

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ENERJİ ABSORBE EDİCİ METALİK VE KOMPOZİT
ÇARPIŞMA KUTUSUNUN TASARIMI VE İMAL
EDİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

Muhammet Muaz YALÇIN

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : MAKİNE TASARIM VE İMALAT
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Kenan GENEL

Aralık 2019

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ENERJİ ABSORBE EDİCİ METALİK VE KOMPOZİT
ÇARPIŞMA KUTUSUNUN TASARIMI VE İMAL
EDİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

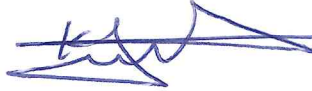
Muhammet Muaz YALÇIN

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

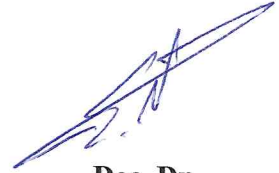
Bu tez 23 / 12 /2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.



Prof. Dr.
İbrahim ÖZSERT
Jüri Başkanı



Prof. Dr.
Kenan GENEL
Üye



Doç. Dr.
Ergün NART
Üye



Doç. Dr.
Mediha İPEK
Üye



Dr. Öğr. Üyesi
Osman Hamdi METE
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

TEŞEKKÜR

Akademik çalışmalarım ve doktora tez sürecindeki çok kıymetli desteklerinden ötürü, hakkını asla ödeyemeyeceğim sayın danışman hocam Prof. Dr. Kenan GENEL'e minnettarlığımı sunarım. Doktora tez izleme komitesinde bulunan kıymetli hocalarım, Doç. Dr. Mediha İPEK ve Dr. Öğr. Üyesi Osman Hamdi METE'ye, tez çalışmamdaki eksik noktaların belirlenmesi ve düzeltilmesi sürecinde göstermiş oldukları destek ve ilgiden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca destek ve yardımlarını her an hissettiğim kıymetli annem ve babama, gözümün nuru, hayat arkadaşım ve sevgili eşime, sıkıntılarımı gülücükleriyle unutturan canım oğluma ve kıymetli kardeşlerime en kalbi teşekkürlerimi sunarım. Bu birlikteliğimizin hüznün, kederin ve tasanın uğramadığı ebedi saadet yurdunda da devam etmesini yüce Rabbim'den niyaz ederim.

Bu çalışma TÜBİTAK Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından desteklenmiştir (Proje No: 115M583).

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER LİSTESİ	iv
TABLolar LİSTESİ	ix
ÖZET..	x
SUMMARY	xi
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
1.1. Literatür İncelemesi	1
BÖLÜM 2.	
DAİRESEL KESİTLİ TÜP YAPILAR	8
2.1. Tüp Yapıların Eksenel Yük Altındaki Deformasyon Davranışı	8
BÖLÜM 3.	
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	14
3.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler	14
3.1.1. Alüminyum tüp (6063-T5)	14
3.1.2. Polivinilklorür (PVC) köpük	16
3.1.3. Elyaf malzemeler	19
3.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması	20
3.2.1. Alüminyum tüp yapıya ait çekme deneyi ve eksenel ezilme deneyleri için numune hazırlanması	20
3.2.2. PVC köpüklerin basma deneyleri için numune hazırlanması	22
3.2.3. Dışarıdan elyaf takviyeli numunelerin hazırlanması	24

3.3. Eksenel Ezme Deney Düzeneği	25
3.4. Çevresel Cidar Ezme İşlemi ve Cihazı	26
3.5. Düşürme Tablası	28

BÖLÜM 4.

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	30
4.1. Alüminyum Tüp Yapıya Ait Çekme Deneyi Sonuçları	30
4.2. PVC Köpük Malzemelere Ait Basma Deney Sonuçları	32
4.3. Cam ve Karbon Elyaf Malzemelerine Ait Çekme Deneyi Sonuçları	33
4.4. Eksenel Ezme Deney Sonuçları	33
4.4.1. Takviyesiz tüp yapılara ait deney sonuçları	33
4.4.2. İçeriden takviyeli tüp yapılara ait deney sonuçları	45
4.4.2.1. Tüp yapı ile köpük etkileşimi	53
4.4.3. Dışarıdan takviyeli yapılara ait deney sonuçları	64
4.4.4. Çevresel cidar ezme işlemi uygulanmış tüp yapılara ait deney sonuçları	68
4.4.5. Çoklu takviye edilmiş tüp yapılara ait deney sonuçları	77
4.4.5.1. İki takviye yönteminin birlikte kullanıldığı numunelerin deney sonuçları	77
4.4.5.2. Üç takviye yönteminin birlikte kullanıldığı numunelerin deney sonuçları	81
4.4.6. Düşürme darbe deney sonuçları	86

BÖLÜM 5.

GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER	88
5.1. Genel Sonuçlar	88
5.2. Öneriler	90

KAYNAKLAR	91
ÖZGEÇMİŞ	97

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. a) Köşeden, b) tam önden rijit bir engele çarpma durumunda; elemanlar: TI) şasi alt kısmı, PS) şasi üst kısmı, PP) ana şasi, CB) ezilme kutusu, TA) tampon [1]	2
Şekil 2.1. Tüp yapının deformasyonu [4].....	9
Şekil 2.2. Tüp yapının deformasyonu [8].....	10
Şekil 2.3. Tüp yapının deformasyonu [10].....	10
Şekil 2.4. Tüp yapının deformasyonu [12].....	11
Şekil 2.5. a) Simetrik, b) elmas (üstten ve önden) katlanma modları [72]	12
Şekil 3.1. Webster portatif sertlik ölçüm cihazı	16
Şekil 3.2. a) 60 kg/m ³ , b) 80 kg/m ³ , ve c) 100 kg/m ³ yoğunluklara sahip PVC köpüklerin x75 büyütmede elde edilen SEM görüntüleri.....	17
Şekil 3.3. Sırasıyla twill dokuma cam ve plain dokuma karbon elyaf kumaşlar	20
Şekil 3.4. a) Çekme numunesini sıkıştırma aparatı, b) alüminyum tüpten çıkarılmış çekme deney numunesi.....	21
Şekil 3.5. Malzeme özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan cihaza ait çene ve ekstansometre ekipmanın yakın görüntüsü (Instron)	21
Şekil 3.6. Alüminyum boruların CNC dik işleme merkezindeki talaş kaldırma işlemi	22
Şekil 3.7. Farklı yoğunluklardaki PVC köpüklere ait basma deney numuneleri	23
Şekil 3.8. PVC köpüklerin basma deneyine ait görüntü	23
Şekil 3.9. İçeriden takviyede kullanılan silindirik ve hlaka köpüklerin CNC dik işleme merkezinde işlenmesi	24
Şekil 3.10. Elyaf kumaştan üretilen kompozit çekme numune örneği	25
Şekil 3.11. a) Cam ve b) karbon elyaf kompozit takviyeli alüminyum tüpler	25
Şekil 3.12. 250 kN kapasiteli bilgisayar kontrollü hidrolik pres	26
Şekil 3.13. Ezme miktarı ve konumu ayarlanabilen çevresel ezme cihazı	27

Şekil 3.14. 58 mm çaplı tüpte çevresel ezme işlem kademesi ve ezme işlemi uygulanmış numune görseli	27
Şekil 3.15. Cidar ezme işlemine ait şematik resim	28
Şekil 3.16. Ağırlık-düşürme darbe test cihazı	29
Şekil 4.1. a) $D= 40$ ($t=1$ mm), b) 58 mm ($t=1,5$ mm) çaplı 6063-T5 boru için elde edilen gerilme-birim şekil değişimi eğrileri.....	31
Şekil 4.2. Farklı yoğunluktaki PVC köpük malzemelerin gerilme-birim şekil değişimi eğrileri ($v=0,2$ mm/s).....	32
Şekil 4.3. Cam ve karbon elyaf kumaş takviyeli kompozit numunelerin çekme eğrileri.....	33
Şekil 4.4. Özdeş üç numuneye ait kuvvet-deplasman eğrileri ($D/t=40/1$ ve $L=80$ mm).....	34
Şekil 4.5. a) Simetrik, b) elmas ve c) karşık modda katlanmış numune görüntüleri..	35
Şekil 4.6. Kuvvet-deplasman grafiği ve bu grafikte karakteristik noktalara karşılık gelen numune deformasyonu	38
Şekil 4.7. a) Katlanma ve plastik mafsall oluşumu, b) kat genişliğinin hesaplanması ($D=40$, $t=1$ mm)	39
Şekil 4.8. Farklı geometrik ölçülerdeki tüplerin katlanma haritası	41
Şekil 4.9. a) 14,5 WH sertliğe sahip parçalanmış numune, b) 12WH sertliğe sahip kalın cidarlı tüpün kat bölgelerinde meydana gelen çatlamlar.....	44
Şekil 4.10. Farklı yoğunluktaki PVC köpüklerle TYT modelde takviye edilen numunelerin kuvvet-deplasman grafiği.....	45
Şekil 4.11. a) 60 kg/m^3 , b) 80 kg/m^3 ve c) 100 kg/m^3 yoğunluğundaki PVC köpüklerle takviye edilmiş numunelerin deney sonrası görünümü.....	46
Şekil 4.12. a) Tek tip yoğunluklu (TYT), b) fonksiyonel dereceli (FYT) ve c) sandviç yapılı takviye (SYT) modellerine ait köpük dizilimleri.....	47
Şekil 4.13. Fonksiyonel derecelendirilmiş (FYT) köpük takviyeli tüplerin kuvvet-deplasman grafiği.	48
Şekil 4.14. a) Aynı tabaka kalınlıkları ve farklı yoğunluk dizilimindeki, b) farklı tabaka kalınlıkları ve aynı yoğunluk dizilimindeki sandviç yapılı köpük takviyeli (SYT) tüplerin kuvvet-deplasman eğrileri	49

Şekil 4.15. “10” numaralı kombinasyona ait (30/40/30) köpüklerin (a) kuvvet-deplasman grafiği	52
Şekil 4.16. Köpüğün deney sırasındaki deformasyon görüntüsü	52
Şekil 4.17. a) Deney sırasında yük altında ve b) yük kaldırıldıktan sonra köpük katman geçişlerindeki şekil değişimi	53
Şekil 4.18. a) TYT ve b) RYDY numunelerin deney öncesi görüntüsü	54
Şekil 4.19. Takviyesiz, sadece düşük ve sadece yüksek yoğunluklu köpük takviyeli tüplere ait kuvvet-deplasman eğrileri	55
Şekil 4.20. Takviyesiz ve TYT numunelerin deney sonrası görüntüsü	56
Şekil 4.21. Düşük yoğunluklu halka ve yüksek yoğunluklu silindirik köpüklerle takviye edilmiş RYDY-D numunelere ait kuvvet deplasman eğrileri	57
Şekil 4.22. Yüksek yoğunluklu halka ve düşük yoğunluklu silindirik köpüklerle takviye edilmiş RYDY-Y numunelere ait kuvvet deplasman eğrileri	58
Şekil 4.23. Tüp cidarıyla köpük arasındaki etkileşimin kuvvet değerlerine etkisi	59
Şekil 4.24. Takviyesiz tüpün, TYT-D/Y ve RYDY-D/Y-2,5 numunelere ait kuvvet-deplasman eğrileri	60
Şekil 4.25. Takviyesiz tüp, TYT-D/Y ve RYDY-D/Y-2,5 numunelerinin a) deplasmana bağlı ortalama kuvvet eğrileri, b) ortalama kuvvetlerin takviyesiz tüpün ortalama eğrisine oranı ve c) bu numunelerin ezilme kuvvet verimi eğrileri (EKV)	62
Şekil 4.26. a) RYDY-D-2,5 ve b) RYDY-Y-2,5 numunelerine ait SEM görüntüleri	64
Şekil 4.27. 2 ve 4 kat cam elyaf takviyeli numunelerin kuvvet-deplasman eğrileri (D/t=58/1,5)	65
Şekil 4.28. Eksenel yük altındaki cam elyaf takviyeli numunenin ara yüzeyinde hasar oluşumu (gerilme beyazlığı-stress whitening)	66
Şekil 4.29. Özdeş iki tüpte dışarıdan yapılan takviyenin katlanma moduna olan etkisi	67
Şekil 4.30. 2 ve 3 kat karbon elyaf sarılmış alüminyum tüplerin kuvvet-deplasman eğrileri	67
Şekil 4.31. 2 ve 3 kat karbon elyaf sarılmış alüminyum tüplerin deney sonrası görüntüleri	68

Şekil 4.32. a) 0,20 mm ve b) 0,30 mm ezme şiddetinde çevresel ezilmiş numunelerin eksenel yük altındaki deformasyon davranışları.....	69
Şekil 4.33. Ezme işlemi uygulanan tüpün cidarında meydana gelen sertlik değişimi	70
Şekil 4.34. Ezme işlemi uygulanmamış ve farklı λ değerlerinde ezme işlemi uygulanmış kısa numunelere ait kuvvet-deplasman eğrileri.....	71
Şekil 4.35. Ezme işlemi uygulanmamış ve farklı λ değerlerinde ezme işlemi uygulanmış kısa numunelerin deformasyon davranışları	72
Şekil 4.36. a) Cidar ezme işlemi uygulanmamış, b) $\lambda=10$ mm ve c) $\lambda=20$ mm numunelerin deney sonrası kesit görüntüleri (D_i ve d_i : deformasyon öncesi, D_f ve d_f : deformasyon sonrası sırasıyla dış ve iç çaplar).....	73
Şekil 4.37. Farklı λ değerlerinde çoklu ezme işlemi uygulanmış numunelere ait kuvvet-deplasman eğrileri.....	74
Şekil 4.38. Ezme işlemi uygulanmamış ve $\lambda=10$ mm olan numunelere ait kuvvet-deplasman eğrileri (b1-b3 etiketleri Şekil 4.40'da verilen katlanma aşamalarını simgelemektedir)	75
Şekil 4.39. a) Cidar ezme işlemi uygulanmamış, b) uygulanmış numunelerin deformasyon aşamaları	76
Şekil 4.40. Kısa elyaf sarılmış numune, takviyesiz tüp ve tetikleme işlemi uygulanmış takviyesiz tüp yapıların görüntüsü (soldan sağa)	78
Şekil 4.41. Kısa elyaf sarılmış tetikleme bulunan ve bulunmayan a) sadece dışarıdan, b) dışarıdan ve içeriden takviyeli numunelerin kuvvet-deplasman eğrileri	80
Şekil 4.42. a) Dışarıdan takviyeli numune tetikleme yok, b) dışarıdan takviyeli numune tetikleme var, dışarıdan ve içeriden takviyeli numune c) tetikleme yok, d) tetikleme var.....	81
Şekil 4.43. Her üç takviyenin birlikte kullanıldığı numunelere ait kuvvet-deplasman eğrileri.....	82
Şekil 4.44. a) 100 mm uzunluğundaki, b) 125 mm uzunluğundaki tüplerden 2 kat karbon elyaf sarılmış çoklu takviyeli numunelerin kuvvet-deplasman eğrileri (PVC köpükler sandviç dizilimine sahiptir)	83

Şekil 4.45. 125 mm uzunluğa sahip çoklu takviye edilmiş numunelerin a) deney öncesi, b) sonrasına ait görüntüleri84

Şekil 4.46 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....86

Şekil 4.47. a) Takviyesiz, b) içeriden en iyi performansı veren sıralı PVC köpük takviyeli, c) dışarıdan cam elyaf takviyeli, d) dışarıdan cam elyaf ve içeriden en iyi performansı veren sıralı PVC köpük takviyeli numunelerin düşürme deney sonundaki görüntüleri Not: Parantez içindeki değerler deney sonrası numunelerin yüksekliğini göstermektedir.87

TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1. 6063 alüminyum alaşımasının kimyasal bileşimi	15
Tablo 3.2. 6063 alaşım serisinin farklı ısı işlemlerine göre mekanik özellikleri [73]	15
Tablo 3.3. Numunelerin geometrik ölçü ve sertlik aralıkları	15
Tablo 3.4. Farklı yoğunluktaki PVC köpüklerin (AIREX C70) bazı mekanik özellikleri [74]	19
Tablo 4.1. Tüp malzemesinin akma dayanımı, sertlik, geometrik büyüklükleri ve katlanma durumu ve F_{ort} , F_{maks} değerleri.	43
Tablo 4.2. TYT, FYT ve SYT köpük takviyesi için katman kalınlıkları ve deney sonucu edilen enerji değerleri	50
Tablo 4.3. TYT ve RYDY numunelerdeki köpüklerin ölçüleri ve takviye durumlarının şematik resimleri	54
Tablo 4.4. Cidar ezme işlemi uygulanmamış, $\lambda=10$ mm ve $\lambda=20$ mm numunelerinin deney öncesi ve sonrasına ait dış ve iç çap değerleri (D_i ve d_i : deformasyon öncesi, D_f ve d_f : deformasyon sonrası sırasıyla dış ve iç çaplar)	73
Tablo 4.5. Ezilme kutusu tasarımları için elde edilen karşılaştırma kombinasyonları.	85

ÖZET

Anahtar kelimeler: ezilme kutusu, alüminyum tüp, cidar ezme, PVC köpük, tüp-köpük etkileşimi

Bu çalışma kapsamında, içeriden ve dışarıdan takviye edilmiş ve çevresel cidar ezme işlemi uygulanmış dairesel alüminyum tüplerin (6063-T5), eksenel yük altındaki deformasyon davranışları ve enerji absorbe etme kabiliyetleri deneysel olarak incelenmiştir. Tüplerin içeriden takviye edilmesinde farklı yoğunluklara sahip kapalı gözenekli PVC köpükler, dışarıdan takviye edilmesinde ise twill dokuma cam ve plain dokuma karbon elyaf kumaşlar kullanılmıştır. Cidar ezme işleminde ise takviye elemanı yerine, tüp cidarı bölgesel olarak deforme edilmiştir.

Yapılan çalışmalarda, öncelikle takviyesiz tüpün eksenel yük altında sergilediği deformasyon davranışı detaylı olarak incelenmiş ve tüp yapının mekanik özelliklerden bağımsız olarak sadece geometrik ölçülere göre farklı katlanma modlarında deformasyona uğradığı anlaşılmıştır. Ayrıca cidar kalınlığındaki artışın absorbe edilen enerji üzerinde çaptaki artışa oranla daha baskın bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. İçeriden takviyede, farklı yoğunluklara sahip PVC köpükler, tüp uzunluğu doğrultusunda farklı dizilim kombinasyonlarında kullanılmışlardır. Sağlanan enerji artışının, köpüğün eksenel direncinden ve tüp cidarı ile köpük arasında meydana gelen etkileşimden kaynaklandığı tespit edilmiş ve bu etkileşimin daha net ortaya konulabilmesi için düşük ve yüksek yoğunluklu köpükler radyal yönde değişen şekilde kullanılmışlardır. Deneyler neticesinde, radyal köpük takviyesinin enerji değerini yaklaşık %48 artırdığı, takviyeli numunelerin SEM görüntüleri incelendiğinde bu enerji artışında köpüğün katlanan tüp cidarları arasında sıkışma durumunun etkili olduğu tespit edilmiştir. Dışarıdan takviye durumunda elyaf türünden bağımsız olarak ilk pik kuvvetin yüksek oranda arttığı, elyafların özellikle tüpün cidar stabilitesine katkı sundukları görülmüştür. Ayrıca karbon elyaf takviyesinin cam elyafa göre daha az gevrek olduğu ve katlanan tüp cidarıyla daha uyumlu hareket ettiği anlaşılmıştır. Çevresel cidar ezme işlemi uygulanan numunelerde, normalde tüpün üst veya alt uçlarına yakın kısımlarda başlayan katlanmanın, tüpün orta kısımlarına yönlendirilebildiği görülmüş ve absorbe edilen enerji değeri %26 artırılmıştır. Herhangi bir takviye elemanı kullanılmadığından bu değer tüpün özgül enerji absorbe etme değerine de eşit olması açısından önemlidir. Herbir takviye yöntemindeki en verimli durumun birlikte kullanılması durumunda ise absorbe edilen enerji değeri takviyesiz tüpe oranla 2,4 kat artarak 4381 J seviyesine ulaşmış, özgül enerji değerinde ise %37 oranında artış elde edilmiştir.

DESIGN AND MANUFACTURING OF ENERGY ABSORBING METALLIC AND COMPOSITE CRASH-BOX

SUMMARY

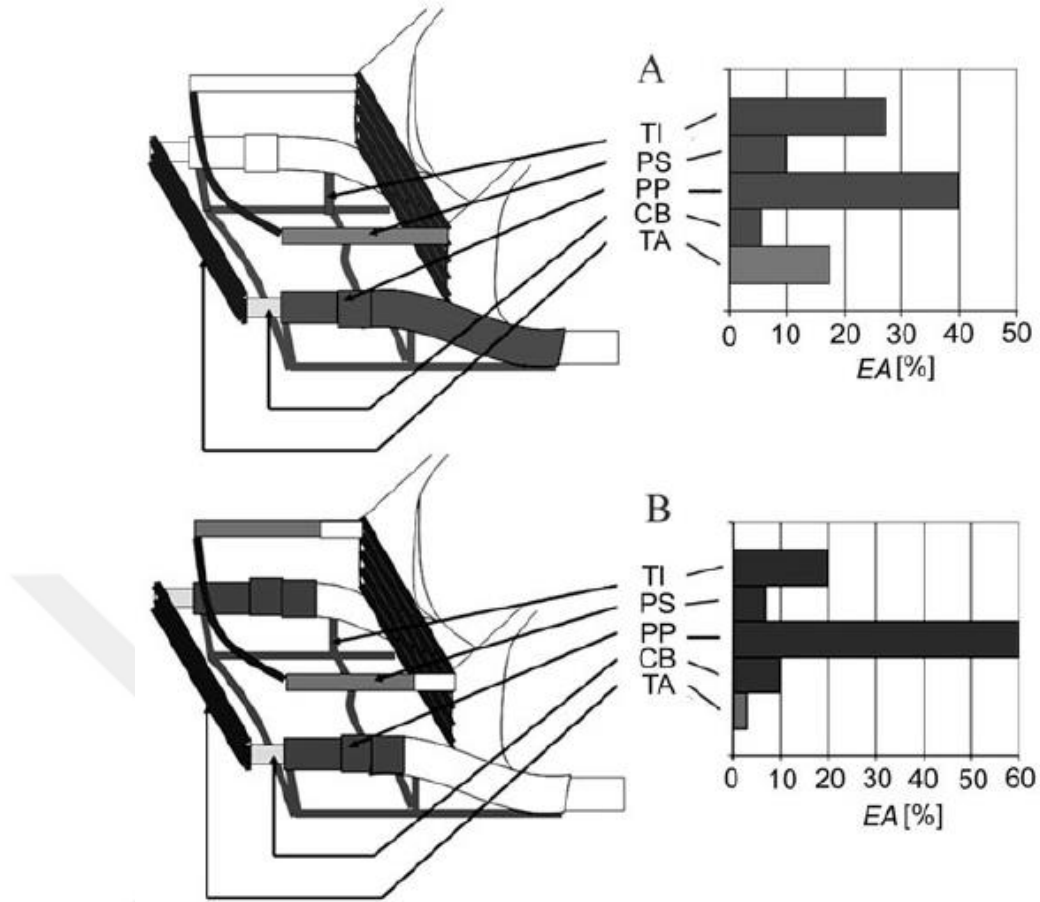
Keywords: crash-box, aluminum tube, annular-rolling, PVC foam, tube-foam interaction, metallic tube

In this study, the deformation behavior and energy absorption capability of the circular aluminum tubes (6063-T5) reinforced internally and externally and annular-rolled were investigated experimentally. PVC foams with different densities were used for inner reinforcements and glass and carbon fiber were used for reinforcing the tubes from the outside. In the annular-rolling process, instead of the reinforcing element, the tube wall is locally deformed. In the experiments, firstly, the deformation behavior of the base tube under axial load was examined in detail and it was found that the tube structure deformed in different folding modes according to the geometrical dimensions, regardless of the mechanical properties. In addition, the increase in wall thickness has a more dominant effect on the absorbed energy than the increase in diameter. In the internal reinforcement, PVC foams having different densities were used in different sequence combinations in the direction of the tube length. It was found that the energy increase is due to the axial resistance of the foam and the interaction between the tube wall and the foam, in order to make this interaction clearer, low and high-density foams are used in varying radial direction. As a result of the experiments, it was found that radial foam reinforcement increased the energy value by approximately 48% and when SEM images of reinforced samples were examined, it was found that the compression of the foam between the folded tube walls was effective in this energy increase. It was found that in the case of external reinforcement, the first peak force is increased independently of the fiber type, and the fibers contribute to the wall stability of the tube, in particular. It was also found that the carbon fiber reinforcement is less brittle than the glass fiber and acts more harmoniously with the folding tube wall. It was seen from the annular-rolled specimens that the folding, which starts normally near the upper or lower ends of the tube, can be directed to the middle parts of the tube and the absorbed energy value has been increased by 26%. Since no reinforcing elements are used, this value is also equal to the specific energy absorption value of the tube. When the most efficient case was used together in each reinforcement method, the absorbed energy value increased by 2,4 times compared to the base tube and reached 4381 J level and the specific energy value increased by 37%.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1. Literatür İncelemesi

Bilindiği gibi trafik kazalarında, sürücü ve yolcuların can güvenliğinin sağlanması amacıyla aktif güvenlik elemanlarının (emniyet kemeri, hava yastığı vb.) yanı sıra araçta oluşabilecek hasarın engellenmesi veya minimize edilebilmesi amacıyla pasif güvenlik elemanlarından (ezilme kutusu, tampon, B-pillar vb.) yararlanılmaktadır. Pasif koruma elemanlarından olan ezilme kutuları, aracın kütlesi ve hızından kaynaklanan çarpışma enerjisini tamamen veya kısmen sönümleyerek, araç ana gövdesinde oluşan hasarın minimize edilmesinde kullanılmaktadırlar. Bu kapsamda, araç güvenliğinin test edildiği standart merkezleri (Euro-Us NCAP gibi) tarafından, farklı çarpışma durumlarında, çarpışma enerjisinin otomobilin hangi aksamında hangi oranda absorbe edileceğine dair detaylı araştırmalara ulaşmak mümkündür. Şekil 1.1.'de önden tam veya köşeden rijit bir engele çarpma durumunda, araçların çarpışmadan etkilenecek aksamaları ve absorbe edecekleri enerji oranları verilmiştir. Şekil incelendiğinde, tam önden çarpışma durumunda ortaya çıkan enerjinin %10'unun iki ezilme kutusu tarafından absorbe edildiği görülmektedir. Bu enerji değeri, ezilme kutusunun kendi cidarı üzerinde katlanarak deforme olmasında harcanmaktadır. Ezilme kutularında genellikle farklı kesitlerdeki ince cidarlı metalik tüp yapılar tercih edilmektedir. Literatürde ince cidarlı metalik yapılarla ilgili yapılmış çok sayıda çalışmaya ulaşmak mümkündür. Bu kapsamda yapılmış çalışmalar genel olarak tüp yapıların deformasyon davranışlarının incelenmesi ve absorbe ettikleri enerji değerlerinin farklı yöntemler kullanılarak artırılması üzerinedir.



Şekil 1.1. a) Köşeden, b) tam önden rijit bir engelle çarpma durumunda; elemanlar: TI) şasi alt kısmı, PS) şasi üst kısmı, PP) ana şasi, CB) ezilme kutusu, TA) tampon [1]

Enerji absorbe edici eleman olarak kullanılan ince cidarlı metalik yapılarla ilgili ilk çalışmalar, 1900'lerin ilk yarısına dayanmakta ve halen güncelliğini korumaktadır. Bu kapsamda tüp yapıların deformasyon davranışlarının ve enerji absorbe etme kabiliyetlerinin teorik, deneysel ve sayısal olarak incelendiği çok sayıda çalışma mevcuttur [1-13]. Tüp yapılarla ilgili ilk çalışma Mallock tarafından yapılmıştır. Mallock [2], eksenel yük uygulanan farklı mekanik özelliklere sahip çelik tüplerin dayanımları ile deformasyon davranışları arasındaki ilişkilerle ve geometrik özellikleri ile katlanma modelleri arasındaki ilişkileri deneysel olarak incelemiştir. Yapılan çalışmada tüplerin geometrik özellikleri ile deformasyon davranışları arasındaki ilişkiden bahsedilmiş, farklı katlanma modelleri ile ilgili ilk numune resimlerine yer verilmiştir. Her ne kadar bu çalışmada, tüplerin genel burkulma davranışları dışındaki tüp farklı katlanma modları simetrik olarak tanımlanmış olsa da, sonraki yıllarda yapılan çalışmalarda genel kabul, katlanma modellerinin simetrik ve elmas olarak

iki farklı terimle ayrıştırılmaları yönündedir. Robertson [3] farklı çeliklerden imal edilmiş tüplere uygulanan farklı ısı işlemlerin, tüp yapıların deformasyon davranışına ve ilk deformasyonu başlatan kuvvet değerine olan etkisini 1927 yılında deneysel olarak incelemiştir. Dairesel kesitli tüplerin eksenel yük altındaki davranışına ilişkin ilk teorik çalışma, 1960 yılında Alexander [4] tarafından yapılmıştır. Alexander, nükleer reaktörlerde dikey konumlandırılmış yakıt kanallarında yüksekte düşerek zemine çarpma durumunda oluşan hasarı incelemiştir. Dairesel metal yakıt kanallarının çarpmanın etkisiyle kendi ekseninde katlanarak deforme olduğunu belirtmiş ve bu katlanmayı simetrik mod olarak isimlendirmiştir. Çalışmada, simetrik modda katlanan tüp yapıların ortalama kuvvet değeri, çap ve cidar kalınlığına bağlı olarak hesaplanmıştır.

Allan [5] eksenel yük altındaki silindirik çelik tüplerin deformasyon davranışlarını deneysel ve teorik olarak incelemiştir. Yapılan çalışmada, tüp yapıların deformasyonu Mallock'un aksine simetrik ve elmas katlanma modu şeklinde ayrı ayrı tanımlanmıştır. Tüp cidarının katlanırken sergilediği yönlenmeyle katlanma modları arasında ilişki kurularak simetrik katlanmanın cidarın ilk tüp ekseninin dışına doğru, elmas katlanmanın ise ilk tüp ekseninin içine doğru hareketi ile ilişkilendirilmiştir. Ayrıca simetrik modda katlanan tüp yapının deformasyon aşamaları ile kuvvet-deplasman grafiği arasında ilişki kurularak, kuvvet değerlerindeki değişimlerin karşılık geldikleri deformasyon durumları belirlenmiştir.

Metalik tüplerin eksenel yük altında simetrik ve elmas katlanma şeklinde iki ana katlanma davranışı sergilediği bilinmektedir [5]. Simetrik katlanmada deformasyon sonrası akordeon benzeri bir görünüm elde edilirken, elmas katlanmada üst üste oturmuş eşkenar üçgenler şeklinde bir görünüm ortaya çıkmaktadır. Bu bağlamda, Pugsley ve Macaulay [6] tarafından elmas katlanma modelinin kapsamlı bir şekilde deneysel ve teorik olarak incelendiği çalışma, elmas katlanma sergileyen tüp yapının kat geometrilerinin tahmin edilebilmesi ve ortalama kuvvet değerlerinin hesaplanabilmesi üzerinde yoğunlaşmaktadır. Ayrıca elmas katlanmanın, üst üste oturan eşkenar üçgenler veya dörtgenler şeklinde iki farklı durumda gerçekleşebileceği

gösterilmiştir. İkinci durumun daha ziyade ince tüplerde görüldüğü belirtilerek, elmas katlanmadaki bu farklılığın çap ve cidar kalınlığı oranıyla ilgili olduğu vurgulanmıştır.

Katlanma modlarındaki bu farklılık, tüp yapının çapı (D), cidar kalınlığı (t) ve uzunluğu (L) ile doğrudan ilişkilidir [5,14,15]. Deformasyon davranışlarının tüp yapının geometrik ölçüleriyle olan ilişkisi Andrews ve ark. [14] tarafından çok geniş çap, cidar kalınlığı ve uzunluk aralığında incelenmiştir. Yapılan çalışmada, L/D ve D/t oranları bağlamında, alüminyum tüplerin deformasyon davranışları ile geometrik ölçüleri arasında ilişki kurulmuştur. Benzer bir çalışma Guillove ve ark. [15] tarafından da yapılmış ve benzer bir ilişki ortaya konulmuştur. Bu araştırmalar ışığında, katlanma modelinin şekillenmesindeki baskın etkinin D/t oranı olduğu söylenebilir.

Wierzbicki ve Abramowicz [16] simetrik katlanma sergileyen silindirik tüpler için absorbe edilen enerji değerini teorik olarak hesaplamışlardır. Bunun yanı sıra kare kesitli tüpler için, ortalama kuvvet değerini veren ve cidar kalınlığının kare tüpün ayrıt uzunluğundan daha baskın olduğunu gösteren bir denklem ortaya koymuşlardır. Bulunan denklemlerle üretilen eğrilerin, önceki deneysel çalışmalarla uyumlu olduğu not edilmiştir.

Tüp yapıların absorbe ettikleri enerji değerlerinin artırılmaya çalışılması, birçok çalışmanın ana hedefini oluşturmaktadır. Bu kapsamda tüpler, içeriden ve/veya dışarıdan takviye edilerek enerji absorbe etme kabiliyetleri incelenmiştir. İçeriden yapılan takviyelerde genellikle metalik [17-32] veya polimer esaslı [33-48] köpükler kullanılmıştır. Köpüklerin takviye elemanı olarak tercih edilmesinin sebepleri, yaklaşık sabit bir yük değerinde yüksek deplasman değerleri sunmaları ve içinde kullanıldıkları tüplere göre çok daha düşük yoğunluğa sahip olmaları şeklinde sıralanabilir. Metalik tüplerde genellikle kapalı gözenekli alüminyum köpükler kullanılırken, polimer esaslı köpüklerde poliüretan (PU) başta olmak üzere polivinilklorür (PVC) ve polistiren (PS) en çok tercih edilen köpük türleridir. Alüminyum köpüklerde yoğunluk aralığının polimer esaslı köpüklere göre çok daha dar olması köpük takviye modellerinde yapılabilecek değişiklikleri de kısıtlamaktadır.

Seitzberg ve ark. [17] alüminyum köpük takviyeli dairesel ve kare kesitli çelik tüplerin deformasyon davranışları ve enerji absorbe etme kabiliyetlerini deneysel ve nümerik olarak incelemişler ve absorbe edilen enerji değerlerinin köpük takviyesiyle arttığını belirtmişlerdir. Artışın, temelde tüp cidarı ile köpük arasındaki etkileşim ve köpüğün aksenal yüke karşı direnciyle ilişkili olduğuna dikkat çekmişlerdir. Takviyesiz tüplerde katlanmanın herhangi bir uçtan başladığı, ancak köpük takviyesiyle birlikte katlanmanın uçlardan daha uzak noktalarda da görülebildiği not edilmiştir. Santosa ve ark. kare kesitli tüplerin alüminyum köpük veya alüminyum bal peteği ile doldurulma durumlarını incelemişler ve takviyeyle sağlanan enerji artışının cidarı kalınlığının artırılmasıyla sağlanandan daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir [18]. Zarei ve Kröger [21] kare kesitli 6060 serisi alüminyum tüplerin aksenal çarpma durumunu deneysel olarak incelemişler ve tüplerin farklı yoğunluktaki alüminyum köpükler kullanılarak takviye edildiği durumu için absorbe ettikleri enerji değerlerini karşılaştırmışlardır. Artan köpük yoğunluğuyla enerji değerinin arttığını, ancak ağırlık başına düşen enerjinin (özellik enerji) belirli bir yoğunluk değerinden sonra boş tüpten daha düşük olduğunu belirtmişlerdir.

Seitzberger ve ark. [28] alüminyum köpükle takviye edilmiş farklı kesitlere sahip tek ve ikili çelik tüplerin enerji absorbe etme kabiliyetlerini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışma kapsamında kare, altıgen ve sekizgen tek ve ikili tüpler kullanılmış, tek tüpler tamamen alüminyum köpükle doldurulurken, ikili tüplerde sadece tüpler arasındaki boşluğa köpük ikame edilmiştir. Yapılan değerlendirmeler neticesinde, en verimli enerjinin kare kesitli tek tüp modelinde elde edildiği rapor edilmiştir. Takviyeli numunelerdeki enerji artışı, bizzat köpüğün aksenal direncine bağlanmakla birlikte, tüp ile köpük arasında da bir etkileşimin varlığına dikkat çekilmiştir. Alüminyum köpük takviyeli kare ve dairesel kesitli alüminyum tüplerin aksenal ezilme davranışları üzerine yapılan diğer çalışmalarda, ortalama kuvvet ve enerji değerlerindeki artış ile köpük yoğunluğu arasındaki ilişkiyi ampirik bir denklemle hesaplanabilir olduğu ortaya konmuştur [29,30,32].

PU köpükler üretim kolaylıkları ve geniş yoğunluk aralıkları nedeniyle tüp yapıların içeriden takviyesinde sıklıkla kullanılmaktadırlar. Lampien ve Jeryan [34] yaptıkları

çalışmada farklı yoğunluklardaki PU takviyesinin, ekstrüde edilmiş dairesel ve kare kesitli borular ile kaynaklı kare kesitli boruların yarı-statik ve dinamik yükleme durumlarına etkisini deneysel olarak incelemişlerdir [34]. Artan köpük yoğunluğu ile absorbe edilen enerji artarken, aktif ezilme uzunluğunun kısaldığı, en verimli köpük takviye modelinin enerji ve ezilme miktarında optimum değeri veren orta yoğunluklu köpükte elde edildiği rapor edilmiştir. Ayrıca absorbe edilen enerji açısından tüpün cidar kalınlığının artırılmasının, köpük ikamesinden daha verimli olduğu tespit edilmiştir. Tüp ile takviye elamanı (köpük) etkileşiminin literatürde ilk defa geçtiği yer olması bakımından, Reddy ve Wall [41] PU takviye edilmiş alüminyum tüplerin, statik ve dinamik yükleme altındaki davranışlarını incelediği çalışma önemli bir yer tutmaktadır. Derin çekmeyle imal edilmiş çok ince (teneke meşrubat kutuları gibi) alüminyum tüpler kullanılmıştır. Tüp cidarı ile PU köpük arasındaki etkileşimin, tüp cidarının stabilitesine katkı sunarak düzensiz elmas mod yerine simetrik modda katlanmasını sağladığı, dolaylı olarak enerji artışını da etkilediği belirtilmiş ve enerjideki artışın sadece köpüğün eksenel direncinden kaynaklanmadığı vurgulanmıştır.

Tüp yapılarda, göz önünde bulundurulmuş bir diğer parametre de enerji verimliliğidir. Özgül enerji absorbe etme kabiliyeti (ÖEA) olarak da isimlendirilen bu durum, absorbe edilen toplam enerjinin tüpün ağırlığına oranı şeklinde tanımlanabilir. Bu kapsamda yapılmış çalışmalarda ÖEA değeri, farklı kesitlerdeki tüp yapıların kullanılması [49,50], cidar kalınlığının artırılması [51-54] veya çoklu tüpler kullanılması [55-57] gibi farklı yaklaşımlarla artırılmaya çalışılmıştır. Nia ve Hamedani [49] yarı-statik yükleme altında farklı kesitlerdeki alüminyum tüplerle yaptıkları araştırmada ÖEA açısından en verimli modelin dairesel kesitte elde edildiğini, köşelere sahip tüplerde ise köşe sayısının azalması ile ÖEA değerinin düştüğünü belirtmişlerdir. Benzer bir çalışma yapan Pirmohammad ve Marzdashti [56] dinamik yük altındaki çelik tüplerde ÖEA açısından en verimli modelin altıgen kesitte elde edildiğini, ÖEA açısından en kötü durumun ise eliptik tüplerde ortaya çıktığını göstermişlerdir. Kare kesitli tüplerdeki ÖEA değerinin, tüp ayırtlarından birinin artırılması ile düştüğü, benzer şekilde dairesel kesitli tüpte elde edilen ÖEA değerinin eliptik tüpten çok daha yüksek olduğu önemli bir bulgu olarak karşımıza çıkmaktadır.

Alavi ve Parsapour [55] yaptığı bir diğer çalışmada çok hücreli ve köşeli (üçgen, kare, altıgen ve sekizgen) alüminyum tüplerin yarı statik yükleme altındaki davranışlarını deneysel ve nümerik olarak incelemişler ve sekizgen çok hücreli tüpün en yüksek ÖEA değerini sunduğunu ifade etmişlerdir. En verimsiz ÖEA durumunun, önceki çalışmalara uygun olarak, boş üçgen tüpte ortaya çıktığı, ancak çok hücreli üçgen tüplerin boş kare tüpe göre daha iyi olduğu tespit edilmiştir. İç içe geçmiş ve birbirleriyle bağlantılı dairesel, üçgen, kare ve altıgen kesitli alüminyum tüplerle yapılan incelemede, en yüksek özgül enerjiyi dairesel tüpün sunduğunu, köşe sayısı arttıkça ÖEA değerinde iyileşmenin ortaya çıktığı vurgulanmıştır [57].

ÖEA değeri, takviye edilmiş tüplerin değerlendirilmesinde önemli bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır [44-46,54,58,59]. Yüksek dayanıma sahip takviye elemanları kullanılarak, tüp yapıların enerji değerlerinin çok yüksek değerlere çıkarılabileceği muhtemeldir, ancak enerjide sağlanan artışın, takviye elemanından kaynaklanan ağırlık artışının gölgesinde kalması, özellikle hafif ve enerji verimliliği yüksek ürün tasarımında tercih edilebilir bir yöntem olmayacaktır. Dolayısıyla takviye elemanı ile ağırlığı artan tüp yapının enerjisindeki artışın, ağırlık artışından daha baskın olması, verimli bir takviye modeli için oldukça önemlidir. Bu kapsamda, takviye elemanlarından kaynaklanan ağırlık artışı minimize edilmek istenmekte ve bu amaçla genellikle düşük yoğunluklu köpükler tercih edilmektedir [58,60]. Baroutaji ve ark. [52] son 40 yıllık süre zarfında ince cidarlı tüplerin ezilme kabiliyetlerinin artırılması hakkında yapılmış çok sayıdaki çalışmayı, kullanılan tüplerin kesiti, imal edildikleri malzeme türü, uygulanan kuvvetin türü ve tekli veya çoklu tüp kullanılması gibi parametrelere göre derlemişlerdir.

BÖLÜM 2. DAİRESEL KESİTLİ TÜP YAPILAR

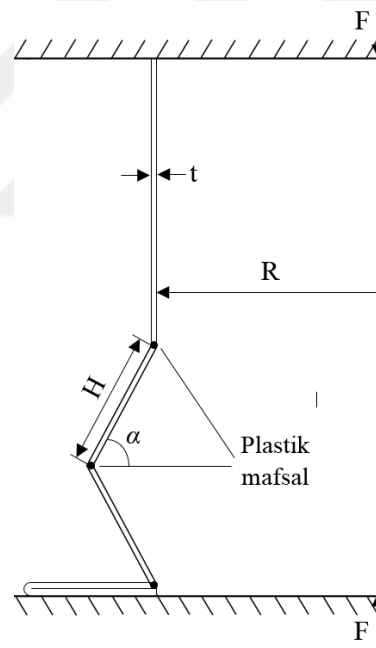
Günümüzde tüp kesitli yapılar, otomotiv sektöründen havacılık sektörüne kadar birçok farklı alanda sıklıkla kullanılmaktadırlar. Tüplerin nispeten iyi enerji absorbe etme verimlilikleri yanı sıra tahmin edilebilir ve tekrarlanabilir deformasyon davranışları, bu alanlarda tercih edilmelerinin önemli nedenleri arasındadır. Özellikle enerji sönümleyici pasif güvenlik elemanları olarak, araçların çeşitli bölgelerinde farklı kesitlere sahip (dairesel, kare vb.) metalik (alüminyum, çelik) tüpler kullanılmaktadır. Dolayısıyla bu yapıların enerji absorbe etme kabiliyetlerinin artırılması, araç güvenliğine ve dolaylı olarak ta sürücü ve yolcu güvenliğine katkı sunacaktır. Bu bağlamda, ikame edilmesi planlanan malzemenin mevcut malzemedan daha yüksek dayanıma sahip olarak tercih edilmesi ve/veya geometrik ölçülerinin değiştirilmesi, absorbe edilen enerjinin artırılması adına başvuru olan yöntemlerdendir. Ancak bu durum gerek maliyet gerekse tasarım açısından çok verimli olmamaktadır. Literatür incelendiğinde tüp yapıların enerji değerlerini artırmaya yönelik çok sayıda teorik, deneysel ve nümerik çalışmayla karşılaşmak mümkündür. Enerji artışının sağlanabilmesi amacıyla tüplerin farklı takviye elemanları ile (içeriden ve/veya dışarıdan) güçlendirilmesinin güncel bir durum olduğu, son yıllarda bu kapsamda yapılan çalışmaların yoğunluğundan da anlaşılmaktadır.

2.1. Tüp Yapıların Eksenel Yük Altındaki Deformasyon Davranışı

Daha önce yapılmış çalışmaları, kuvvetin tüp eksenine dik [61,62] veya belirli bir açıyla [63-66] uygulandığı, deformasyon hızının düşük [55,56] veya yüksek [67-71] olması durumlarına göre gruplandırmak mümkündür. Tüp yapılarla ilgili yapılan ilk çalışmalar, tüp yapıların gündelik hayatta karşılaşılan deformasyonlarının teorik olarak incelenmesi üzerinedir. Araştırmacılar, tüplerin düşme, çarpışma gibi eksenel yüklere maruz kalmaları durumundaki deformasyon davranışları incelemiş ve bazı

matematiksel yaklaşımlar geliştirmişlerdir. Bu kapsamda, tüplerin farklı katlanma modunda deforme olma durumları araştırmacılar tarafından teorik olarak incelenmiş ve deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır [4,6,8-10].

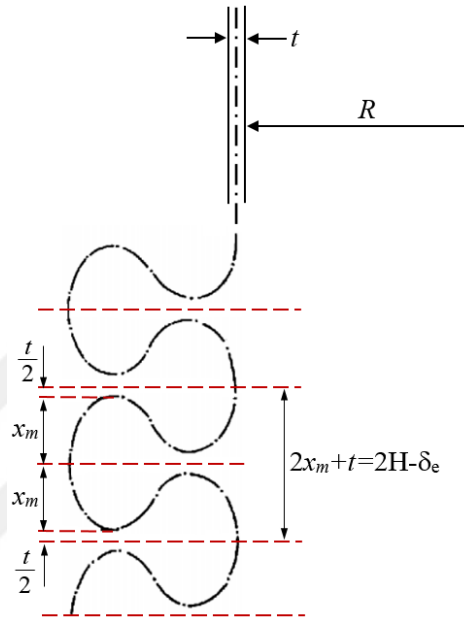
Alexander [4] yaptığı çalışmada, eksenel yük altındaki tüpün simetrik katlanması durumunu incelemiş ve bir tam simetrik katın, eşit uzunluktaki iki parçadan meydana geldiğini, kat oluşumunun ise bu iki parçanın bir mafsal etrafında hareket ederek birbiri üzerine oturmasıyla tamamlandığını göstermiştir (Şekil 2.1.). Bu çalışma kapsamında kat uzunluğun hesaplanmasında $2H = 2,426\sqrt{Dt}$ şeklinde bir denklem önerilmiştir. Burada $2H$, D ve t terimleri sırasıyla, kat uzunluğu, ortalama çap ve cidar kalınlığı şeklinde tanımlanmıştır. Ayrıca ortalama kuvvet değeri için $F_{ort} = K\sigma_{ak}t^{1,5}\sqrt{D}$ şeklinde (K çarpanı) bir denklem geliştirilmiştir.



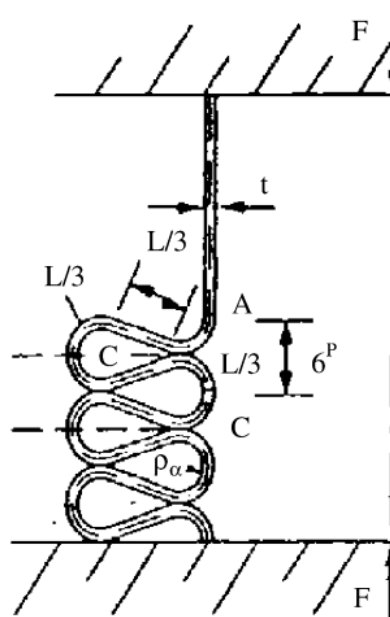
Şekil 2.1. Tüp yapının deformasyonu [4].

Eksenel dinamik yüke maruz tüpler Abramowicz ve Jones [8] tarafından teorik olarak incelenmiş ve ortalama kuvvet değeri için bir denklem önerilmiş ve Alexander [4] tarafından yapılan çalışmadan farklı olarak, katlanma esnasında cidarın durumunu deneysel duruma benzer (büküm bölgeleri daha belirgin) şekilde çizilmiştir. Şekil 2.2.'de verilen şematik gösterimde bir tam katın, eşit uzunluktaki iki parçadan

meydana geldiği görülmektedir. Grzebieta [10] bir tam simetrik katın üç eşit parçadan meydana geldiği kabulü üzerine Abramowicz ve Jones [8] tarafından önerilen deformasyon davranışını revize etmişlerdir (Şekil 2.3.). Ortaya konulan yeni yaklaşım üzerinden ortalama kuvvet ve ortalama kat uzunluğunu veren birer denklem önermişlerdir.

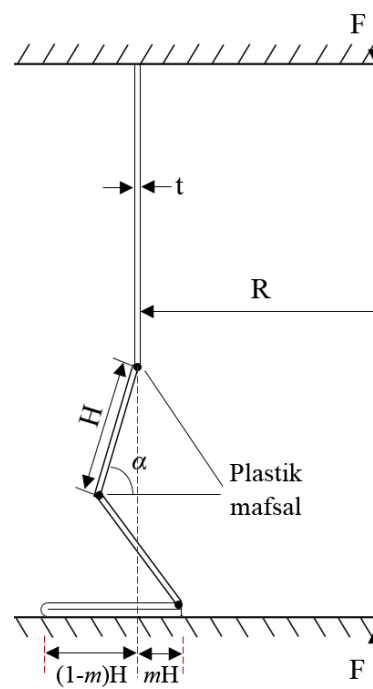


Şekil 2.2. Tüp yapının deformasyonu [8].



Şekil 2.3. Tüp yapının deformasyonu [10]

Yukarıda t p yapının katlanma davranışına ilişkin verilen şematik gösterimler incelendiğinde, t p cidarının ortalama eksenin (deformasyon öncesi ortalama t p çapı) tamamen dışına doğru yönlendiği şeklinde bir kabulün olduğu görülmektedir. Ancak deneysel veriler, t p cidarının ortalama eksenin hem içine, hem de dışına doğru yönlendiğini ortaya koymaktadır. Bu kapsamda ilk defa Wierzbicki ve ark. [11] tarafından 1992 yılında yapılan analitik çalışmada t p cidarındaki yönlenme, deneysel verilerle uyumlu olacak şekilde ele alınmış ve şematik olarak gösterilen H uzunluğunun yarısının orijinal eksenin içine, yarısının ise dışına yönlendiği kabul edilmiştir. Buna göre, Alexander tarafından önerilen deformasyon modeli geliştirilmiş ve t p cidarındaki i e ve dışa y nlenmelere göre yeniden bir ortalama kuvvet hesabı yapılmıştır. Daha sonra Singace ve ark. [12,13] Wierzbicki tarafından ileri sunulan yönlenme oranlarını deneysel verilerle karşılaştırmış, i e ve dışa yönlenme oranlarını deneysel verilere göre güncellemişlerdir. Bu kapsamda “ m ” eksantriklik katsayısı önerilmiş, i e ve dışa y nlenmelerin ortalama kat uzunluğuna oranı bu katsayıyla verilmiştir (şekil 2.4.). Simetrik katlanmada i e ve dışa yönlenme oranı kat uzunluğunun sırasıyla %35 ve %65’ine karşılık geldiği ve bunun deney sonuçlarıyla oldukça tutarlı olduğu tespit edilmiştir.



şekil 2.4. T p yapının deformasyonu [12].

Eksenel yük altındaki dairesel tüp yapıdaki deformasyon, simetrik ve elmas olmak üzere iki farklı katlanma modunda gerçekleşmekle birlikte, bazı durumlarda, bu iki modun birlikte görüldüğü karışık katlanma durumu da ortaya çıkabilmektedir. Şekil 2.5.'te simetrik ve elmas katlanma modlarına ait numune görüntüleri verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 2.5. a) Simetrik, b) elmas (üstten ve önden) katlanma modları [72]

Farklı çap (D), cidar kalınlığı (t) ve uzunluk (L) değerlerine sahip tüplerle yapılan deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen deformasyon haritaları, geometrik ölçülerin, katlanma modu için temel etken olduğunu ortaya koymaktadır [7,15]. Andrews ve ark. [7] çok geniş ölçü aralığındaki tüplerle (L/D oranı 0,174-8,754, t/D oranları ise 0,0165-0,25) yaptıkları çalışmada, tüplerin deformasyon davranışları ile geometrik ölçüleri arasında ilişkiyi gösteren bir harita oluşturmuşlardır. Bu çalışmalar

ışığında, katlanma modu için baskın etkinin D/t oranı olduğu söylenebilir. D/t oranının düşük değerlerinde ($D/t < 60$), simetrik katlanma oluşurken, daha yüksek oranlarda katlanmanın elmas modda gerçekleştiği görülmüştür. L/D oranının çok yüksek olduğu ($L/D > 5$) durumlarda katlanmadan burkulma (Euler tipi deformasyon) görülürken, bu oranın altında ($2 < L/D < 5$) genellikle simetrik başlayıp sonrasında elmas katlanmaya dönüşen karışık katlanma (mixed-mode) görülmektedir. Uzunluğun, tüp çapının iki katından düşük olduğu durumlarda ise (D/t 'ye bağlı olmakla birlikte) simetrik katlanma gerçekleşmektedir. Ayrıca kuvvetin açılı uygulanması (heterojen yük dağılımı) katlanma modunu etkileyen bir diğer parametredir. Simetrik katlanma sergilemesi beklenen bir tüp yapı, kuvvetin açılı şekilde uygulanması veya kuvvetin tüm tüp kesitine homojen dağılmaması durumunda da elmas modda katlanma oluşmaktadır.

Bölüm 1 ve 2'de yapılan incelemeler neticesinde tez açılışmasının kurgusunu belirleyen önemli tespitler şu şekilde özetlenebilir;

- Dairesel kesitli tüp yapının cidarında aksel yük altında, kabaca %65 dışarıya, %35 içeriye yönelme söz konusudur.
- Katlanma modu, yeterince sünek metal tüpler kullanılmak kaydıyla tüp ebatlarına bağlı olarak gelişmektedir.
- Tüpün katlanma davranışını geciktirici etki yapan takviye amaçlı yapılacak ilavelerin, parça ağırlığını aşırı artırmaması tercih edilen bir durumdur. Bu amaçla genelde gözenekli malzemelerin tüpün içeriden takviyesinde kullanıldığı dikkat çekmektedir.
- Cidarda talaş kaldırma yoluyla verilecek şekillendirme işlemleri için kalın cidarlı tüplerin seçilme zorunluluğu söz konusudur.
- Dışarıdan elyaf takviyeli kompozit kullanımına dair çoğu çalışmada kompozitin kırılma doğası gereği metal tüpün daha çok cidar stabilitesine katkı sunduğu anlaşılmaktadır.

BÖLÜM 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Tez kapsamında, dairesel tüpün eksenel yük altındaki davranışının detaylı bir şekilde incelenmesi ve elde edilen bilgiler ışığında ÖEA kabiliyetini artıracak şekilde takviye şekli ve Malzeme özelliklerine karar verilmiş (içeriden PVC köpük, dışarıdan cam ve karbon elyaf) ve hem takviyeli hem de takviye yapılmadan (yüzeyde kontrollü olarak çevresel cidar ezme işlemi uygulayarak) gerçekleştirilebilecek iyileştirmeler sistematik olarak ele alınmıştır.

Bu bölümde deneysel çalışmalar hakkında genel bilgi verilmiş, bu kapsamda deneylerde kullanılan malzemeler, deney numunelerinin hazırlanması ve deney düzeneklerine değinilmiştir.

3.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler

3.1.1. Alüminyum tüp (6063-T5)

Deneylerde yüksek korozyon direncine sahip, makine imalatında sıklıkla tercih edilen 6063 serisi alüminyum alaşım borular kullanılmıştır. Alüminyum alaşım borular, T6 ısıtıl işlem durumuna göre nispeten daha iyi soğuk şekillendirilebilme kabiliyeti sunması sebebiyle T5 ısıtıl işlem uygulanmış haliyle tercih edilmiştir. 6063 serisi alüminyum malzemenin kimyasal bileşim oranı Tablo 3.1.'de verilmiştir. Ayrıca aynı alaşımın farklı ısıtıl işlemlere karşılık gelen genel mekanik özellikleri Tablo 3.2.'de verilmiştir. Tablodaki veriler ışığında ısıtıl işlemle birlikte malzemenin dayanımında ve sertliğinde artış sağlandığı, buna mukabil sünekliğinde düşüşün söz konusu olduğu görülmektedir.

Tablo 3.1. 6063 alüminyum alaşımasının kimyasal bileşimi

Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Diğer	Al
0,35	0,2-0,6	0,1	0,1	0,45-0,9	0,1	0,1	0,15	Kalan

Tablo 3.2. 6063 alaşım serisinin farklı ısıtım işlem durumuna göre mekanik özellikleri [73]

Isıl işlem durumu	Akma dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (HB)
0	50	100	26	25
T1	90	150	24	45
T4	90	160	21	50
T5	110-175	150-215	15	60
T6	170-210	205-245	12	75

Deneyisel çalışmada, tüp yapıların eksenel yük altında sergiledikleri deformasyon davranışları ile mekanik ve geometrik özellikleri arasındaki ilişkinin daha net ortaya konulabilmesi amacıyla farklı dayanım değerlerinde ve geometrik ölçülerdeki tüplerle çok sayıda deney yapılması planlanmıştır. Bu deneylerde tüplerin farklı akma dayanımına, sertliğe ve geometrik ölçülere (çap, cidar kalınlığı ve uzunluk) sahip olmasına özellikle dikkat edilmiştir. Bu kapsamda kullanılan tüplerin büyük bir kısmı, temin edildikleri ölçülerde kullanılmıştır. Bazı ara ölçüler için ise tüplerin gerek çapları gerekse cidar kalınlıkları talaş kaldırılarak işlenmiştir. Aşağıda verilen Tablo 3.3.'te, tez çalışması kapsamında yapılması planlanan tüm deneylerde kullanılacak 6063-T5 alüminyum tüplere ait geometrik ölçüler ve sertlik aralığı verilmiştir.

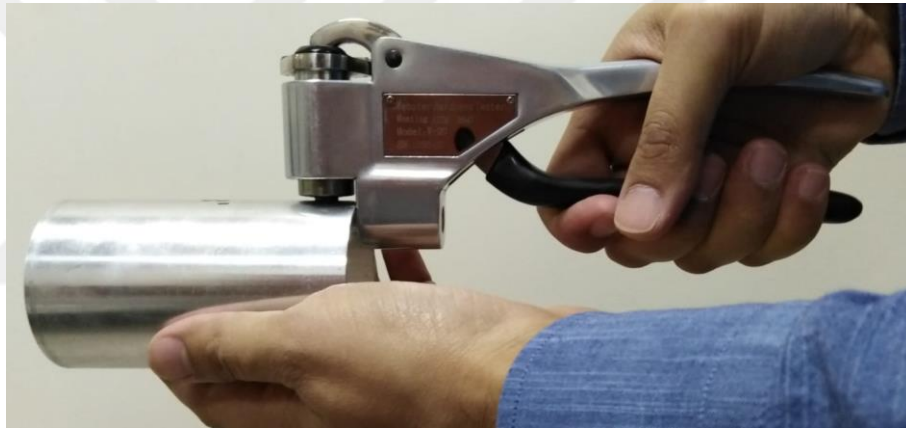
Tablo 3.3. Numunelerin geometrik ölçü ve sertlik aralıkları

	Çap (mm)	Cidar kalınlığı (mm)	Sertlik (HW)
Minimum	24	1	9,5
Maksimum	60	2,5	14,5

Deneyisel çalışmanın ana bölümünde farklı ölçülere sahip iki grup 6063-T5 alüminyum tüp kullanılmıştır. İlk grup numuneler, 40 mm çapa, 1 mm cidar kalınlığına ve 80 mm uzunluğa sahiptir. İkinci grup numuneler ise 58-58,5 mm çapa, 1,1 ve 1,5 mm cidar kalınlığına sahiptir. İkinci grup numunelerde takviye durumuna göre farklı uzunluklar

kullanılmıştır. İlk grup numuneler ($D=40$ mm), eksenel yük altındaki tüpün kuvvet-deplasman eğrisi ile deformasyon aşamalarının detaylı bir şekilde incelenmesinde kullanılmıştır. Bunun yanı sıra bir öngörü sunması açısından da farklı takviye durumlarında bu grup numunelerden faydalanılmıştır. İkinci grup numuneler ise çalışmanın en önemli kısmını oluşturan (takviye durumu ve cidar ezme) deneylerde kullanılmıştır.

Deneylerde kullanılan tüplerin sertlik değerleri sağlıklı verilerin elde edilebilmesi açısından (deformasyon esnasında çatlama oluşmaması açısından) önemlidir. Bu açıdan ana deneylerde kullanılan her iki gruba ait numunelerin sertlikleri, Şekil 3.1.'de verilen Webster marka portatif sertlik ölçüm cihazı kullanılarak tek tek ölçülmüştür.



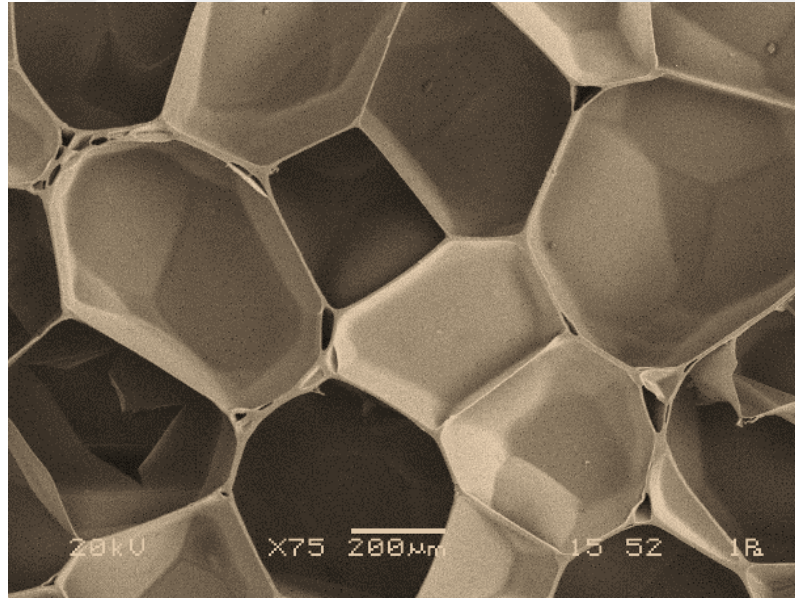
Şekil 3.1. Webster portatif sertlik ölçüm cihazı

3.1.2. Polivinilklorür (PVC) köpük

Tüp yapıların içeriden takviye edilmesinde, kapalı gözenekli ve çapraz bağlı polimerlerden PVC köpük tercih edilmiştir. Düşük ağırlıklarına oranla sağladıkları yüksek dayanım ve tokluk, enerji absorbe etme verimliliği, iyi darbe ve yorulma direnci ile kimyasal kararlılık PVC köpük türlerinin genel özellikleri arasında yer almaktadır. Bu özellikleri nedeniyle denizcilik ve otomotiv sanayisi başta olmak üzere rüzgar türbin imalatı, raylı taşımacılık, uzay endüstrisi ve bazı spor araç ve gereçlerinin yapımında sıklıkla tercih edilmektedir. Deneysel çalışmalarda farklı mekanik özelliklere sahip olan PVC köpük türleri arasından, nispeten daha yüksek enerji

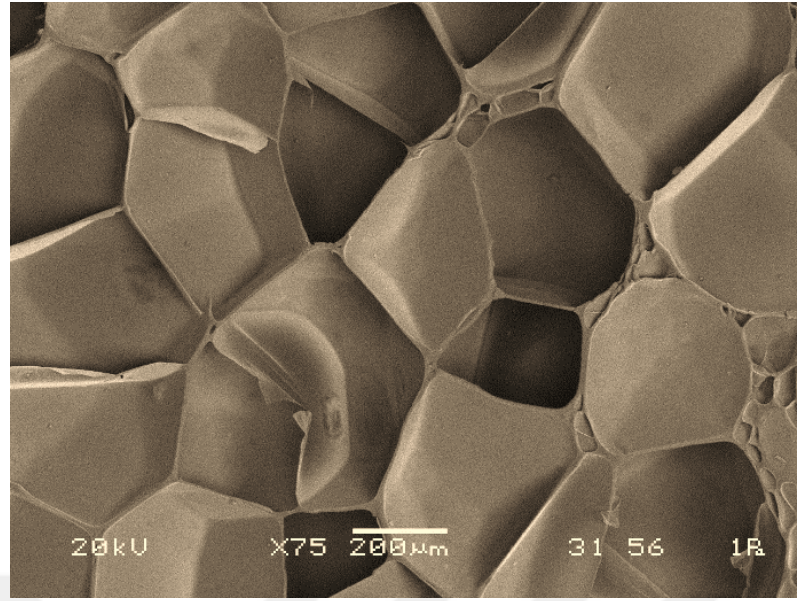
absorbe etme kabiliyetine sahip olan ve AIREX firması tarafından C70 ticari kodu ile satışa sunulan PVC köpük türü tercih edilmiştir. Köpük takviye durumunun absorbe edilen enerji değerlerine olan etkisinin daha net ortaya konulabilmesi amacıyla farklı köpük yoğunlukları tercih edilmiştir.

Kapalı gözenekli PVC köpüklerin, yoğunluğu ile hücre büyüklüğü arasındaki ilişkinin daha belirgin şekilde ortaya konulabilmesi için köpük yapıların mikro yapıları taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak görüntülenmiştir. Köpük numunelerin SEM için hazırlanmasında, özel kesici bıçak kullanılarak hücre duvarlarında deformasyon olmasının önüne geçilmiş, görüntü alınacak yüzeyler özel bir bileşime sahip altın-paladyum ile kaplanarak görüntüleme işlemine hazır hale getirilmiştir. Şekil 3.2.'de düşük, orta ve yüksek yoğunluklu köpüklere ait, X75 büyütmede elde edilen SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntülerden PVC köpüklerin ortalama hücre büyüklükleri, düşük yoğunluk için 560 μm , orta yoğunluk için 440 μm ve yüksek yoğunluk için 320 μm olarak hesaplanmıştır. Ayrıca bu köpüklere ait bazı mekanik özelliklerde (üretici firmanın sağladığı ürün bilgi formlarından elde edilen) Tablo 3.4.'te verilmiştir.

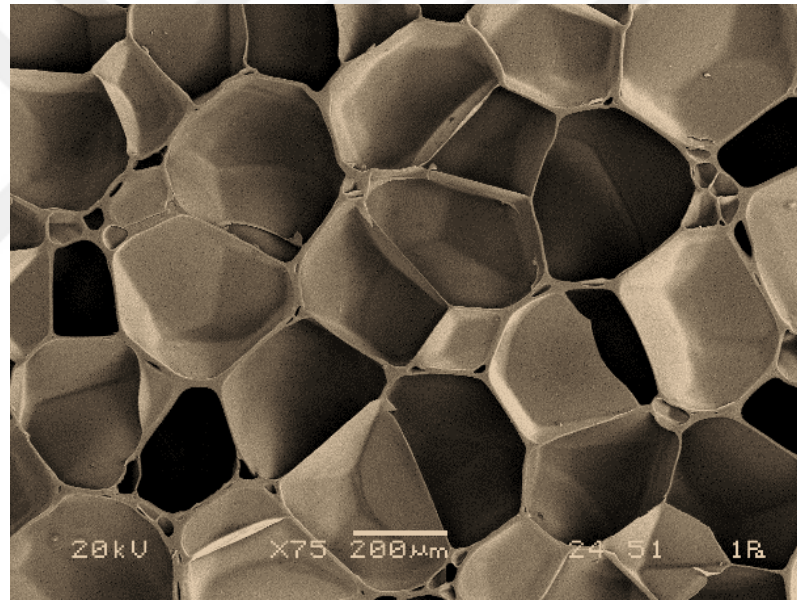


(a)

Şekil 3.2. a) 60 kg/m^3 , b) 80 kg/m^3 , ve c) 100 kg/m^3 yoğunluklara sahip PVC köpüklerin x75 büyütmede elde edilen SEM görüntüleri



(b)



(c)

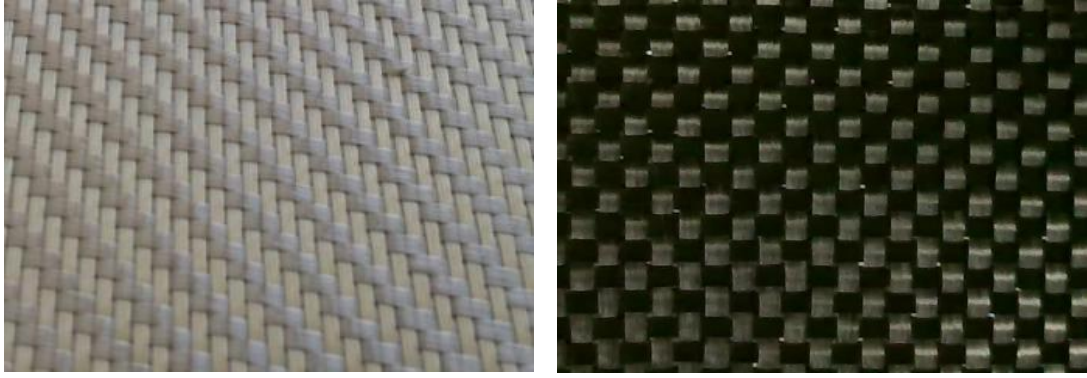
Şekil 3.2. (Devamı)

Tablo 3.4. Farklı yoğunluktaki PVC köpüklerin (AIREX C70) bazı mekanik özellikleri [74]

Özellikler			C70.55	C70.75	C70.90
Yoğunluk (kg/m ³)	ISO 845	Ortalama	60	80	100
		Hesaplanan	54-69	72-92	90-115
Basma dayanımı (N/m ²)	ISO 844	Ortalama	0,90	1,45	2,0
		Minimum	0,75	1,10	1,7
Basma modülü (N/m ²)	DIN 53421	Ortalama	69	104	130
		Minimum	55	80	110
Çekme dayanımı (N/m ²)	ISO 527 1-2	Ortalama	1,3	2,0	2,7
		Minimum	1,0	1,6	2,2
Çekme modülü (N/m ²)	ISO 527 1-2	Ortalama	45	66	84
		Minimum	35	50	65
Kayma dayanımı (N/m ²)	ISO 1922	Ortalama	0,85	1,2	1,7
		Minimum	0,70	1,0	1,4
Kayma modülü (N/m ²)	ASTM C393	Ortalama	22	30	40
		Minimum	18	24	34
Kayma uzaması (%)	ISO 1922	Ortalama	16	18	23
		Minimum	10	10	12
Isı iletim katsayısı (W/m.K)	ISO 8301	Ortalama	0,031	0,033	0,035

3.1.3. Elyaf malzemeler

Tüp yapıların dışarıdan takviyesinde kullanılmak üzere, cam ve karbon olmak üzere iki farklı tip elyaf kullanılmıştır. Elyaf türlerinden cam olanı twill dokuma, karbon olan ise plain dokuma olarak Dost Kimya firmasından temin edilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan cam ve karbon elyafların (Şekil 3.3.) yoğunlukları sırasıyla 280 gr/m² ve 200 gr/m² değerlerinde olmakla birlikte kalınlıklar yaklaşık olarak aynıdır.



Şekil 3.3. Sırasıyla twill dokuma cam ve plain dokuma karbon elyaf kumaşlar

3.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması

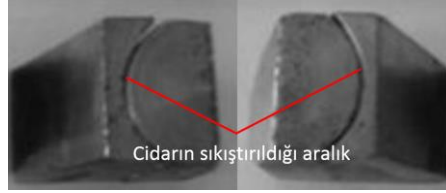
Bu bölümde, yukarıda tanıtılan malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılması planlanan deneyler için numune hazırlanma süreci anlatılmıştır. Ayrıca deneysel çalışmalarda kullanılan, deney düzenekleri ile ilgili de ayrıntılı bilgi verilmiştir.

3.2.1. Alüminyum tüp yapıya ait çekme deneyi ve aksenal ezilme deneyleri için numune hazırlanması

Deneylerde kullanılacak alüminyum tüpler ile dışarıdan yapılması planlanan takviye işleminde kullanılacak cam ve karbon elyaf malzemeler mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla çekme deneyine tabi tutulmuştur. Çekme deneylerinde Instron marka 30 kN kapasiteli, servo-motor kontrollü cihaz kullanılmış olup, deney hızları standartlara uygun olarak, metal malzemeler için 0,1 mm/s ve elyaf malzemeler için 0,5 mm/s ve köpükler için ise 0,2 mm/s olarak belirlenmiştir.

40 ve 58 mm çapa sahip tüpler, 25 mm'den büyük çaplara sahip tüplerin çekme deneyleri için belirlenen ASTM-E8/E8M-09 standartları uyarınca (boru uzunluğu doğrultusunda) çekme numunesi çıkarılmıştır. Deney esnasında numune üzerinde gerçekleşen uzamanın hassas bir şekilde izlenebilmesi için numune üzerinde özel bir kalem kullanılarak düşey doğrultuda iki nokta işaretlenmiş ve bu noktalar arasındaki düşey mesafe değişimi video-ekstansometre ile izlenmiştir. Çekme numunesinin oval

kesitlerine uygun sıkıştırma aparatları kullanılarak, numunenin çekme cihazının çeneleri arasından sıyrılması engellenmiştir. Şekil 3.4.'te numunenin tutulmasında kullanılan aparatlar ve çekme numunesinin deney öncesi resmi verilmiştir. Ayrıca Şekil 3.5.'te çekme cihazı ve numunenin cihaza bağlandığı duruma ait görüntü verilmiştir.

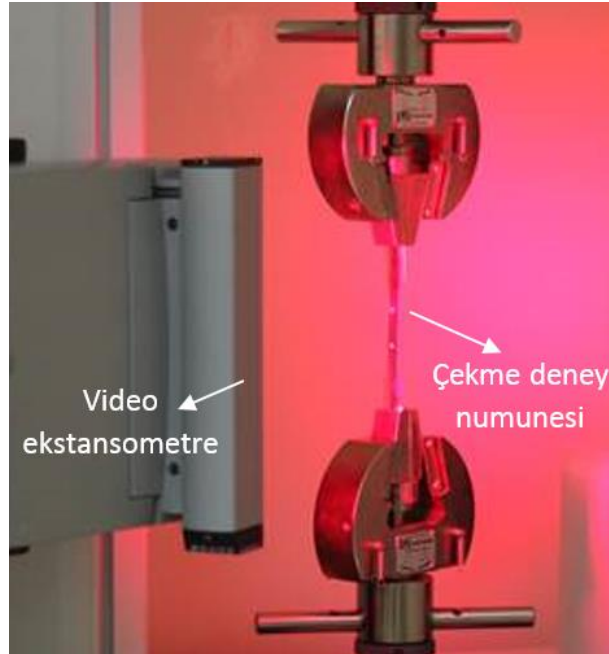


(a)



(b)

Şekil 3.4. a) Çekme numunesini sıkıştırma aparatı, b) alüminyum tüpten çıkarılmış çekme deney numunesi



Şekil 3.5. Malzeme özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan cihaza ait çene ve ekstansometre ekipmanın yakın görüntüsü (Instron)

Piyasadan temin edilen alüminyum boruların cidar kalınlıklarında ekstrüzyonla üretilmiş olmalarına rağmen bir miktar farklılıklar gözlenmektedir. Deneysel çalışmaların sağlıklı ve tekrarlanabilir olabilmesi için bu boruların CNC dik işleme merkezinde içinden ve dışından talaş kaldırılarak, homojen cidar kalınlığına sahip olmaları sağlanmıştır. Özellikle tez çalışmasının ana deneylerinin yapıldığı tüm tüpler bu yöntemle imal edilmiştir. Ayrıca uygulanan kuvvetin tüm tüp kesitinden homojen dağılması için, alt ve üst tüp yüzeylerinin tornalanmak suretiyle paralel olması sağlanmıştır. Şekil 3.6.'da CNC dik işlemede alüminyum borunun içinden ve dışından talaş kaldırma sürecine ait görüntü verilmiştir.

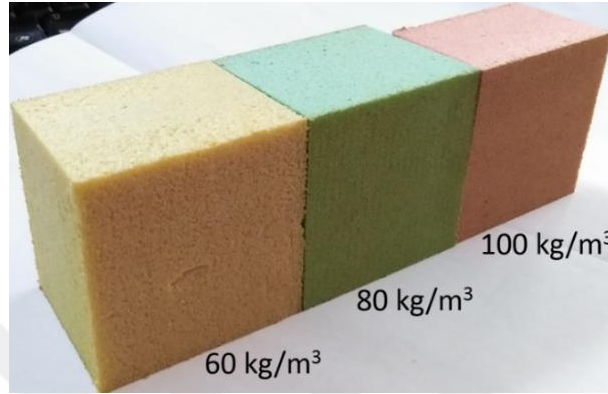


Şekil 3.6. Alüminyum boruların CNC dik işleme merkezindeki talaş kaldırma işlemi

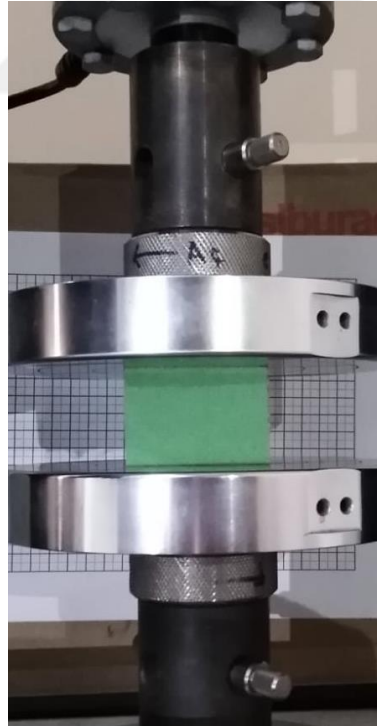
3.2.2. PVC köpüklerin basma deneyleri için numune hazırlanması

PVC köpükler, mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla basma deneyine tabi tutulmuşlardır. Deneyler çekme deneylerinin yapıldığı Instron marka cihazda, 0,2 mm/s hızda gerçekleştirilmiştir. Basma deney numuneleri, PVC köpük plakalardan ekstrüzyon yönü doğrultusunda ve standartlara uygun olarak kare kesitli olacak şekilde çıkarılmıştır. Daha hassas sonuçlar için basma deney numuneleri ve içeriden takviyede kullanılan silindirik ve halka şeklindeki köpükler CNC dik işleme merkezinde işlenmiş, bu sayede olası geometrik düzgünsüzlüklerin önüne geçilmiştir. Farklı

yoğunluklara sahip PVC köpüklerden imal edilen basma deney numunelerinin, deney öncesi görüntüleri Şekil 3.7.'de, deney esnasındaki görüntüleri ise Şekil 3.8.'de verilmiştir. Tüplerin içeriden takviye edilmesinde kullanılan silindirik ve halka köpüklerin CNC dik işleme merkezindeki üretimine ait görüntüler Şekil 3.9.'da verilmiştir.



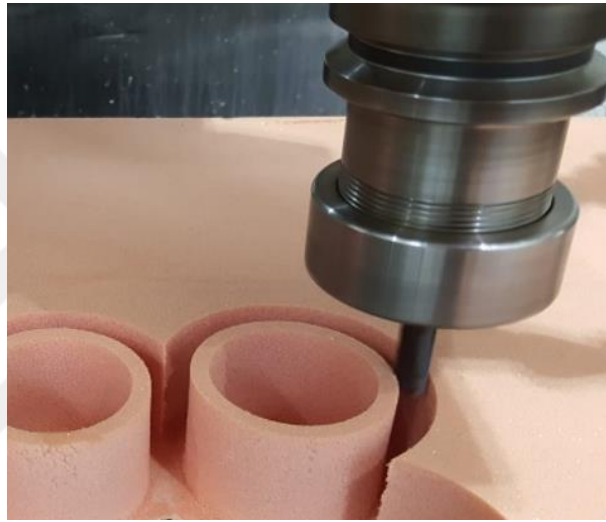
Şekil 3.7. Farklı yoğunluklardaki PVC köpüklere ait basma deney numuneleri



Şekil 3.8. PVC köpüklerin basma deneyine ait görüntü



(a)



(b)

Şekil 3.9. İçeriden takviyede kullanılan silindirik ve hırla köpüklerin CNC dik işleme merkezinde işlenmesi

3.2.3. Dışarıdan elyaf takviyeli numunelerin hazırlanması

Dışarıdan takviye edilecek tüpler, ağırlıkça 100/40 epoksi ve sertleştirici oranına göre hazırlanan karışım kullanılarak ıslatılan elyafı (elyaf ıslanma problemi yaşanmayacak şekilde) sarılmıştır. Tüplerin sarılmasında kullanılan cam ve karbon elyaflardan elde edilen kompozit yapının mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla çekme numuneleri üretilmiş ve çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.10.'da cam elyaf kompozit çekme numunesine ait, deney öncesi görüntüsü verilmiştir. Gerek çekme numunelerinde gerekse tüplerin sarılmasında kullanılan elyaf kompozitler, yüksek verimlilik için oda sıcaklığında en az 24 saat kürlenmeye bırakılmıştır.



Şekil 3.10. Elyaf kumaştan üretilen kompozit çekme numune örneği

Alüminyum tüplerin dışarıdan sarılmasında kullanılan elyaf uzunlukları, sarım sayısına bağlı olarak tüp çapına göre hesaplanmıştır. Elyaf genişlikleriyse, 100 mm olan tüp uzunluğundan bir miktar fazla tutulmuştur. Elyafların ıslatılmasında kullanılan karışımın miktarı, elyaf katman sayısına bağlı olarak kontrol edilmiş ve numuneler arasında farklılık oluşmamasına özen gösterilmiştir. Tüplerin sarılmasına başlamadan önce elyaf üzerindeki fazla epoksi uzaklaştırılarak oluşması muhtemel ekstra gevrekliğin önüne geçilmiştir. Kürleme işlemi sonrası, tüp uzunluğundan fazla olan kompozit, yüksek devirli dairesel testereyle, kompozit yapıya zarar vermeyecek düşük hızda kesilerek (ihtiyaç duyulması halinde de zımparalanarak) tüple aynı uzunluğa getirilmiştir. Bu sayede, tüp ve elyafın eksenel yüke aynı anda maruz kalması sağlanmıştır. Dışarıdan cam ve karbon elyaf takviye edilmiş numunelerin nihai görünümü Şekil 3.11.'de verilmiştir.

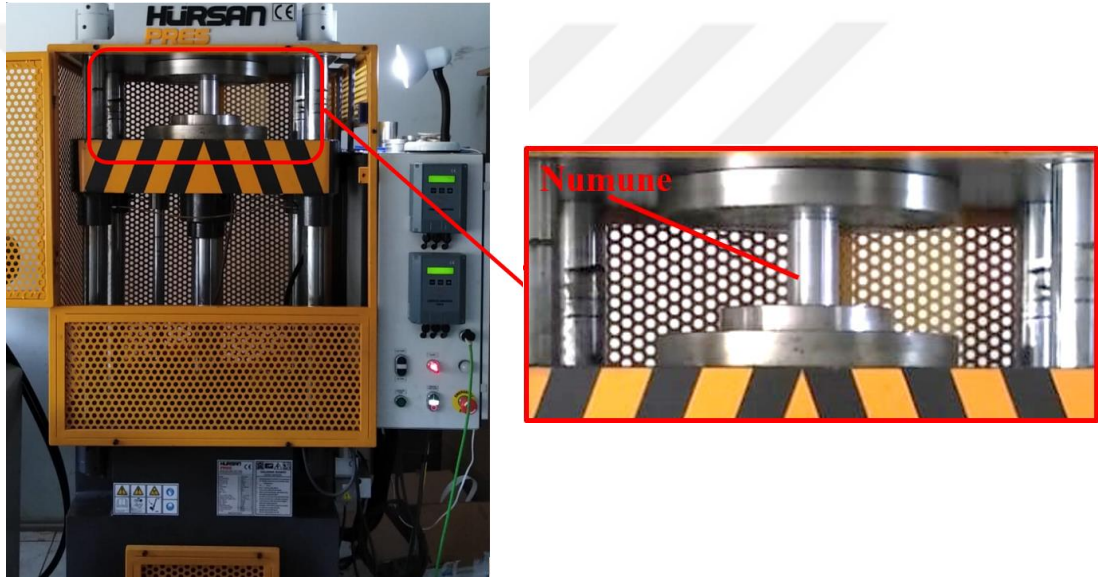


Şekil 3.11. a) Cam ve b) karbon elyaf kompozit takviyeli alüminyum tüpler

3.3. Eksenel Ezme Deney Düzenegi

Takviyesiz ve takviyeli tüm tüp yapıların, yarı-statik eksenel ezilme deneyleri, alımı 115M583 numaralı TÜBİTAK 1001 projesi kapsamında yapılan 250 kN kapasiteli ve

bilgisayar kontrollü hidrolik presle gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.12.). Dört sütunlu hidrolik preste kuvvet değerleri 250 kN kapasiteli load-cell, deplasman değerleri ise manyetik bilezikli çubuk ekstansometre ile ölçülmüştür. Deneyler neticesinde anlık kuvvet-deplasman (N-mm) veri çifti elde edilmiştir. Üst tablası sabit olan hidrolik presin alt tablası 1 mm/s – 10 mm/s hız aralığında, yukarı-aşağı yönlü hareket edebilmekte, kuvvet-deplasman çiftine ait veriler de 6 veri/s sıklığı ile bilgisayara kaydedilmektedir. Bütün deneyler bir kamera yardımıyla kayıt altına alınmıştır. Absorbe edilen enerji değerleri, kuvvet-deplasman eğrilerinin altında kalan alanın grafik programı kullanılarak hesaplanmasıyla bulunmuştur.

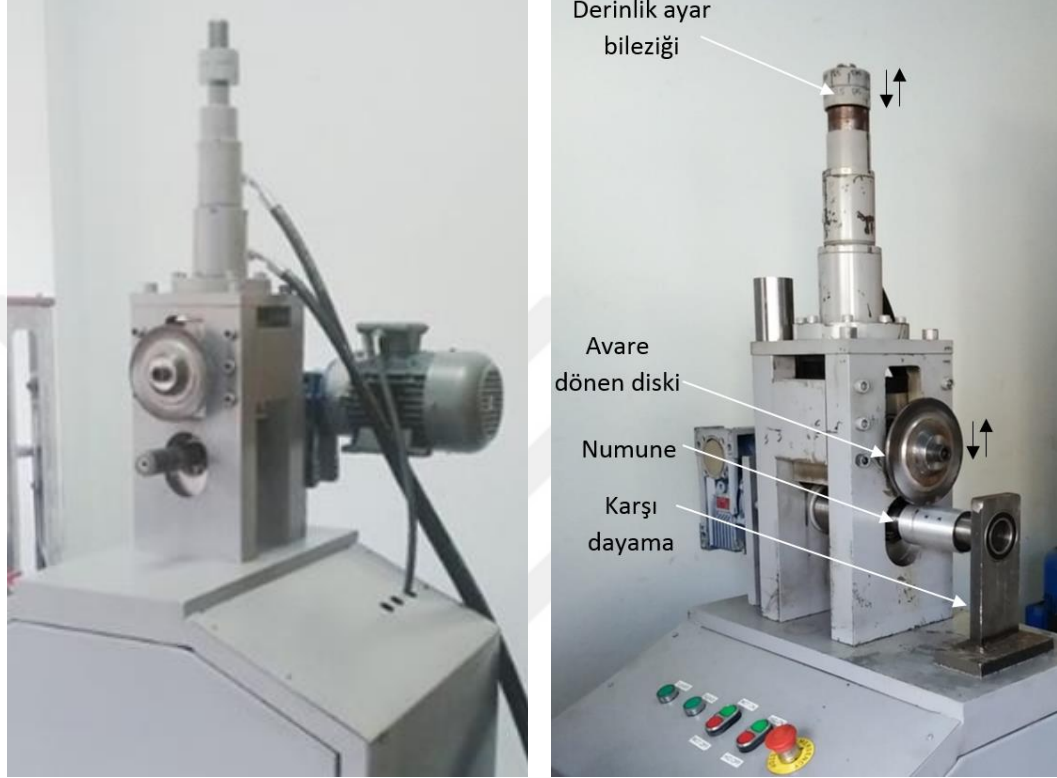


Şekil 3.12. 250 kN kapasiteli bilgisayar kontrollü hidrolik pres

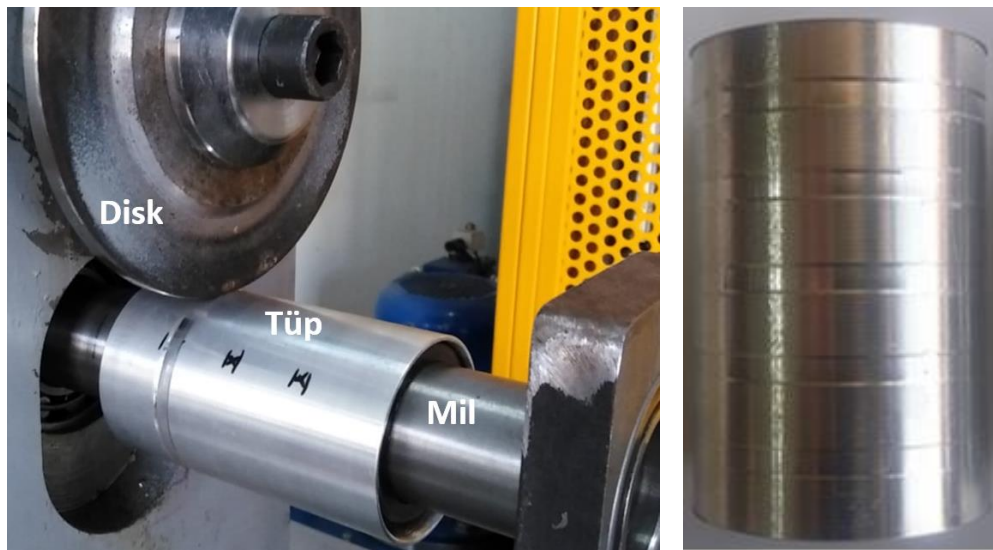
3.4. Çevresel Cidar Ezme İşlemi ve Cihazı

Çevresel cidar ezme işlemi, Şekil 3.13.'te genel ve detay resmi verilen cihazda gerçekleştirilmiştir. Bu işlemde ilk adım, ezme bölgeleri işaretlenen tüpün şekilde gösterilen ve motor yardımıyla tahrik edilerek dönen mil üzerine yerleştirilmesidir. Ezme derinliği, Şekil 3.13.'te derinlik ayar bileziği olarak gösterilen aparat yardımıyla istenilen miktarda ayarlandıktan sonra, hidrolik kontrollü olarak yukarı-aşağı hareket eden ve avare şekilde dönen 6 mm genişliğindeki disk, mil üzerindeki tüpe bastırılır. Sonrasında milin kendi eksenini etrafında tam bir tur döndürülmesiyle, tüp üzerinde tam

bir çevresel ezme bölgesi elde edilir. Cidarda olası tam ezilmeme durumlarından kaçınmak adına tüm cidar ezme işlemlerinde mil, iki tam tur döndürülmüştür. Şekil 3.14.'de cidar ezme işleminin uygulanma aşaması ve işlem uygulanmış tüp numunenin resmi verilmiştir.

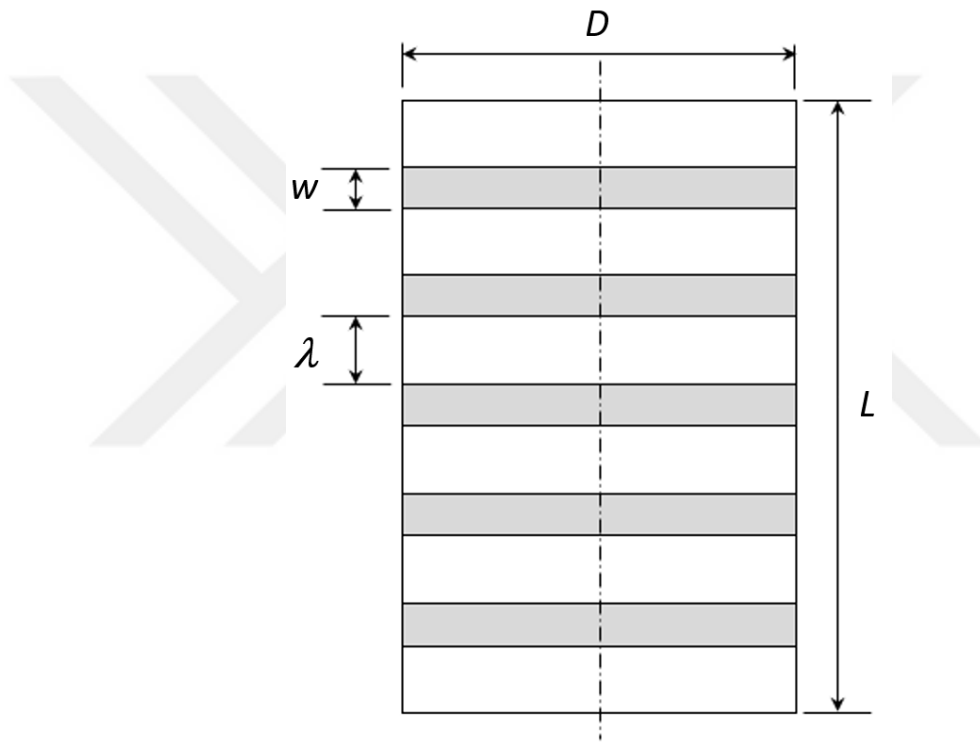


Şekil 3.13. Ezme miktarı ve konumu ayarlanabilen çevresel ezme cihazı



Şekil 3.14. 58 mm çaplı tüpte çevresel ezme işlem kademesi ve ezme işlemi uygulanmış numune görseli

Çevresel cidar ezme işlemiyle, alüminyum tüplerin enerji absorbe etme kabiliyeti, herhangi bir takviye elemanı kullanılmadan artırılmaya çalışılmıştır. Bu kapsamda, çapları ve cidar kalınlıkları özdeş olan farklı uzunluklardaki tüpler kullanılmıştır. Bu amaçla önce uygun ezme derinliğine sonrasinda ise ezme aralıklarına karar verilmiş ve pilot deneylerle doğrulanması yapılmıştır. Şekil 3.15.'te ezme işlemine ait şematik resim verilmiştir. Burada D ve L tüp çapını ve uzunluğunu, w ezme bölgesini, λ ise ezme bölgeleri arasında kalan bölgeyi (serbest burkulma boyunu: SBB) tanımlamaktadır.



Şekil 3.15. Cidar ezme işlemine ait şematik resim

3.5. Düşürme Tablası

Yarı statik deney koşullarında yapılan deneylerin yanı sıra, bazı numuneler için yüksek hızlı çarpma deneyleri de gerçekleştirilmiştir. Çarpma testleri, 2,5 m kullanım yüksekliğine sahip düşürme tablası kullanılarak yapılmıştır. Düşürme tablasının yüksekliği, özel makaralı bir sistemle istenilen yüksekliğe (elektromanyetik mıknatıs kullanılarak) göre ayarlanabilmektedir. Düşürme tablasında, çarpma sırasında ulaşılan

maksimum hız 6 m/s değerindedir. Ayrıca 150 kg olan tabla ağırlığı, ek ağırlıklar kullanılarak 300 kg değerine çıkarılabilmekte, böylece daha yüksek enerjilere ihtiyaç duyulan durumlarda da hızlı çarpma deneyleri gerçekleştirilebilmektedir. Şekil 3.16.'da düşürme tablasının genel ve detay görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.16. Ağırlık-düşürme darbe test cihazı

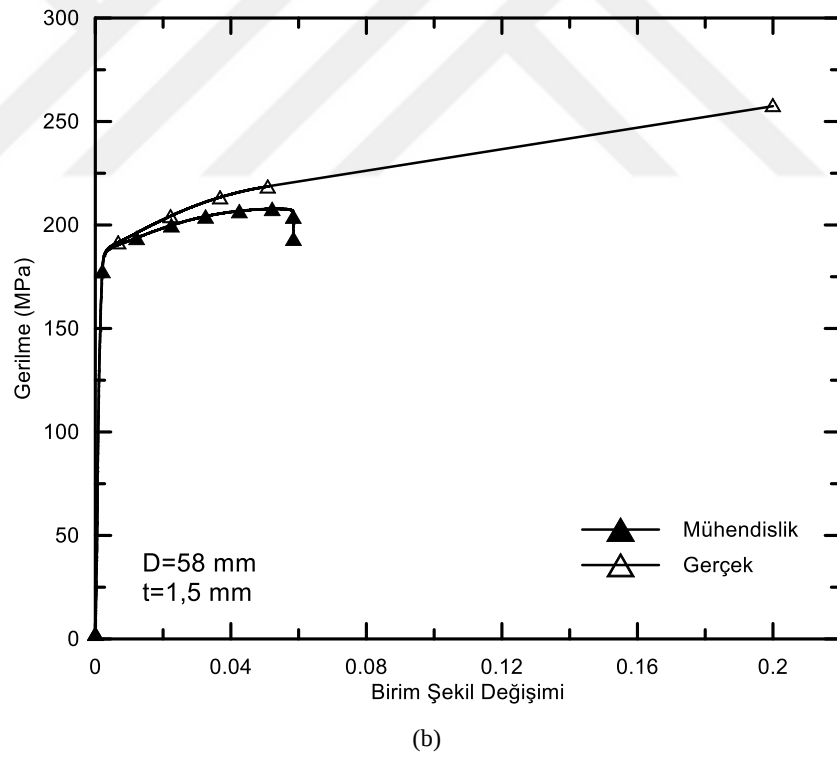
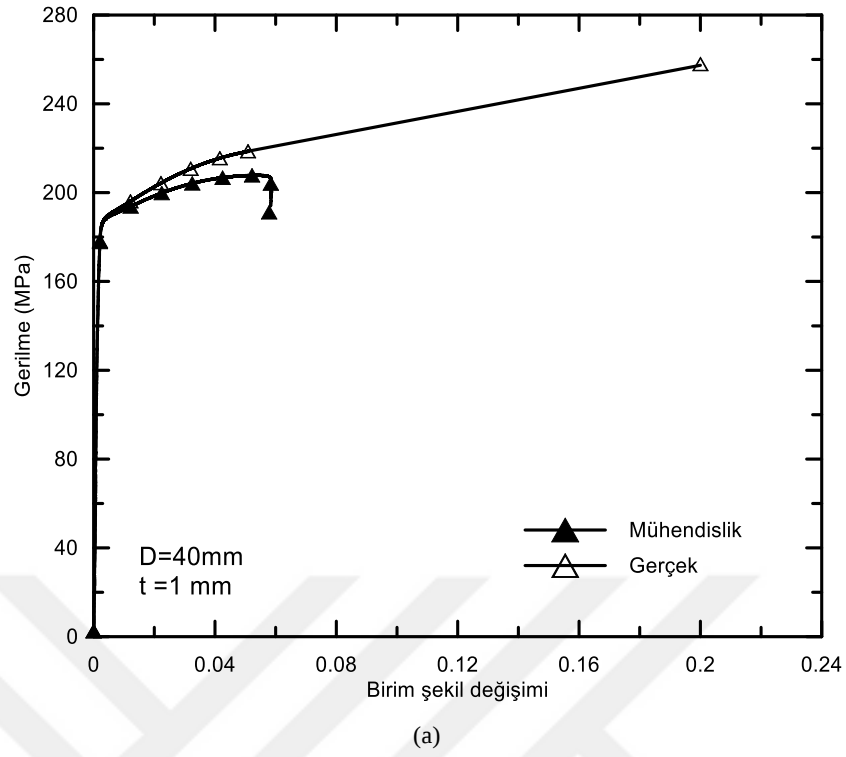
BÖLÜM 4. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, öncelikli olarak numune hazırlamada kullanılan malzemelerin karakterizasyon sonuçları olmak üzere takviyesiz ve farklı şekillerde takviye edilmiş tüp yapıların eksenel yük altındaki deney sonuçları verilmiştir.

4.1. Alüminyum Tüp Yapıya Ait Çekme Deneyi Sonuçları

Ön deneyler için kullanılan 6063-T5 borulardan imal edilmiş 40 mm ve ana deneyler için kullanılan 58 mm çaplı tüp malzemesinin mühendislik ve gerçek çekme eğrileri Şekil 4.1.'de verilmiştir. Bu malzeme için %0,2 akma sınırının 188 MPa, çekme dayanımının ise 212 MPa olduğu tespit edilmiştir. Grafikte, eğrinin nihai noktası için gerçek birim şekil değişimi hesaplanırken aşağıdaki denklemden (Denklemler 4.1) yararlanılmıştır. Denklemden kullanılan A_0 değeri çekme numunesinin başlangıç alanına karşılık gelmekteyken, A değeri kopma anındaki alanı vermektedir.

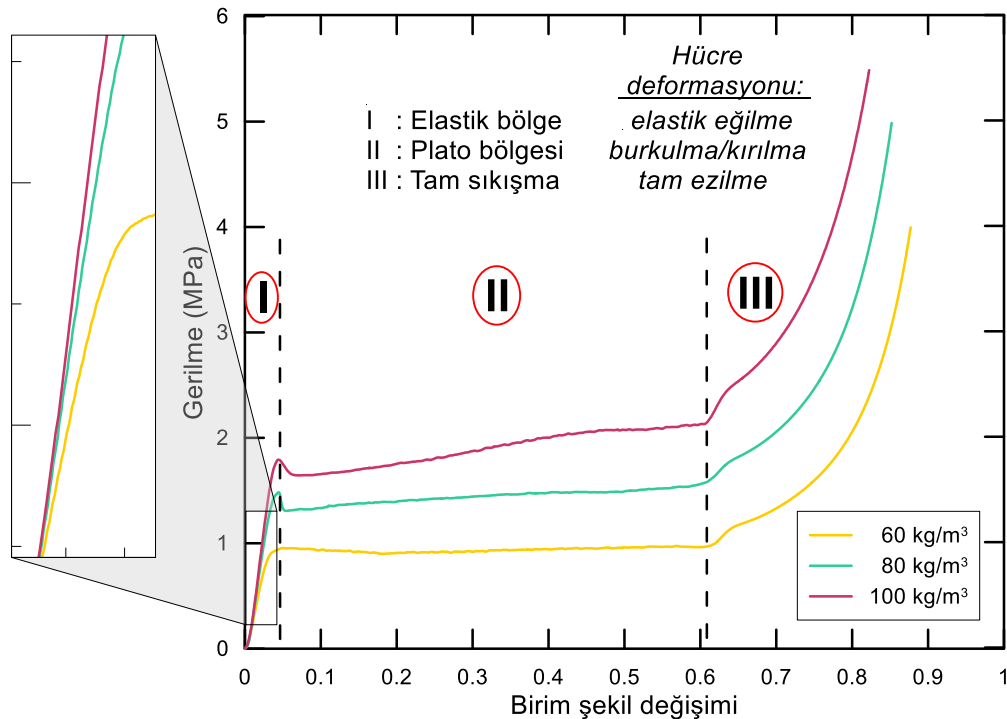
$$\varepsilon_g = \ln\left(\frac{A_0}{A}\right) \quad (4.1)$$



Şekil 4.1. a) $D=40$ ($t=1\text{ mm}$), b) 58 mm ($t=1.5\text{ mm}$) çaplı 6063-T5 boru için elde edilen gerilme-birim şekil değişimi eğrileri

4.2. PVC Köpük Malzemelere Ait Basma Deney Sonuçları

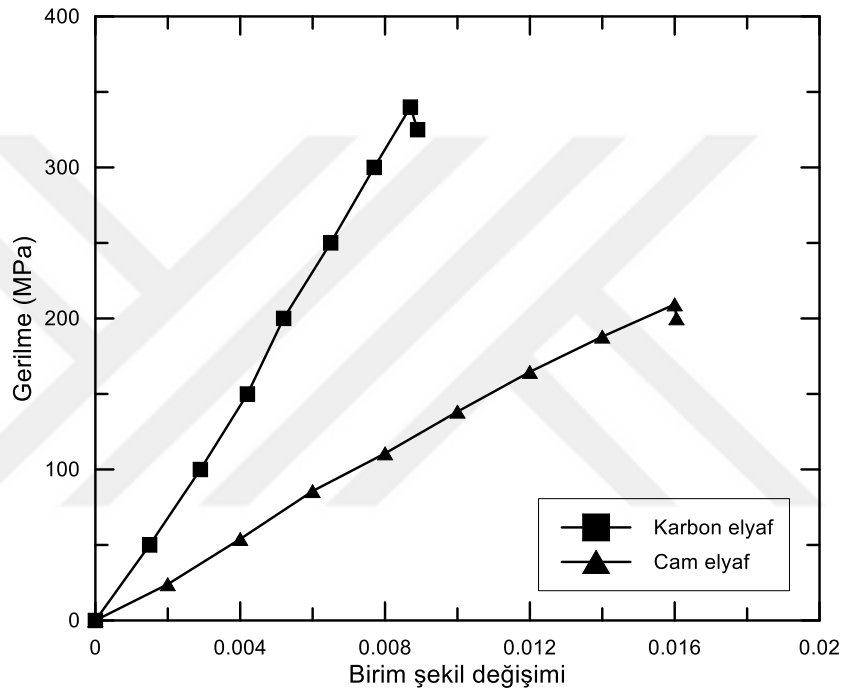
Köpük numunelerin Instron marka çekme/basma deney cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiş basma deneylerine ait sonuçlar Şekil 4.2.'de verilmiştir. Şekilden de görülebileceği üzere, eğriler; i) elastik, ii) plato ve iii) tam sıkışma (densification) olmak üzere üç farklı bölgeden oluşmaktadır. Elastik bölgedeki deformasyon, hücre duvarlarında eğilme şeklinde ortaya çıkmakta ve kuvvetin kaldırılmasıyla toparlanma oluşmaktadır. Plato bölgesindeyse, hücre duvarlarının bazılarında burkulma, bazılarında ise kırılmaya varan şekil değişimleri gözlenmektedir. Köpüğün, uygulanan yükü neredeyse sabit bir gerilme/kuvvet değerinde, uzun deplasman değerleri boyunca taşıdığı plato bölgesi, köpüğün yük taşıma kapasitesini temsil etmektedir. Diğer mühendislik malzemelerinden farklı olarak ortaya çıkan bu davranış aslında, köpüklerin bölgesel olarak kademe kademe deforme olmasıyla ilgilidir. Hücre duvarlarının yukarıdan aşağıya doğru kırılarak ilerlediği plato bölgesinin sonunda, tüm hücrelerin tam anlamıyla ezildiği tam sıkışma bölgesi başlamakta ve gerilme değeri çok hızlı bir şekilde artmaktadır. Ayrıca köpüklerin elastik bölgedeki eğimlerinin köpük yoğunluğuya arttığında yine dikkat çeken bir durumdur (Şekil 4.2.).



Şekil 4.2. Farklı yoğunluktaki PVC köpük malzemelerin gerilme-birim şekil değişimi eğrileri (v=0,2 mm/s).

4.3. Cam ve Karbon Elyaf Malzemelerine Ait Çekme Deneyi Sonuçları

Şekil 4.3.'te alüminyum tüplerin dışarıdan takviye edilmesinde kullanılan cam ve karbon elyaf kompozit numunelere ait çekme deneyi grafikler verilmiştir. Çekme yükü altında dokuma cam elyaf takviyeli kompozitin elastiklik modülünün 14,3 GPa, çekme dayanımının 213 MPa, karbon elyaf için ise elastiklik modülü 42,5 GPa, çekme dayanımı ise 335 MPa değerindedir.



Şekil 4.3. Cam ve karbon elyaf kumaş takviyeli kompozit numunelerin çekme eğrileri

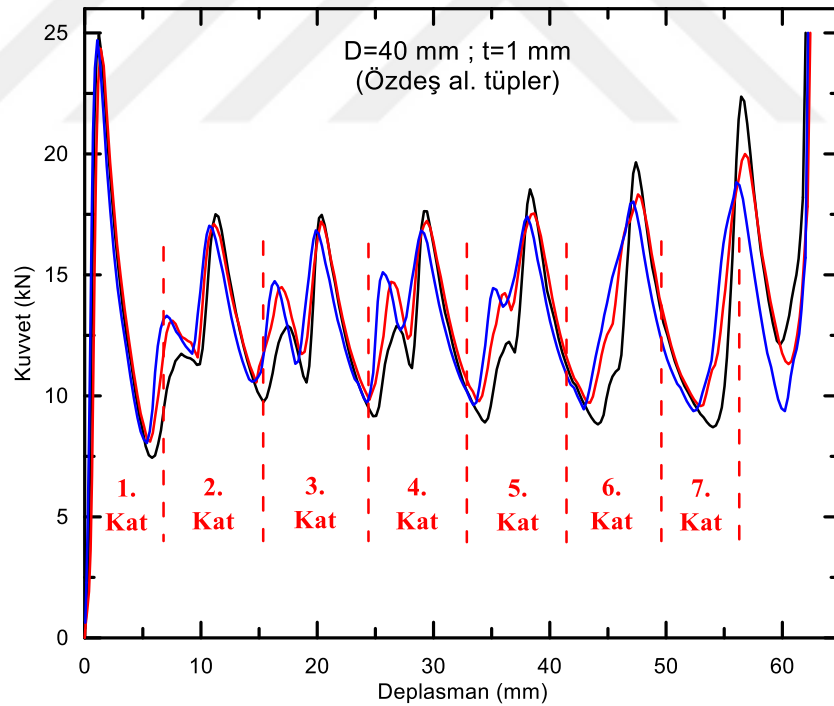
4.4. Eksenel Ezme Deney Sonuçları

4.4.1. Takviyesiz tüp yapılara ait deney sonuçları

Bu bölümde, dairesel kesitli takviyesiz (herhangi bir dayanım artırıcı işlem uygulanmamış) 6063-T5 alüminyum tüplerin eksenel yük altındaki deformasyon davranışları ve enerji absorbe etme kabiliyetleri incelenmiştir.

Şekil 4.4.'te eksenel yük uygulanmış, aynı sertlik ve çapa sahip üç adet özdeş tüpün kuvvet-deplasman eğrileri verilmiştir. 40 mm çapa sahip tüpler simetrik modda 7 adet

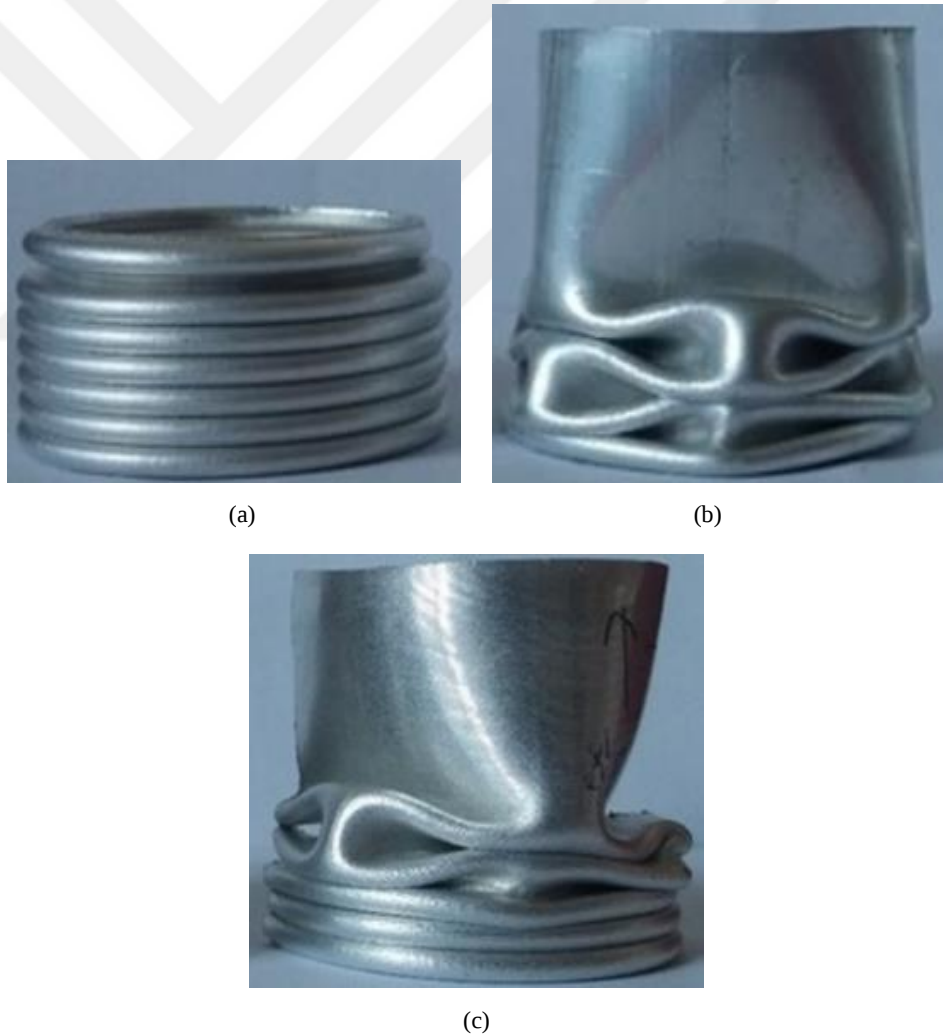
katlanma sergilemiştir. Tüp yapıdaki deformasyon, çok kısa bir deplasman değerinde (yaklaşık 2 mm) ulaşılan bir maksimum kuvvet (F_{maks}) değeriyle başlamakta, daha sonra maksimum ve minimum kuvvetler arasında salınım yapan bir forma dönüşmektedir. Bu salınımın belirli bir ortalama kuvvet (F_{ort}) etrafında gerçekleştiği de söylenebilir. Deneyin sonuna doğru tüp yapıdaki aşırı deformasyondan kaynaklı olarak yığılma (tam ezilme durumu-densification) durumu ve pekleşme etkisiyle kuvvet değerleri hızla artmakta ve deney sonlandırılmaktadır. Tüplerin deformasyonu sırasında ortaya çıkan tüm üst kuvvet değerlerinin, deney sonunda oluşan yığılmadan kaynaklı aşırı artış dışında, her zaman için F_{maks} değerinden daha düşük olduğu görülmektedir. Ancak artan deplasmanla deformasyona uğramamış tüp uzunluğunun azalması neticesinde katlanmanın önceki durumlara nispeten daha zorlaşmakta, buna bağlı olarak pik kuvvetlerde bir miktar artış ortaya çıkmaktadır. Bu davranış, metal tüplerin aksel yük altında gösterdikleri tipik bir davranış olup, konuyla ilgili geniş bir literatür yer almaktadır [12,15,72].



Şekil 4.4. Özdeş üç numuneye ait kuvvet-deplasman eğrileri ($D/t=40/1$ ve $L=80$ mm)

Yapılan deneyler neticesinde gerek numune geometrisi ve düzgünlüğüne gerekse kuvvetin üniform uygulanmasına bağlı olarak katlanmanın farklı modlarda

gerçekleşebileceği görülmüştür. Şekil 4.5.'te farklı modda katlanmış numunelerin deney sonrası görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.5a.'dan görüleceği üzere simetrik katlanmada tüm kesitte cidarın tekrarlayan içeri veya dışarı hareketi sonucu akordeon benzeri bir son hal oluşmaktadır. Elmas katlanmada ise aynı kesitteki cidarın bir kısmı içe yönlenirken bir kısmı dışarıya doğru yönlenmektedir. Elmas modda katlanma sonrası kesit, üst üste oturmuş eşkenar üçgenler şeklinde görülmektedir. Ancak tüp cidarının çok ince olduğu durumlarda, elmas katlanan tüp kesiti dörtgen bir görünüm de sergileyebilmektedir. Aynı mekanik ve geometrik özelliklere sahip tüplerin farklı modellerde katlanması durumunda, farklı karakteristiğe sahip kuvvet-deplasman eğrileri elde edileceği açıktır.



Şekil 4.5. a) Simetrik, b) elmas ve c) karışık modda katlanmış numune görüntüleri

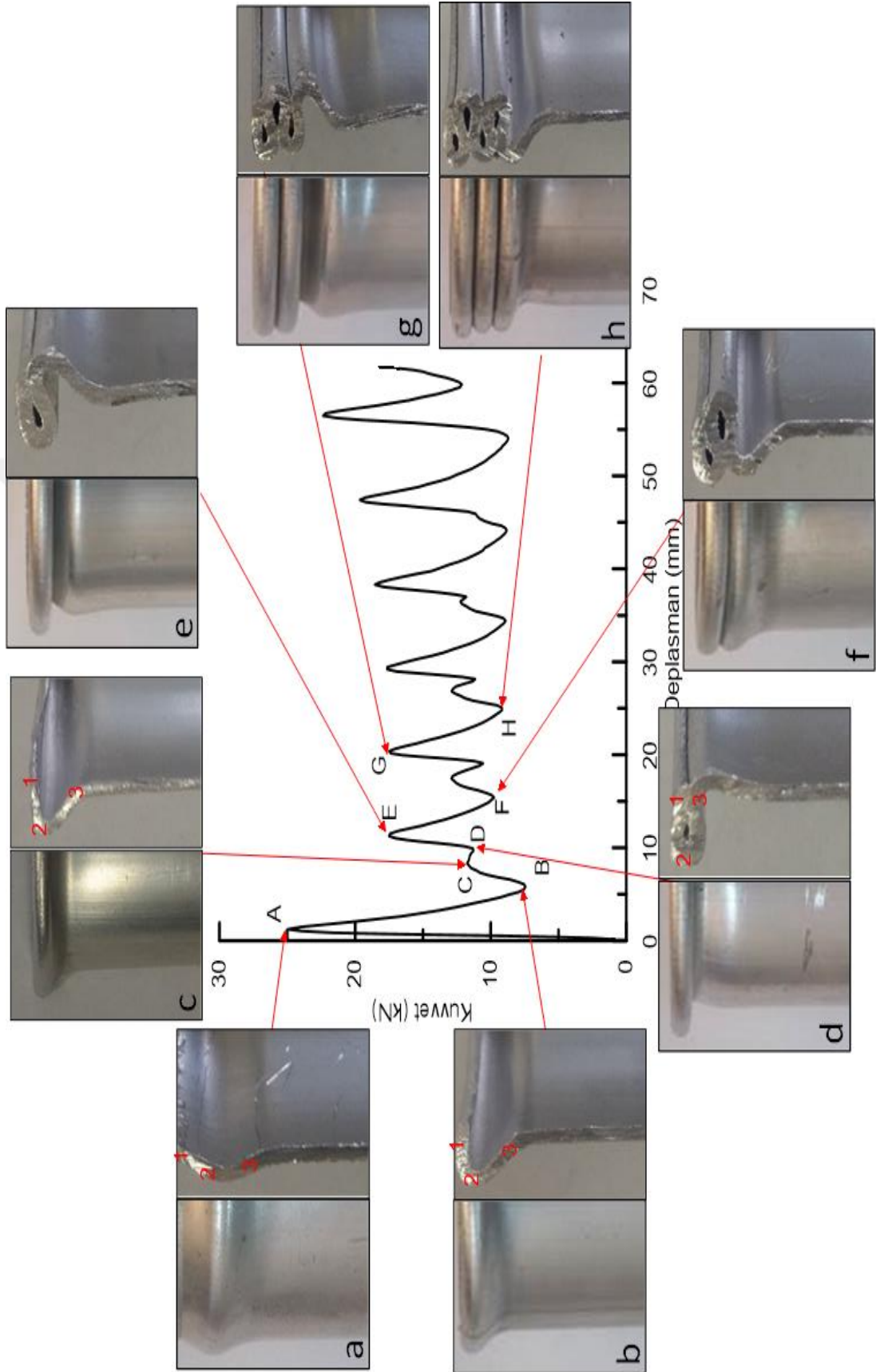
Simetrik modelde katlanan bir tüpün kuvvet-deplasman eğrisindeki salınımlar, belirli karakteristik deformasyonlara karşılık gelmektedir. Bu kapsamda Şekil 4.6.'da önemli deformasyon aşamalarına karşılık gelen deplasman değerleri (deplasman-deformasyon çifti) birlikte verilmiştir. Eksenel yükün uygulanmaya başlanmasıyla, başlangıçta herhangi bir deformasyon söz konusu olmadığından kuvvette, t p cidarında burkulmaya yol açacak ani bir artış meydana gelmektedir. Kuvvetin uygulanmaya devam edilmesiyle, tüpün alt ve üst serbest uçlarına yakın kısımlardan birinde veya her ikisinde dışarıya doğru çok düşük oranda yönlenmeler (düşük ölçekli lokal burkulmalar) oluşmaktadır. Bu lokal deformasyonun tüpün u  kısımlarında oluşmasının sebebi, bu bölgelerde t p cidarının hareket serbestisi bulunması olarak açıklanabilir. Devam eden süreçte katlanma oluşumu ve tekrarıyla eğride karakteristik değişimler meydana gelmektedir.

Şekil 4.6.'da simetrik modda katlanmış tüpün, ilk üç katına ilişkin deformasyon aşamaları detaylı olarak irdelenmiştir. Burada 1-3 numaraları ile gösterilen bir kat uzunluğu, 2 numarası ile eşit uzunluğa sahip iki parçaya b l nm ştir. Deformasyon aşamaları şu şekilde sıralanabilir;

- 0-A aralığı: Lokal burkulmayı başlatacak kuvvet değerine ulaşılmasıyla, tüpün u  kısmına yakın bölgelerde t p cidarı dışa doğru harekete zorlanması, A noktasına ulaşıldığında Şekil 4.6a.'da verilen durumun oluşması,
- A-B aralığı: Tüpün  st ucunun (1 noktası) içeriye doğru hareket yönlenmesinin katlanmayı kolaylaştırması nedeniyle, kuvvetin hızlı bir şekilde azalması (Şekil 4.6b.),
- B-C aralığı: Kuvvetin uygulanmaya devam etmesiyle radyal yönde iç kısma harekete zorlanan cidarın (3 noktası) göstermiş olduğu dirençten dolayı kuvvetin bir miktar yükselmesi,
- C-D aralığı: Eğilme/katlanma etkisiyle kuvvetin tekrar kısmi düşüş göstermesi (Burada 1 ve 3 numaralı cidarlar birbirlerine yaklaşmaktadır. Şekil 4.6d. dışa burkulan cidarın alt ve üst kenarlarının birbirine temas edecek şekilde birbirleri üzerine katlanmış durumunu göstermektedir),
- D-E aralığı: Yeni bir kat oluşum safhası; cidarın dışa doğru burkulması ve buna bağlı olarak kuvvetin tekrar yükselmesi,

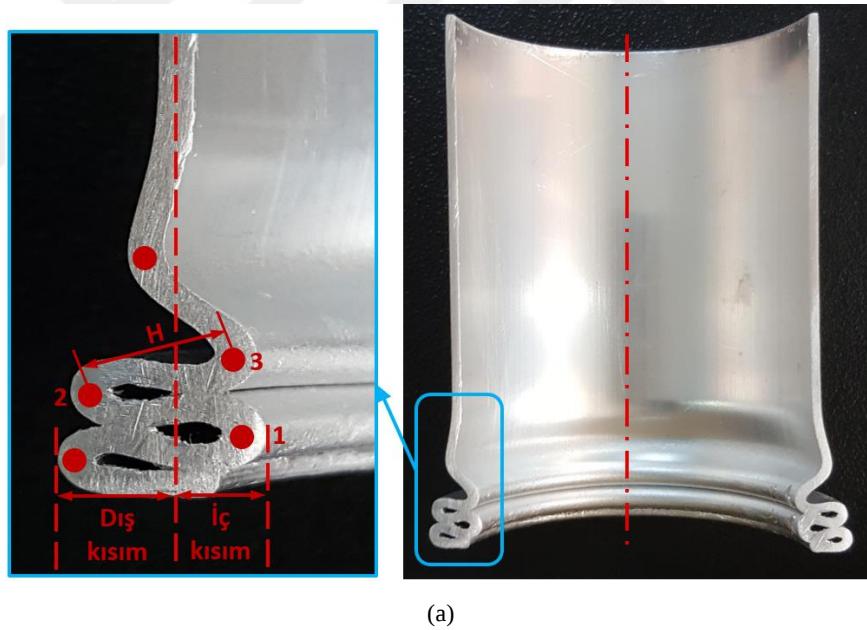
Tüpün katlanması sırasında dikkat çeken önemli bir noktada ilk kat oluşumundan sonraki katlarda, cidar tüp eksenine paralel olmamakta ve bu durum moment etkisi doğurarak yeni kat oluşumunu kolaylaştırmaktadır. Başka bir deyişle, tamamlanan her bir kat, bir sonraki katın başlangıç safhasını oluşturmakta, buna bağlı olarak diğer katların kuvvet pikleri, ilk katlanmadaki F_{maks} 'dan her zaman daha düşük değer almaktadır. Ancak katlanma sürecinin sonuna doğru tüpün serbest burkulma boyu kısaldığından, katlanma işlemi bir anlamda zorlaşmakta ve son katlara ait kuvvet piklerinde artış meydana gelmektedir.





Şekil 4.6. Kuvvet-deplasman grafiği ve bu grafikte karakteristik noktalara karşılık gelen numune deformasyonu

Simetrik modda her bir katın büyüklüğü, iki eşit parçadan ($2H$) meydana gelmekte ve tüpün çap ve cidar kalınlığına bağlı olarak değişmektedir (Şekil 4.7.). Şekilden de anlaşılacağı üzere katlanma, kat boyunu (1-3 uzunluğu) oluşturan iki eşit parçanın (1-2 ve 2-3 uzunlukları) 2 noktasındaki hayali bir mafsallı etrafında hareket ederek birbirleri üzerine oturması şeklinde gerçekleşmektedir. 40 mm ($t=1$ mm) çaplı (ortalama çapı 39 mm olan) tüp numunenin deney sonrası kesit görüntüsü Şekil 4.7.'de verilmiştir. Deformasyon sonrası dış ve iç çaplar sırasıyla 46,5 mm ve 35,5 mm, ortalama kat uzunluğu ise 10,8 mm olarak ölçülmüştür. Dış ve iç çaplar ile kat uzunluğu göz önünde bulundurularak, ortalama çap için gerekli hesaplamalar yapıldığında içeriye yönelme oranı kat uzunluğunun yaklaşık %33'lik kısmına, dışarıya yönelme oranı ise kat uzunluğunun yaklaşık %67'lik kısmına karşılık gelmektedir. Hesaplanan bu oranlar daha önce literatürde dairesel kesitli parçalar için rapor edilen miktarlarla örtüşmektedir [12,15].



Şekil 4.7. a) Katlanma ve plastik mafsallı oluşumu, b) kat genişliğinin hesaplanması ($D=40$, $t=1$ mm)



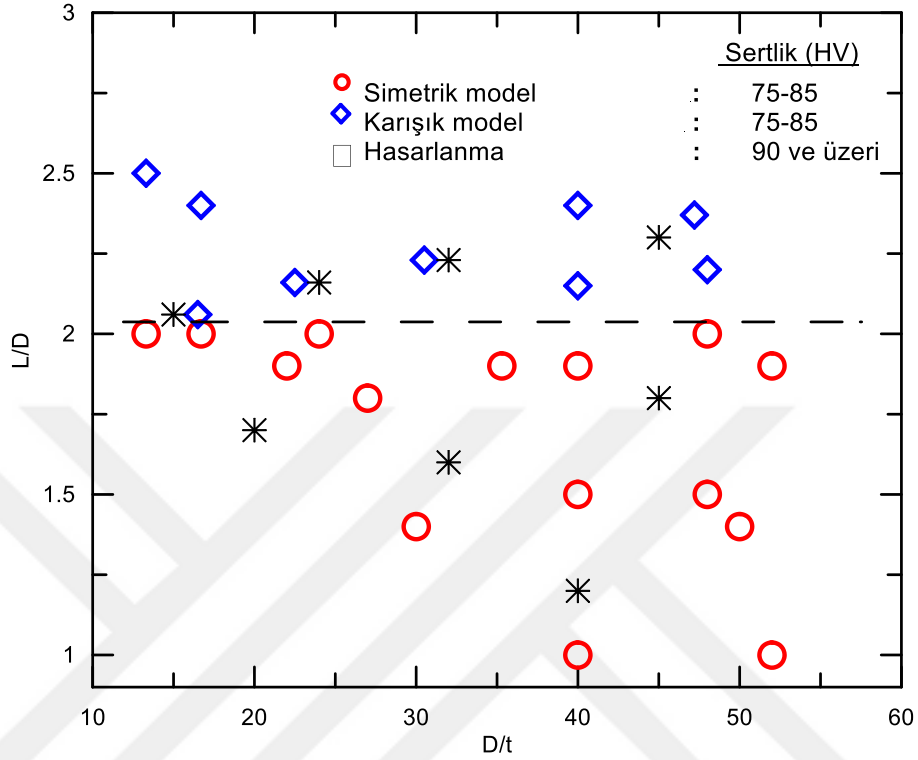
(b)

Şekil 4.7. (Devamı)

Önceki bölümlerde bahsedildiği üzere, katlanma modelleri ile tüplerin geometrik ölçüleri arasındaki ilişkinin ortaya konulabilmesi için farklı ölçülerdeki 6063-T5 alüminyum malzemeden işlenmiş tüplerin aksel ezilme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Katlanma esnasında, özellikle katların büküm bölgelerinde, tüp cidarının kısıtlı bir alanda yüksek şekil değişimine zorlanması nedeniyle bu bölgelerde çatlamların veya hasarlanmaların oluşmaması için tüp malzemesinin sertliği önemli bir parametreyi oluşturmaktadır. Bu nedenle deneylerde, tüplerin sertlik değerleri de göz önünde bulundurulmuştur. Bu sayede 6063-T5 serisi alüminyum tüplerin, geometriye bağlı olarak, çatlamadan veya hasarlanmadan katlanma sergileyebileceği üst sertlik limiti de tespit edilmeye çalışılmıştır.

Deneylerde kullanılan tüplerin bir kısmı piyasadan temin edildikleri şekliyle (çap ve cidar ölçüleri değiştirilmeden) sadece istenilen uzunlukta kesilerek kullanılmıştır. Ancak bazı çap ve cidar kalınlığı oranları için tüpler talaş kaldırılmak suretiyle istenilen ölçülere getirilerek ara değerler de tamamlanmıştır. Farklı geometrik ölçülerdeki tüplerle gerçekleştirilen deneyler neticesinde, literatürdeki katlanma haritalarına benzer bir harita, 6063-T5 alüminyum tüp yapı için elde edilmiştir. Şekil 4.8.'de verilen bu haritada diğer çalışmalardan farklı olarak numunelerin sertlikleri de göz önünde bulundurulmuştur. Katlanma haritasının oluşturulmasında, grafikte

sonuçları verilen numunelerin tekrar deneyleriyle birlikte 80 adetten fazla deney gerçekleştirilmiştir.



Gerek Şekil 4.8.'de verilen katlanma haritası, gerekse diğer katlanma haritaları [14,15] incelendiğinde, L/D ve D/t oranlarının düşük olması durumunda, tüplerin simetrik modda katlandığı, buna mukabil, benzer D/t oranlarına rağmen, L/D oranının yüksek olması ($L/D > 2$) neticesinde, katlanmanın karışık modda olduğu görülmektedir. Karışık katlanma modunda, tüp yapıdaki deformasyon simetrik modda başlamakta, sonrasında ise muhtemelen tüp uzunluğuna bağlı olarak kuvvetin tüm kesitte homojen olamaması nedeniyle elmasa moda dönüşmektedir. Katlanma haritası incelendiğinde farklı katlanma rejimlerinin birbirlerinden açıkça ayrıldığı da dikkat çeken bir husustur. Bu kapsamda grafik iki farklı katlanma rejimi bölgesine sahip gibi değerlendirilerek, L/D ekseninin yaklaşık 2 olduğu değerden çizilen bir kesikli çizgi ile katlanma rejimleri birbirlerinden ayrılabilir. Elmas katlanma modu, genellikle L/D oranından bağımsız olarak çok yüksek D/t oranlarında oluşmaktadır. Ayrıca yapılan deneylerde uygulanan kuvvetin tüm tüp kesitine homojen olarak dağılmadığı (alt ve

üst yüzeylerin paralel olmadığı) durumlarda da elmas katlanmanın olduğu görülmüştür. Bu noktada, normalde geometrik ölçüler açısından simetrik katlanma beklenen tüplerin, eksenel yükün kesite düzgün uygulanmaması nedeniyle elmas katlanma sergilediği bilinen bir durumdur.

Tüp uzunluğunun çaptan çok büyük olduğu ($L \gg D$) durumlarda, tüp yapı uygulanan eksenel kuvvetin etkisiyle katlanmadan burkulma (Euler deformasyonu) şeklinde deformasyona uğramaktadır. Bu durumda katlanma gerçekleşmediği için enerji absorbe etme kabiliyetinden söz etmek mümkün değildir. Bu gibi çok uzun tüplerin kullanılma durumu, eksenel yük altındaki stabilite (yapıların burkulmadan yük taşıma kapasitesi) başlığıyla incelenmektedir [75].

Şekil 4.8.'de verilen katlanma haritasının oluşturulmasında kullanılan numunelerin deneylerine ait detaylı bilgi Tablo 4.1.'de verilmiştir. Tabloda, tüplerin D , t ve L değerleri ve bu değerlere bağlı olarak elde edilen D/t ve L/D oranlarının yanı sıra ilk pik kuvvet (F_{maks}) ve ortalama kuvvet (F_{ort}) değerleri de verilmiştir. Ortalama kuvvet değeri, numunenin kuvvet-deplasman eğrisi altında kalan alan olarak elde edilen enerji değerinin toplam deplasmana oranlanmasıyla hesaplanmıştır. Ayrıca F_{maks} değerinin F_{ort} değerine oranı ve bazı teorik çalışmalarda ortalama kuvvetin hesaplanması için önerilen denklemlerin ilgili tüp geometrisine uyarlanması neticesinde elde edilen F_{ort} değerleri de verilmiştir.

Tablo 4.1. Tüp malzemesinin akma dayanımı, sertlik, geometrik büyüklükleri ve katlanma durumu ve F_{ort} , F_{maks} değerleri.

Malzeme özellikleri		Numune boyutları (mm)					Deney çıktıları				F_{ort} tahminine yönelik yaklaşımlar		
σ_{ak}	WH*	t	D	L	D/t	L/D	F_{maks} (kN)	F_{ort} (kN)	F_{maks}/F_{ort}	Katl. modu	F_{ab-jon}	F_{wi}	F_{sing}
170	9,5	1	50	71	50,0	1,4	26,2	13,3	1,97	4 Sim.	8,2	10,6	6,9
170	10	2	60	80	30,0	1,33	67,4	38,1	1,77	4 Sim.	26,0	32,8	21,7
180	11	1	48	96	48,0	2,0	10,1	8,1	1,25	6 Sim.	8,5	11,0	7,2
		1	48	106	48,0	2,2	26,0	12,2	2,12	Karışık	8,5	11,0	7,2
		1	48	106	48,0	2,2	23,9	16,9	1,42	Elmas	8,5	11,0	7,2
		1	48	96	48,0	2,0	26,8	18,7	1,44	Karışık	8,5	11,0	7,2
		1	40	76	40,0	1,9	22,1	12,1	1,83	7 Sim.	8,2	10,5	6,9
188	12	2,5	55	105	22,0	1,9	99,0	-	-	Hasar	39,2	48,5	32,3
		2	54	100	27,0	1,85	68,4	37,4	1,83	5 Sim.	27,5	34,4	22,8
		1,5	53	100	35,3	1,9	49,1	26,7	1,84	6 Sim.	17,5	22,1	14,6
		1	52	100	52,0	1,9	27,8	11,8	2,36	Karışık	9,3	11,9	7,8
190	12,5	1,5	20	50	13,3	2,5	23,9	19,9	1,20	Karışık (çatlama)	11,5	13,7	9,3
		1,5	20	40	13,3	2,0	24,1	19,8	1,22	3 Sim. (çatlama)	11,5	13,7	9,3
190	13	1,5	25	60	16,7	2,4	27,5	20,5	1,34	3 Sim. (çatlama)	12,6	15,4	10,3
		1,5	25	50	16,7	2,0	27,5	19,5	1,41	Karışık (çatlama)	12,6	15,4	10,3
		1,5	25	50	16,7	2,0	27,5	20,3	1,35	3 Sim. (çatlama)	12,6	15,4	10,3
		1	24	48	24,0	2,0	21,5	13,9	1,55	Karışık	6,6	8,2	5,5
		2	33	68	16,5	2,0	64,0	-	-	Hasar	22,9	27,9	18,7
195	14,5	1,4	31,5	68	22,5	2,16	33,8	-	-	Hasar	12,9	16,0	10,6
		1	30,5	68	30,5	2,23	18,3	-	-	Hasar	7,5	9,5	6,3

*WH: Webster sertlik değeri.

Tablo 4.1. incelendiğinde, uygun sertlikteki (< 13 WH) numunelerde simetrik ve karışık mod ağırlıklı olmak üzere üç farklı katlanma türü görülmektedir. D/t ve L/D oranlarının düşük olması durumunda alüminyum tüpler, simetrik modda katlanma göstermektedir. D/t oranının sabit kalması şartıyla, artan L/D oranı ile tüpler çoğunlukla simetrik başlayan katlanma davranışından sonra elmas modda katlanarak

netice itibariyle karışık modda katlanmayla deformasyonu tamamlamaktadır. Karışık katlanma modunun, yük iletimini etkileyen cidardaki homojensizliklerden kaynaklandığını söylemek mümkündür. Tabloda sadece 48 mm çapa sahip tüpte elmas katlanma modu görülmüştür. Tüp yapının D/t oranının elmas katlanma için gerekli büyüklükte olmamasına rağmen, elmas modda katlanması, tüpün üst ve alt yüzeylerinin paralel olmamasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca kuvvetin uygulanma açısı da, kuvvetin tüp yüzeyinin öncelikle bir kısmına uygulanması, simetrik katlanmanın elmas moda dönüşmesine sebep olabilmektedir.

Alüminyum tüplerdeki sertlik artışıyla ortaya çıkan süneklikteki düşüşün (şekil değiştirme kabiliyetindeki azalma), eksenel yük altındaki tüplerin katlanma aşamasındaki etkisi Tablo 4.1.'de açıkça görülebilmektedir. Sertliğin 14 WH değerinden yüksek olduğu tüm durumlarda (çap ve cidar kalınlığı fark etmeksizin) tüp yapıların, deney esnasında katlanamadan parçalandığı tespit edilmiştir (Şekil 4.9a.). Sertliğin 12 WH değerinin üstünde ve cidar kalınlığının çapa göre fazla olduğu (genellikle küçük çaplı) numunelerde ($D/t < 30$), katlanma esnasında cidarın özellikle büküm bölgelerinde çatlamlar görülmüştür (Şekil 4.9b.). Ancak benzer sertliklerde olan küçük çaplı numunelerden talaş kaldırılmak suretiyle cidar kalınlıkları düşürülenlerde herhangi bir çatlama durumu gözlenmemiştir. Bu durum kat büküm bölgelerindeki cidarın küçük bir alanda büyük miktarda deformasyona zorlanmasının büyük cidar kalınlıklarında çatlamlara neden olabileceğini göstermesi bakımından önemlidir.



(a)

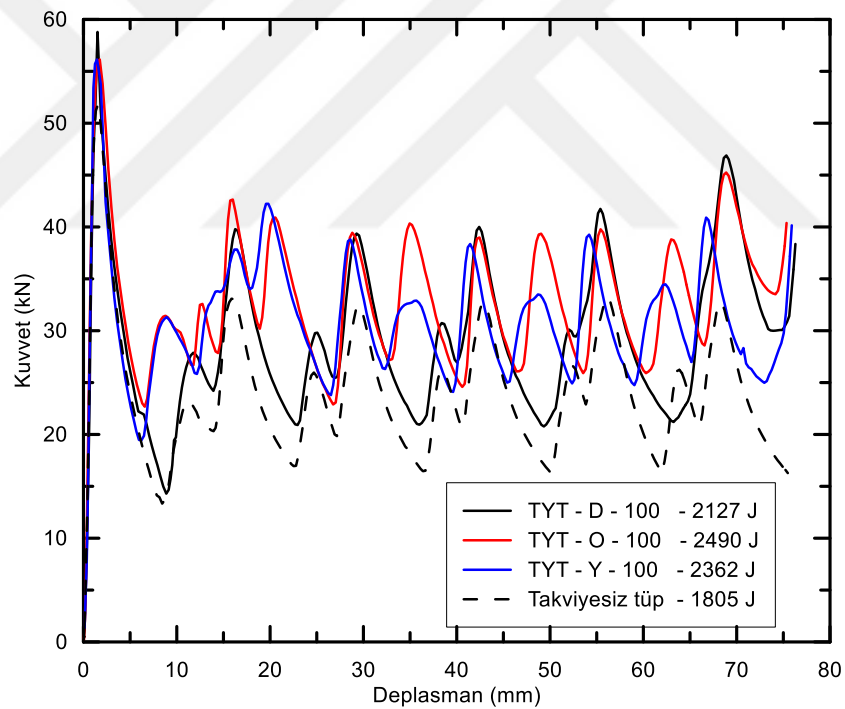


(b)

Şekil 4.9. a) 14,5 WH sertliğe sahip parçalanmış numune, b) 12WH sertliğe sahip kalın cidarlı tüpün kat bölgelerinde meydana gelen çatlamlar

4.4.2. İÇERİDEN TAKVİYELİ TÜP YAPILARA AİT DENEY SONUÇLARI

Köpük yoğunluğunun absorbe edilen enerji üzerindeki etkisinin görülebilmesi amacıyla tüpler, öncelikle tek bir köpük yoğunluğunun kullanıldığı tek yoğunluklu takviye (TYT) modelinde takviye edilmiş ve aksenal ezilme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerde 58,5 mm çapa, 1,5 mm cidar kalınlığına ve 100 mm uzunluğa sahip tüpler kullanılmıştır. Bu takviye modeline ait numunelerin kuvvet-deplasman eğrileri Şekil 4.10.'da verilmiştir. Tüm takviyeli tüpler yaklaşık 75 mm deplasman değerine kadar ezilmiş, bu deplasman değerinden sonra (tam sıkışma durumundan dolayı) kuvvetin hızla artması nedeniyle sonlandırılmıştır. Absorbe edilen enerji (eş deplasman değerine göre hesaplanan) değeri açısından, en yüksek değer 80 kg/m^3 yoğunluklu köpükle takviye durumunda elde edilmiştir (Şekil 4.10.).

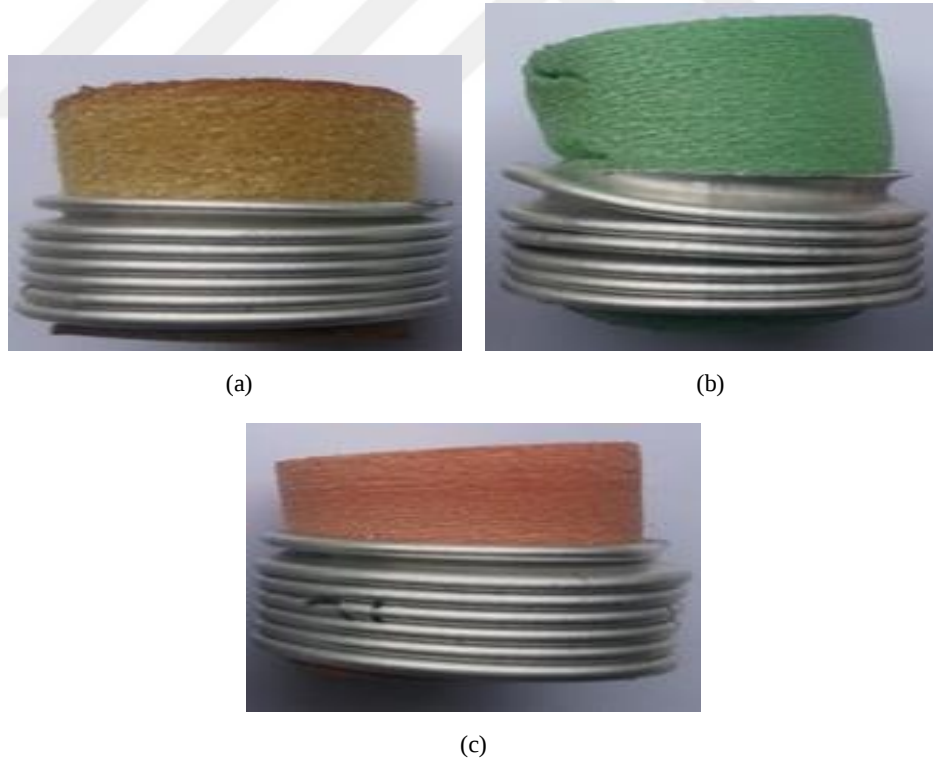


Şekil 4.10. Farklı yoğunluktaki PVC köpüklerle TYT modelde takviye edilen numunelerin kuvvet-deplasman grafiği

Yüksek enerji değerinin, yüksek plato değerine sahip köpükle takviyeli numunede elde edilmesi beklenirken, orta yoğunluktaki köpükte ortaya çıkması, köpüğün enerji artışına nasıl katkı sunduğunun daha açık anlaşılması gerektiğini ortaya çıkarmaktadır. Bu kapsamda tekrarlanan çalışmalardan, köpüğün üç farklı mekanizma ile enerji

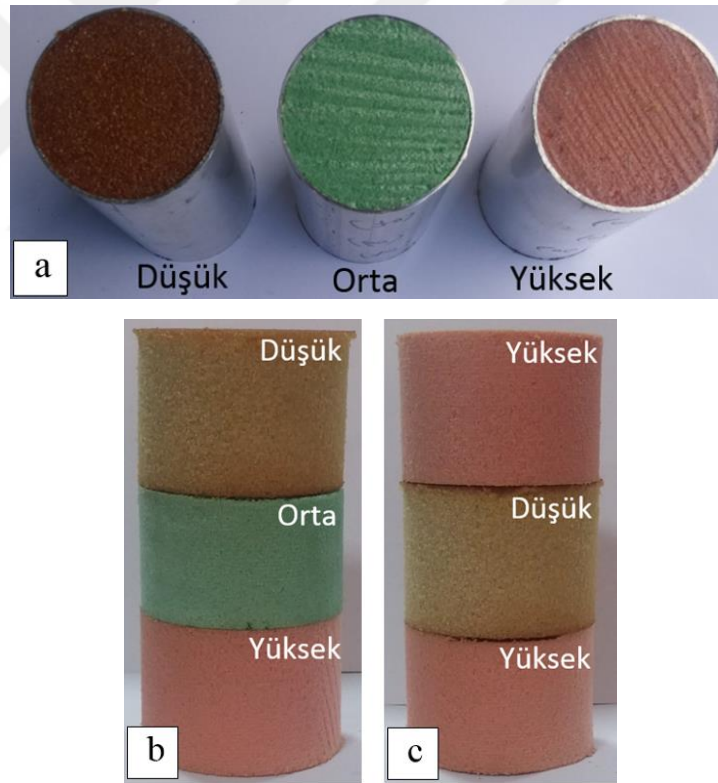
artışına katkı sağladığını ortaya koymaktadır. Bunlar köpüğün; i) eksenel yüke karşı gösterdiği direnç, ii) yanıl cidar hareketine karşı gösterdiği direnç ve iii) katlanma aşamasında içe yönelen tüp katları arasında sıkışma durumu olmak üzere üç başlıkta incelenebilir. Bu etkilerden ilki köpüğün plato değeriyle ilişkili olup, yoğunlukla orantılı olarak arttığı bilinmektedir. Ancak üçüncü etkinin köpük yoğunluğuyla belirli bir orana kadar artış gösterdiği belirli bir değerdan sonra ise düşüş trendine gireceğı söylenebilir. Nitekim bu durumla ilgili daha detaylı inceleme ve irdelemeler, ilerleyen kısımlarda farklı köpük takviye yöntemleri (radyal değışken köpük yoğunluğu) kullanılarak yapılmıştır.

Şekil 4.11.'de farklı yoğunluklardaki PVC köpüklerle içerden takviye edilmiş numunelerin deney sonrası görünümü verilmiştir. Şekilde tüpün dışında gözükten köpükler, yükün kaldırılması sonrasında köpüğün sergilediğı elastik davranıştan kaynaklanmaktadır. Kat aralarına sıkışan köpük ise tüp içerisinde kalmaktadır.



Şekil 4.11. a) 60 kg/m³, b) 80 kg/m³ ve c) 100 kg/m³ yoğunluğundaki PVC köpüklerle takviye edilmiş numunelerin deney sonrası görünümü

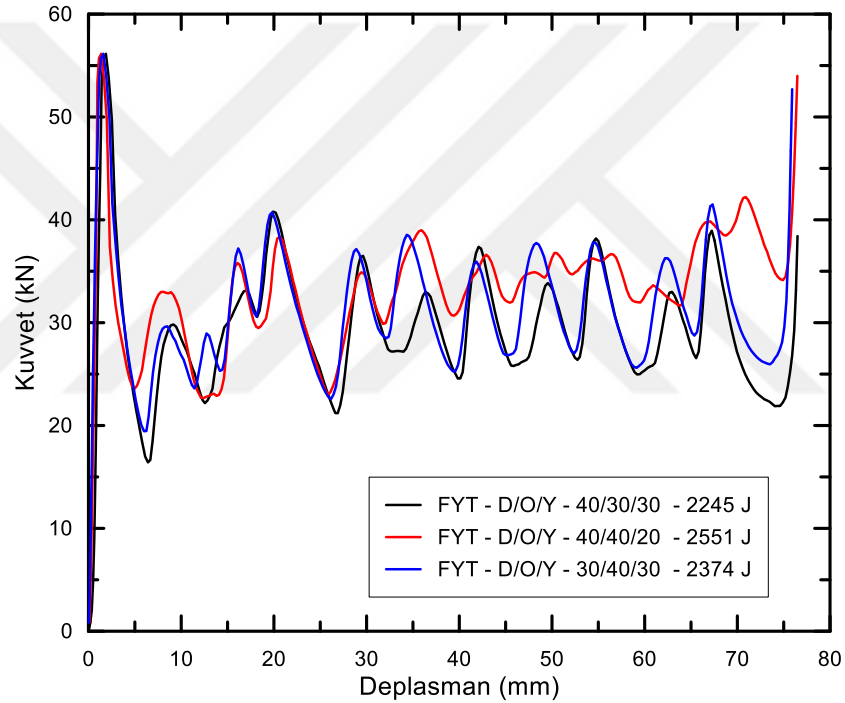
Alüminyum tüpler, hangi köpük yoğunluğunun enerji artışı üzerinde ne oranda etki ettiğinin anlaşılması amacıyla farklı köpük yoğunluklarının birlikte kullanılması şeklinde de takviye edilmişlerdir. Bu takviye türlerinden fonksiyonel derecelendirilmiş yapılı (FYT) modelde, her üç köpük yoğunluğu, yoğunluk sıralaması düşük, orta ve yüksek olacak şekilde birlikte kullanılmıştır. Köpük yoğunluk sıralaması değişmeksizin köpüklerin tabaka kalınlıkları değiştirilerek, en uygun kombinasyon belirlenmeye çalışılmıştır. Bu kapsamda kullanılan bir diğer takviye türü, iki farklı köpük yoğunluğunun üç katman olarak tüp içerisine yerleştirildiği sandviç yapılı takviye (SYT) modelidir. Ancak bu modelde, köpük yoğunlukları sıralı değil de alt ve üst tabaka aynı, orta tabaka farklı yoğunlukta olacak şekilde sıralanmıştır. Bu modelde de yine değişken parametre köpük tabaka kalınlıkları olarak belirlenmiştir. Her üç takviye modelinde kullanılan köpük dizilimi Şekil 4.12.'de verilmiştir.



Şekil 4.12. a) Tek tip yoğunluklu (TYT), b) fonksiyonel dereceli (FYT) ve c) sandviç yapılı takviye (SYT) modellerine ait köpük dizilimleri.

FYT ve SYT modellerde takviye edilmiş numunelere ait kuvvet-deplasman eğrileri Şekil 4.13.'te verilmiştir. FYT modelde D-O-Y (D: düşük, O: orta ve Y: yüksek)

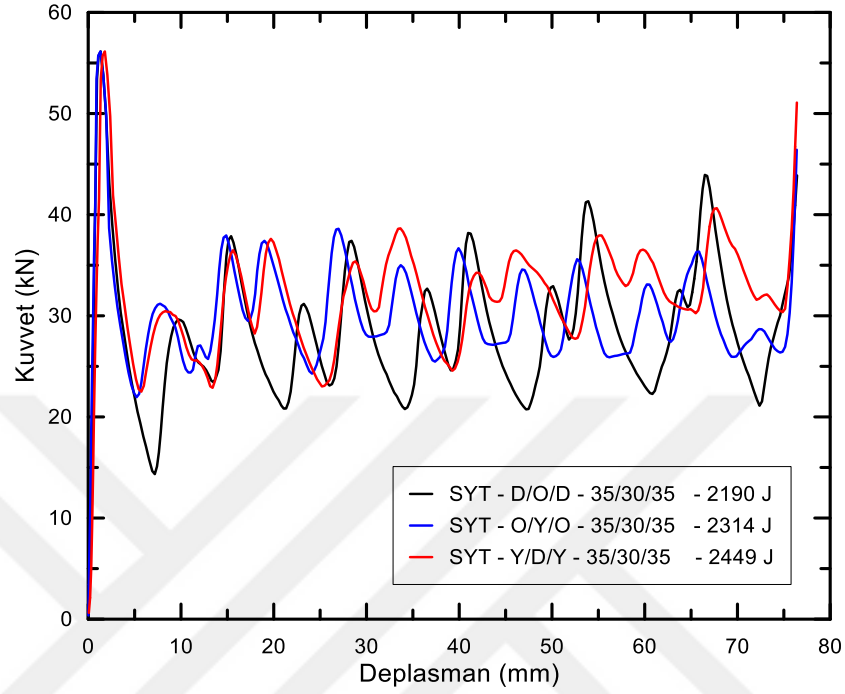
yoğunluk sırası için en yüksek enerji, TYT modelde elde edilenden daha yüksek olarak, 40-40-20 mm tabaka kalınlıklarında 2551 J olarak elde edilmiştir. Bu takviye modelindeki katlanmanın, eksenel yük direncinin daha düşük olduğu düşük yoğunluklu köpük tarafında olduğu görülmüştür. Artan deplasmanla (yaklaşık 30 mm sonra) hem eksenel hem radyal zorlanma altındaki düşük yoğunluklu köpük, tam sıkışma durumuna yaklaşmakta ve bu nedenle de yoğunluğu ve sertliği artmaktadır. Devam eden süreçte en alt katmandaki daha rijit yüksek yoğunluklu köpükle arasında kalan orta yoğunluklu köpüğü ezilmeye zorlamaktadır. Orta yoğunluk için en iyi enerji değeri, kat arasına sıkışma olayı ile daha da belirginleşmektedir.



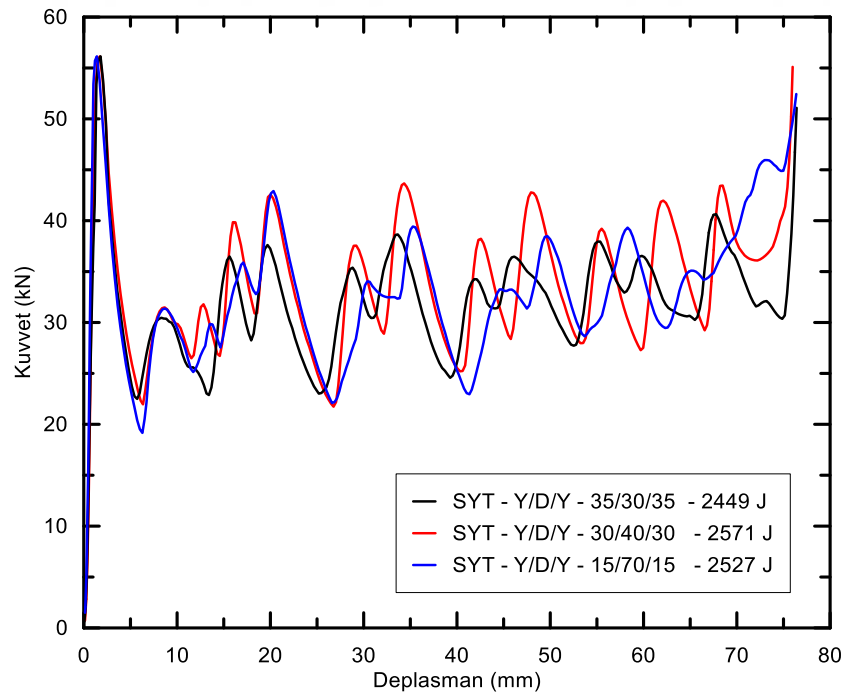
Şekil 4.13. Fonksiyonel derecelendirilmiş (FYT) köpük takviyeli tüplerin kuvvet-deplasman grafiği.

SYT modelde öncelikle aynı tabaka kalınlıklarındaki farklı köpük yoğunluk çiftleriyle deneyler gerçekleştirilmiş, en yüksek enerji değeri ortada düşük, üst ve altta ise yüksek yoğunluklu köpüğün bulunduğu durumda 2449 J olarak elde edilmiştir (Şekil 4.14a.). Bu durum neticesinde, bu köpük dizilimi kullanılarak köpük tabaka kalınlıkları değiştirilerek en yüksek enerji elde edilmeye çalışılmıştır. Yapılan deneyler neticesinde en yüksek enerji ortada 40 mm kalınlığında düşük yoğunluklu köpüğün,

üst ve altta ise 30 mm kalınlıklarında yüksek yoğunluklu köpüğün bulunduğu numunede (Y-D-Y/30-40-30) 2571 J olarak elde edilmiştir (Şekil 4.14b.).



(a)



(b)

Şekil 4.14. a) Aynı tabaka kalınlıkları ve farklı yoğunluk dizilimindeki, b) farklı tabaka kalınlıkları ve aynı yoğunluk dizilimindeki sandviç yapılı köpük takviyeli (SYT) tüplerin kuvvet-deplasman eğrileri

Tablo 4.2.'de 58 mm çaplı ($t=1,5$ mm) tüplerin TYT, FYT ve SYT modellerinde takviye edilmiş tüm numunelerin köpük tabaka kalınlıkları, absorbe edilen enerji değerleri ve özgül enerji absorbe (ÖEA) değerleri birlikte verilmiştir. TYT modelde orta yoğunluktaki köpüğün enerji değeri açısından daha tercih edilebilir olduğu görülmektedir. FYT takviyeli numuneler için orta sertlikteki köpüğün katman kalınlığındaki artış ile enerji değerinin orantılı olduğu dikkat çekmektedir (5 ve 6 numaralı kombinasyon). 5 numaralı kombinasyonla elde edilen 2551 J enerji değeri, yüksek yoğunluklu köpük kullanılan 3 numaralı kombinasyonda elde edilen enerjiden oldukça yüksek olduğu görülmektedir. TYT model için elde edilen en iyi enerji değeri (2 numaralı kombinasyon) dikkate alınır, 9-11 numaralı üç kombinasyonun tercih edilebilir olduğu görülmektedir. Ayrıca SYT modelde 10 numaralı numunenin enerji değeri daha yüksek olmakla birlikte, 9 numaralı numunedeki düşük yoğunluklu tabaka kalınlığının fazla olması, enerji verimliliği açısından daha yüksek ÖEA değeri sunmaktadır. ÖEA değerleri kapsamında takviyesiz tüpte elde edilen 25,03 değerinin TYT modelde 2 numaralı, FYT modelde 5 numaralı, SYT modelde ise 9 ve 10 numaralı numunelerde bariz bir şekilde arttığı görülmektedir. En yüksek ÖEA değeri Y-D-Y/15-70-15 köpük kombinasyonunun sahip olan 9 numaralı numunede elde edilmiştir.

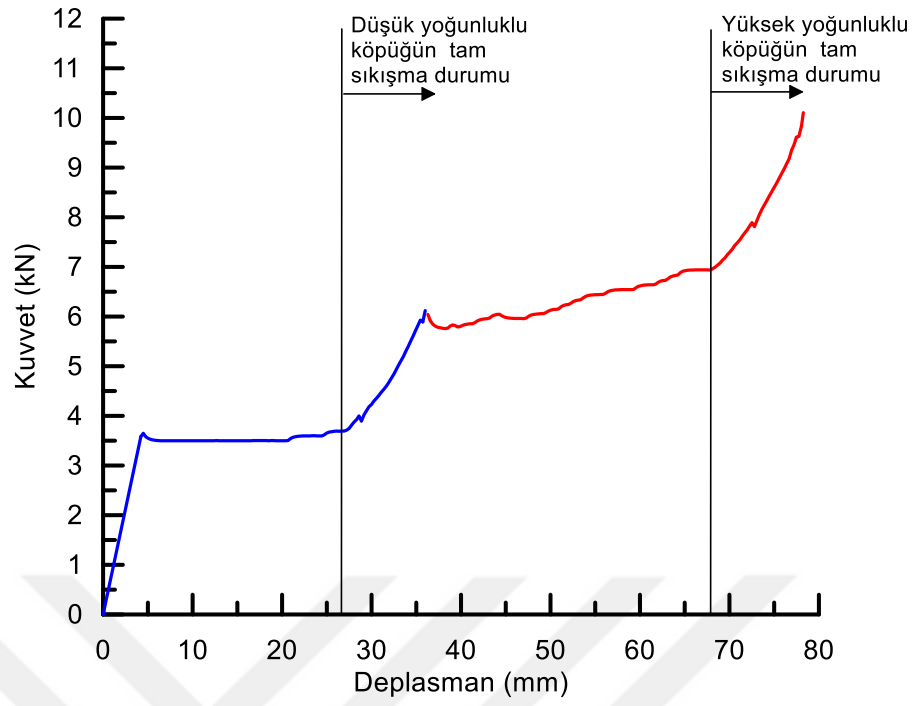
Tablo 4.2. TYT, FYT ve SYT köpük takviyesi için katman kalınlıkları ve deney sonucu edilen enerji değerleri

D=58 mm t=1,5 mm		Katman kalınlıkları (mm)			Absorbe edilen enerji (J)	Ağırlık (gr)	Özgül enerji (J/gr)
		1.	2.	3.			
	Takviyesiz	0	-	-	1805	72,0	25,0
	TYT model	1	35	30	2127	87,8	24,2
		2	35	30	2490	95,7	26,0
		3	35	30	2362	98,4	24,0
	FYT model	4	40	30	2245	93,1	24,1
		5	40	40	2551	92,8	27,4
		6	30	40	2374	93,7	25,3
	SYT model	7	35	30	2314	95,8	24,4
		8	35	30	2191	89,9	24,4
		9	15	70	2527	90,9	27,8
		10	30	40	2571	94,2	27,3
		11	35	30	2449	95,2	25,7

Not: Deney sırasında hareketli plaka "1" numaralı katman tarafında olup, katlanma da söz konusu taraftan başlamıştır.

Tüp içerisindeki köpüğün davranışını daha kolay irdeleyebilmek için, en yüksek enerjinin elde edildiği 10 numaralı numunedeki köpük kombinasyonlarının eksenel ezilme deneyi yapılmış ve elde edilen kuvvet-deplasman grafiği Şekil 4.15.'te verilmiştir. Görüleceği üzere, yükün uygulanmaya başlanmasıyla birlikte öncelikle daha düşük dayanıma sahip düşük yoğunluklu köpük deforme olmaktadır. Eğri 5-26 mm değerleri arasında düşük yoğunluklu köpüğe ait ilk plato değeri olan 3,5 kN kuvvette sabit kalmaktadır. Sonrasında yaklaşık 36 mm deplasman değerine kadar düşük yoğunluklu köpüğün tam sıkışma durumundan kaynaklı olarak eğri eğimi hızla artmakta ve 6 kN değerinde yüksek yoğunluklu köpük deformasyona başlamaktadır. Yüksek yoğunluklu köpükte tam sıkışma durumunun 7 kN değerinden sonra (yaklaşık 68 mm) gerçekleştiği de grafikten görülebilmektedir.

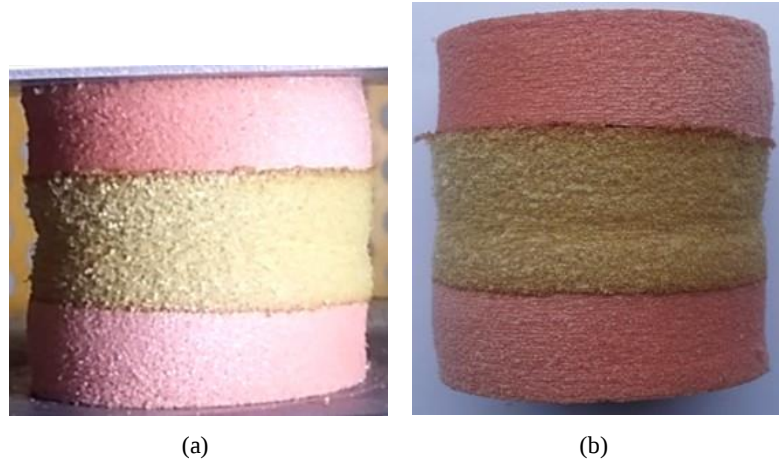
Şekil 4.16.'da verilen, köpük kombinasyonunun bazı deformasyon aşamalarına ait resimler incelendiğinde, deformasyonun alt ve üstte yer alan, yüksek yoğunluklu dolayısıyla daha rijit iki köpüğün arasındaki düşük yoğunluklu köpükte yoğunlaştığı anlaşılmaktadır. Devam eden ezilme sürecinde kalınlıklara dikkat edilecek olursa, deformasyonun ortadaki düşük yoğunluklu köpük üzerinden devam ettiği, bu köpüğün tam ezilme durumundan (bir anlamda rijitleşmesi) sonra yüksek yoğunluklu köpüklerin dönüşümlü olarak deformasyona uğradığı görülmektedir. Şekil 4.17.'de verilen köpüğün deformasyon sonrası görüntüsündeki çapraz köşelerdeki şişme veya daralma olayının 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 sıkışmasını teşvik edici bir etken olduğunu söylemek mümkündür. Dolayısıyla farklı yoğunluklu köpüklerle tasarlanmış bir sandviç yapının enerji değerinin yükselmesinin nedeni; i) deformasyonun öncelikle belirli bölgede başlatılması/yoğunlaştırılması, ii) farklı yoğunluktaki köpük geçişlerinde dışa şişme olayının gerçekleşmesi gibi etkenlere bağlanabilir.



Şekil 4.15. “10” numaralı kombinasyona ait (30/40/30) köpüklerin (a) kuvvet-deplasman grafiği



Şekil 4.16. Köpüğün deney sırasındaki deformasyon görüntüsü



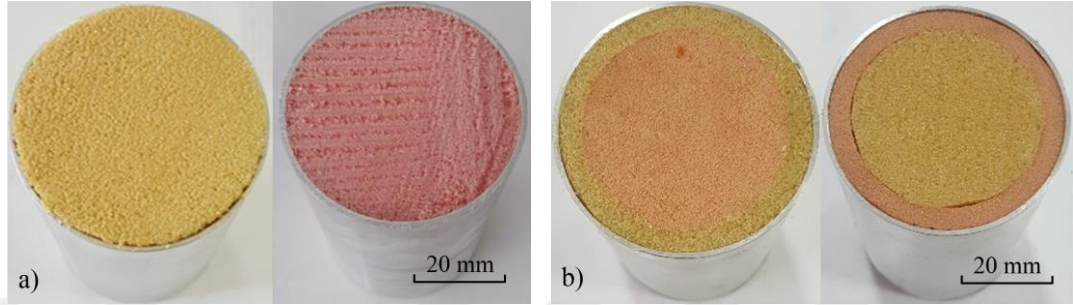
Şekil 4.17. a) Deney sırasında yük altında ve b) yük kaldırıldıktan sonra köpük katman geçişlerindeki şekil değişimi

4.4.2.1. Tüp yapı ile köpük etkileşimi

Takviye elemanı olarak kullanılan PVC köpüklerin, enerji artışına olan katkısının daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla tüpler, farklı köpük kombinasyonlarında takviye edilerek eksenel ezilme deneyine tabi tutulmuştur. Tüp yapının deformasyonu için gereken kuvvetin, köpüklerinkiyle kıyaslanmayacak derecede yüksek olması nedeniyle bu kısımda yapılan deneylerde tüpün dış çapı yaklaşık sabit tutulmak şartıyla cidar kalınlığı azaltılmıştır. Bu sayede köpüğün tüp içerisindeki etkinliğinin daha belirgin ve kolay tespit edilebilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda yapılan deneylerde, cidar kalınlığı 1,1 mm olan tüpler kullanılmıştır. Bu tüpler, CNC dik işleme merkezinde yüksek geometrik hassasiyetle işlenen silindirik ve halka şeklindeki yüksek ve düşük yoğunluklu köpüklerle, radyal yönde değişen yoğunlukta (RYDY) takviye edilmişlerdir. Numune tasarımında halkanın düşük yoğunluklu olması durumunda, silindirik köpük yüksek yoğunluklu olmakta, tersi durumunda ise yoğunluk sıralaması bunun tam tersi olmaktadır.

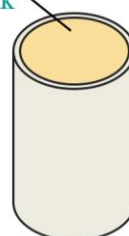
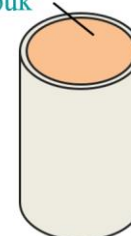
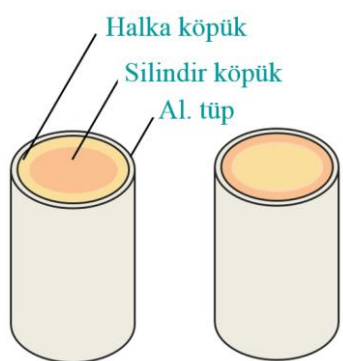
RYDY numunelerde tüp cidarıyla halka köpüğün, silindirik köpük de halka köpüğün tam temas halinde olmasına özellikle dikkat edilmiştir. Halka köpük kalınlığının belirlenmesinde tüp cidarının deformasyon esnasında içeri doğru yaptığı yönelme baz alınmıştır. Simetrik katlanmada benzer ölçülere sahip tüp için içeri yönelme uzunluğu yaklaşık 2,5 mm olarak ölçülmüştür. Bu bilgi ışığında halka köpük kalınlıkları, içeri

yönlenme miktarından düşük, yüksek ve bu değere eşit olacak şekilde 1,5 mm, 2,5 mm ve 5 mm değerlerinde belirlenmiştir. Şekil 4.18.'de TYT ve RYDY numunelere ait deney öncesi görüntüler, Tablo 4.3.'te ise bu numunelerin geometrik ölçüleri detaylıca verilmiştir.



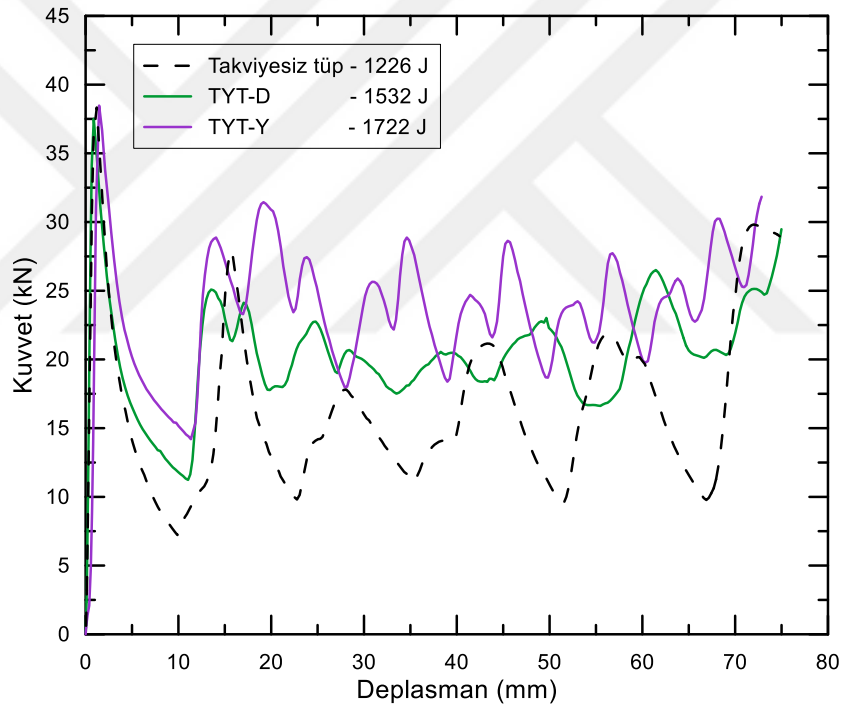
Şekil 4.18. a) TYT ve b) RYDY numunelerin deney öncesi görüntüsü

Tablo 4.3. TYT ve RYDY numunelerdeki köpüklerin ölçüleri ve takviye durumlarının şematik resimleri

Numune kombinasyonu			Takviyeli tüplerin şematik resmi	
Tek yoğunluklu takviye [TYT]		Kodlama	Düşük yoğ. köpük	Yüksek yoğ. köpük
60 kg/m ³	Diameter (mm) 56.4	TYT-D		
100 kg/m ³		TYT-Y		
Radyal yönde değişen yoğunluklu [RYDY]		Kodlama		
Halka	Kalınlık (mm)	RYDY- D/Y- X*		
60 kg/m ³	1.5			
100 kg/m ³	2.5			
	5.0			
Silindir	Dış çap (mm)			
60 kg/m ³	53.4			
100 kg/m ³	51.4			
	46.4			

*D: düşük yoğunluk, Y: yüksek yoğunluk, X: halka kalınlığı

Tüp numune (takviyesiz), sadece düşük ve sadece yüksek yoğunluklu köpüklerle takviye edilmiş tüplerin eksenel ezilme deneylerine ait kuvvet-deplasman eğrileri Şekil 4.19.'da verilmiştir. Takviyesiz tüple elde edilen enerji değerinin ve kuvvet değerlerinin köpük takviyesi ile yukarı doğru ötelendiği görülmektedir. Absorbe edilen enerjilerin TYT-D ve TYT-Y numunelerinde, takviyesiz yapıya göre sırasıyla %25 ve %40 oranında arttığı tespit edilmiştir. Burada bahsedilen TYT numunelerinden enerji değerlerinin önceki kısımda bahsedilen TYT numunelerden daha düşük olması (özdeş köpük takviyesi kullanılmasına rağmen), burada kullanılan alüminyum tüplerin cidar kalınlıklarının önceki tüplerden yaklaşık %25 oranında düşük olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.19. Takviyesiz, sadece düşük ve sadece yüksek yoğunluklu köpük takviyeli tüplere ait kuvvet-deplasman eğrileri

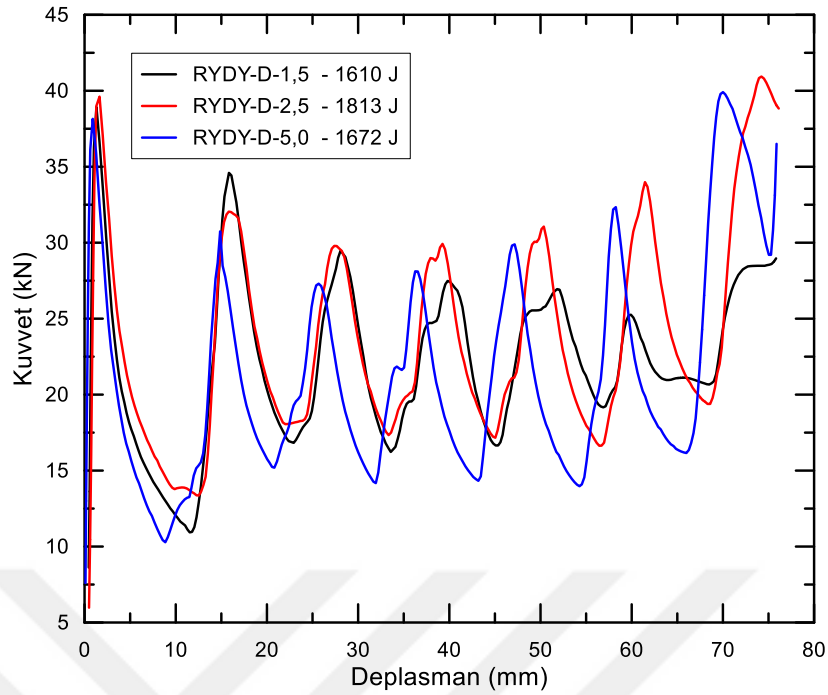
Takviyesiz tüp yapının elmas modda katlanma sergilediği, numunelerin deney sonrası görüntülerinin verildiği Şekil 4.20.'de görülmektedir ($D/t > 50$). Düşük yoğunluklu köpük kullanılan TYT-D numunesinde katlanma, karışık modda gerçekleşmiştir. Bu durum, katlanma sırasında, köpüğün içeri yönelen tüp cidarına karşı gösterdiği direncin, düşük yoğunluklu köpük ikamesinde yetersiz kaldığını ve düşük yoğunluklu köpüğün deformasyon modu üzerinde belirgin bir etkiye sahip olmadığını

göstermektedir. Yüksek yoğunluklu köpüğün kullanıldığı TYT-Y numunede, katlanma modu simetrik moda dönüşmüştür (Şekil 4.20.). Bu durum, yüksek yoğunluklu köpüğün, tüp cidarının içeri yönlenmesine karşı gösterdiği direncin daha yüksek olmasının bir sonucu olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu durum, köpüğün tüp cidar stabilitesine yaptığı katkının köpük yoğunluğuyla orantılı olarak arttığını göstermesi açısından önemlidir. Bu kapsamda yapılan bazı çalışmalarda [41,76], köpüğün cidar stabilitesine olan katkısının köpük yoğunluğuyla orantılı olarak arttığı ve katlanma modunun elmas moddan simetrik moda dönüştüğü rapor edilmiştir.



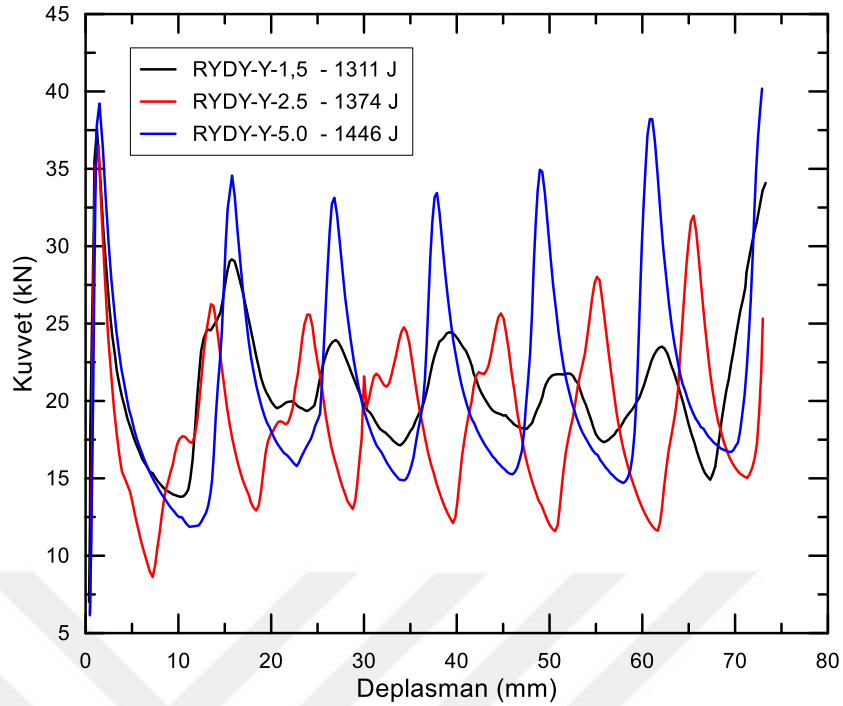
Şekil 4.20. Takviyesiz ve TYT numunelerin deney sonrası görüntüsü

Düşük yoğunluklu halka ve yüksek yoğunluklu silindirik köpükle takviye edilmiş RYDY-D numunelere ait kuvvet deplasman eğrileri Şekil 4.21.'de verilmiştir. Eğriler incelendiğinde, cidarın içeri yönlenmesine karşılık gelen alt kuvvet değerlerinin, halka köpük kalınlığıyla ters orantılı olarak değiştiği görülmektedir. Bu durum, artan düşük yoğunluklu halka köpük kalınlığıyla cidarın içeri yönlenmesinin kolaylaştığını göstermektedir. Ayrıca halka kalınlığıyla birlikte kuvvet değerlerinin yukarı doğru ötelendiği açıkça görülmektedir. En yüksek enerji, tüpün içeri yönlenme uzunluğuna eşit kalınlıktaki halkanın kullanıldığı RYDY-D-2,5 numunesinde, 1813 J olarak elde edilmiştir.



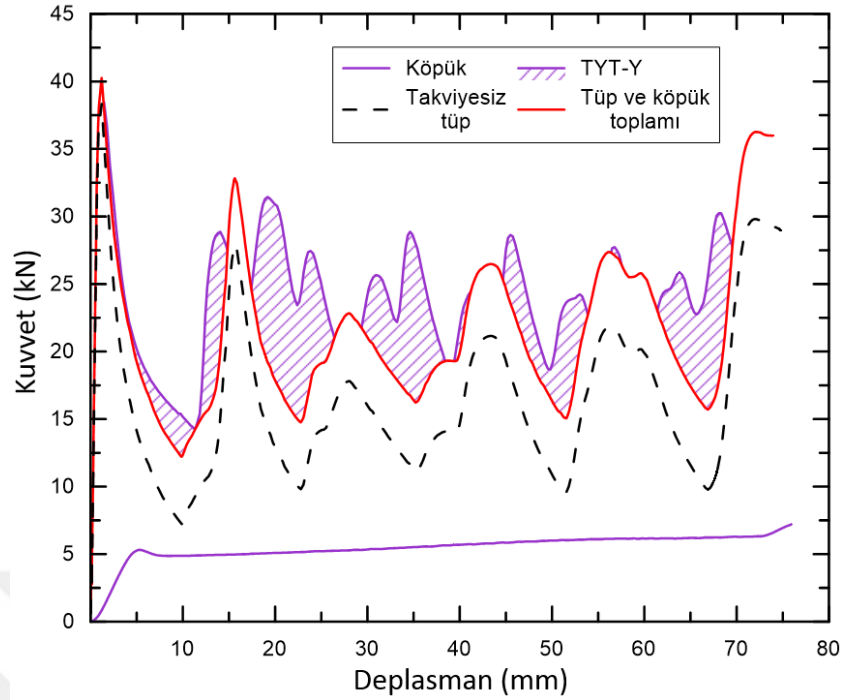
Şekil 4.21. Düşük yoğunluklu halka ve yüksek yoğunluklu silindirik köpüklerle takviye edilmiş RYDY-D numunelere ait kuvvet deplasman eğrileri

Şekil 4.22., yüksek yoğunluklu halka ve düşük yoğunluklu silindirik köpüğün birlikte kullanıldığı RYDY-Y numunelerinin aksenal ezilme deneyleri neticesinde elde edilen kuvvet-deplasman eğrilerini içermektedir. Eğriler incelendiğinde, artan halka kalınlığı ile ilk pik kuvveti ve absorbe edilen enerji değerinin arttığı görülmektedir. Bu durum, daha yüksek aksenal ve radyal dirence sahip yüksek yoğunluklu köpüğün kesitte artan oranı ile açıklanabilir. Ayrıca halka kalınlığının artmasıyla, diğer pik kuvvetlerin de ilk pik kuvvet değerine yaklaştığı görülmektedir.



Şekil 4.22. Yüksek yoğunluklu halka ve düşük yoğunluklu silindirik köpüklerle takviye edilmiş RYDY-Y numunelere ait kuvvet deplasman eğrileri

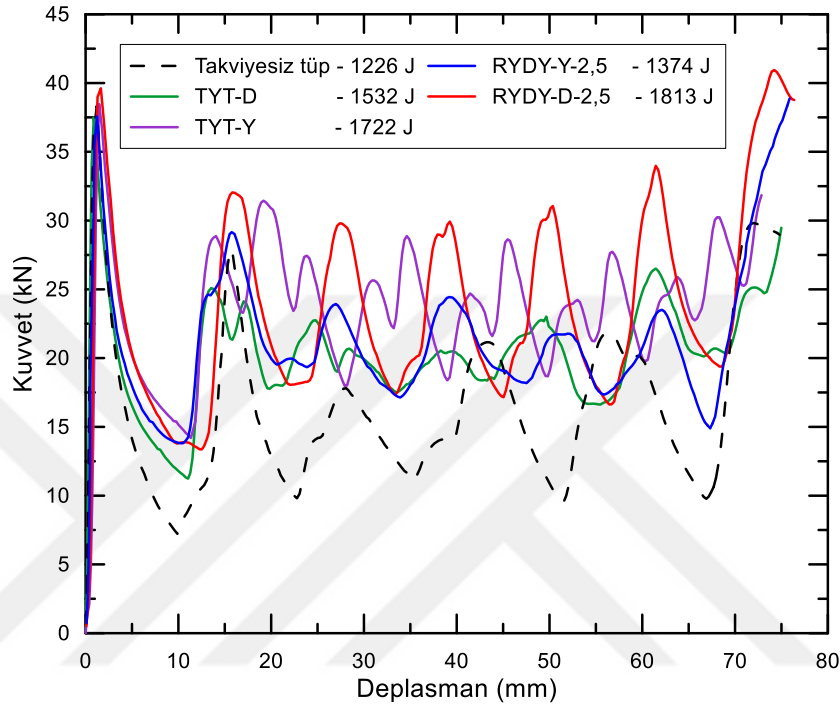
Tüp yapı ile köpük arasındaki etkileşimin enerji artışına olan etkisini daha açık bir şekilde gösterebilmek için, takviyesiz tüp, TYT-Y numune ve bu numune de kullanılan köpüğün aksenal ezilme değerleri aynı grafikte birlikte verilmiştir. Şekil 4.23.'te verilen bu grafikte, takviyesiz tüp ile köpüğün kuvvet değerlerinin cebirsel toplamı neticesinde elde edilen eğri de verilmiştir. Bu sayede tek başına tüpün ve köpüğün absorbe ettikleri enerjilerin toplamının, köpüğün tüp içerisinde kullanılma durumunda elde edilen enerjiden daha düşük olduğu ortaya çıkmıştır. Bu durum köpüğün, hem aksenal ve radyal zorlanmalara karşı gösterdiği dirençle tüp cidarının stabilitesine sunduğu katkı, hem de önceki kısımlarda bahsedilen, köpüğün içeri yönlenen tüp katları arasına sıkışma etkisinin toplam bir neticesi olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 4.23. Tüp cidarıyla köpük arasındaki etkileşimin kuvvet değerlerine etkisi

Takviyesiz tüpün, TYT-D/Y ve RYDY-D/Y-2,5 numunelerinin kuvvet-deplasman eğrileri, köpük yoğunluğunun absorbe edilen enerji üzerindeki etkisini göstermek için Şekil 4.24.'te birlikte verilmiştir. Deney sonuçlarından, radyal değişen köpük diziliminde uygun kombinasyonla enerjinin artabileceğinin yanı sıra kötü tasarlanmış bir dizilimde de çok düşük değerler alabileceği görülmüştür. Örneğin, RYDY-Y-2,5 için düşük yoğunluklu silindirik köpüğün varlığı, TYT-Y'ye kıyasla düşük eksenel direncinin bir sonucu olarak enerjiyi 1381 J değerine düşürmüştür. Düşük yoğunluklu halka köpük bulunan RYDY-D-2,5 numunede, eksenel direnç anlamında bir miktar kayıp olsa bile enerji açısından üstün performans sunmaktadır. Bu durum yukarıda bahsedilen, düşük yoğunluklu halka köpüğün tüp cidarı ile etkileşimi ile açıklanabilir. İçe yönlenen katlar arasında sıkışan köpüğün enerji değerine etkisi bu numunede daha açık bir şekilde görülmektedir. Ayrıca deformasyon sonrası iç ve dış çapları ölçülen TYT-D/Y numunelerin ölçülerinde farklılıklar olduğu da gözlenmiştir. Düşük yoğunluklu köpük takviyesinde iç çap değerinin yüksek yoğunluklu köpük takviyesine göre daha küçük olduğu (sırasıyla 51,44 ve 52,41), dolayısıyla cidarın köpüğe daha fazla battığı tespit edilmiştir. Bu durum içe yönlenen katlar arasında sıkışan köpük miktarının daha yüksek hacimde olacağını, dolayısıyla bu bölgede sıkışan köpüğün

enerji artışına daha fazla katkı sunacağını göstermektedir. Literatürde radyal yönde yoğunluğu değiştirilmiş köpük takviyeli numuneler üzerine yapılmış bir çalışmaya ulaşamamış olmakla birlikte, köpük yoğunluğunun cidar yönlenmesini etkilediğine dair bazı çalışmalara rastlamak mümkündür.



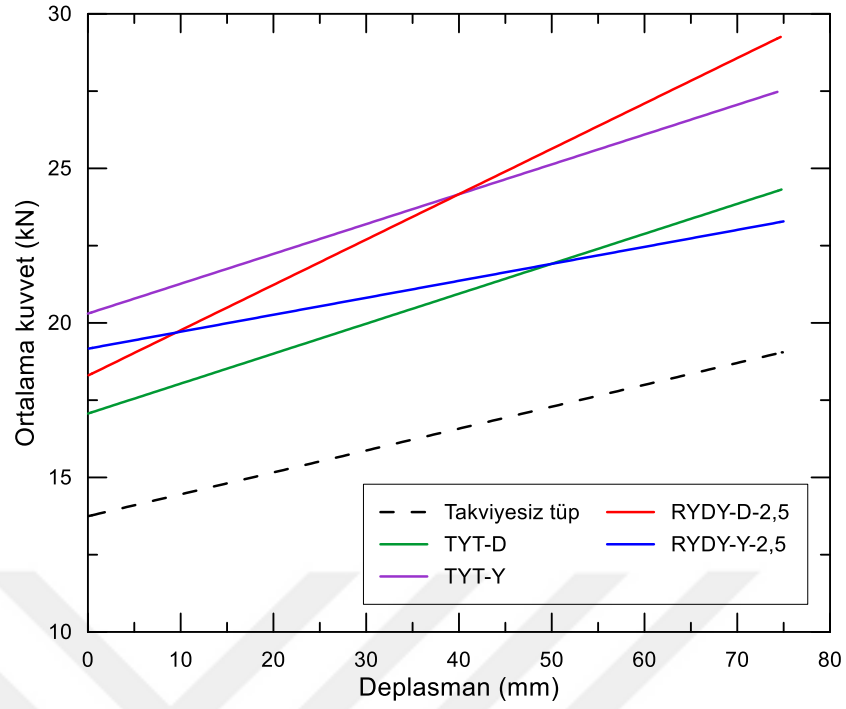
Şekil 4.24. Takviyesiz tüpün, TYT-D/Y ve RYDY-D/Y-2,5 numunelere ait kuvvet-deplasman eğrileri

Şekil 4.24.'te verilen kuvvet-deplasman eğrilerinin ortalama kuvvet değerleri hesaplanmış ve Şekil 4.25a.'da deplasmana bağlı olarak değişimleri elde edilmiştir. Şekilden, ortalama kuvvet eğrilerinin eğimlerinin farklı olduğu açıkça görülmektedir. Ayrıca ortalama kuvvetlerin, takviyesiz tüpün ortalama eğrisine oranlanmasıyla elde edilen eğriler de Şekil 4.25b.'de verilmiştir. Bu kapsamda elde edilen her bir eğri, $(F = F_0 + \alpha d)$ şeklindeki genel bir denklemle tanımlanabilir. Burada F_0 değeri eksenel ezilme direncini, α değeri ise eğri eğimini temsil etmekte olup içe yönelen tüp katları arasında sıkışan köpük miktarı ile ilişkilidir. Eğriler incelendiğinde iki farklı eğilimin ortaya çıktığı görülebilir. Bunlar; i) nispeten yüksek F_0 değerlerindeki negatif eğime sahip eğriler ve ii) nispeten düşük F_0 değerlerindeki pozitif bir eğime sahip olanlar. Görüleceği üzere F_0 yüksek yoğunluklu halka veya silindirik köpük kullanılması durumunda daha yüksek bir değer almaktadır. Örnek olarak, TYT-D numunesinde

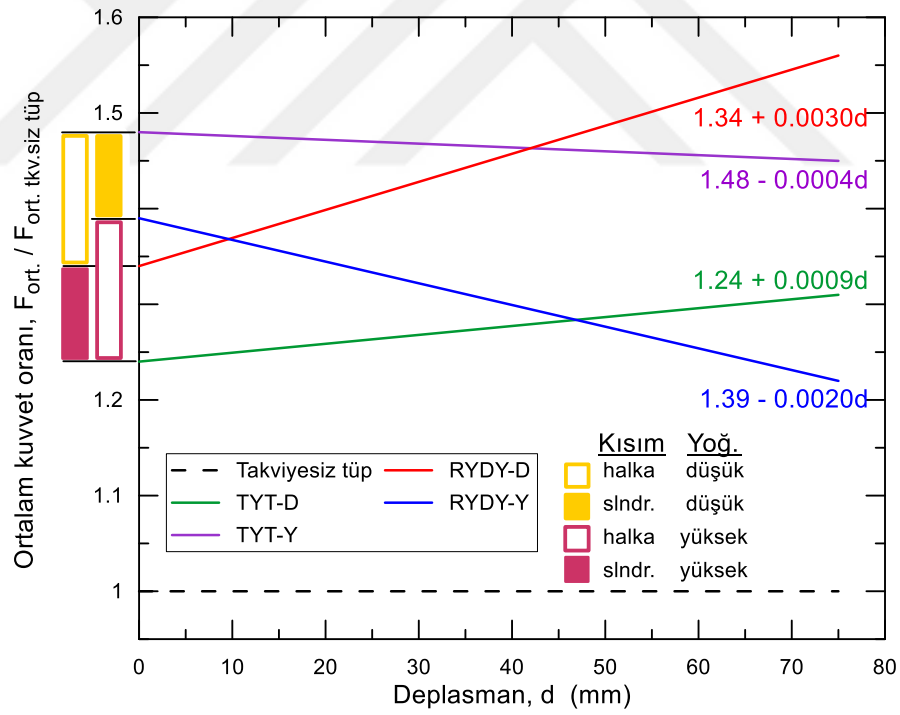
elde edilen en düşük F_0 değeri (1.24), yüksek yoğunluklu silindir kullanılan RYDY-D-2,5 numunesinde 1.34 değerine çıkmaktadır. Her ne kadar tüp cidarı ile temas halinde olan köpük yoğunluğu her iki numunede aynı olsa da, yüksek yoğunluklu silindirik köpük nedeniyle absorbe enerjide bir fark ortaya çıkmaktadır. Benzer şekilde, F_0 değerinin, RYDY-Y-2,5 numunesinde, yüksek yoğunluklu halka köpük sayesinde TYT-D numunesinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Benzer bir ilişki TYT-Y ve RYDY-D ile TYT-D ve RYDY-Y numune çiftlerinde de görülebilir.

Düşük yoğunluklu halka köpük bulunan RYDY-D ve TYT-D numunelerinde tüp cidarıyla etkileşim halinde olan köpük yoğunluğu aynı olsa da, TYT-D numunesinin eğiminin daha yüksek olması ilginç bir örneklik teşkil etmektedir. Bu davranış, tüp köpük etkileşiminin şiddetiyle alakalıdır. RYDY-D numunesinde köpük tüp cidarı ile daha yüksek yoğunluğa sahip silindirik köpük arasında sıkışmaktadır. Dolayısıyla bu bölgedeki köpük, tam sıkışma bölgesine TYT-D numunesinden daha önce girmekte ve enerji artışına daha fazla katkı sunmaktadır.

Şekil 4.25c.'de bu numunelere ait ezilme kuvvet verimi (EKV) eğrileri verilmiştir. EKV, enerji absorbe edici yapılarda ilk pik kuvvetin ortalama kuvvete oranı olarak kullanılan bir parametredir. Bu çalışmada, ortalama kuvvet değerleri deplasmana bağlı olarak değiştiğinden sabit bir EKV değerinden bahsetmek mümkün değildir. Dolayısıyla, bu numunelerdeki EKV değeri her bir numunedeki en yüksek pik kuvvet değerinin, ortalama kuvvetin minimum ve maksimum değerlerine (Şekil 4.25a.) oranı olarak hesaplanmıştır.

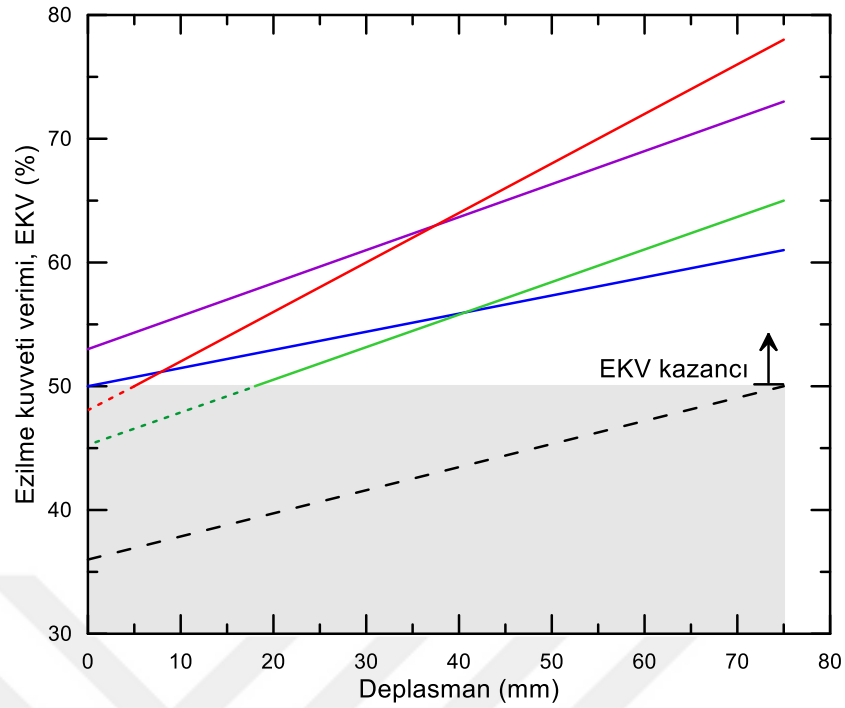


(a)



(b)

Şekil 4.25. Takviyesiz tüp, TYT-D/Y ve RYDY-D/Y-2,5 numunelerinin a) deplasmana bağlı ortalama kuvvet eğrileri, b) ortalama kuvvetlerin takviyesiz tüpün ortalama eğrisine oranı ve c) bu numunelerin ezilme kuvvet verimi eğrileri (EKV)

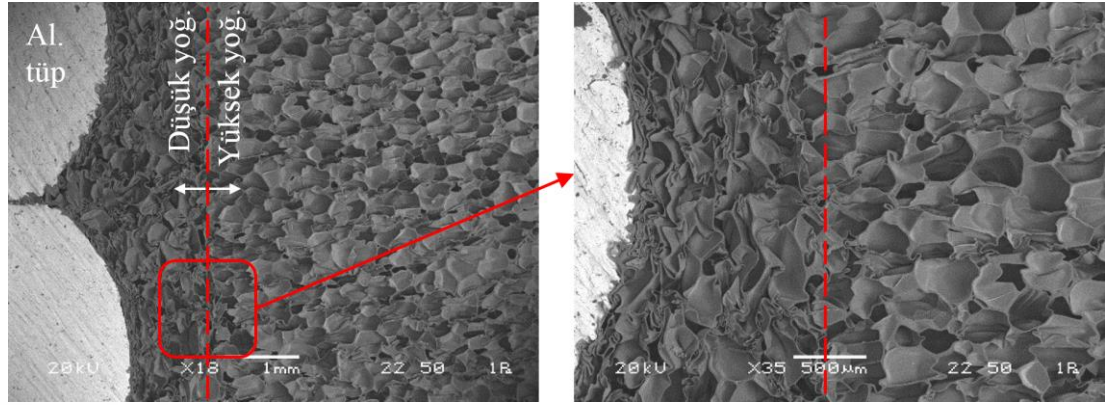


(c)

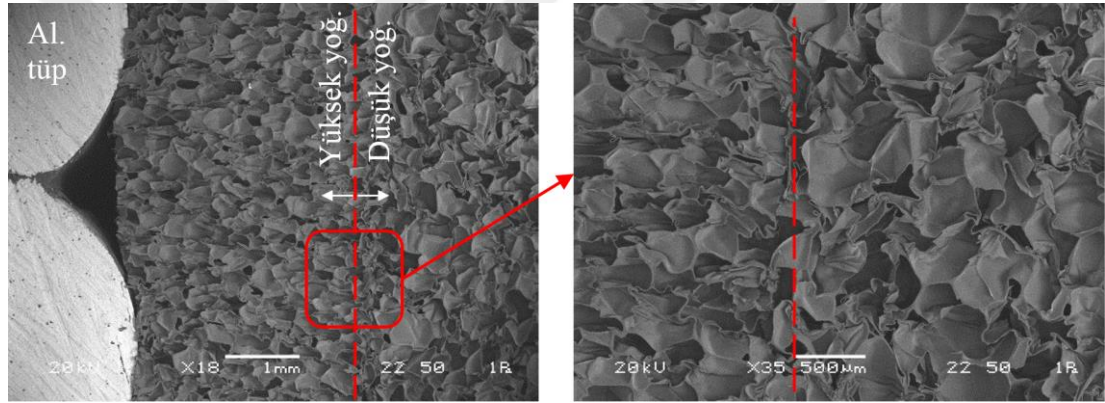
Şekil 4.25. (Devamı)

Eksenel ezilme sonrası numunelerde meydana gelen deformasyonların daha açıkça görülebilmesi açısından, RYDY-D/Y-2,5 numunelerinin SEM görüntüleri alınmıştır. Numuneler alt ve üst plakalar arasında eksenel olarak ezilmeye tabi tutulmuş ve deney sonrasında bu iki plaka birbirlerine cıvata somun yardımıyla bağlanmışlardır. Buna rağmen, eksenel yükün kaldırılmasıyla köpüklerde bir miktar geri yaylanma durumu oluşmuştur. Bu kapsamda elde edilen numune görüntülerindeki deformasyon durumunun çok küçükte olsa azaldığı göz önünde bulundurulmalıdır. Köpüklerin Şekil 4.26.'da verilen SEM görüntüleri incelendiğinde içe yönelen tüp cidarı ile köpükler arasındaki etkileşim daha açık bir şekilde ortaya çıkmaktadır. RYDY-D numunesinde köpüğün tüp katları arasında yüksek oranda sıkıştığı, bir anlamda çok eksenli ezilmeye maruz kaldığı, bu bölgedeki köpük hücrelerinde meydana gelen deformasyonun şiddetiyle de görülebilir. Ayrıca yüksek yoğunluklu silindir ile tüp arasında kalan düşük yoğunluklu halkanın, silindirik köpükten daha yüksek oranda deforme olduğu da açıktır. Buna mukabil, RYDY-Y numunesinde, yüksek yoğunluklu halkanın silindirik köpükle neredeyse aynı oranda deforme olduğu (hatta bir miktar daha az

deforme olduğu) ve kat arasına sıkışmanın çok daha düşük mertebelerde kaldığı dikkat çekmektedir.



(a)

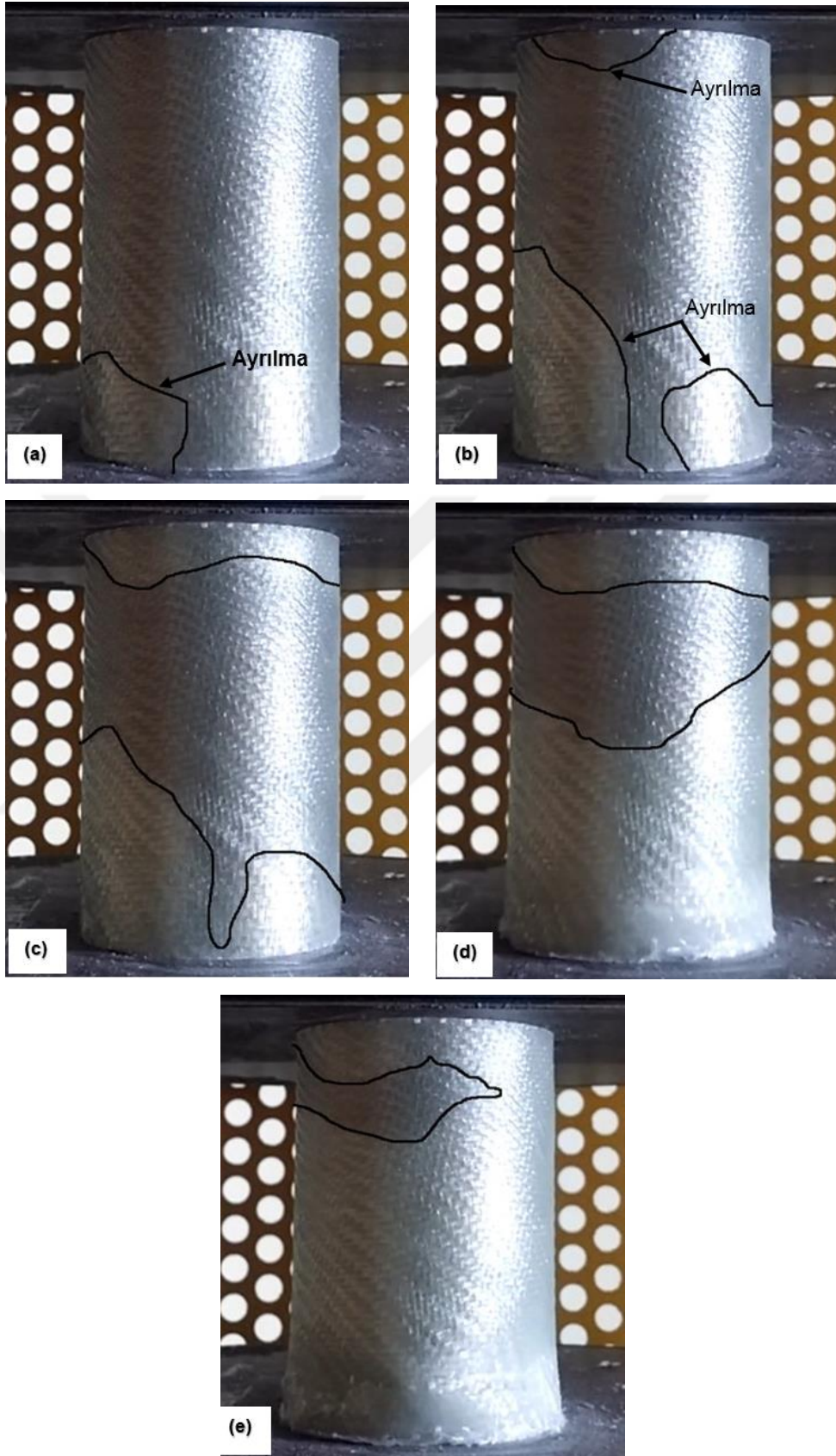


(b)

Şekil 4.26. a) RYDY-D-2,5 ve b) RYDY-Y-2,5 numunelerine ait SEM görüntüleri

4.4.3. Dışarıdan takviyeli yapılara ait deney sonuçları

Bu grup deneylerde alüminyum tüpler, dışarıdan cam ve karbon elyaf kullanılarak takviye edilmişlerdir. Farklı sarım sayılarındaki cam elyaf takviyeli numunelerin aksenal ezilme deneyi sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri Şekil 4.27.'de verilmiştir. Grafikte gereksiz karmaşıklığa neden olmamak için her numune grubundan, ortalama davranışı sergileyen sadece birer temsili eğriye yer verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere elyaf katkısı F_{maks} değerini, sarım sayısı ile ilişkili olarak ciddi oranda artırmaktadır. Buna mukabil F_{ort} değerindeki değişimin iki kat sarım sayısı için neredeyse aynı kaldığı söylenebilir. F_{maks} değeri tüp yapının cidar stabilitesi

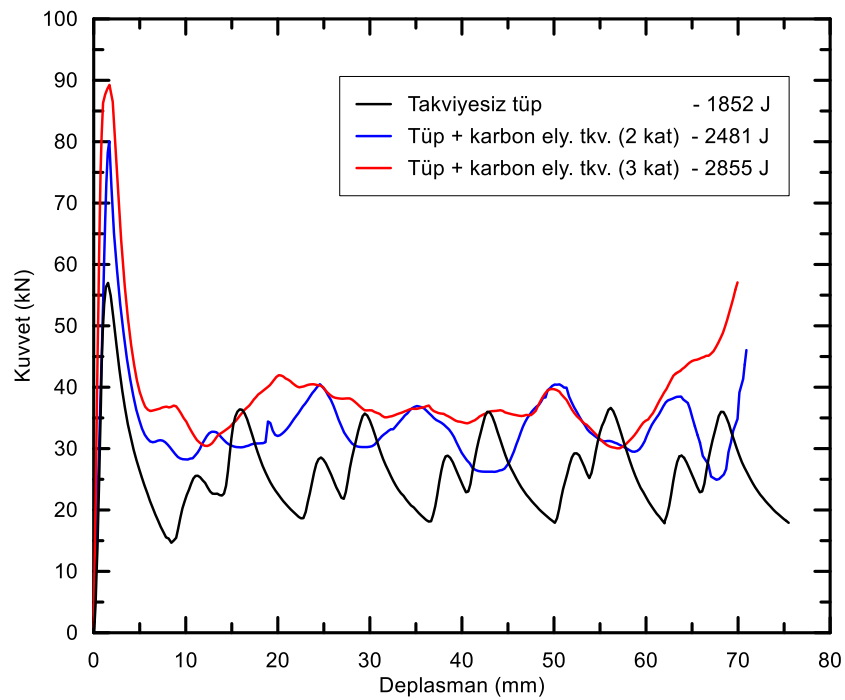


Şekil 4.28. Eksenel yük altındaki cam elyaf takviyeli numunenin ara yüzeyinde hasar oluşumu (gerilme beyazlığı-stress whitening)



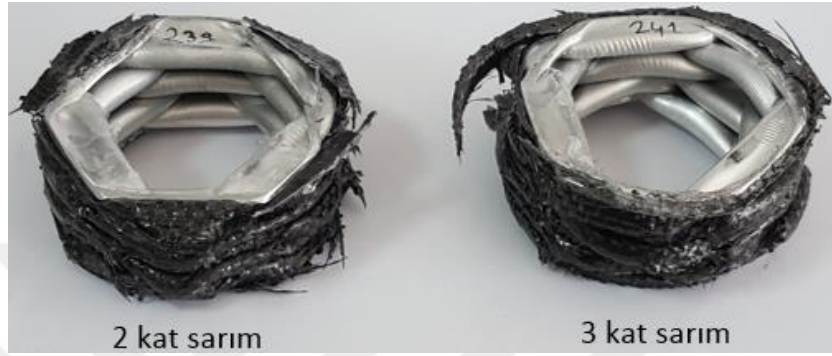
Şekil 4.29. Özdeş iki tüpte dışarıdan yapılan takviyenin katlanma moduna olan etkisi

Şekil 4.30.'da karbon elyaf sarım sayıları farklı olan numunelere ait kuvvet-deplasman eğrileri görülmektedir. Eğriler incelendiğinde, F_{ort} değerindeki sarım sayısına bağlı değişim dışında, F_{maks} değerinde bir artış olduğu ancak bu artışın cam elyaf takviyesi durumuna göre daha düşük mertebelerde kaldığı görülebilmektedir. Buna ek olarak sarım sayısının, cam elyaf takviyesinin aksine, bu grup numunelerde F_{ort} kuvvet üzerinde belirgin bir etkisinin olduğu söylemek mümkün değildir. Bu kapsamda absorbe edilen enerji değerleri de birbirlerine oldukça yakın olduğundan iki kat sarım yapılan numunenin düşük ağırlığı nedeniyle tercih edilebilir olduğu söylenebilir.



Şekil 4.30. 2 ve 3 kat karbon elyaf sarılmış alüminyum tüplerin kuvvet-deplasman eğrileri

Şekil 4.31.'de iki ve üç kat karbon elyaf sarılmış tüplerin eksenel ezme sonrası görüntüleri verilmiştir. Her iki durumda da takviyeli tüplerin elmas modda katlandıkları görülmektedir. Ancak üç kat elyaf sargılı tüplerle yapılan bazı deneylerde, elyaf ve tüp yüzeyindeki etkileşimin iki kat sarımlı numunelere göre daha yüksek olması neticesinde alüminyum tüplerde yırtılma gözlenmiştir.

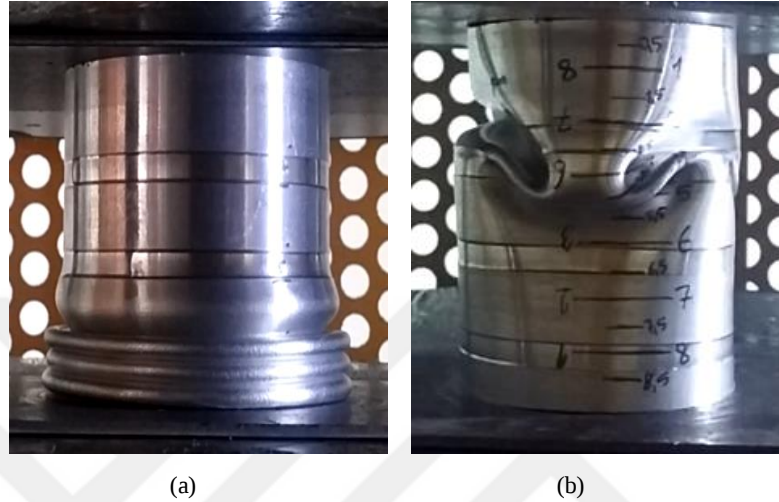


Şekil 4.31. 2 ve 3 kat karbon elyaf sarılmış alüminyum tüplerin deney sonrası görüntüleri

4.4.4. Çevresel cidar ezme işlemi uygulanmış tüp yapılara ait deney sonuçları

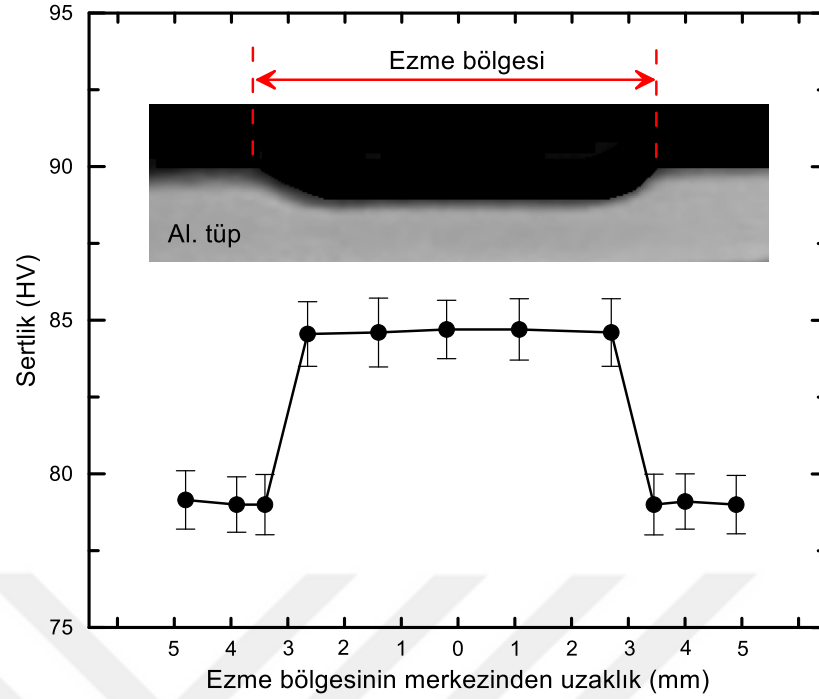
Cidar ezme işleminde öncelikle, deneysel çalışmada kullanılan tüpler için en uygun ezme şiddeti/derinliği belirlenmiştir. Bu kapsamda yapılan ön deneylerde, tüplere 0,20 mm ve 0,30 mm başta olmak üzere farklı ezme derinlik değerleri tatbik edilmiştir. Cidar ezme işleminin düzgünlüğü i) cidar ezme işlemi sırasında tüp cidarında çatlak oluşmaması, ii) cidarı ezilmiş tüpün düzenli katlanması ve katlanma sırasında erken hasarlanmaması kriterleri üzerinden kontrol edilmiştir. Ön deneyler neticesinde, 0,20 mm ezme değeri için tüp cidarında gerek ezme işlemi sırasında gerekse eksenel yük altında herhangi bir hasar (çatlak, yırtılma) oluşmamıştır. Buna mukabil ezmenin daha şiddetli uygulandığı 0,30 mm değerinde ise tüp cidarının bazı kısımlarında cidar ezme işlemine bağlı kılcal çatlaklar ve eksenel yük altında erken hasarlanmalar (cidarda yırtılmalar) olduğu gözlenmiştir. Diğer taraftan 0,20 mm'den daha düşük değerlerde tüpün katlanmasında olumsuz bir durumla karşılaşılmamış olmasına rağmen, absorbe edilen enerji değerlerinin yetersiz kalması, 0,20-0,30 mm aralığında ise katlanma davranışının düzgün olmaması nedeniyle, ideal ezme derinliği 0,20 mm olarak seçilmiştir. Şekil 4.32.'te sırasıyla 0,20 ve 0,30 mm ezme şiddetinde çevresel ezme işlemi uygulanmış numunelere ait deformasyon durumu verilmiştir. Şekil

incelendiğinde 0,30 mm ezme derinliğinde, 0,20 mm değerinde elde edilen düzgün katlanmanın aksine bir yığılma durumunun ortaya çıktığı görülmektedir. Düzgün bir katlanmanın oluşmaması, absorbe edilen enerji değerini de olumsuz olarak etkilemektedir.



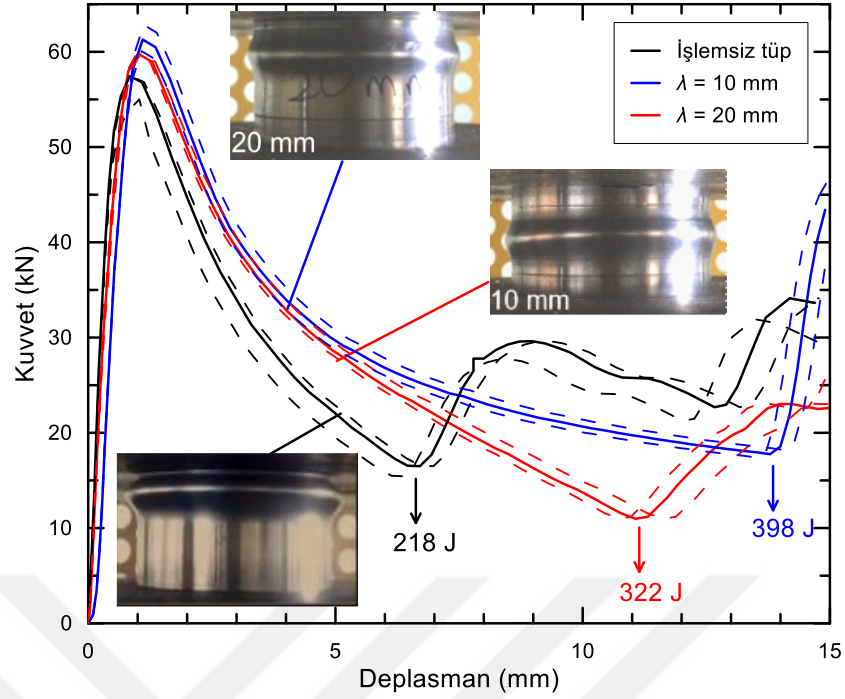
Şekil 4.32. a) 0,20 mm ve b) 0,30 mm ezme şiddetinde çevresel ezilmiş numunelerin aksenal yük altındaki deformasyon davranışları

Ezme bölgelerindeki plastik şekil değişimi neticesinde bu bölgelerdeki dayanım artışı sertlik değerindeki artışla kendini göstermektedir. Ezme bölgesine ait mikro sertlik ölçüm sonuçları Şekil 4.33.'te verilmiştir. Grafikten de görüleceği üzere alüminyum tüplerin yaklaşık 79 HV (yaklaşık 12 Webster sertliğe eşit) olan sertlikleri, ezme işlemi uygulanması neticesinde 85 HV seviyelerine çıkmaktadır.



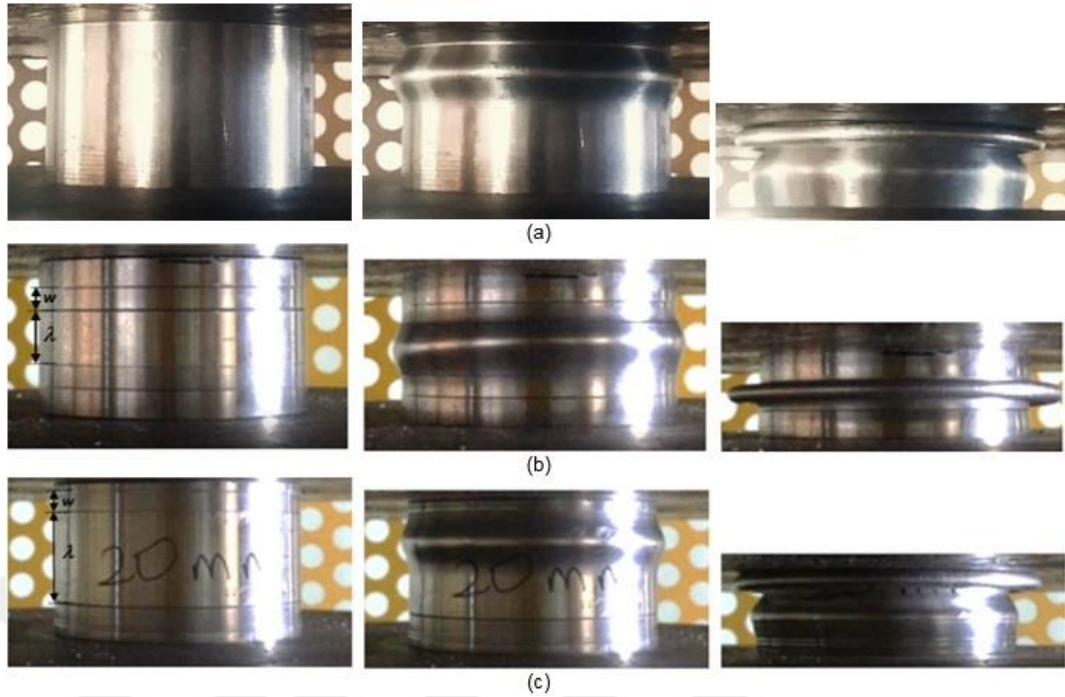
Şekil 4.33. Ezme işlemi uygulanan tüpün cidarında meydana gelen sertlik değişimi

Ezme bölgeleri arası mesafeyi gösteren λ değerinin (Şekil 3.15.), deformasyon davranışına ve absorbe edilen enerji değerine etkisini belirlemek amacıyla, 34 mm uzunluğunda ve farklı λ değerlerine sahip özdeş alüminyum tüplere ait deney sonuçları Şekil 4.34.'te verilmiştir. Grafikteki kesikli çizgiler, her bir grup için eğri saçılım aralığını göstermektedir. Şekilden görüleceği üzere farklı λ değerleri, tüp yapının kuvvet değerlerinde ve katlanma deplasmanında farklılıklara yol açmaktadır. Serbest burkulma boyunun ezme bölgeleri tarafından kısıtlanması, ilk pik kuvvetlerinin, ezme işlemi uygulanmamış tüplerden daha yüksek olmasına neden olmaktadır. Bu farklılık, $\lambda=10$ mm olan numunede, işlem uygulanmamış tüpten yaklaşık %7 daha yüksek olarak hesaplanmıştır. Kuvvet eğrilerindeki farklılık, devam eden katlanma sürecinde de kendini göstermekte ve alt kuvvet değerleri azalan λ değeriyle sağa doğru ötelenmektedir. Dolayısıyla cidarda kat oluşumunun nispeten daha yavaş gerçekleştiği, bu davranış neticesinde, absorbe edilen enerjinin kısa λ değerine sahip tüpte, işlem uygulanmamış tüpe göre %82 daha yüksek olması tercih edilme noktasında daha avantajlı olduğu söylenebilir.



Şekil 4.34. Ezme işlemi uygulanmamış ve farklı λ değerlerinde ezme işlemi uygulanmış kısa numunelere ait kuvvet-deplasman eğrileri

Şekil 4.34.'te eğrileri verilmiş numunelerin deformasyon aşamalarına ait detay görüntüleri Şekil 4.35.'te verilmiştir. Şekil 4.35a.'da verilen cedar ezme işlemi uygulanmamış tüpün, üst uca yakın bir yerde katlanmaya başlayarak devam ettiği ancak değişen λ değeriyle birlikte ilk katlanma bölgesinin de değiştiği gözlenmiştir. Serbest burkulma uzunluğunun, 10 mm olduğu numunede ilk katlanma numunenin tam orta noktasındayken, 20 mm olduğu numunede ise yine ezme bölgeleri arasında, ancak nispeten üst noktada oluştuğu görülmüştür. Bu durum, cedar ezme işlemiyle dayanımı artmış bölgelerin aksenal yüke karşı daha fazla direnç göstermesi ve bu bölgelerin daha zor burkulması neticesinde ortaya çıkmaktadır. Kuvvet değerleriyle birlikte değerlendirildiğinde kısa burkulma boyu için gerekli burkulma kuvvetinin beklendiği gibi daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.35. Ezme işlemi uygulanmamış ve farklı λ değerlerinde ezme işlemi uygulanmış kısa numunelerin deformasyon davranışları

Kısa tüpler, deformasyon sonrası nihai katlanma durumlarının irdelenmesi amacıyla tüp uzunluğu doğrultusunda kesilmiş ve görüntüleri Şekil 4.36.'da verilmiştir. Şekilde gösterilen iç ve dış çap değerleri Tablo 4.4.'te detaylı olarak verilmiştir. Veriler incelendiğinde cidar ezme işleminin içe ve dışa yönlenme oranlarını ciddi oranda değiştirdiği anlaşılmaktadır. Ezme işlemi uygulanmamış tüpte dışa yönlenme oranı yaklaşık %66 iken, $\lambda=10$ mm ve $\lambda=20$ mm olan tüplerde bu oran sırasıyla yaklaşık %83 ve %75 değerlerine çıkmıştır. Kısa tüplerde görülen yönlenmeler arasındaki bu fark, takviye işlemleri için önemli bilgiler vermektedir. Bu yönlenme oranları göz önünde bulundurulduğunda cidar ezme işlemi uygulanmış bir tüpü içeriden takviye etmek yerine dışarıdan takviye etmenin enerji değerleri üzerinde daha etkili olacağı sonucuna ulaşılmaktadır.



(a)



(b)



(c)

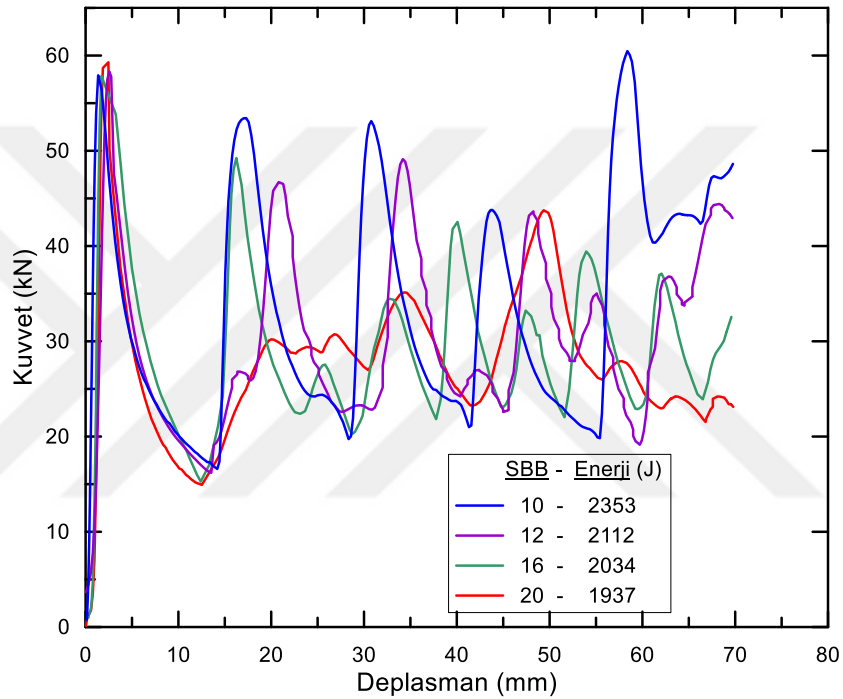
Şekil 4.36. a) Cidar ezme işlemi uygulanmamış, b) $\lambda=10$ mm ve c) $\lambda=20$ mm numunelerin deney sonrası kesit görüntüleri (D_i ve d_i : deformasyon öncesi, D_f ve d_f : deformasyon sonrası sırasıyla dış ve iç çaplar)

Tablo 4.4. Cidar ezme işlemi uygulanmamış, $\lambda=10$ mm ve $\lambda=20$ mm numunelerinin deney öncesi ve sonrasın ait dış ve iç çap değerleri (D_i ve d_i : deformasyon öncesi, D_f ve d_f : deformasyon sonrası sırasıyla dış ve iç çaplar)

	D_i (mm)	d_i (mm)	D_f (mm)	d_f (mm)	İçe yönlenme (%)	Dışa yönlenme (%)
İşlem uygulanmamış	58,5	55,5	68,6	50,4	34,2	65,8
$\lambda=10$ mm	58,5	55,5	72,0	53,6	17,5	82,5
$\lambda=20$ mm	58,5	55,5	70,2	51,6	25,3	74,7

Şekil 4.37.'de farklı λ değerlerinde cidar ezme işlemi uygulanmış 90 mm uzunluğa sahip çoklu cidar ezme işlemi uygulanmış özdeş numunelerin, aksenal ezilme deney sonuçlarına ait kuvvet-deplasman eğrileri verilmiştir. Grafik incelendiğinde, serbest

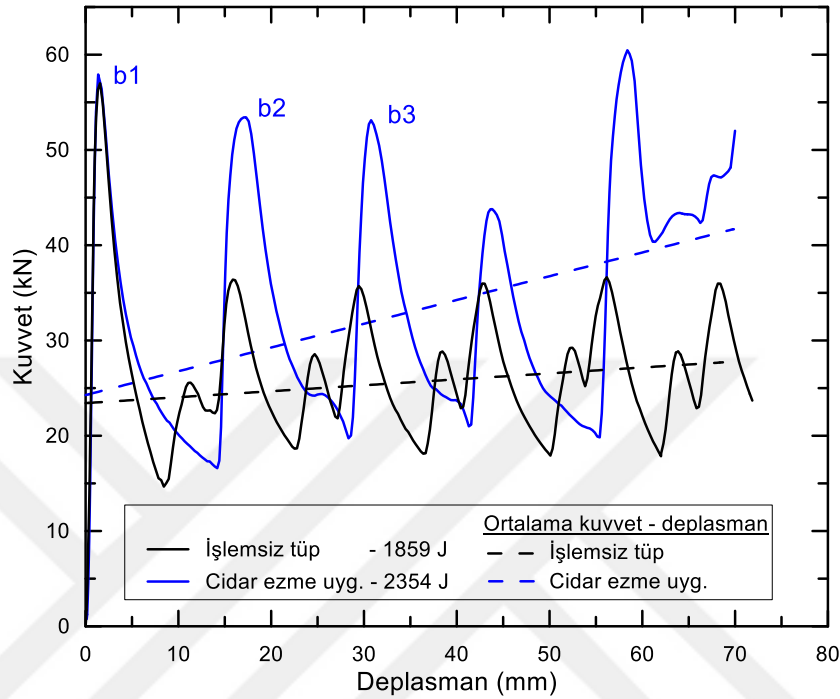
burkulma mesafesinin, ilk pik kuvvet üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı, ilk katın oluştuğu alt kuvvet değerinin ise azalan λ değerleriyle arttığı görülmektedir. Devam eden katlanma sürecinde ise 12 ve 16 mm serbest burkulma boyuna sahip numunelerin kuvvet değerlerinin, beklendiği üzere serbest burkulma boyu 10 mm ve 20 mm olan numunelerin arasında olduğu görülmüştür. Azalan λ değerleriyle diğer pik kuvvetlerin de arttığı, $\lambda=10$ mm olan numunede kuvvetlerin ilk pik kuvvete yaklaştığı açıkça görülmektedir.



Şekil 4.37. Farklı λ değerlerinde çoklu ezme işlemi uygulanmış numunelere ait kuvvet-deplasman eğrileri

Absorbe edilen enerji açısından en iyi sonucu veren 10 mm serbest burkulma boyuna sahip numune ile ezme işlemi uygulanmamış tüpün kuvvet-deplasman eğrileri Şekil 4.38.'de verilmiştir. Şekil incelendiğinde çevresel cedar ezme işleminin, tüp yapının kuvvet değerleri üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Cedar ezme işlemiyle tüpün içeri yönlenme durumuna karşılık gelen alt kuvvet ve tüpün dışa yönlenmesine karşılık gelen üst kuvvet değerleri yukarı doğru ötelenmiştir. Absorbe edilen enerji değerleri olarak bakıldığında da işlem görmemiş tüpe göre %26 daha yüksek enerji absorbe ettiği tespit edilmiştir. Bu durumun, herhangi bir ekstra takviye elamanı kullanılmadan sağlanmış olması, ayrı bir öneme sahiptir. Diğer takviye

yöntemlerinde, tüp yapının ağırlığının da arttığı göz önünde bulundurulursa, özgül enerji absorbe etme kabiliyeti açısından yapılacak bir değerlendirmede çevresel cidar ezme yönteminin önemi daha net biçimde görülecektir.

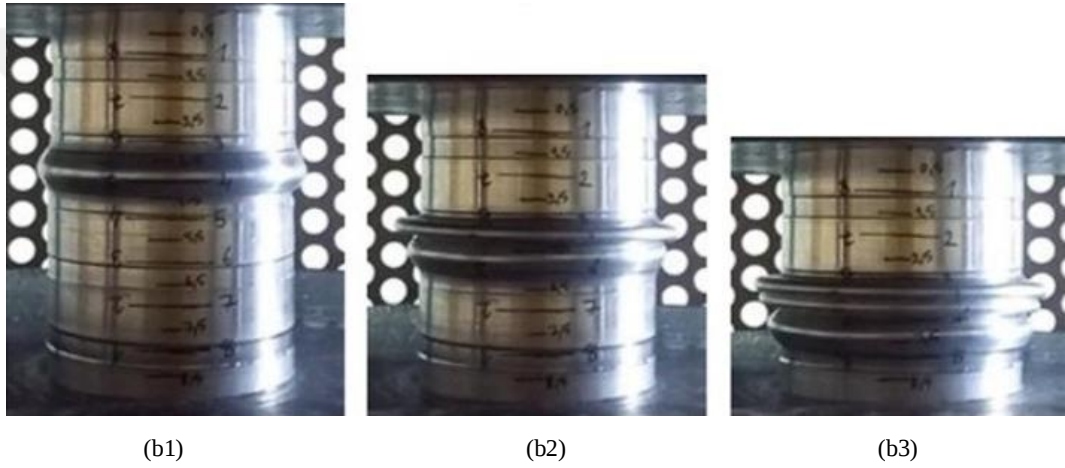


Şekil 4.38. Ezme işlemi uygulanmamış ve $\lambda=10$ mm olan numunelere ait kuvvet-deplasman eğrileri (b1-b3 etiketleri Şekil 4.40'da verilen katlanma aşamalarını simgelemektedir)

Bu numunelere ait deformasyon aşamaları Şekil 4.39.'da verilmiştir. Şekil 4.39b.'de verilen ezme işlemi uygulanmış numune incelendiğinde, ilk burkulmanın (dışa yönlenmenin) işlem uygulanmamış numunenin aksine, tüpün orta kısmındaki serbest burkulma bölgesinin orta noktasından başladığı görülmektedir. Ayrıca diğer katlarında yine serbest burkulma bölgelerinin orta noktalarında başladığı ve deformasyonun bu şekilde devam ettiği anlaşılmaktadır. Dolayısıyla bu numunedeki burkulmanın (katların başlangıç aşamasındaki), işlem uygulanmamış tüpten daha kısa mesafede oluşmaya zorlandığı anlaşılmaktadır. Bu durum, Şekil 4.38.'de değinilen üst kuvvet değerlerindeki artışın sebebini göstermesi açısından önemlidir. Deformasyon aşamaları göz önünde bulundurulduğunda, çevresel cidar ezme işleminin tüpte katlanma başlangıcının istenilen bölgeye yönlendirilebilmesine imkan tanıdığı söylenebilir.



(a)



(b1)

(b2)

(b3)

Şekil 4.39. a) Cidar ezme işlemi uygulanmamış, b) uygulanmış numunelerin deformasyon aşamaları

Çevresel cidar ezme; i) metalik malzemenin ön şekil verilerek bölgesel dayanım artışı (pekleşme) sağlanmasına ve ii) burkulma boyunun kısaltılmasıyla cidarda burkulma davranışının zorlaştırılmasına olanak veren bir işlemdir. İlki tüp yapının malzemesiyle, ikincisi ise tüp yapının geometrisiyle ilişkili olan bu iki bileşik etkinin optimum olduğu durumlarda, tüp yapının enerji absorbe etme kabiliyetinde kayda değer artış sağlanabilmektedir. Dolayısıyla, alüminyum gibi pekleşme oranının (çekme dayanımı/akma dayanımı) düşük olduğu bir malzeme yerine, özdeş geometride yüksek pekleşme kabiliyetine sahip bir malzeme kullanılması durumunda, absorbe edilen enerjinin çok daha yüksek olması beklenmektedir.

4.4.5. Çoklu takviye edilmiş tüp yapılara ait deney sonuçları

Bu bölümde, her bir takviye yöntemi için en verimli enerji değerini sunan kombinasyonlara ait deney sonuçları verilmiştir. Bu kapsamda, öncelikle dışarıdan ve içeriden takviyeli numunelerin, sonrasında ise cidar ezme işlemi uygulanmış tüplerin dışarıdan takviye edilme durumlarına ait eksenel ezilme deney sonuçları incelenmiştir. Belirtilen iki takviye yönteminin birlikte kullanıldığı durumlara ek olarak da cidar ezme işlemi uygulanmış tüplerin hem içeriden hem de dışarıdan takviye edilme durumlarına ait sonuçlar incelenmiştir.

4.4.5.1. İki takviye yönteminin birlikte kullanıldığı numunelerin deney sonuçları

Bu bölümde dışarıdan cam elyaf, içeriden PVC köpük takviye edilmiş numuneler ile cidar ezme işlemi uygulandıktan sonra cam elyaf takviye edilmiş numuneler incelenmiştir.

Dışarıdan yapılan takviye durumunda, F_{maks} değerinin elyaf türünden bağımsız olarak ciddi oranda arttığına değinilmişti (Bölüm 4.4.3). Metalik tüplerde çok yüksek ilk pik kuvvet istenmediğinden, bu kuvvet değerinin düşürülebilmesi için dışarıdan sarılan elyaf, tüp uzunluğundan daha kısa tutulmuş ve ilk katın oluşacağı bölge takviyesiz bırakılmış, dolayısıyla ilk pik kuvvet değeri takviyesiz tüple aynı seviyelere çekilebilmiştir. Buna ek olarak, çok daha düşük ilk pik kuvvet değeri için bazı numunelere, tetikleme amaçlı ön deformasyon işlemi uygulanarak ilk kat oluşumu başlatılmış ve tüp bu haliyle bırakılmıştır. Şekil 4.40.'ta, kısa elyaf sarılmış numune ile takviyesiz tüp ile tetikleme işlemi uygulanmış tüp yapıların görüntüsü verilmiştir.

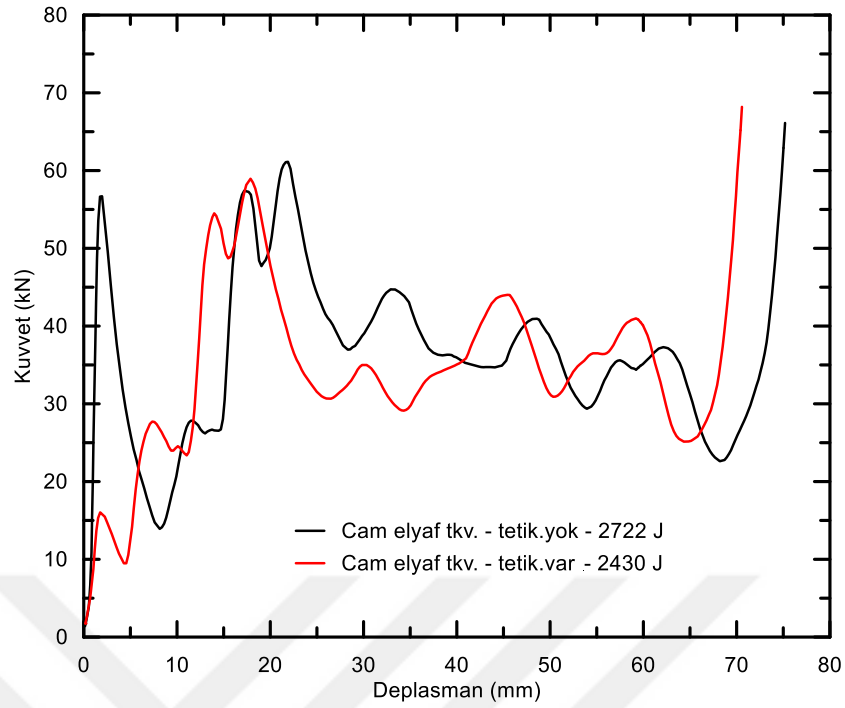


Şekil 4.40. Kısa elyaf sarılmış numune, takviyesiz tüp ve tetikleme işlemi uygulanmış takviyesiz tüp yapıların görüntüsü (soldan sağa)

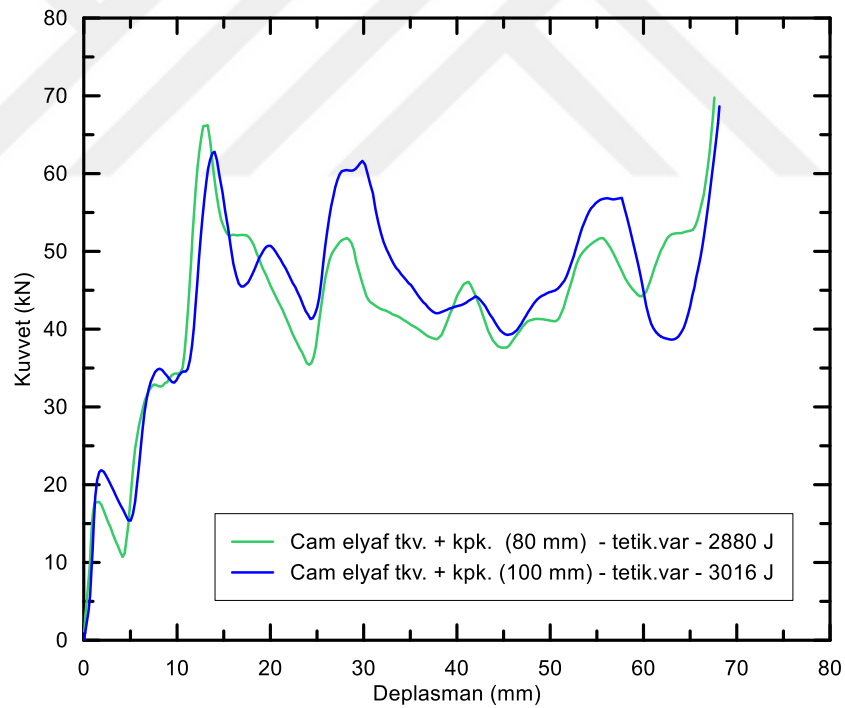
Sadece dışarıdan elyaf sarılmış (kısa elyaf) tüpler ve dışarıdan ve içeriden takviye edilmiş, tetikleme bulunan ve bulunmayan numunelere ait kuvvet-deplasman eğrileri Şekil 4.41.'de verilmiştir. Şekil 4.41a.'da görüldüğü üzere, tetikleyici bulunmayan kısa elyafli numunede 56 kN değerinde oluşan ilk katlanma, tetikleme sayesinde 15 kN değerine indirilebilmiştir. Dolayısıyla, dışarıdan takviyede kısa elyaf kullanılmasıyla katlanma başlangıç kuvvetinin takviyesiz tüple yaklaşık aynı değere çekilebildiği, ilk pik kuvvetini daha da düşürmek amacıyla uygulanan ön şekil verme işleminin de bu anlamda başarılı olduğu anlaşılmaktadır. Absorbe edilen enerji açısından bakıldığında, tetikleme bulunan numunenin daha az enerji absorbe ettiği, bunun sebebinin ise ön deformasyon işleminin ilk kat kuvvet değerinde ve toplam deplasman değerindeki bir miktar azalmaya bağlanamam mümkündür. Eğrilerin genel karakteristiğinde ciddi benzerlik bulunmasına rağmen, her bir katlanma safhasıyla ilişkilendirilebilecek pik kuvvetlerin tetikleme bulunan numunede daha belirgin olduğu açıkça görülmektedir. Ayrıca bilindiği üzere tetikleme bulunmayan numunenin eksenel yüke maruz kalması halinde, ilk kat başlayıncaya dek hem üst hem de alt uçlara yakın bölgelerde bir miktar burkulma oluşmakta, sonrasında ise katlanma genellikle presin hareketli tarafındaki bir noktadan devam etmektedir. Dolayısıyla elyaf takviyeli numunede tetikleyici bulunması, kat başlangıcının sadece bir uçta

oluşmasından dolayı, numunede deformasyon sırasında yığılma olasılığı, her iki ucun cidarında kısmi burkulmanın meydana geldiği numuneye göre nispeten azdır. Bu durum, bir anlamda, katlanmanın tetikleme bulunan takviyeli numunede daha düzgün ve sıralı bir şekilde olduğunu göstermesi açısından oldukça önemlidir.

Şekil 4.41b.'de eğrileri verilen numunelerde, dışarıdan üç kat cam elyaf ve içeridense en verimli köpük kombinasyonu (ortada düşük yoğunluklu, alt ve üstte ise yüksek yoğunluklu köpük) kullanılmıştır. İçeriden takviyede kullanılan PVC köpükler, elyaf uzunluğu olan 80 mm (tetikleyici bölgeyi kapsamayan) ve tüp uzunluğu olan 100 mm (tetikleyici bölgeyi de kapsayan) yüksekliklerinde olacak şekilde seçilmiştir. Grafik incelendiğinde, her iki durumdaki köpük takviyesinde de genel kuvvet değerlerinin, sadece cam elyaf takviyesine göre nispi olarak yükseldiği, dolayısıyla enerji değerinin arttığı görülmektedir. Ayrıca farklı köpük yüksekliğine sahip numunelerin kuvvet piklerinde şekil ve sayı itibarıyla (ilk pikteki artış dışında) önemli bir fark olmamakla birlikte, 100 mm köpük yüksekliğinin enerji değerinde kabaca %5'lik bir iyileşme sağladığı görülmektedir. Numunelerde tetikleminin varlığı, tetikleminin bulunmadığı duruma göre enerji değerinde bir miktar daha artış sağlamıştır. Bu durum, yukarıda da değinilen katlanma davranışındaki düzensizliğin daha az olmasıyla açıklanabilir (Şekil 4.41b.).



(a)

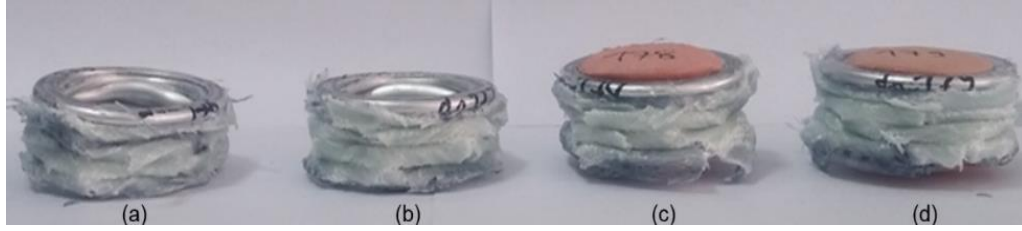


(b)

Şekil 4.41. Kısa elyaf sarılmış tetikleme bulunan ve bulunmayan a) sadece dışarıdan, b) dışarıdan ve içeriden takviyeli numunelerin kuvvet-deplasman eğrileri

Yukarıda eğrileri verilen sadece dışarıdan takviyeli numunelerle, hem dışarıdan ve içeriden takviyeli numunelerin deney sonrası görüntüleri Şekil 4.42.'de verilmiştir.

Tüm numunelerde simetrik olmayan katlanma davranışı gözlenmiştir. Ancak bu durum, sadece dışarıdan takviyeli numunelerde daha küçük deplasman değerlerinde ortaya çıkmıştır. Ayrıca elyaf takviyesinin, aksenal yük altında deforme olurken dışarıya yönelmeye çalışan tüp yapıyı kısıtlaması, takviye türleriyle tüp yapının girdiği etkileşimin şiddetini, dolayısıyla absorbe edilen enerji değerini artırmıştır.



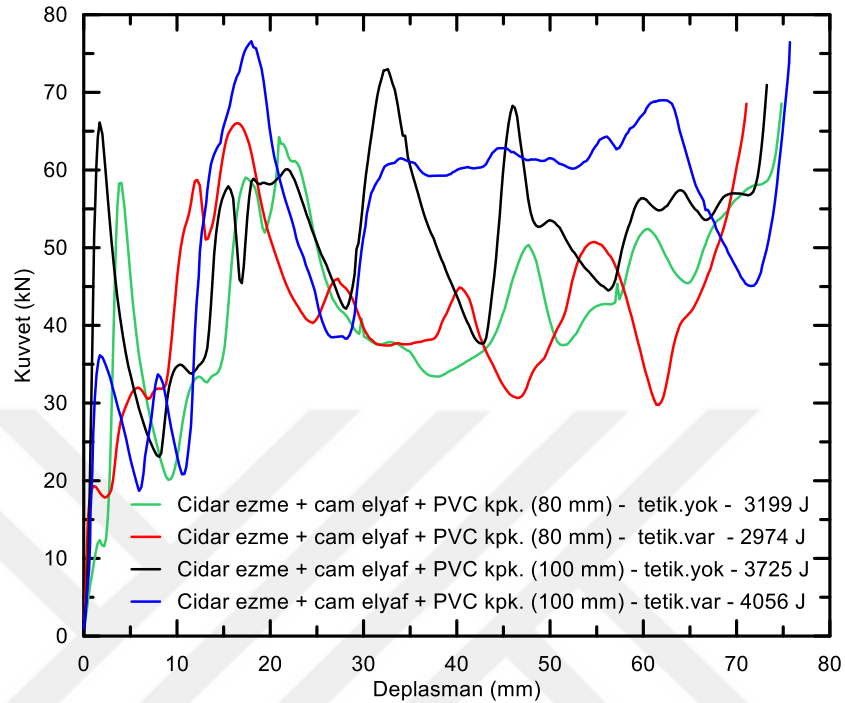
Şekil 4.42. a) Dışarıdan takviyeli numune tetikleme yok, b) dışarıdan takviyeli numune tetikleme var, dışarıdan ve içeriden takviyeli numune c) tetikleme yok, d) tetikleme var.

Literatürde de benzer sonuçlara rastlanmakta, ayrıca elyaf yönelmesinin de hasar oluşumu üzerine kısmen etkisi bulunduğu rapor edilmektedir [77-79].

4.4.5.2. Üç takviye yönteminin birlikte kullanıldığı numunelerin deney sonuçları

Bu bölümde cidar ezme işlemi uygulanmış numunelerin, içeriden köpük ve dışarıdan elyaf kullanılarak takviye edilme durumları incelenmiş ve numunelere ait kuvvet-deplasman eğrileri Şekil 4.43.'te verilmiştir. Eğriler, ikili takviye edilmiş numunelere ait eğrilerle karşılaştırıldığında, köpük takviyesiyle numunelerde kat oluşum deplasman değerlerinin azaldığı, kuvvet değerlerinin de nispi olarak yükseldiği görülmektedir. Özellikle ilk pik kuvvet değerinin, 100 mm köpük kullanılan numunelerde önemli oranda arttığı görülmektedir. Numunelerin kuvvet-deplasman grafiklerinde, katlanma başlangıcının içeriden yapılan köpük takviyesinden belirgin bir şekilde etkilendiği, ikinci kat başlangıcının nispeten daha yüksek kuvvetten başladığı ve ortalama kuvvetin nispeten daha yüksek olduğu ilk göze çarpan farklılıklar olarak sıralanabilir. Numunelerin deney sonrası görüntüleri incelendiğinde, elyaf takviyesiyle tüp cidarının dışarı doğru yönelmesinin kısıtlanması, sadece tüp yapının ezilmesini sınırlamamakta, aynı zamanda cidarın içe doğru yönelmesine yardımcı olarak elmas katlanmaya teşvik ettiği görülmüştür. Dolayısıyla bu durum,

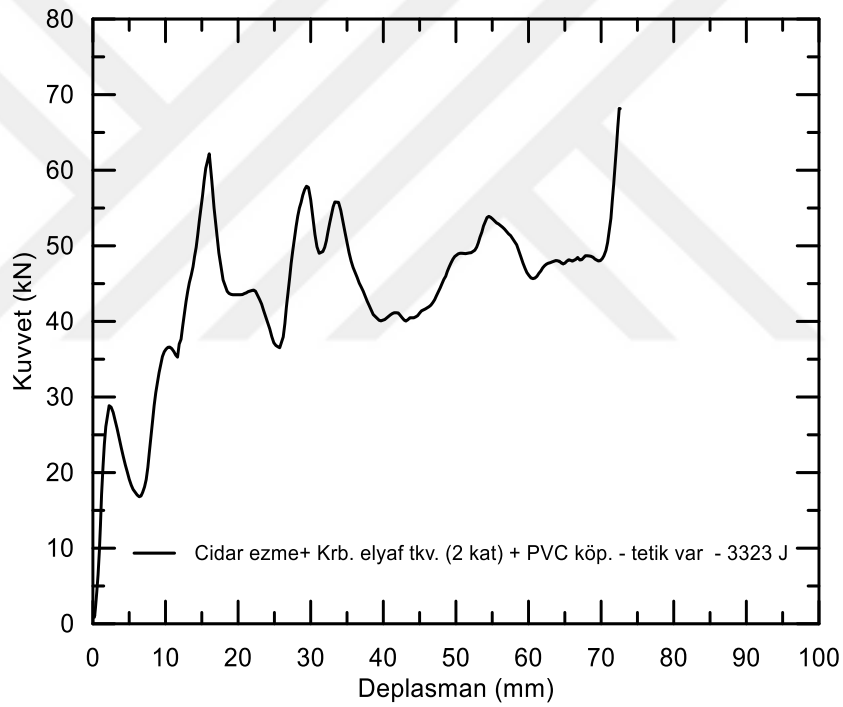
üçlü takviye durumunda köpüğün daha fazla sıkışmasını sağlamakta ve köpüğün enerji absorbe etme kabiliyetinin etkinliğini arttırmaktadır.



Şekil 4.43. Her üç takviyenin birlikte kullanıldığı numunelere ait kuvvet-deplasman eğrileri

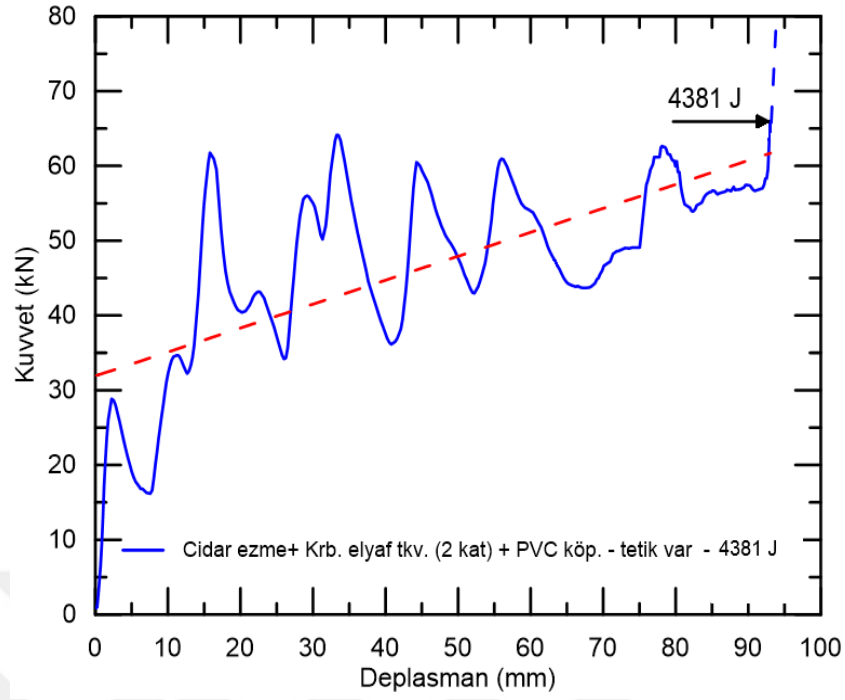
Yapılan deneyler neticesinde, cam elyaf-tüp ara yüzeyi bağlantısında karbon elyafa göre çok daha kısa deplasman değerlerinde ayrılmalar gerçekleştiği, cam elyafın tüpün deformasyonu esnasındaki katlanma davranışına çok uyum sağlayamadığı tespit edilmiştir. Bu kapsamda, takviyeli numune ağırlığının daha düşük olabilmesi adına iki kat karbon elyaf kullanımının daha isabetli olacağı sonucuna ulaşılmıştır. İki kat karbon elyaf kullanılan çoklu takviye edilmiş 100 mm uzunluğundaki numunede yaklaşık 73 mm ezilme deplasman değerinde elde edilen kuvvet deplasman eğrisi Şekil 4.44a.'da verilmiştir. Mevcut ezilme kutularının uzunlukları göz önünde bulundurularak hazırlanan ve yaklaşık 93 mm eksenel ezilme uzunluğuna sahip 125 mm uzunluğundaki ezilme kutusunda 4330 J ile 4380 J arasında değişen enerji değerleri absorbe edilmiştir (Şekil 4.44b.). Ayrıca grafikte ortalama kuvvetin deplasmanla artış göstermesi ideal ezilme kutu tasarımı bakımından tercih edilen özellikler arasındadır.

Bu değer, önceki kısımlarda değinilen, 1000 kg kütleyle sahip bir aracın (B segmenti) 15 km/s hızla rijit bir engele önden çarpması durumunda, bir ezilme kutusu tarafından absorbe edilmesi gereken enerji olan 4340 J değerinin aşıldığını göstermektedir. Ayrıca, bu numune de elde edilen 35,3 J/gr ÖEA değeri, takviyesiz tüpe göre yaklaşık %37 daha yüksek olmuştur. Bu durum, ezilme kutusu tasarımı için belirlenen enerji ve ÖEA hedeflerinin sağlandığını göstermekle birlikte, numunenin hali hazırda kullanılan ezilme kutusu ebatlarında olması durumunda (yaklaşık 150 mm verimli ezilme uzunluğunda olması) absorbe edilen enerjinin 7000 J değerine kolaylıkla ulaşabileceğini göstermektedir. Bu numunelere ait deney öncesi ve sonrası görüntüleri Şekil 4.45.'te verilmiştir.



(a)

Şekil 4.44. a) 100 mm uzunluğundaki, b)125 mm uzunluğundaki tüplerden 2 kat karbon elyaf sarılmış çoklu takviyeli numunelerin kuvvet-deplasman eğrileri (PVC köpükler sandviç dizilimine sahiptir)



(b)

Şekil 4.44. (Devamı)



(a)



(b)

Şekil 4.45. 125 mm uzunluğa sahip çoklu takviye edilmiş numunelerin a) deney öncesi, b) sonrasına ait görüntüleri

Deneysel çalışmalar neticesinde, takviyesiz tüple takviyeli numunelerden bazılarına ait F_{maks} , F_{ort} , absorbe edilen enerji ve özgül enerji değerleri Tablo 4.5.'te birlikte verilmiştir. Bu kapsamda, bir numaralı sırada bulunan takviyesiz boş tüpün özgül enerji absorbe (ÖEA) değeri referans kabul edilerek karşılaştırma yapıldığında, tüm numunelerin tercih edilebilir olduğu görülmektedir. Dışarıdan yapılan elyaf

takviyesinin, ideal bir ezilme kutusu tasarımı istenmeyen bir durum olarak ilk pik kuvveti yüksek oranda artırmış, bu problem kısa elyaf sarımı ve tetikleme amaçlı ön deformasyon uygulanarak giderilmiştir. En yüksek enerji değerlerinin ise doğal olarak üç takviye yönteminin birlikte uygulandığı numunelerde elde edilmiştir. Özellikle, tetikleme mekanizması bulunan 100 mm köpük takviyeli numunede elde edilen 4056 J değeri, takviyesiz yapıya göre %119 oranında artmıştır. İdeal ezilme kutusu tasarımı açısından değerlendirildiğinde, gerek absorbe edilen enerji değeri gerekse ÖEA değeri bakımından en uygun kombinasyonun 15 numara olduğu açıktır.

Tablo 4.5. Ezilme kutusu tasarımları için elde edilen karşılaştırma kombinasyonları.

No	Takviye durumu	Kombinasyon	Tetik durumu	F_{maks} (kN)	Enerji (J)	Ağırlık (gr)	ÖEA (J/gr)
1	Takviyesiz	Tüp	-	56	1852	72	25,7
2		Tüp	Var	20	1749	72	24,3
3	Dışardan takviye	2 kat cam elyaf tkv.	-	98	2358	85	27,7
4		3 kat cam elyaf tkv.	-	112	2722	95	28,6
5		3 kat cam elyaf tkv.	Var	16	2430	95	25,5
6		2 kat karbon elyaf tkv.	-	80	2481	87	28,5
7		3 kat karbon elyaf tkv.	-	89	2855	97	29,4
8	Dışardan + İçeriden takviye	3 kat cam elyaf tkv. +80 mm PVC köpük	Var	18	2880	110	26,4
9		3 kat cam elyaf tkv. +100 mm PVC köpük	Var	22	3016	115	26,7
10	Ezme + Dışardan + İçeriden takviye	Ezme işlemi + 3 kat cam elyaf tkv. + 80 mm PVC köpük	-	58	3199	109	29,3
11		Ezme işlemi + 3 kat cam elyaf tkv.+ 80 mm PVC köpük	Var	19	2974	110	27,3
12		Ezme işlemi + 3 kat cam elyaf tkv.+ 100 mm PVC köpük	-	66	3725	115	32,7
13		Ezme işlemi + 3 kat cam elyaf tkv.+ 100 mm PVC köpük	Var	36	4056	116	34,9
14		Ezme işlemi + 2 kat karbon elyaf tkv.+ 100 mm PVC köpük	Var	32	3233	105	30,8
15		Ezme işlemi + 2 kat karbon elyaf tkv.+ 125 mm PVC köpük*	Var	28	4381	124	35,3

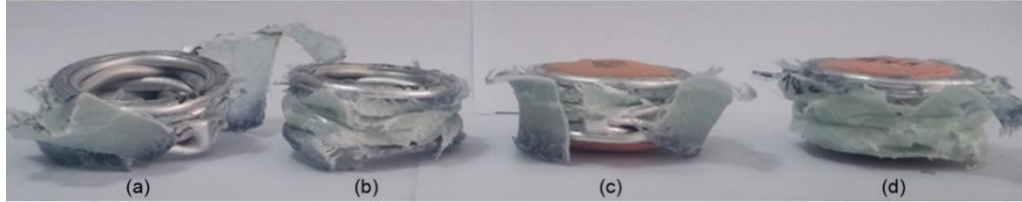
Ezme işlemi: 10 mm serbest burkulma boyuna sahip eşit aralıklı.

Köpük takviyesi: Sandviç model (üst ve alt tabakalarda yüksek, ort tabakada düşük yoğunluklu köpük)

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

Numunelerin deney sonrası genel görüntüsü Şekil 4.46.'da 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/dağılma miktarının daha fazla olduğu dikkat çekicidir.



Şekil 4.46 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.

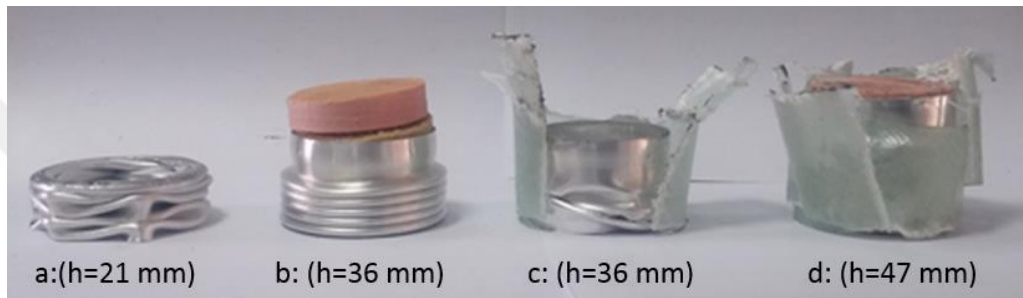
4.4.6. Düşürme darbe deney sonuçları

Düşürme darbe deneyleri, numuneler arasında karşılaştırma yapılabilmesi için öncelikle, takviyesiz yapının absorbe ettiği toplam enerji olan 1850 J değeri dikkate alınarak 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 70 mm düşük yoğunluklu köpük, alt ve üstte ise 15'er mm yüksek yoğunluklu köpük) ile takviye edilen numunelerin deney sonrası görünüşleri Şekil 4.47'de verilmiştir.

Şekil 4.47.'den, takviyesiz tüpte tamamen ezilmeye yol açan enerji değeri altında; sadece dışarıdan yapılan takviyenin parçanın deformasyonunu 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 mm, 36 mm, 36 mm 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. Hidrolik presle yapılan deneylerde kademeli olarak deplasmandaki artışla birçok noktadan başlayan çatlağın, yüksek hızlı

düşürme deneyinde çok daha hızlı gerçekleştiği ve elyaf katmanının bir iki noktadan boyuna yarılmasına neden olduğu düşünülmektedir.

6063 malzemenin dinamik zorlanmalar altında sergileyeceği deformasyonun, yarı statik şartlara göre farklılık göstermesi beklenmektedir. Bunun temel nedeni, bu alaşımın şekil değiştirme hızına duyarlı olmamasıdır [80]. Dolayısıyla parça yüksekliğinin kısa ya da uzun seçilmesi halinde bağlı hızdaki farklılığın genel olarak metal cidarın katlanma davranışını etkileyecektir.



Şekil 4.47. a) Takviyesiz, b) içeriden en iyi performansı veren sıralı PVC köpük takviyeli, c) dışarıdan cam elyaf takviyeli, d) dışarıdan cam elyaf ve içeriden en iyi performansı veren sıralı PVC köpük takviyeli numunelerin düşürme deney sonundaki görüntüleri Not: Parantez içindeki değerler deney sonrası numunelerin yüksekliğini göstermektedir.

BÖLÜM 5. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Genel Sonuçlar

Eksenel yüke maruz alüminyum tüplerle yapılan deneyler, tüplerin farklı modlarda deformasyona uğradıklarını ve bu farklılığın tüpün malzeme ve mekanik özelliklerinden bağımsız olarak, sadece geometrik özellikleriyle ilgili olduğunu göstermiştir. Katlanma aşamalarının detaylı incelenmesi neticesinde, kuvvet değerinin değişiminde tüp cidarındaki artışın çapa göre daha baskın bir etkiye sahip olduğu, tüp uzunluğunun ise (burkulmaya yol açmamak kaydıyla) herhangi bir etkisinin bulunmadığı anlaşılmıştır.

Tüplerin içeriden takviye edilmesinde, farklı yoğunluklardaki PVC köpükler tüp içerisine farklı kombinasyonlarda (tüp uzunluğu boyunca) yerleştirilmiş, enerji absorbe etme kabiliyetleri (EAK) ve özgül enerji absorbe (ÖEA) değerleri incelenmiştir. En verimli takviye durumu olan sandviç modelde, EAK ve ÖEA değerleri açısından takviyesiz yapıya göre sırasıyla %42 ve %10 oranında artış sağlanmıştır. Tüplerin tek tip köpük yoğunluğuyla takviye edilmesinde en yüksek enerji değerinin, yüksek yerine orta yoğunluklu köpük kullanılan numunede elde edilmiş olması, enerji artışında köpüğün eksenel ezilme direncinin yanı sıra tüp cidarı ile girdiği etkileşimin de önemli bir etken olduğunu ortaya koymaktadır. Bu etkileşiminin daha açık bir şekilde ortaya konulabilmesi açısından radyal yönde değişen yoğunluklu köpük takviyesi kullanılmış, köpüğün içeri yönlenen tüp katları arasına sıkışması durumu SEM görüntülerinin yardımıyla açıkça ortaya konulmuştur.

Cam ve karbon elyaf kullanılarak dışarıdan takviye edilen numunelerde, tüp yapıda deformasyonu başlatan ilk pik kuvvetin sırasıyla %75 ve %43 oranında artış göstermesine rağmen, ortalama kuvvetteki artışın daha düşük seviyelerde kaldığı görülmüştür. Ortalama kuvvetteki artışın, ilk pik kuvvete nazaran daha düşük olması,

elyaf takviyesinin tüp yapının stabilitesine yaptığı katkının daha baskın olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca karbon elyaf kompozitin cam elyafa göre daha az gevrek davrandığı ve katlanan tüp cidarı ile daha uyumlu hareket ettiği görülmüştür. Dışarıdan takviyede karşılaşılan ilk pik kuvvetin yüksek olma problemi, tüpte ilk katın oluşacağı bölgenin çıplak bırakılacak şekilde kısa elyaf kullanılarak sarılmasıyla giderilmiştir.

EAK ve ÖEA değerlerini artırmaya yönelik bir diğer yöntemde ise herhangi bir takviye kullanılmadan sadece tüp cidarına çevresel ezme işlemi uygulanmıştır. Bu kapsamda tüp cidarına, 0,20 mm ezme derinliğinde ve 10 mm aralığında cidar ezme işlemi uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, işlemsiz tüpte uç kısımlarda başlayan deformasyonun cidar ezme işlemiyle tüpün orta kısımlarına yönlendirilebilmesinin mümkün olduğunu göstermiştir. Katlanma aşamasında tüp cidarının dışa yönelme miktarının daha yüksek oranda gerçekleştiği görülmüştür. Ayrıca, absorbe edilen enerji değeri bu işlemle %26 artmış, takviye elemanı kullanılmadığından bu değer doğrudan ÖEA değerine aynı oranda yansımıştır.

Son olarak çevresel cidar ezme ve içeriden takviyedeki en verimli durumların birlikte uygulandığı 100 mm uzunluğundaki tüplere cam ve karbon elyaf sarılmış ve eksenel ezilme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu grup numunelerde absorbe edilen en yüksek enerji, tetikleme mekanizmasının kullanıldığı numunelerde elde edilmiştir. Takviyesiz tüpte elde edilen 1852 J enerji değeri, karbon elyaf kullanımıyla 4381 J değerine ulaşmıştır.

Tez çalışmasının önceki kısımlarında da değinildiği üzere, yaklaşık 1000 kg kütleli (B segmenti) bir aracın 15 km/s hızla önden bir engele çarpması durumunda, ezilme kutusu tarafından absorbe edilmesi gereken enerji değeri 4340 J olmaktadır. Bu durum ve mevcut ezilme kutularının ölçüleri göz önüne alınarak hazırlanan 125 mm uzunluğundaki çoklu takviyeli tüple, EAK değeri takviyesiz tüpe oranla 2,4 kat artarak 4381 J değerine, ÖEA değeri de %37 artışla 35,3 J/gr değerine ulaşmıştır.

5.2. Öneriler

Bu çalışmada, dairesel kesitli alüminyum tüplerin eksenel yük altındaki enerji absore değerleri, içeriden ve dışarıdan takviye yaparak ve çevresel cidar ezme işlemi uygulayarak artırılmaya çalışılmıştır. İçeriden takviye de PVC köpükler, dışarıdan takviye de ise farklı elyaf türleri kullanılmıştır.

Bundan sonar yapılacak farklı araştırmalarda, yapılması planlanan deneylerin öncesinde bir optimizasyon yapılmasıyla uygun kombinasyonların önceden belirlenmesi ve deney sayısının azaltılması mümkün olabilir. Bunun yanı sıra farklı metalik tüplerin farklı köpük türleri kullanılarak, mesela çelik tüplerin alüminyum köpük kullanılarak takviye edilmesi gibi, tüp-köpük etkileşiminden maksimum oranda faydalanılabilir.

Çevresel cidar ezme işleminde, pekleşme oranı yüksek malzeme kullanımıyla daha verimli sonuçlar elde edilebileceği bulgusundan hareketle, bu işlem için çelik tüpler tercih edilebilir. Ayrıca cidar ezme işlemi uygulanmış, arası köpük dolgulu ikili tüplerin kullanımıyla enerji absorbe değerleri açısından ilginç sonuçlar ortaya çıkabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Morello L, Rossini LR, Pia G, Tonoli A. The Automotive Body. London: Springer; 2011.
- [2] Mallock HRA. Note on the instability of tubes subjected to end pressure, and on the folds in a flexible material. Proceedings of the Royal Society A, London 1908;388–93.
- [3] Robertson A. The strength of tubular struts. Royal Society Publishing 1928;213:558–85.
- [4] Alexander JM. An approximate analysis of collapse of thin-walled cylindrical shells under axial loading. Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics 1960;13:10–5.
- [5] Allan T. Experimental and analytical investigation of the behaviour of cylindrical tubes subject to axial compressive forces. Journal of Mechanical Engineering Science 1968;10:182–97.
- [6] Pugsley A, Macaulay M. The large-scale crumpling of thin cylindrical columns. Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics 1960;13:1–9.
- [7] Andrews KRF, England GL, Ghani E. Classification of the axial collapse of cylindrical tubes under quasi-static loading. International Journal of Mechanical Sciences 1983;25:687–96.
- [8] Abramowicz W, Jones N. Dynamic axial crushing of circular tubes. International Journal of Impact Engineering 1984;2:263–81.
- [9] Abramowicz W, Jones N. Dynamic progressive buckling of circular and square tubes. International Journal of Impact Engineering 1986.
- [10] Grzebieta RH. An alternative method for determining the behaviour of round stocky tubes subjected to an axial crush load. Thin-Walled Structures 1990;9:61–89.
- [11] Wierzbicki T, Bhat SU, Abramowicz W, Brodtkin D. Alexander revisited—A two folding elements model of progressive crushing of tubes. International Journal of Solids and Structures 1992;29:3269–88.
- [12] Singace AA, Elsobky H, Reddy TY. On the eccentricity factor in the progressive crushing of tubes. International Journal of Solids and Structures 1995;32:3589–602.

- [13] Singace AA, Elsobky H. Further experimental investigation on the eccentricity factor in the progressive crushing of tubes. *International Journal of Solids and Structures* 1996;33:3517–38.
- [14] Andrews KRF, England GL, Ghani E. Classification of the axial collapse of cylindrical tubes under quasi-static loading. *International Journal of Mechanical Sciences* 1983;25:687–96.
- [15] Guillow SR, Lu G, Grzebieta RH. Quasi-static axial compression of thin-walled circular aluminium tubes. *International Journal of Mechanical Sciences* 2001;43:2103–23.
- [16] Wierzbicki T, Abramowicz W. On the Crushing Mechanics of Thin-Walled Structures. *Journal of Applied Mechanics* 2009.
- [17] Seitzberger M, Rammerstorfer FG, Degiseher HP. Crushing of axially compressed steel tubes filled with aluminium foam. *Acta Mechanica* 1997;105:93–105.
- [18] Santosa S, Wierzbicki T. Crash behavior of box columns filled with aluminum honeycomb or foam. *Computers and Structures* 1998;68:343–367.
- [19] Hanssen AG, Langseth M, Hopperstad OS. Optimum design for energy absorption of square aluminium columns with aluminium foam filler. *International Journal of Mechanical Sciences* 2001;43:153–176.
- [20] Zhang X, Cheng G. A comparative study of energy absorption characteristics of foam-filled and multi-cell square columns. *International Journal of Impact Engineering* 2007;34:1739–52.
- [21] Zarei HR, Kröger M. Optimization of the foam-filled aluminum tubes for crush box application. *Thin Walled Structures* 2008;46:214–21.
- [22] Hou S, Li Q, Long S, Yang X, Li W. Crashworthiness design for foam filled thin-wall structures. *Materials and Design* 2009;30:2024–32.
- [23] Toksoy AK, Guden M. Partial Al foam filling of commercial 1050H14 Al crash boxes: The effect of box column thickness and foam relative density on energy absorption. *Thin Walled Structures* 2010;48:482–494.
- [24] Li Z, Chen R, Lu F. Comparative analysis of crashworthiness of empty and foam- filled thin- walled tubes. *Thin Walled Structures* 2018;124:343–9.
- [25] Langseth M, Hopperstad OS, Hanssen AG. Crash behaviour of thin-walled aluminium members. *Thin Walled Structures* 1998;32:127–50.
- [26] Simancik F, Rajner W. Alulight - Aluminum Foam for Lightweight Construction. *SAE Technical Paper* 2000.
- [27] Santosa SP, Wierzbicki T, Hanssen AG, Langseth M. Experimental and numerical studies of foam-filler sections. *International Journal of Impact Engineering* 2000;24:509–534.

- [28] Seitzberger M, Rammerstorfer FG, Gradinger R, Degischer HP. Experimental studies on the quasi-static axial crushing of steel columns filled with aluminium foam. *International Journal of Solids and Structures* 2000;37:4125–47.
- [29] Hanssen AG, Langseth M, Hopperstad OS. Static and dynamic crushing of square aluminum extrusions with aluminum foam filler. *International Journal of Impact Engineering* 2000;24:347–83.
- [30] Hanssen AG, Langseth M, Hopperstad OS. Static and dynamic crushing of circular aluminium extrusions with aluminium foam filler. *International Journal of Impact Engineering* 2000;24:47–73.
- [31] Kim H. Analysis of crash response of aluminium foam-filled front side rail of a passenger car. *International Journal of Crashworthiness* 2001;6:189–208.
- [32] Hanssen AG, Hopperstad OS, Langseth M. Design of aluminium foam-filled crash boxes of square and circular cross-sections. *International Journal of Crashworthiness* 2001;6:177–88.
- [33] Thornton PH. Energy absorption by foam filled structures. *SAE Technical Paper Series* 1980:529–539.
- [34] Lampien BE, Jeryan RA. Effectiveness of polyurethane foam in energy absorbing structures. *SAE Technical Paper Series* 1982:2059–2076.
- [35] Ahmad Z, Thambiratnam DP. Dynamic computer simulation and energy absorption of foam-filled conical tubes under axial impact loading. *Computers and Structures* 2009;87:186–97.
- [36] Sun G, Li G, Hou S, Zhou S, Li W, Li Q. Crashworthiness design for functionally graded foam-filled thin-walled structures. *Materials Science & Engineering A* 2010;527:1911–9.
- [37] Esat U, Anlas G. Finite element analysis of expanded polystyrene foam under multiple compressive loading and unloading. *Materials and Design* 2011;32:773–80.
- [38] Umer R, Balawi S, Raja P. The energy-absorbing characteristics of polymer foams reinforced with bamboo tubes. *Journal of Sandwich Structures and Materials* 2014;16:108–22.
- [39] Alia RA, Guan Z, Jones N, Cantwell WJ. The energy-absorption characteristics of metal polymer foams. *Journal of Sandwich Structures and Materials* 2015;17:74–94.
- [40] Alia RA, Guan ZW, Haldar AK, Cantwell WJ. A numerical study of the energy-absorption characteristics of metal polymer foams. *Journal of Sandwich Structures and Materials* 2016;18:597–623.
- [41] Reddy TY, Wall RJ. Axial compression of foam-filled thin-walled circular tubes. *International Journal of Impact Engineering* 1988;7:151–166.

- [42] Zhang J, Kikuchit N, Li V, Yee A, Nusholtz G. Constitutive modelling of polymeric foam material subjected to dynamic crash loading. *International Journal of Impact Engineering* 1998;21:369–386.
- [43] Meguid SA, Attia MS, Monfort A. On the crush behaviour of ultralight foam-filled structures. *Materials and Design* 2004;25:183–189.
- [44] Toksoy AK, Guden M. The strengthening effect of polystyrene foam filling in aluminum thin-walled cylindrical tubes 2005;43:333–350.
- [45] Guden M, Toksoy AK, Kavi H. Experimental investigation of interaction effects in foam-filled thin-walled aluminum tubes. *Journal of Material Science* 2006;41:6417–24.
- [46] Kavi H, Toksoy AK, Guden M. Predicting energy absorption in a foam-filled thin-walled aluminum tube based on experimentally determined strengthening coefficient. *Materials and Design* 2006;27:263–269.
- [47] Rizov V. Local crushing of HCP100 structural foam due to low-velocity impact. *Marine Structures* 2008;21:47–58.
- [48] Mirfendereski L, Salimi MA. Parametric study and numerical analysis of empty and foam-filled thin-walled tubes under static and dynamic loadings. *International Journal of Mechanical Sciences* 2008;50:1042–57.
- [49] Nia AA, Hamedani JH. Comparative analysis of energy absorption and deformations of thin walled tubes with various section geometries. *Thin-Walled Structures* 2010;48:946–54.
- [50] Tarlochan F, Samer F, Hamouda AMS, Ramesh S, Khalid K. Design of thin wall structures for energy absorption applications: Enhancement of crashworthiness due to axial and oblique impact forces. *Thin Walled Structures* 2013;71:7–17.
- [51] Zhang X, Zhang H, Wen Z. Axial crushing of tapered circular tubes with graded thickness. *International Journal of Mechanical Sciences* 2015;92:12–23.
- [52] Baroutaji A, Sajjia M, Olabi AG. On the crashworthiness performance of thin-walled energy absorbers: Recent advances and future developments. *Thin Walled Structures* 2017;118:137–163.
- [53] Li G, Zhang Z, Sun G, Huang X, Li Q. Comparison of functionally-graded structures under multiple loading angles. *Thin Walled Structures* 2015;94:334–347.
- [54] An X, Gao Y, Fang J, Sun G, Li Q. Crashworthiness design for foam-filled thin-walled structures with functionally lateral graded thickness sheets. *Thin Walled Structures* 2015;91:63–71.
- [55] Alavi Nia A, Parsapour M. Comparative analysis of energy absorption capacity of simple and multi-cell thin-walled tubes with triangular, square, hexagonal and octagonal sections. *Thin-Walled Structures* 2014;74:155–65.

- [56] Pirmohammad S, Marzdashti SE. Crushing behavior of new designed multi-cell members subjected to axial and oblique quasi-static loads. *Thin-Walled Structures* 2016;108:291–304.
- [57] Tang Z, Liu S, Zhang Z. Analysis of energy absorption characteristics of cylindrical multi-cell columns. *Thin Walled Structures* 2013;62:75–84.
- [58] Santosa S, Wierzbicki T. Effect of an ultralight metal filler on the bending collapse behavior of thin-walled prismatic columns. *International Journal of Mechanical Sciences* 1999;41:995–1019.
- [59] Reyes A, Hopperstad OS, Langseth M. Aluminum foam-filled extrusions subjected to oblique loading: experimental and numerical study. *International Journal of Solids and Structures* 2004;41:1645–1675.
- [60] Zarei H, Kro M, Albertsen H. An experimental and numerical crashworthiness investigation of thermoplastic composite crash boxes. *Composite Structures* 2008;85:245–57.
- [61] Wierzbicki T, Abramowicz W. On the crushing mechanics of thin-walled structures. *Journal of Applied Mechanics* 1983;50:727–34.
- [62] Abramowicz W, Jones N. Transition from initial global bending to progressive buckling of tubes loaded statically and dynamically. *International Journal of Impact Engineering* 1997;19:415–37.
- [63] Reid SR, Reddy TY. Static and dynamic crushing of tapered sheet metal tubes of rectangular cross-section. *International Journal of Mechanical Sciences* 1986;28:623–37.
- [64] Ahmad Z, Thambiratnam DP, Tan ACC. Dynamic energy absorption characteristics of foam-filled conical tubes under oblique impact loading. *International Journal of Impact Engineering* 2010;37:475–88.
- [65] Reyes M, Langseth M, Hopperstad OS. Crashworthiness of aluminum extrusions subjected to oblique loading : Experiments and numerical analyses. *International Journal of Mechanical Sciences* 2015;44:1965–1984.
- [66] Tran T, Hou S, Han X, Nguyen N, Chau M. Theoretical prediction and crashworthiness optimization of multi-cell square tubes under oblique impact loading. *International Journal of Mechanical Sciences* 2014;89:177–93.
- [67] Tanlak N, Sonmez FO. Optimal shape design of thin-walled tubes under high-velocity axial impact loads. *Thin Walled Structures* 2014;84:302–312.
- [68] Kumar A., Himabindu G, Raman MS, Reddy VK. Experimental investigations with crush box simulations for different segment cars using LS-DYNA. *International Journal of Current Engineering and Technology* 2014:670–676.
- [69] Simhachalam B, Srinivas K, Rao CL. Energy absorption characteristics of aluminium alloy AA7XXX and AA6061 tubes subjected to static and dynamic axial load. *International Journal of Crashworthiness*,2014;19:139-152.

- [70] Cadoni E, Fenu L, Forni D. Strain rate behaviour in tension of austenitic stainless steel used for reinforcing bars. *Construction and Building Materials* 2012;35:399–407.
- [71] Nagel GM, Thambiratnam DP. Dynamic simulation and energy absorption of tapered thin-walled tubes under oblique impact loading. *International Journal of Impact Engineering* 2006;32:1595–620.
- [72] Al Galib D, Limam A. Experimental and numerical investigation of static and dynamic axial crushing of circular aluminum tubes. *Thin Walled Structures* 2004;42:1103–1137.
- [73] <http://www.seykoc.com.tr/icerik/isil-islem-sembolleri?dil=tr>
- [74] <https://www.3accorematerials.com/en/products/airex-foam/airex-c70-pvc-foam>
- [75] Hsu SS, Jones N. Quasi-static and dynamic axial crushing of thin-walled circular stainless steel, mild steel and aluminium alloy tubes. *International Journal of Crashworthiness* 2015;9:195-217.
- [76] Reid SR, Reddy TY, Gray MD. Static and dynamic axial crushing of foam-filled sheet metal tubes. *International Journal of Mechanical Sciences* 1986;28:295–322.
- [77] Kim HC, Shin KS, Lee JJ, Kwon JB. Crashworthiness of aluminum CFRP square hollow section beam under axial impact loading. *Composite Structures* 2014;122:1–10.
- [78] Mirzaei M, Shakeri M, Sadighi M, Akbarshahi H. Experimental and analytical assesment of axial crushing of circular hybrid tubes under quasi-static load. *Composite Structures* 2012;94:1959-1966.
- [79] Lee KS, Im KH, Yang IY. Experimental evaluation of the crashworthiness for lightweight composite structural member. *Thin Solid Films* 2020;518:5637-5641.
- [80] Hsu SS, Jones N. Dynamic axial crushing of aluminium alloy 6063-T6 circular tubes. *Latin American Journal of Solids and Structures* 2004;1:277-296.

ÖZGEÇMİŞ

Muhammet Muaz YALÇIN, 1985 yılında Ağrı, Tutak'ta doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini İstanbul'da tamamladı. 2004 yılında Üsküdar Çağrıbey Anadolu Lisesi'ni, 2010 yılında Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nü bitirdi. 2014 yılında Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden yüksek lisans derecesiyle mezun oldu. Aynı yıl başladığı Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği doktora eğitimine halen devam etmektedir.