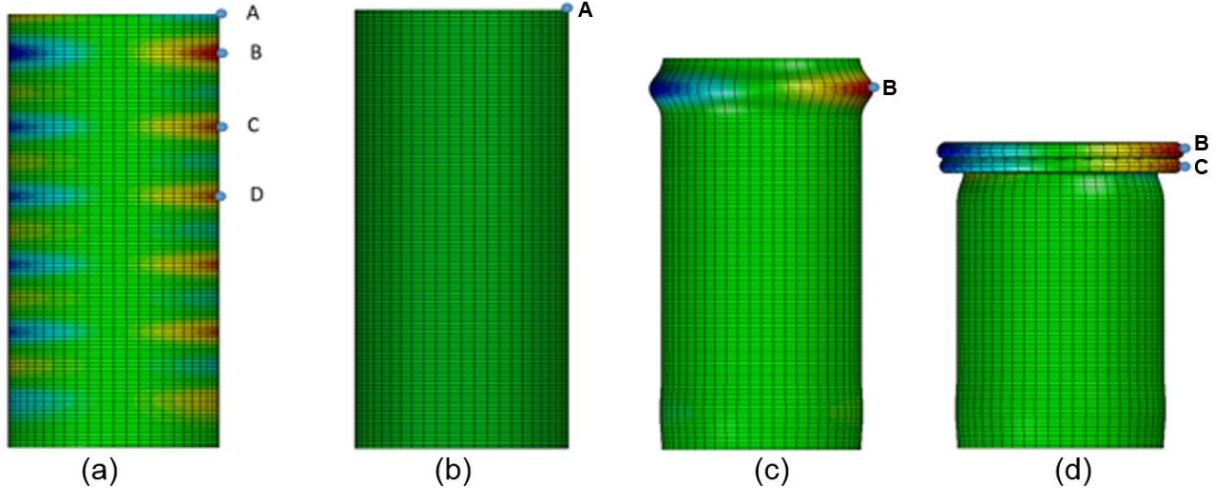
(b)

Şekil 64. (a) Solid model SE analizi-deney kuvvet-deplasman grafiği (b) Shell model SE analizi-deney kuvvet-deplasman grafiği.

Şekil 64 ve Tablo 5'den anlaşılacağı üzere, Shell model kullanılarak yapılan analiz sonuçlarının deney sonuçlarına çok daha yakın olduğu, analizin absorbe edilen enerjiyi belirlemede yaklaşık %94 oranında doğruluğa sahip olduğu anlaşılmaktadır. Deformasyon sırasında kat oluşumunun başladığı noktanın belirlenmesi, ezilme kutusu tasarımı açısından önemlidir (Şekil 65).

Tablo 5. Deneysel sonuçlarla Shell ve Solid model sonuçlarının kuvvet ve katlanma sayısı açısından karşılaştırılması

	F_{maks} (kN)	F_{ort} (kN)	Enerji (J)	Katlanma adedi
Deney	24,76	12,67	760	7
Solid	23,90	11,28	677	6
Shell	23,10	11,84	710	7



Şekil 65 Tüpün katlanması sırasında cidarda dışa burkulmanın meydana geldiği noktaların belirlenmesi

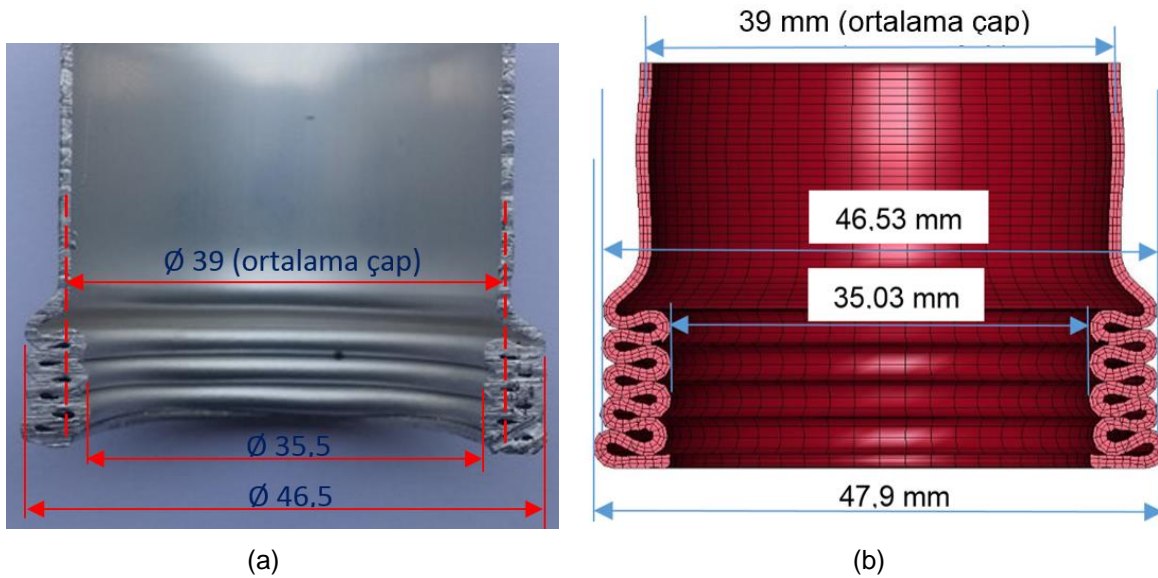
Her iki modele göre analiz sonuçlarından elde edilen katlanma boyu mesafesi, deneysel olarak elde edilen değerler ile birlikte Tablo 6'de listelenmiştir.

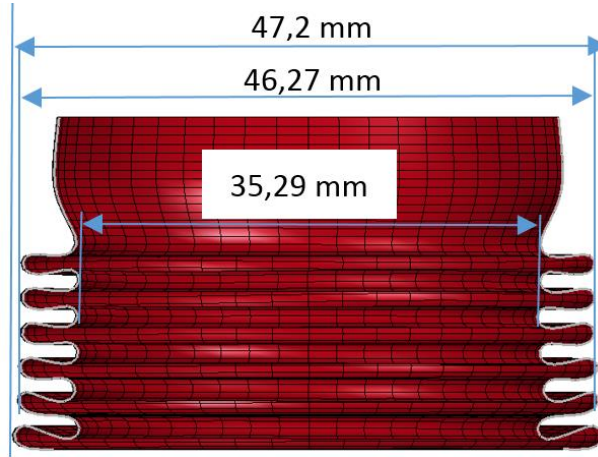
Tablo 6. D=40 mm olan tüp için deneysel olarak ve her iki modele göre analiz sonuçlarından elde edilen katlanma boyu (deformasyon sonrası kat genişliği) mesafeleri

		Tekrarlanan deneylere ait kat boyu ortalaması (mm) [Std. sapma 0,56 mm]*	Solid model SE katlanma boyları (mm)	Shell model SE katlanma boyları (mm)
Kat başlangıcı		5,5	8	4,9
Kat sayısı	1	11,8	13,9	13,1
	2	12,8	12,5	11,8
	3	11,3	13,2	11,8
	4	12,0	13,2	12,5
	5	12,0	13,2	11,8
	6	11,3	8	11,8
	7	5,5	-	4,3
Toplam boy		82	82	82

* Std. sapma hesaplamasında kat başlangıcı ve son kat boyuna ait değerler değerlendirme dışı tutulmuştur.

Simetrik katlanma gösteren numunenin boyuna kesilmiş görünümü Şekil 66'da verilmiştir. Şekilden anlaşılacağı üzere, hem deney ve hem de analiz sonuçları kat genişliğinin tüpün ortalama eksenine göre, radyal yönde hem içeriye ve hem de dışarıya doğru yönelmiş olduğunu göstermektedir. Bu, literatürde dikkat çekilen davranış mekanizmalarıyla doğrudan örtüşmektedir.





(c)

Şekil 66 40 mm çaplı ($t=1$ mm) ölçülerinde tüpte (a) deney sonrası kesiti alınan (b) solid modelin (c) Shell modelin kullanıldığı analiz sonucunu elde edilen numunenin kesit görünümü.

- **Deneysel olarak elde edilen deformasyondan;** (Şekil 66a) Kat genişliğinin 5,5 mm olduğu tüp yapıda ortalama çap değeri dikkate alınarak hesaplama yapıldığında, cidarın dışarıya yönelme miktarının kat genişliğinin %68 olduğu sonucuna daha önce ulaşılmıştı.

- **Solid modelin kullanıldığı analizden elde edilen deformasyondan;** (Şekil 66b) Birbiri üzerine katlanan cidarların (kat) genişliği tek taraftan 5,75 mm olup, bunun 3,76 mm dışarıya, 1,98 mm ise içeriye cidar hareketinin söz konusu olduğu anlaşılmaktadır. 39 mm'lik çap değeri referans kabul edildiğinde, kat genişliğinin %65,3 dışarıya, % 34,7'sinin içeriye hareket ettiği sonucuna varılmaktadır.

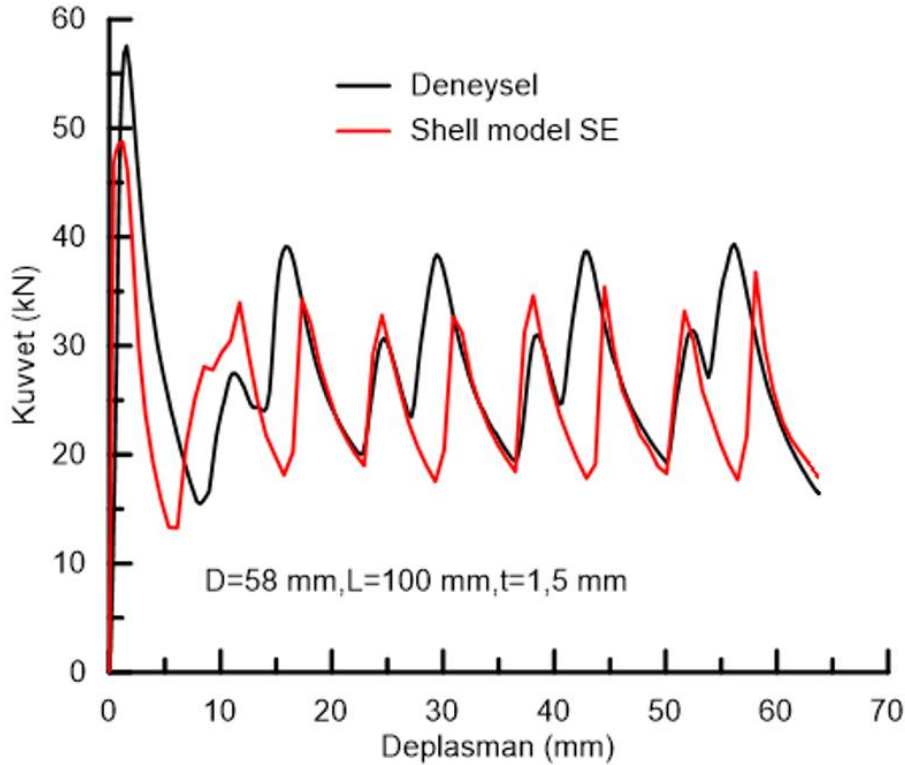
- **Shell modelin kullanıldığı analizden elde edilen deformasyondan;** Şekil 66c) Cidardaki bu değişim göze alınarak yapılan değerlendirmeden sonucunda; katlanan cidarların (kat) genişliği 5,49 mm olup, bunun 3,63 mm dışarıya, 1,86 mm ise içeriye cidar hareketinin söz konusu olduğu anlaşılmaktadır. 39 mm'lik çap değeri referans kabul edildiğinde, kat genişliğinin %66 dışarıya, % 34'sinin içeriye hareket ettiği sonucuna varılmaktadır.

Not: Buraya kadarki kısımda hem solid hem de Shell modele ait analiz sonuçları verilmiştir. Her iki yaklaşım katlanmanın fiziğine ışık tutan bilgiler sunmakla birlikte, dikkat çeken en önemli nokta Shell modele ait sonuçların deney sonuçlarına daha yakın ve gerçekçi olmasıdır. Örneğin deneylerde 7 kat oluşumu sadece Shell model sonuçlarında elde edilmiştir. Dolayısıyla bundan sonraki analizlerde (ana tüp ebatı olan 58 mm'lik çap için) Shell model kullanılacaktır.

SE Analizi Yapılan 58 mm Çaplı Tüplerin Validasyonu

D= 58 mm'lik tüp yapının modellenmesinde (Shell model) ağ boyutunun sonuçlara olan etkisi incelenmiş ve büyük farklılıklara yol açmadığı anlaşılmıştır. Analizlerde 2,5 mm x 0,7 mm ebatlarındaki ağ boyutu esas alınmıştır. Burada da pilot analizler için tanımlanmış sınır şartları ve sürtünme durumu dikkate alınmıştır. Tüp yüzeyleri arasında (katlanma safhası için), tüpün ayrı ayrı alt ve üst tabla ile arasında sürtünmeli temas tanımlanmıştır. Parçaların birbirleri ile arasında statik sürtünme 0,2 ve dinamik sürtünme katsayısı ise 0,18 olarak alınmıştır. Burada da *CONTACT AUTOMATIC NODES TO SURFACE temas algoritması kullanılmıştır. Ls-Dyna programına ait malzeme kütüphanesinde *MAT 18 malzeme model (*MAT POWER LAW PLASTICITY) kartı kullanılmıştır. Bu kartta malzemeye ait akma eğrisinin tanımlanmasında Hollomon denklemi kullanımı söz konusu olduğundan, regresyon analizi ile denkleme ait büyüklükler belirlenmiştir. D=58 mm çaplı 6063 alaşımı için $R^2=0,986$ korelasyon katsayısı ile belirlenen ampirik denklem (Denklem 4) aşağıdaki verilmiştir.

$$\sigma = 310\varepsilon^{0,15} \quad (4)$$

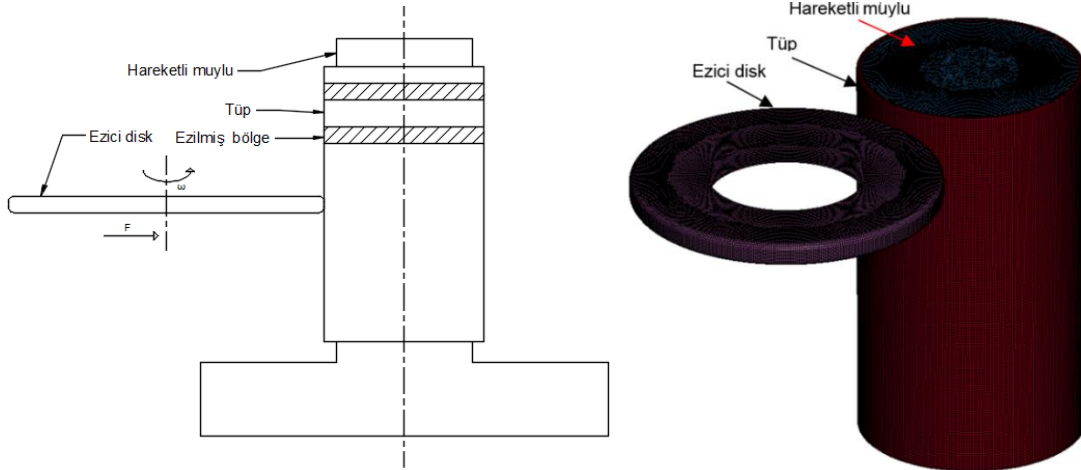


Şekil 67 Takviyesiz tüp yapının deney ve SE analiz sonuçları, (kuvvet-deplasman grafiği).

Şekil 67’de verilen takviyesiz tüp yapının kuvvet-deplasman grafiğinden, SE sonuçlarının kat sayısı ve genel olarak deformasyon davranışı itibarıyla deney sonuçlarıyla uyum içinde olduğunu söylemek mümkündür.

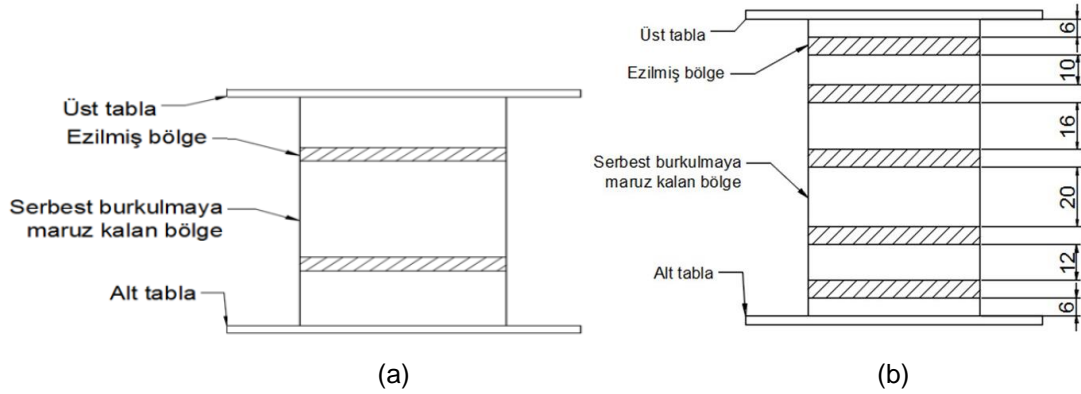
4.3 Çevresel Ezme İşlemi Uygulanmış Numunelerin SE Analizi

Sonlu elemanlar (SE) metodu kullanılarak yapılan ezme işleminin katlanma safhalarına olan etkisi detaylı olarak ele alınmıştır. Cidarın ezilmesi ancak hacim elemanların kullanıldığı SE model üzerinde sağlıklı olarak çalıştırılabildiği için, bu kısımdaki hesaplamalar bu model kullanılarak yapılmıştır. Ezme işlemine ait şematik ve sonlu eleman görünümü ise aşağıdaki şekilde verilmiştir (Şekil 68).



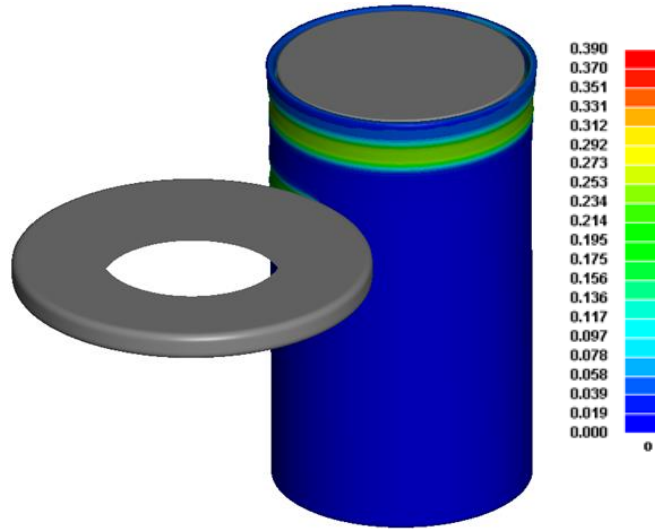
Şekil 68 Ezme işlemine ait (a) şematik (b) sonlu eleman modeline ait görünüm.

Şekil 69’da (a) serbest burkulma boyunun katlanmaya etkisinin incelendiği ve (b) farklı aralıkta cidarı ezme işlemi uygulanmış (dolayısıyla da birden fazla serbest burkulma mesafesine sahip) numuneler için şematik görünüm verilmiştir.



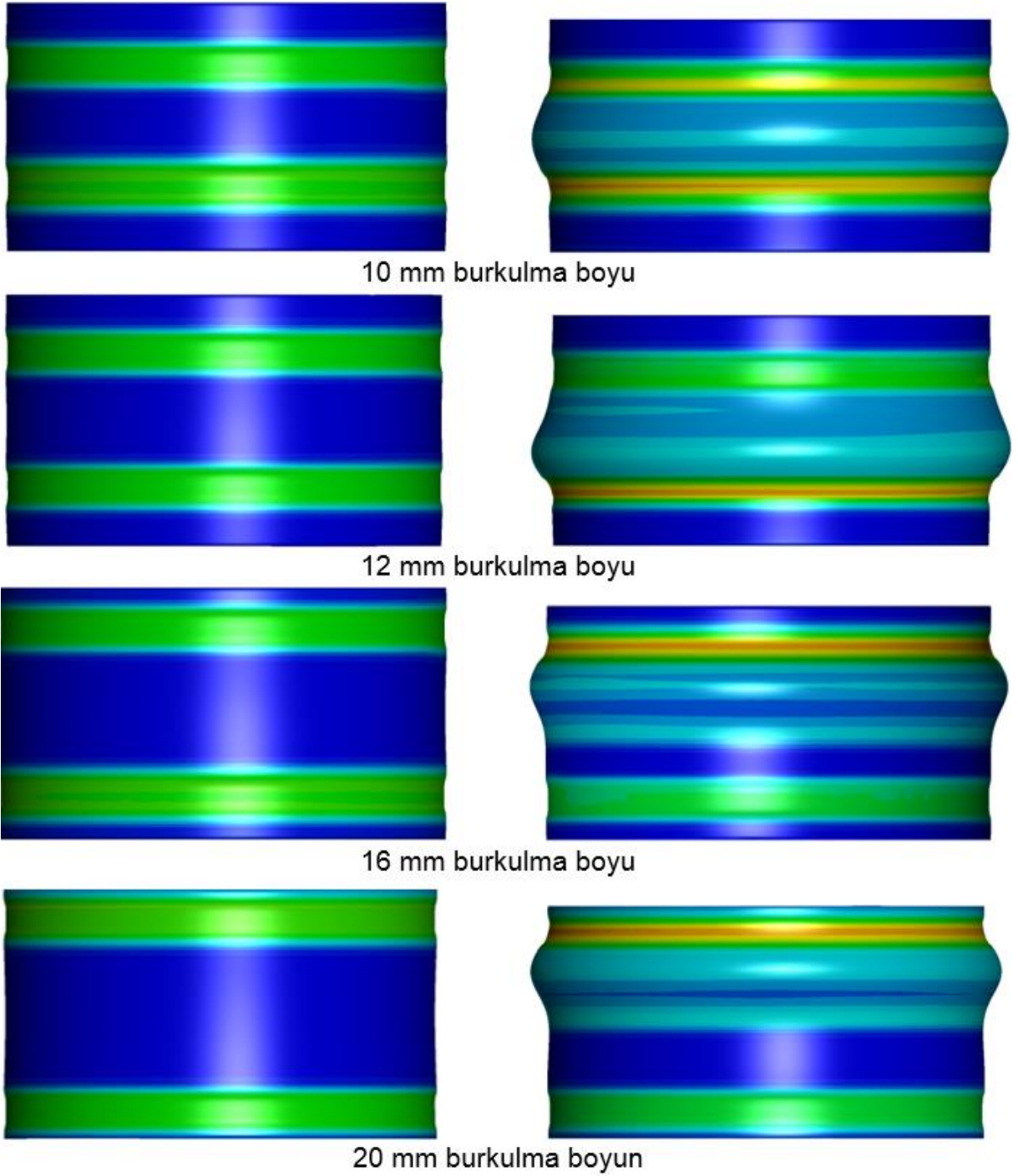
Şekil 69 (a) serbest burkulma boyunun katlanma olan etkisinin incelendiği numune (b) farklı boyda serbest bölge numune ölçüleri

Deneyel ezme işleminin birebir aynı geometri ve ölçüleri kullanılarak SE ortamında gerçekleştirilen ezme işlemi ise Şekil 70'da görülmektedir.



Şekil 70. Cidarında 0,2 mm derinlikte ezme işleminin gerçekleştirilen numunede plastik birim şekil değişimi dağılımı.

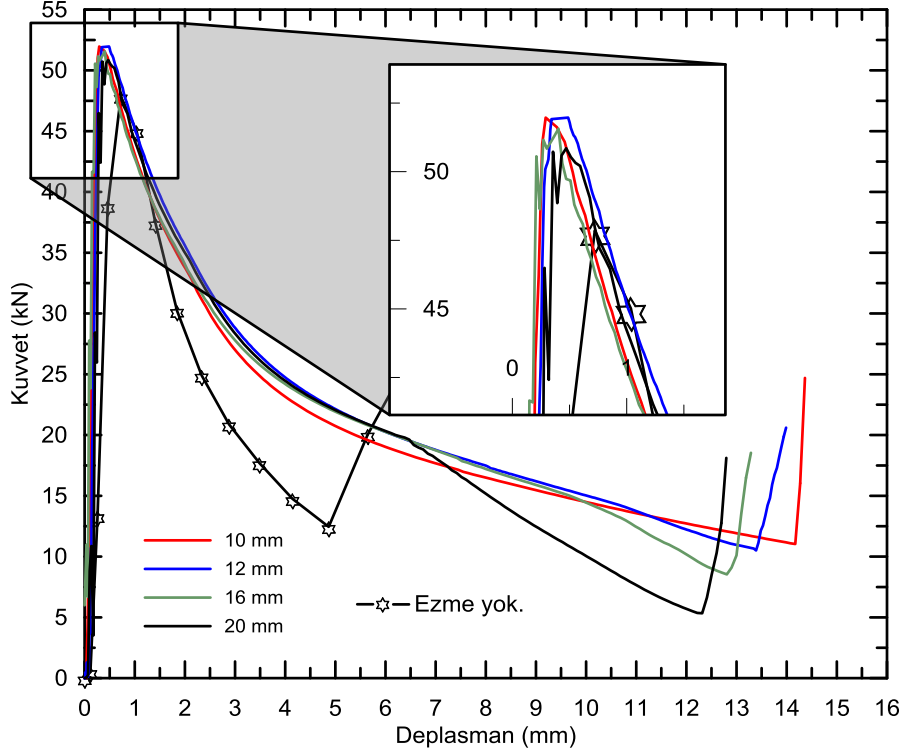
Şekil 71'de farklı serbest burkulma boyları için ezilmiş numunelerde katlanma davranışına ait SE sonuçları görülmektedir. Şekilden genel olarak çıkartılabilecek en önemli sonuç, parçanın uç kısmında yer alan katlanma başlangıcının iki ezme bölgesinin arasına taşınmış olmasıdır.



Şekil 71. Farklı burkulma serbest boyuna sahip numunelerde katlanma davranışı

Bu grup numunelere ait kuvvet deplasman eğrileri ise Şekil 72'de verilmiştir. Görüldüğü gibi, cidarda ezme işlemi tüm serbest burkulma boyları için, ezilmemiş duruma göre kuvvet değerini arttırmaktadır. Dahası azalan burkulma boyu ile katlanma kuvveti de artmaktadır. Bu durum temel

mekanik prensipleri açısından beklenen bir durum olup, kuvvet piklerinin ezilmemiş parçaya göre daha üst değerlere çıktığı deneysel olarak da tespit edilmiştir.

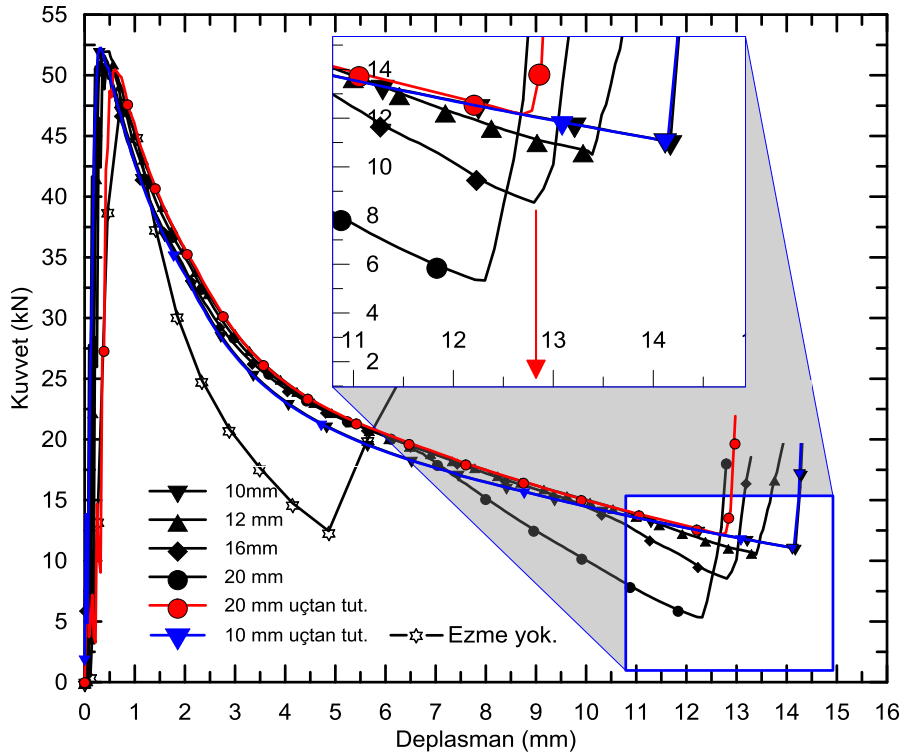


Şekil 72. Burkulma serbest boyunun ilk katlanma kuvveti (F_{maks}) üzerine olan etkisi

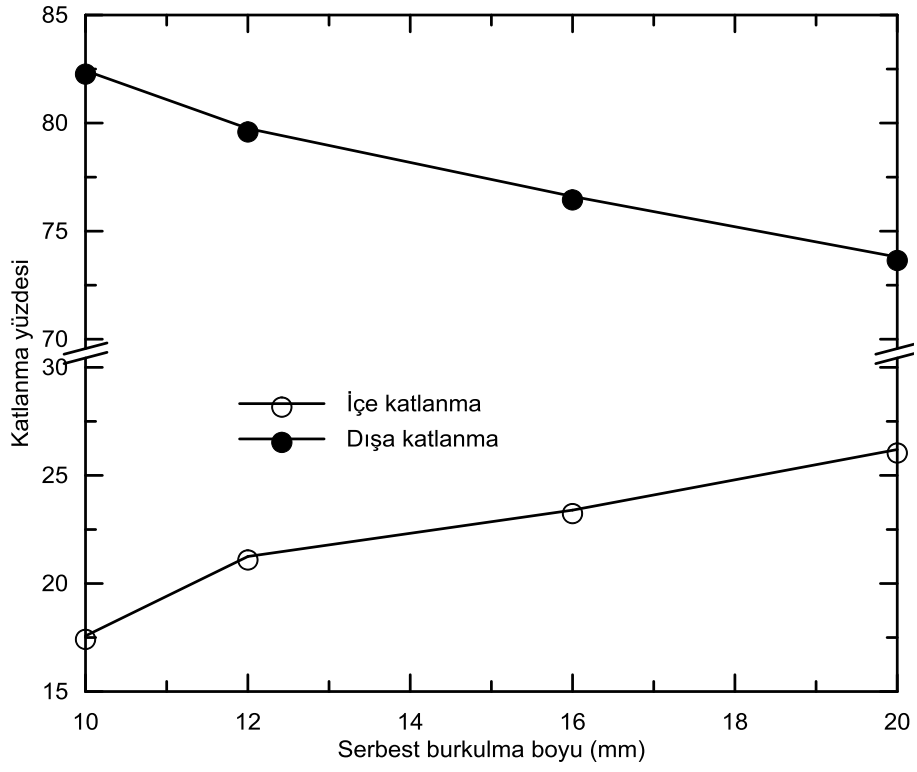
Şekil 73'de burkulma serbest boyunun ikinci katlanma başlangıç kuvveti ve deplasmanına olan etkisi, eğrinin ayrıca büyütülen bölgesinde detaylı olarak görülmektedir. Öncelikle ezme işlemi genel olarak, ikinci kat oluşum deplasmanının yükselmesine yol açmakta, burkulma boyunun değişmesi kuvvet değerini de etkilemektedir. Ezme işlemi uygulanan numunede burkulma boyunun kısa tutulması sadece başlangıç kuvvet değerini nispeten arttırmakla kalmayıp, ikinci kat başlangıç kuvvetini de belirgin bir şekilde yükselmesini sağlamaktadır.

Serbest burkulma boyunun kısa tutulması, kat boyunun da doğal olarak kısalması anlamına geleceğinden, katlanma olayı nispeten daha yüksek kuvvetler altında ve de gecikmeli olarak gerçekleşmektedir (Şekil 73). Ayrıca serbest burkulma boyunun tüp yapının iç ve dış yönde katlanmasına doğrudan etkilediği (Şekil 74), serbest burkulma boyunun azalmasıyla, cidarın dışı doğru hareketinin de arttığı anlaşılmaktadır. Ezme işlemi uygulanmamış numunelerde dışı katlanma yüzdesi kabaca %65 mertebelerinde ve katlanma numunenin uç kısmında başladığı net

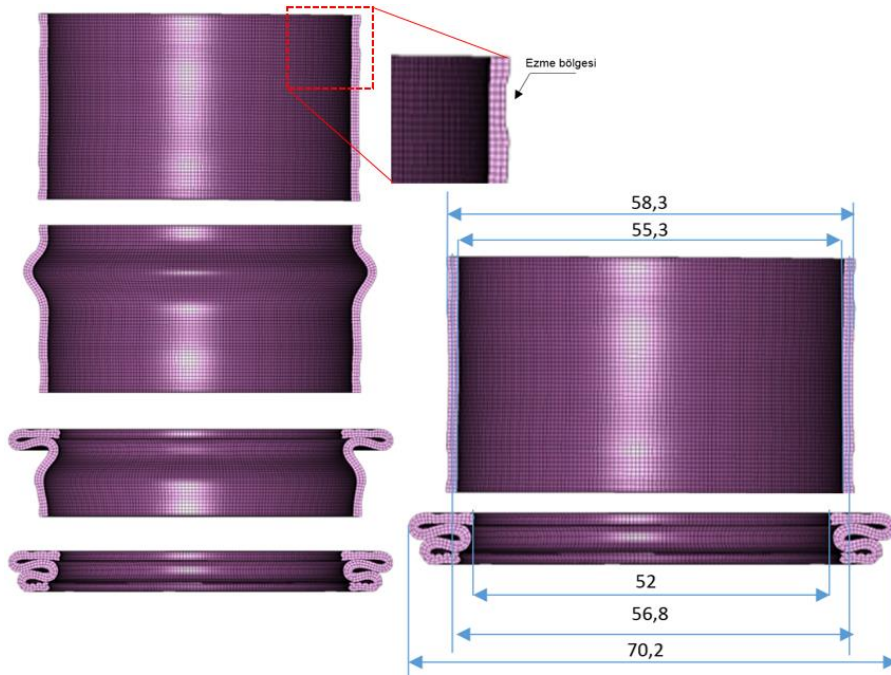
bir şekilde nedenleriyle bilinen bir deformasyondur. Cidarı ezilmiş parçalarda ise kat oluşumu öngörülen aralıkta gelişmektedir. Dahası 20 mm burkulma boyu için dışa katlanma %73 iken, bu değer 10 mm serbest burkulma boyunda %82'lere ulaşmaktadır. Bu durum, 20 mm serbest burkulma boyuna sahip numunede katlanma safhaları ve katlanma yüzdesi hesabı için bazı büyüklükler ile birlikte Şekil 74b ve c'de verilmiştir. Kesiti verilen analiz görüntüsünden tüp cidarının ezilmiş olması deformasyon esnasında cidarların içeriden çok, dışarıya doğru yönelmesine neden olmaktadır.



Şekil 73. Burkulma serbest boyunun ikinci katlanma başlangıç kuvveti ve deplasmanına olan etkisi.



(a)



(b)

(c)

Şekil 74 (a) Serbest burkulma boyunun tüp yapının iç ve dış yönde katlanmasına etkisi (b) 20 mm serbest burkulma boyuna sahip numunede katlanma safhaları (c) iç ve dışa doğru katlanma yüzdesi hesabında kullanılan büyüklüklerin belirlenmesi.

Tablo 6’de dört farklı serbest burkulma boyuna ezme işlemi için analiz sonuçlarından kat oluşumuna ait büyüklükler verilmiştir. Dış tarafa katlanmanın en büyük değeri %81,8 ile 10 mm serbest boya sahip numunede, iç tarafa katlanmanın en büyük değeri %26,4 ile ise 20 mm serbest boya sahip numunede geliştiği anlaşılmaktadır.

Tablo 7. Ezme işlemi uygulanmış numunelerin katlanma davranışına ait büyüklükler

Serbest burkul. boyu (mm)	Dış çap (mm)	İç çap (mm)	Ortalama çap (mm)	Katlanma. Dış çap (mm)	Katlanma. İç çap (mm)	Kat genişliği (mm)	İç tarafa katlanma (mm)	Dış tarafa katlanma (mm)	İç tarafa katlanma (%)	Dış tarafa katlanma (%)
10 mm	58,3	55,3	56,8	71,3	53,7	8,8	1,6	7,2	18,2	81,8
12 mm	"	"	"	75,6	51,4	12,1	2,7	9,4	22,3	77,7
16 mm	"	"	"	72,0	52,1	10,0	2,3	7,7	23,0	77,0
20 mm	"	"	"	70,2	52,0	9,1	2,4	6,7	26,4	73,6

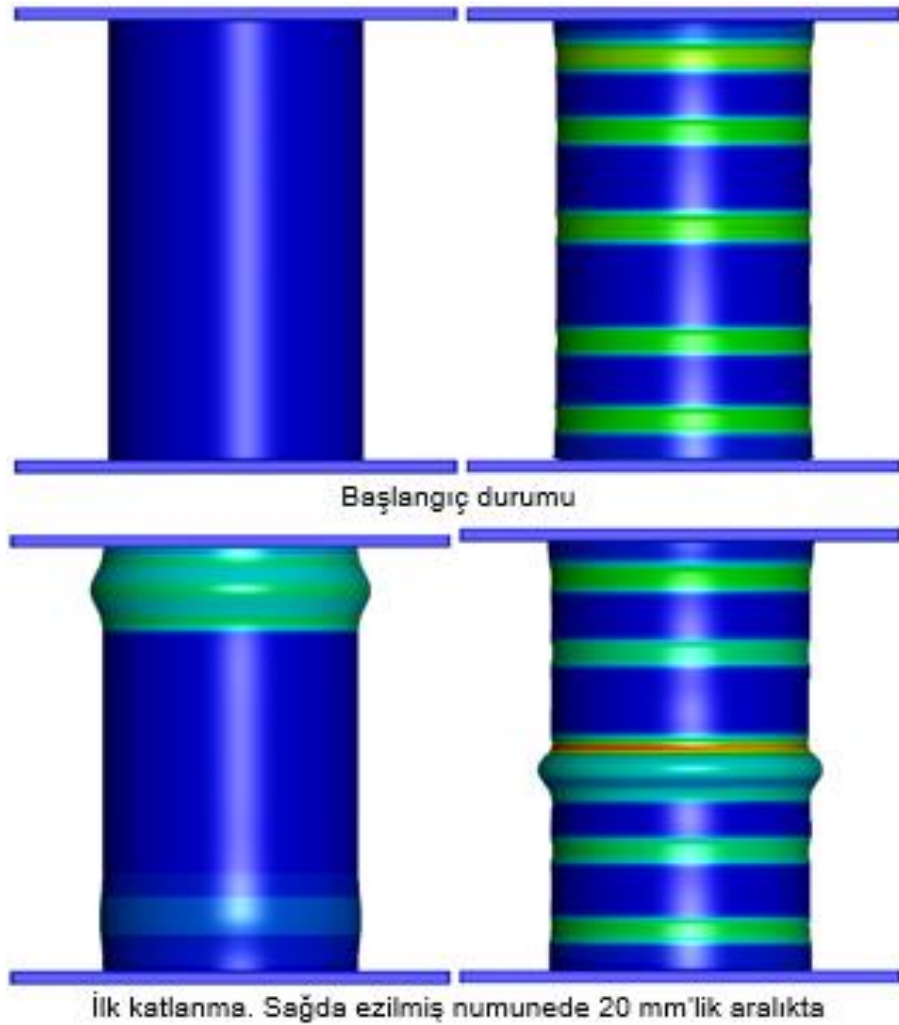
Yukarıda incelenen katlanma sırasında cidarın daha fazla dışarıya yönelme durumu için aşağıdaki irdelemeleri yapmak mümkündür;

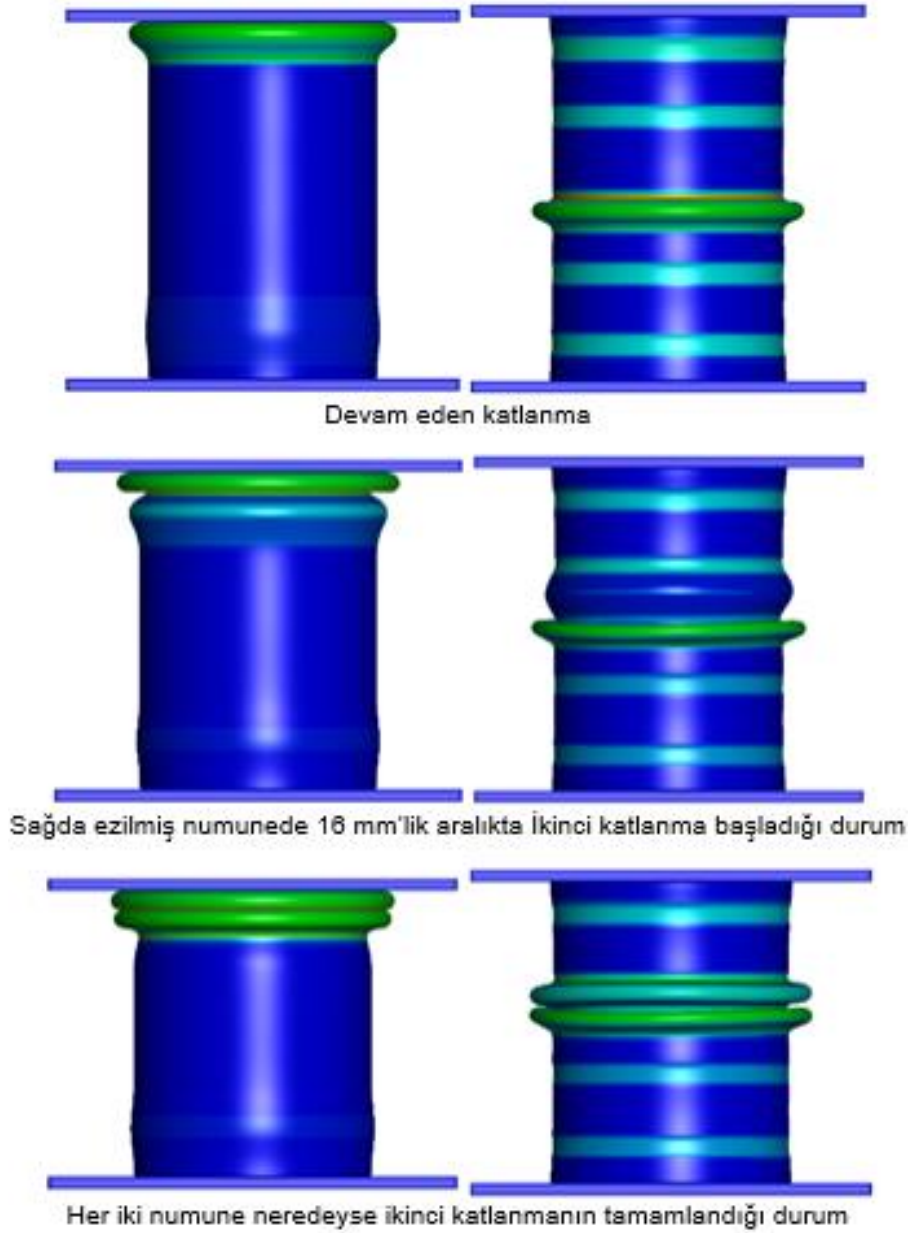
- Dışarıdan yapılan güçlü bir takviyenin parçanın deformasyonunu engelleyerek numunenin ezilme karşı etkinliğini arttıracaktır. Burada, cidar ezme bölgesine uygulanacak elyaf takviyenin, ara yüzeyde boşluk bulundurması en önemli sorunu teşkil etmektedir.
- İçeriden yapılan (örn. köpük) takviyenin sınırlı katkı sunmasına neden olacaktır.

Şekil 73 ‘de 10 ve 20 mm serbest burkulma boyuna sahip parçaların alt ve üst yüzeylerinden radyal yönde hareketi kısıtlanmış olması da SE ortamında incelenmiş ve aynı eğri üzerinde etkisi gösterilmiştir. Buna göre, serbest burkulma boyunun uzun tutulduğu numunelerde bu işlemin efektif olarak etkisinin bulunduğu, ancak kısa burkulma boyunda aynı etkiden söz etmenin mümkün olmadığı anlaşılmaktadır. 20 mm serbest burkulma boyu için bu işlemin belirgin fayda sağlaması, bu numunelerde kat oluşumunun numune uç kısmına, ezilen bölgenin sınırına yaklaşma eğilimi göstermesi nedeniyle, numune ucundaki yatay yer değiştirmenin bağıl olarak artmasıyla ilişkili olduğu düşünülmektedir. Bu durum yukarıda numune görüntülerinin toplu olarak

verildiği şekilde açık bir şekilde, özellikle de 10 ve 20 mm serbest boya sahip parçaların karşılaştırılmasından da anlaşılmaktadır.

Şekil 75 farklı serbest burkulma boylarına ezilmiş bir numune ile ezme işlemi uygulanmamış numunenin katlanma davranışını hakkında genel bilgi vermektedir. Cidarı ezilmemiş numunede katlanma üst taraftan gerçekleşirken, ezme işlemi katlanmanın serbest burkulma boyunun en büyük olduğu (20 mm) bölgeden başlamasını sağlamıştır. Bu numunelere ait analiz ortamında elde edilen kuvvet-deplasman grafiği ise Şekil 82'de verilmiştir.

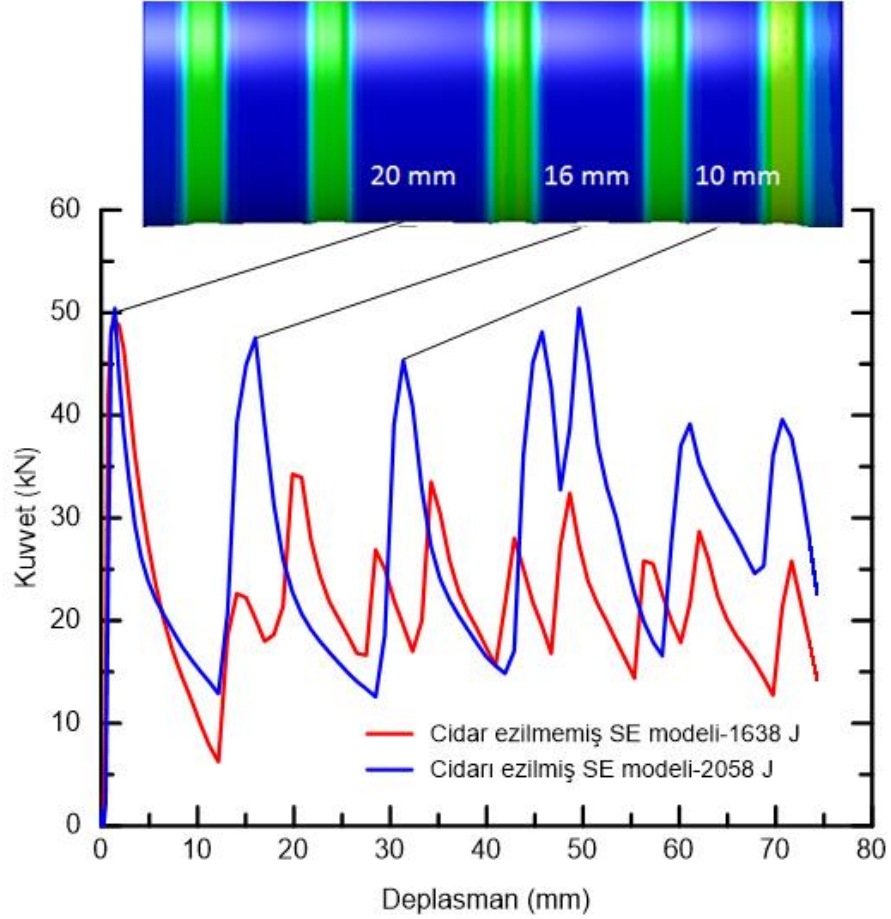




Şekil 75. Bir numunenin farklı serbest burkulma boylarına sahip olması halinde katlanma sırası. (Burkulma boyu sayısı: bir tane 20 mm, bir tane 16 mm, bir tane 12 mm ve bir tane 10 mm)

Şekil 76'de verilen kuvvet –deplasman grafiğinden cidarı ezilmemiş numune 75 mm deplasmanda 1638 J enerji absorbe ederken, bu değer ezilmiş numune için 2058 J 'dür. Buna göre, enerji değerinde %24 oranında artış söz konusudur. Şekilde burkulmanın sırasıyla serbest boyun 20 mm olduğu kısımdan başlamış ve daha sonra 16 ve 10 mm aralıklarda devam etmiştir. 16 mm aralığa sahip kısmın katlanması sonrası, 12 mm'lik kısmın deformasyona katılmamasının nedeni,

her bir kat oluşumunun son evresi komşu cidarda yeni kat oluşumuna kolaylaştırıcı geometrik değişikliğe yol açmasıdır.

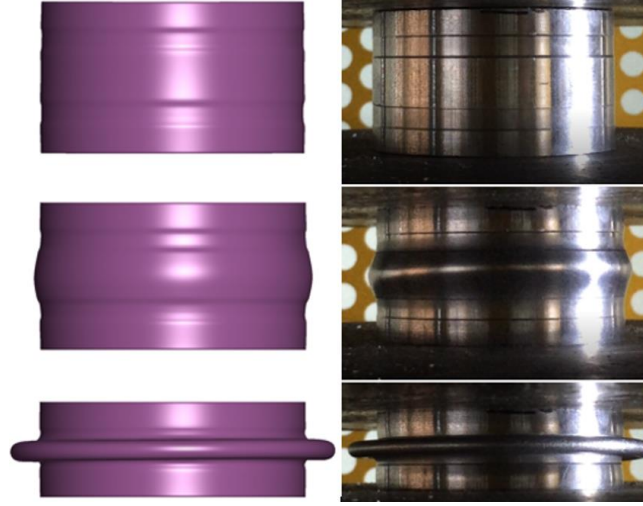


Şekil 76. Farklı serbest burkulma boylarında cidar ezme işleminin tüp yapının kuvvet-deplasman grafiğine etkisi.

Çevresel Ezme SE Sonuçlarının Doğrulanması

Bu bölümde tüp yapının analizlerinde ağırlıklı olarak ele alınan cidar ezme işleminin doğurduğu sonuçlar ve bunların fiziksel olarak oluşumlarının irdelenmesi üzerineydi. Deneysel çalışmada her ne kadar pekleşme davranışı çok az olan, alüminyum alaşımı üzerinde çalışılmış olsa da, tekrarlanan çok sayıda ezme işlemi ve beraberinde kazanılan tecrübelerle çevresel olarak düzgün ezilmiş numuneler üretilebilmiştir. Toplam boyu 34 mm olan, ezme aralığı, dolayısıyla serbest

burkulma boyu 10 ve 20 mm olacak şekilde cidarı dıştan ezilen numunelerin deney esnasındaki video kaydından alınan görüntüleri, analiz sonuçlarıyla birlikte eşleştirilerek Şekil 77'da verilmiştir.



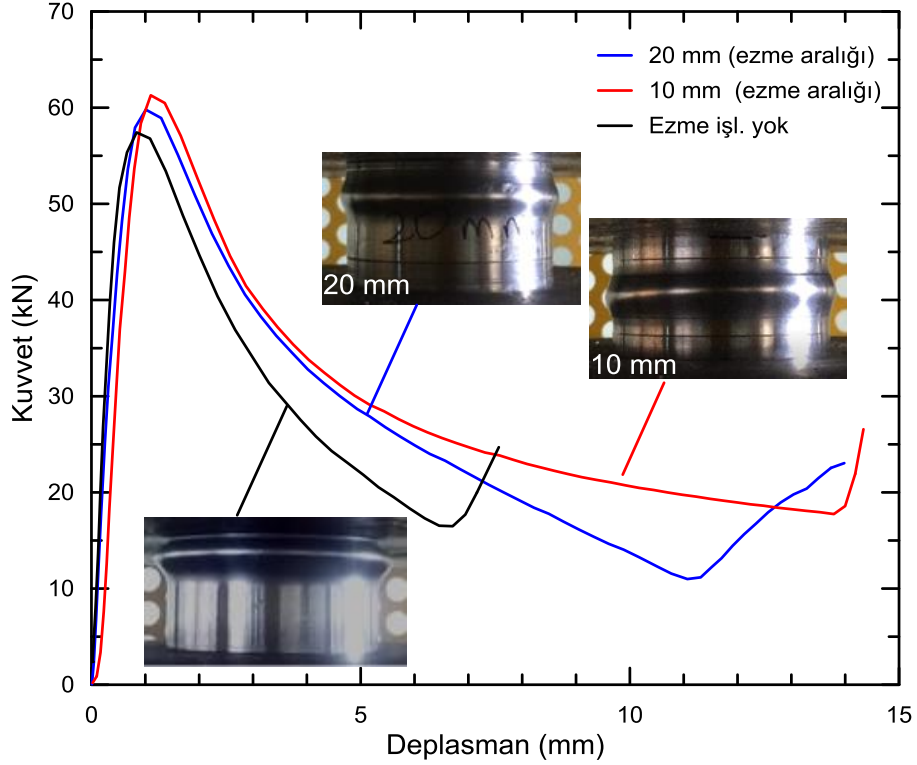
(a)



(b)

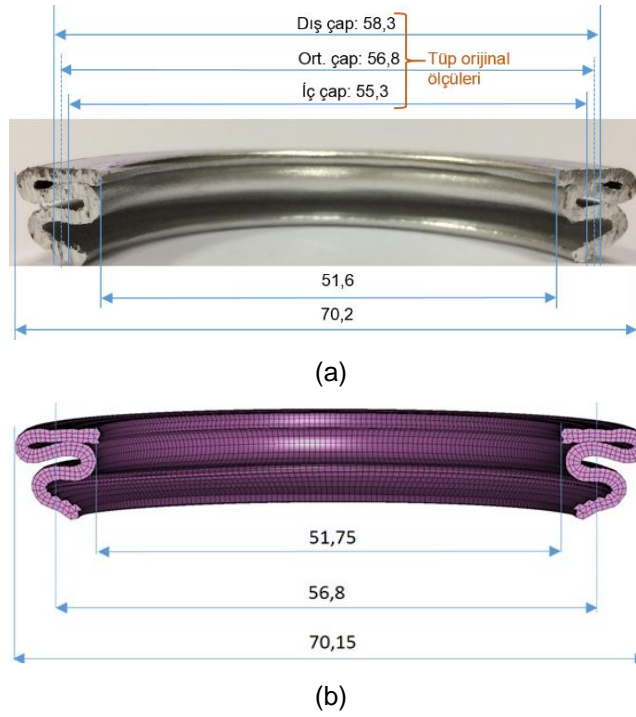
Şekil 77. Serbest burkulma boyu (a) 10 ve (b) 20 mm olacak şekilde cidarı dıştan ezilen numunelerin deneye ve analize ait görüntüleri. Not: Şekildeki video görüntüleri ekte verilen MP4 uzantılı dosyalardan ulaşılabilir.

Yukarıda verilen analiz ve deneysel olarak elde edilen görüntülerden, burkulma davranışının fiziksel olarak analiz edilebildiği anlaşılmaktadır. Şekil 78’de ise bu numunelerin (deneysel olarak serbest burkulma boyu 10 ve 20 mm olarak üretilen) kuvvet-deplasman grafikleri verilmiştir. Buna göre, daha önce cidarda analiz ortamında ezme işleminin parçanın katlanma davranışına olan etkisi aşağıda verilen deney sonuçlarıyla desteklenmektedir.



Şekil 78 Serbest burkulma boyu 10 ve 20 mm olacak şekilde cidarı dıştan ezilen numunelere ait deneysel olarak elde edilen kuvvet-deplasman grafikleri.

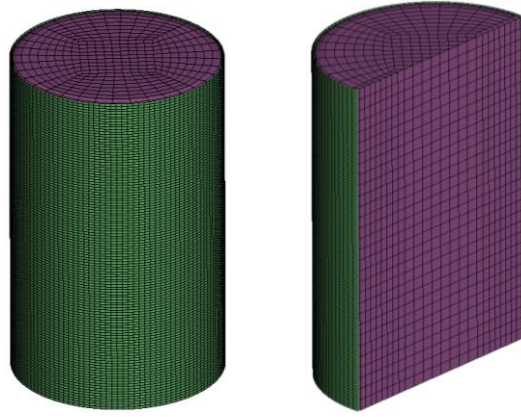
Şekil 79’de Cidarı ezilmiş takviyesiz tüp yapının ezilme durumunu deneysel ve analiz ortamında elde edilen görüntüleri verilmiştir. Şekilden anlaşılacağı üzere, kat genişliğinin tüpün ortalama eksenine göre radyal yönde dışarıya yönelmesinin daha fazla olduğu, deneysel ve analiz sonuçlarıyla desteklenmiş ve her iki sonucun birbiriyle önemli oranda örtüştüğü anlaşılmaktadır.



Şekil 79 Cidarı ezilmiş takviyesiz tüp yapının ezilme sonrası görüntüsü (a) deneysel (b) analiz sonucu.

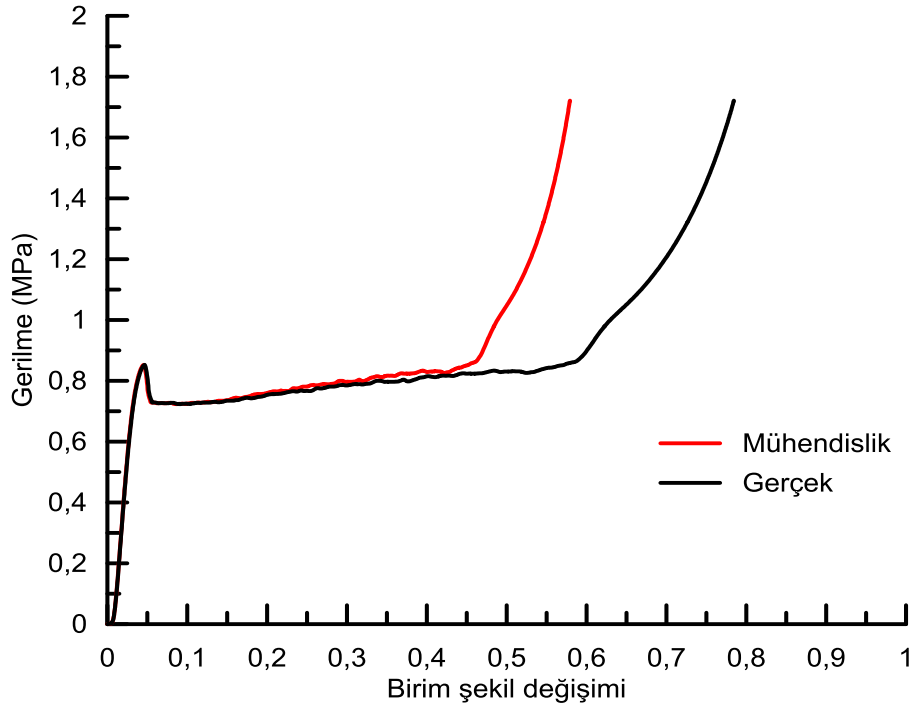
4.4 İçeriden (PVC Köpük) Takviyeli Numunelerin SE Analizi

Bu bölümde içeriden takviye modelinde kullanılan PVC köpüklerin mekanik davranışları SE yöntemiyle belirlenmeye çalışılmış, alüminyum tüp PVC köpükle takviye edilerek SE analizi yapılmıştır. Gözenekli yapıya sahip olan köpüklerin mekanik davranışları metallere çok farklıdır. Basma kuvveti altında önce elastik şekil değişimi gösterip akma noktasının aşılmasıyla fıçılama davranışı görülen metallere aksine köpükler elastik şekil değişim sonrasında fıçılama davranışı göstermezler. Gözenekleri oluşturan hücre çeperlerinin dayanımını aşan kuvvetler çeperlerin kırılmasına sebep olur. Bu durum neticesinde bölgesel hasarlanma meydana gelerek köpüğün plastik deformasyonu vuku bulmuş olur. Şekil 80’de alüminyum tüpün içeriden PVC köpükle takviye edilme durumunun SE analizine ait tam model ve kesit görüntüsü verilmiştir.

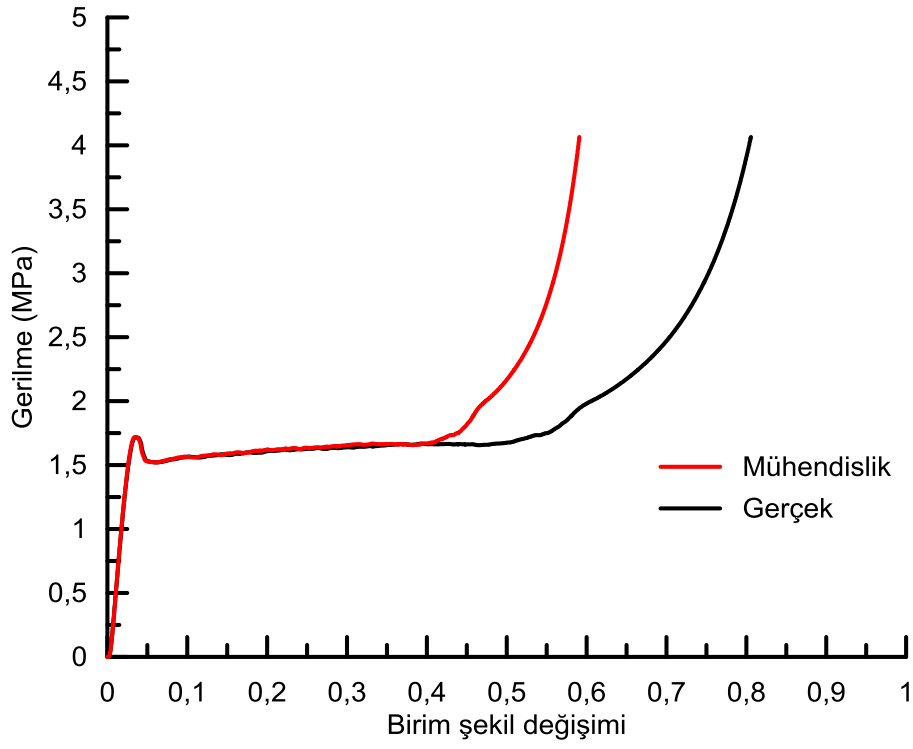


Şekil 80. SE analizine ait tam model ve kesit görüntüsü

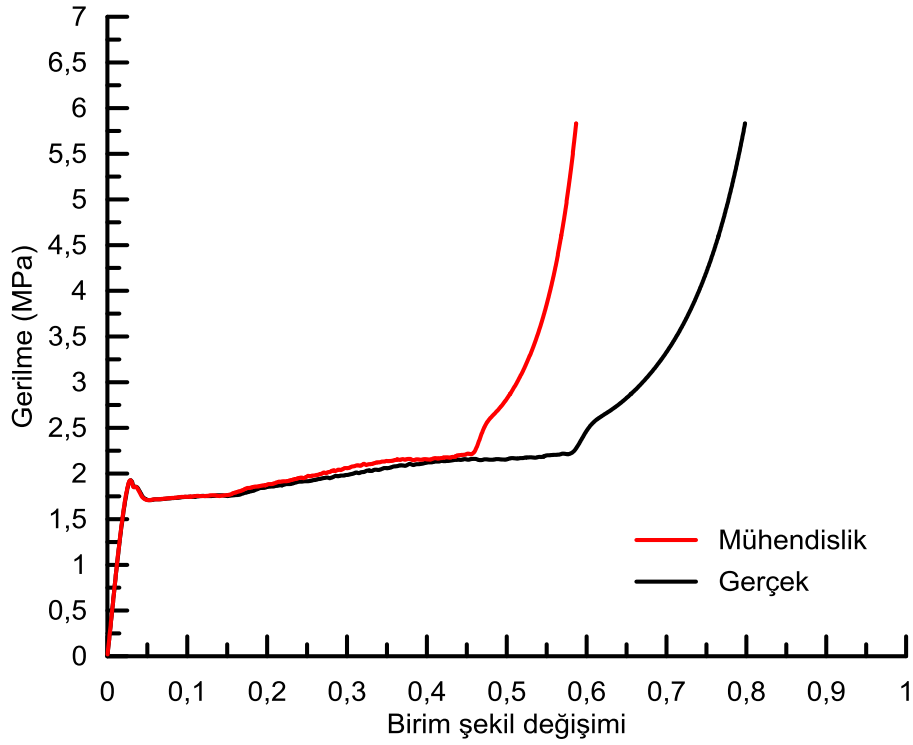
Köpüğün sergilediği nispeten karmaşık plastik deformasyon davranışı nedeniyle SE ortamında modellenmesini ve alüminyum tüple aynı anda çalıştırılmasını zorlaştırılmaktadır. PC köpüklerin modellenmesi aşamasında alüminyum tüp ve çevresel ezme işlemlerinde olduğu gibi Ls-Dyna programından faydalanılmıştır. Köpük malzemelerin modellenmesinde Ls-Dyna malzeme kütüphanesinden *MAT CRUSHABLE FOAM malzeme kartı ve köpük ağ yapısında 1 mm büyüklüğünde elemanlar kullanılmıştır. Şekil 81’de üç farklı yoğunluğa sahip (60, 80 ve 100 kg/m³) PVC köpüklere ait SE analizinde elde edilen gerilme-deplasman eğrileri verilmiştir. Ayrıca grafikler üzerinde basma analizlerine ait mühendislik eğrilerinin yanı sıra gerçek eğrileri verilmiştir.



(a)



(b)



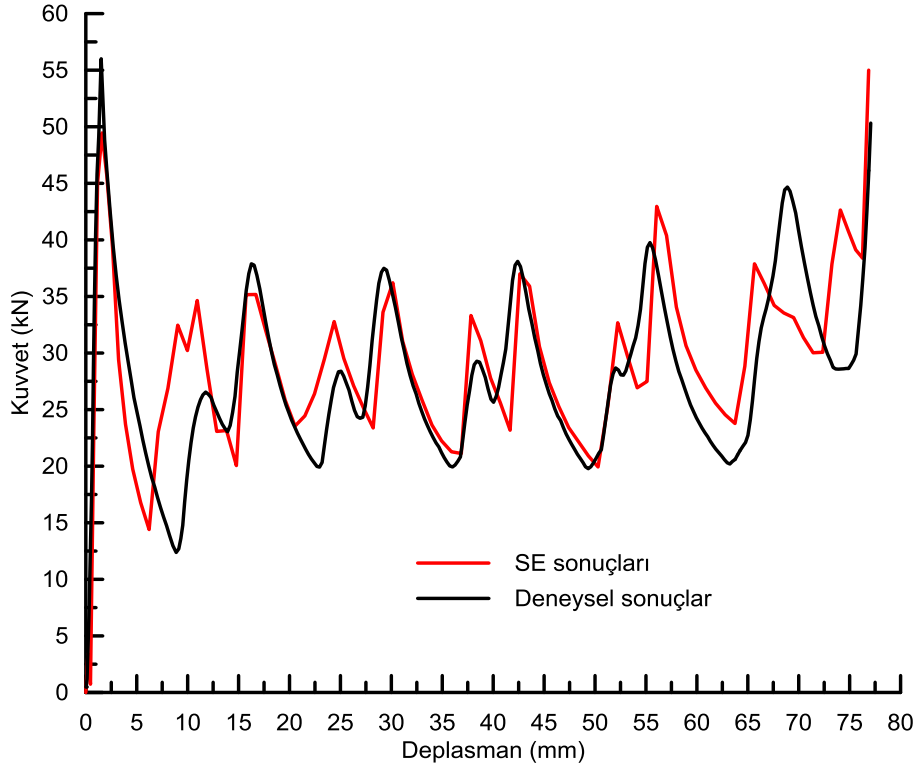
(c)

Şekil 81. (a) 60 kg/m³, (b) 80 kg/m³ ve (c) 100 kg/m³ yoğunluklarına sahip PVC köpüklerin SE yöntemiyle elde edilmiş basma analiz eğrileri

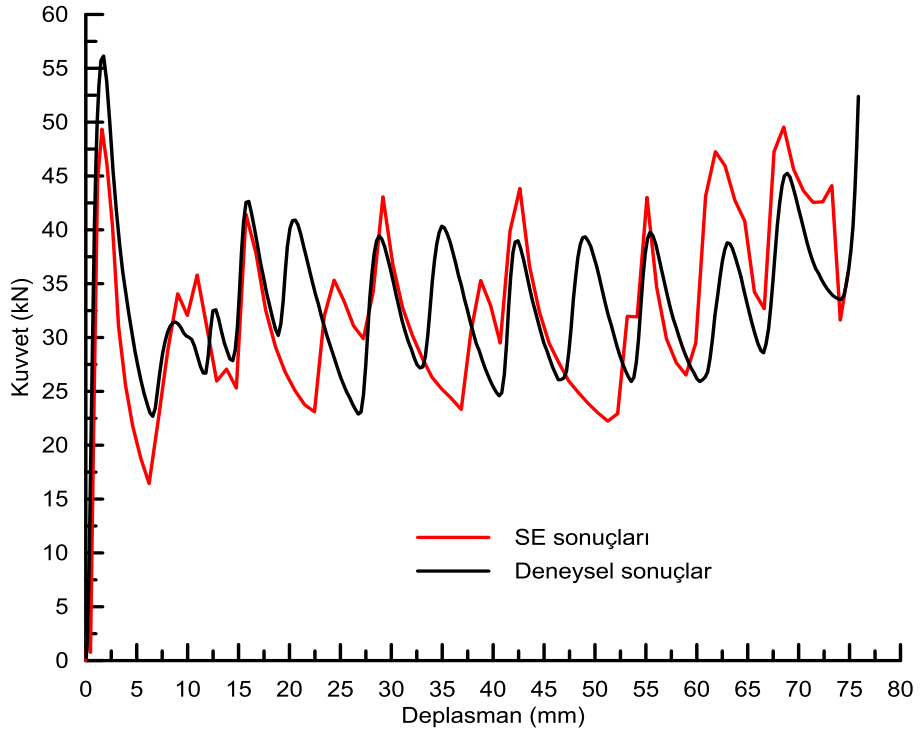
Yukarıda verilen eğriler neticesinde farklı yoğunluklardaki köpüklerin alüminyum tüplerle birlikte kullanılma durumları incelenmiştir. Deneysel olarak elde edilen kuvvet-deplasman grafiklerinin SE analiz yöntemleri ile elde edilen eğrilerle yüksek oranda eşleştiği görülmüştür. Ayrıca enerji değerleri açısından da çok küçük sapmalar ile deneysel verilerin SE analiz sonuçlarıyla uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Deneysel ve SE analiz sonuçları arasında aşağıdaki veriler elde edilmiştir;

	<u>Deneysel enerji değeri</u>	<u>SE enerji değeri</u>
- 60 kg/m ³	2160 J	2238 J
- 80 kg/m ³	2522 J	2517 J
- 100 kg/m ³	2403 J	2439 J

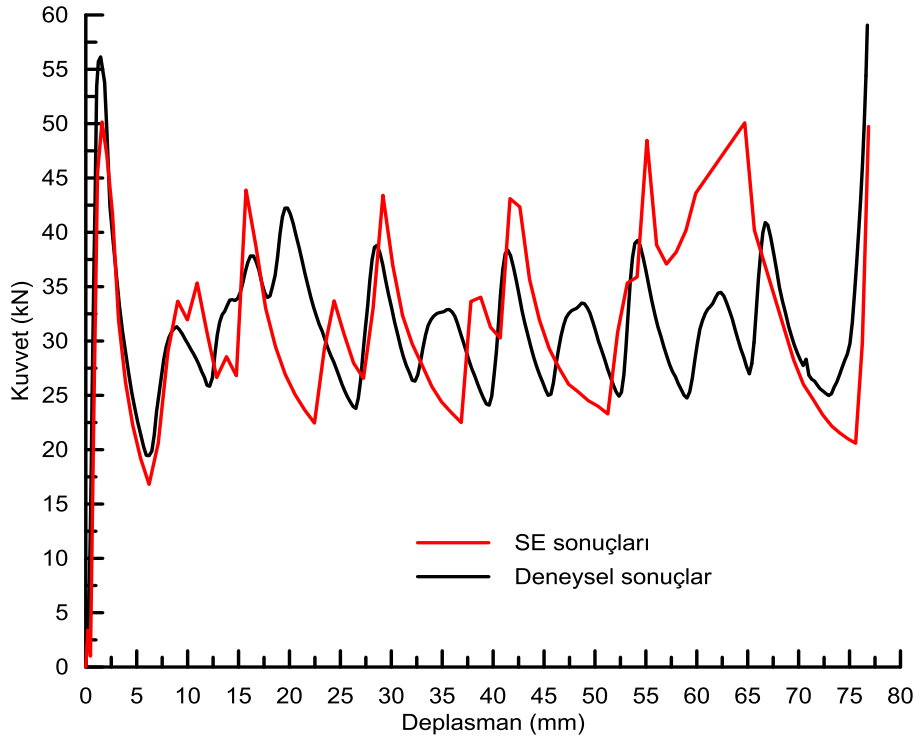
Değerler incelendiğinde bütün köpük yoğunluklarında enerji değerleri arasında yaklaşık %2 civarında bir sapmanın olduğu görülebilmektedir. Şekil 82’de sırasıyla 60, 80 ve 100 kg/m³ yoğunluğa sahip köpüklerle takviye edilmiş alüminyum tüplerin kuvvet-deplasman grafikleri verilmiştir.



(a)



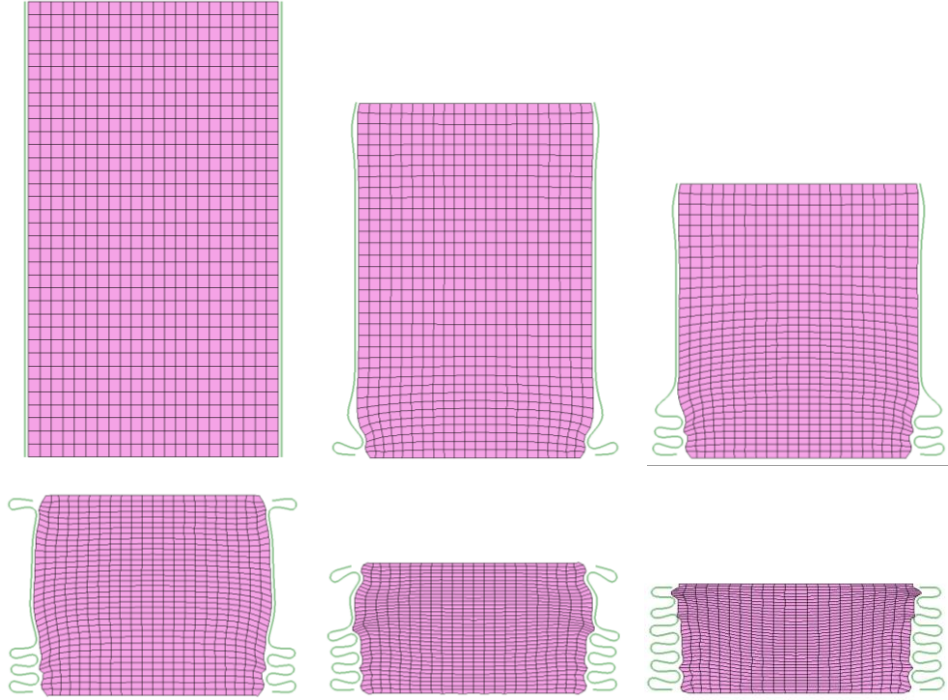
(b)



(c)

Şekil 82. (a) 60 kg/m³, (b) 80 kg/m³ ve (c) 100 kg/m³ yoğunluğa sahip köpüklerle takviye edilmiş alüminyum tüplerin kuvvet-deplasman grafikleri

Şekil 83'te köpükle takviye edilen alüminyum tüpün aksenal olarak zorlanması durumunda, köpüğün sergilediği deformasyon davranışına ait görüntüler verilmiştir. PVC köpüğün lokal hasarlandığı bölgelerde meydana gelen densifikasyonun köpüğü alüminyumun kat aralarına doğru yönlendirdiği şekilden de anlaşılmaktadır.



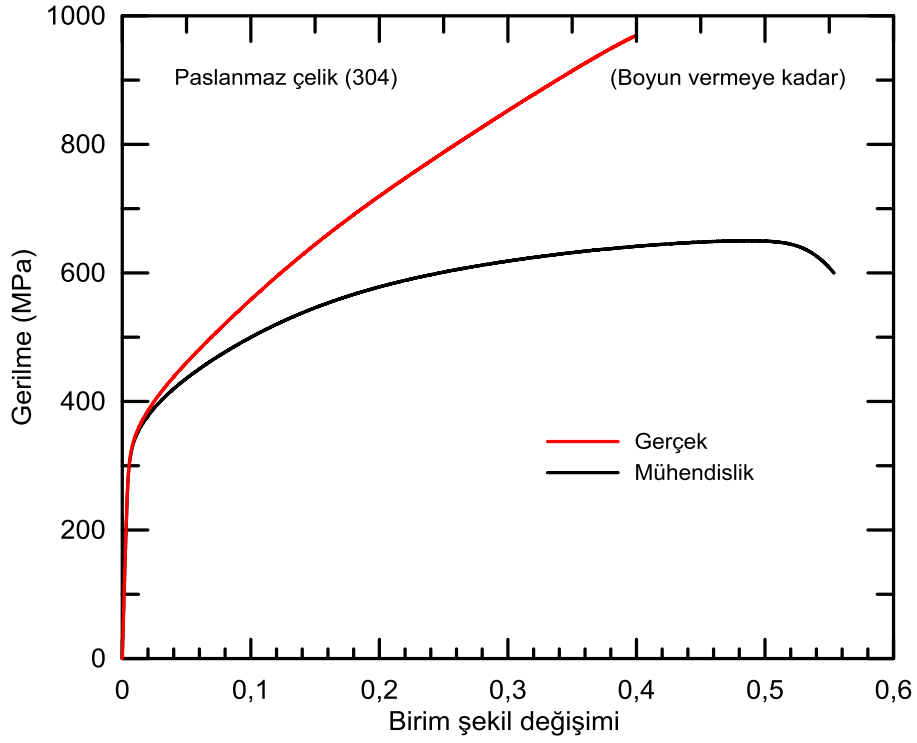
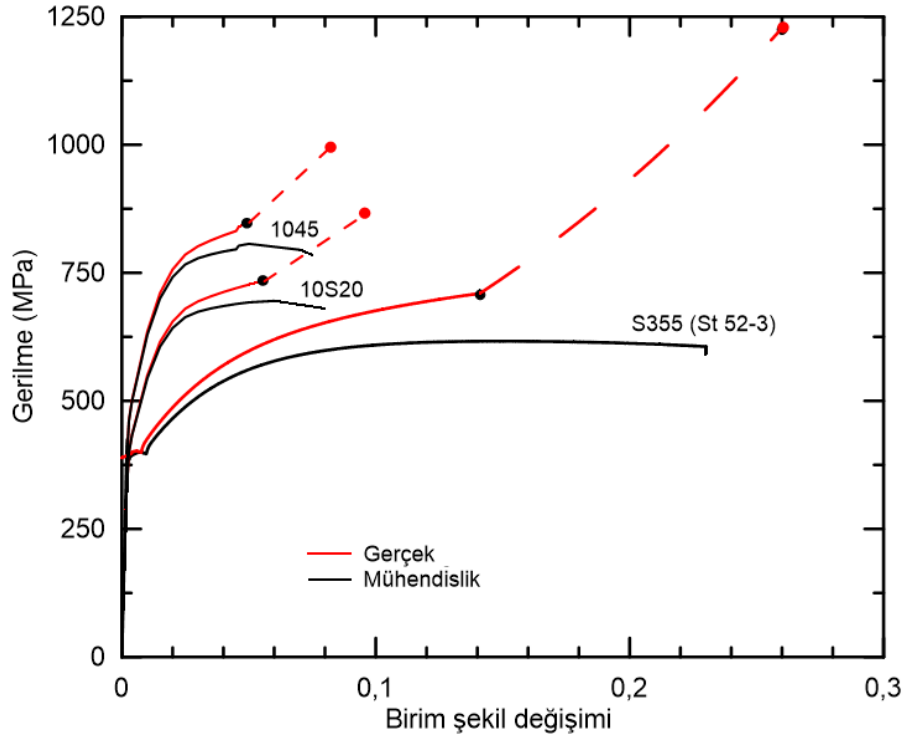
Şekil 83. Alüminyum tüp içerisindeki PVC köpüğün aksenal kuvvet altında sergilediği deformasyon davranışı

5. DEFORMASYON BİLEZİĞİ TASARIMI VE İMALATI

Projede belirtilen enerji absorbe edici sistemin ikinci ana elemanı deformasyon bileziğidir. Deformasyon bileziği genel çalışma prensibi olarak radyal yönde genişleyerek deforme olmakta ve bu deformasyonu sırasında enerji absorbe etmektedir. Proje kapsamında deformasyon bileziği olarak kullanılması muhtemel üç farklı çelik malzemesi seçilmiştir. Her bir çelik malzemedan farklı çaplarda, koniklik açılarında ve kalınlıklarda deformasyon bileziği üretimi yapılmıştır. Deformasyon bilezik tasarımında en uygun deneysel verinin elde edilebilmesi amacıyla ezilme kutusunun aksine öncelikle SE analizleri yapılmıştır. Her bir farklı çelik türü ve geometrik özellikteki bilezikler için yapılan SE analizleri neticesinde elde edilen veriler deneysel çalışmalarda uygun malzeme seçimi ve geometrik büyüklüklerin belirlenmesinde ışık tutmuştur. Sonraki bölümlerde tasarımı ve imalatı yapılan bu bilezik modelleri için en uygun malzemenin ve geometrik ölçünün belirlenmesi amacıyla yapılan SE analiz ve deneysel çalışmalarına yer verilmiştir.

5.1 Deformasyon Bileziği Malzemelerinin Mekanik Özellikleri

Deformasyon bileziği ve muyluya ait deneysel ve sonlu eleman çalışmalarında kullanılmak üzere elde edilen çekme eğrileri toplu olarak Şekil 84'de verilmiştir. Paslanmaz çeliğin kopma uzamasının oldukça fazla olması ve analizlerde bu denli yüksek şekil değişimlerine ihtiyaç duyulmaması nedeniyle, bu çelik için boyun verme sonrasına ait eğri elde edilmemiştir.



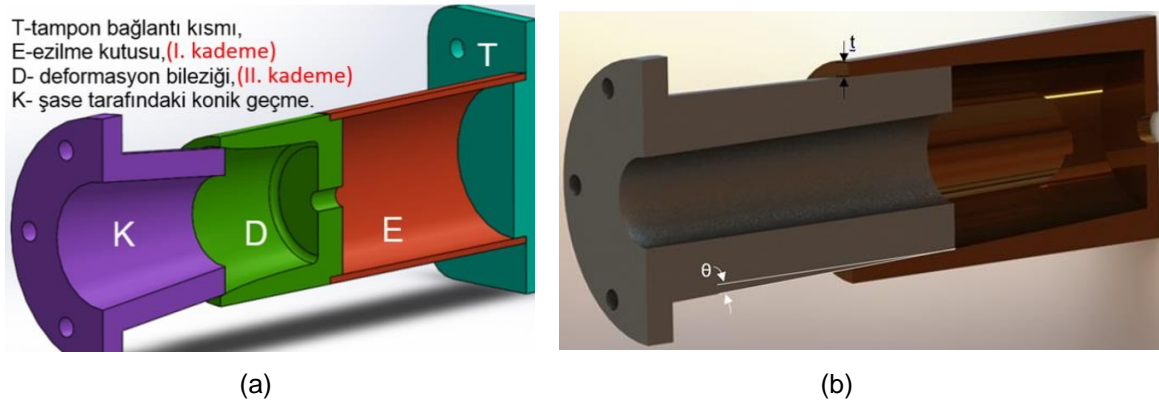
Şekil 84 Deformasyon bileziği ve muylu (1045) için kullanılan çeliklerin çekme eğrileri.

5.2 Deformasyon Bileziği Modellerinin SE Çalışmaları

Ana adımlar

- 1- Başvuru dosyasındaki konik kovan yapısının analizi yapılarak, kuvvet ve enerji değerlerinin elde edilmesi ve bu değerlerden hareketle uygun geometrinin belirlenmesi,
- 2- Revize edilen geometri için model doğrulama çalışmalarının yapılabilmesi ve bilezik genişlik etkisinin incelenmesi için deneylerin yapılması. Söz konusu tasarımda kullanılması muhtemel çelik malzeme özelliklerinin kabaca belirlenmesi

Proje başvuru dosyasında verilen sistem ve bu yapıya ait deformasyon bileziği kısmı "K" ve "D" parçalarının katı modeli Şekil 85'de verilmiştir.



Şekil 85. (a) öngörülen iki kademeli enerji absorbe edici yapının şematik görünümü (b) konik parça ve bilezik yapıya ait katı model (a'da "K" ve "D" ile gösterilen parçalar.

Öngörülen konik parça için 0,5-2 değerleri arasında dört farklı (0,5, 1, 1,5 ve 2) derece ve AISI 1015 çeliği (normalize şartlarında) kullanılması durumu için analizler öngörülmüştür. Deformasyon bileziği (D) için farklı malzeme seçenekleri dikkate alınacaktır.

5.2.1 SE Analizine Ait Model

ANSYS Workbench programının Explicit Dynamics modülü kullanılarak gerekli analizler yapılmıştır. Sırasıyla sistemin (muylu, konik bilezik tipi kovan) modellenmesi, malzeme özelliklerinin, mesh oluşturma, eleman tiplerinin, temas edecek olan yüzeylere yerleştirilecek

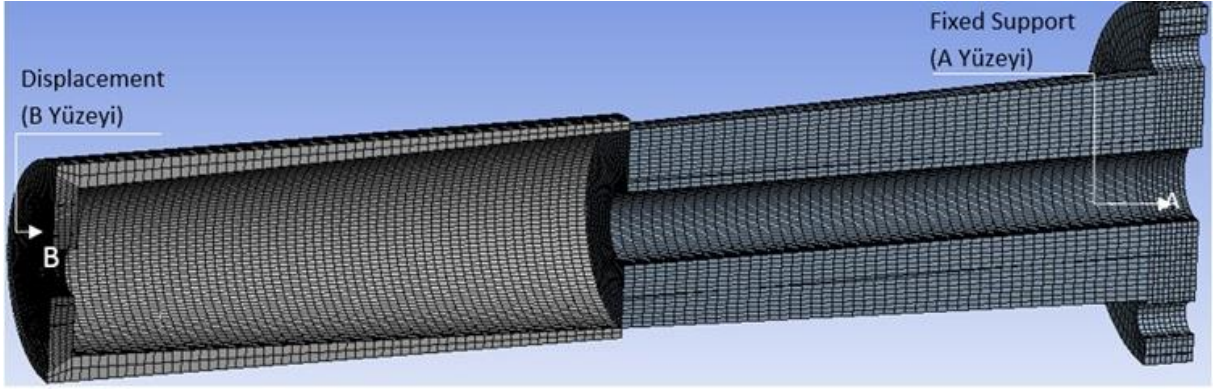
kontak elemanların tiplerinin girilmesi, sınır şartlarının (deplasman, sabitleme) verilmesi, çözüm ve analiz sonuçlarının alınması gibi bir çok işlem gerçekleştirilmiştir.

Modelleme işlemi Ansys'in Geometry kısmında modellenmiştir. Yapılan modeller elde edilen analiz sonuçlarına göre uygun sonuçlar elde edilinceye kadar değişikliğe gidilmiş ve parametreler oluşturulmuştur. Sistemin modellenmesinden sonra, Engineering Data kısmından analizde kullanılacak olan malzemeler tanımlanır. Analizde kullanılacak olan muylunun malzemesi yüzeyi indüksiyonla sertleştirilmiş 1045 çeliği ($E=210$ GPa $\nu=0,29$), konik kovan yapının malzemesi ise imalat çeliği ($E=210$ GPa $\nu=0,29$) seçilmiştir. Yapacak olduğumuz analiz elasto-plastik analiz olduğu için malzemeye Multilinear Isotropic Hardening tanımlanarak malzemelerin gerçek gerilme-birim şekil değişimi eğrileri girilmiştir.

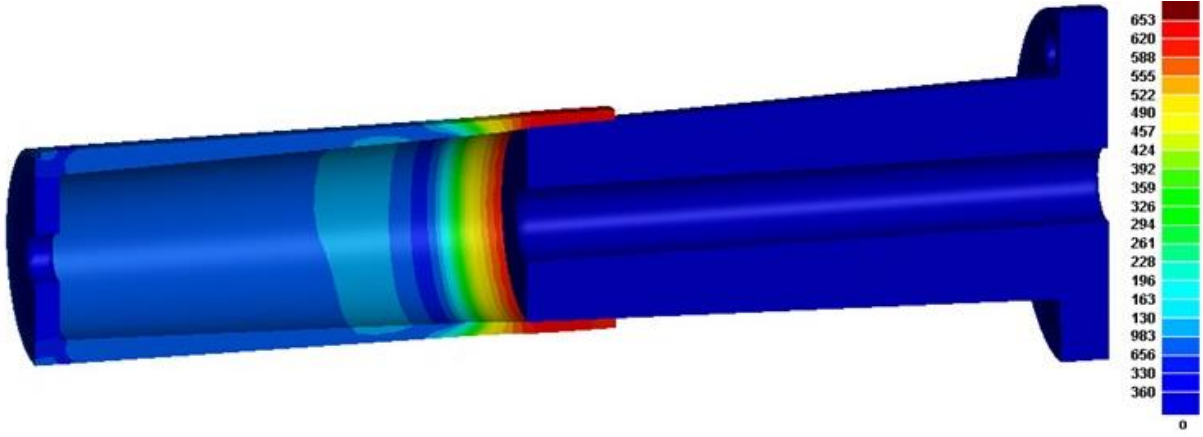
Muylu ve konik kovan modellerinde mesh metodu olarak MultiZone kullanılmış ve elemanların düzensiz olduğu yüzeylere Face Meshing uygulanarak daha düzgün eleman dağılımı elde edilmiştir. Deformasyon davranışını inceleyecek olduğumuz konik kovanın eleman boyutları hassas sonuç elde edebilme amacı ile daha küçük eleman boyutları (0,5-1,5 mm) oluşturulmuştur. Oluşan mesh yapısı ortalama 80.000-120.000 eleman içermektedir. Sistemin asıl amacı sürtünmeden dolayı oluşan kuvvetin ile deformasyonun belirlenmesi olduğundan, yapılan analizde Contact ilişkisi en önemli adımı oluşturmaktadır. "Contact" konik kovan yüzeyi, muylu ise "target" yüzeyi oluşturmaktadır. Sürtünme katsayısı çelik-çelik (gres yağlı) yüzeyler için 0,12 seçilmiştir. Model, mesh ve sınır şartları oluşturulduktan sonra K dosyası(.k) yazılmış ve daha sonra Ansys Mechanical APDL Product Launcher programında LS-DYNA Solver kullanılarak ANSYS Multiphysics/LS-DYNA Analysis gerçekleştirilmiştir.

Şekil 86 'da modeli oluşturan yapının mesh yapısı ve zorlanma durumu verilmiştir. Analizlerde muylu sabit tutulmuş (Fixed Support), konik kovana deplasman (Displacement) verilmiştir. Şekil 92b ve 92c'den 20 mm deplasman değeri için verilen gerilme dağılımından beklendiği gibi, muylu tarafından radyal yönde açmaya zorlanan konik kovana cidarında önemli oranda gerilme / plastik deformasyon oluşmaktadır.

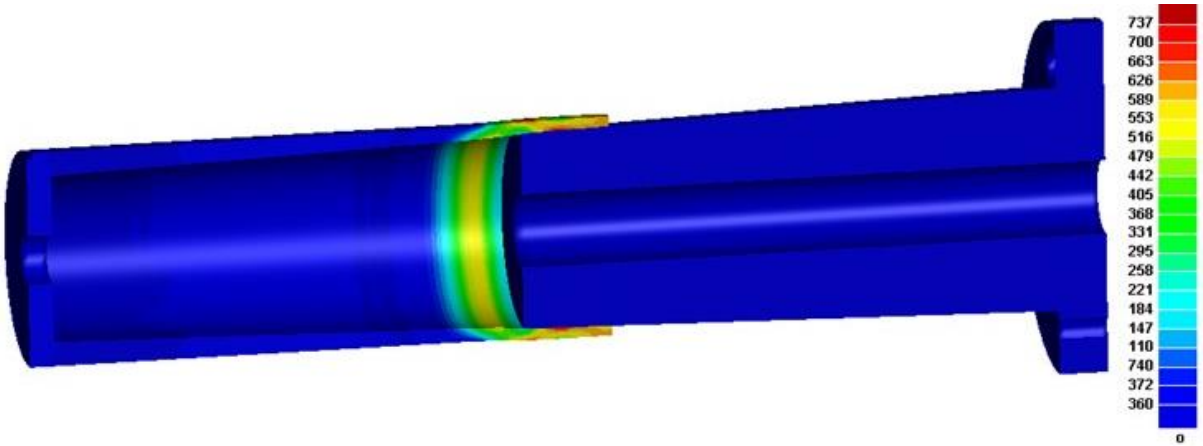
Not: Bu modelin doğrulanmasında, proje başvuru dosyasında verilen konik geçmeye ait deney sonuçları kullanılmış, ayrıca deney yapılmamıştır.



(a)



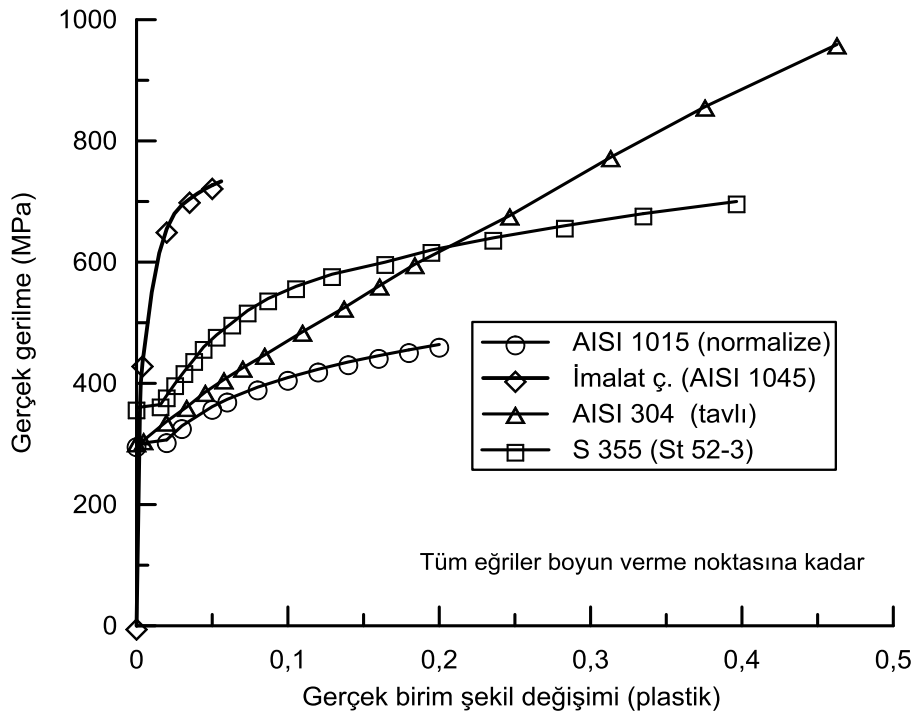
(b)



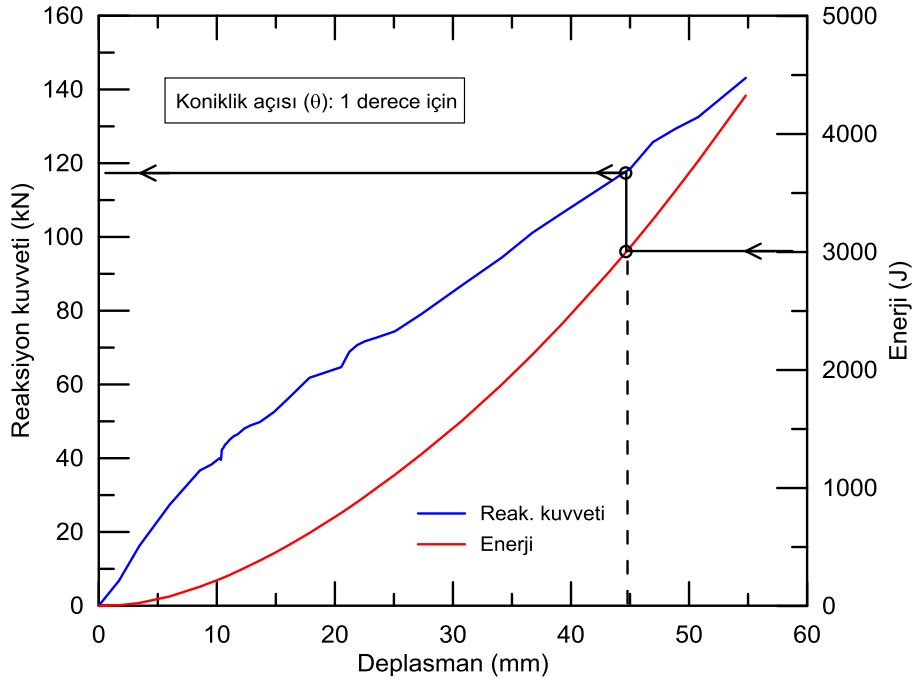
(c)

Şekil 86. (a) Modeli oluşturan yapının mesh yapısı. 20 mm deplasman değeri için konik kovandaki (b) eşdeğer gerilme (Von Mies) (c) en büyük asal gerilme dağılımı

Şekil 87’de analizlerde kullanılan çeliklerin çekme eğrileri verilmiştir. Koniklik açısı, $\theta=1$ derece için reaksiyon kuvvetinin, deplasman değeri ve koniklik açısıyla değişimi Şekil 88’de verilmiştir. Şekilden anlaşılacağı üzere, enerji değeri deplasmanla artmakla birlikte yapıda oluşan reaksiyon kuvveti oldukça yüksek değerlerde seyretmektedir. 1500 J için reaksiyon kuvvetinin 80 kN mertebelerinde olduğu, hedeflenen 3000 J değeri için söz konusu kuvvet değerinin 120 kN’a yaklaştığı dikkat çekmektedir. Bu noktada, koniklik açısının değiştirilerek reaksiyon kuvvetinde değişimin incelenmesi faydalı olacaktır.



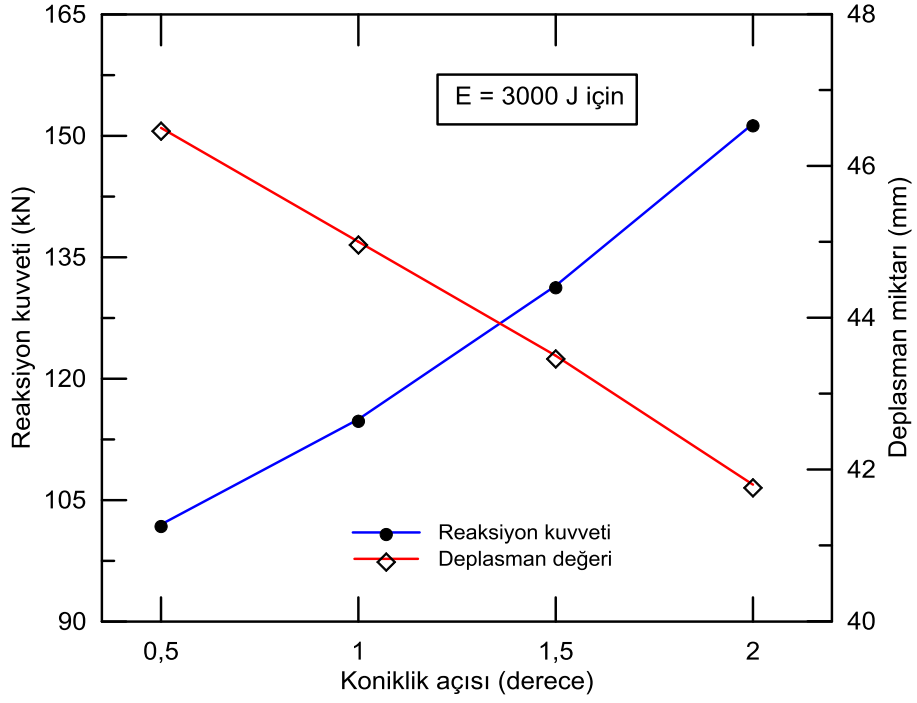
Şekil 87. Çeliklerin analizlerde kullanılan çekme eğrileri.



Şekil 88. Reaksiyon kuvveti ve enerjinin, deplasmanla değişimi

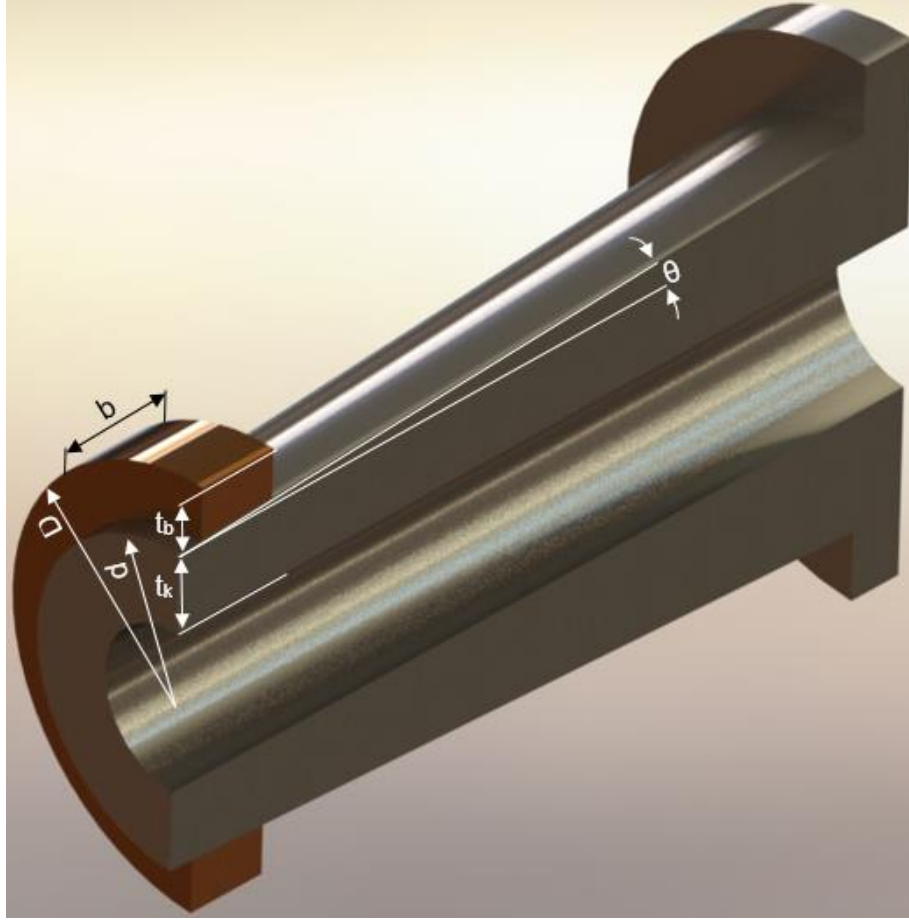
Şekil 89 reaksiyon kuvveti ve deplasman değerinin, dört farklı koniklik açısıyla olan değişimini vermektedir. Şekilden reaksiyon kuvvetinin koniklik açısıyla arttığı ve beklendiği üzere, 3000 J'ün elde edildiği deplasman değerinin azaldığı görülmektedir. $\theta = 2$ derece için en düşük, $\theta = 0,5$ derece için en büyük deplasman değeri elde edilmekte olup, bu koniklik için ($\theta = 0,5$) reaksiyon kuvveti en düşük değerini (102 kN) almaktadır.

Sonuç: öngörülen konik yapıda, 3000 J enerji değeri için tüm koniklik açısı değerlerinde hesaplanan reaksiyon kuvveti proje kapsamında belirtilen kuvvet değerinin (68 kN) çok üstünde olduğu tespit edilmiştir. Söz konusu sistemde deplasmanla sürekli artan bir yüzey alanı söz konusudur. Dolayısıyla temas alanının sabit tutulacağı bir yapı muhtemel bir çözümü oluşturacaktır. Konik parçaya genişliği sabit, dolayısıyla yüzey alanı sabit olan bir bileziğin geçirildiği tasarım, imalat kolaylığının yanı sıra çalışma prensibi açısından tercih edilecek bir geometriği oluşturacaktır.



Şekil 89. Reaksiyon kuvveti ve deplasman değerinin koniklik açısıyla değişimi

Proje başvurusunda yapılan ön çalışmalardan elde edilen kuvvet-deplasman grafikleri ve deney tecrübelerinden hareketle, ana hatlarıyla katı model görüntüsü (Solidworks) Şekil 90'da verilen ve boyutları henüz kesinleştirilememiş bir deformasyon bileziği ve konik yapı geometrisi üzerine yoğunlaşmıştır. Ebatların SE analizleri ışığı altında boyutlandırılması ve sonrasında nihai deneylerle kesin kararın verilebilmesi için bazı kritik noktaların irdelenmesi gerekmektedir.



Şekil 90. Deformasyon bileziği-konik yapı (katı model) ve analizlerde kullanılan parametrelerin gösterimi.
 D : bilezik dış çap, d : bilezik iç çapı, t_b : bilezik kalınlığı, b : bilezik genişliği. θ : koniklik açısı

Deformasyon bileziğinin tasarımına ait ana kısıtları

I. kademe sonundaki F_{DB} kuvvetinin 47-50 kN değerini aşması halinde bileziğin konik yapı üzerinde hareketi başlayacaktır. Yani, bir anlamda bileziğin 47 kN'luk kuvvetle çıkılarak montajlanması söz konusudur. Bunun için;

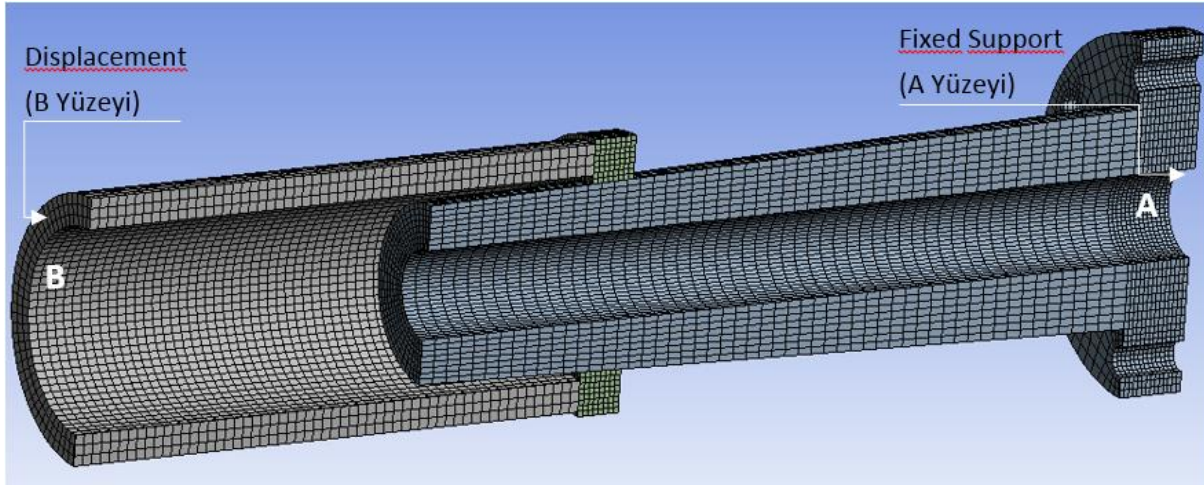
- Bileziğin montaj kuvveti (reaksiyon kuvveti) olan 50 kN değerine en fazla 8 mm'lik deplasmanda erişmesi,
- Bilezik cidarında oluşan akma alanının, kalınlık doğrultusundaki cidarın 1/3'ünü geçmemesi.

Yukarıdaki şartları sağlayan çelik ve bileziğe ait geometrik ölçüler analiz sonuçlarından hareketle belirlenecektir. Analizlerde kullanılan parametreler Şekil 90'da resim üzerinde tanımlanmış, Tablo 7 'da ise geometrik ölçülere ait büyüklükler sıralanmıştır. SE modeli ve sınır şartları ise Şekil 91'de verilmiştir.

Tablo 8. Malzeme ve geometri özellikleri

Parça	Malzeme	Alın cidar kalınlığı, t (mm)	Alın çap değeri, D/d (mm)	Koniklik açısı, θ (derece)	Genişlik, b (mm)
Konik muylu	AISI 1045	$t_k=15$	40/10, 50/30	0.5, 0.75, 1, 1.5, 2, 3	-
Bilezik	AISI 1015, S355 (St 52-3) ve 304	$t_b=10$	60/40, 80/60	"	10, 15, 20

Not: D :Dış çap, d : iç çap



Şekil 91. Tasarıma ait SE modeli ve sınır şartları

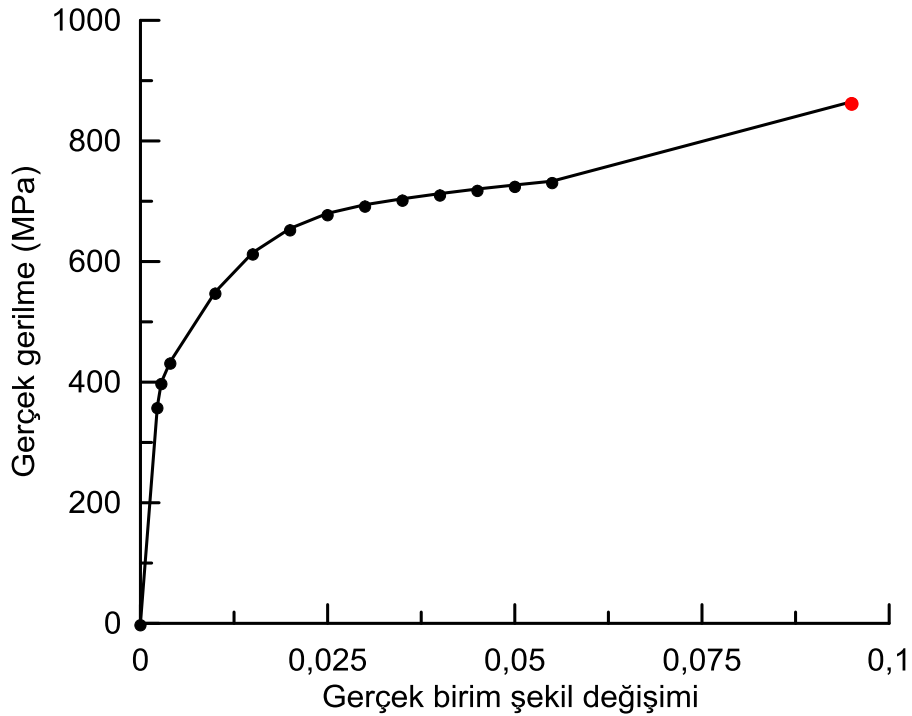
Tablo 7'da özetlenen ve toplamı 144 ulaşan kombinasyonlardan, yapılan ön analiz sonuçlarından hareketle bazı kombinasyonlar elenmiş ve nihayetinde elde edilen 45 sonlu eleman analizinden uygulanabilirlik ve kısıtlara cevap vermesi bakımından en uygun olanları Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 9 Analiz sonuçlarından çalışma şartları için uygun olduğu kabul edilen başlıca kombinasyonlar

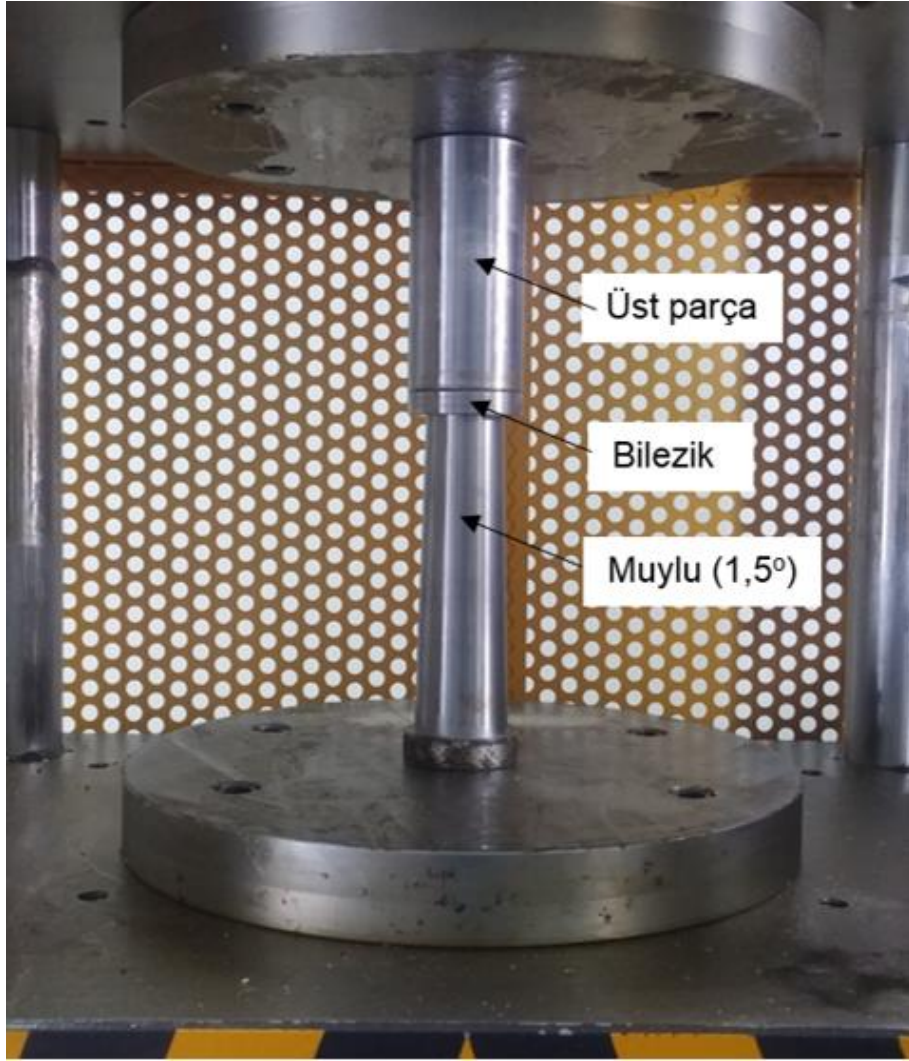
No	Malzeme	Alın çap değeri, D/d [mm]	Koniklik θ [derece]	50 kN için Deplas. [mm]	50 kN için akan kesit kalınlığı	3000 J için deplas. [mm] - reaks. [kN]	65 kN daki deplas.[mm] – enerji [J]	Nihai deplasman için (100 mm) kuvvet [kN]- enerji [J]
1	AISI 304	40/60	1	2,7	$\cong 1/3$	54,9 - 61,3	83 - 4821	67 - 5471
2	AISI 304	40/60	1,5	2,1	1/2	50 - 66,7	49 - 2800	75,3 - 6000
3	AISI 304	60/80	1	3,3	1/6	54 - 61,4	90 - 5313	66 - 5500
4	AISI 304	60/80	1,5	2,2	lokal akma (<1/6)	50 - 66	46 - 2733	73,8 - 6000
5	EN S355 (St52-3)	40/60	1	2,4	$\cong 1/3$	48,2 - 69,6	36,3 - 2197	80,7 - 6388
6	EN S355 (St52-3)	40/60	1,5	1,52	<1/3	44 - 80,1	14 - 837	96 - 7383
7	EN S355 (St52-3)	60/80	1	3,2	lokal akma (<1/6)	47,4 - 68,2	33 - 2039	80 - 6400
8	EN S355 (St52-3)	60/80	0,75	4,4	lokal akma (<1/6)	49 - 65	54 - 3318	72,5 - 6100
9	EN S355 (St52-3)	60/80	0,5	6,5	lokal akma (<1/6)	51,4 - 63,4	93 - 5700	65,6 - 5700
10	AISI 1015	40/60	1	2,5	$\cong 1/3$	57 - 57	-	61,4 - 5143
11	AISI 1015	40/60	1,5	1,6	1/3	54 - 62,4	78,4 - 4610	67 - 5577
12	AISI 1015	60/80	1	3,3	1/4	57 - 57,2	-	61,4 - 5210
13	AISI 1015	60/80	1,5	2,2	lokal akma (<1/6)	54 - 62,1	77 - 4563	67,2 - 5624
14	AISI 1040	60/80	1	3,3	lokal akma (<1/6)	35 - 101,7	--	113,4 - 8500

5.3 Deformasyon Bileziği Modellerinin Deneysel alışmaları

Yukarıda gerçekleştirilen analiz sonuçları ve proje başvuru dosyası için yapılan ön deneylerden elde edilen tecrübelerden hareketle öncelikle dış ve i çap oranları 60/40, i konik açısı 1,5 derece olan genişliği $b=6$ ve $b=10$ olmak üzere iki tip bilezik üzerinde deneylerin yapılmasına karar verilmiştir. Makine imalat çeliğinden (zellikleri otomat çeliğine yakın çekme eğrisi Şekil 92'de verilen) imal edilmiş olan bilezikler Şekil 93'deki deney düzeneğinde test edilmiştir. Muylu ve bilezik deney öncesinde gresle yağlanmıştır. Deney sırasında içi boş silindirik st parça aracılığı ile deformasyon bileziğinin konik muylu üzerinde, düşeyde harekete zorlanmıştır. Yapılan deneyler sırasında kuvvet-deplasman veri çiftleri kaydedilerek grafikleri çizilmiştir.



Şekil 92. Makine imalat çeliğine ait çekme eğrisi, (Not: son nokta kopma sonrası belirlenmiştir)



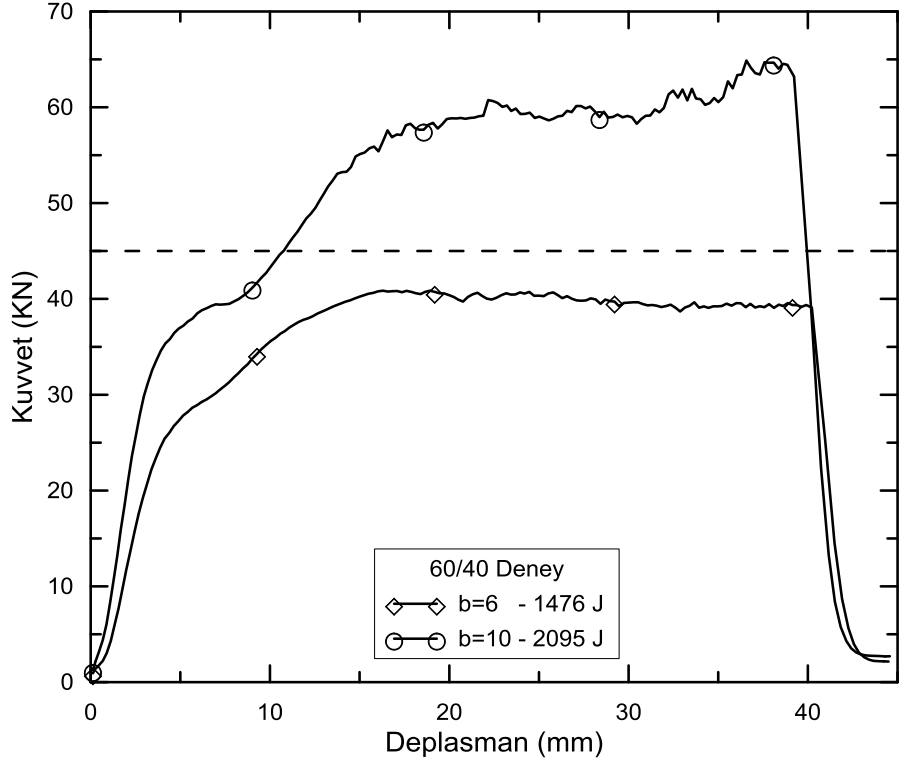
Şekil 93. Deformasyon bileziği deney düzeneği.

Şekil 94'te verilen, 6 ve 10 mm genişliğinde 60/40 ölçülerindeki deformasyon bileziklerine ait kuvvet-deplasman grafiğinden, bileziklerin uygulanan kuvvetin etkisiyle çap doğrultusunda öncelikle elastik davranış sergilediği, daha sonra plastik deformasyona uğrayarak sırasıyla kuvvetin yaklaşık 40 ve 60 kN mertebelerinde ulaştığı ve nihayet artan deplasman altında kırılma gösterdiği (Şekil 94) anlaşılmaktadır.

Kuvvet değeri itibariyle, 45 kN'nun altında kalması nedeniyle, 6 mm genişliğindeki bileziğin değerlendirme dışı tutulması gerektiği görülmektedir. Her iki bileziğin oldukça düşük deplasman değerinde (yaklaşık 40 mm) hasarlandığı, dolayısıyla kullanılan çeliğin yetersiz süneklığe sahip

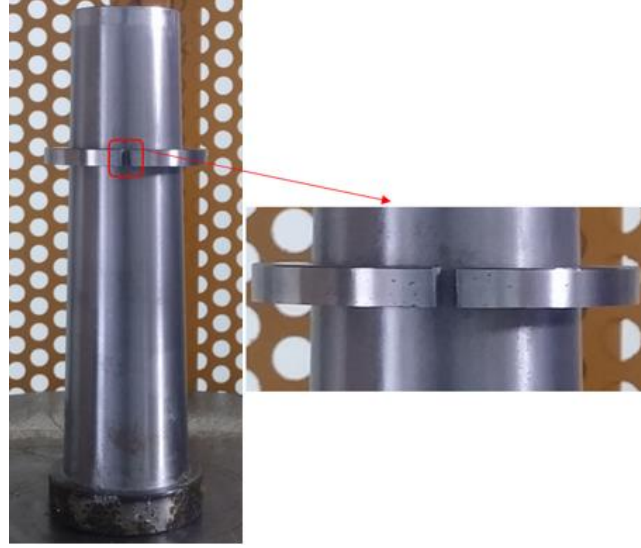
olduğu açık bir şekilde anlaşılmaktadır. 10 mm genişliğindeki bilezik için kuvvet değeri makul görünmekle birlikte, proje hedefleri (3000 J) itibariyle oldukça yetersiz kaldığı anlaşılmaktadır.

Bu tür pasif güvenlik sistemlerinin kırılma göstermesi yerine, aşırı deformasyonla iş yaramaz hale gelmesi istendiğinden, buna uygun farklı çelik uygulamalarının yapılması kaçınılmaz görünmektedir.



Şekil 94. b=6 ve 10 mm genişliğinde 60/40 ölçülerindeki deformasyon bileziklerine ait kuvvet-deplasman grafiği

Şekil 95'te deney sırasında hasarlanan deformasyon bileziklerin genel görünümü verilmiştir. Bilezik iç yüzeyinde bulunan çok küçük sayılabilecek imalat izlerinin deformasyonun etkisiyle silinerek parlak bir yüzey kalitesine ulaştığı görülmüştür.



(a)

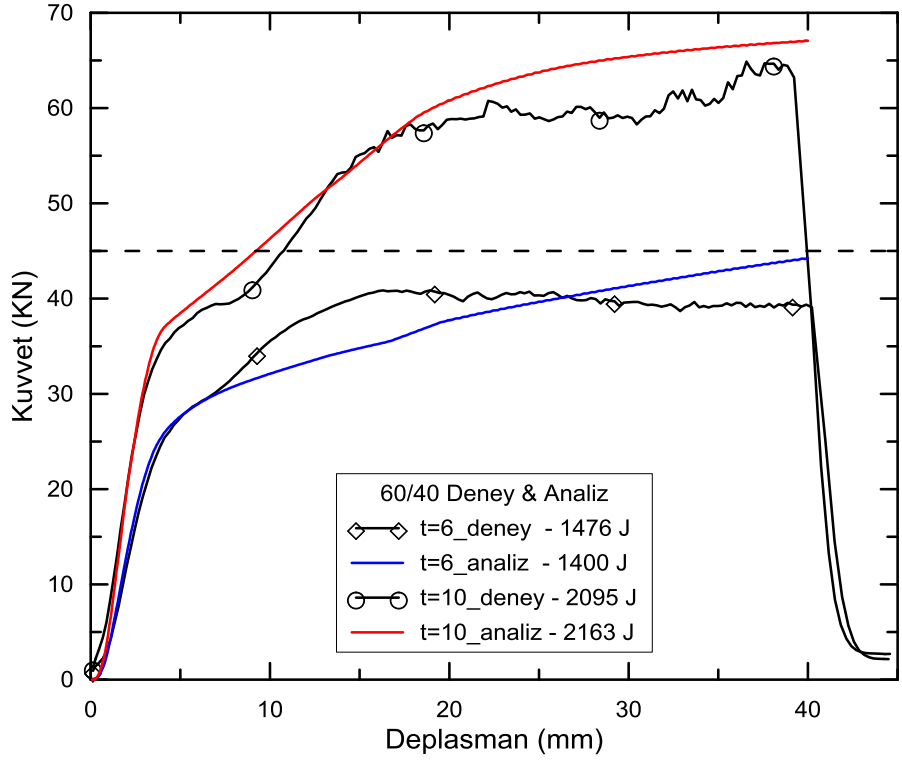


(b)

Şekil 95. (a) Deney sırasında hasarlanmış deformasyon bileziği (b) iki farklı genişlikteki hasarlanan bileziklerin görünümü

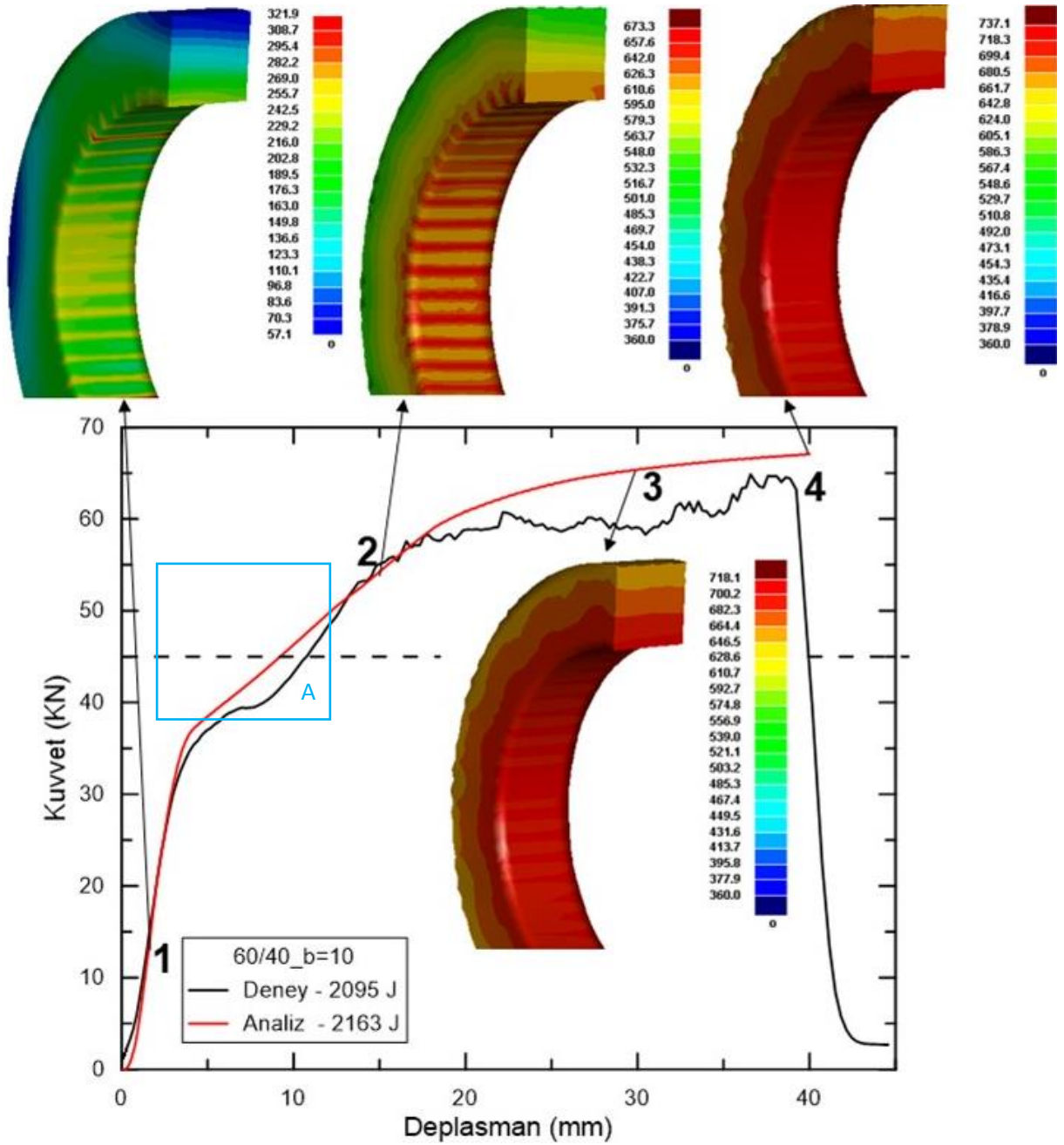
5.4 Deformasyon Bileziğinin SE Analizlerinin Doğrulanması

Bu kısımda 6 ve 10 mm genişliğinde, 60/40 ölçülerindeki deformasyon bilezikleri, söz konusu sınır şartları için analizi yapılmış ve deney sonuçları dikkate alınarak modelin doğrulanma çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Şekil 96'da verilen grafikten, genel olarak analiz sonuçlarının deneye ait grafiğin karakteristiğine sahip olduğu ve absorbe edilen enerji miktarı bakımından kabul edilebilir doğruluğa sahip olduğu anlaşılmaktadır.

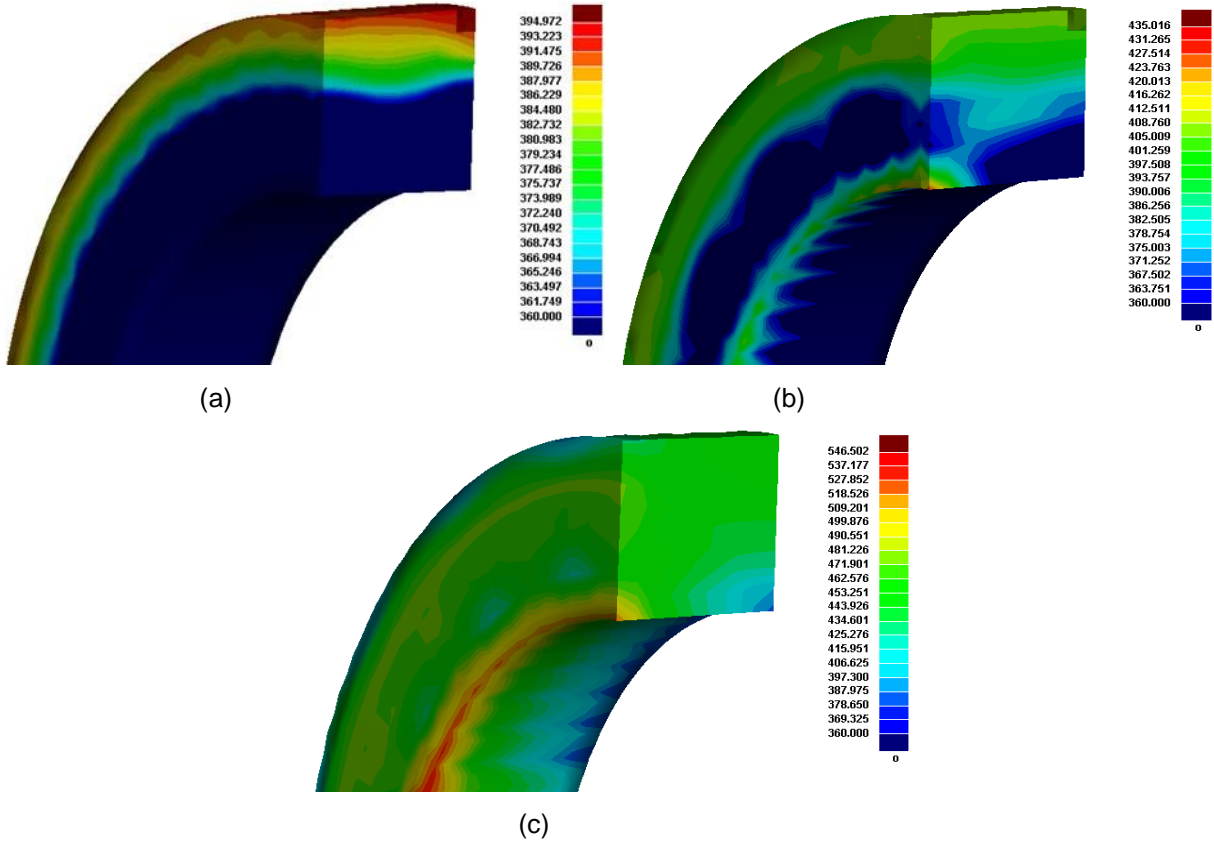


Şekil 96. 6 ve 10 mm genişliğinde 60/40 ölçülerindeki deformasyon bileziği için deneysel ve analiz sonuçlarından elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri

Şekil 97’de verilen kuvvet deplasman grafiği üzerinde, belirli deplasman değerleri için deformasyon bileziği kesitinde oluşan eşdeğer gerilmenin dağılımı verilmiştir. Şekilden anlaşılacağı üzere, “1” noktasında bilezikteki gerilmenin akma sınırının altında kaldığı, 2 noktasında (15 mm) bilezik kesitinin tamamen aktığı, “3” ve “4” noktalarında gerilmenin yükselmesini devam ettiği anlaşılmaktadır. Burada dikkat çeken bir önemli nokta, basınç altında temasın eşdeğer gerilmenin bilezik iç yüzeyinde, dış çepere göre daha yüksek bir değer almasına yol açmaktadır. Ayrıca kuvvet deplasman grafiğinde yaklaşık 35 kN değerinden sonra, eğrideki yükseliş hızının azaldığı dikkat çekmektedir. Bu davranışı detaylı bir şekilde incelemek için şekilde “A” ile gösterilen kısım üzerinde sırasıyla 4,2, 6,2 ve 11 mm deplasmanlar için asal gerilme (σ_1) dağılımı incelenmiştir (Şekil 98).



Şekil 97. Kuvvet deplasman grafiği üzerinde belirli deplasmanlar için deformasyon bileziğinde oluşan eşdeğer gerilme (Von Mises) dağılımı. Çeliğin akma sınırı 360 MPa. Deplasman değerleri, 1: 1,5, 2: 15 mm, 3: 30 mm, 4: 40 mm

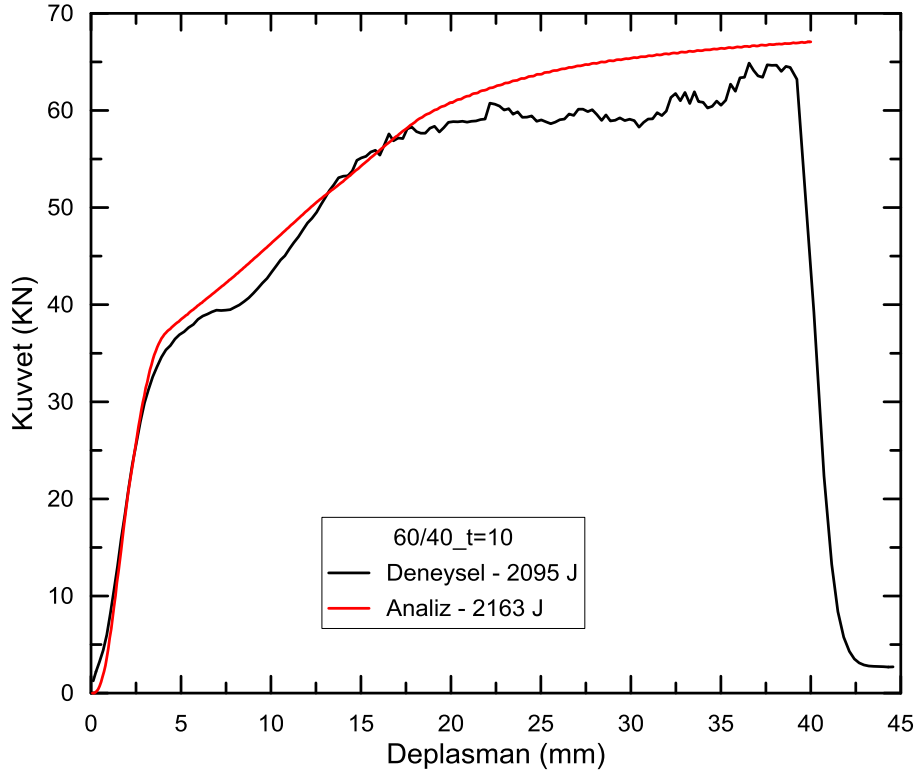


Şekil 98. Deformasyon bileziğine ait en büyük asal gerilme dağılımı. Deplasman değeri (a) 4,2 mm, (b) 6,2 mm ve (c) 11 mm

Bileziğe silindirik bir üst parça aracılığı ile basma kuvveti uygulanmış olması, Şekil 98b’de parça yan yüzeyindeki çekme gerilmesi şiddetini düşürdüğü dikkat çekmektedir. Malzemenin akma sınırı 360 MPa olduğu göz önüne alınarak verilen gerilme dağılımı incelenirse, cidarın dış yüzeyinde etkin olan çekme gerilmesinin deplasmanla artarak, akma alanının sürekli genişlediği ve 11 mm deplasman için tüm kesite yayıldığı sonucuna varılmaktadır (Şekil 98c). Dolayısıyla 35 kN sonrası eğri eğiminin azalması parçada plastik şekil değişiminin etkin bir şekilde başladığı, 11 mm deplasman değerinde tüm kesite yayıldığı ve sonrasında çeliğin pekleşme davranışıyla orantılı olarak eğrinin yükselmesine devam ettiği şeklinde açıklanabilir.

Sonlu eleman analiz sonuçları ile model doğrulama çalışmasına ait grafikten (Şekil 99) elde edilen kuvvet değerinin makul görünmekle birlikte, 2095 J’luk enerji değeri hedeflenen enerji değerinin altında kaldığı anlaşılmıştır. Daha önemlisi malzeme davranışı itibarıyla kırılmanın oluşmayıp, aşırı deformasyonun etkisinde parçanın işe yaramaz hale gelmesi istendiğinden, burada

kullanılacak çeliğin dayanımını yanı sıra, süneklik değerlerinin de yeterince yüksek olması gerektiği anlaşılmıştır.

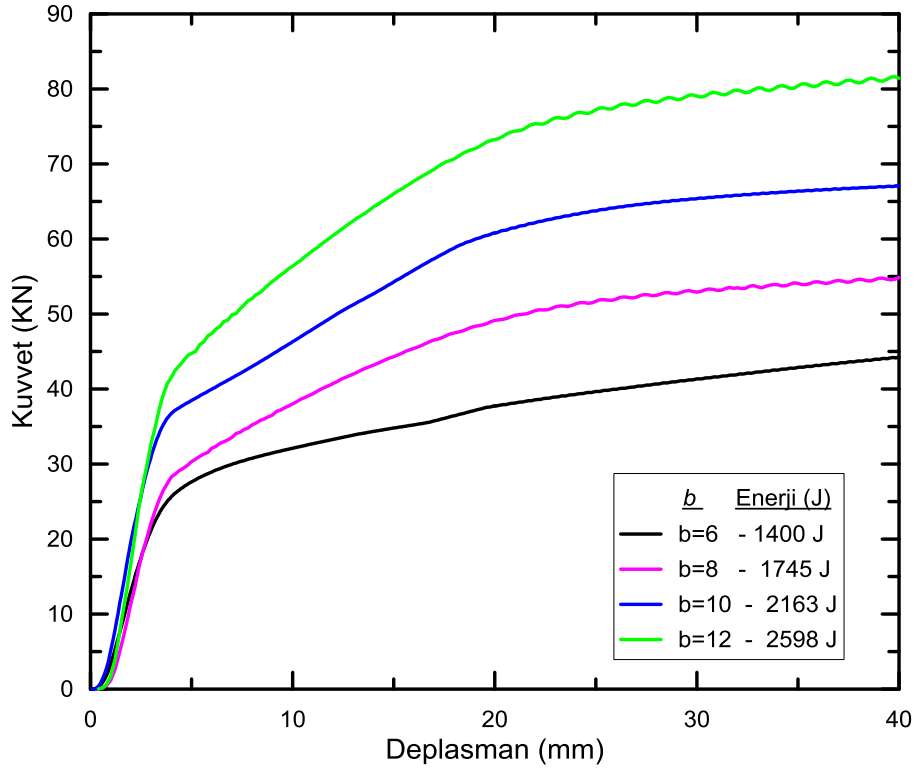


Şekil 99. 1,5 derece konik açılı 60/40 mm ölçülerinde 10S20 çeliği ile gerçekleştirilen deneye ait kuvvet-deplasman grafiği.

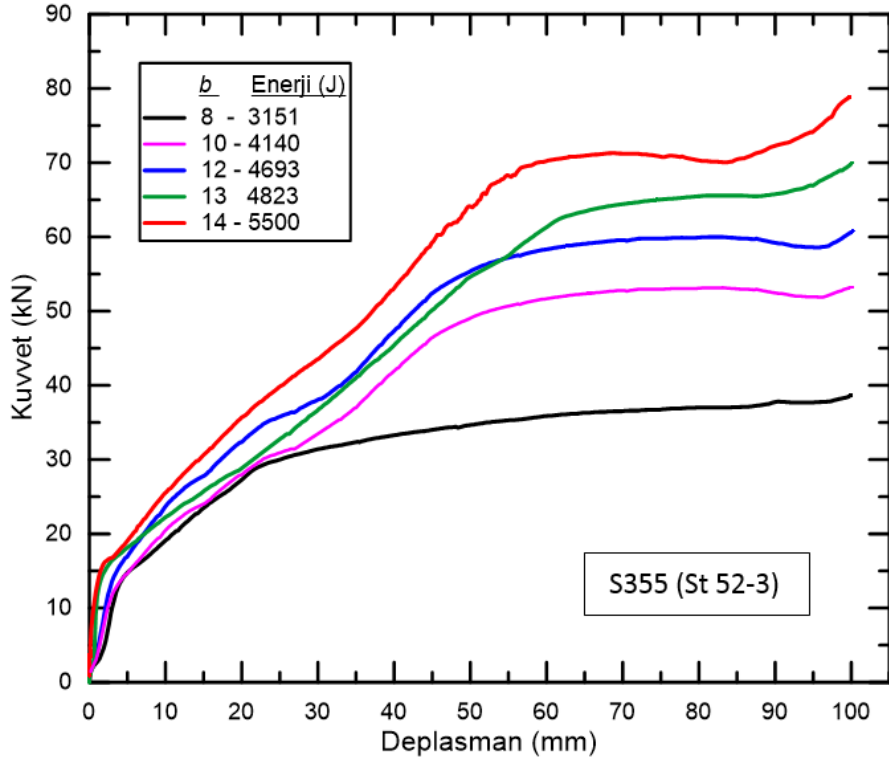
Hedeflenen enerji değeri için malzeme değişikliğine gidilmesinin yanı sıra, dikkat edilmesi gereken bir diğer konu, bilezik genişliğinin irdelenmesidir. Bilezik genişliğinin eğri üzerine etkisini araştırmak üzere aynı malzeme için, sınır şartları aynı kalmak kaydıyla farklı genişlikteki modeller ile yapılan analiz sonuçları neticesinde elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri Şekil 100'de toplu olarak verilmiştir. Buna göre, beklendiği üzere bilezik genişliği kuvvet değerinin ciddi oranda artmasına yol açmakta, buna karşın enerji değerindeki artışın yetersiz kaldığı görülmektedir. Sonuç olarak, bu malzeme ile proje hedefinin sağlıklı olarak elde edilmesi mümkün görülmemektedir.

Sünekliği daha yüksek olan S355 (St 52-3) çeliğine ait 1,5 derece koniklikte farklı genişlikteki 60/40 ölçülerinde, deformasyon bileziklerine ait kuvvet-deplasman grafikleri Şekil 101'de verilmiştir. Burada her bir grup için toplamda üç adet test yapılmış olmasına rağmen, grafiğe genel eğilimi yansıtması bakımından her bir grup için birer adet eğri verilmiştir.

100 mm deplasmanda tüm bileziklerde ciddi oranda deformasyon oluşmasına rağmen, kopma gerçekleşmemiştir. Genelde tüm bilezikler için 40-60 mm deplasman aralığında kuvvetin plato değerine ulaştığı, 100 mm yakın deplasman için bilezik kesitinin tamamen akması neticesinde tüm kesitin pekleşmesiyle eğrinin tekrar yükseldiği dikkat çekmektedir. 12-14 mm genişliğindeki bileziklerin absorbe ettiği enerji bakımından hedeflenen değeri sağladığı ancak kuvvetin aşırı derecede yükseldiği görülmektedir. 12 ve 13 mm genişliğindeki bileziklerin deneyleri tekrarlandığında birbirlerine yakın ve tekrarlanabilirlik açısından sorun teşkil etmeyen sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 100. Farklı genişlikteki 1,5 derece konik açılı 60/40 ölçülerindeki 10S20 çeliğinden işlenmiş deformasyon bileziği için analiz sonuçlarından elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri

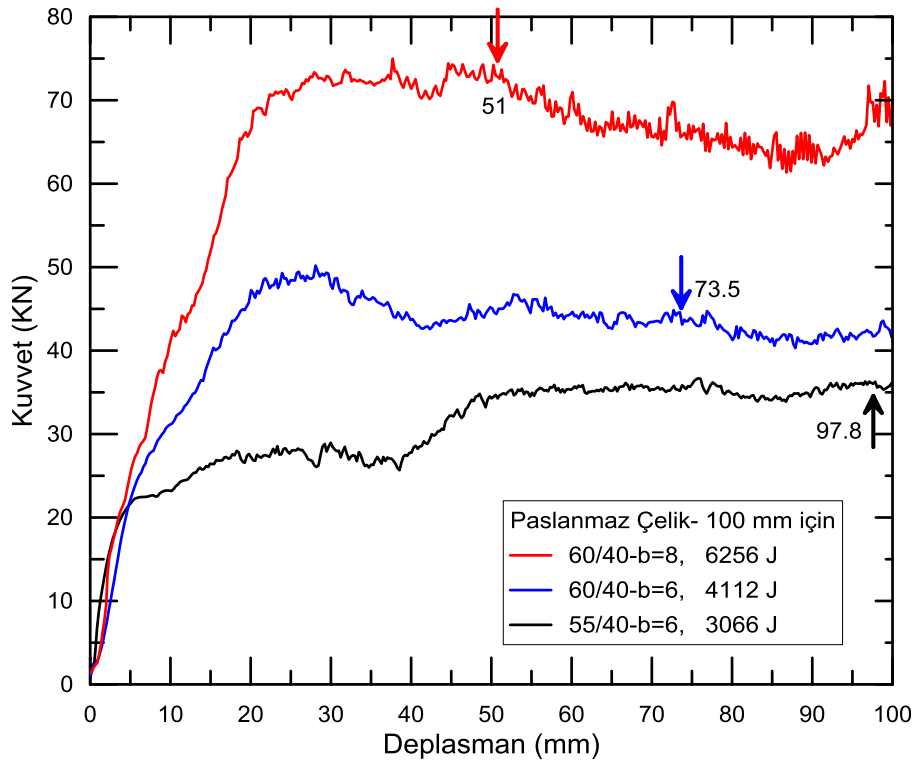


Şekil 101. S355 (St 52-3) çeliğinden işlenmiş 1,5 derece koniklikte farklı genişlikteki 60/40 ölçülerinde, bileziklerin **deney** sonuçlarına ait kuvvet-deplasman grafikleri

Sonuç olarak S355 çeliğinde herhangi bir kırılma yaşanmamış ve enerji ile kuvvet çifti proje hedefine uygun düzeyde olmakla birlikte, eğrilerin temel olarak üç farklı rejimde olması, kuvvetin yükselme hızı nispeten düşük olmasından dolayı, oluşan plato genişliği nispeten kısa olmaktadır. Bu davranışın absorbe edilen enerji değerini sınırladığı düşünülmektedir.

Yukarıda özetlenen S355 için enerjinin nispeten sınırlı kalma durumu göz önüne alınarak, çalışmanın ilerleyen kısmında sünek olduğu kadar hızlı pekleşmesi ($\sigma_{\phi}/\sigma_{Ak}$ oranı yüksek) nedeniyle 304 kalite paslanmaz çeliğin kullanımı planlanmıştır. Bu özellikleriyle nispeten daha küçük bilezik genişliği ile tatminkar enerji değerlerinin elde edilmesi muhtemel görüldüğünden, farklı çap ve genişlikte numuneler hazırlanmıştır. Bu bileziklere ait kuvvet deplasman grafiği Şekil 102'de verilmiştir. Prensip olarak gresin dışında bir yağlayıcının çok uygun olmayacağı tahmin edilmesine rağmen, bu deneyde paslanmaz ve karbonlu çelik yüzeyler arasındaki yağlama durumunun etkisini görmek için makine yağı kullanılmıştır.

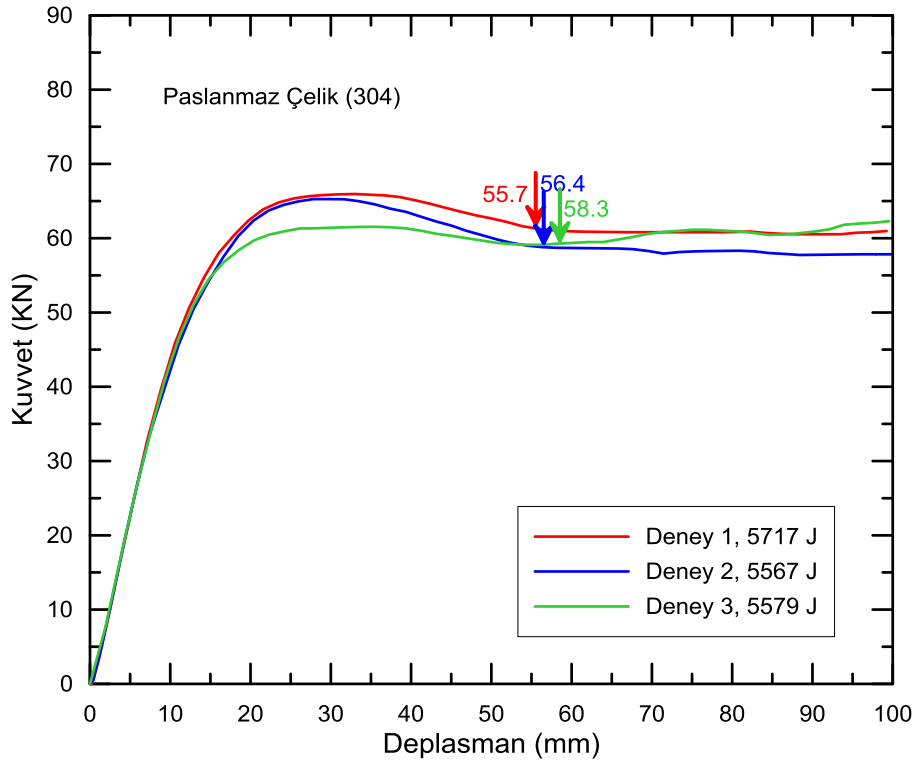
Grafikten, 8 mm genişlikteki bilezikte, bir önceki malzemeye göre (S355 çeliğine göre) daha kısa deplasman değerlerinde 3000 J'luk enerjinin elde edildiği görülmektedir. Ayrıca parçaların hiç birinde çatlak başlangıcını işaret eden bir oluşum tespit edilmemiştir. Ancak kuvvet değerinin, hedeflenen 64-68 kN aralığının üstüne çıkmış olduğu dikkat çekmektedir. Grafiklerin genelinde özellikle plastik bölgede küçük zig-zag hareketleri şeklinde görünen, deney esnasında darbecik şeklinde seslerin duyulmasına yol açan davranış gözlenmiş ve bunun eğride karasızlığa yol açtığı gözlenmiştir. Bu nedenle deneylerin aynı ebattaki bileziğin, gres yağlayıcı kullanılarak tekrarlanmasına karar verilmiştir.



Şekil 102. Paslanmaz çelikten işlenmiş konikliği 1,5 derece olan farklı genişlikteki 60/40 ölçülerinde, deformasyon bileziklerine ait kuvvet-deplasman grafiği (yağlayıcı: makine yağı). *NOT: Oklar, absorbe edilen 3000 J'e karşılık gelen deplasman değerini göstermektedir*

Paslanmaz çelikten 60/40 (b=8 mm) ölçülerinde bileziklerle ve yağlayıcı olarak gresin kullanıldığı üç deneye ait sonuçlar Şekil 103'de toplu olarak verilmiştir. Yüzeylerin gres ile yağlanması bir önceki eğrilerde görülen süreksizliklerin ortadan kalkmasını sağlamıştır. Grafikten aşağıdaki sonuçlara ulaşılmaktadır.

1. Projenin hedefleri arasında yer alan, araç şase kolon emniyeti için istenen 64-68 kN ($F_{DB-maks}$) kuvvet üst sınır değeri aşılmamıştır.
2. Yukarıda sözü edilen kuvvet değeri için, deformasyon bileziğinin yeterliliği 2000 J, öngörülen hedef değeri ise 15 cm deplasman için 3000 J'dür. Söz konusu geometri ve büyüklük için 3000 J değeri öngörülen deplasmanın (15 cm) kabaca 1/3'ünde elde edilmiştir. 10 cm (2/3 deplasman) çalışma aralığı için absorbe edilebilecek enerji değeri (ortalama enerji) 5621 J olup, bu değer itibariyle deformasyon bileziğine ait proje hedefi, daha kısa deplasmanda (2/3) olmak üzere 1,87 kat daha yüksek enerji değeriyle aşılmıştır.
3. Deneylerde 100 mm yerine, deplasmanın 120 mm artırılması durumunda kuvvetin yine ortalama 60 kN mertebesinde kaldığı, bilezikte herhangi bir hasarlanmanın görülmediği tespit edilmiş olup, 120 mm deplasman için absorbe edilen enerji değeri **6820 J** dür. Bu büyüklük tek başına, projenin ana hedefi durumundaki 7000 J olan, ezilme kutusu ile bileziğin absorbe edeceği toplam enerjiye oldukça yakındır.

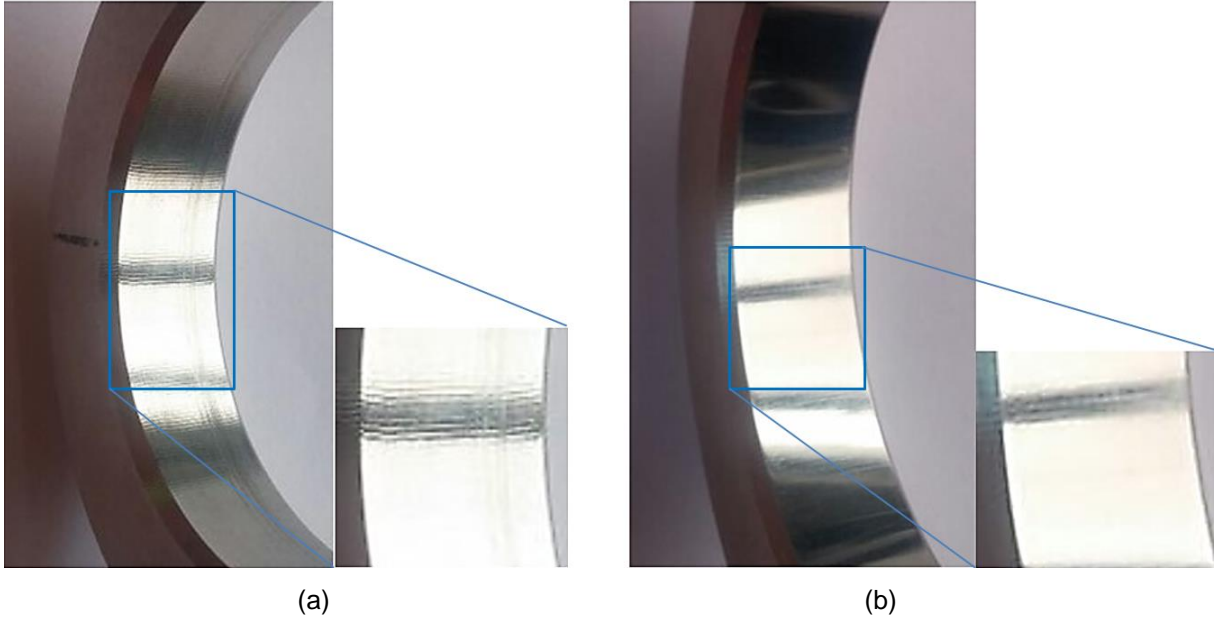


Şekil 103. Paslanmaz çelikten işlenmiş konikliği 1,5 derece olan farklı genişlikteki 60/40 ölçülerinde (b=8 mm), deformasyon bileziklerine ait kuvvet-deplasman grafiği (yağlayıcı: gres)

Daha uzun deplasmanda konik muylu ile kuvvet tatbiki için kullanılan ara parçanın birbirine temas etmesi söz konusu olduğundan, yapılan deneylerde ve SE analizlerinde bileziğin hareket ettiği deplasman değeri 120 mm'yi aşmayacak şekilde planlanmıştır.

Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü

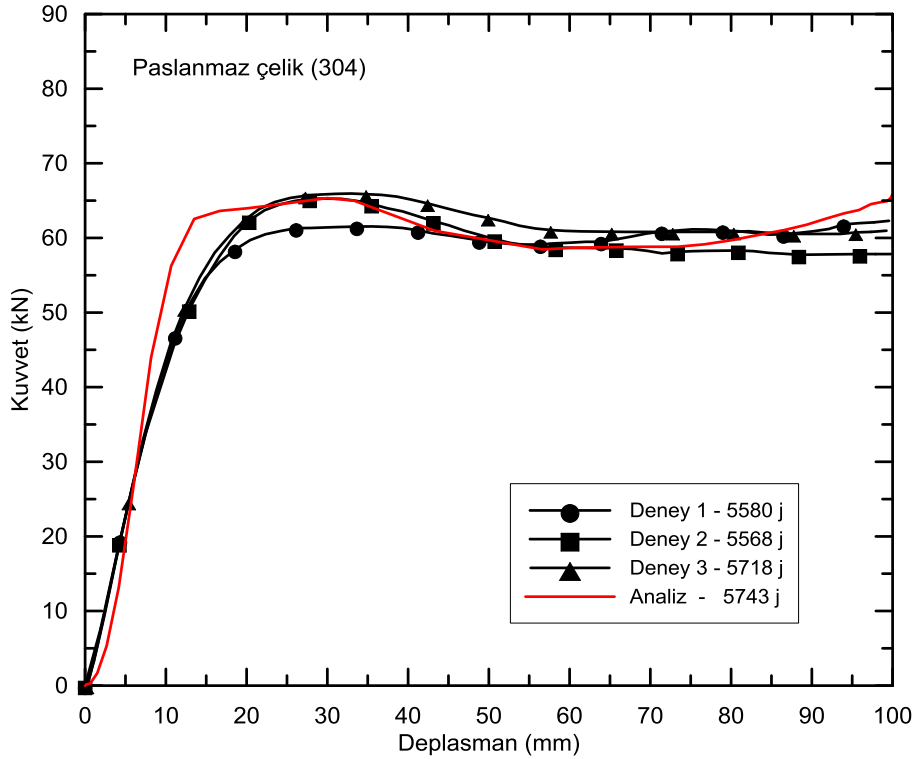
100 mm'lik deplasman sonrası bilezik iç yüzeyinin deney öncesi ve sonrası görünümü Şekil 104'de verilmiştir. Bu yüzeylerden Mitutoyo SJ-301 model cihaz ile yapılan yüzey pürüzlülük ölçümlerinden, deney öncesinde $R_z= 4,95\mu\text{m}$, $R_a= 0,490 \mu\text{m}$ olan değerler deney sonrasında $R_z=0,43\mu\text{m}$, $R_a=0,06 \mu\text{m}$ değerlerine değişmiştir. Deneyler sırasında gözlenen önemli bir diğer sonuç, muylu yüzeyinin yüzey sertleştirme olmaksızın kullanılmasının, özellikle yüksek yüzey basıncının söz konusu olduğu plastik zorlanma şartlarında uygun olmadığıdır.



Şekil 104. Bilezik iç yüzeyinin (a) deney öncesi ve (b) sonrası görünümü

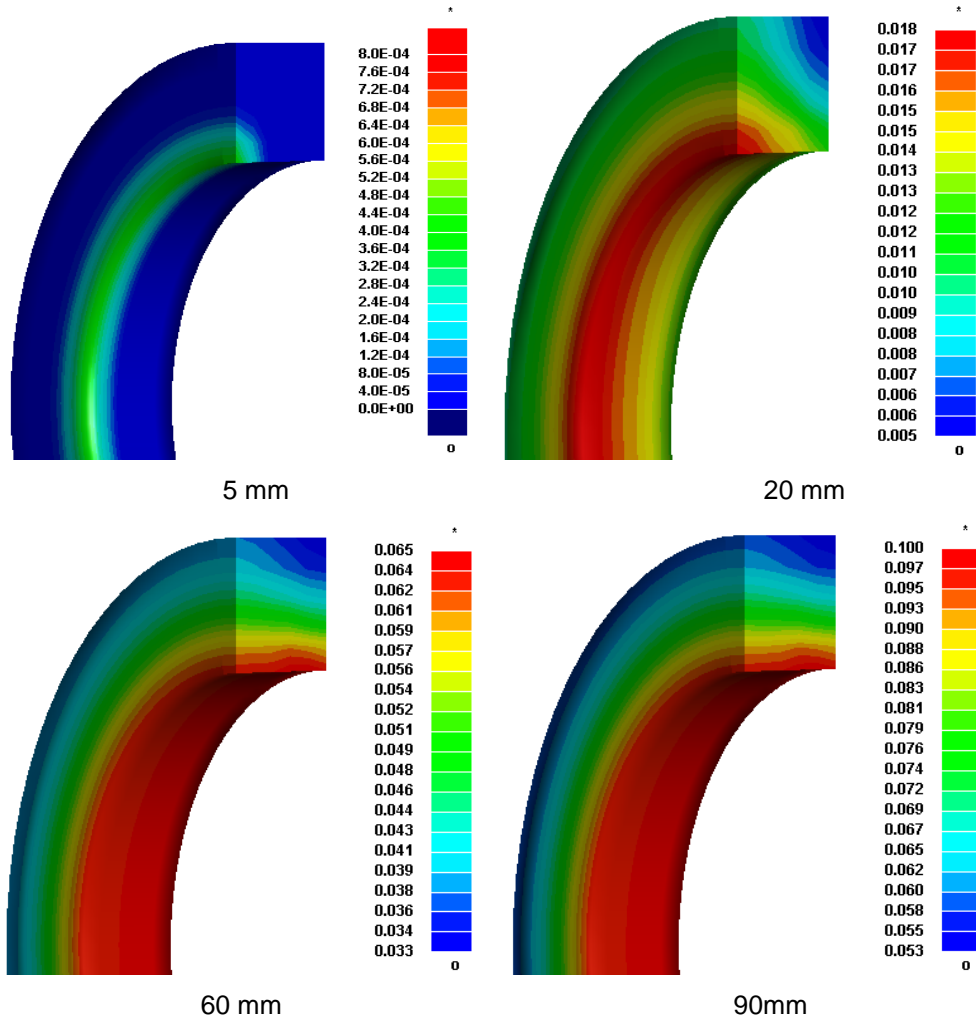
Paslanmaz Çelik Bileziğe Ait Sonlu Eleman Analiz Sonuçları

Paslanmaz çelik malzeme için de aynı modeller kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. 8 mm genişliğine ait numuneye analiz sonucu ile deney olarak elde edilen sonuçlar ile birlikte verilmiştir. Analiz sonucuna ait eğrinin, genel olarak kabul edilebilir sapma ile, özellikle de 20 mm deplasman sonrasında başarılı olduğundan söz edilebilir (Şekil 105).

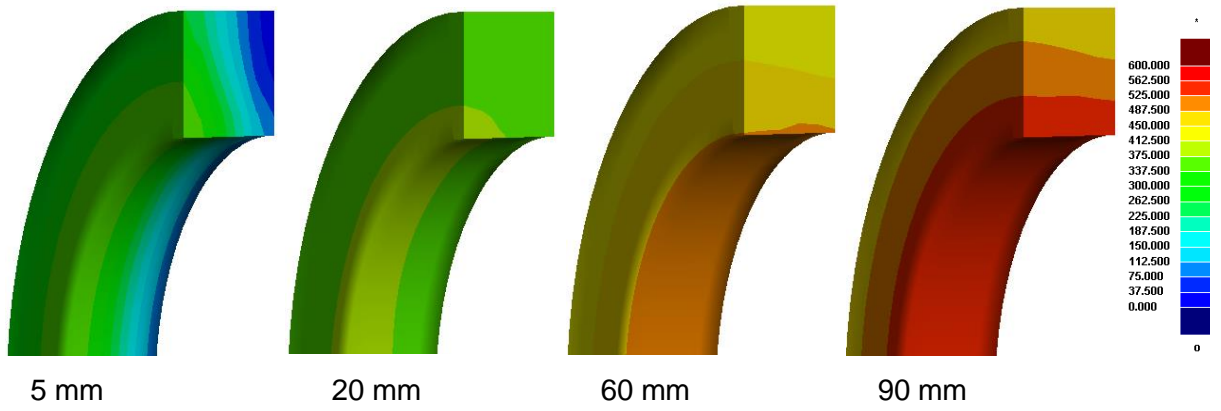


Şekil 105. Paslanmaz çelikten işlenmiş konikliği 1,5 derece olan farklı genişlikteki 60/40 (b=8 mm) ölçülerinde, deformasyon bileziklerine ait kuvvet-deplasman grafiği (yağlayıcı:gres)

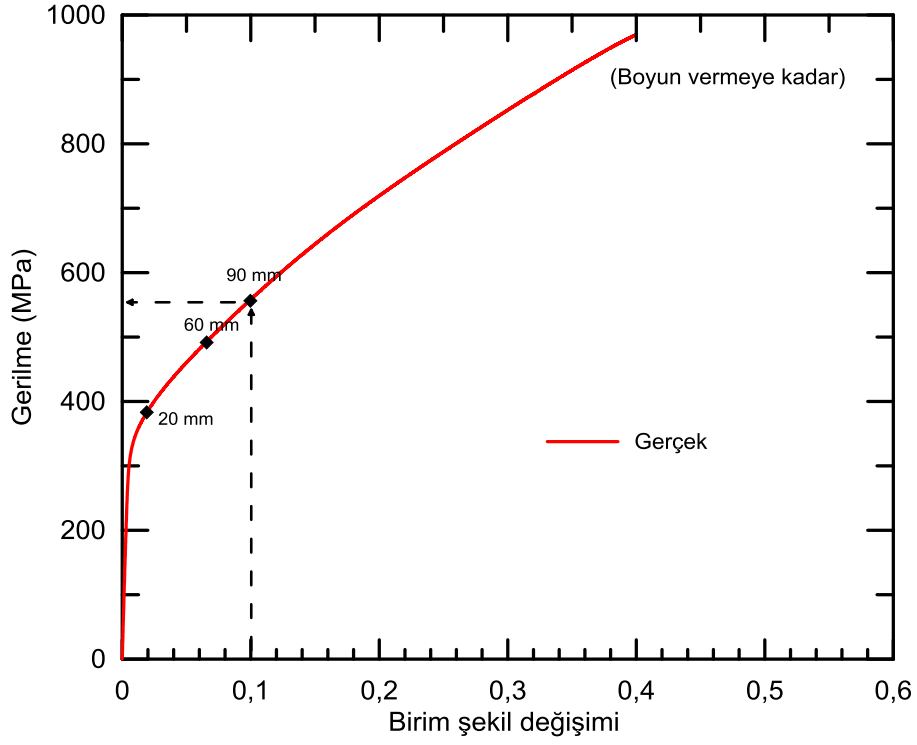
Şekil 106'da verilen 20, 60 ve 90 mm deplasman değerlerinde oluşan plastik birim şekil değişimleri ile yine bu değerlerde gelişen gerilme dağılımları (Şekil 107), çeliğin akma eğrisiyle birlikte (Şekil 108'da verilen) karşılaştırıldığında, analizin gelişen deformasyonun tanımlanması bakımından yeterince uygun sonuçlar verdiği sonucuna ulaşılmaktadır. 90 mm deplasman için şekil değişiminin malzemenin akma eğrisindeki yeri dikkate alındığında, paslanmaz çeliğin hasarlanma bakımından bir risk taşımadığı, herhangi bir çatlama oluşmaksızın daha da büyük şekil değişimlerine uğratılabileceği anlaşılmaktadır.



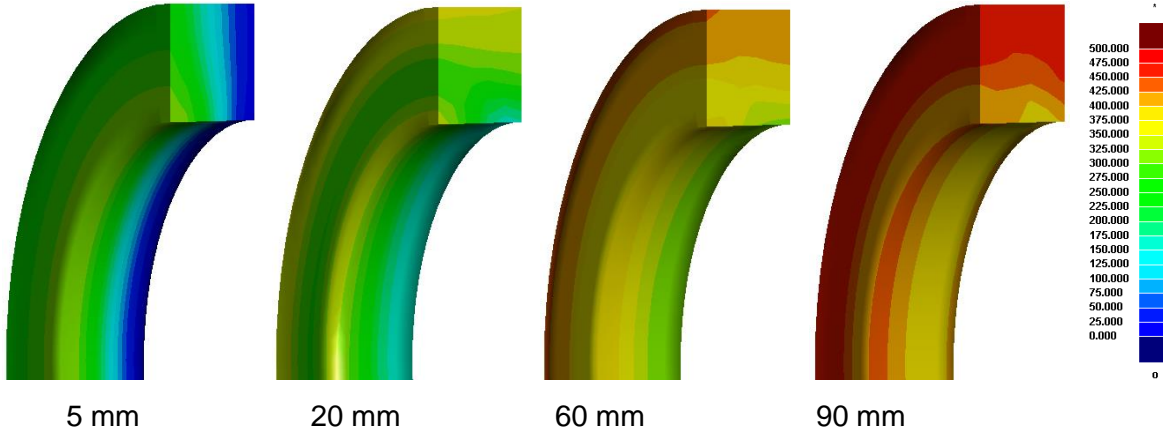
Şekil 106. Bilezik kesitinde plastik birim şekil değişimin deplasmana bağlı olarak değişimi



Şekil 107. Bilezik kesitinde Von-Mises gerilmesinin deplasmana bağlı olarak değişimi

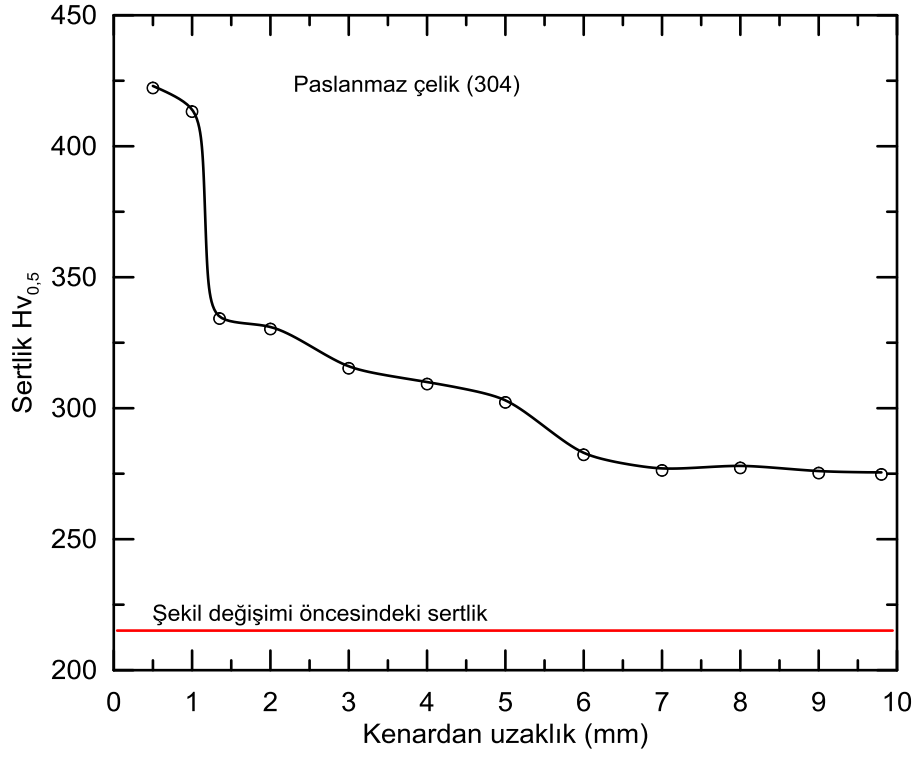


Şekil 108. Paslanmaz çeliğin akma eğrisi

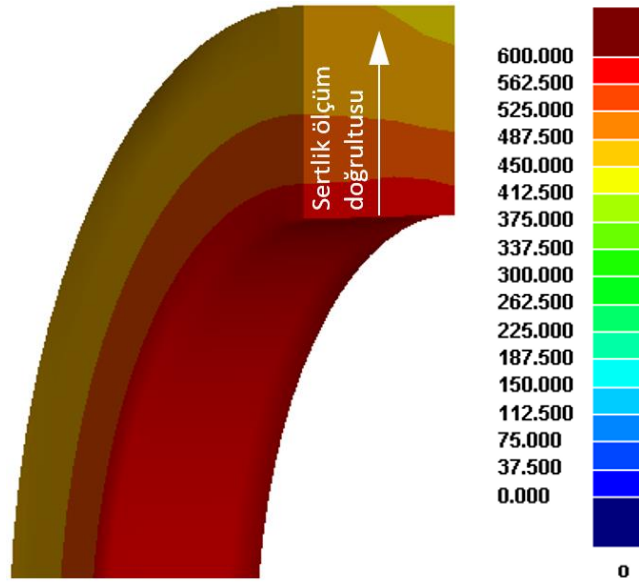


Şekil 109. Bilezik kesitinde asal gerilmelerin deplasmana bağlı olarak değişimi

Asal gerilme dağılımının verildiği Şekil 109'da dış çeperlerde etkisini gösteren asal gerilmenin artan deformasyonla şiddetlenerek tüm kesite yayıldığı görülmektedir. Şekilden, 90 mm deplasman için iç yüzeyde yüksek basınç etkisinde temastan kaynaklanan gerilmenin, bileziğin küçük çaplı ağız kısmında yoğunlaşmış olması da (Şekil 109) dikkat çeken bir noktayı oluşturmaktadır.



(a)



(b)

Şekil 110. (a) 100 mm deplasman için şekil değiştirmiş bileziğin iç kısmındaki sertliğin mesafe ile değişimi, (b) plastik şekil değiştirmiş bilezik üzerinde sertlik ölçüm yeri ve doğrultusu

Başlangıçta sertliği 215 HV mertebelerindeki paslanmaz çeliğin, deney sonrası yani, 100 mm'lik deplasman sonunda bilezik iç yüzeyinden kalınlık doğrultusu boyunca sertlik değişiminin verildiği

Şekil 110 incelendiğinde, parçanın tüm kesitinde pekleşme nedeniyle sertlik artışına yol açacak derecede yaygın bir şekil değişiminin söz konusu anlaşılmaktadır. Bu noktada sertlik ölçümü ve analiz sonuçlarının birbirlerine paralel ve aynı zamanda doğrular nitelikte olduğu dikkat çekmektedir. 100 mm deplasman için iç yüzeydeki en yüksek birim şekil değişimi (Von Mises) değeri 0,12 olup, bu 0,4 olan boyun vermedeki birim şekil değişiminin 1/3'üne karşılık gelmektedir ki bu malzemenin süneklik açısından son derece rahat çalıştığıının bir göstergesidir.

6. EZİLME KUTUSU VE DEFORMASYON BİLEZİĞİNİN BİRLİKTE TEST EDİLMESİ

Bu bölümde ezilme kutusu ve deformasyon bileziğinin seri bağlı olarak birlikte çalışma durumlarına ait deney sonuçları ve SE analiz sonuçları verilmiştir.

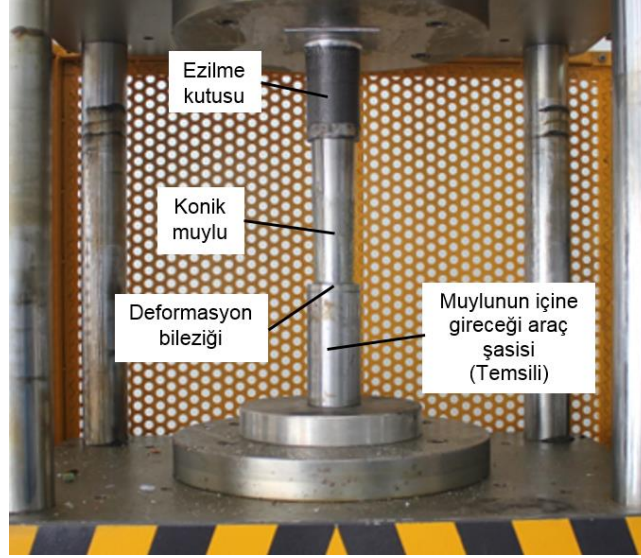
6.1 Deneysel Çalışma

Ezilme kutusu ve deformasyon bileziği tasarımıyla ilgili yapılan 330 adeti aşkın deney neticesinde her iki kademe içinde enerji absorbe etme kabiliyeti bakımından en iyi kombinasyonlar birleştirilmiştir. Ezilme kutusu için projede belirlenen enerji absorbe değerinin üstünde enerji absorbe etme yeteneğine sahip tasarım kullanılmıştır. Bu tasarımı oluşturan takviye parametreleri şu şekilde sıralanabilir;

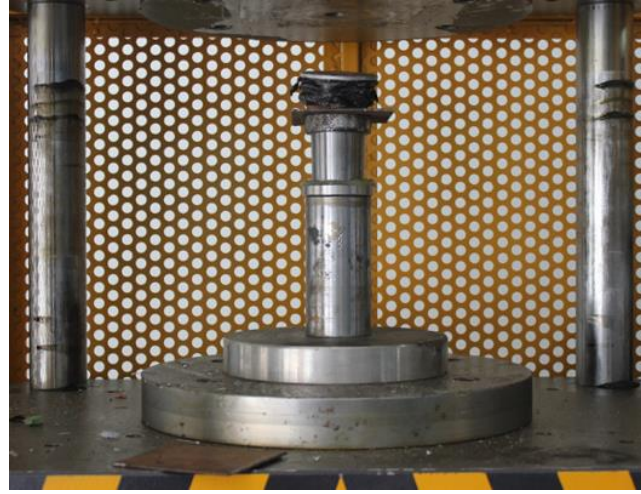
- 1- 0,20 mm derinlikte ve 10 mm eş ezme aralıklı çevresel ezme işlemi,
- 2- Alt ve üst yüzeyde en sert köpüğün, ortada ise yumuşak köpüğün bulunduğu Sandviç modellenli PVC köpükle içeriden takviye işlemi,
- 3- 2 kat karbon elyafın sarıldığı dışarıdan takviye işlemi.

Ayrıca ilk pik kuvvetinin uygun değerlere düşürülmesi için ezilme kutusunun bir ucu, tetikleme amacıyla belirli bir miktar deforme edilmiştir. Deformasyon bileziği olarak projede belirlenen enerji absorbe hedefinin çok daha düşük deplasmanlarla elde edildiği 304 kalite paslanmaz çelik kullanılmıştır. Deformasyon bileziğinin (deneysel ve sonlu eleman sonuçları dikkate alınarak) geometrik ölçüleri, iç çap/dış çap 40/60 mm olan 8 mm genişliğe ve 1,5° koniklik açısına sahip olan numune kullanılmıştır.

Birlikte çalışma durumuna ait deneysel çalışmalar iki farklı yükleme modu için gerçekleştirilmiştir. İlk durum hidrolik presle yarı statik deneyleri ikinci durum ise ağırlık-düşürme darbe test cihazıyla dinamik deneyleri kapsamaktadır. Şekil 111'de hidrolik pres altında yarı statik deney için numunelerin yerleştirilme sırası ve şekli görülmektedir. Şekil 112'de ise deney sonrası hasarlanmış ezilme kutusu ve deformasyon bileziği görülmektedir.



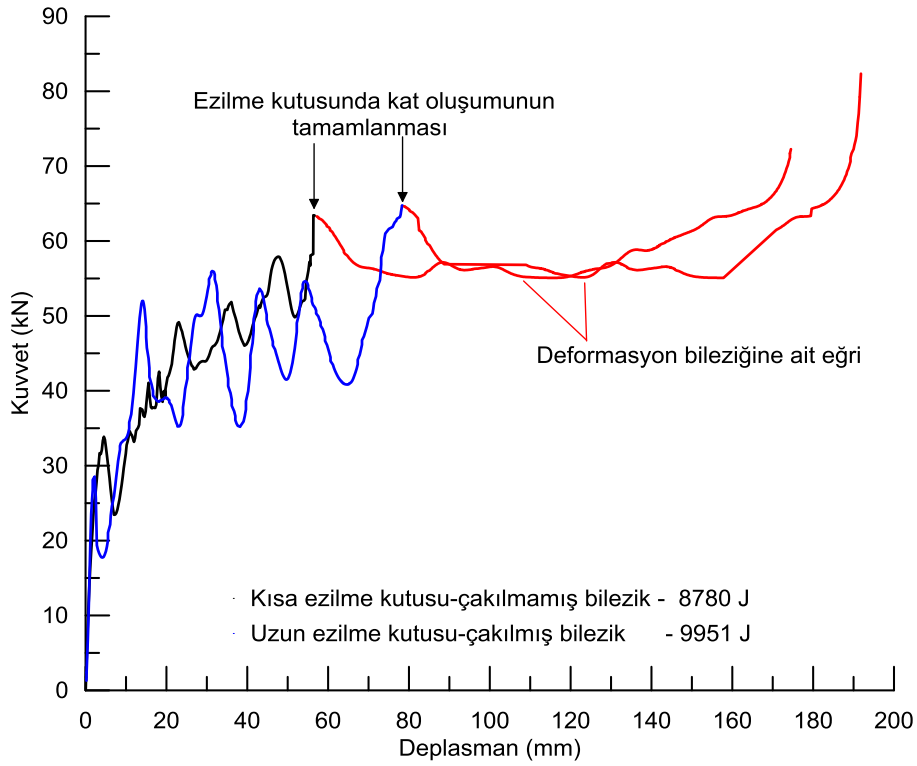
Şekil 111. Yarı-statik deney öncesinde ezilme kutusu ve deformasyon bileziğinin görünümü



Şekil 112. Yarı-statik deney sonrasında ezilme kutusu ve deformasyon bileziğinin hasarlanmış görüntüsü

Şekil 113'da iki farklı uzunluktaki ezilme kutusunun (100 ve 125 mm) deformasyon bileziğiyle birlikte test edilmesi sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman grafiği görülmektedir. Deney başlangıcında tetiklemenin etkisi ve takip eden deplasmanlarda katlanmanın meydana geldiği grafikten açıkça görülebilmektedir. Daha sonra tamamen bileziğin harekete geçtiği kısım ise grafikte kırmızı renkli eğri ile gösterilmiştir. İki kademenin birlikte çalışma rejimlerinin kademelerin tekli çalışma durumlarıyla benzer karakterde olduğu, ancak ezilme kutusunun katlanma alt-üst pik kuvvetleri arasındaki farkın nispeten daha az olduğu dikkat çekmektedir. Bu durum bileziğin

çakılmadığı ve kısa ezilme kutusunun (100 mm) kullanıldığı deneysel çalışmaya aittir. Bu numunede deformasyon esnasında çok az da olsa bilezikte küçük hareketlerin (grafikte ilk katlanma sonrası oluşan küçük zikzak hareketleri) gelişmesiyle açıklanabilir. Bu şekilde bir davranış kuvvetin deplasmanla üstel olarak artış göstermesini dolayısıyla da ideal ezilme kutusundan beklenen rampa etkisi gözlenmesi nedeniyle bir olumsuzluk olarak görülmemektedir. Deformasyon bileziğın daha büyük kuvvetlerle çakılarak uzun ezilme kutusunun (125 mm) kullanıldığı deneye ait grafik incelendiğinde katlanma pik kuvvetleri arasındaki fark artma eğilimine girmiştir.

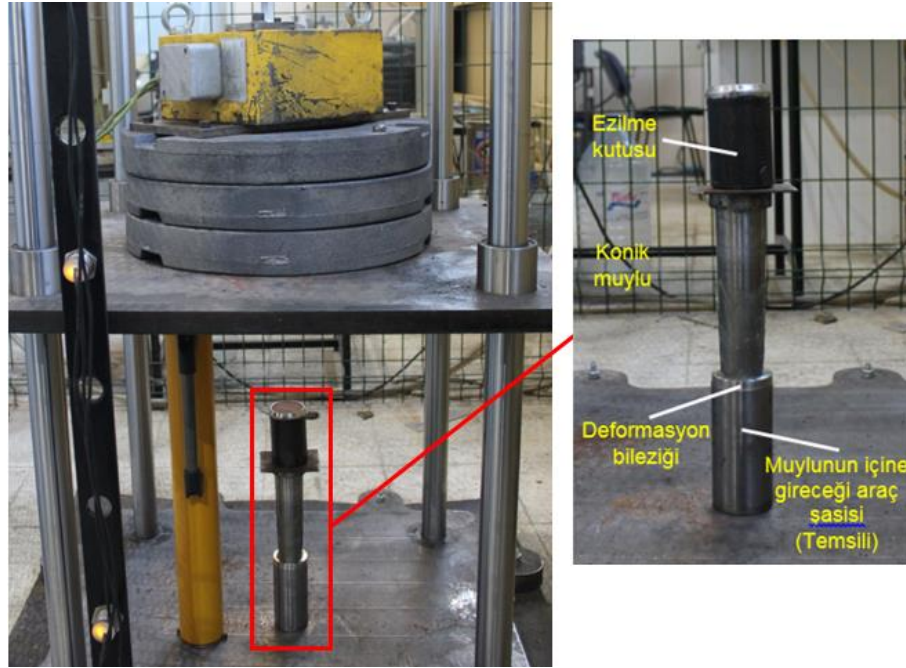


Şekil 113. İki farklı ezilme kutusunun deformasyon bileziğiyle birlikte test edilmesi sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman grafiği

Şekil 114'da dinamik deney öncesinde birlikte çalışma durumuna ait numune görüntüsü ve ayrıntıları verilmiştir. Bu testlerde kullanılan ağırlık miktarı 290 kg olarak belirlenmiş olup 2,5 m yükseklikten serbest düşme ile 7180 J değerinde bir çarpışma enerjisi elde edilmiştir. Ağırlık-düşürme darbe test cihazıyla yapılan deneylerden gerek numune gerekse deneylere ait ağır çekim videolarından (ilgili videolar ek dosya olarak yüklenmiştir) elde edilen verilerin, yarı-statik deney sonuçlarıyla büyük oranda benzerlik arz ettiği görülmüştür. Çarpışmada numunenin

deformasyona uğraması ve tablanın deney sonunda geri sıçrama göstermemesi, çarpışma enerjisinin başarılı bir şekilde absorbe edildiğinin bir göstergesidir.

Ezilme kutusunda meydana gelen deformasyon miktarının yarı-statik deneylerdeki değerlerle (75mm) yaklaşık aynı olduğu ve ezilme kutusunun deformasyon başlangıcında simetrik katlanma sonrasında ise elmas türü katlanmaya dönüştüğü tespit edilmiştir. Deformasyon bileziğinde de çarpışma enerjisiyle orantılı olarak 36-40 mm aralığında bir ilerlemenin söz konusu olduğu görülmüştür. Deformasyon bileziğinde herhangi bir çatlak başlangıcına rastlanmamış dolayısıyla parçanın tamamen plastik şekil değiştirdiği anlaşılmıştır. Şekil 115'de bu deneylere ait bir temsili numune görüntüsü verilmiştir.



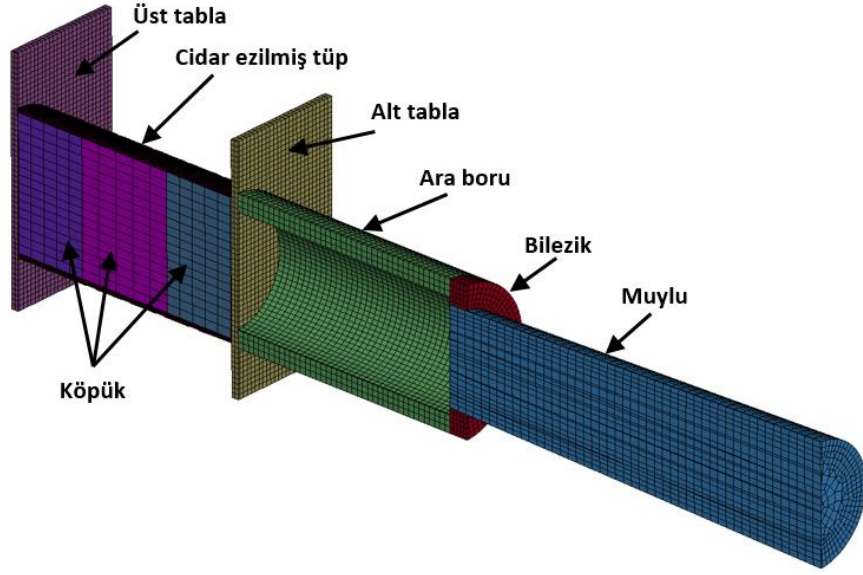
Şekil 114. Ezilme kutusu ve deformasyon bileziğinin ağırlık-düşürme darbe test cihazında deney öncesi görüntüsü



Şekil 115. Ezilme kutusu ve deformasyon bileziğinin deney sonrası görüntüsü

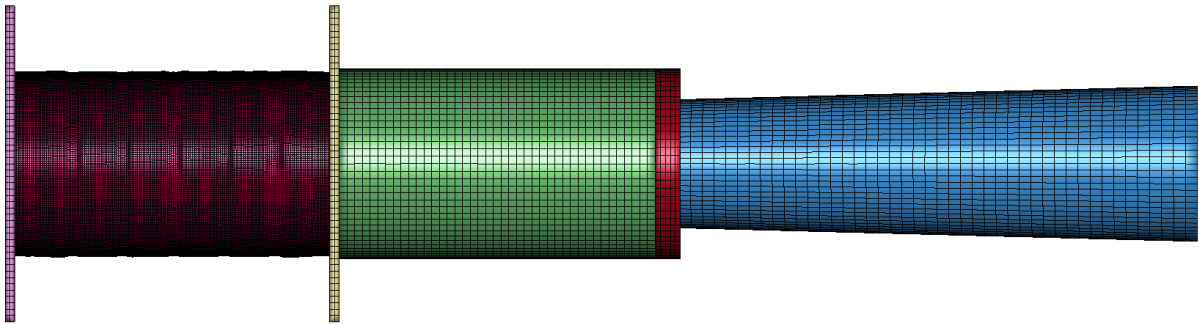
6.2 SE Analiz Çalışmaları

Yukarıdaki bölümde verilen ezilme kutusu ve konik deformasyon bileziğinin birlikte çalışma durumlarına ait deneysel veriler ışığında sonlu elemanlar modeli geliştirilmiştir. Ezilme kutusu ve deformasyon bileziği modeline ait görüntü Şekil 116'da verilmiştir. Görüntüden de anlaşılacağı üzere ezilme kutusu için çevresel ezme ve içeriden PVC köpük takviyesi olmak üzere iki farklı takviye durumu söz konusudur. 10 mm eşit aralıklı ve 0,25 ezme derinliğinde çevresel ezme işlemi uygulanan alüminyum tüp, yoğunluk ve tabaka kalınlığı sırası 100-60-100 kg/m³ ve 30-40-30 mm olacak şekilde içeriden PVC köpükle takviye edilmiştir. Deformasyon bileziği olarak ise 1,5° koniklik açısında, 40/60 mm iç çap/dış çap ve 8 mm genişlik ölçülerine sahip 304 kalite paslanmaz çelik kullanılmıştır. İki kademelin birlikte çalıştığı SE modeli 244392 node ve 184047 elemandan oluşmaktadır.

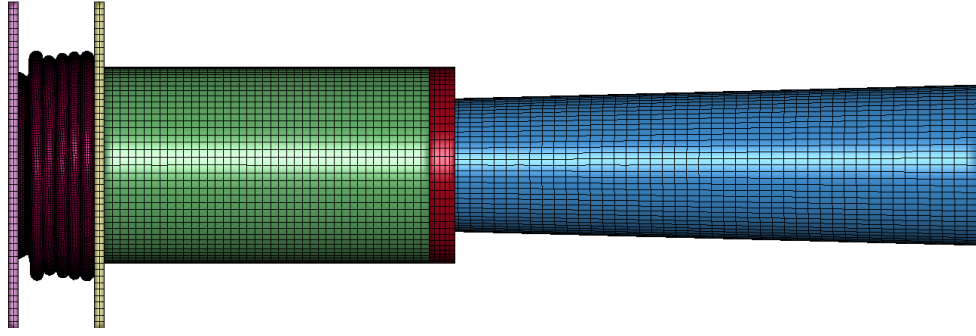


Şekil 116. Ezilme kutusu ve deformasyon bileziğinin SE model görünümü

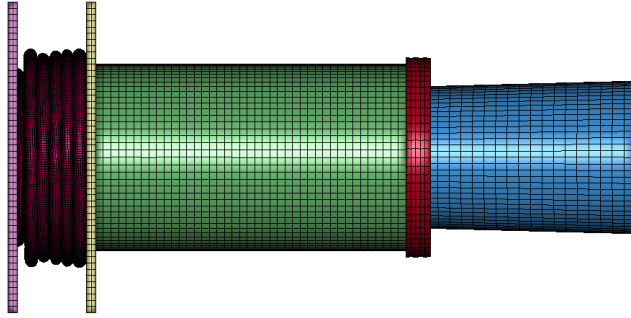
Tüp ile kompozit tabaka arasında meydana gelen ayrılma (deleminasyon) davranışının gerçekçi olarak modellenmesinde yaşanan sorunlar nedeniyle yani deformasyon davranışının tahmin edilememesinden sadece elyaf takviye durumu SE analizlerinde modellenmemiştir. Bu durum neticesinde elyaf sarımından kaynaklanan ilk pik kuvvetin artışı gerçekleşmeyeceği için SE modelinde tetikleme amaçlı ön şekil verme işlemine de gerek duyulmamıştır. Aşağıdaki Şekil 117'de SE analizinde kullanılan modelin analiz öncesinde, ezilme kutusunun deformasyonun sonlandığı ve bileziğin deformasyonunun sonlandığı üç aşama sırasıyla verilmiştir.



(a)

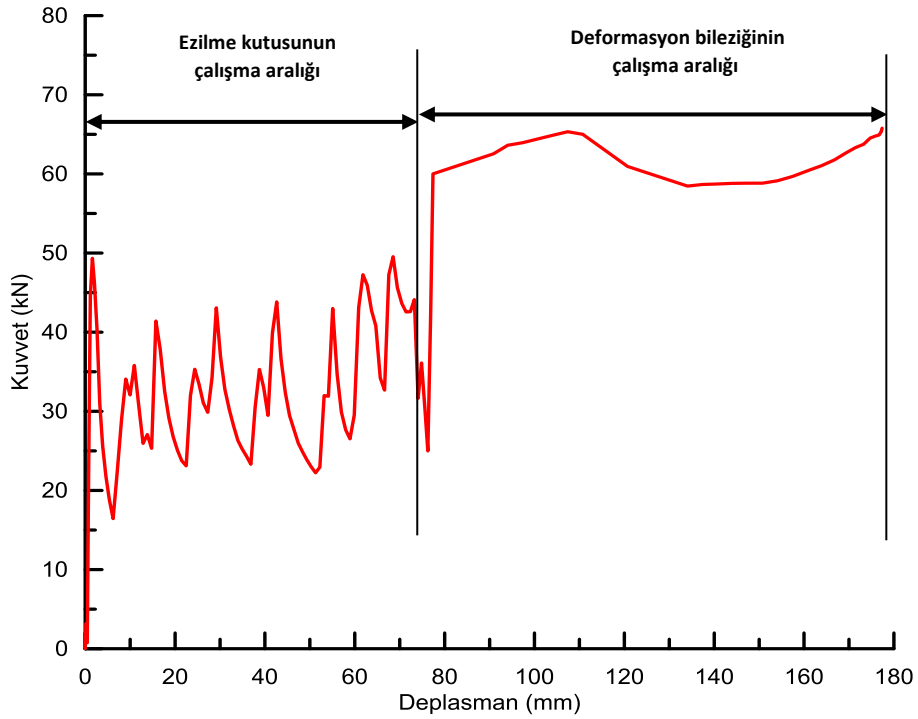


(b)



(c)

Şekil 117. SE analizinde kullanılan modelin (a) analiz öncesinde, (b) ezilme kutusunun deformasyonun sonlandığı ve (c) bileziğin deformasyonunun sonlandığı aşamalara ait görüntü



Şekil 118. SE modeline kuvvet-deplasman eğrisi

Şekil 118'de SE modeline kuvvet-deplasman eğrisi verilmiştir. 100 mm uzunluğundaki ezilme kutusunun kullanıldığı bu modelde deneysel çalışmaya yakın bir enerji değeri elde edilmiştir. Deneysel çalışmada 8780 J olan enerji değeri SE analizinde 8660 J olarak yaklaşık %1 farkla hesaplanmıştır. SE analizinde elde edilen birbirinden tamamen ayrı iki çalışma bölgesinin deneysel çalışmaya ait grafikte bu kadar net olmamasının sebebinin deneysel çalışmada ezilme kutusunun deforme olduğu bölgede çok az da olsa bilezikte meydana gelen deformasyon olduğu düşünülmektedir.

7. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Proje kapsamında ezilme kutusu ve deformasyon bileziği olmak üzere iki kademedan oluşan, enerji absorbe etme kabiliyeti yüksek bir yapının tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Birinci kademedde 1000 kg ağırlığındaki bir aracın 15 km/h hızla rijit bir cisme çarpması durumunda absorbe edilmesi gereken enerji değeri 4340 J'dür. Bu kritik değer tüp yapıda maksimum ve ortalama kuvvetin 60-65 kN değerini aşmaksızın ve ortalama kuvvetin deplasman ile düzgün artış gösterdiği yani ideal bir ezilme kutusunda aranan rampa etkisinin sağlanması esastır. Bu tür bir gereksinimin ortalama kuvvet üzerinde en büyük etkiye sahip olan cidar kalınlığının artırarak 6063 alüminyum alaşımı bir tüp için gerçekleştirilmesi katlanma köşelerinde çatlak oluşması nedeniyle mümkün değildir.

Tasarımı gerçekleştirilen ezilme kutusunda başvuru üç temel takviye etkisi oluşturacak yöntemle yukarıda sözü edilen enerji değeri 4330 J – 4370 J aralığında başarılı bir şekilde elde edilmiştir. Belirtilen takviye modellerinden çevresel ezmenin, malzeme bünyesinde mikro çatlığa yol açmayacak şekilde uygulanması, içerinden yapılacak köpük takviyesinin köpük yoğunluğu dikkate alınarak oluşturulan sandviç modelde olması ve son olarak dışarıdan karbon elyaf takviyesi uygulanması maksimum özgül enerji absorbe etme kabiliyeti açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu enerji değeri 94 mm deplasman için elde edilmiştir. Kullanım yerine, boy/çap oranına bağlı olarak bu deplasman değeri artırılabilir. Nitekim 100 mm deplasman için 4700 J'ü aşabilmektedir. Ezilme kutularına yapılan takviye işlemlerinden çevresel ezme işleminin numunelerin dışarı katlanma yüzdesini artırdığı gerek deneysel gerekse sonlu eleman çalışmalarında net bir şekilde görülmüştür.

İkinci kademeyi oluşturan deformasyon bileziği ise 60-65 kN mertebelerinde harekete geçmesi ve kuvvetin 68-70 kN bandını aşmaması temel kısıtları oluşturmaktadır. Bu çerçevede farklı malzeme ve farklı geometrik ölçülerde üretimi kolay deformasyon bileziği tasarımına gidilmiştir. Sonlu eleman çalışmalarından deformasyon bileziğinde kullanılması muhtemel bir çelik için sünekliğin parçanın fonksiyonelliği açısından (kırılmaması), akma dayanımı ve pekleşme davranışı ise elde edilecek kuvvet-deplasman eğrisini açısından önemli olduğu anlaşılmıştır. Kullanılacak çeliğin en azından S355 (St 52-3) kalitesinde olması gerektiği belirlenmiştir. Malzeme özelliklerine bağlı

olarak bilezik geometrik ölçüleri değiştirilerek farklı enerji değerleri elde edilmesi mümkündür. Yapılan deneysel ve sonlu eleman çalışmaları neticesinde 304 kalite paslanmaz çelik ile hedeflenen enerjinin parçada kırılma veya çatlamaya yol açmaksızın bilezik için belirtilen alt proje hedefi 2660 J olup bu değer 60 mm deplasmanda 3000 J olarak elde edilmiştir. Tasarımı yapılan bileziğin 100 mm deplasmana zorlanması durumunda absorbe edilen enerji yaklaşık 5600 J olmaktadır.

Kısa ezilme kutusu ile çakılmamış bileziğin seri olarak çalıştırılması durumuna ait deney sonuçlarından, sırasıyla birinci ve ikinci kademenin 70-75 mm ve 100-105 mm değerlerinde, 8765-8830 J arasında değiştiği ve bunun proje alt hedefi olan 7000 J'e göre %40 oranında artış sağlandığı görülmüştür. 125 mm'lik ezilme kutusunun ve çakılmış bileziğin kullanıldığı deneylerde ise enerji değeri 8975-10010 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Bu enerji değeri 1000 kg ağırlığındaki bir aracın rijit bir engele köşeden çarpması halinde (ezilme kutusu tarafından absorbe edilen 6080 J değerindeki enerjinin) absorbe edilen enerjinin %56 oranında artırılmış olması anlamına gelmektedir. Ağırlık-düşürme darbe test cihazıyla yapılan deneylerden çarpışmada numunenin deformasyona uğraması ve tablanın deney sonunda geri sıçrama göstermemesi, çarpışma enerjisinin ezilme kutusu ve deformasyon bileziği tarafından başarılı bir şekilde absorbe edildiğini göstermektedir.

Projenin geneli dikkate alındığında yapılabilecek öneriler şu şekilde sıralanabilir;

- Tüp içerisinde farklı yoğunluktaki alüminyum köpüğün cam elyaf takviyesiyle birlikte kullanımını,
- Bilezikte absorbe edilecek enerjinin geniş bir aralıkta istenen değerlerde elde edilebilmesi için deformasyon bileziğinin şekil odaklı (farklı geometri ve ebat) farklı tasarımların yapılması ve uygulanması

Referanslar

- [1] Guillow, S. R., Lu, G. ve Grzebieta, R. H. 2001. "Quasi-static axial compression of thin-walled circular aluminium tubes", *International Journal of Mechanical Sciences*, 43(9), 2103-2123.
- [2] Li, Z., Yu, J. ve Guo, L. 2012. "Deformation and energy absorption of aluminum foam-filled tubes subjected to oblique loading", *International Journal of Mechanical Sciences*, 54(1), 48-56.
- [3] Lu, G., Yu, T. 2003. *Energy absorption of structures and materials*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited.
- [4] Jones, N. 1989. *Structural Impact*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [5] Wierzbicki, T. ve Abramowicz, W. 1983. "On the crushing mechanics of thin-walled structures", *Journal of Applied mechanics*, 50(4a), 727-734.
- [6] Abramowicz, W. ve Wierzbicki, T. 1989. "Axial crushing of multicorner sheet metal columns", *Journal of Applied Mechanics*, 56(1), 113-120.
- [7] Zarei H.R. ve Kröger M. 2008. "Optimization of foam filled aluminium tubes for crush box application", *Thin-Walled Structures*, 46, 214-221.
- [8] Guden, M., Yüksel, S., Taşdemirci, A. ve Tanoğlu, M. 2007. "Effect of aluminum closed-cell foam filling on the quasi-static axial crush performance of glass fiber reinforced polyester composite and aluminum/composite hybrid tubes", *Composite structures*, 81(4), 480-490.
- [9] Santosa, S. P., Wierzbicki, T., Hanssen, A. G. ve Langseth, M. 2000. "Experimental and numerical studies of foam-filled sections", *International Journal of Impact Engineering*, 24(5), 509-534.
- [10] Djamaluddin F., Abdullah S., Ariffin Zm. ve Nopiah Z.M. 2015. "Optimization of foam-filled double circular tubes under axial and oblique impact loading conditions", *Thin-Walled Structures*, 87, 1-11.
- [11] Fang, J., Gao, Y., Sun, G., Zhang, Y. ve Li, Q. 2014. "Crashworthiness design of foam-filled bitubal structures with uncertainty", *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 67, 120-132.
- [12] Sun, G., Li, G., Hou, S., Zhou, S., Li, W. ve Li, Q. 2010. "Crashworthiness design for functionally graded foam-filled thin-walled structures", *Materials Science and Engineering: A*, 527(7), 1911-1919.

- [13] Yin, H., Wen, G., Hou, S. ve Qing, Q. 2013. "Multiobjective crashworthiness optimization of functionally lateral graded foam-filled tubes", *Materials & Design*, 44, 414-428.
- [14] Adachi, T., Tomiyama, A., Araki, W. ve Yamaji, A. 2008. "Energy absorption of a thin-walled cylinder with ribs subjected to axial impact", *International journal of impact engineering*, 35(2), 65-79.
- [15] Salehghaffari, S., Tajdari, M., Panahi, M. ve Mokhtarnezhad F. 2010. "Attempts to improve energy absorption characteristics of circular metal tubes subjected to axial loading", *Thin-Walled Structure*, 48, 379-390.
- [16] S.J. Hosseinipour, G.H. Daneshi, Energy absorption and mean crushing load of thin-walled grooved tubes under axial compression, *Thin-Walled Struct.* 41 (2003) 31–46.
- [17] [12] S.J. Hosseinipour, Mathematical model for thin-walled grooved tubes under axial compression, *Mater. Des.* 24 (2003) 463–469.
- [18] Ahmad, Z. ve Thambiratnam, D. P. 2009. "Dynamic computer simulation and energy absorption of foam-filled conical tubes under axial impact loading", *Computers & Structures*, 87(3), 186-197.
- [19] Lin, J. S., Wang, X. ve Lu, G. 2014. "Crushing characteristics of fiber reinforced conical tubes with foam-filler", *Composite Structures*, 116, 18-28.
- [20] Ghamarian, A., Zarei, H. R. ve Abadi, M. T. 2011. "Experimental and numerical crashworthiness investigation of empty and foam-filled end-capped conical tubes", *Thin-Walled Structures*, 49(10), 1312-1319.
- [21] Qiao, J. S., Chen, J. H. ve Che, H. Y. 2006. "Crashworthiness assessment of square aluminum extrusions considering the damage evolution", *Thin-walled structures*, 44(6), 692-700.
- [22] Kazancı, Z. ve Bathe, K. J. 2012. "Crushing and crashing of tubes with implicit time integration", *International Journal of Impact Engineering*, 42, 80-88.
- [23] Zhang, X. ve Huh, H. 2009. "Energy absorption of longitudinally grooved square tubes under axial compression", *Thin-Walled Structures*, 47(12), 1469-1477.
- [24] Eren, I., Gür, Y. ve Aksoy, Z. 2009. "Finite element analysis of collapse of front side rails with new types of crush initiators", *International journal of automotive technology*, 10(4), 451-457.
- [25] Eren, İ. 2002. "Araçlarda Çarpışma Etkisini Karşılıyan Şasi Ön Kolonlarının Tepki Kuvvet-Enerji yutma Optimizasyonu", *Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.*

- [26] Morello, L., Rossini, L., R., Pia G. ve Tonoli, A., 2011. The Automotive Body Volume I. London: Springer.
- [27] Morello, L., Rossini, L., R., Pia G. ve Tonoli, A., 2011. The Automotive Body Volume II. London: Springer.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Prof. Dr. KENAN GENEL
Proje No:	115M583
Proje Başlığı:	Çift Kademeli (Ezilme Kutusu, Konik Deformasyon Bileziği) Enerji Absorbe Edici Sistem Tasarımı Ve İmalatı
Proje Türü:	1001 - Araştırma
Proje Süresi:	24
Araştırmacılar:	OSMAN HAMDİ METE, YAŞAR KAHRAMAN
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	SAKARYA Ü.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/09/2015 - 01/09/2017
Onaylanan Bütçe:	285144.0
Harcanan Bütçe:	202378.01
Öz:	<p>Bilindiği gibi, araçlarda pasif koruma elemanlarının kaza esnasında ortaya çıkan çarpışma enerjisini absorbe ederek araç ana gövdesinin hasara uğramasını önlenmesi ya da hasar seviyesinin minimize edilmesi amaçlanmaktadır. Bu çalışmada, ezilme kutusu ve konik deformasyon bileziğinden oluşan iki kademeli bir yapının tasarımı ve imalatı üzerine çalışmalar yürütülmüştür. 6063 alüminyum alaşımı ezilme kutusunun cidarda çevresel ezme işlemine ek olarak, içeriden ve dışarıdan takviye edilerek deformasyon esnasında enerji absorbe etme kabiliyeti artırılmaya çalışılmıştır. Çarpışma enerjisinin bilezikte plastik şekil değişimine harcadığı konik deformasyon bileziğinde ise konik muylu ve bilezik yapısının tasarım ve imalatı gerçekleştirilmiştir. İki kademeli sistemle ilgili yapılan 330 adeti aşkın deneyden, ezilme kutusu için özgül enerji absorbe değeri dikkate alınarak elde edilen en iyi kombinasyonla, 4330-4370 J aralığında değişen bir enerji değeri ile proje hedefleri aşılmıştır. Belirtilen takviye modellerinden çevresel ezmenin, malzeme bünyesinde mikro çatlakla yol açmayacak şekilde uygulanması, içeriden yapılacak köpük takviyesinin köpük yoğunluğu dikkate alınarak oluşturulan sandviç modelde olması ve son olarak dışarıdan karbon elyaf takviyesi uygulanması maksimum özgül enerji absorbe etme kabiliyeti açısından kritik bir öneme sahiptir. Deformasyon bileziğinin 60-65 kN mertebelerinde harekete geçmesi ve kuvvetin 68-70 kN bandını aşmaması temel kısıtları oluşturmuş, bu çerçevede farklı malzeme ve farklı geometrik ölçülerde üretimi kolay deformasyon bileziği tasarımına gidilmiştir. Yapılan deneysel ve sonlu eleman çalışmaları neticesinde 304 kalite paslanmaz çelik ile hedeflenen enerjinin parçada kırılma veya çatlama yolu açmaksızın alt proje hedefi olan 2660 J değeri 60 mm deplasmanda 3000 J olarak elde edilmiştir. Tasarımı yapılan bileziğin 100 mm deplasmana zorlanması durumunda absorbe edilen enerji yaklaşık 5600 J değerine ulaşmaktadır. 125 mm uzunluğundaki ezilme kutusunun ve çakılmış bileziğin kullanıldığı deneylerde ise enerji değeri 8975-10010 J arasında değiştiği tespit edilmiştir. Ağırlık-düşürme darbe test cihazıyla yapılan deneylerden de önerilen iki kademeli yapının uyumlu bir şekilde çalıştığı çarpışma enerjisinin ezilme kutusu ve deformasyon bileziği tarafından başarılı bir şekilde absorbe edildiğini gözlenmiştir.</p>
Anahtar Kelimeler:	ezilme kutusu, konik deformasyon bileziği, köpük, kompozit, çevresel ezme, ince cidarlı tüp
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır