

2005-53



TÜRKİYE BİLİMSEL VE
TEKNİK ARAŞTIRMA KURUMU

THE SCIENTIFIC AND TECHNICAL
RESEARCH COUNCIL OF TURKEY

59693

**ÇOKLU ALÜMİNYUM KAPALI HÜCRELİ
KÖPÜK DOLU ALÜMİNYUM VE POLİMERİK
KOMPOZİT TÜPLERİN EZİLME
DAVRANIŞLARININ BELİRLENMESİ**

**Makina, Kimyasal Teknolojiler, Malzeme ve İmalat Sistemleri
Araştırma Grubu**

**Mechanical Engineering, Chemical Technologies, Material
Sciences and Manufacturing Systems Research Grant
Committee**

59693

**ÇOKLU ALÜMİNYUM KAPALI HÜCRELİ
KÖPÜK DOLU ALÜMİNYUM VE POLİMERİK
KOMPOZİT TÜPLERİN EZİLME
DAVRANIŞLARININ BELİRLENMESİ**

PROJE NO: 102M033 (MİSAG 227)

Doç.Dr. MUSTAFA GÜDEN

Doç. Dr. METİN TANOĞLU

HALİT KAVI

SİNAN YÜKSEL

TEMMUZ 2005
İZMİR
ÖNSÖZ

Alüminyum metal köpük dolu tüpler son yıllarda otomobillerde şase ve tampon arasına yerleştirilen ve çarpışma darbe enerjisini emme özelliğine sahip *ezilme kutularında* (crushbox) kullanılmaları araştırılmaktadır. Tamponlar 3-5 km saat⁻¹ hızlarındaki çarpışmalarda araçların ön kısmını koruyabilmektedir ve 20 km saat⁻¹ ve daha yüksek hızlarındaki çarpışmalarda ise aracın şasesi ezilmektedir. Şasenin ezilmesini önlemek ve darbe deformasyon enerjisinin kademeli bir şekilde emilmesi için son yıllarda ezilme kutuları kullanılmaya başlanılmıştır. Bu projede yeni ezilme kutusu tasarımına çekirdek oluşturabilecek alüminyum ve polistiren köpük dolu alüminyum, polyester kompozit ve hibrid (kompozit/alüminyum) ikili tüplerin enerji emme özelliklerine yönelik sistematik deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar Makina, Kimyasal Teknolojiler Malzeme ve İmalat Sistemleri Araştırma Grubu tarafından desteklenmiştir. Yazarlar Institute of Statics and Dynamics of Aerospace Structures'da (Almanya) çalışan Levent Aktay'a modelleme çalışmalarında yaptığı katkılardan dolayı teşekkür etmektedirler.

İÇİNDEKİLER

1. GİRİŞ.....	14
1.1 Projenin amacı ve kapsamı	14
1.2 Literatür	15
1.2.1 Boş tüplerin ezilme davranışları	15
1.2.2 Kapalı hücreli alüminyum köpük metal basma davranışları	23
1.2.3 Köpük dolu tüplerin ezilme davranışları	28
1.3 Malzeme ve test yöntemleri	30
1.3.1 Köpük metal üretimi	30
1.3.2 Polistiren köpük	35
1.3.3 Metal tüpler	37
1.3.4 Köpük dolu tek ve ikili metal tüpler	38
1.3.5 Boş ve köpük dolu çok tüp geometriler	40
1.3.6 Kompozit tüp üretim metotları	43
1.4 Nümerik modelleme	46
1.4.1 Malzemeler ve basma testleri	46
1.4.2 Ağırlama optimizasyonu	50
1.4.3 Sitatik simulasyon	50
2. GELİŞME	52
2.1 Köpükleşme deneyleri	52
2.2 Alüminyum köpüklerin ezilme davranışları	55
2.3 Boş alüminyum tüplerin ezilme davranışları	59
2.4 Tekli alüminyum ve polistiren köpük dolu tüplerin ezilme davranışı	61
2.5 Alüminyum ve polistiren köpük dolu alüminyum ikili tüplerin ezilme davranışları	67
2.6 Altıgen ve kübik paketli alüminyum boş ve alüminyum köpük dolu çoklu tüplerin ezilme davranışları	71
2.7 Köpük dolgusunun güçlendirme etkisi	76
2.8 Tekli, ikili ve çoklu alüminyum tüplerin spesifik enerji emme özellikleri	79
2.9 Boş kompozit tüplerin ezilme davranışları	84
2.10 Boş alüminyum-kompozit ikili tüpler	97
2.11 Al-köpük dolu kompozit tüpler	104
2.12 Al-köpük dolu Al-kompozit ikili tüpler	109
2.13 Kompozit çoklu tüpler	113
2.14 Modelleme sonuçları	114
2.14.1 Alüminyum boş tüpler	114
2.14.2 Doldurulmuş alüminyum tüpler	117
SONUÇLAR	123

Tablo Listesi

Tablo 1.1	Kullanılan tozların özellikleri. D parçacık boyutu (%X) ise hacim yüzdesi.	31
Tablo 1.2	Tüp malzemesinin mekanik özellikleri.	37
Tablo 1.3	Boş tüplerin geometrik boyutları.	37
Tablo 1.4	Köpük dolu tek tüplerin geometrik özellikleri ve gruplanması.	38
Tablo 1.5	Köpük dolu ikili tüplerin geometrik özellikleri.	39
Tablo 1.7	Al köpük dolu kübik paketlenmiş tüplerin özellikleri.	42
Tablo 2.1	Denklem 2.1'deki katsayıların değerleri.	58
Tablo 2.2	Boş tüplerin ezilme test sonuçları.	61
Tablo 2.3	Tek tüplerin basma test sonuçları.	67
Tablo 2.5	Altıgen paket tüplerin ezilme özellikleri.	74
Tablo 2.6	Kübik paket tüplerin ezilme özellikleri.	74
Tablo 2.7	Çoklu tüplerde ortalama yükleri etkileyen yükler.	75
Tablo 2.8	İkili ve çoklu tüplerde güçlendirme katsayıları.	79
Tablo 2.9	Basma testinde kullanılan kompozit tüplerin kumaş ve et kalınlıkları.	86
Tablo 2.10	Farklı kalınlıktaki kompozit tüplerin özellikleri.	91
Tablo 2.11	Boş kompozit tüplerin ezilme test sonuçları (TE serisi).	94
Tablo 2.12	Boş ikili tüplerin geometrik özellikleri.	98
Tablo 2.13	Farklı yoğunlukta Al-köpük dolu kompozit tüplerin özellikleri.	105
Tablo 2.14	Köpük dolu kompozit tüplerin ezilme test sonuçları.	107
Tablo 2.15	Farklı yoğunlukta Al-köpük dolu ikili tüplerin özellikleri.	110
Tablo 2.16	Köpük dolu ikili tüplerin basma test sonuçları.	112

Şekil Listesi

Şekil 1.1	Ezilme analizinde aksenal yük-deplasman grafiği ve kullanılan terimlerin grafiksel gösterimi.	17
Şekil 1.2	Alexander'ın simetrik katlanma modeli.	18
Şekil 1.3	a) 6063-Al tüpün ($D=19,16$ mm ve $t= 0,84$ mm) simterik deformasyonu (4 katlanma), yandan görünüş ve elmas modda deformasyona uğrayan Al tüpün ($D=25$ mm ve $t= 0,286$ mm) (b) üstten ve (c) yandan görünüşleri.	19
Şekil 1.4	Simetrik ve simetrik olmayan deformasyonların yük- deplasman grafiği.	19
Şekil 1.5	Tüplerin simetrik deformasyonu, içe ve dışa doğru hareketler.	21
Şekil 1.6	%8,6 SiC-Al köpüğün basma gerilme-birim şekil değişimi davranışı.	24
Şekil 1.7	6061-Al köpüğün basma gerilme-birim şekil değişim grafikleri.	24
Şekil 1.8	6061 Al köpüğün %10 birim şekil değişimine tekabül eden gerilmelerin nispi yoğunlukla değişimi.	25
Şekil 1.9	a) açık hücreli ve b) kapalı hücreli köpük modelleri.	26
Şekil 1.10	Al metal köpükte hücre yapısı.	27
Şekil 1.11	Al köpük metal üretim akış şeması.	31
Şekil 1.12	Soğuk sıkıştırma kalıbı.	32
Şekil 1.13	Sıkıştırılmış tabletler.	32
Şekil 1.14	Tabletlerin haddelenmesi.	32
Şekil 1.15	Tabletlerin işlenmesi.	32
Şekil 1.16	Köpükleştirme düzeneği.	33
Şekil 1.17	Köpükleştirici kalıplar.	33
Şekil 1.18	Köpükleşme sonrası tablette oluşan uzama.	34
Şekil 1.19	(a) soğutma esnasında şekilsel bozulmaya uğramış köpük malzeme (uzunluk 75 mm) and (b) tam şekil almış köpük malzeme (uzunluk 75 mm).	34
Şekil 1.20	Silindirik numune kesme işlemi.	35
Şekil 1.21	Silindirik kesilmiş köpük numuneler.	35
Şekil 1.22	Izocam A.Ş. tarafından üretilen ekstrüde polisiten köpükler (Foamboard®) ve boyutları.	36
Şekil 1.23	Polisitren köpük basma testi numuneleri.	37
Şekil 1.24	Alüminyum ve polisitren köpük dolu tek tüplerin üstten görünüşü (25 mm çap tüpler).	38
Şekil 1.25	Köpük dolu ikili tüp geometrileri (a) BPH, (b)BPP ve (c) BPA serileri.	39
Şekil 1.26	Altgen paketlenmiş (a) boş ve (b) Al köpük dolu tüpler.	40
Şekil 1.27	Kübik paketlenmiş (a) boş ve (b) Al köpük dolu tüpler.	40
Şekil 1.28	Altgen paketlenme için basma aparatları (a) basma testinde hareket eden kısım ve (b) dik yöndeki hareketi kısıtlayan kısım.	41
Şekil 1.29	Kübik paketlenme için basma aparatları (a) basma testinde hareket eden kısım (b) dik yöndeki hareketi kısıtlayan kısım ve (c) basma testi.	42
Şekil 1.30	Polimerik kompozit tüp yapımında kullanılan cam fiberler, (a) sonsuz cam fiber ve (b) [0,90] dokulu kumaş.	43
Şekil 1.31	Filament sarma tekniğiyle kompozit tüp üretim düzeneği.	44
Şekil 1.32	Filament sarma tekniğinde kullanılan mandrel ve tüp sıyrıcı.	44
Şekil 1.33	Filament sarma tekniğiyle üretilmiş polimerik kompozit tüpler (a),yandan ve (b) üstten görüntü.	44
Şekil 1.34	(a)Cam fiber kumaş ve (b) sonsuz fiber kullanılarak üretilen polimerik kompozit tüplerin yüzey ve kesit alan görüntüleri.	45
Şekil 1.35	(a) Al metal tüp malzemesinin çekme gerilme birim şekil değişimi grafiği ve (b) polisitren köpük malzemesinin deneysel ve SE analizi basma gerilme-birim şekil değişimi grafikleri.	47
Şekil 1.36	Eksenel basma test düzeneği, 16 mm çaplı boş tüp.	47
Şekil 1.37	FE ağlama (a) boş tüp (tüm model) ve (b) köpük dolu tüp (yarım model): 1 ve 2: basma testi plakaları, 3: boş ve köpük dolu tüp ağlaması ve 4:köpük dolgu ağlaması.	49

Şekil 1.38	(a) 16 mm tüp için farklı yoğunluk ve hızlarda kinetik ve iç enerji değişimi ve (b) buna karşılık gelen yük-deplasman grafiği.	51
Şekil 2.1	Tablet nispi yoğunluğunun soğuk presleme basıncı ile değişimi.	52
Şekil 2.2	Fırın ve tablet sıcaklıklarının zaman ile değişimleri.	53
Şekil 2.3	Farklı zamanlarda köpüklenen numuneler: (a) 5 dakika 25 saniye (b) 5 dakika 15 saniye (c) 5 dakika 10 saniye (d) 5 dakika 5 saniye ve (e) 5 dakika	53
Şekil 2.4	Köpüklenen tabletin tabanında oluşan çökme.	54
Şekil 2.5	Al köpüklerin tipik gerilme-birim şekil değişimi grafiği.	56
Şekil 2.6	Farklı yoğunluktaki Al köpüklerin gerilme-birim şekil değişimi grafikleri.	56
Şekil 2.7	Al köpük ($0,27 \text{ g cm}^{-3}$) numunesinin (a) %0 (b) %25 (c) %50 ve (d) %75 birim şekil değişimindeki basma testi görüntüleri.	57
Şekil 2.8	Plato gerilmesine karşılık nispi yoğunluk.	58
Şekil 2.9	Model ile deneysel sonuçların karşılaştırılması.	58
Şekil 2.10	Boş alüminyum tüplerin tipik yük-deplasman davranışları.	59
Şekil 2.11	25 mm çaplı alüminyum tüplerin ezilme görüntüleri (a) %0, (b) %20, (c) %35 ve (d) %60 basma yer değiştirmeleri.	60
Şekil 2.12	Ezilmiş boş alüminyum tüpün üstten ve alttan görünüşleri.	60
Şekil 2.13	Boş Al tüplerin tipik ortalama ezilme yükü-deplasman grafikleri.	61
Şekil 2.14	Köpük dolu 25 mm tüpün, boş tüpün, boş tüp + köpüğün ve köpüğün yük-deplasman grafikleri (a) $0,27 \text{ g cm}^{-3}$ Al köpük dolu, (b) $0,35 \text{ g cm}^{-3}$ Al köpük dolu ve (c) $0,43 \text{ g cm}^{-3}$ Al köpük dolu tüpler.	62
Şekil 2.15	$0,35 \text{ g cm}^{-3}$ Al köpük dolu tüpde simetri deformasyonun ilerleyişi, deformasyon: (a) %0, (b) %20, (c) %35 ve (d) %50.	63
Şekil 2.16	Simetrik deformasyona uğrayan Al köpük dolu tüpün iç görünüşü.	63
Şekil 2.17	Polisitren köpüklerde karışık deformasyon: (a) 25 mm dolu tüpün içi, (b) 35 mm dolu tüpün içi, (c) 25 mm dolu tüpün dışı ve (d) 35 mm dolu tüpün dışı.	64
Şekil 2.18	Polisitren köpük ($0,0321 \text{ g cm}^{-3}$) dolu tüplerin yük-deplasman grafikleri: a) 25 mm ve b) 35 mm Al tüp.	65
Şekil 2.19	Polisitren köpük dolu tüplerin ortalama yüklerinin boş tüp ve köpük ile karşılaştırılması a) 25 mm ve b) 35 mm Al tüp.	66
Şekil 2.20	BPH numunelerin tipik (a) yük-deplasman ve (b) ortalama yük-deplasman grafikleri.	68
Şekil 2.21	Deforme olmuş BPH numunesinin kesiti.	68
Şekil 2.22	BPP numunelerin tipik (a) yük-deplasman ve (b) ortalama yük-deplasman grafikleri.	69
Şekil 2.23	Deforme olmuş BPP numunesinin kesiti.	70
Şekil 2.24	BPA numunelerin tipik (a) yük-deplasman ve (b) ortalama yük-deplasman grafikleri.	70
Şekil 2.25	Deforme olmuş BPA numunesinin kesiti.	70
Şekil 2.26	Ezilen çoklu boş tüpler: (a) altgen paket (MHE) ve (b) kübik paket (MCE).	71
Şekil 2.27	Ezilen Al köpük çoklu tüpler, altgen paket (MHF) üstten (a) ve kenerdan (b) görünüş ve kübik paket (MCF) üstten (c) ve kenerdan (d) görünüş.	72
Şekil 2.28	Çoklu tüp paketlerin yük-deplasman grafikleri: (a) boş ve köpük dolu altgen paket ve (b) boş ve köpük dolu kübik paket.	73
Şekil 2.29	Boş tüplerin yük toplamlarının paketlenmiş tüplerin yükleriyle karşılaştırılması: (a) altgen paket (MHE) ve (b) kübik paketleme (MCE).	74
Şekil 2.30	Çoklu tüplerin ezilme yüklerinin boş tüp ve köpüklerin yüklerinin toplamı ile karşılaştırılması: (a) MFH1, (b) MHF2, (c) MCF1 ve (d) MCF2.	76
Şekil 2.31	Etkileşim yüküne karşılık köpük plato yükü.	78
Şekil 2.32	(a) altgen tüplerde ezilen komşu tüp duvarlarının kesiti, (b) kübik paketlemede ezilen köpük dolu tüpler ve (c) kübik paketli ezilmiş yapıdan alınan tek tüp.	78
Şekil 2.33	Boş tüp, dolu tüp ve boş tüp+Al köpük enerji emme miktarları, (a) $0,27$, (b) $0,35$ ve $0,43 \text{ g cm}^{-3}$ köpük yoğunlukları.	81
Şekil 2.34	Spesifik enerjinin tüp toplam ağırlığı ile değişimi.	82
Şekil 2.35	İkili ve boş tüplerde SAE'nun deplasman ile değişimi.	82

Şekil 2.36	Çoklu ve boş tüplerde SAE'nin deplasman ile değişimi.....	83
Şekil 2.37	Çoklu ve boş tüplerde SAE'nin deplasman ile değişimi, (a) altıgen ve (b) kübik paket.....	84
Şekil 2.38	Çoklu dolu tüplerin SAE'lerinin dolu tekli tüp ile karşılaştırılması: (a) altıgen ve (b) kübik.....	84
Şekil 2.39	Filament sarma tekniğiyle hazırlanan tüplerin basma test grafikleri (kalınlık 1-2 mm).....	85
Şekil 2.40	Filament sarma tekniğiyle hazırlanan tüpün ezilme sonrası (a) üstten (fiber ayrışması) ve (b) yandan görüntüleri (bükülme).....	85
Şekil 2.41	[0,90] dokulu cam fiber kumaş kullanılarak hazırlanan farklı kalınlıktaki boş kompozit tüplerin basma testi yük-deplasman grafikleri; kalınlık (a) 0,86, (b) 0,71, (c)1,07 ve (d)1,53 mm.....	87
Şekil 2.42	Boş kompozit tüplerin ezilme mekanizmaları a) ilerleyen ezilme, b) basma kayması ve (c) radyal ve eksenel ayrılma.....	87
Şekil 2.43	İlerleyen ezilme deformasyon bölgesinde (a) matris kırılması, b) fiber kırılması ve c) matris ve fiber arayüzeyi ayrılması.....	88
Şekil 2.44	Polimerik kompozit tüp üretiminde kullanılan 165 g m^{-2} yoğunluktaki E-cam fiber kumaşın dokusu (2x2 twill).....	89
Şekil 2.45	Ezilme eksenine 0/90 ve 45/45 derece açılı kompozit tüplerin a) yük-deplasman ve (b) SAE-deplasman grafikleri.....	89
Şekil 2.46	Cam kumaşla üretilen kompozit tüplerde fiberlerin şematik gösterimi.....	90
Şekil 2.47	Farklı et kalınlığına sahip kompozit boş tüpler.....	90
Şekil 2.48	Farklı ortalama et kalınlığındaki kompozit tüplerin yük-deplasman eğrileri, ortalama.....	92
Şekil 2.49	0,41 mm kalınlığındaki 45/45 fiber açılı kompozit tüpün (a) yük-deplasman grafiği ve (b) ezilme görüntüleri.....	93
Şekil 2.50	(a) 0,59 mm kalınlığındaki kompozit tüpün (a) yük-deplasman grafiği ve (b) ezilme görüntüleri.....	95
Şekil 2.51	Kompozit tüplerin (a) yük ve (b) SAE değerlerinin Al tüp ile karşılaştırılması.....	95
Şekil 2.52	(a) tüp ağırlığının maksimum ve ortalama yük değerlerine ve (b) SAE değerlerine etkisi.....	96
Şekil 2.53	27 mm uzunluğunda 0,29 mm kalınlığındaki Al tüplerin yük, ortalama yük ve SAE-deplasman grafikleri.....	97
Şekil 2.54	Al-kompozit ikili tüplerin yandan ve üstten görünüşleri.....	98
Şekil 2.55	Boş ikili tüplerin yük-deplasman davranışı.....	98
Şekil 2.56	Tüp ağırlığının boş ikili tüplerde (a) maksimum ve ortalama yük değerlerine ve (b) SAE değerlerine etkisi ve (c) boş ikili tüplerin SAE değerlerinin boş kompozit ve Al tüple karşılaştırılması.....	99
Şekil 2.57	İlerleyen ezilme ile deforme olan boş ikili tüpün (a) yük-deplasman eğrisi ve (b) ezilme görüntüleri.....	100
Şekil 2.58	Basma kayması ile deforme olan boş ikili tüpün (a) yük-deplasman eğrisi ve (b) ezilme görüntüleri.....	101
Şekil 2.59	20 mm ezilme sonrasında ikili tüplerin (a) üstten ve (b) alttan görüntüleri.....	102
Şekil 2.60	Ezilmiş tekli Al tüplerin (a) üstten ve (a) alttan görüntüleri.....	102
Şekil 2.61	Basma kaymasıyla deforme olmuş ikili tüpün Al tüpünün deformasyon mekanizması, ezilmenin arka yüzeyden görüntüsü.....	103
Şekil 2.62	İkili tüplerin ezilme yük değerlerinin tekli tüplerin yük değerleriyle ve bunların toplamıyla kıyaslanması.....	103
Şekil 2.63	İkili tüplerin SAE değerlerinin tekli tüplerin SAE değerleriyle ve bunların toplamıyla kıyaslanması.....	104
Şekil 2.64	(a) tel erozyonla kesilmiş silindirik Al köpük ve (b) köpük dolu kompozit tüp.....	104
Şekil 2.65	Al köpük dolu kompozit tüplerin yük- deplasman davranışları.....	105
Şekil 2.66	Al köpük dolu kompozit tüpün (a) yük-deplasman davranışı ve (b) ezilme görüntüleri.....	106
Şekil 2.67	Köpük yoğunluğunun ortalama yük ve maksimum yük değerlerine etkisi.....	107
Şekil 2.68	(a) $0,25 \text{ g cm}^{-3}$ (b) $0,33 \text{ g cm}^{-3}$ ve (c) $0,44$ ve $0,27 \text{ g cm}^{-3}$ yoğunlukta köpük dolu kompozit tüplerin yük değerlerinin boş kompozit, köpük ve bunların yük değerleri toplamıyla karşılaştırılması.....	109

Şekil 2.69	Köpük dolu kompozit tüplerin SAE değerlerinin boş tüp ve köpüğün SAE değerleri toplamıyla karşılaştırılması.	109
Şekil 2.70	Al köpük dolu Al-kompozit ikili tüpler, üstten ve yandan görünüş.	110
Şekil 2.71	Al köpüklerle doldurulmuş ikili tüplerin ezilme testlerine ait yük-deplasman grafikleri: (a) boş kompozit ve ikili tüp, b) köpük dolu ikili tüp ve (c) köpük dolu Al ve kompozit tüp ile karşılaştırma ve (d) SAE-deplasman grafikleri.	111
Şekil 2.72	Al köpük dolu ikili tüpün ezilme testi sonrası görüntüleri, (a) ayrılan kompozit tüp ve (b) içteki Al köpük dolu tüpteki katlanmalar.	112
Şekil 2.73	Köpük dolu tek Al tüp katlanması.	113
Şekil 2.74	İkili tüplerde kompozitin katlanmalar arasına girmesi ve düzensiz katlanmalar.	113
Şekil 2.75	a)Çoklu tüp ezilme test düzeneği ve b) Al-köpük dolu tüpler.	114
Şekil 2.76	16mm çaplı boş tüpün farklı ağ sayılarındaki nümerik ve deneysel yük-deplasman grafikleri , element sayıları (a) 40x20, (b) 40x40, (c) 40x80 ve (d) 40x160.	115
Şekil 2.77	Nümerik ve deneysel sonuçların karşılaştırılması, (a) yük-deplasman ve (b) ortalama yük-deplasman grafikleri.	116
Şekil 2.78	16 mm' lik tüpün farklı yüzde deformasyonlardaki kesit resimleri: (a) deneysel ve (b) nümerik. ...	116
Şekil 2.79	25 mm' lik tüpün farklı yüzde deformasyonlardaki kesit resimleri: (a) deneysel ve (b) nümerik. ...	117
Şekil 2.80	16 mm köpük dolu ($27,8 \text{ kg m}^{-3}$) tüpün farklı yüzde deformasyonlardaki kesit resimleri: (a) deneysel ve (b) nümerik.	118
Şekil 2.81	16 mm köpük dolu ($27,8 \text{ kg m}^{-3}$) tüpün nümerik ve deneysel yük-deplasman grafikleri.	118
Şekil 2.82	25 mm köpük dolu ($27,8 \text{ kg m}^{-3}$) tüpün farklı yüzde deformasyonlardaki kesit resimleri: (a) deneysel ve (b) nümerik.	119
Şekil 2.83	25 mm köpük dolu ($27,8 \text{ kg m}^{-3}$) tüpün nümerik ve deneysel yük-deplasman grafikleri.	119
Şekil 2.84	Kısmi ezilmeye uğramış ($27,8 \text{ kg m}^{-3}$) polistiren köpük dolu tüplerin dış yüzeyleri: (a) 16 mm ve.. (b) 25 mm tüp.	120
Şekil 2.85	Nümerik ve deneysel katlanma uzunluklarının köpük yoğunluğu ile değişimi.	121
Şekil 2.86	Nümerik ve deneysel SEA miktarları (%50 deformasyon): (a) 16 mm ve (b) 25 mm tüp.	122
Şekil 3.1	Tasarlanan altıgen paketli köpük dolu tüplerden oluşan ezilme kutusu ve kesit görünüşü.	126
Şekil 3.2	Tasarlanan altıgen paketli köpük dolu tüplerin (a) deneysel ve (b) model ezilme görüntüleri.	127

ÖZET

Bu projede alüminyum (Al) ve polisitren kapalı hücreli köpük dolu boş, ikili tüp ve çok tüplü geometrilerin ve boş kompozit, hibrid kompozit/metal ve alüminyum köpük dolu kompozit ve hibrid tüplerin statik hızlarda ezilme davranışları deneysel incelenmiştir.

Al köpük dolumu ile Al tüplerde ezilme modu simetrik moda dönüşmüştür. Daha düşük plato gerilmesine sahip polisitren köpük dolumu ise karışık mod ile sonuçlanmıştır. Tüplerde oluşan deformasyon mod değişimi, köpük dolgunun tüpün kalınlığını artırma etkisinden kaynaklanmaktadır. Köpük dolgunun boş Al tüplere etkilere şöyle sıralanabilir: (a) ortalama yük boş tüp ve köpüğün ortalama yüklerinin toplamının üzerine çıkmakta (etkileşim etkisi) ve tüp katlanma uzunluğu azalmaktadır. Benzer sonuçlar ikili tüplerde de görülmüştür. Boş tüplere benzer olarak altıgen ve kübik paketli tüplerde köpük dolgusu deformasyon modunu elmadan simetrik deformasyona çevirmiştir. Paketlenmiş boş tüplerde ortalama ezilme yükü eşit sayıdaki boş tüplerin ezilme yüklerinin toplamından daha yüksektir. Ortalama ezilme yükündeki bu artış, tüpler arasında ve tüpler ve kalıp duvarları arasındaki sürtünme ve sınırlamaların sonucudur. Tekli Al tüplerde köpüğün güçlendirme katsayısı 1,7 bulunmuştur. Bu değer daha önce kare tüpler için belirlenen 1,8 değeri ile uyumaktadır. Ancak çoklu tüplerde güçlendirme etkisi tekli tüplerden daha yüksektir. İkili Al tüplerin güçlendirme etkisi çoklu tüplerle benzerdir. Dolayısıyla her iki geometride köpük dolu tüplerde güçlendirme etkisini artırmak için kullanılabilir. Köpük dolu tüplerde enerji emme boş tüp ve köpüğün enerjilerinin toplamından daha yüksektir. Ancak boş tüpün kalınlığının artırılması ile karşılaştırıldığında, köpük dolu tüplerin enerji emme miktarı kalın tüpten daha düşüktür. Bu çalışma sonucunda verimli tüp dolgusu tasarımında, güçlendirme etkisinin ve plato gerilmesinin esas alınarak uygun tüp-köpük kombinizasyonun seçiminin önemi ortaya çıkmıştır. Etkin köpük dolgusu için seçilen köpüğün yoğunluğunun kritik bir değerin üzerinde olması gerekmektedir. Çoklu paketli tüplerde köpük dolgusuyla ulaşılan spesifik enerji emme (SAE) değerleri boş tüpten daha yüksek olmamasına karşın, çoklu tüp geometrileri benzer köpük yoğunluklarındaki köpük dolu tek tüplerden daha yüksek SAE değerlerine sahiptirler. Bu ise çoklu tüplerin deformasyonu esnasında oluşan sürtünme ve sınırlamalardan kaynaklanmaktadır.

Kompozit boş tüplerde iki farklı ezilme modu gözlenmiştir: ilerleyen ezilme ve katastrofik kırılma (basma bantları). İlerleyen ezilme daha yüksek ortalama yük ve SAE değerleri ile sonuçlanmıştır. Kalınlığın düşük olduğu tüplerde ilerleyen ezilme modunun daha fazla oluşması tüpün uç yüzeylerinde kesme esnasında oluşan hasarlardan ve basma aparatı ile tüp uç yüzeyleri arasındaki heterojen kontaklardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Boş tüpler ilerleyen ezilme modunda maksimum yük sonrasında sabit bir yük altında deforme olmaktadır. Bu ise ortalama yük kullanılarak SAE hesaplanmasına olanak sağlamıştır. Hibrid kompozit/metal tüplerde deformasyon kompleks elmas modda oluşmuştur. Bu ise hibrid tüplerde, kompozit ve Al tüplerin SAE toplamlarından daha yüksek SAE'lere neden olmaktadır. SAE değerlerindeki bu artış Al tüp deformasyonuna kompozit tüp tarafından oluşturulan sınırlamanın sonucudur. Ortalama yüke göre SAE hesaplandığında, boş kompozit tüp daha yüksek SAE değerlerine sahiptir. Köpük dolu kompozit tüplerde iki farklı davranış gözlenmiştir. Yüksek köpük yoğunluklarında, köpük dolumu ile SAE değerleri kompozit tüpün ve köpüğün SAE toplamlarının üzerine çıkmaktadır. Diğer durumda ise tüp ve köpük bireysel deforme olmaktadır. Bu etkilerin nedenleri tartışılmıştır. Hibrid tüplerde köpük dolumu SAE değerlerini artırmakta etkisizdir. Bunun temel nedeni ise Al tüpün katlanmasına karşı köpüğün gösterdiği direnç nedeni ile kompozit tüpün ezilme esnasında katastrofik kırılmasıdır.

Bu proje sonucunda paketli köpük dolu ve hibrid kompozit/Al tüplerin ezilme kutularında kullanılmalarının (sabit hacim) boş tüplerden daha avantajlı olduğu bulunmuştur. Ağırlığın önemli olduğu durumlarda ise hibrid tüpler boş tüplerle karşılaştırılabilecek SAE değerlerine sahiptirler. Modelleme çalışmaları ise farklı tüp ve köpük dolgu geometrilerinin test sayısını azaltarak modellenebileceği göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Tüp, kompozit, alüminyum köpük, modelleme, basma testi

ABSTRACT

In this study the static crushing behavior of Al and polystyrene foam-filled bitubular and multi-tube geometries and empty and foam filled composite and hybrid (composite/Al) tubes were investigated through compression testing.

Al foam filling was reverted the deformation mode of single tubes from diamond into concertina. In polystyrene foam-filled tubes the deformation mode switched into mixed and/or concertina. The change of deformation mode of tubes when filled with foam was due to the wall thickening effect of foam filling. The effects of foam filling in single tubes were (a) to increase the average crushing load over that of the tube (alone) + foam (alone), known as interaction effect and (b) to decrease the fold length. Similar effects of foam filling were also found in bitubular geometries. Empty multi tube geometries, both hexagonal and cubic packed, deformed in diamond mode of deformation while Al foam filling changed the deformation mode into concertina. In empty multi tube geometries the average crushing load values were however higher than that of the sum of the average crushing loads of equal number of single tubes. The increase in average crushing loads of empty tube geometries was solely due to the frictional forces between adjacent tubes walls, tube walls and die wall and constraining effect of the die itself. The effect was however greater in hexagonal packed design due to more contact surfaces between adjacent tubes and tube walls and die wall. In foam filled multi-tube geometries, the load values were also found higher than those of foams+tubes, showing the presence of interaction effect. The strengthening coefficient of foam filling in single tubes was extracted 1.7. This value of strengthening coefficient was also very similar to the previously determined strengthening coefficient value for square Al tubes (1.8). The strengthening coefficients of bitubular and multi-tube geometries were however shown to be greater than that of foam filled single tubes. The strengthening coefficients of bitubular geometries were comparable with those of multi-tube geometries. Therefore, both designs can be used to increase the strengthening coefficients of foam-filled tubes. The foam density was found to increase the interaction coefficients in multi-tube designs. Although foam filling resulted in higher energy absorption than the sum of the energy absorptions of the tube alone and foam alone, it was found to be not more effective in increasing the specific energy than simply thickening the tube walls. For efficient foam filling the foam plateau load should be higher than a critical value. The foam filling in multi

tube designs were not effective in increasing Specific Absorbed Energies (SAE) over the empty tube, however at similar foam filler densities multi-tube geometries were energetically more effective than single Al foam-filled tubes for both hexagonal and cubic packed geometries. This was due to the frictional loads of the multi-tube designs.

In empty composite tubes, two failure mechanisms, progressive crushing and catastrophic failure (compression shear) were observed in the testing of empty composite tube. The progressive crushing mode led to higher crushing loads hence SAEs. The predominant progressive crushing mode of empty tubes of thinner wall section was attributed to the surface end surface inhomogeneous. Empty composite tubes showed almost a constant mean crush load in the progressive crushing region, which allowed the calculation of SAE values based on the mean crush load. In hybrid tube, the deformation mode of Al tube was found to be a more complex form of the diamond mode of deformation, leading to higher SAE values than the sum of the SAEs of empty composite and empty metal tube. The increased load and SAE values of hybrid tubes were attributed to the interaction between composite and metal tube. Based on the SAE mean crush load calculation it was found that empty composite tube absorbed more energy than hybrid tube. The foam filling of the composite tubes came with two different results. It increased the foam filled tube crush loads over the sum of the crush loads of empty composite and foam. In the latter case, although foam filling stabilized the initial region of the load-displacement curves of the filled tubes, it was found to be not effective in increasing foam filled tube crush load over the sum of the crush loads of empty composite tube and foam in the progressive crushing region. These two effects were discussed in terms of possible interactions between composite tube and foam. The foam filling of hybrid composite tubes was found to be ineffective in increasing crush loads and hence SAE values over the sum of the crush loads of composite tube, Al tube and foam.

The results have shown that foam filled multi Al tubes and empty hybrid composite tubes could be used in crash boxes when a constant volume is considered. For the constant mass applications hybrid tubes showed similar SAE values with empty composite tubes. Modeling studies on single foam-filled tubes have shown that complex geometries of crash boxes can be modeled by reducing the number of experiments.

Key words: Tube, Composite, Aluminum Foam, Modelling , Compression Testing

1. GİRİŞ

1.1 Projenin amacı ve kapsamı

Trafik kazaları sayısının her yıl arttığı ve kaçınılmaz fiziksel ve manevi kayıplara neden olduğu bilinmektedir. Taşıt kazalarında yaşamını yitiren ve yaralananların sayısı belki de savaş ve doğal afetlerde (deprem, sel ve benzeri) yaşamını yitirenlerin veya yaralananların sayısı ile benzer büyüklüktedir. Sadece 1991 yılında uykusuz, dikkatsiz ve alkollü sürücüler tarafından gerçekleşen 438338 trafik kazasında 4596 kişi yaşamını yitirmiş ve 109899 kişi ise yaralanmıştır. Bahsedilen kazalar sonucunda oluşan fiziksel kayıp 262 milyon ABD Dolar'ına yakındır (AKKAYA, 2001).

Kazalarda sürücü ve yolcuları koruyucu sistemler otomobil, raylı taşıt ve uçak endüstrilerinde önemli bir tasarım problemidir. Araçlarda önemli derecede korumayı artıracak yeni teknolojiler son yıllarda ilgi çekmektedir. Ezilmeye karşı dayanıklılık mevzuatlarındaki artış ile birlikte artan müşteri emniyet duyarlılığı ve sigorta firmaları tarafından konulan maliyet kısıtlamaları son zamanlarda otomobil endüstrisinde gözlenen gelişmelerdir.

Otomobillerde ezilme enerjisini emen (sönümleyen) sistemler, kolon şeklindeki yapıların, örneğin metal tüplerin, eksensel katlanma mekanizmasına dayanmaktadır. Bu yapıların mükemmel deformasyon enerjisi emme özellikleri bilinmektedir. Benzer mekanizma ile çalışan yapılar, deformasyon enerjisinin kontrollü bir şekilde emilmesi gereken otomobil, tren ve diğer taşıtlarda da kullanılmaktadır. Otomobillerde kaza esnasında açığa çıkan deformasyon enerjisini emmek için tasarlanan ezilme kutuları genellikle tampon ve şase arasına yerleştirilmektedir. Ezilme kutuları desteklediği otomobil parçalarında kaza esnasında oluşabilecek hasarların maliyetini azaltmak için tasarlanmış olup, çok az bir maliyetle değiştirilme özelliklerine sahiptirler.

Ucuz ve mükemmel ezilme özellikleri nedeni ile çelik otomobil endüstrisinde en fazla kullanılan yapısal malzemedir. İnce metal malzeme işleme ve ucuz kaynak metotları otomobil endüstrisinde, çelik kolon yapıların şekillendirilmesinde yaygın kullanılan yöntemlerdir. Çelikten üç kat daha hafif olan alüminyum ve magnezyum alaşımları son yıllarda otomobil endüstrisinin oldukça ilgisini çekmektedir. Ağırlığın önemli tasarım kriteri olduğu yapıların, çelikle benzer elastisite modülüne ve enerji emme özelliğine sahip alüminyum ve alüminyum alaşımlarında işlenmesi daha uygundur.

Kolonsu yapıların ezilme davranışları yaklaşık 30 yıldır çalışılmaktadır. Son yıllarda ise kolonsu yapıların hafif köpük malzeme ile doldurulması önem kazanmıştır. Köpük dolgu yapılarda spesifik enerji emme miktarı, tek tüpün ve tek köpüğün enerji emme miktarlarının toplamından daha yüksektir. Dolu tüplerde gözlenen spesifik enerji emme değerindeki bu artış etkileşim etkisi olarak bilinmektedir. Köpük dolu tüpler üzerine yapılan çalışmaların bir çoğu tek tüp üzerine yapılmış ve çoklu köpük dolu tüplerin ezilme davranışları henüz detaylı çalışılmamıştır. Tekli tüplerde, enerji emme mekanizmaları şöyledir: tüpün katlanması, dolgu köpük malzemesinin ezilmesi ve etkileşim etkisi. Enerji emme değerlerini artırmak için diğer mekanizmaların (örneğin sürtünme ve tüp deformasyonunun sınırlandırılması) oluşturulması gerekmektedir. Örnek gösterilen bu iki mekanizmanın enerji emme miktarları üzerine etkileri çoklu tüplerin deformasyonu ile bu projede araştırılmıştır. Karşılaştırma amacı ile tek ve ikili tüp geometrileri de farklı dolgu malzemeleri kullanılarak test edilmiştir. Dolgu malzemesi olarak son yıllarda oldukça ilgi çeken kapalı hücreli alüminyum ve polisitren köpükler seçilmiştir. Projede farklı tüp geometrilerin enerji emme özellikleri belirlenmiş ve tekli tüplerin deformasyon davranışları sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmiştir. Metal tüplerin yerine kullanılacak boş ve köpük dolu cam elyaf kompozit ve hibrid (metal ve kompozit tüpler) tüplerin davranışları da belirlenmiştir.

1.2 Literatür

1.2.1 Boş tüplerin ezilme davranışları

Metal tüpler eksensel yük altında karakteristik ezilme davranışları gösterirler (Şekil 1.1); uygulanan ani yük (P), ortalama ezilme yükünün (P_a) altında veya üstünde, deplasman miktarı (δ) ile değişmektedir. Herhangi bir deplasman miktarında tüpün deformasyonu ile emilen enerji Şekil 1.1'deki taralı alana karşılık gelmekte ve aşağıdaki denklem ile gösterilmektedir,

$$E(\delta) = \int_0^{\delta} P d\delta \quad (1.1)$$

Denklem 1.1'deki deplasman ezilme veya kısalma miktarıdır. Enerji miktarına karşılık gelen ortalama ezilme yükü ise aşağıdaki denklem ile belirlenebilir,

$$P_a(\delta) = \frac{E(\delta)}{\delta} \quad (1.2)$$

Spesifik Enerji Emme (SAE) yapının deformasyon esnasında enerji emme kabiliyetini gösterir ve birim kütle veya birim hacim esas alınarak hesaplanabilir. Birim kütle tarafından emilen enerji aşağıdaki denklemle hesaplanır,

$$SAE = \frac{\int_0^{\delta} P d\delta}{m_t} \quad (1.3)$$

burada m_t deformasyona uğrayan yapının toplam kütesidir. Ortalama ezilme yükün $\{0, \delta\}$ deplasman aralığında maksimum yüke (P_{max}) oranı Ezilme Yükü Verimliliği (A_E) olarak tanımlanmıştır,

$$A_E = \frac{P_a(\delta)}{P_{max}(\delta)} = \frac{E(\delta)}{P_{max}(\delta)\delta} \quad (1.4)$$

Toplam Verimlilik (T_E) ise emilen enerjinin P_{max} ile deforme olan elementin uzunluğunun (l) çarpımına bölünmesi ile hesaplanır,

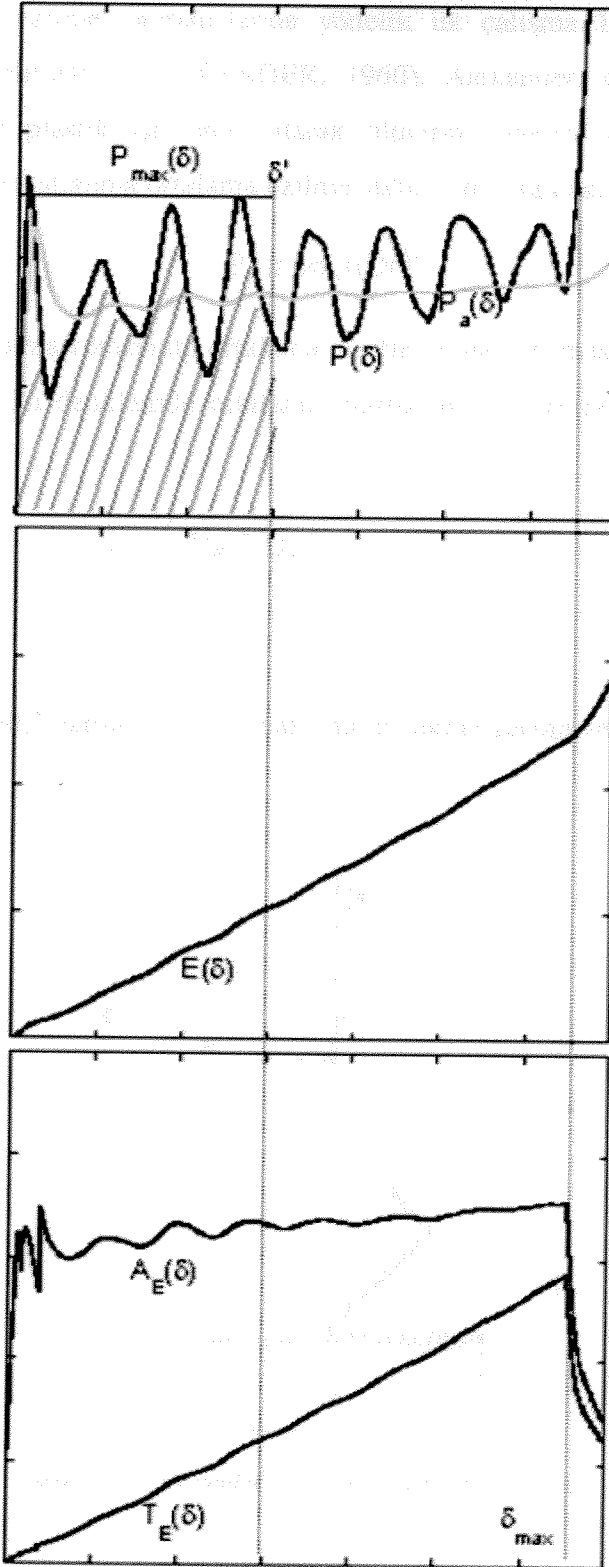
$$T_E = \frac{E(\delta)}{P_{max}(\delta)l} \quad (1.5)$$

Toplam verimliliğinin maksimuma ulaştığı noktaya tekabül eden deplasmanın (δ_{mak}), elementin ilk uzunluğuna oranı Strok Verimliliği (S_E) olarak tanımlanır,

$$S_E = \frac{\delta_{max}}{l} \quad (1.6)$$

Deplasmanın ilk uzunluğa oranı ise Deplasman Kapasitesidir (D_c):

$$D_c = \frac{\delta}{l} \quad (1.7)$$



Şekil 1.1 Ezilme analizinde eksensel yük-deplasman grafiği ve kullanılan terimlerin grafiksel gösterimi.

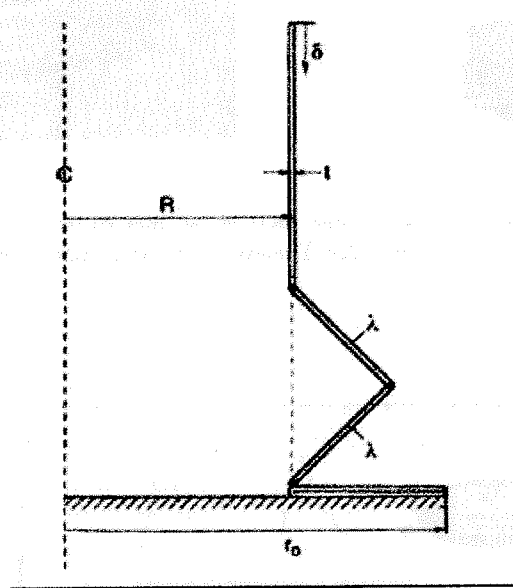
Boş metal tüplerin ezilme davranışlarına yönelik ilk çalışma 1960 yılında Alexander tarafından gerçekleştirilmiştir (ALEXANDER, 1960). Alexander, silindirlerin uzaması ve eğilmesi için gereken plastik işi temel alarak tüplerin *simetrik* katlanma davranışlarını incelemiştir (Şekil 1.2) ve katlanma ortalama ezilme yükü için aşağıdaki denklemi bulmuştur,

$$P_a \cong 6\sigma_0 t(Dt)^{1/2} \quad (1.8)$$

Denklem 1.8'de, σ_0 tüp malzemesinin ortalama plastik akma gerilmesi, t tüpün kalınlığı ve D ise tüpün dış çapıdır. Bu denklemde ortalama plastik akma gerilmesi aşağıdaki denklemle gösterilmektedir,

$$\sigma_0 = \left(\frac{\sigma_{0.2} + \sigma_U}{2} \right) \quad (1.9)$$

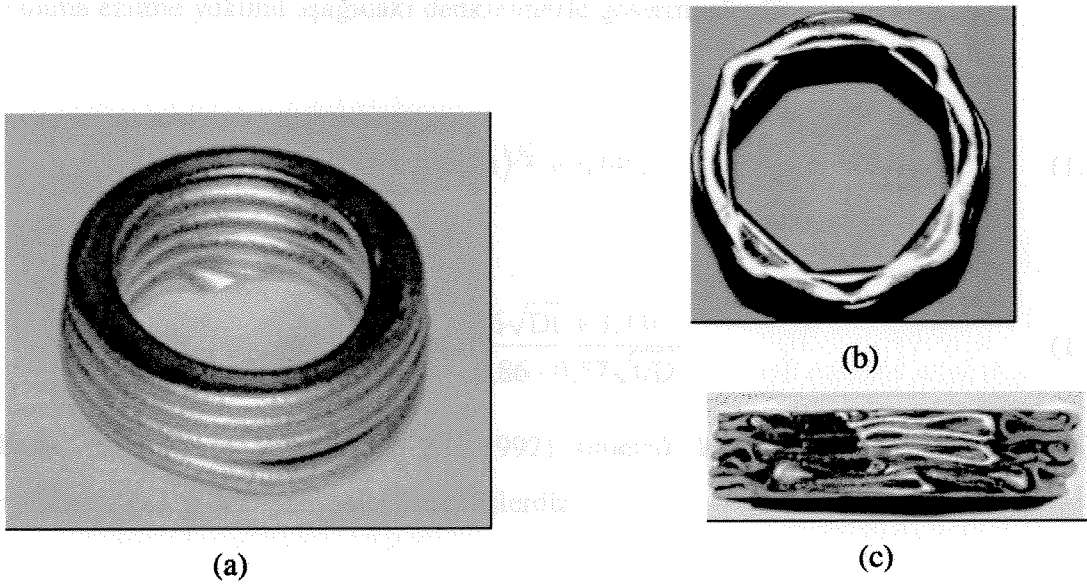
Denklem 1.9'da $\sigma_{0.2}$ %0,2 akma ve σ_U ise maksimum çekme gerilmeleridir.



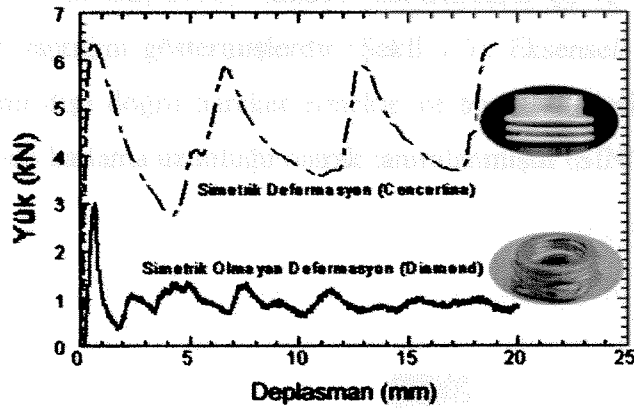
Şekil 1.2 Alexander'ın simetrik katlanma modeli.

Metal tüplerin ezilme davranışlarına yönelik ilk çalışmalar, deformasyon modlarının tüp malzeme özellikleri, tüp şekli ve tüp şekilsel parametrelerine göre sınıflandırılması üzerinedir. Deformasyon modlarının sınıflandırılmasına yönelik ilk sistematik çalışma 1983 yılında Andrews ve diğerleri (ANDREWS, 1983) tarafından gerçekleştirilmiştir. Farklı t/D ve L/D oranlarına sahip alüminyum metal tüplere yapılan testler sonucunda tüplerin ezilme

davranışları sınıflandırılmıştır. Metal tüpler eksensel basma yükleri altında dört ana modda deformasyona uğrayabilirler. Bunlar: *simetrik* (ilerleyen katlanma, katlanma tüpün bir ucunda başlayarak ilerlemektedir, bkz. Şekil 1.3(a)), *simetrik olmayan* veya *elmas* (ilerleyen katlanma, bkz. Şekil 1.3(b) ve (c)), *karışık* (deformasyon simetrik başlıyor ancak bir süre sonra elmasa dönüyor) ve *Euler eğilmesi*. Şekil 1.4'de simetrik ve elmas modlarda deforme olan Al tüplerin ezilme yük-deplasman grafikleri görülmektedir. Her iki modda da deformasyon yükü deplasmanla birlikte yükselmeler ve düşmeler göstermektedir. Yüklerde gözlenen yükselme tepe nokta sayısı katlanma sayısını vermektedir.



Şekil 1.3 a) 6063-Al tüpün ($D=19,16$ mm ve $t=0,84$ mm) simetrik deformasyonu (4 katlanma), yandan görünüş ve elmas moda deformasyona uğrayan Al tüpün ($D=25$ mm ve $t=0,286$ mm) (b) üstten ve (c) yandan görünüşleri.



Şekil 1.4 Simetrik ve simetrik olmayan deformasyonların yük- deplasman grafiği.

Andrews ve diğeri (ANDREWS, 1982) HT30-A1 alaşım tüplerinin ezilme modlarını L/D ve t/D oranlarına bağlı olarak bir grafik üzerinde göstermişlerdir. İnce duvarlı tüplerde t/D oranının 0,013'den küçük olduğu durumlarda baskın deformasyon modunun elmas olduğunu ve katlanmaların t/D oranının azalması ile arttığını da bulmuşlardır. Yine aynı çalışmada, simetrik deformasyonun daha yüksek ortalama ezilme yüklerinde ilerlediği ve daha fazla enerji emdiği, ancak tek bir katlanma incelendiğinde elmas modun daha fazla enerji emdiği gösterilmiştir. Abramowicz ve Jones (ABRAMOWICZ, 1984, 1986 ve JONES, 1985) Alexander'ın modelini geliştirerek 1984 ve 1985 yıllarında simetrik katlanma modu için ortalama ezilme yükünü aşağıdaki denklemlerle göstermişlerdir,

$$P_a \cong \sigma_0 t (6(Dt)^{1/2} + 3,44t) \quad (1.10)$$

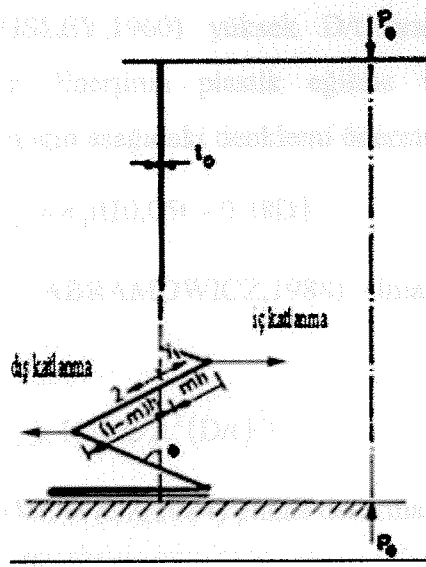
ve

$$P_a \cong \sigma_0 t \frac{6\sqrt{Dt} + 3,44t}{0,86 - 0,57\sqrt{t/D}} \quad (1.11)$$

Wierzbicki ve diğeri (WIERZBICKI, 1992) simetrik katlanma deformasyon ortalama ezilme yükü için aşağıdaki denklemi önermişlerdir,

$$P_a = 7,933 \sigma_0 t^2 \left(\frac{D}{t} \right)^{1/2} \quad (1.12)$$

Singace ve Elbosky (SINGACE, 1996) simetrik katlanmanın içe ve dışa doğru olmak üzere iki ayrı deformasyon yaptığını göstermişlerdir (Şekil 1.5). Eksensel deformasyon esnasında tüp kısmi içe ve kısmi dışa doğru hareket etmekte ve bu hareketlerin toplam uzunluğu ise simetrik deformasyonun katlama uzunluğu olarak tanımlanmıştır (SINGACE,1995).



Şekil 1.5 Tüplerin simetrik deformasyonu, içe ve dışa doğru hareketler.

Dışa katlanmanın toplam katlanma uzunluğuna oranı eksentrisite faktörüdür. Eksentrisite faktörü 0,65 olarak önerilmesine karşın deneysel sonuçlar bu değer in altındadır (SINGACE,1996). Denklem 1.13 Singace tarafından simetrik katlanmanın ortalama ezilme yükünü belirlemek için önerilmiştir,

$$\frac{P_a}{M_p} \cong 22,27 \left(\frac{D}{t} \right)^{1/2} + 5,632 \quad (1.13)$$

Denklem 1.13'de, $M_p = \sigma_0 t^2 / 2\sqrt{3}$ birim uzunluk plastik eğilme momentidir. Deformasyon esnasında oluşan toplam eğilme için gereken iş ve enerjiyi minimize ederek, Singace (SINGACE,1999) elmas katlanma için gereken ortalama ezilme yükü aşağıdaki denklemi kullanarak belirlemiştir,

$$\frac{P_a}{M_p} \cong -\frac{\pi}{3} N + \frac{2\pi^2}{N} \tan\left(\frac{\pi}{2N}\right) \frac{D}{t} \quad (1.14)$$

burada N oluşan toplam katlanma sayısıdır. Alexander (ALEXANDER,1960) elmas katlanmada, enerjinin plastik deformasyon noktalarında kullanıldığını varsayarak, aşağıdaki denklemi elmas katlanma için önermiştir,

$$P_a \cong 2,286N^2 \sigma_0 t^2 \quad (1.15)$$

Pugsley ve Macaulay (PUGSLEY,1960) yüksek D/t oranına sahip tüplerdeki elmas deformasyonu incelemiştir. Enerjinin plastik eğilme ve kayma olarak emildiğini varsayarak, elmas deformasyon için aşağıdaki denklemi önermişlerdir,

$$P_a \cong \sigma_o t(10,05t + 0,38D) \quad (1.16)$$

Abramowicz ve Wierzbicki (ABRAMOWICZ,1988) elmas deformasyon için aşağıdaki denklemi geliştirmişlerdir,

$$P_a \cong 18,15\sigma_o t^2 (D/t)^{1/3} \quad (1.17)$$

Abramowicz ve Jones (ABRAMOWICZ,1984) elmas deformasyon ortalama ezilme yükü için aşağıdaki denklemi önermişlerdir,

$$\frac{P_a}{M_p} = 86,14 \left(\frac{D}{t} \right)^{0,33} \quad (1.18)$$

Bardi ve diğerleri (BARDI, 2003) tüplerin simetrik katlanmasını deneysel ve nümerik incelemiştir. ABAQUS programı kullanılarak yapılan nümerik çalışmaların sonuçlarının deneysel sonuçlara uyduğu bulunmuştur. Deneysel sonuçlar, Alexander (Denklem 1.8), Singace (Denklem 1.12) ve Wierzbicki (Denklem 1.13) tarafından geliştirilen plastik bükülme modelleriyle karşılaştırılmıştır. Wierzbicki denklemi ile tahmin edilen yük değerleri deneysel sonuçlara %81-91 uymasına karşın, katlanmanın uzunluklarını tahmin etmekte her üç denklemin de başarısız olduğu bulunmuştur. Grupta ve Abbas (GRUPTA, 2001) eğri-kat modeli kullanarak simetrik katlanmayı incelemiştir. Eğri-kat modeli plastik bükülme modellerinden farklı olarak katlanmanın düz kısmını da analize dahil etmektedir. Üç farklı durum incelenmiştir; bunlar içeri, dışarı ve kısmi içeri ve kısmi dışarı katlanmalardır. Katlanmanın düz kısmının uzunluğunun azaldığı kabul edilince, hesaplanan yüklerin deneysel yüklere yaklaştığı bulunmuştur. Ayrıca, çalışmanın sonuçları katlanmanın düz kısmının arttığı durumda ortalama yükün ve katlanma uzunluğunun azaldığını göstermesine karşın, nümerik sonuçlar deneysel sonuçlardan oldukça uzaktır. Grupta ve Abbas (GRUPTA, 2001) ve Abbas ve diğerleri (ABBAS, 2003) tüp kalınlığının deformasyon esnasında değişmesinin simetrik katlanmaya etkilerini incelemiştir. Tüp kalınlığında katlanma sırasında oluşan değişim analize dahil edildiğinde nümerik katlanma uzunluğunun deneysel uzunluğa yaklaştığını bulmuşlardır. Ancak, hesaplanan ortalama ezilme yükleri deneysel yüklerden daha düşüktür. Bunu şöyle açıklamışlardır: bir sonraki katlanma önceki katlanmanın

tamamlanmasından daha önce başlaması nedeni ile deneylerde gözlenen deformasyon yükü yatay ezilmenin katlamanın iki katına ulaşmasından daha önce yükselmeye başlamaktadır. Sonuç olarak, deformasyon esnasında tüp kalınlığında oluşan değişimlerin ortalama yük üzerinde önemli etkisinin olmadığını bulmuşlardır. Wierzbicki ve Abramowicz (WIERZBICKI, 1983,1989) kare ve altıgen kesitli tüplerin ortalama ezilme davranışlarını incelemiştir. Kare tüpler için

$$\frac{P_a}{M_0} \cong 48,64 \left(\frac{b}{t} \right)^{0,37} \quad (1.19)$$

ve altıgen tüpler için

$$\frac{P_a}{M_0} \cong 80,92 \left(\frac{b}{t} \right)^{0,4} \quad (1.20)$$

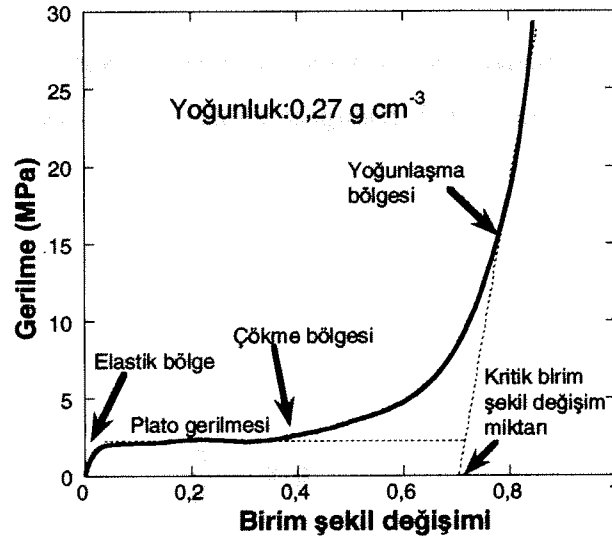
denklemlerini türetmişlerdir. Burada b kesitin kenar uzunluğudur.

1.2.2 Kapalı hücreli alüminyum köpük metal basma davranışları

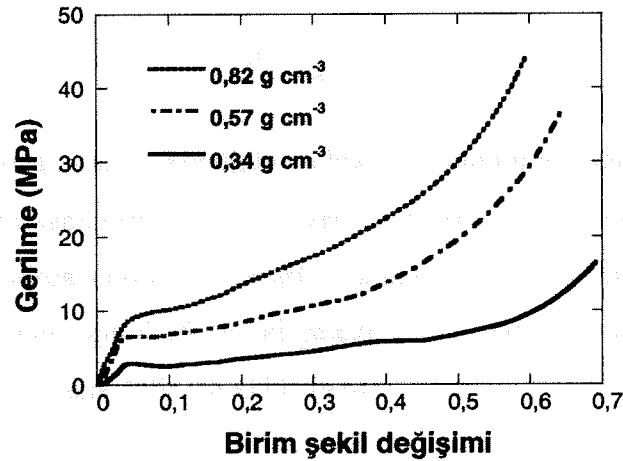
Kapalı hücreli Al köpükler basma altında karakteristik gerilme-birim şekil değişimi grafiği gösterirler. Basma grafiği Şekil 1.6'da SiC/Al kompozit köpük için gösteriliği gibi üç farklı bölgeden oluşmaktadır: liner elastik, çökme ve yoğunlaşma. Liner elastik bölgede, deformasyon hücre duvarlarının bükülmesi veya genişlemesiyle kontrol edilmektedir. Çökme bölgesinde köpük hücreleri bir kaç mekanizma ile (elastik bükülme, gevrek kırılma veya deformasyonun yoğunlaşması) deforme olmaktadır. Bu bölgede deformasyon bir alandaki hücrelerin çökmesiyle oluşan yerel deformasyonun, çökmeyen bölgelere doğru ilerlemesi ile devam etmektedir. Deformasyonun belirli bir bölgede yoğunlaşması ve deforme olmayan bölgelere doğru ilerlemesi sebebiyle bu bölgedeki gerilmelerde düşme ve yükselmeler gözlenmektedir. Çökme bölgesi, sabit veya birim şekil değişimi ile artan bir plato gerilmesinde gerçekleşmektedir (Şekil 1.6). Kritik bir birim şekil değişim miktarından (ϵ_d) sonra hücre duvarlarının tamamen çökmesi ile yoğunlaşma bölgesi başlamaktadır (Şekil 1.6). Bu bölgede gerilme artarak yoğun Al metalin gerilmesine ulaşmaktadır.

Köpük metallerin basma altındaki davranışları yoğunluğa, hücre geometrisine ve yapıldıkları metalin akma gerilmesine bağlı olarak değişmektedir. Çökme veya plato

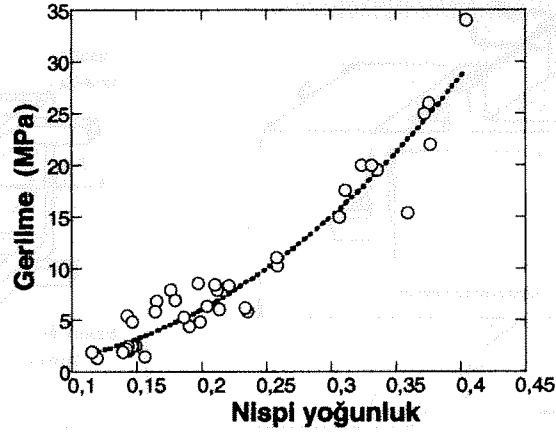
gerilmesi yoğunluğun artması ile yükselmektedir (Şekil 1.7 ve 1.8)(HALL, 2000, ELBİR, 1999). Benzer şekilde yapıldıkları metalin akma gerilmesinin artmasıyla köpükteki gerilmelerin yükselmesi beklenmektedir. Özellikleri bilinen bir alaşımın metal köpüğünün aynı yoğunluktaki numunelerinin mekanik özelliklerinde farklılıklar gözlenmektedir. Bunun sebebi ağırlık dağılımı, heterojen mikro yapı gibi aynı yoğunluktaki malzemelerde değişkenlik gösteren gizli parametrelerdir. Dolayısı ile gerçek mekanik özellikleri belirlemek için gizli parametrelerin etkisini ortaya çıkaracak sayıda numunenin test edilmesi gerekmektedir (BANHART, 2001).



Şekil 1.6 %8,6 SiC-Al köpüğün basma gerilme-birim şekil değişimi davranışı.



Şekil 1.7 6061-Al köpüğün basma gerilme-birim şekil değişimi grafikleri.



Şekil 1.8 6061 Al köpüğün %10 birim şekil değişimine tekabül eden gerilmelerin nispi yoğunlukla değişimi.

Gibson ve Ashby, basit çubuk modelleri kullanarak, ideal kapalı ve açık hücreli köpüklerin elastisite modülleri için (Şekil 1.9) sırasıyla aşağıdaki denklemleri türetmişlerdir (GIBSON, 1997),

$$\frac{E^*}{E_s} = \alpha_1 \rho \quad (1.21)$$

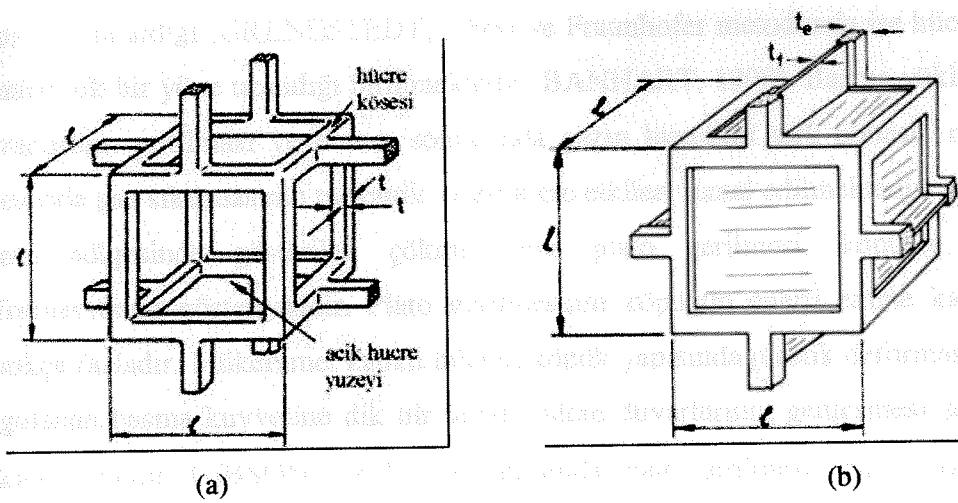
ve

$$\frac{E^*}{E_s} = \alpha_2 \rho^2 \quad (1.22)$$

Bu denklemlerde, sırasıyla E^* ve E_s köpük ve hücre metalinin elastisite modülleri. Nispi yoğunluk (ρ^*) aşağıdaki denklemle ifade edilmektedir ;

$$\rho^* = \frac{\rho}{\rho_s} \quad (1.23)$$

Denklem 1.23'de, sırasıyla ρ ve ρ_s köpüğün ve hücre metalinin yoğunluğudur. α_1 ve α_2 ise hücre geometrisine bağlı sabitlerdir. α_1 'in değeri izotropik kapalı hücreli köpükler için 1/3 (EVANS, 1999), tetrakaidekahedron (14 kenarlı) hücreler ve içi boş kürelerin yüzey merkezli kübik şeklinde paketlenmesi için 0,35 ve bal peteği için 1 olarak hesaplanmıştır (SIMONE, 1998). α_2 'nin değeri ise yaklaşık 1'dir (MAITI, 1984).



Şekil 1.9 a) açık hücreli ve b) kapalı hücreli köpük modelleri.

Ticari üretilen kapalı hücreli Al köpüklerin özellikle düşük yoğunluktaki köpüklerin deneysel elastisite modülleri Denklem 1.21'den hesaplanandan oldukça düşüktür (ASHBY,1999). Modül azalması kısmen hücre köşelerinin hücre duvarlarından daha kalın olmasından kaynaklanmaktadır (Şekil 1.9(b)). Bu ise yüzey gerilmelerinin sıvı metali hücre köşelerine doğru çekmesinden dolayı oluşmaktadır. Gibson ve Ashby, köpük metalinin hücre duvarları ve köşelerindeki dağılımını da içeren aşağıdaki denklemi önermişlerdir (GIBSON,1997)

$$\frac{E^*}{E_s} = C_1 \phi^2 \rho^2 + C_2 (1 - \phi) \rho \quad (1.24)$$

Denklem 1.24'de ϕ hücre köşelerinde bulunan metalin oranı ve C_1 ve C_2 ise geometriye bağlı sabitlerdir. Denklem 1.24'ün sağındaki ilk terim ($C_1 \phi^2 \rho^2$) hücre duvarlarının bükülmesinin, ikincisi ($C_2 (1 - \phi) \rho$) ise genişlemesinin köpüğün elastisite modülüne katkılarıdır. ϕ 'nin yüksek değerleri, bu genellikle de ticari kapalı hücreli Al köpüklerde gözlenmektedir (örneğin Alulight köpüğü için bu değer 0,92-0,94 arasındadır) hücre duvarları bükülmesinin elastisite modül değerinde etkin olduğunu göstermektedir (MCCULLOUGH, 1999). Bu yüzden kapalı hücreli köpükler açık hücreli köpükler gibi davranırlar.

Al köpüklerin mekanik özelliklerini azaltan diğer faktörler ise şöyle sıralanabilir: eğri ve kayıp hücre duvarları, hücre duvarı ve köşesinde oluşan boşluklar (Şekil 1.10) ve heterojen yoğunluk dağılımıdır (SIMONE, 1998, BEALS, 1997 ve SUGIMURA, 1997). Hücrelerin elips şeklinde olması köpükte anizotropik özelliklere neden olabilir. Cymat metodunda sıvı köpüğü taşıyan kayış ve sıvı köpük arasında oluşan kayma gerilmelerin sonucunda hücrelerin

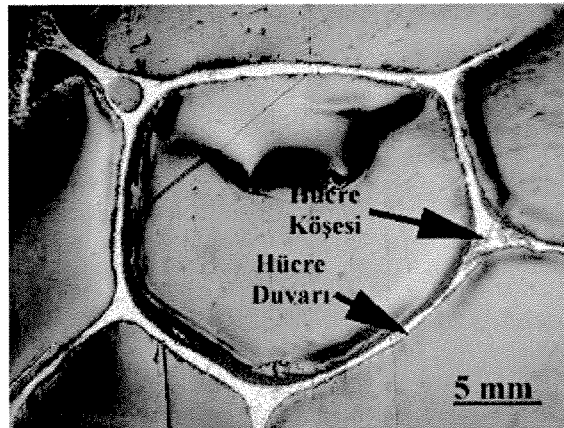
elips şeklini aldığı (GRENESTEDT, 1998) ve Fraunhofer metodunda ise hücrelerin presleme yönüne dik bir yöne uzandığı bilinmektedir (BANHART, 1998). Basma yükleri altında hücre duvarlarının yırtılması ve bunun sonucunda gazın hücreleri terk etmesi nedeniyle basma esnasında gaz sıkışmasının mekanik özelliklere etkileri ihmal edilmektedir. Şekil 1.6'nın ikinci bölgesinde gösterilen çökme veya plato gerilmesi, köpükte oluşan plastik deformasyonun göstergesidir. Plato gerilmesinin köpüğün enerji emme kapasitesine etkisi oldukça fazladır. Mükemmel kapalı hücreli köpük yapısında plastik deformasyonun hücelere uygulanan basma kuvvetine dik bir yönde hücre duvarlarının genişmesi şeklinde oluşması beklenmektedir (GIBSON, 1997). Bu durumda plato gerilmesi (σ_{pl}^*) aşağıdaki denklemle ifade edilebilir,

$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{ys}} = C\rho \quad (1.25)$$

Burada C geometriye bağlı sabit ve σ_{ys} ise metalin akma gerilmesidir. Hücre genişlemesi, hücre duvarı bükülmesi ile eş zamanlı oluşması durumunda ise, aşağıdaki denklem plato gerilmesinin belirlenmesinde kullanılabilir (GIBSON, 1997):

$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{ys}} = C_5 \left(\phi \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{3/2} + C_6 (1-\phi) \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \quad (1.26)$$

Burada, C_5 ve C_6 geometriye bağlı sabitlerdir. Eğer hücre duvarları, uygulanan yük yönünde bükülecek kadar ince ise plato gerilmesi hücre duvarı bükülmesi ile belirlenir ve bu durumda kapalı hücreli köpüğün plato gerilmesi açık hücreli köpüğün gerilmesine yaklaşıp. Daha önce bahsedildiği üzere, ticari Al köpükler yüksek ϕ değerine sahiptir ve dolayısıyla açık hücreli köpüklere benzer davranış gösterirler.



Şekil 1.10 Al metal köpükte hücre yapısı.

Köpükler darbe enerjisinin büyük bir kısmını plastik deformasyon enerjisine çevirerek, objedeki yükü zarar verebilecek seviyelerin altında tutar. Bu özellik köpükleri insan vücudunun ve hassas cihazların dıştan gelebilecek darbelere karşı korunması için kullanılabilir potansiyel malzemeler yapmaktadır. Yoğun metallerle karşılaştırıldığında, köpük malzeme sabit bir yük altında daha fazla enerji emme kapasitesine sahiptir. Burada metal ve polimerler köpüklerin basma ve enerji-emme özelliklerini karşılaştırmak yararlı olacaktır, çünkü bu iki malzemenin yapısal uygulama alanları kesişmektedir. Benzer yoğunluğa sahip polietilen ve alüminyum köpük malzemelere yapılan basma deneyleri, metal köpüğün basma gerilmesinin üç kat daha yüksek olduğunu göstermiştir (BANHART, 1998). Metal köpükler deformasyon enerjisini plastik deformasyona dönüştürürler. Polimer köpükler ise depo ettikleri deformasyon enerjisini yükün kalkmasıyla salarlar. Bu özellik hareketli taşıtların çarpışmasında ikincil kazaların ortaya çıkmasına sebep olabilir. Yapılan yüksek hız basma deneyleri sonucunda ($\sim 3000 \text{ s}^{-1}$ 'e kadar) alüminyum köpüğün gerilme miktarlarının deformasyon hızıyla değişmediği bulunmuştur (HALL, 2000). Kapalı hücreli polimerik köpüklerde ise gerilmenin deformasyon hızıyla arttığı bulunmuştur. Basma testi esnasında hücrelere sıkışan gazların buna kısmen sebep olduğu ileri sürülür (SHERWOOD, 1991). Fakat, alüminyum köpüklerde hücre duvarlarının bükülme veya yırtılma ile çökmesi gazların hücrelerde sıkışmasını engellemektedir.

Alüminyum metal köpüklerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılabileceği bir başka hafif malzeme ise metal bal peteğidir. Bal peteğinin, altıgen hücrelerin yöneldiği eksendeki basma direnci köpük metallerinkinden daha yüksektir. Fakat hücrelerin yöneldiği eksene dik olan yönde bal peteği metal köpükten daha zayıf bir direnç gösterir. Ancak metal köpüklerin mekanik özellikleri homojen olup, test yönüne bağlı olarak fazla değişmez.

1.2.3 Köpük dolu tüplerin ezilme davranışları

Son yıllarda tüpleri hafif metal ve polimerik köpüklerle doldurarak spesifik enerji-emme miktarını artırmaya yönelik çalışmalar oldukça ilgi çekmektedir. Köpük dolu tüpler üzerine ilk deneysel çalışma Thornton (THORNTON, 1980) tarafından yapılmıştır. Thornton poliüretan köpük dolu tüplerdeki ezilme davranışlarını incelemiş ve köpük dolu tüpün ezilme davranışı aynı ağırlığa sahip daha kalın boş tüpün ezilme davranışı ile karşılaştırmıştır. Köpük dolu tüplerde spesifik enerji emme miktarında önemli artış olmasına karşın tüpün kalınlığının

Köpükler darbe enerjisinin büyük bir kısmını plastik deformasyon enerjisine çevirerek, objedeki yükü zarar verebilecek seviyelerin altında tutar. Bu özellik köpükleri insan vücudunun ve hassas cihazların dıştan gelebilecek darbelere karşı korunması için kullanılabilir potansiyel malzemeler yapmaktadır. Yoğun metallere karşılaştırıldığında, köpük malzeme sabit bir yük altında daha fazla enerji emme kapasitesine sahiptir. Burada metal ve polimerler köpüklerin basma ve enerji-emme özelliklerini karşılaştırmak yararlı olacaktır, çünkü bu iki malzemenin yapısal uygulama alanları kesişmektedir. Benzer yoğunluğa sahip polietilen ve alüminyum köpük malzemelere yapılan basma deneyleri, metal köpüğün basma gerilmesinin üç kat daha yüksek olduğunu göstermiştir (BANHART, 1998). Metal köpükler deformasyon enerjisini plastik deformasyona dönüştürürler. Polimer köpükler ise depo ettikleri deformasyon enerjisini yükün kalkmasıyla salarlar. Bu özellik hareketli taşıtların çarpışmasında ikincil kazaların ortaya çıkmasına sebep olabilir. Yapılan yüksek hız basma deneyleri sonucunda ($\sim 3000 \text{ s}^{-1}$ 'e kadar) alüminyum köpüğün gerilme miktarlarının deformasyon hızıyla değişmediği bulunmuştur (HALL, 2000). Kapalı hücreli polimerik köpüklerde ise gerilmenin deformasyon hızıyla arttığı bulunmuştur. Basma testi esnasında hücrelere sıkışan gazların buna kısmen sebep olduğu ileri sürülür (SHERWOOD, 1991). Fakat, alüminyum köpüklerde hücre duvarlarının bükülme veya yırtılma ile çökmesi gazların hücrelerde sıkışmasını engellemektedir.

Alüminyum metal köpüklerin mekanik özelliklerinin karşılaştırabileceği bir başka hafif malzeme ise metal bal petegidir. Bal peteginin, altıgen hücrelerin yöneldiği eksendeki basma direnci köpük metallerekinden daha yüksektir. Fakat hücrelerin yöneldiği eksene dik olan yönde bal petegi metal köpükten daha zayıf bir direnç gösterir. Ancak metal köpüklerin mekanik özellikleri homojen olup, test yönüne bağlı olarak fazla değişmez.

1.2.3 Köpük dolu tüplerin ezilme davranışları

Son yıllarda tüpleri hafif metal ve polimerik köpüklerle doldurarak spesifik enerji-emme miktarını artırmaya yönelik çalışmalar oldukça ilgi çekmektedir. Köpük dolu tüpler üzerine ilk deneysel çalışma Thornton (THORNTON, 1980) tarafından yapılmıştır. Thornton poliüretan köpük dolu tüplerdeki ezilme davranışlarını incelemiş ve köpük dolu tüpün ezilme davranışı aynı ağırlığa sahip daha kalın boş tüpün ezilme davranışı ile karşılaştırmıştır. Köpük dolu tüplerde spesifik enerji emme miktarında önemli artış olmasına karşın tüpün kalınlığının

artırılması ile karşılaştırıldığında köpük dolgusunun etkili olmadığını belirtmiştir. Lampinen ve Jeryan (LAMPINEN, 1982) poliüretan köpük dolu ince metal tüplerin ezilme davranışını incelemiş ve köpük dolgusunun deformasyonu daha kararlı hale getirdiği sonucuna varmışlardır. Poliüretan köpük dolu ince metal tüplerin statik ve dinamik ezilme davranışları Reid ve diğerleri (REID, 1986) tarafından araştırılmıştır. Deformasyon esnasında, tüp duvarının köpük dolgu ile etkileşmesi sonucu köpük dolu tüplerde simetrik ezilme eğiliminin arttığı sonucuna varmışlardır. Guillow ve diğerleri (GUILLOW, 2001), Reid ve diğerleri (REID, 1986) ve Reddy ve Wall'un (REDDY, 1988) sonuçlarına zıt olarak, poliüretan köpük dolu Al metal tüplerin ortalama ezilme yükünün boş tüp ve köpüğün ortalama ezilme yüklerinin toplamından daha yüksek olduğunu göstermişlerdir. Seitzberger ve diğerleri (SEITZBERGER, 2000) Al kapalı hücreli tek ve çoklu kare ve altıgen kesitli metal tüplerin ezilme davranışlarını incelemişler ve kütle esaslı ortalama yük miktarının Al köpük dolgusu ile arttığını göstermişlerdir. Yine aynı çalışmada etkili (verimli) ezilme elamanları tasarımında uygun köpük ve metal tüp seçiminin önemli olduğu belirtilmiştir. Santosa ve Wierzbicki (SANTOSA, 1998) Al köpük dolu Al bal peteği ve tüp yapıların ezilme davranışlarını deneysel ve nümerik incelemişlerdir. Dolgu malzemesinin ortalama yüke etkisinin bal peteği ekseninin yüke dik ve paralel olduğu her iki durumunda benzer olduğunu ve dolayısıyla köpük dolgu malzemesinin hem yatay ve hem de dikey yöndeki mukavemetlerinin ortalama yükün artmasında etkin olduğunu göstermişlerdir. Santosa ve diğerleri (SANTOSA, 2000) uygun tüp-dolgu malzemesi seçildiğinde, tüp ve dolgu malzemesi arasındaki yapışmanın ortalama ezilme yükünü yapışmanın olmadığı dolu tüplerin ezilme yüklerinin üzerine çıkarttığını belirtmişlerdir. Santosa ve Wierzbicki (SANTOSA, 1998) sonlu elemanlar metodu çalışmaları sonucunda köpük dolu tüplerdeki ortalama ezilme yükünü hesaplamak üzere aşağıdaki ampirik denklemi önermişlerdir,

$$P_{a,f} = P_a + C\sigma_p b^2 \quad (1.27)$$

Burada $P_{a,f}$, P_a ve σ_p sırası ile dolu ve boş tüpün ortalama ezilme yükleri ve köpüğün plato gerilmesidir. Denklem 1.27'deki C sabiti ise köpük dolgusunun güçlendirme katsayısıdır. Nümerik ve deneysel çalışmalar, yapıştırıcı kullanılan ve kullanılmayan kare tüplerde C değerinin sırası ile 1,8 ve 2,8 olduğunu göstermiştir (SANTOSA,1998). Yine aynı çalışmada, köpük dolgusunun tüp kalınlığının artırılmasında ağırlık esaslı spesifik enerji emmede daha etkili olabilmesi için dolgu ağırlığının kritik bir değerden daha yüksek olması gerektiği belirtilmiştir. Hanssen ve diğerleri (HANSSSEN, 1999 ve 2000) Al köpük dolu Al

tüplerin statik ve dinamik ezilme davranışlarını çalışmışlardır. Köpük dolu tüplerin statik ve dinamik yüklerde boş tüplerden daha fazla sayıda katlanma oluşturdıklarını göstermişlerdir. Katlama sayısındaki artış, köpük dolgusunun tüpün duvar kalınlığını artırarak bükülme uzunluğunu azaltmasının bir sonucu olarak açıklanmıştır. Tüp dolgusu ayrıca ortalama ezilme yükünü tek tüp ve köpüğün ezilme yüklerinin toplamının üzerine çıkarttığı da bulunmuştur. Deneysel verilerin modellenmesi sonucunda aşağıdaki denklemi bulmuşlardır,

$$P_{a,f} = P_a + \sigma_p b^2 + C_{avg} \sqrt{\sigma_p \sigma_o} bh \quad (1.28)$$

burada C_{avg} birimsiz bir sabit olup etkileşim etkisine bağlıdır.

1.3 Malzeme ve test yöntemleri

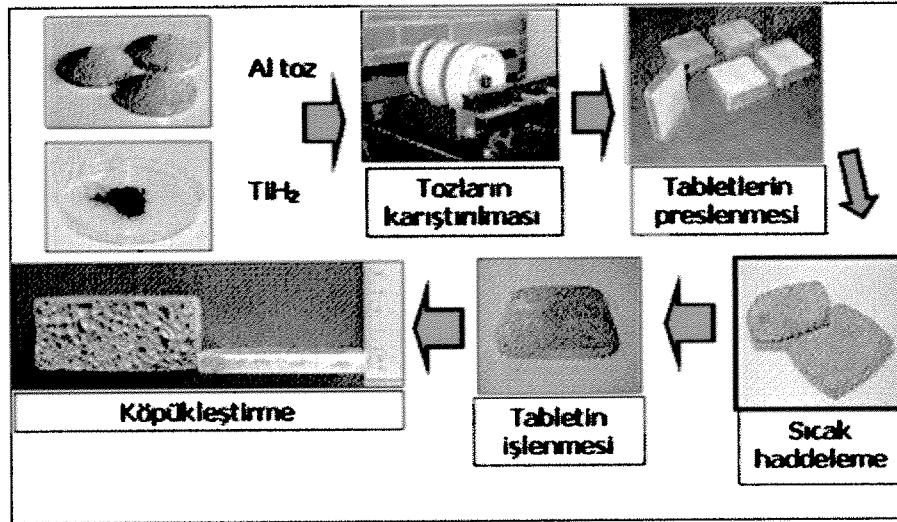
1.3.1 Köpük metal üretimi

Alüminyum köpük üretiminde kullanılan preslenmiş tabletlerden köpük metal üretimi, Fraunhofer Resource Center (Almanya) tarafından patentleşmiştir. Preslenmiş tabletlerin köpükleştirilmesi metodunda, toz metal ve köpük yapıcı madde karıştırıldıktan sonra sıcak presleme, ekstürüzyon veya haddeleme benzeri metal şekillendirme yöntemleri ile köpükleşecek yoğun yapıya sahip yarı ürün haline getirilmektedir. Yarı mamul dökme veya işlenmemiş alüminyum alaşımlardan elde edilen tozlardan hazırlanabilmektedir. Köpükleşecek yarı ürün, metalin erime sıcaklığının üstüne ısıtılmaktadır. Isıtma esnasında köpük yapıcı madde bozunmakta ve açığa çıkan gaz, erimiş metalin genişlemesine ve gözenekli bir yapının oluşmasına neden olmaktadır. Etkin bir köpükleşme için, gazın kaçmasına engel olabilecek yoğunluğa sahip bir yarı ürünün hazırlanması çok önemlidir; köpükleştirici maddenin metal içinde tamamen hapsedilmesi gerekmektedir. Bu yüzden sıcak şekillendirmede kullanılan sıcaklık ve basınç, toz metal parçacıklarını birbirine bağlayacak ve köpük yapıcı maddenin bozunumu ile oluşan hidrojen gazı kaçışını önleyecek şekilde ayarlanmalıdır.

Alüminyum köpük üretiminde Şekil 1.11'de şematik olarak gösterilen yöntem izlenmiştir. Metot alüminyum toz metal ile köpükleştirici maddenin (TiH_2) karıştırılması ile başlamaktadır. Karışım ağırlık olarak %99 Al toz ve %1 TiH_2 içermektedir. Kullanılan

tozların özellikleri Tablo 1.1’de sıralanmıştır. Bazı deneylerde SiC seramik parçacık içeren tabletlerde hazırlanmış ve köpükleştirilmiştir. Bu deneylerin amacı SiC parçacıkların plato gerilmesine ve köpükleşmeye olan etkilerini belirlemektir. SiC metal matris kompozit köpükler dolu tüp ezilme deneylerinde kullanılmamıştır. Prosesin ikinci aşamasında ise Al ve TiH₂ toz karışımı Şekil 1.12’de gösterilen kalıp içerisinde 100 MPa’da soğuk sıkıştırılarak köpükleşecek tabletler hazırlanmaktadır. Bu yöntemle 11x70x70 mm boyutlarında köpükleşecek tabletler hazırlanmıştır (Şekil 1.13). Presle sıkıştırılan tabletlerin yoğunluğunu artırmak için tabletler 350 °C’de şahmerdan kullanılarak inceltilmiştir (Şekil 1.14). Sıcak haddeleme sonucunda tablet yoğunluğu %98’e çıkmıştır.

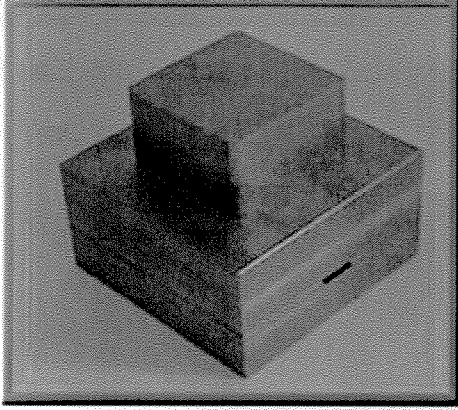
Köpükleşecek yarı ürün kalıp içerisinde köpükleştirilmediğinde şekilsiz bir metal köpük parçası oluşmaktadır. Kalıp içerisinde ise yarı ürün köpükleşerek kalıbın şeklini almaktadır. Sıcak presleme sonucunda inceltilen tabletlerin uç kısımlarında çatlakların oluştuğu ve bu yüzden metal yoğunluğunun düşük olduğu gözlenmiştir. Bu nedenle inceltilen tabletlerin kenar bölümleri kalıbın boyutlarına uyacak şekilde kesilerek, kalıp ile sıkı bir temas sağlanmıştır (Şekil 1.15).



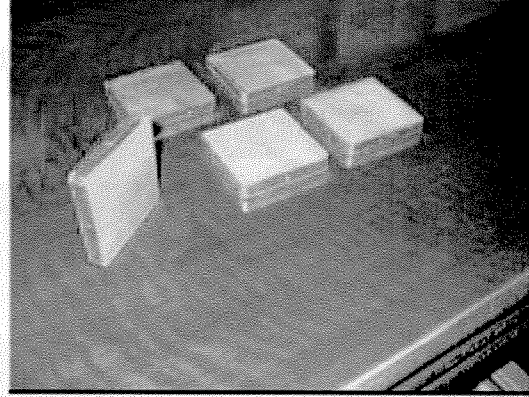
Şekil 1.11 Al köpük metal üretim akış şeması.

Tablo 1.1 Kullanılan tozların özellikleri. D parçacık boyutu (%X) ise hacim yüzdesi.

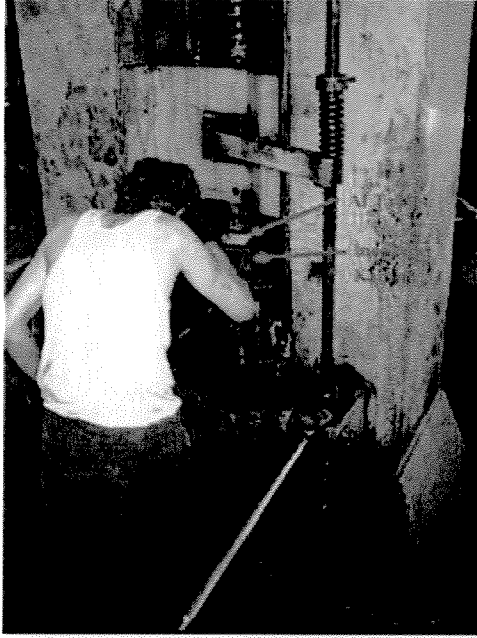
Toz	Boyut (µm)	Safılık	Ölçülen Toz boyutu (µm)	D (%10) (µm)	D(%50) (µm)	D (%90) (µm)
Al toz (Aldrich)	< 74	99%	37,13	17,32	34,64	69,28
TiH ₂ (Merck)	< 37	>98%	–	–	–	–
SiC _p (Aldrich)	< 37		20,12	12,25	22,36	33,4



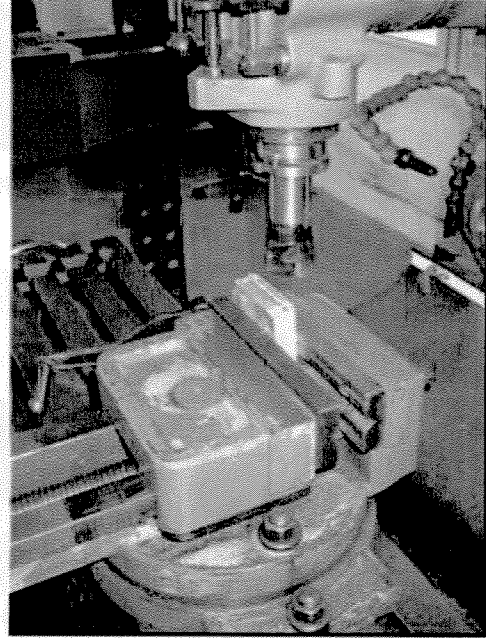
Şekil 1.12 Soğuk sıkıştırma kalıbı.



Şekil 1.13 Soğuk sıkıştırılmış tabletler.



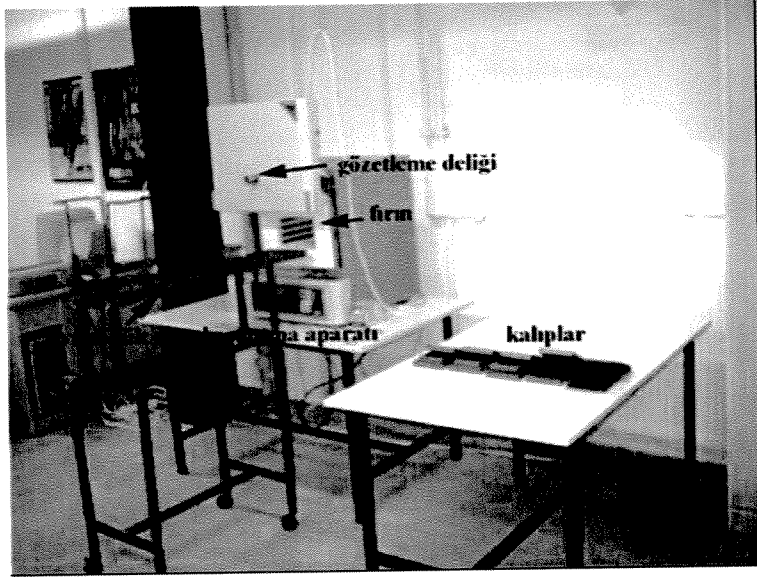
Şekil 1.14 Tabletlerin haddelenmesi.



Şekil 1.15 Tabletlerin işlenmesi.

Köpük metal üretiminde bir sonraki aşama köpükleştirme işlemidir. Köpükleştirme düzeneği Şekil 1.16'da gösterilmektedir. İlk aşamada köpükleştirme kalıbı (Şekil 1.17) fırın içine konulmakta ve kalıp uygun sıcaklığa erişinceye kadar ($750\text{ }^{\circ}\text{C}$) beklenmektedir. Daha sonraki aşamada ise tablet sıcak kalıbın içine konulmaktadır. Kalıp üstten ve alttan sıkıca kapatılmıştır. Isıtma esnasında metal matris içine gömülmüş olan TiH_2 bozunmaya başlamaktadır. Bozunma ile açığa çıkan H_2 gazı, erimiş metalin genişlemesine ve gözenekli bir yapının oluşmasına neden olmaktadır. Köpükleşme sonrasında kalıp fırından hızlıca

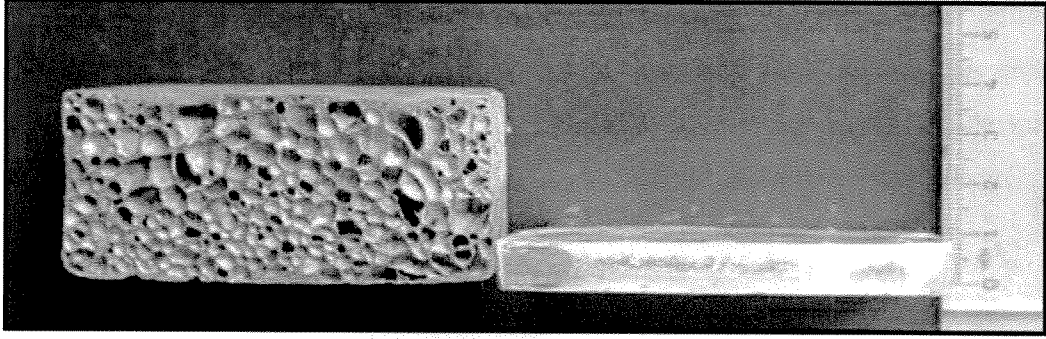
alınmakta ve daha sonra soğutulmaktadır. Köpikleşme sonucunda ilk tablet boyuna göre yaklaşık dört kat uzama meydana gelmektedir (Şekil 1.18).



Şekil 1.16 Köpikleştirme düzeneği.

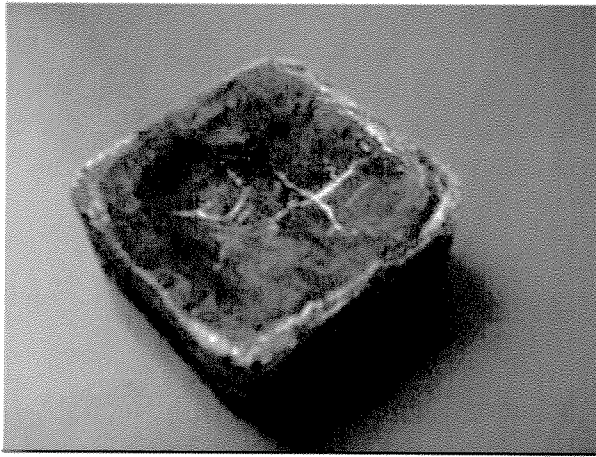


Şekil 1.17 Köpikleştirici kalıplar.

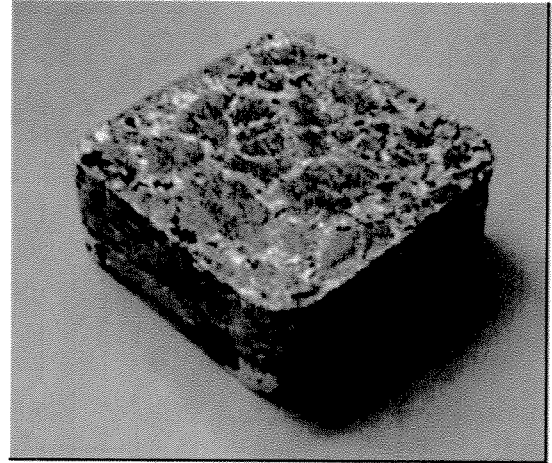


Şekil 1.18 Köpüklenme sonrası tablette oluşan uzama.

Köpükleştirme esnasında tabletin fırında kalma süresi köpüğün mikro yapısını etkileyen önemli bir parametredir. İlk denemeler (15 tane tablet) sonucunda kullanılan düzenek için fırında kalma süresi 5 dakika olarak belirlenmiştir. Daha düşük sürelerde tablet kalıbın tam şeklini almamakta, daha fazla sürelerde ise sıvı metalin drenajı nedeniyle çökmeler oluşmaktadır. Fırından çıkarılan sıvı köpüklerde hücre çökmesinin engellenmesi için soğutulmaları gerekmektedir. Soğutma esnasında köpüklerde şekilsel bozukluklar oluştuğu gözlenmiştir (Şekil 1.19(a)). Soğutma işlemi için 3 yol denenmiştir. Bunlar a) su dolu bir hazneye sıcak kalıbın daldırılması, b) kaliba su püskürterek daha yavaş soğutma ve c) kalıbın açık havada soğutulmasıdır. Bu denemelerde şekilsel bozuklukların su püskürtülerek yapılan soğutma işlemi sonucunda azaldığı bulunmuştur (Şekil 1.19(b)). Elde edilen blok köpük malzeme 78x78x35 mm boyutlarındadır.



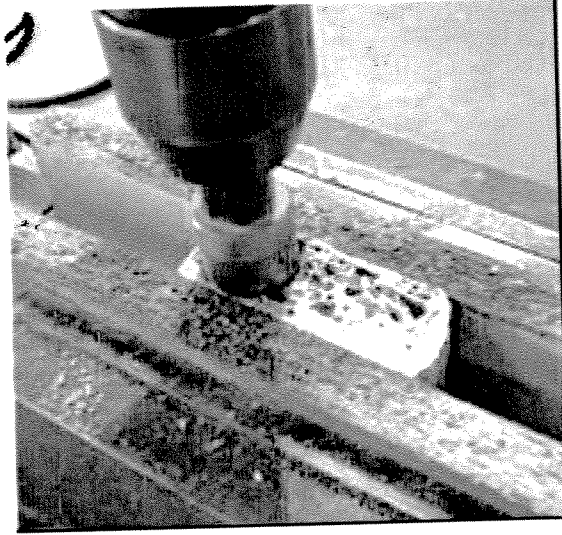
(a)



(b)

Şekil 1.19 (a) soğutma esnasında şekilsel bozulmaya uğramış köpük malzeme (uzunluk 75 mm) ve (b) tam şekil almış köpük malzeme (uzunluk 75 mm).

Blok halinde üretilen köpük malzemedan delme testeresi ile silindirik basma numuneleri hazırlanmıştır (Şekil 1.20). Hazırlanan numuneler 30 mm boy ve 24,6 mm çap ölçülerine sahiptir (Şekil 1.21). Bu numuneler basma testlerinde ve alüminyum tüpleri doldurmak için kullanılmıştır. Silindirik numunelerin yoğunlukları basma testinden önce ölçülmüştür.



Şekil 1.20 Silindirik numune kesme işlemi.

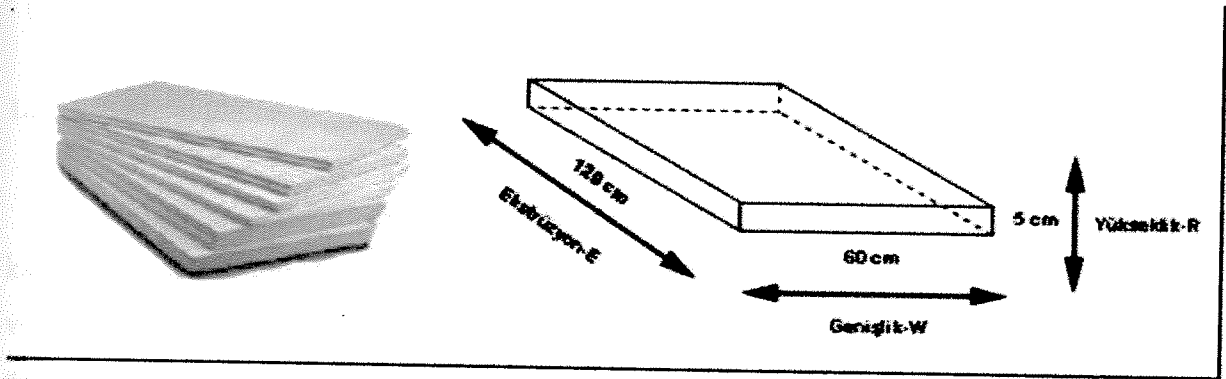


Şekil 1.21 Silindirik kesilmiş köpük numuneler.

1.3.2 Polisitren köpük

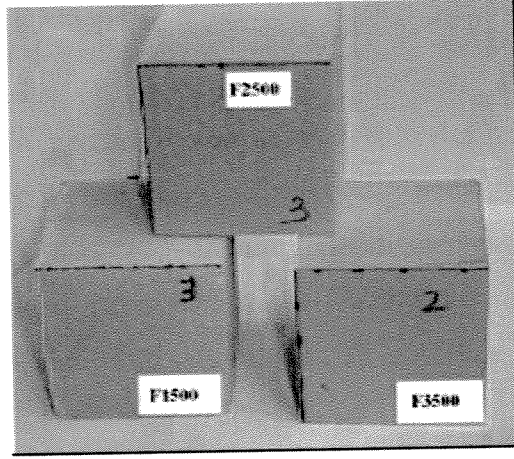
Alüminyum köpük metalin yanında, polisitren köpük malzemesi Al tüplerin doldurulmasında ve farklı geometrilerin oluşturulmasında kullanılmıştır. Polisitren köpüklerin daha kolay işlenmesi nedeniyle iç-içe geçen tüp yapıların hazırlanmasında kullanılmışlardır. Çalışmada kullanılan köpükler İzocam A. Ş. tarafından 5x60x120 cm boyutlarında yarı yönlendirilmiş kapalı hücreli ve pürüzsüz sürekli yüzeyli olarak üretilmektedir (Şekil 1.22).

Üç farklı yoğunlukta üretilen ve ticari isimleri Foamboard® 1500, Foamboard® 2500 ve Foamboard® 3500 olan köpükler bu çalışmada F1500, F2500 ve F3500 olarak adlandırılmışlardır. Yoğunluk ölçümleri köpüklerden 50x50x50 mm boyutlarında kesilen kübik örneklerin ağırlıklarının hacimlerine bölünmesi ile $21,7\pm 1$, $27,82\pm 2$ ve $32,12\pm 2$ kg m^{-3} olarak bulunmuştur. Nispi yoğunlukları (ρ^*) ise hesaplanan yoğunlukların saf polisitrenin yoğunluğuna ($\rho_s=1050$ kg m^{-3}) bölünmesi ile 0,0207, 0,0265 ve 0,0305 olarak bulunmuşlardır. Bu çalışmada sadece F2500 köpük dolu tüpler incelenmiştir.



Şekil 1.22 Izocam A.Ş. tarafından üretilen ekstrüde polisitren köpükler (Foamboard®) ve boyutları.

Polisitren köpüklerin basma davranışlarını belirlemek için her üç yoğunluktaki köpük plakalardan ASTM D1621-00 standart'ına uygun 50x50x50mm boyutlarındaki test numuneleri kesilerek hazırlanmıştır (Şekil 1.23). Yoğunluğun, basma yönünün ve basma hızının mukavemet üzerindeki etkilerinin belirlenmesi için test numuneleri yükseklik-R yönünde dört, diğer yönlerde (genişlik-W, ekstrüzyon-E) ise üç farklı deformasyon hızlarında basma testlerine tabi tutulmuşlardır.



Şekil 1.23 Polistiren köpük basma testi numuneleri.

1.3.3 Metal tüpler

Projede kullanılan derin çekme Al tüpler METALUM firması tarafından iki farklı çap ve et kalınlığında hazırlanmıştır. Tüplerin çapları ve et kalınlıkları sırası ile 25 ve 35 mm, ve 0,29 ve 0,35 mm'dir. Tüp malzemesinin gerilme-birim şekil değişimi davranışı daha önceki bir çalışmada belirlenmiştir (TOKSOY, 2005). Tüp malzemesinin mekanik özellikleri Tablo 1.2'de, tüplerin boyutları ise Tablo 1.3'de sıralanmıştır. Tüplerin uzunluğu elmas uçlu hassas kesme makinesiyle 27 mm'e indirilmiştir.

Tablo 1.2 Tüp malzemesinin mekanik özellikleri.

Malzeme	σ_U (çekme gerilmesi) (MPa)	$\sigma_{0,2}$ (%0,2 akma gerilmesi) (MPa)	$\frac{(\sigma_{0,2} + \sigma_U)}{2}$	Vickers sertlik değeri (GPa)
%99,7 Al	170 ± 10	112 ± 10	141	58

Tablo 1.3 Boş tüplerin geometrik boyutları.

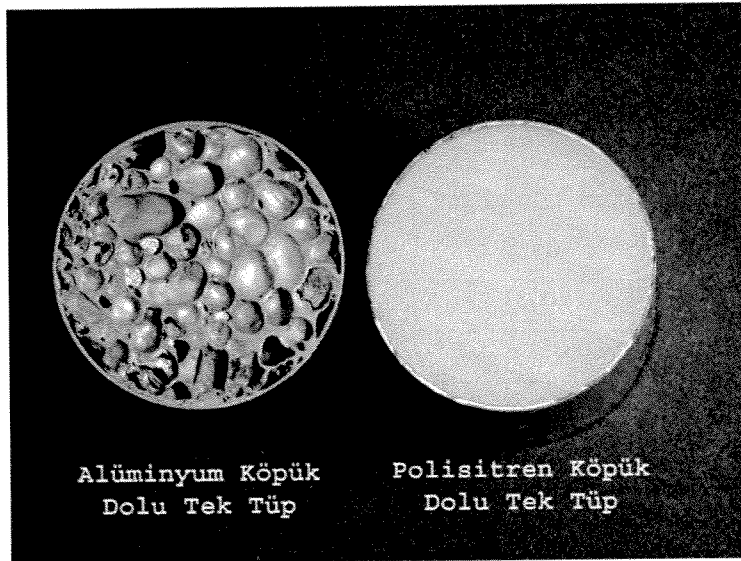
Tüp malzemesi	Dış çap (mm)	Kalınlık (mm)	Uzunluk (mm)	Ağırlık (g)	D/t oranı
%99,7 Al	25	0,29	27	1,72	86,2
%99,7 Al	35	0,35	27	2,61	100

1.3.4 Köpük dolu tek ve ikili metal tüpler

Köpük dolu tek tüplerin geometrik özellikleri Tablo 1.4'de sıralanmıştır. Bu tabloda kullanılan kodlama şöyledir: ilk harf dolgu malzemesidir (polisitren köpük 'P' ve Alüminyum köpük 'A'), daha sonraki iki harf "FF" dolu tüpleri simgelemektedir. En sondaki rakam ise farklı tüp ve köpük yoğunluğu için kullanılmıştır. Tablodan da anlaşılacağı üzere sadece 25 mm çap tüpler doldurulmuştur. Tek Alüminyum ve polisitren köpük dolu tüplerin üstten görünüşleri Şekil 1.24'de gösterilmiştir.

Tablo 1.4 Köpük dolu tek tüplerin geometrik özellikleri ve gruplanması.

Test Kodu	Uzunluk (mm)	Çap (mm)	Kalınlık (mm)	Köpük yoğunluğu (g cm ⁻³)	Ortalama ağırlık (g)
PFF1	27	25	0,29	0,0321	2,106
PFF2	27	35	0,35	0,0321	3,3983
AFF1	27	25	0,29	0,27	5,3168
AFF2	27	25	0,29	0,35	6,0325
AFF3	27	25	0,29	0,43	7,5219



Şekil 1.24 Alüminyum ve polisitren köpük dolu tek tüplerin üstten görünüşü (25 mm çap tüpler).

Üç farklı köpük dolu ikili tüp geometrisi araştırılmıştır. Bu geometriler kullanılan köpük dolgu malzemesi ve yoğunluğu ile birlikte Tablo 1.5’de sıralanmış olup üstten görünüşleri Şekil 1.25’de görülmektedir. Tabloda kullanılan kodlama ise aşağıda açıklanmıştır:

- i- *BPH*; içi boş tüp (25 mm) ve polistiren köpük dolu dış tüp (35 mm çap), Şekil 1.25(a).
- ii- *BPP*; polistiren köpük dolu iç tüp (25 mm) ve dolu dış tüp (35 mm çap), Şekil 1.25 (b) ve,
- iii- *BPA*; Alüminyum köpük dolu iç tüp (25 mm) ve polistiren köpük dolu dış tüp (35 mm çap), Şekil 1.25(c),



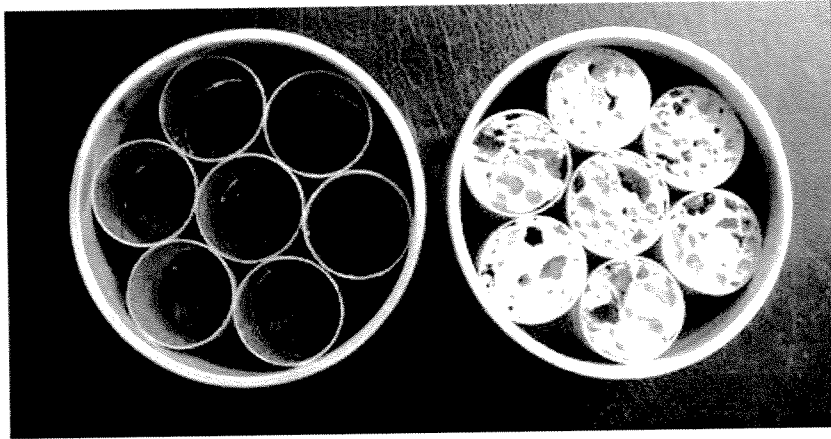
Şekil 1.25 Köpük dolu ikili tüp geometrileri (a) BPH, (b)BPP ve (c) BPA serileri.

Tablo 1.5 Köpük dolu ikili tüplerin geometrik özellikleri.

Kod	Uzunluk (mm)	Kalınlık (iç/dış tüp) (mm)	Köpük yoğunluğu (dış/iç) (g cm ⁻³)	Ortalama ağırlık (g)
BPH	27	0,29 / 0,35	0,0321	4,6411
BPP	27	0,29 / 0,35	0,0321/ 0,0321	5,1799
BPA4	27	0,29 / 0,35	0,0321/ 0,3301	8,9985
BPA1	27	0,29 / 0,35	0,0321/ 0,3541	9,1125
BPA2	27	0,29 / 0,35	0,0321/ 0,2596	8,0389
BPA3	27	0,29 / 0,35	0,0321/ 0,3104	8,5833

1.3.5 Boş ve köpük dolu çok tüp geometriler

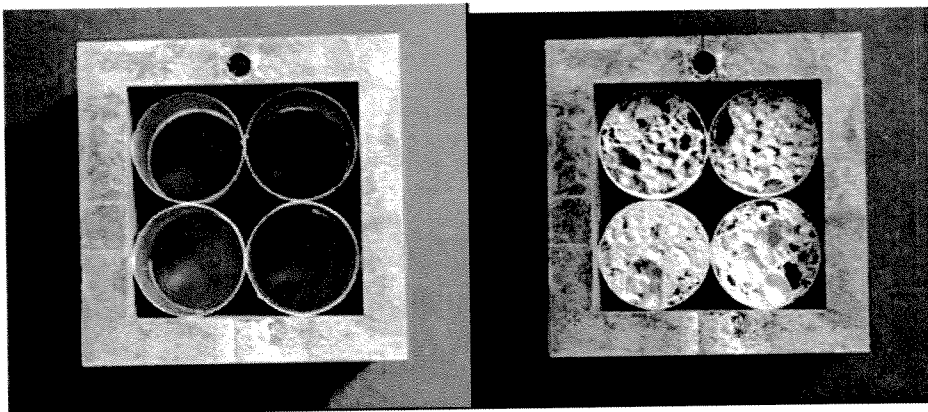
Çoklu tüp geometrilerinde sadece 25 mm çaplı Al tüpler kullanılmıştır. Bu seride dört tüp geometrisi kullanılmıştır. Bunlar altıgen paketlenmiş boş (Şekil 1.26(a)) ve Al köpük dolu tüpler (Şekil 1.26(b)) ve kübik paketlenmiş boş (Şekil 1.27(a)) dolu tüpler (Şekil 27(b)). Altıgen paketlenme yedi tüpten, kübik paketlenme ise dört tüpten oluşmaktadır. Çoklu tüpler için özel basma aparatları işlenmiştir. Altıgen tüp paketlenme için işlenen basma aparatı Şekil 1.28'de gösterilmiş olup paketlenen tüpler sıkıca aparatın içine oturmakta ve dolayısı ile tüplerin yatay yöndeki hareketleri sınırlandırılmıştır. Dairesel basma aparatının iç çapı 75 mm olup et kalınlığı 2,5 mm ve yüksekliği 35 mm'dir.



(a)

(b)

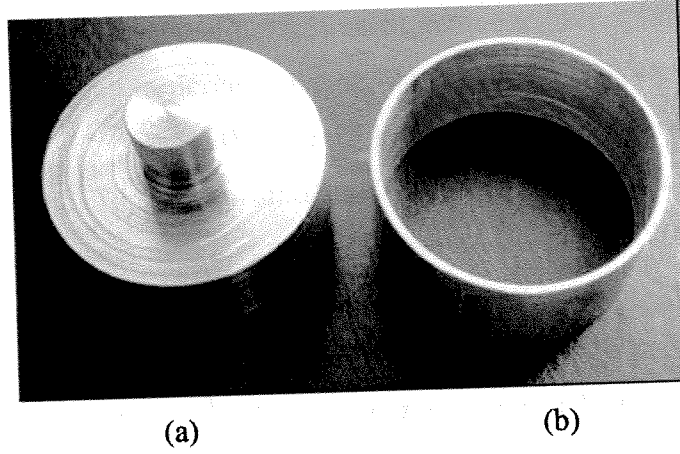
Şekil 1.26 Altıgen paketlenmiş (a) boş ve (b) Al köpük dolu tüpler.



(a)

(b)

Şekil 1.27 Kübik paketlenmiş (a) boş ve (b) Al köpük dolu tüpler.

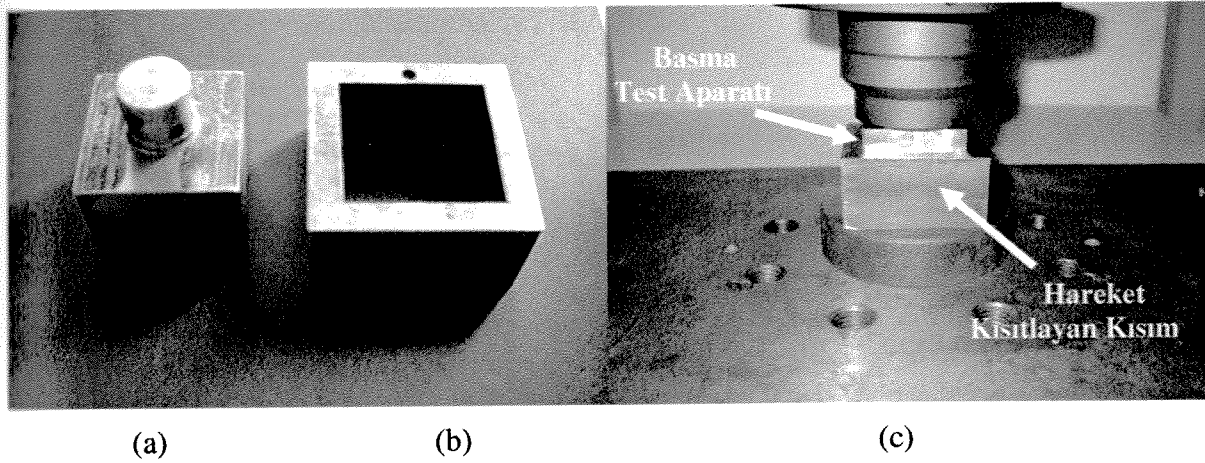


Şekil 1.28 Altgen paketlenme için basma aparatları (a) basma testinde hareket eden kısım ve (b) dik yöndeki hareketi kısıtlayan kısım.

Tablo 1.6 Al köpük dolu altgen paketlenmiş tüp geometrileri özellikleri.

Test Kodu	Tek Tüp kodu	Köpük yoğunluğu (g cm ⁻³)	Ağırlık (g)
MHF1	AFF31	0,472	7,6292
	AFF32	0,454	7,3468
	AFF34	0,415	6,9025
	AFF39	0,4219	7,0220
	AFF46	0,40	6,70
	AFF48	0,458	7,4802
	AFF49	0,446	7,29
MHF2	AFF22	0,3668	6,29
	AFF25	0,385	6,52
	AFF28	0,382	6,45
	AFF29	0,35	6,03
	AFF33	0,391	6,61
	AFF41	0,359	6,249
	AFF45	0,40	6,70
MHF3	AFF21	0,6	9,3103
	AFF27	0,535	8,3767
	AFF36	0,546	8,5225
	AFF37	0,5152	8,1544
	AFF38	0,567	8,7620
	AFF42	0,58	8,9736
	AFF43	0,51	8,1237

Köpük dolu altıgen paketlenmiş Al tüp geometrilerinin özellikleri Tablo 1.6'da kodları ile birlikte sıralanmıştır. İlk grup testlerde, 0,4 ve 0,47 g cm⁻³ (MHF1), ikinci grupta ise 0,34 ve 0,4 g cm⁻³ (MHF2) ve son grupta ise 0,51 ve 0,6 g cm⁻³ (MHF3) yoğunluğa sahip köpük dolu tek tüpler kullanılmıştır. Tüplerin uzunluğu 27 mm'dir. Kübik paketlenmiş tüpler için kullanılan (50x50 mm) basma testi aparatları ve basma testi Şekil 1.29'da gösterilmektedir. Kübik paketleme için iki farklı grupta testler yapılmıştır. Test grupları özellikleri Tablo 1.7'de sıralanmıştır. İlk grup testlerde köpük yoğunluğu 0.30 ve 0.33 g cm⁻³ (MCF1) aralığında ikinci grupta ise 0.26 ve 0.29 g cm⁻³ (MCF2) aralığında değişmektedir. Son olarak, altıgen ve kübik paketleme geometrilerinde basma testi üst aparatı yatay yöndeki hareketi kısıtlayan aparat içerisinde sürtünmeksizin hareket etmektedir.



Şekil 1.29 Kübik paketleme için basma aparatları (a) basma testinde hareket eden kısım (b) dik yöndeki hareketi kısıtlayan kısım ve (c) basma testi.

Tablo 1.7 Al köpük dolu kübik paketlenmiş tüplerin özellikleri.

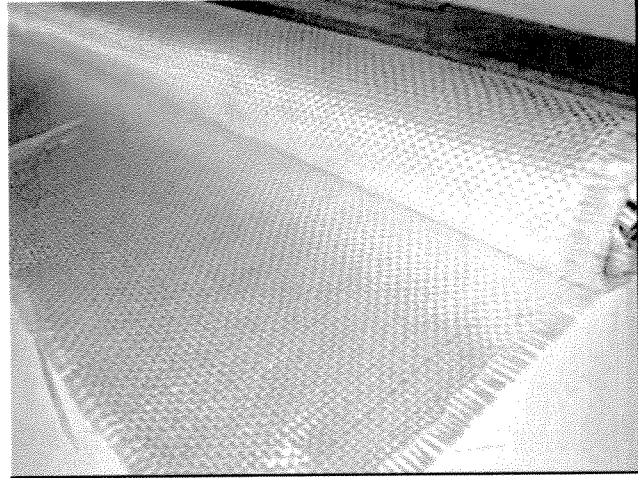
Test Grubu	Tek tüp kodu	Köpük yoğunluğu (g cm ⁻³)	Ortalama ağırlık (g)
MCF1	AFF23	0,331	5,80
	AFF24	0,312	5,64
	AFF35	0,30	5,45
	AFF44	0,31	5,64
MCF2	AFF20	0,26	4,95
	AFF26	0,30	5,46
	AFF40	0,285	5,17
	AFF47	0,289	5,26

1.3.6 Kompozit tüp üretim metotları

Proje kapsamında kullanılan kompozit tüplerin ezilme yüklerinin alüminyum köpüklerin ezilme yükleriyle kıyaslanır seviyelerde olması göz önüne alınmıştır. Tüp hazırlamada iki farklı cam elyaf kullanılmıştır: sürekli cam elyaf veya fiber (Şekil 1.30(a)) ve elyaf kumaş (Şekil 1.30(b)). Cam elyafın reçineyle birlikte çelik çubuk üzerine sarılarak hazırlanan tüpler ilk kürlenme için oda sıcaklığında 24 saat bekletilmiş ve daha sonra 110 °C sıcaklığa ısıtılmış bir fırında 2 saat bekletilerek kürlenmiştir. Projede farklı cam fiber takviyesi kullanılarak hazırlanan tüplerin tümünde, matris malzemesi olarak izoflatik polyester reçine kullanılmıştır. Dondurucu madde olarak kullanılan %5'lik Mek-peroxide solüsyonu reçineye ağırlıkça %1,5 oranında katılmıştır. Hızlandırıcı olarak ağırlıkça %6 kobalt octoat etken maddesi içeren solüsyon % 0,28 oranında katılmıştır. Hazırlanan tüplerin iç çapı 25 mm, ezilme testi numunelerinin uzunluğu ise 27 mm'dir.



(a)

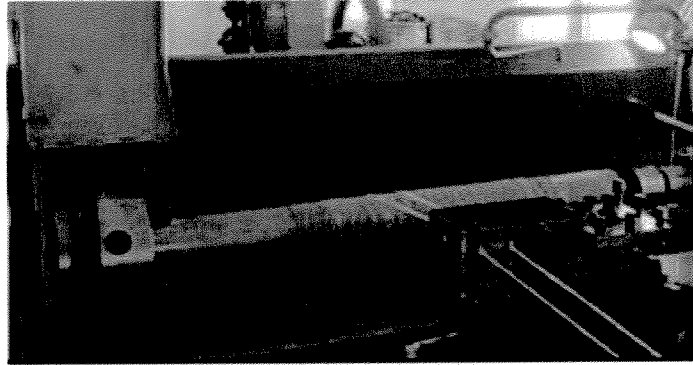


(b)

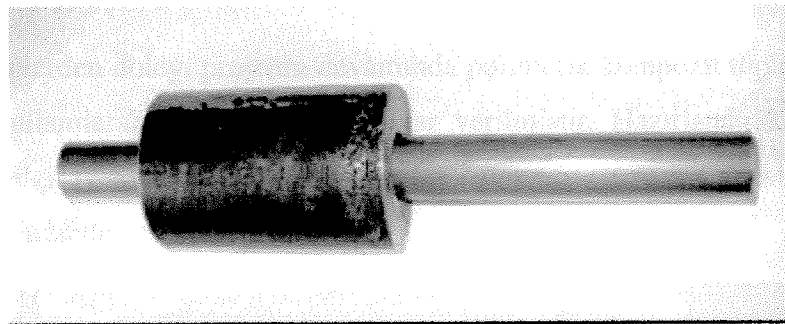
Şekil 1.30 Polimerik kompozit tüp yapımında kullanılan cam fiberler, (a) sonsuz cam fiber ve (b) [0,90] dokulu kumaş.

Projenin ilk aşamasında filament sarma tekniği ile sürekli cam fiber takviyeli kompozit tüpler hazırlanmıştır. Filament sarma yönteminde, sürekli cam fiberler reçine banyosundan ıslatıldıktan sonra torna tezgahına bağlı bir silindirik çubuğun üstüne sarılarak hazırlanmıştır (Şekil 1.31). Silindirik çubuğa fiber sarma işleminden önce hazırlanan tüpün kolayca çubuktan çıkartılması için çubuğun üzerine kalıp ayırıcı sürülmüştür. Bu yöntemde

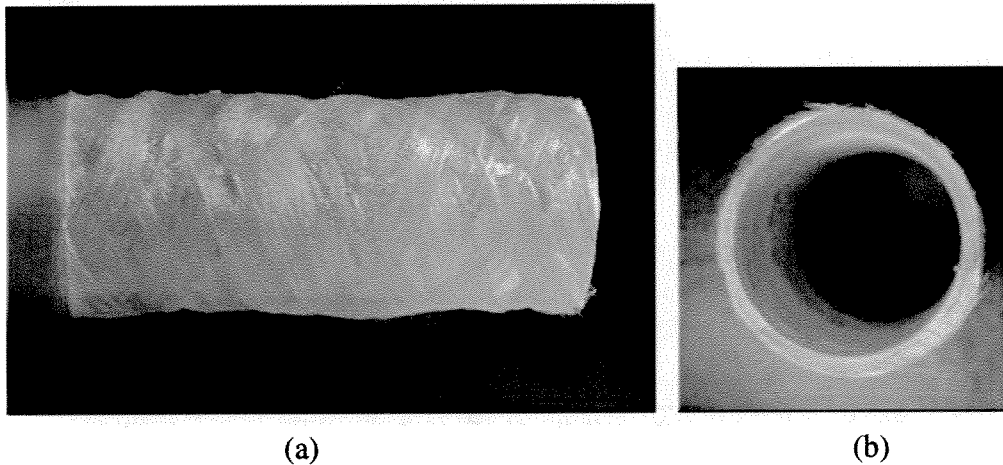
kullanılan mandrel ve tüpü çubuktan sıyrmak için kullanılan sıyrıcı aparatı Şekil 1.32'de gösterilmektedir. Hazırlanan kompozit tüpler Şekil 1.33'de gösterilmektedir.



Şekil 1.31 Filament sarma tekniğiyle kompozit tüp üretim düzeneği.



Şekil 1.32 Filament sarma tekniğinde kullanılan mandrel ve tüp sıyrıcı.



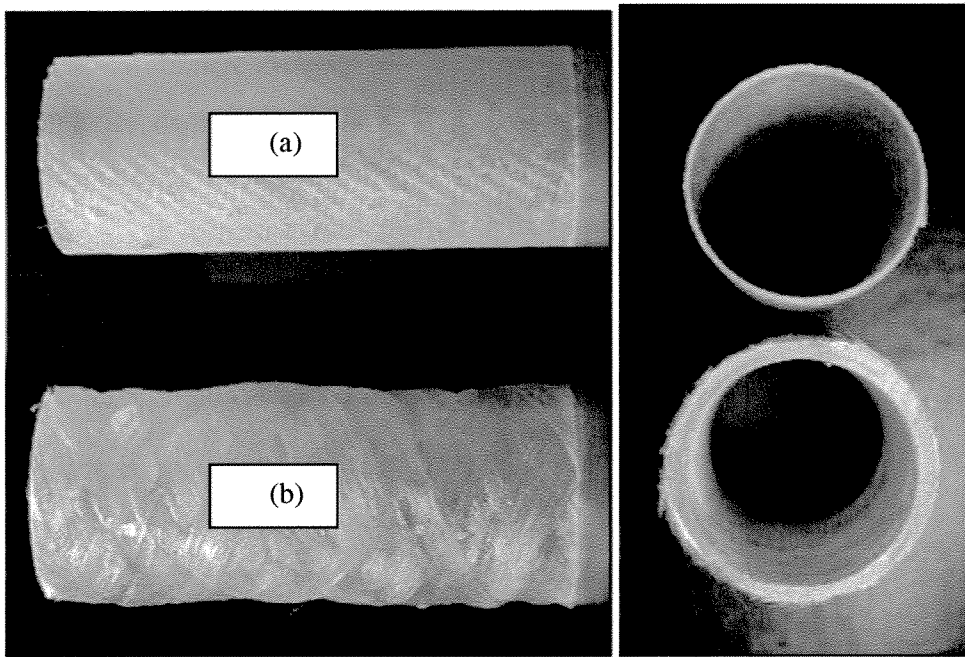
Şekil 1.33 Filament sarma tekniğiyle üretilmiş polimerik kompozit tüpler (a),yandan ve (b) üstten görüntü.

Filament sarma tekniğiyle alüminyum köpüklerin ezilme yüklerine benzer ezilme yükleri gösterecek et kalınlığına sahip tüpler hazırlamak mümkün olmamıştır. Bu yöntemle hazırlanan tüplerde istenen et kalınlığını kontrol etmek zordur ve ayrıca hazırlanan tüplerin et kalınlıkları da çok değişkendir.

İkinci yöntemde ise cam fiber kumaş reçineyle ıslatıldıktan sonra çelik mandrele sarılmıştır. Kumaş kullanılarak hazırlanan tüplerde et kalınlığı daha homojen ve tüp yüzeyi daha pürüzsüzdür. Şekil 1.34’de iki yöntemle hazırlanan tüplerin resimleri görülmektedir. Cam fiber kumaş kullanılarak hazırlanan tüplerin avantajları şunlardır:

- Düşük et kalınlığına sahip tüpler hazırlamak mümkündür
- Tüplerin et kalınlığı daha homojendir ve et kalınlığını kontrol etmek daha kolaydır
- Cam fiberlerin açısını kontrol etmek daha kolaydır
- Çoklu tüp geometrileri hazırlamak daha kolaydır
- Kumaşlar reçineyle daha iyi ıslanmaktadır

Yukarıdaki sebeplerden dolayı projenin devamında polimerik kompozit tüplerin sürekli fiber yerine kumaş kullanılarak hazırlanmasına karar verilmiştir. Hazırlanan kompozit tüplerin ezilme testleri bilgisayar kontrollü Schmadzu AGI üniversal test makinesi kullanılarak 2,5 mm dak⁻¹ basma hızında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1.34 (a) Cam fiber kumaş ve (b) sonsuz fiber kullanılarak üretilen polimerik kompozit tüplerin yüzey ve kesit alan görüntüleri.

1.4 Nümerik modelleme

Projede polistiren köpükle doldurulmuş alüminyum tek tüplerin ezilme davranışları modellenmiştir. Polistiren köpükler halen motosiklet başlıklarında darbelere karşı korunma amacı ile kullanılmaktadırlar. Ekspande polistiren köpülere göre ekstrüde polistiren köpükler daha homojen hücre büyüklüğüne sahip olmaları ve hücreler arası zayıf sınırlar içermediklerinden dolayı ince çeperli tüp yapıların doldurulmasında daha uygundurlar. Köpük doldurmanın tüp yapıların ezilme davranışlarına etkilerini incelemek amacıyla elmas deformasyon moduna sahip iki farklı kalınlık ve çaptaki tüpler yine iki farklı yoğunluğa sahip polistiren köpük malzeme ile doldurulmuştur.

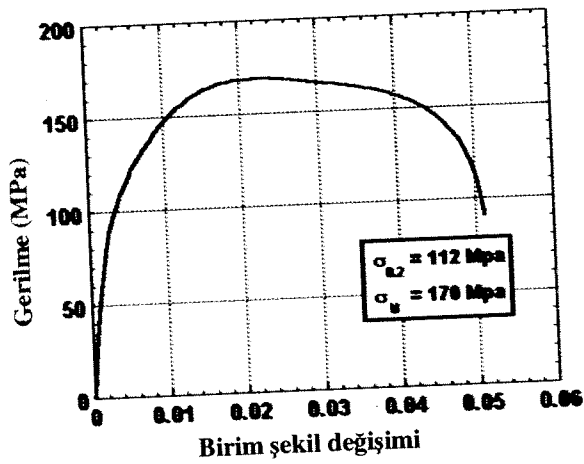
1.4.1 Malzemeler ve basma testleri

Seçilen Al tüpler 16 mm dış çap ve 0,23 mm kalınlık ve 25 mm dış çap ve 0,29 mm kalınlıktadırlar. Tüp malzemesinin statik çekme grilme-birim şekil değişimi eğrisi Şekil 1.35(a)'da gösterilmiştir. Soğuk çekme işlemi sonucunda grilme-birim şekil değişimi grafiğinin plastik deformasyon bölgesinde yüksek şekil değiştirme sertleşmesi değerlerine ulaşılmıştır. Tüpler herhangi bir ısıl işleme tabii tutulmadan doldurulmuşlardır.

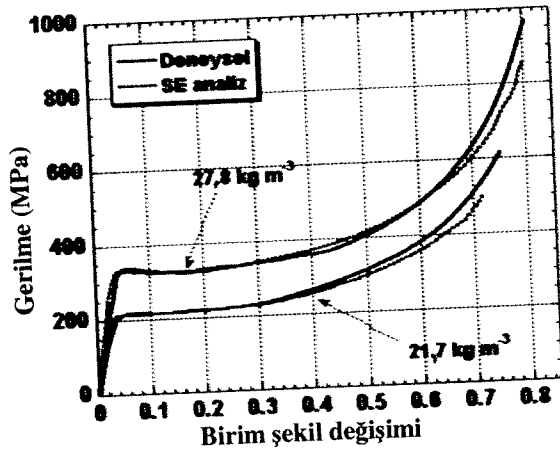
Izocam A.Ş. tarafından üretilen ekstrüde iki farklı yoğunluktaki: 21,7 ve 27,8 kg m⁻³, polistiren köpükler deneylerde kullanılmıştır. Tek eksenli basma gerilme-birim şekil değişimi davranışları daha önce belirtildiği üzere ASTM 1621-91 standardına uygun 50x50x50 mm boyutlarındaki kübik örnekler kullanılarak belirlenmiştir. Eğriler üç bölgeyi içeren tipik köpük deformasyon davranışını göstermektedirler. Bu bölgeler elastik, çökme (plato) ve yoğunlaşma bölgeleri olup köpük malzemelerin mekanik özelliklerinin test edilmesi ve oluşturulması ile ilgili bilgi başka bir çalışmada verilmiştir (TOKSOY, 2005).

Tüp yapılarının iç çaplarından hafifçe büyük çapa sahip olan silindirik köpük dolgu, polistiren köpük tabaka içerisinden ekstrüzyon yönüne dik olarak oyularak çıkarılmıştır. Köpük dolgu örnekleri boş tüplerin içine hücrelere zarar vermeden yerleştirilmiştir. Tüm çekme ve basma testleri bilgisayar kontrollü Schmadzu AGI universal test makinesi ile yapılmıştır. Test malzemeleri birbirine paralel basma çeneleri ile hiç bir sabitleme

kullanılmadan test edilmiştir (Şekil 1.36). Boyları 40 mm olan boş ve köpük doldurulmuş tüpler, köpük malzemelerin testlerinde de kullanılan 100 mm dak⁻¹, deformasyon hızı ile test edilmişlerdir.

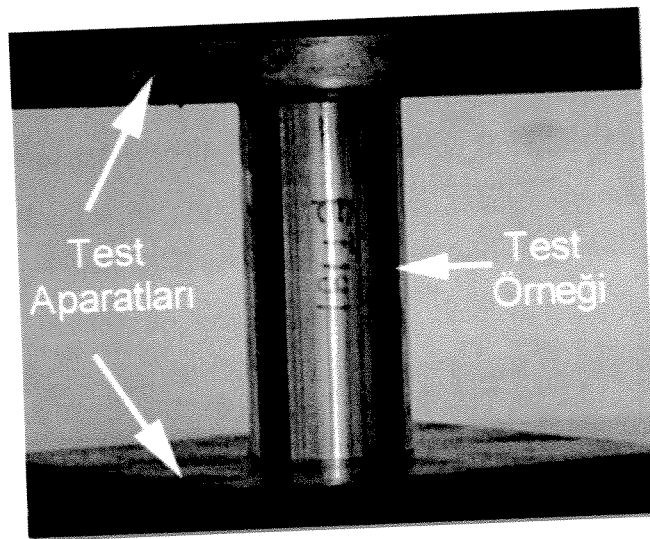


(a)



(b)

Şekil 1.35 (a) Al metal tüp malzemesinin çekme gerilme birim şekil değişimi grafiği ve (b) polistiren köpük malzemesinin deneysel ve SE analizi basma gerilme-birim şekil değişimi grafikleri.

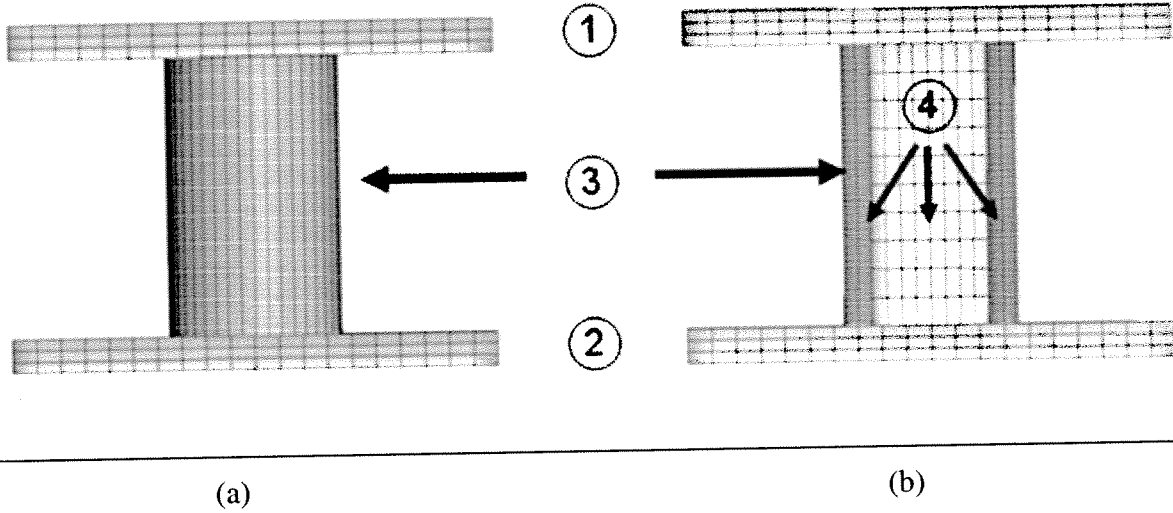


Şekil 1.36 Eksensel basma test düzeneği, 16 mm çaplı boş tüp.

Nümerik çalışmada kullanılan geometrik model ticari sonlu elemanlar paketi olan ANSYS™ ile oluşturulmuştur. Ağlanmış geometrik model daha sonra sınır koşullarının oluşturulması için PAM-GENESIS™ programına aktarılmıştır. Nümerik çözümler eksplicit sonlu eleman kodu PAM-CRASH™ ile elde edilmiş ve yine PAM-VIEW™ görüntüleme programı kullanılarak elde edilen sonuçlar işlenmiştir.

Al tüpler Belytschko-Tsay-4 noktalı ince kabuk elemanları kullanılarak modellenmiştir. Simetriden dolayı dolu tüplerin modellenmesinde sadece fiziksel geometrinin yarısı kullanılmıştır. Köpük dolgusu ve basma çenelerinin modellenmesinde 8 nokta katı elemanlar kullanılmıştır. Boş ve dolu tüplerin statik basma testi sonlu eleman ağlama modelleri Şekil 1.37(a) ve (b)'de gösterilmiştir. Alt ve üst basma çeneleri rijit kütle ve kinematik sınır olarak modellenmiştir. Üst çenenin dik eksenindeki hareketi haricinde iki çenenin diğer tüm yönlerdeki hareketlerine ve rotasyonlarına izin verilmemiştir. Rijit kütle hareketi, kütlelerin ağırlık merkezine yapay olarak konumlandırılan nokta ile belirlenmiştir. Sınır koşulları yine bu ağırlık merkezine uygulanmıştır.

Tüp malzemelerde elastik-plastik isotropik ince kabuk modeli olan malzeme modeli 103 kullanılmıştır. Bu malzeme modelinde dik yönlerdeki kesme kuvvetlerinin etkisini de içeren genişletilmiş plastisite algoritması kullanılmaktadır. Modelde plastik deformasyon sırasında Hill kriterlerini tam olarak sağlamış ve elemanların kalınlıkları sürekli yenilenmiştir. Üst ve alt çenelerde ise elastik-plastik katı eleman modeli olan malzeme modeli 1 kullanılmıştır. Bu model elastik-plastik davranışın isotropik sertleşmesini içermekle birlikte akma mukavemeti, tanjant modülü veya efektif plastik gerilme-şekil değiştirme değerlerini de kullanabilmektedir. Polistiren köpük malzemenin özellikleri ezilebilir köpük katı malzeme modeli 2 kullanılarak modellenmiştir. Malzeme modeli 2 birleştirilmiş hacimsel kütle ve deviatorik kesme plastisitesi sergileyen malzemeler için oluşturulmuştur. Dolu tüplerin modellenmesinden önce polistiren köpük malzemelerin deformasyon modelleri oluşturulmuş ve sonuçlar deneysel veriler ile karşılaştırılarak Şekil 1.35(b)'de gösterilmiştir. Şekil 1.35(b)'den de anlaşıldığı üzere nümerik modelin ve deneysel sonuçların birbirine uyması modelleme için yeterli gözükmektedir.



Şekil 1.37 FE ağlama (a) boş tüp (tüm model) ve (b) köpük dolu tüp (yarım model): 1 ve 2: basma testi plakaları, 3: boş ve köpük dolu tüp ağlaması ve 4:köpük dolgu ağlaması.

Modellemede üç farklı kontak kullanılmıştır: (i) alt çene ve boş tüp arasındaki sıkı kontak, (ii) üst çene ile tüpün üst kısmı için noktadan bölgeye kontak ve (iii) plastik deformasyon sırasında katlanan tüp yapıların birbirleri ile temasının model tarafından algılanması için tüp yüzeylerinde kendinden kontak modeli. Üçüncü model (model 36 algoritması) kayma ara yüzeylerindeki tüm ikincil bölümlere izin vermektedir. Böylece hiçbir özel bölge tanımlamadan algoritma otomatik olarak elementlere ait noktaların hangi bölgeler ile temas ettiğini algılar ve hafızada tutar. Ayrıca bu model üç boyutlu bölgeleme olarak adlandırılan 3D ikincil yüzeyleri bölge sayısına bölerek ikincil noktaları bu bölgelerin koordinatlarına göre hesaplayan bir algoritma kullanmaktadır.

Tüp çeperlerinin birbirleri üzerine kapanması, köpük dolgu yüzeyinde plastik deformasyonu ve tüp çeperlerinin köpük yapılarının içine girmesi ile sonuçlanır. Tüp duvarlarının köpük malzeme yüzeyinden içeriye girme miktarı dolgu malzemesi yarı çapından küçüktür. Bu gözlem esas alınarak, hesaplama zamanını azaltmak için model içinde tüp çeperlerine yakın olan köpük malzemesi üzerinde özel bit ağlama modeli uygulanmıştır, Şekil 1.37(b). Köpük malzemedeki katı elemanların yüksek deformasyon miktarlarında şeklini kaybettiği zaman ortaya çıkabilecek nümerik problemleri gidermek için dahili katı anti-çökme kontak (kontak model 10) kullanılmıştır. Bu opsiyon istikrarlı çözüm zaman adımları arasındaki aralığı azaltmaktadır. Ayrıca yine bu opsiyon sayesinde, elementlerin

büyük şekil kayıplarına uğramaları sonucunda ortaya çıkan negatif hacimlerden dolayı oluşabilecek kötü tanımlı elemanların oluşması önlenmektedir. Tüp çeperi ile köpük malzeme arasındaki etkileşim çoklu bölge kontağı (kontak model 23) kullanılarak tanımlanmıştır. Kontak model 23 muhtemel temasları saptamak amacıyla genişletilmiş bir tarama algoritması kullanılmaktadır. Bu kontak modelinde her bir birincil bölge alan kutusuna potansiyel aday ikincil noktalar verimli bir sınırlandırma ile aranmaktadır. Birincil alan için harcanan her zaman adımında sadece bu alana ait olan aday noktalarla temas olup olmadığı için kontrol edilir. Kritik kuvvetler bu noktalara uygulanır ve birincil bölge ile temasları kontrol edilir.

1.4.2 Ağlama optimizasyonu

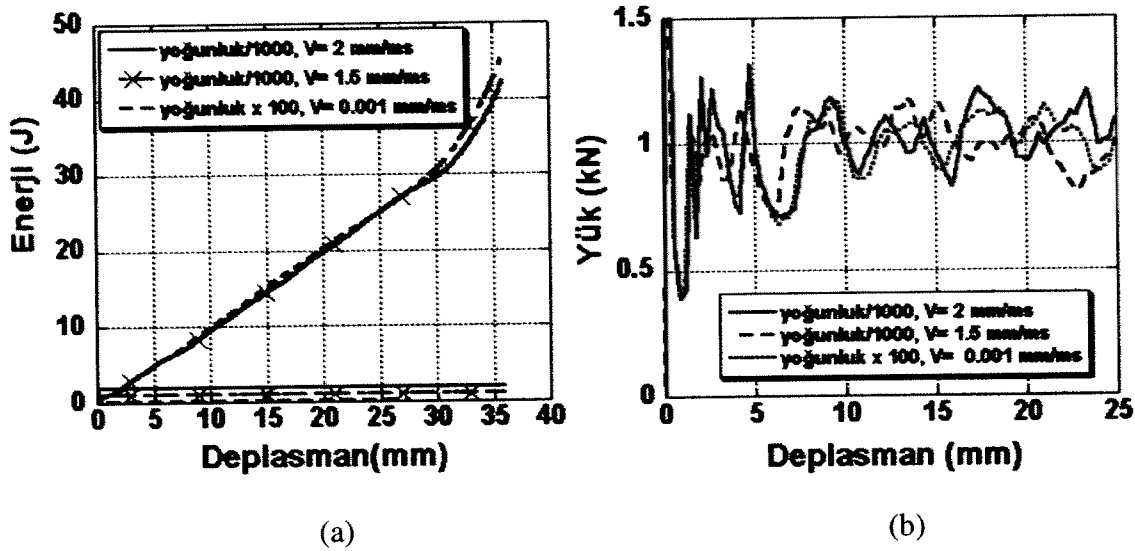
Sonlu elemanlar analizinde sabit geometri için kullanılan sonlu eleman ağ sayısı elemanların büyüklüğü nümerik sonuçlarda farklılıklara yol açmaktadır. Optimum sonlu eleman sayısı, eleman sayısını deneysel sonuçlara yaklaşım sağlanana kadar sürekli değiştirilerek elde edilmiştir. Her iki tüp geometrisi içinde çevresel eleman sayısı 40 olarak belirlenmiştir. Tüp yüksekliği boyunca eleman sayısı 20, 40, 80 ve 160 alınmıştır. 40x80 gösterimi çevresel olarak 40, yükseklik boyunca ise 80 toplam eleman sayısına karşılık gelmektedir.

1.4.3 Statik simülasyon

Boş ve köpük malzeme dolu tüplerin basma testleri 100 mm dak⁻¹'da (4.16×10^{-2} s⁻¹ deformasyon hızı) gerçekleşmiştir. Bu deformasyon hızı dinamik simülasyonlar düşük bir hız olmasına karşın, ekspilisit zaman integrasyonu metodu hesaplama aralıkları yeterince küçük olduğu zaman bu tip modellemelerde de güvenilir sonuçlar vermektedir. Düşük hızlarda gerçekleşen olayları modellemede kullanılan implisit metoda göre ekspilisit metot genel olarak çarpışma ve patlama gibi olayların modellemesinde kullanılmaktadır. Fakat Santosa ve diğerleri (SANTOSA, 2000) iki farklı yöntem kullanılarak ekspilisit dinamik modellemenin statik simülasyonlarda da kullanılabilirliğini göstermişlerdir. Bunlar malzeme kütlelerini belirli bir oranda azaltmak veya malzemenin yoğunluğunu belirli bir oranda artırmaktır. Bu metotların ilki hesaplama zaman aralıklarının artmasına neden olurken, ikincisi ise zaman

aralıkları artış sayısının düşük yükleme hızları için azalmasına neden olmaktadır. Bu çalışmada yükleme hızı 2 mm ms^{-1} alınmış ve kütle 1000 kat oranında azaltılmıştır. Simülasyon sırasında yükleme hızı 0.01 ms içinde belirlenen değere ulaşıttan sonra sabit tutulmuştur.

Santosa ve diğerlerinin (SANTOSA, 2000) çalışmalarında belirtildiği gibi statik koşulların simülasyonla sağlandığını kanıtlamak için iki simülasyon çıktısı kontrol edilmiştir. İlk olarak ezilme sırasında oluşan toplam kinetik enerjinin mutlaka toplam iç enerjiden küçük olmalıdır. İkinci olarak ise ezilme yükü-deplasman davranışı uygulanan hızdan bağımsız olmak zorundadır. Şekil 1.38(a)'da üç değişik yoğunluk oranı-deformasyon hızı girdisine karşılık gelen kinetik enerjinin toplam iç enerjiden küçük olduğu gösterilmektedir. Ayrıca yine Şekil 1.38(b)'de aynı üç farklı kombinasyonun sonuçlarının yük-deplasman eğrilerinin benzer davranış sergiledikleri görülmektedir. Verimlilik ve toplam çözüm zamanı göz önüne alınarak nümerik çözümlemede malzemelerin yoğunluğu 1000 kat küçültülmüş deformasyon hızı ise 2 mm ms^{-1} seçilmiştir.

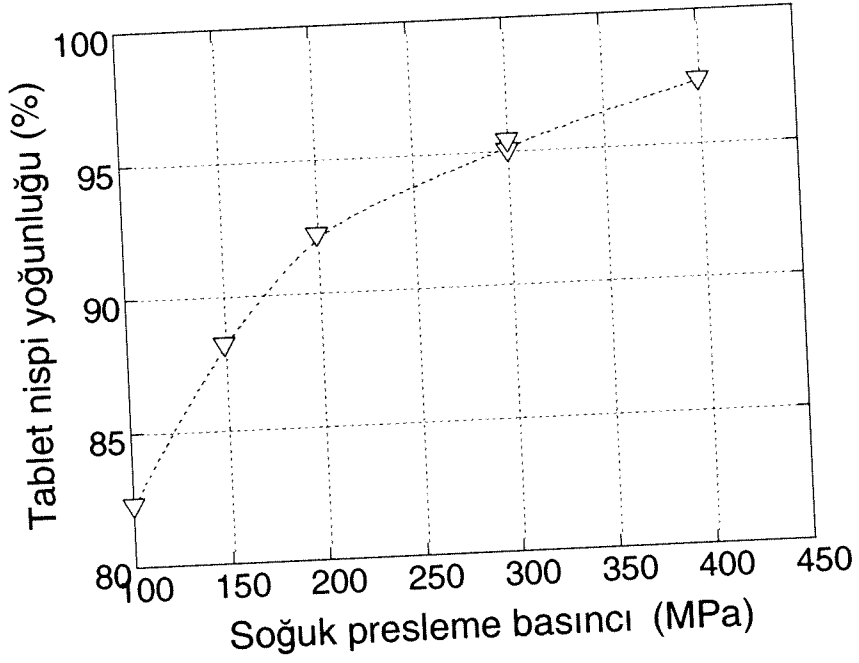


Şekil 1.38 (a) 16 mm tüp için farklı yoğunluk ve hızlarda kinetik ve iç enerji değişimi ve (b) buna karşılık gelen yük-deplasman grafiği.

2. GELİŞME

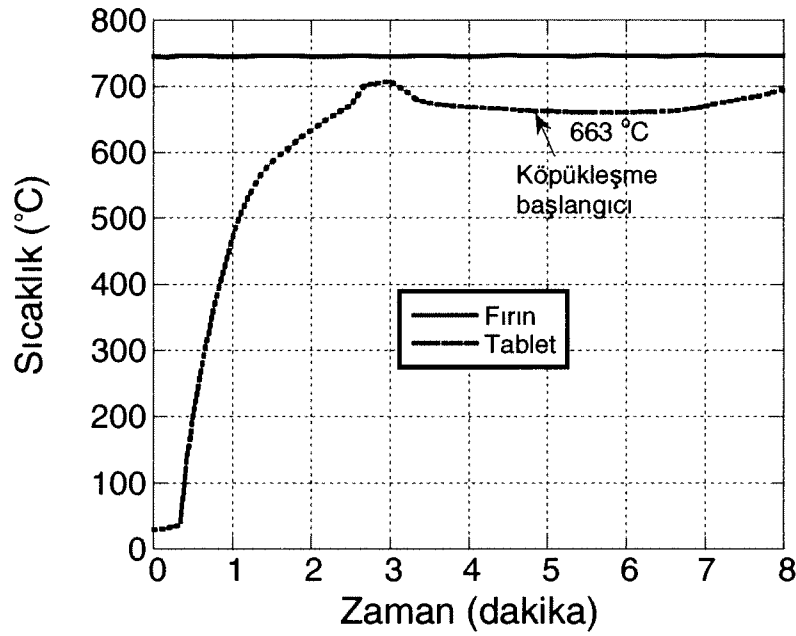
2.1 Köpükleşme deneyleri

Soğuk presleme basıncının ara numunenin nispi yoğunluğuna etkisi Şekil 2.1'de gösterilmektedir. Kullanılan en yüksek basınç olan 400 MPa'da dahi tabletlerin nispi yoğunluğu %98'den küçüktür. Ara numunelerde etkin bir köpükleşme sağlamak için sıcak haddeleme uygulanmış ve tabletlerin nispi yoğunluğu % 99'un üstüne çıkartılmıştır.

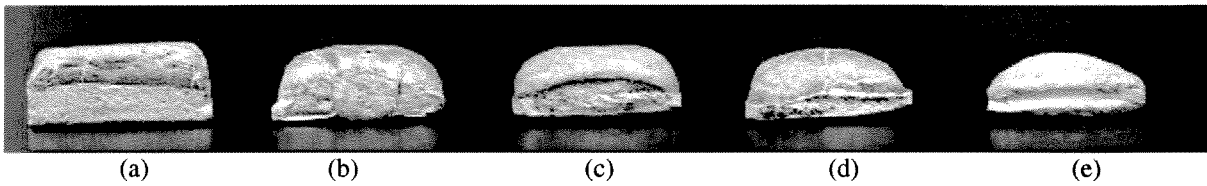


Şekil 2.1 Tablet nispi yoğunluğunun soğuk presleme basıncı ile değişimi.

Hazırlanan tabletlere benzer ara ürünler daha önceki bir çalışmada 750 °C'ye ısıtılmış bir fırında etkin bir şekilde köpükleştirilmişlerdir (ELBİR, 2003). Şekil 2.2'de gösterilen ara numunenin fırındaki sıcaklık-zaman davranışı köpükleşmenin bazı önemli aşamalarını da göstermektedir. Ara numunenin önceden ısıtılmış köpükleşme kalıbına oda sıcaklığında yerleştirilmesi nedeniyle köpükleşme bir süre sonra başlamaktadır. Şekil 2.2'de gösterildiği gibi numune sıcaklığı önce 700 °C'ye yükselmekte ve daha sonra numune 663 °C'de erimekte. Kullanılan kalıp ve fırında köpükleşme ancak 4 dakika 45 saniyede başlamakta ve oluşan köpüğün kalıbı tamamen doldurması ise 5 dakika 25 saniyede gerçekleşmektedir. Şekil 2.3'de değişik fırında kalma sürelerinde köpükleştirilmiş numuneler gösterilmektedir.



Şekil 2.2 Fırın ve tablet sıcaklıklarının zaman ile değişimleri.



Şekil 2.3 Farklı zamanlarda köpükleşen numuneler: (a) 5 dakika 25 saniye (b) 5 dakika 15 saniye (c) 5 dakika 10 saniye (d) 5 dakika 5 saniye ve (e) 5 dakika .

Köpükleşme kalıbı malzemesi ve geometrisinin ve kullanılan fırın boyutunun ara numune ısınma hızını doğal olarak etkilemektedir. Bu etkiler köpükleşme işleminde dikkate alınmalıdır. Bu çalışmada tüm köpükleşme deneyleri aynı malzemedен (St-37 çelik) hazırlanmış ve aynı boyutlara sahip kalıplarda yapılmıştır. Bu yüzden, ön ısıtma sıcaklığı, ara numuneyi kalıba yerleştirme ve kalıbı çıkarma süreleri gibi köpükleşme ve ısınma parametreleri ayarlanarak, Şekil 2.3’de gösterilen değişik fırınlama sürelerindeki köpükleşme davranışı tekrarlı bir davranışa dönüştürülmüştür. Köpükleşme işleminin zorluklarından biri de sıvı köpüğün termodinamik açıdan kararsız olmasıdır. Ara numunenin önceden ısıtılmış köpükleşme kalıbına temasla ısındığını da burada belirtmek gerekmektedir. Ara numune ve köpükleşme kalıbı temas yüzeylerinde oluşacak boşluklar değişen ısı iletimi nedeniyle köpükleşme süresini etkileyecektir.

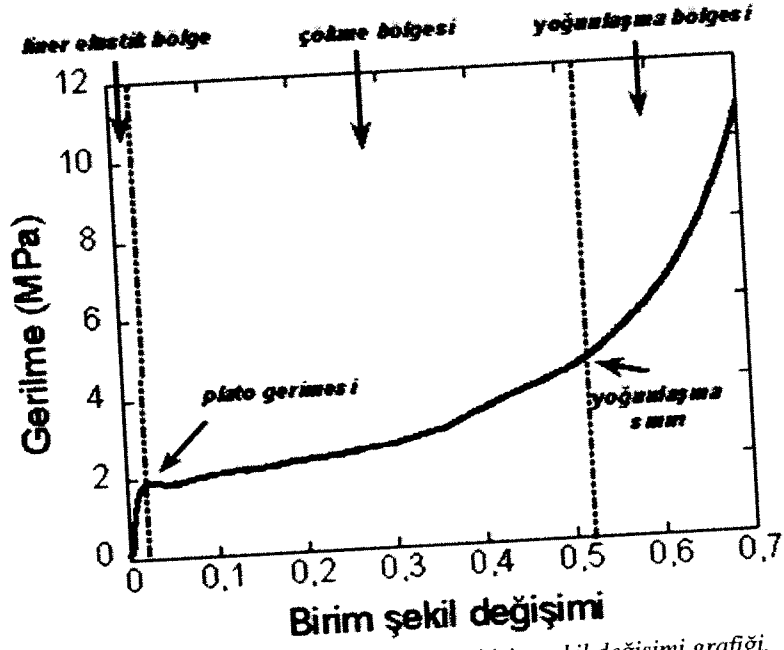
Ara numunenin genişmesi beklenen düzeye geldiğinde köpük şeklini ve gözenek yapısını koruyabilmek için sıvı köpük hızlıca soğutulmalıdır. Aksi takdirde sıvı alüminyum alt kısma akar (drenaj) ve daha uzun köpükleşme sürelerinde alt kısımdaki yoğun metal tabakası oluşur. Uzun köpükleşme süreleri aynı zamanda düzensiz ve büyük gözeneklerin oluşmasına ve hücre duvarlarının çökmesine neden olur. Soğutma esnasında geometrik hatalar da oluşabilmektedir. Şekil 2.4’de alt yüzeyinde çökme oluşmuş bir numune gösterilmektedir. Hatalı numuneler projede kullanılmamıştır.



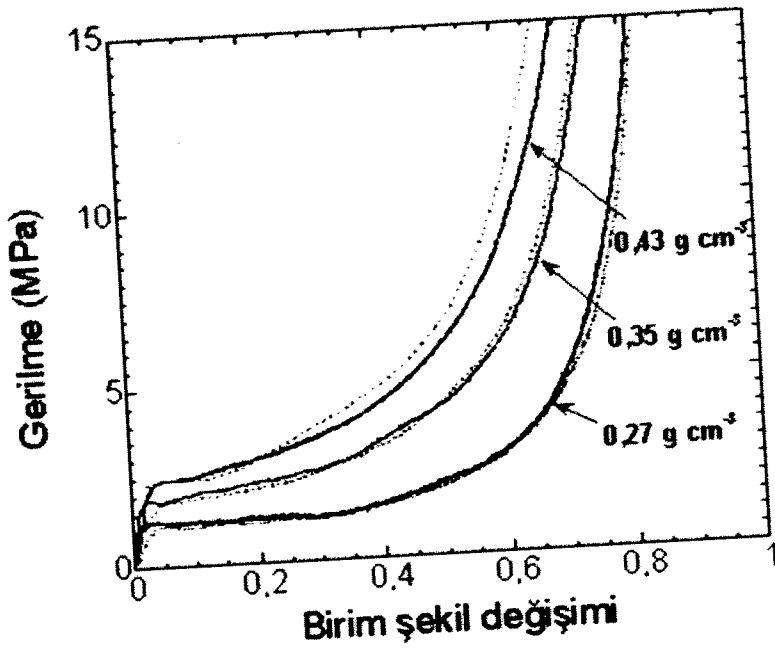
Şekil 2.4 Köpükleşen tabletin tabanında oluşan çökme.

2.2 Alüminyum köpüklerin ezilme davranışları

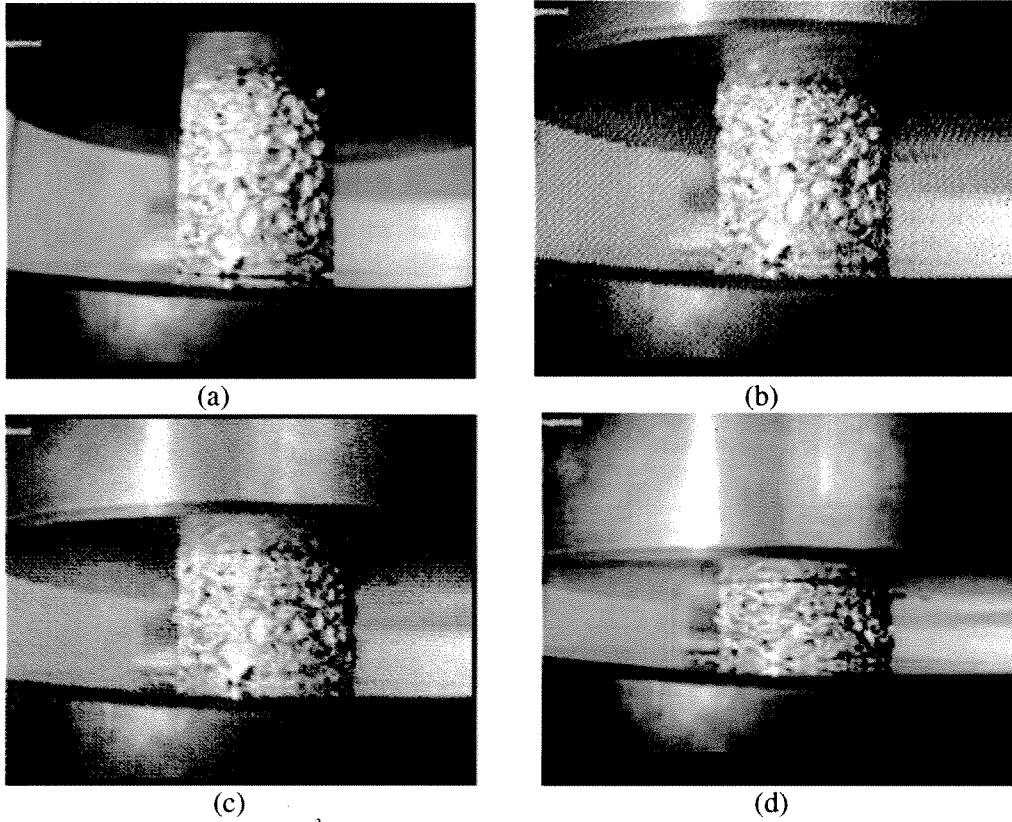
Kapalı hücreli metal köpükler, doğrusal elastik, çökme ve yoğunlaşma bölgelerinden oluşan karakteristik gerilme-birim şekil değişimi davranışı gösterirler (Şekil 2.5). Düşük gerilmelerde liner elastik bölgede deformasyon hücre duvarlarının eğilmesi ile kontrol edilir. Bu bölgeyi, elastik bükülme, hücre duvarlarının gevrek parçalanması ve plastik bükülme gibi değişik deformasyon mekanizmaları ile ilerleyen çökme bölgesi takip eder. Çökme bölgesinde deformasyon oldukça yereldir ve diğer bölgelere yayılarak devam eder. Deformasyonun bölgesel gerçekleşmesi ve hücre çökmesi ve yoğunlaşması mekanizmalarının tekrarlanması nedeni ile gerilmelerde dalgalanmalar oluşur. Çökme bölgesi sabit veya birim değişim miktarı ile artan bir plato gerilmesi ile tanımlanabilir (Şekil 2.5). Kritik bir şekil değişimi miktarına, ϵ_d , ulaşıldığında yerel deformasyon sona erer ve hücre duvarları birbirlerine değmeye başlayarak yoğunlaşma bölgesine girilir. Bu bölgede gerilme hızla yükselir ve yoğun Al metalin gerilme miktarlarına yaklaşır. Her bir bölgenin uzunluğu nispi köpük yoğunluğuna bağlı olarak değişir. Hazırlanan Al köpükler yukarıda belirtilen deformasyon mekanizmalarını göstermektedirler. Değişik yoğunluklarda (0,27, 0,35 ve 0,43 g cm⁻³) hazırlanmış Al köpüklerin basma gerilme-birim şekil değişimi grafikleri Şekil 2.6'da gösterilmektedir. Benzer yoğunluktaki Al köpüklerin basma gerilme-birim şekil değişimi davranışlarının tekrarlılığını göstermek için, Şekil 2.6'da iki testin sonuçları birlikte gösterilmiştir. Aynı zamanda, Şekil 2.6'da, köpüklerin plato gerilmesinin sabit olmadığı, artan birim şekil değişimi ile arttığı da görülmektedir. Homojen hücre boyutuna ve hücre boyutu dağılımına sahip köpüklerin, çökme bölgesinde sabit bir plato gerilmesi göstermesi beklenmektedir. Gerçekte ise hücre boyutu ve dağılımındaki bölgesel farklılıklar zayıf hücrelerin güçlü ve kalın hücrelerden daha önce çökmelerine neden olmaktadır. Bu ise çökme bölgesinde gerilme artışına neden olmaktadır. Şekil 2.7(a-d)'de, 0,27 g cm⁻³ yoğunluktaki bir köpüğün %0, %25, %50 ve %75 birim şekil değişimi miktarlarındaki ezilme deformasyon görüntüleri gösterilmektedir. Şekil 2.7(a)'da da görüldüğü üzere, köpükteki bölgesel deformasyon üst basma plakasına yakın bir yerden başlayarak (Şekil 2.7(b)) alt kısımlardaki daha yoğun bölgelere doğru ilerlemektedir.



Şekil 2.5 Al köpüklerin tipik gerilme-birim şekil değişimi grafiği.



Şekil 2.6 Farklı yoğunluktaki Al köpüklerin gerilme-birim şekil değişimi grafikleri.



Şekil 2.7 Al köpük ($0,27 \text{ g cm}^{-3}$) numunesinin (a) %0 (b) %25 (c) %50 ve (d) %75 birim şekil değişimlerdeki basma testi görüntüleri.

Şekil 2.8’de hazırlanan köpüklerin plato gerilmesi (elastik bölgenin bittiği gerilme) nispi yoğunluk ile değişimi gösterilmiştir. Beklenildiği üzere nispi yoğunluğun artması ile hazırlanan köpüklerde plato gerilmesi artmaktadır.

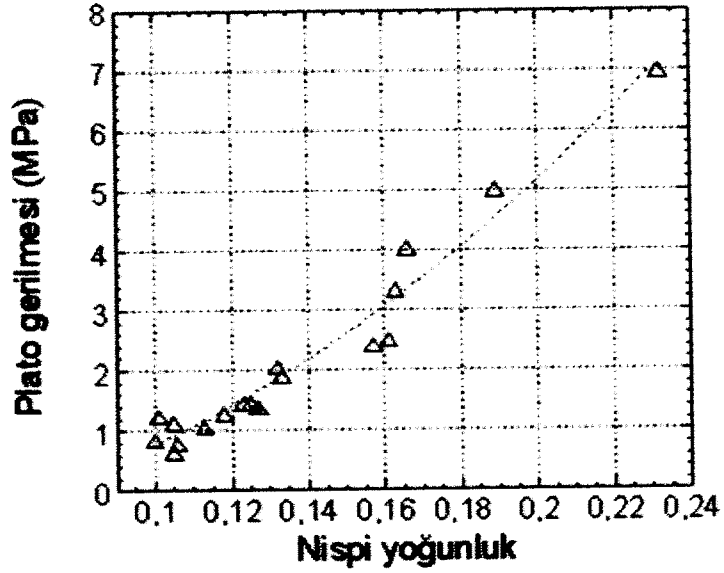
Norveçli araştırmacı Hanssen (HANSEN, 2002) eksensel yüklemelerde alüminyum köpüklerin gerilme ve birim şekil değişimi arasındaki ilişkiyi modellemek için aşağıdaki denklemi önermiştir;

$$\sigma = \sigma_{pl}^* + \gamma \frac{e}{e_D} + \alpha \ln \left[1 / \left(1 - \left(\frac{e}{e_D} \right)^\beta \right) \right] \quad (2.1)$$

$$e_D = 1 - \rho^* \quad (2.2)$$

Denklem 2.1’de e , e_D , γ , α ve β sırasıyla birim şekil değişimi, yoğunlaşma birim şekil değişimi, deformasyon sertleşme değişkeni ve oranı ve şekil katsayılarıdır. Denklem 2.1 hazırlanan köpüklere uydurularak, σ_P , γ , α ve β değerleri her yoğunluk için hesaplanmıştır (Tablo 1.1). Denklem 2.1’i kullanarak dolgu köpük malzemesinin gerilme-birim şekil

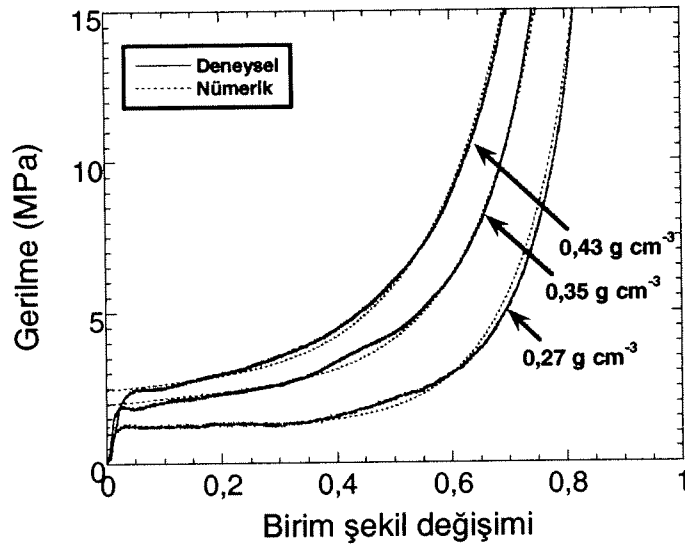
değişimi değerleri çalışılan üç yoğunluk için hesaplanmıştır. Şekil 2.9'dan görüleceği gibi deneysel ve nümerik sonuçlar arasında kabul edilebilir uyum bulunmuştur.



Şekil 2.8 Plato gerilmesine karşılık nispi yoğunluk.

Tablo 2.1 Denklem 2.1'deki katsayıların değerleri.

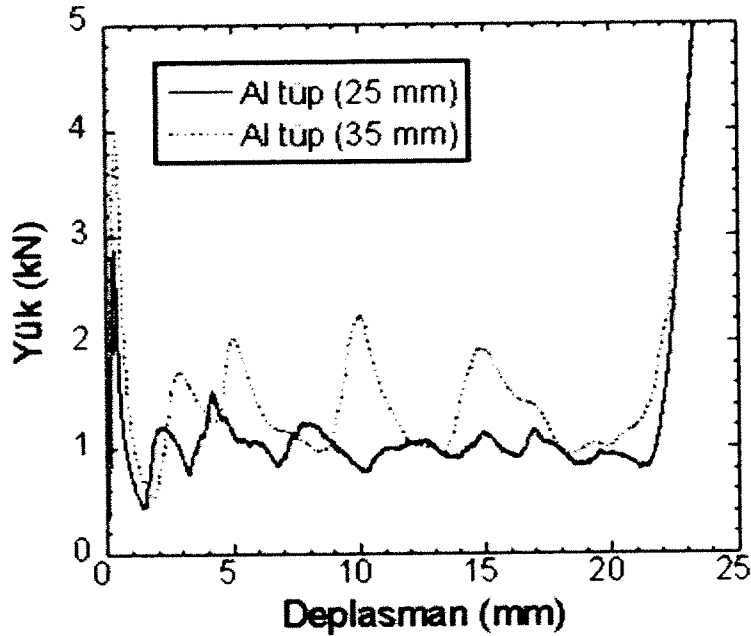
Köpük yoğunluğu (g cm ⁻³)	σ_{pl}^* (MPa)	γ	α	β
0,27	1,24	0,2	17	6
0,35	1,96	1,7	17	5
0,43	2,44	1,7	18	4



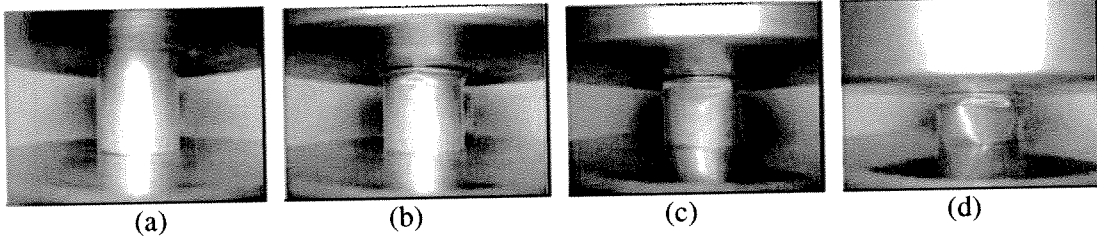
Şekil 2.9 Model ile deneysel sonuçların karşılaştırılması.

2.3 Boş alüminyum tüplerin ezilme davranışları

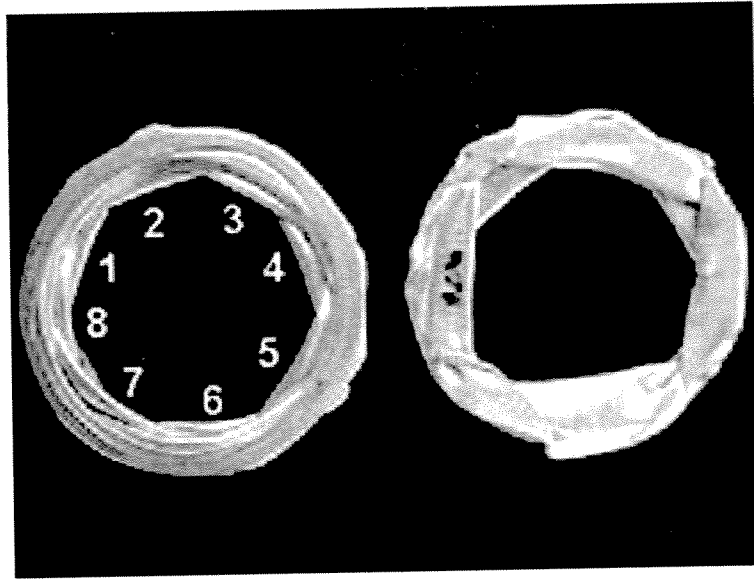
Boş 25 mm ve 35 mm çaplı Al tüpler elmas modunda deforme olmuşlardır. Boş tüplerin tipik yük-deplasman eğrileri Şekil 2.10'da gösterilmektedir. 25 mm çaplı boş Al tüpün %0, %20, %35 ve %60 deplasmanlardaki ezilme görüntüleri ise sırası ile Şekil 2.11(a), (b), (c) ve (d)'de gösterilmektedir. Bu şekillerden görüldüğü üzere deformasyon ilerleyen bir özellik göstermektedir. Her iki tüpte de deformasyon sekiz köşeli elmas katlanmadır (Şekil 2.12). Şekil 2.10'da gösterilen yük değerleri sürekli artan ve azalan bir özellik göstermektedir. Yüklerin tepe noktaları arasındaki mesafe katlanma uzunluğuna ve tepe sayısı ise katlanma sayısına eşittir. Her iki tüpte de toplam 4 veya 5 katlanma oluşmuştur. Tüplerde yoğunlaşma (yük değerlerindeki ani artış) başlangıç tüp uzunluğunun yaklaşık %80'nine tekabül eden 21 mm'lik deplasmandan sonra başlamaktadır. Şekil 2.10'da gösterildiği üzere ilk yük tepe noktasının yük değeri onu takip eden diğer yük tepelerinin değerlerinden daha yüksektir. Bu özellik ince duvarlı tüplerin ezilmesinde oldukça yaygın gözlenmekte olup, basma test plakalarının yatay deformasyonu kısıtlamasından dolayı oluşmaktadır. İlk yük tepe değeri maksimum ezilme yükü değeri olarak kabul edilmektedir.



Şekil 2.10 Boş alüminyum tüplerin tipik yük-deplasman davranışları.

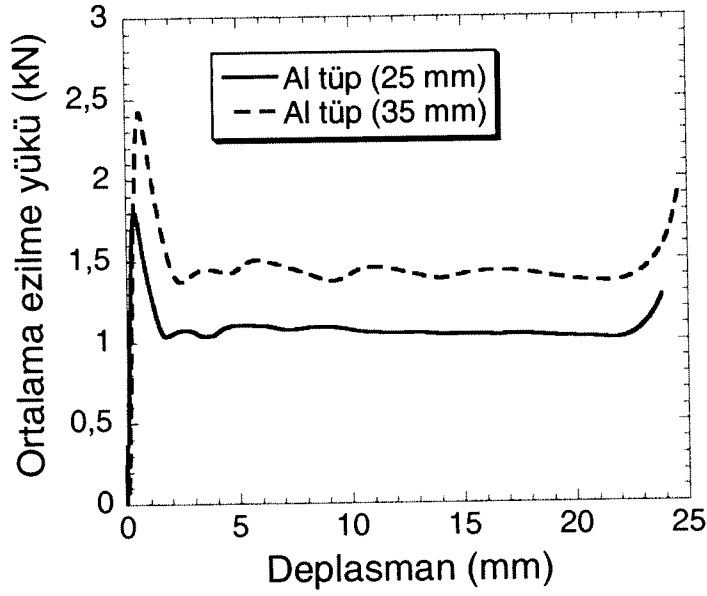


Şekil 2.11 25 mm çaplı alüminyum tüplerin ezilme görüntüleri (a) %0, (b) %20, (c) %35 ve (d) %60 basma yer değiştirmeleri.



Şekil 2.12 Ezilmiş boş alüminyum tüpün üstten ve alttan görünüşleri.

Boş tüplerin ortalama ezilme yük-deplasman grafikleri Şekil 2.13'de gösterilmektedir. Aynı şekilden görüldüğü üzere 25 mm çaplı tüp yaklaşık 1 kN'luk ortalama yük ile ezilirken 35 mm çaplı tüp 1.25 kN civarında ezilmektedir. Tablo 2.2'de ise boş tüplerin ezilme test sonuçları listelenmiştir.



Şekil 2.13 Boş Al tüplerin tipik ortalama ezilme yükü-deplasman grafikleri.

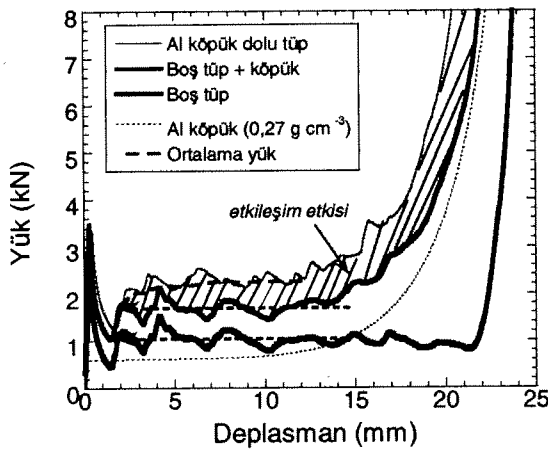
Tablo 2.2 Boş tüplerin ezilme test sonuçları.

Test kodu	Tüp		Özellikler			
	Tüp çapı (mm)	Tüp kalınlığı (mm)	Maksimum yük (kN)	Ortalama yük (%50 deplasman) (kN)	Toplam katlanma sayısı	Ezilme modu
E1-1	25	0,29	1,5313	0,999	4	Elmas
E2-1	25	0,29	1,4844	1,0299	4-5	Elmas
E3-1	25	0,29	1,5547	1,0192	4-5	Elmas
E4-1	25	0,29	1,4219	0,9439	4	Elmas
E5-1	25	0,29	1,5156	1,039	5	Elmas
E6-1	25	0,29	1,3516	0,9416	5	Elmas
E7-1	25	0,29	1,375	1,085	5	Elmas
E8-1	25	0,29	1,3438	0,9265	4	Elmas
E9-1	25	0,29	1,3516	0,9534	5	Elmas
E1-2	35	0,35	1,6406	1,1378	4	Elmas
E2-2	35	0,35	1,8141	1,2812	4	Elmas
E3-2	35	0,35	2,2438	1,3609	4	Elmas

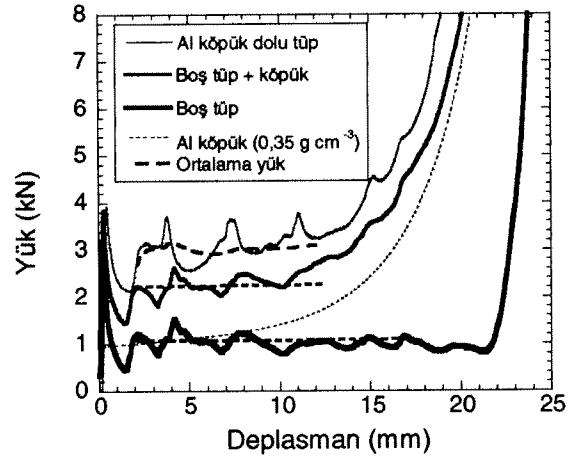
2.4 Tekli alüminyum ve polistiren köpük dolu tüplerin ezilme davranışları

Şekil 2.14(a)'da, $0,27 \text{ g cm}^{-3}$ yoğunlukta Al köpükle doldurulmuş 25 mm tüpün ezilme yük-deplasman grafiği, boş tüp, Al köpük, boş tüp+Al köpük grafikleriyle birlikte gösterilmektedir. Boş tüp+Al köpük, boş tüple Al köpüğün ezilme yük değerlerinin

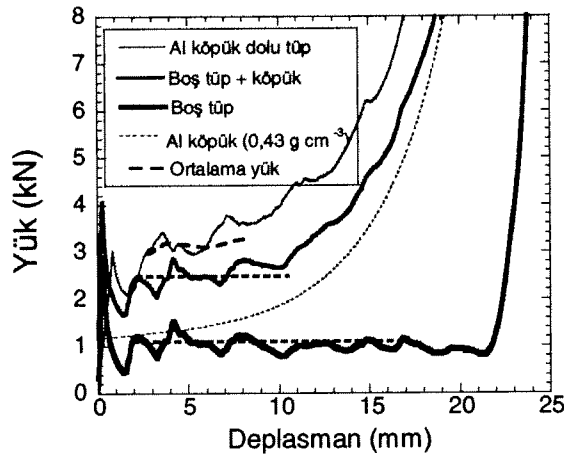
toplamıdır. Aynı şekilde ortalama ezilme yükleri noktalı çizgiyle gösterilmektedir. 10 mm deplasmandan sonra Al köpük dolgunun ezilme yük değeri plato yük değerinin üstüne çıkmasından dolayı Al köpük dolu tüplerin ortalama ezilme yükü değerleri 2 ile 10 mm yer değiştirme arasında hesaplanmıştır. Şekil 2.14(a)'da açıkça görüldüğü üzere dolu tüpün ortalama ezilme yük değeri boş tüp+Al köpük değerinden daha yüksektir ve bu etkileşim etkisi olarak bilinmektedir. Etkileşim etkisi, Şekil 2.14(b) ve (c)'de sırasıyla gösterildiği üzere 0,35 ve 0,43 g cm⁻³ yoğunlukta köpük dolu tüplerde de gözlemlenmiştir.



(a)



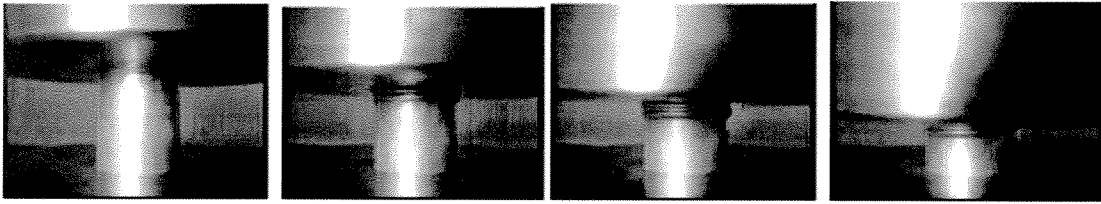
(b)



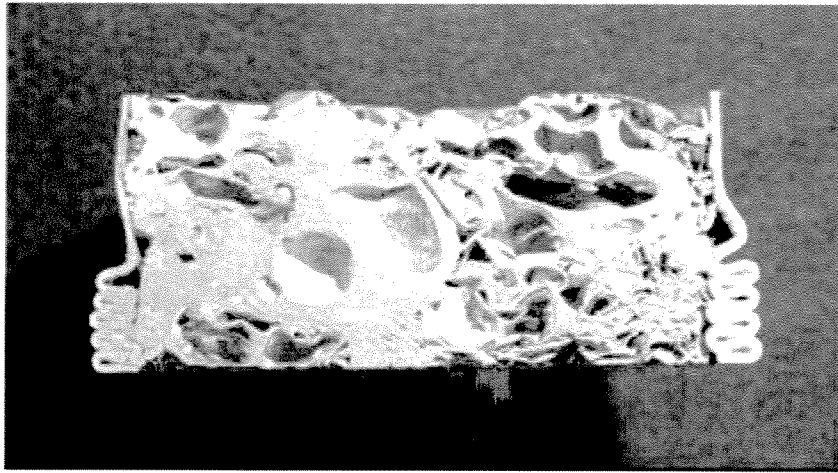
(c)

Şekil 2.14 Köpük dolu 25 mm tüpün, boş tüpün, boş tüp + köpüğün ve köpüğün yük-deplasman grafikleri (a) 0,27 g cm⁻³ Al köpük dolu, (b) 0,35 g cm⁻³ Al köpük dolu ve (c) 0,43 g cm⁻³ Al köpük dolu tüpler.

Doldurulan Al köpüğün yoğunluğundan bağımsız olarak köpük doldurma işlemi sonucunda, deformasyon elmas moddan (boş tüp) ilerleyen simetrik moduna dönüşmüştür. Şekil 2.15(a-d)'de $0,35 \text{ g cm}^{-3}$ yoğunluğunda köpük dolu 25 mm çaplı tüpteki simetrik deformasyon değişik deplasman yüzdelerinde gösterilmektedir. Katlanma, Şekil 2.16'da görüldüğü üzere tüpün bir ucundan başlayarak diğer ucuna doğru ilerlemektedir. Köpük doldurma işlemi sonucunda, katlanma uzunluğunu azalmış ve toplam katlanma sayısı 4'den 6'ya çıkmıştır.



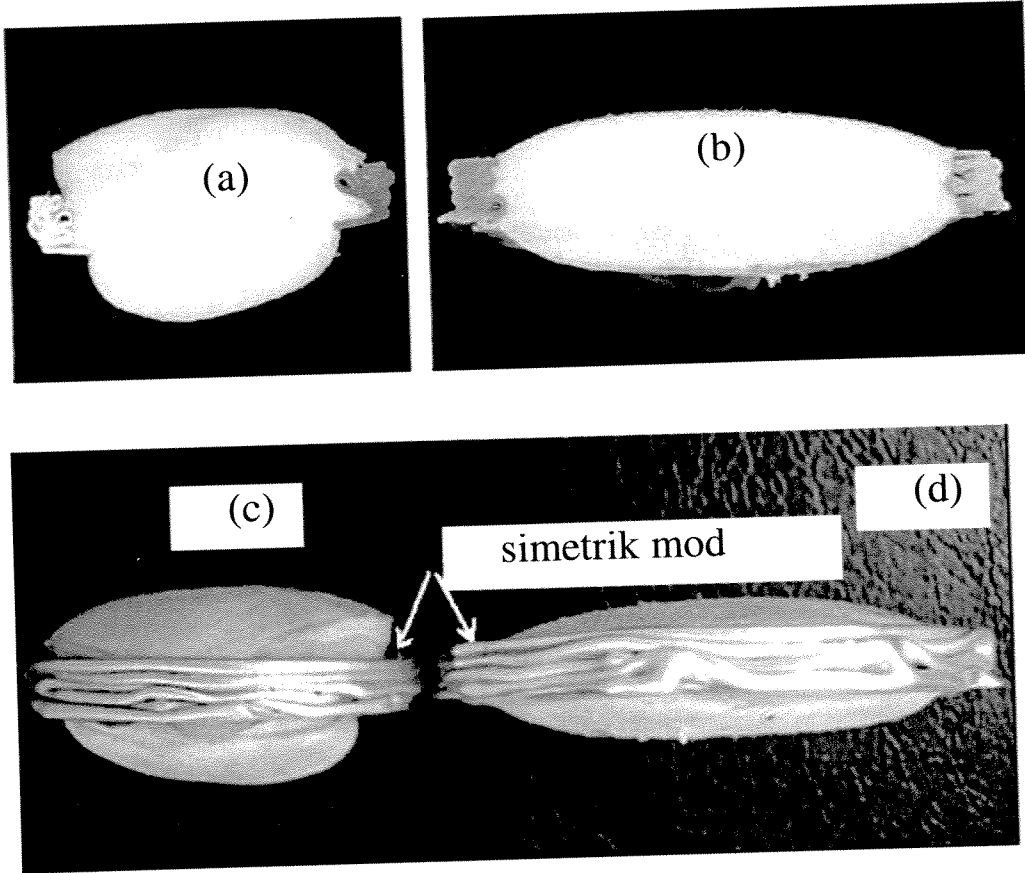
Şekil 2.15 $0,35 \text{ g cm}^{-3}$ Al köpük dolu tüpte simetri deformasyonun ilerleyişi, deformasyon: (a) %0, (b) %20, (c) %35 ve (d) %50.



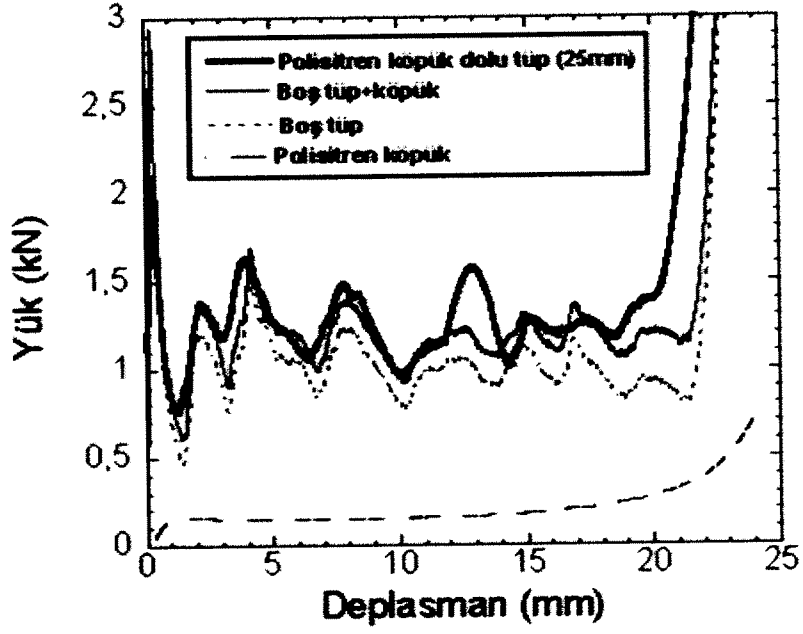
Şekil 2.16 Simetrik deformasyona uğrayan Al köpük dolu tüpün iç görünüşü.

Polisitren köpük dolu 25 mm ve 35 mm çaplı tüplerde deformasyon modu elmasan, simetrik ve elmas katlamadan oluşan karışık moda dönüşmüştür (Şekil 2.17(a-d)). Tüplerin eksensel ezilmesinde karakteristik iki farklı deformasyon modu bilinmektedir; simetrik ve elmas. Polisitren dolu tüplerde ise elmas ve simetrik deformasyondan oluşan karışık mod sıklıkla gözlenmiştir.

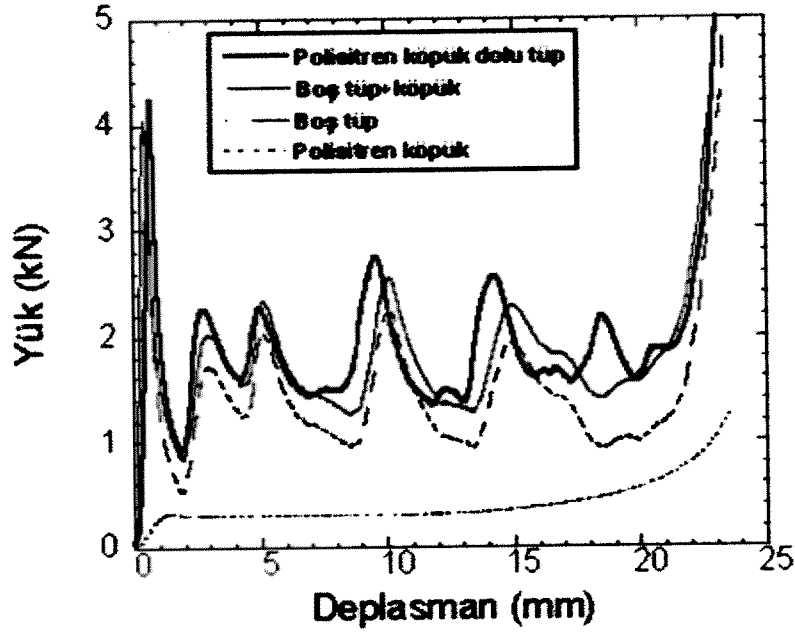
Polisitren köpük dolu, 25 mm ve 35 mm çaplı Al tüplerin tipik yük-deplasman grafikleri, sırasıyla Şekil 2.18(a) ve (b)'de gösterilmektedir. Aynı şekillerde boş ve boş tüp+ köpük için yük-deplasman eğrileri karşılaştırma amacı ile gösterilmiştir. Her iki tüpte de köpük dolgu ortalama ezilme yükü boş tüp+köpüğün üstüne çıkarmıştır (Şekil 2.19(a) ve (d)). Bu sonuçlar daha önce belirtilen etkileşim etkisini doğrulamaktadır. Al köpük dolu tüplerdeki gibi, polisitren köpük dolgu katlanma uzunluğunu azaltmış ve dolayısıyla katlanma sayısını artırmıştır. Tablo 2.3'de polisitren köpük dolu tüplerin geometrik ve ezilme özellikleri listelenmiştir. Tablo 2.3'de gösterildiği üzere simetrik mod karışık moddan daha fazla toplam katlanmaya neden olmuştur.



Şekil 2.17 Polisitren köpüklerde karışık deformasyon: (a) 25 mm dolu tüpün içi, (b) 35 mm dolu tüpün içi, (c) 25 mm dolu tüpün dışı ve (d) 35 mm dolu tüpün dışı.

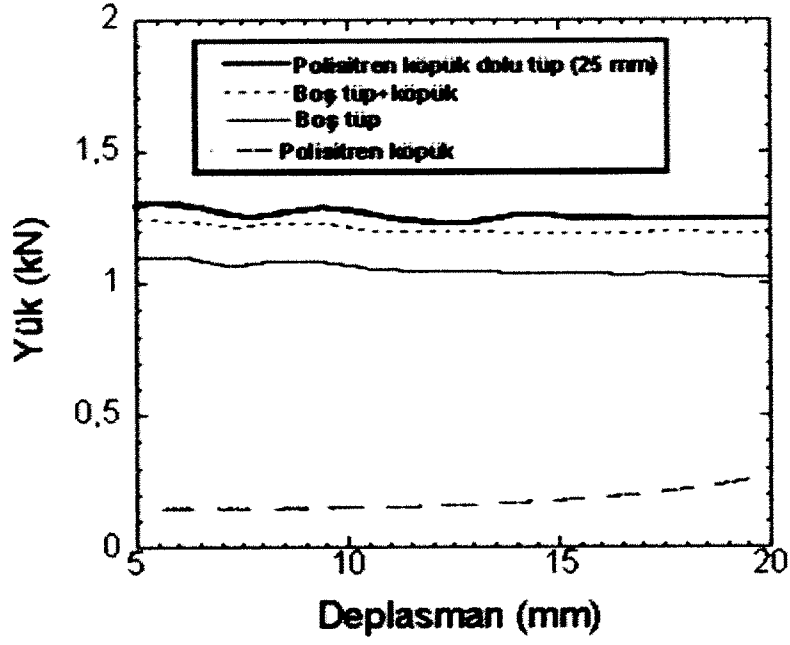


(a)

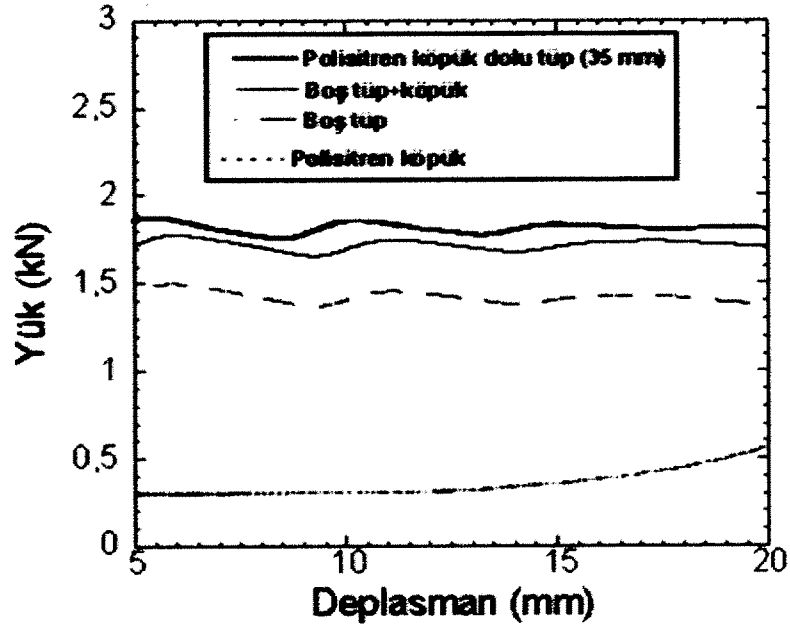


(b)

Şekil 2.18 Polistiren köpük ($0,0321 \text{ g cm}^{-3}$) dolu tüplerin yük-deplasman grafikleri: a) 25 mm ve b) 35 mm Al tüp.



(a)



(b)

Şekil 2.19 Polistiren köpük dolu tüplerin ortalama yüklerinin boş tüp ve köpük ile karşılaştırılması a) 25 mm ve b) 35 mm Al tüp.

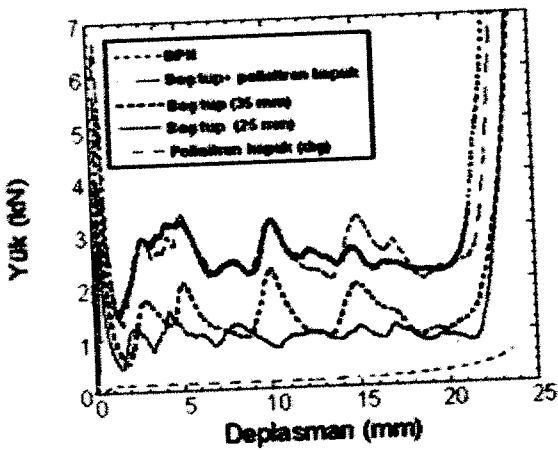
Tablo 2.3 Tek tüplerin basma test sonuçları.

Test Kodu	Tüp		Köpük			Köpük dolu tüp özellikleri			
	Tüp çap (mm)	Tüp kalınlık (mm)	Köpük	Yoğunluk (g cm ⁻³)	Ortalama plato gerilmesi (MPa)	Mak. yük (kN)	Ort. yük (kN)	Toplam Katlanma sayısı	Mod
AFF-1	25	0,29	A	0,288	1,24	2,5516	2,2655	6	simetrik
AFF-2	25	0,29	A	0,2714	1,24	2,4531	2,0409	6	simetrik
AFF-3	25	0,29	A	0,3262	1,96	3,3516	2,699	6	simetrik
AFF-4	25	0,29	A	0,2962	1,24	2,8203	2,4126	6	simetrik
AFF-5	25	0,29	A	0,3633	1,96	3,3672	2,743	6	simetrik
AFF-6	25	0,29	A	0,3836	1,96	3,4297	2,9918	6-7	simetrik
AFF-7	25	0,29	A	0,3469	1,96	3,8359	3,0955	6	simetrik
AFF-8	25	0,29	A	0,2669	1,24	2,0234	1,85	5-6	simetrik
AFF-9	25	0,29	A	0,4353	2,44	3,8125	3,2988	6	simetrik
AFF-10	25	0,29	A	0,4414	2,44	4,6172	3,8594	6	simetrik
AFF-11	25	0,29	A	0,3679	1,96	2,6328	2,1533	6	simetrik
AFF-12	25	0,29	A	0,3882	2,44	3,7187	3,4195	5-6	simetrik
PFF1-1	25	0,29	P	0,0321	0,32	1,7281	1,2462	5-6	karışık
PFF2-1	25	0,29	P	0,0321	0,32	1,2313	1,0170	4	karışık
PFF3-1	25	0,29	P	0,0321	0,32	1,6297	1,2609	4	karışık
PFF4-1	25	0,29	P	0,0321	0,32	1,6263	1,1788	4-5	karışık
PFF5-1	25	0,29	P	0,0321	0,32	1,4875	1,1694	4	karışık
PFF6-1	25	0,29	P	0,0321	0,32	1,5297	1,0891	4-5	karışık
PFF1-2	35	0,35	P	0,0321	0,32	2,3797	1,8544	5	karışık
PFF2-2	35	0,35	P	0,0321	0,32	2,13	1,5586	4	karışık
PFF3-2	35	0,35	P	0,0321	0,32	2,6688	1,8368	5	karışık
PFF4-2	35	0,35	P	0,0321	0,32	2,75	1,7778	5	karışık
PFF6-2	35	0,35	P	0,0321	0,32	1,4766	1,6681	4	karışık
PFF7-2	35	0,35	P	0,0321	0,32	2,4687	1,2789	5	karışık
PFF8-2	35	0,35	P	0,0321	0,32	2,1328	1,8544	4	karışık

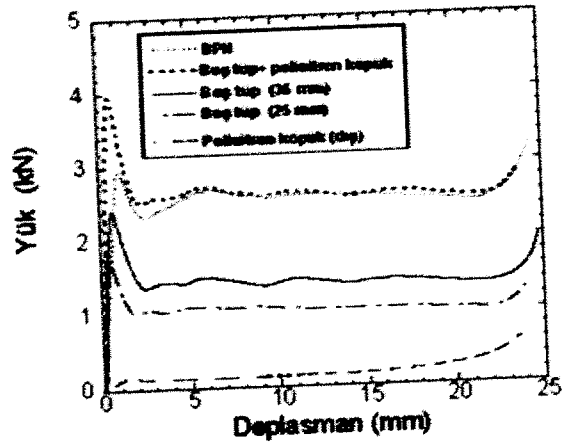
2.5 Alüminyum ve polisitren köpük dolu alüminyum ikili tüplerin ezilme davranışları

İki tüpün iç içe geçmesinden oluşan üç farklı geometri belirlenmiş ve bu geometrilerin basma özellikleri incelenmiştir. Geometriler Kısım 1'de sırası ile şöyle kodlanmıştır: BPH (iç:boş, dış: polisitren köpük), BPP (iç: polisitren köpük, dış:polisitren köpük) ve BPA (iç: Al köpük, dış: polisitren köpük). BPH numunelerin tipik yük ve ortalama yük-deplasman eğrileri Şekil 2.20(a) ve (b)'de verilmiştir. BPH numunelerinde (35 mm çaplı dış tüp ve 25 mm çaplı iç tüp), Şekil 2.21'de gösterildiği gibi deformasyon modu elmadır. BPP numunelerinde, yük ve ortalama yük-deplasman eğrilerinde boş tüp+köpüğe göre bir artış gözlenmektedir (Şekil 2.22). Bu numunelerde, 35 mm çaplı dış tüp elmas modda deforme

olurken, 25 mm'lik iç tüp simetrik deformasyona uğramaktadır. BPA numunelerinde, köpük dolgusunun yük değerlerinin köpük+boş tüpün yük değerlerinin üstüne çıkmasında etkin olduğu Şekil 2.24 (a) ve (b)'de açıkça görülmektedir. BPP numunelerindeki gibi, BPA numunelerinde dış tüp elmas, iç tüp ise simetrik deformasyona uğramıştır (Şekil 2.25). Tablo 2.4'de test edilen ikili tüplerin geometrik ve ezilme parametreleri listelenmiştir.

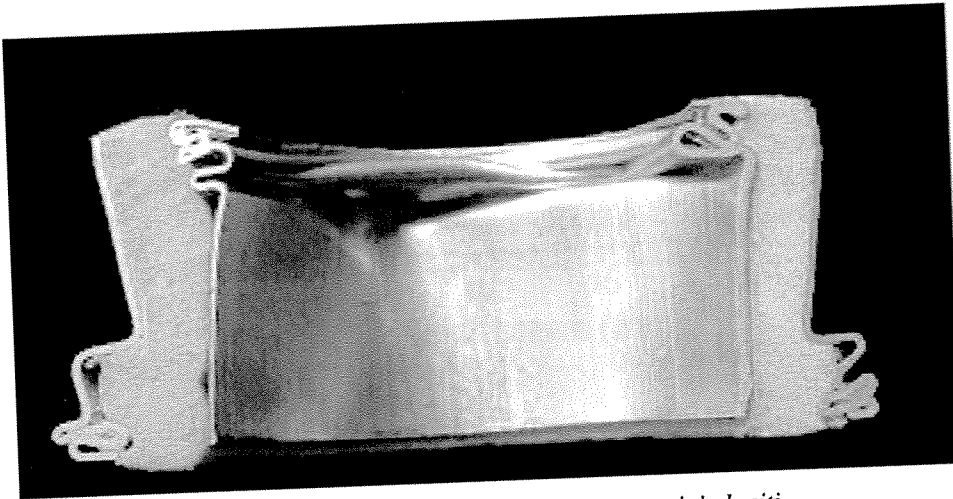


(a)

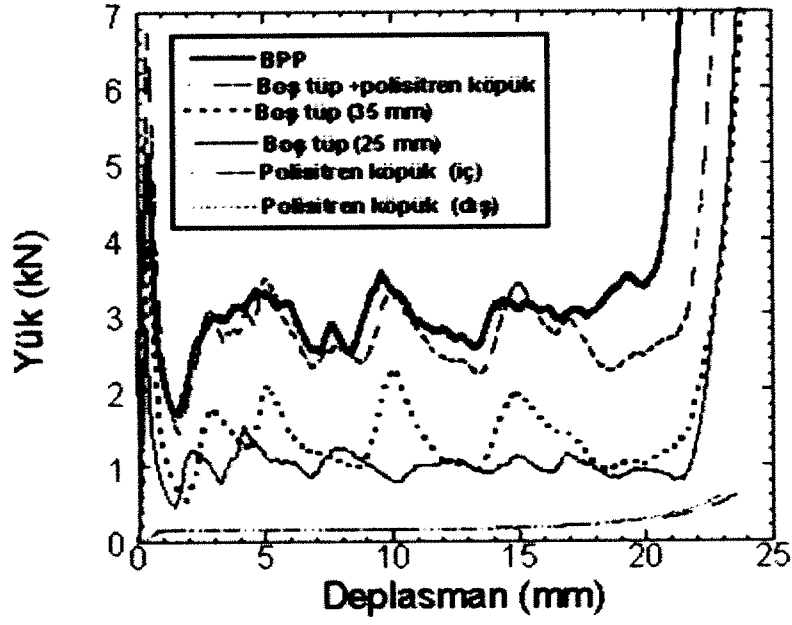


(b)

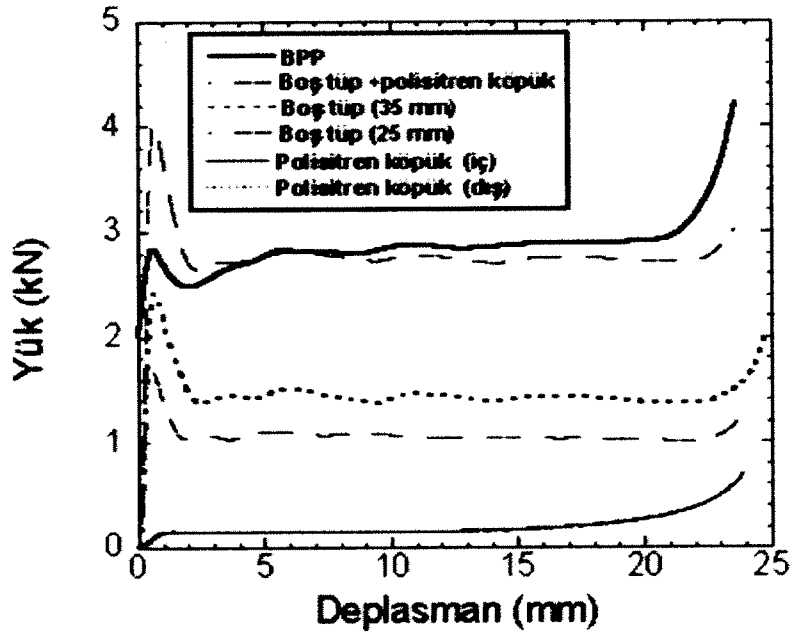
Şekil 2.20 BPH numunelerin tipik (a) yük-deplasman ve (b) ortalama yük-deplasman grafikleri.



Şekil 2.21 Deforme olmuş BPH numunesinin kesiti.

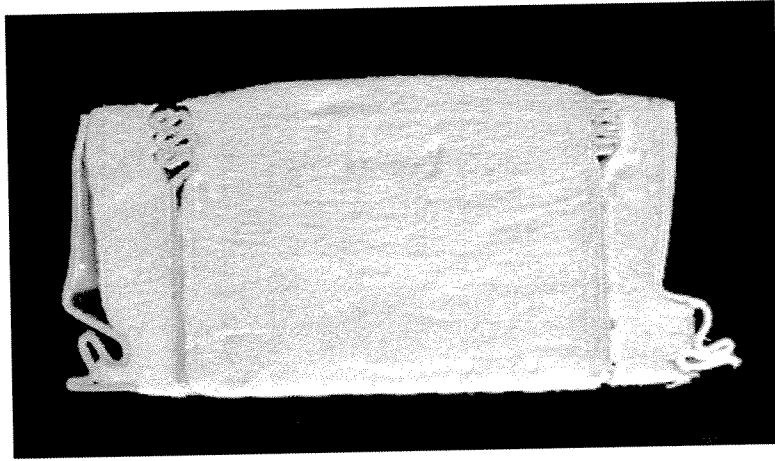


(a)

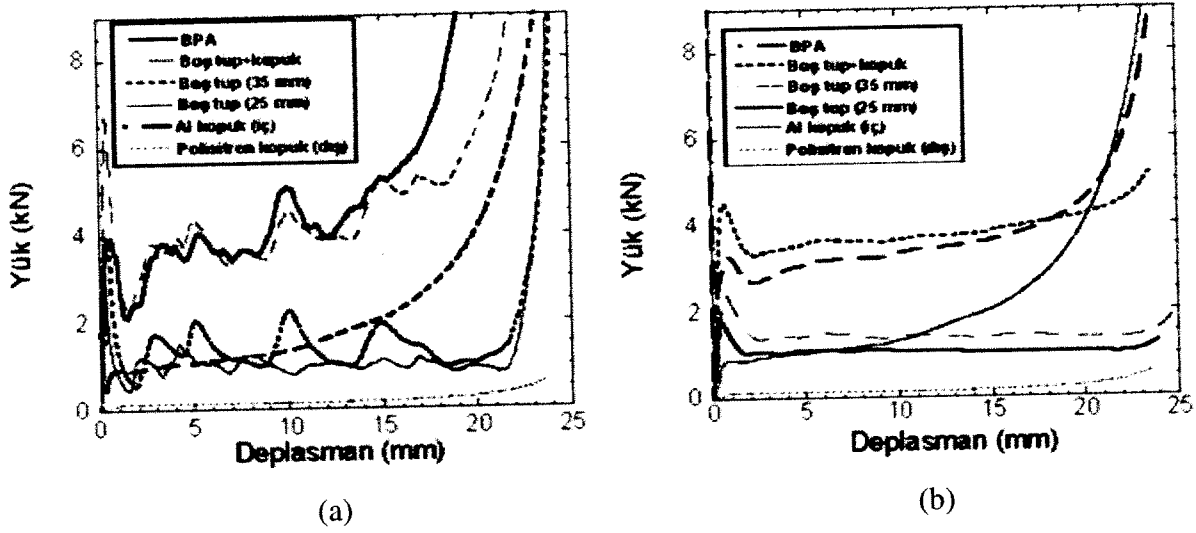


(b)

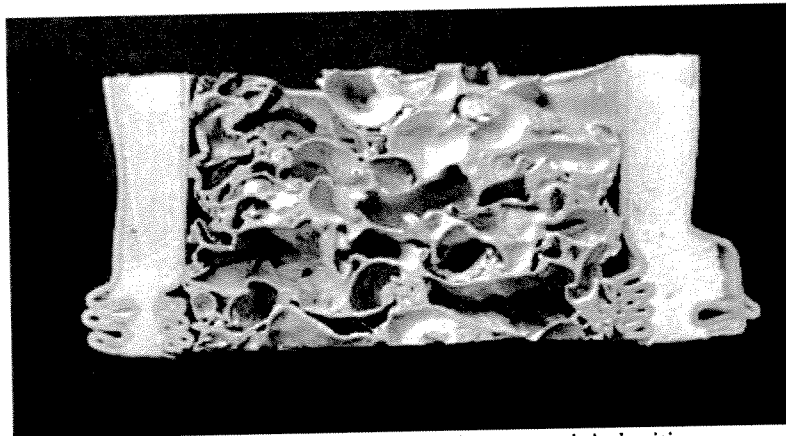
Şekil 2.22 BPP numunelerin tipik (a) yük-deplasman ve (b) ortalama yük-deplasman grafikleri.



Şekil 2.23 Deforme olmuş BPP numunesinin kesiti.



Şekil 2.24 BPA numunelerin tipik (a) yük-deplasman ve (b) ortalama yük-deplasman grafikleri.



Şekil 2.25 Deforme olmuş BPA numunesinin kesiti.

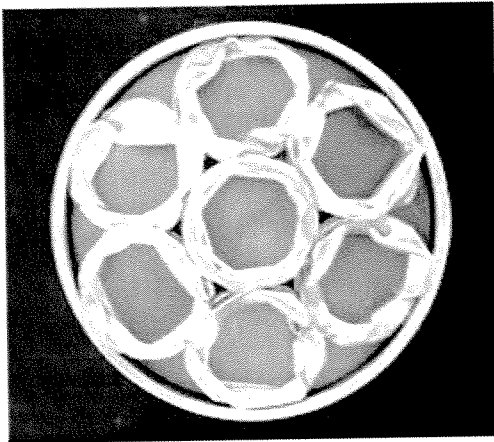
Tablo 2.4 İkili tüplerin geometrik ve ezilme özellikleri.

Test kodu	Köpük						Köpük dolu ikili tüpler			
	Köpük	Yoğunluk (g cm ⁻³)	Ortalama plato gerilmesi (MPa)	-			Mak. yük (kN)	Ort. yük (kN)	Katlanma sayısı	Mod (iç/dış)
				İç	Dış	Köpük				
BPA1	A	0,35	1,96	P	0,0321	0,32	4,5	3,743	4	S/E
BPA3	A	0,32	1,96	P	0,0321	0,32	5,17	4,053	4	S/E
BPA4	A	0,33	1,96	P	0,0321	0,32	5,27	3,588	4	S/E
BPP2	P	0,0321	0,32	P	0,0321	0,32	3,55	2,979	4	S/E
BPP3	P	0,0321	0,32	P	0,0321	0,32	3,54	2,973	4-5	S/E
BPP4	P	0,0321	0,32	P	0,0321	0,32	3,49	2,944	4	S/E
BPH1	-	-	-	P	0,0321	0,32	3,38	2,64	4	E/E
BPH3	-	-	-	P	0,0321	0,32	3,21	2,51	4	E/E
BPH4	-	-	-	P	0,0321	0,32	3,28	2,535	4	E/E

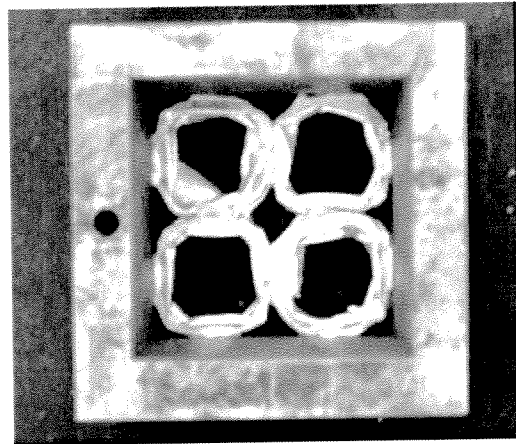
E: Elmas, S: Simetrik,

2.6 Altıgen ve kübik paketli alüminyum boş ve alüminyum köpük dolu çoklu tüplerin ezilme davranışları

Altıgen ve kübik paketli boş tüplerde de tekli boş tüplerde olduğu gibi deformasyon elmas modda oluşmaktadır (Şekil 2.26(a) ve (b)). Al köpük dolu çoklu geometrilerde ise, köpük dolu tekli tüplerde olduğu gibi deformasyon simetrik modda oluşmaktadır (Şekil 2.27(a-d)).

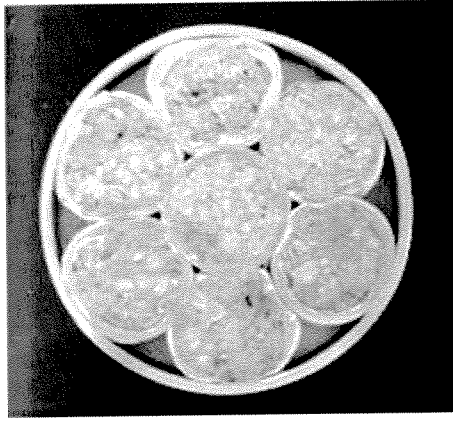


(a)

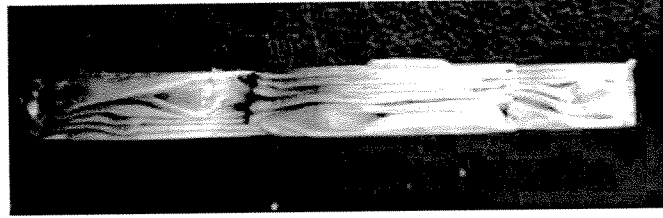


(b)

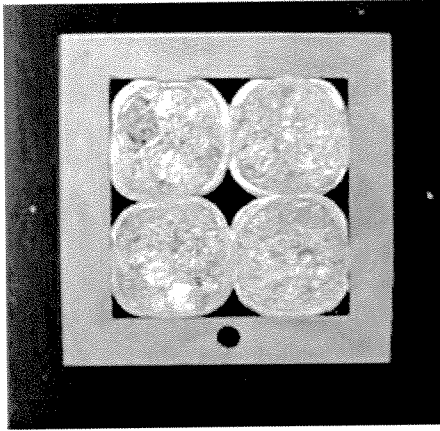
Şekil 2.26 Ezilen çoklu boş tüpler: (a) altıgen paket (MHE) ve (b) kübik paket (MCE).



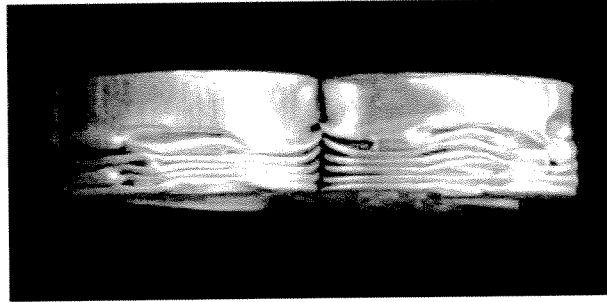
(a)



(b)



(c)

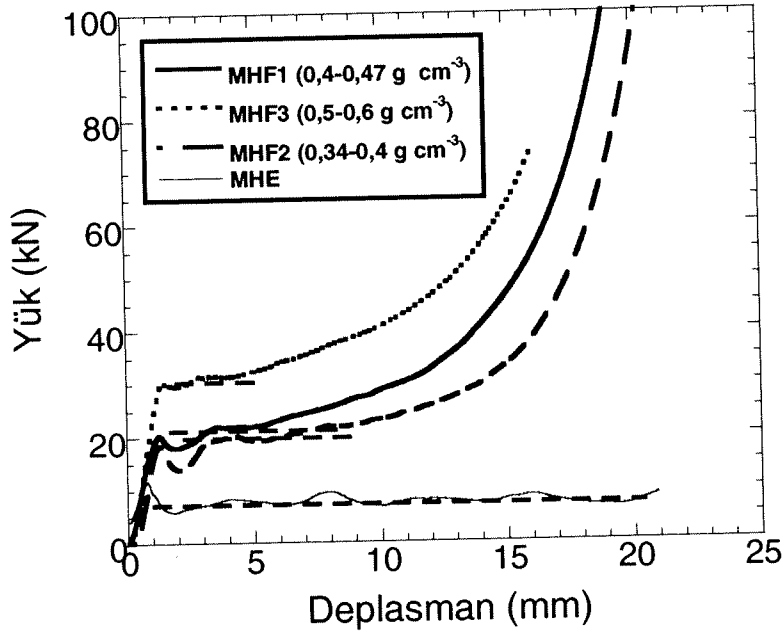


(d)

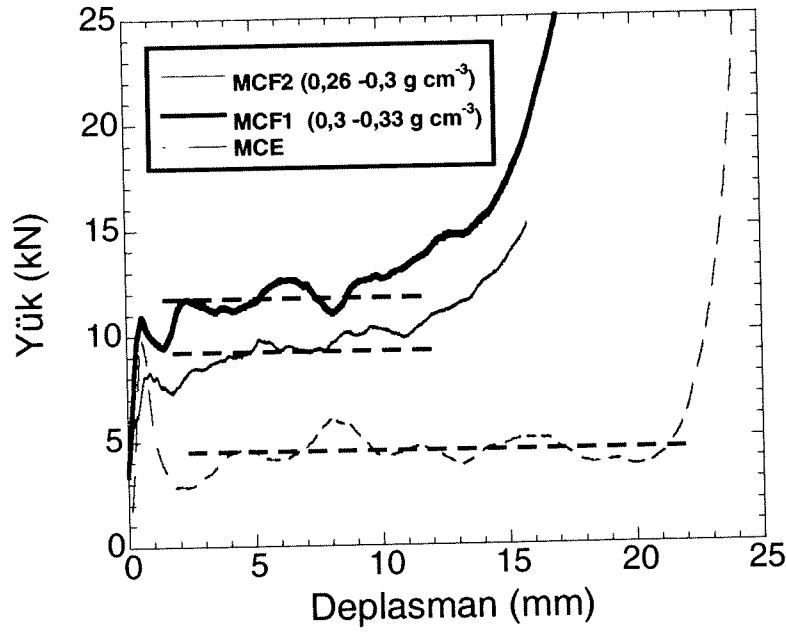
Şekil 2.27 Ezilen Al köpük çoklu tüpler, altıgen paket (MHF) üstten (a) ve kenardan (b) görünüş ve kübik paket (MCF) üstten (c) ve kenardan (d) görünüş.

Altıgen ve kübik paketli boş ve köpük dolu tüplerin tipik yük-deplasman grafikleri Şekil 2.28(a) ve (b)'de gösterilmektedir. Bu grafiklerdeki noktalı çizgiler ortalama ezilme yükünü göstermektedir. Grafiklerde açıkça görüldüğü üzere Al köpüğün yoğunluğu arttıkça yük değerleri de artmaktadır. Çoklu tüplerde ortalama yük değerleri daha önceden belirtilen artan köpük plato gerilmesi nedeni ile sadece 3 ve 20 mm deplasmanları arasında hesaplanmıştır. Köpük dolu ve boş altıgen ve kübik çoklu tüp paketleme geometrilerinin ezilme özellikleri sırasıyla Tablo 2.5 ve 2.6'da listelenmiştir. Şekil 2.29(a) ve (b)'de yedi ve dört adet boş tüpün toplam yük değerleri altıgen ve kübik paketli çoklu tüplerin yük değerleriyle birlikte kıyaslama amacı ile gösterilmektedir. Her iki boş tüp paketleme yapılarında, MHE ve MCE, ölçülen ortalama ezilme değerleri boş tüplerin ezilme yüklerinin toplamından (tüp sayısı ile tekli boş tüp ortalama ezilme yükü değeri çarpımı) daha yüksektir (Şekil 2.29(a) ve (b)). Ortalama ezilme yükü değerindeki artış MHE'de 0,92 kN, MCE'de ise 0.4 kN bulunmuştur. Çoklu tüp paketlerin ortalama ezilme yüklerindeki artış tüp duvarları ve tüp ve test aparatı

duvarları arasındaki sürtünme kuvveti ve engelleme etkisinin basit bir sonucudur. MHE tasarımında ise tüp duvarları arasındaki kontak alanının daha büyük olmasından dolayı bu etki daha yüksektir.



(a)



(b)

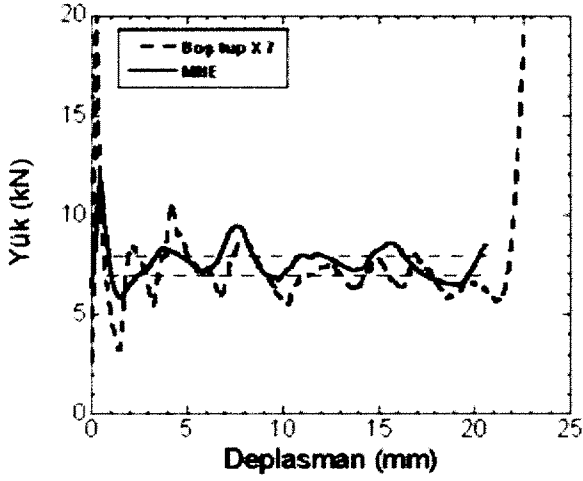
Şekil 2.28 Çoklu tüp paketlerin yük-deplasman grafikleri: (a) boş ve köpük dolu altıgen paket ve (b) boş ve köpük dolu kübik paket.

Tablo 2.5 Altıgen paket tüplerin ezilme özellikleri.

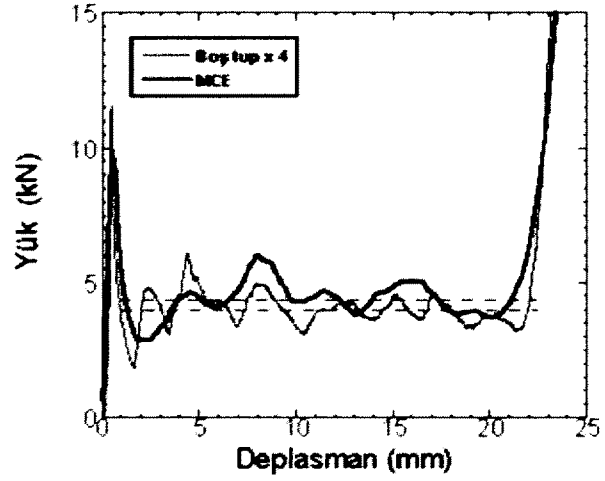
Test Kodu	Köpük yoğunluğu (g cm ⁻³)	Mak. yük (kN)	Ortalama Yük (kN)	Katlanma sayısı	Mod
MHF1	0,4 - 0,47	30,375	24,818	6-7	Simetrik
MHF2	0,34 - 0,4	24,508	21,117	6-7	Simetrik
MHF3	0,5 - 0,6	34,633	31,772	6-7	Simetrik
MHE1	0	9,1922	8,3278	4-5	Elmas
MHE2	0	9,45	7,7298	4-5	Elmas
MHE3	0	9,0766	7,5645	4-5	Elmas

Tablo 2.6 Kübik paket tüplerin ezilme özellikleri.

Test Kodu	Köpük yoğunluğu (g cm ⁻³)	Mak. yük (kN)	Ortalama Yük (kN)	Katlanma sayısı	Mod
MCF1	0,30 - 0,33	12,914	11,936	7-8	Simetrik
MCF2	0,28 - 0,30	10,359	9,4794	6-7	Simetrik
MCE1	-	6,14	4,4428	4-5	Elmas
MCE2	-	6,04	4,4699	5	Elmas
MCE3	-	5,71	4,1805	4-5	Elmas



(a)



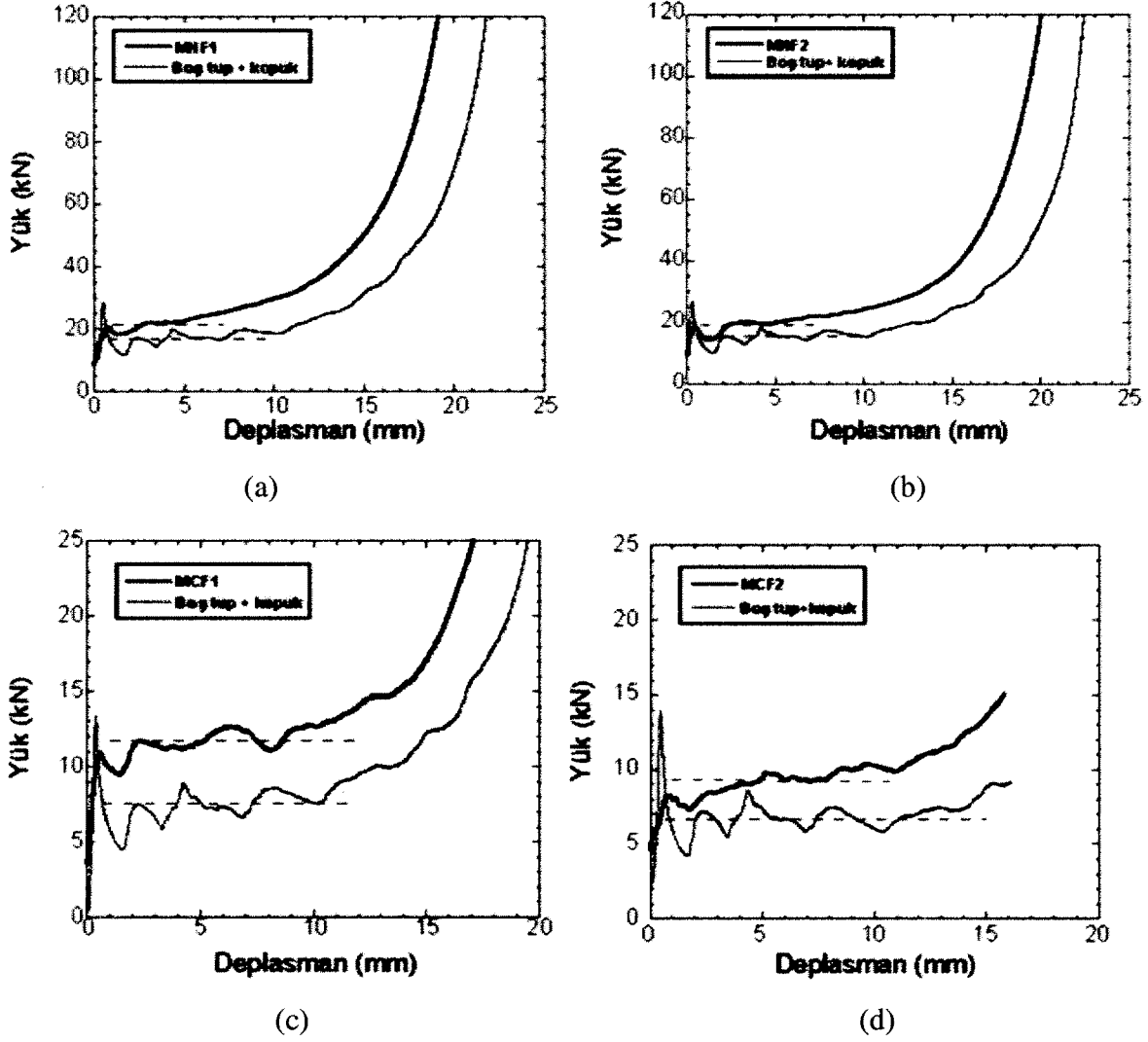
(b)

Şekil 2.29 Boş tüplerin yük toplamlarının paketlenmiş tüplerin yükleriyle karşılaştırılması: (a) altıgen paket (MHE) ve (b) kübik paketleme (MCE).

Al köpük dolu çoklu tüp paketlerinde yük değerleri boş tüp+köpük yük değerlerinden daha yüksektir (Şekil 2.30(a-d)). Bu ise etkileşim etkisini açıkça göstermektedir. Köpük dolu çoklu tüp paketlerinde toplam ezilme yükleri (a) boş tüp ezilme yüklerinin toplamı (MHF için boş tüp ortalama ezilme yükünün 7 katı, MCF için boş tüp ortalama ezilme yükünün 4 katı), (b) köpük plato gerilmelerinin toplamı (MHF için tek köpüğün plato gerilmesinin 7 katı, MCF için tek köpüğün plato gerilme değerinin 4 katı), (c) köpük dolu tüplerde oluşan güçlenme etkisi (MHF için tek köpük dolu tüpün güçlendirme etkisinin 7 katı, MCF için tek köpük dolu tüpün güçlendirme etkisinin 4 katı) ve (d) tüp duvarları arası ve tüpler ile test aparatı duvarları arasındaki sürtünme kuvveti ve kalıbın yatay deformasyonu kısıtlama etkisidir. Tekli köpük dolu tüpün güçlenme etkisi köpüğün plato gerilmesi değerinin yaklaşık 1.7 katıdır (kısım 2.5'e bakınız). Tüpler ve kalıp duvarı arasındaki sürtünme kuvvetleri ve kalıbın kısıtlama etkisi, köpük dolu çoklu tüp geometrilerinin ortalama ezilme yükünden a, b ve c katkılarını çıkararak hesaplanmış ve Tablo 2.7'de gösterilmiştir. Sürtünme ve kalıbın kısıtlama etkisinin her iki tasarımında da köpük yoğunluğu arttıkça artması Tablo 2.7'de açıkça görülmektedir.

Tablo 2.7 Çoklu tüplerde ortalama yükleri etkileyen yükler.

Paketleme	Test kodu	Boş tüplerin ortalama yüklerinin toplamı (kN)	Köpüklerin plato yüklerinin toplamı (kN)	Tek tüplerin güçlendirme etkilerinin toplamı (kN)	Sürtünme kuvveti (kN)	Ortalama ezilme yükü (kN)
Altıgen	MHF1	6,9514	8,8361	7,304	1,7265	24,818
	MHF2	6,9514	7,182	6,0307	0,9529	21,117
	MHE	6,9514	-	-	0,9226	7,874
Küçük	MCF1	3,972	2,856	3,968	1,341	11,936
	MCF2	3,972	2,441	1,795	1,271	9,4794
	MCE	3,972	-	-	0,3924	4,3644



Şekil 2.30 Çoklu tüplerin ezilme yüklerinin boş tüp ve köpüklerin yüklerinin toplamı ile karşılaştırılması: (a) MFH1, (b) MHF2, (c) MCF1 ve (d) MCF2.

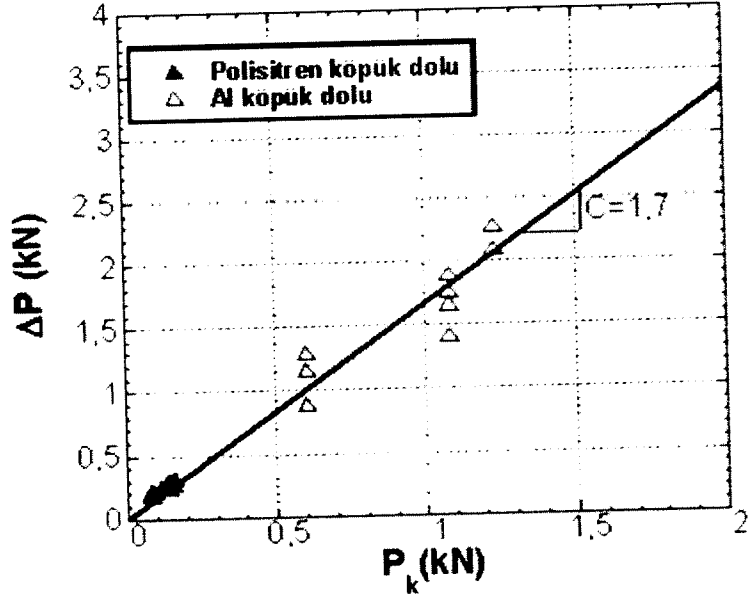
2.7 Köpük dolgusunun güçlendirme etkisi

Köpük dolgusu güçlendirme katsayısı, Denklem 1,27'i düzenleyerek tek dolu tüpler için aşağıdaki gibi gösterilebilir;

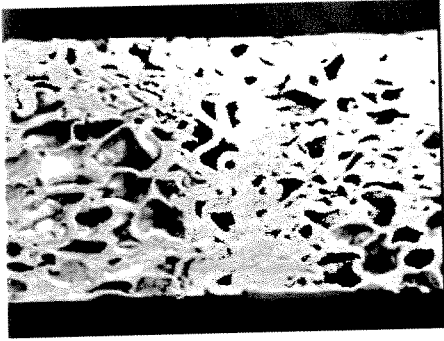
$$C = \frac{P_{a,f} - P_{a,t}}{P_f} \quad (2.3)$$

burada $P_{a,f}$, $P_{a,t}$ ve P_f sırasıyla köpük dolu tüp (tüplerin), boş tek tüp (tüplerin) ve köpüğün plato yükleridir. Tekli köpük dolu tüplerin güçlendirme etkisi köpük dolu tekli tüplerin

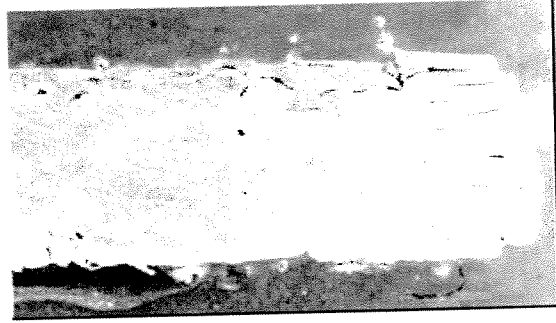
ortalama ezilme yükündeki artışın köpüğün plato yüküne karşılık çizildiği Şekil 2.31'deki grafikten tahmin edilebilir. Köpük dolu tekli tüplerin güçlendirme katsayısı, Şekil 2.31'de ortalama ezilme yükü-köpük plato yük grafiğinin eğimidir ve 1,7 olarak tahmin edilmiştir. Bu değer, daha önce kare alüminyum tüpler için hesaplanan değere (1,8) oldukça yakındır (SANTOSA, 2000). Köpük dolgunun, ikili ve çoklu tüpler için güçlendirme katsayıları, boş tüp ortalama ezilme yükü ve köpük plato kuvvetiyle birlikte Tablo 2.8'de verilmiştir. İkili ve çoklu tüp geometrilerinin güçlenme katsayılarının 1'den büyük olması köpük dolgu ve tüp arasındaki etkileşimi etkisini ispat etmektedir. İkili ve çoklu tüp geometrilerin güçlenme katsayıları aynı zamanda köpük dolu tekli tüplerinkinden yüksektir. Çoklu tüplerde güçlenme katsayısındaki artış tüplerin duvarları ve tüplerin basma aparatı duvarı arasındaki sürtünme kuvvetlerinin ve kalıbın yatay yöndeki deformasyonu engellemesinin sonucudur. İkili tüplerde güçlenme katsayısı çoklu tüplerinkiyle kıyaslanabilir büyüklüktedir. Bundan dolayı iki tasarım da köpük dolu tüplerin güçlendirme katsayılarını artırmak için kullanılabilir. Köpük yoğunluğunun çoklu tüp tasarımlarında etkileşim katsayısını artırdığı bulunmuştur. Bunun bir nedeni ise tüplerin deformasyon sırasında birbirleriyle etkileşimleridir. Çoklu tüplerde tüp duvarlarının katlanmasına köpük dolgusunun gösterdiği direncin yanında Şekil 2.32(a)'da da gösterildiği gibi diğer tüplerin oluşturduğu sınırlamalarda etkili olmaktadır. Tüp duvarı ve basma aparatı duvarı temas bölgesindeki tüm katlanmalar içe doğru yani dolgu malzemesinin içine doğru oluşmakta ve çoklu tüp tasarımlarında ilave güçlenmeye neden olmaktadır (Şekil 2.32(b)). Tekli köpük dolu tüplerle kıyaslandığında (Şekil 2.32(c)) çoklu tüp geometrilerinde katlanma uzunluğu azalmıştır. Çoklu tüp geometrilerin deformasyonu oldukça karmaşıktır ve bir çok değişik deformasyon mekanizması ortalama ezilme yükünü etkilemektedir. Dolayısıyla deformasyon mekanizmalarını ve bu mekanizmaların ortalama ezilme yüküne etkilerini belirlemek için detaylı deneysel ve mikroskobik çalışmalara ihtiyaç vardır.



Şekil 2.31 Etkileşim yüküne karşılık köpük plato yükü.



(a)



(b)



(c)

Şekil 2.32 (a) altıgen tüplerde ezilen komşu tüp duvarları kesiti (b) kübik paketlemede ezilen köpük dolu tüpler ve (c) kübik paketli ezilmiş yapıdan alınan tek tüp.

Tablo 2.8 İkili ve çoklu tüplerde güçlendirme katsayıları.

Kod	Ortalama ezilme yükü (kN)	Boş tüplerin ezilme yükü (kN)	Ortalama köpük plato yükü (kN)	Güçlendirme katsayısı (C)
BPH	2,56	2,243	0,14	2,26
BPP	2,96	2,243	0,29	2,47
BPA	3,79	2,243	0,854	1,81
MHF1 (0,40-0,47 g cm ⁻³)	24,81	7,874	8,836	1,91
MHF2 (0,35-0,40 g cm ⁻³)	21,11	7,874	7,182	1,84
MHF3 (0,5-0,6 g cm ⁻³)	31,77	7,874	10,08	2,37
MCF1 (0,30-0,33 g cm ⁻³)	11,93	4,364	2,856	2,65
MCF2 (0,26-0,30 g cm ⁻³)	9,47	4,364	2,441	2,09

2.8 Tekli, ikili ve çoklu alüminyum tüplerin spesifik enerji emme özellikleri

Al köpük dolu tekli tüplerin SAE'si, 20 mm deplasmana kadar boş tüpünkünden daha düşüktür (Şekil 2.33(a-c)) ve ancak bu deplasmandan sonra köpük doldurmak boş tüpten daha verimli olmaktadır. Bu davranışın temel nedeni deplasmanın artması ile deformasyonla köpük yoğunluğunun ve dolayısı ile ezilme yükünün artmasıdır. Kritik bir tüp ağırlığında sonra köpük doldurmanın boş tüpe göre daha verimli olduğu daha önceden gösterilmiştir (SANTOSA, 1998, TOKSOY, 2004). Kritik tüp ağırlığı boş tüpün tüp duvar kalınlığının artırılması göz önüne alınarak belirlenmelidir. Boş tüpün ortalama ezilme yükünü tahmin etmede tüpün duvar kalınlığının etkisini belirlemek için geliştirilen Alexander (ALEXANDER, 1960) Signace ve diğerleri, (SIGNACE, 1995) ve Wierzbicki ve diğerlerine (WIERZBICKI, 1992) ait denklemler aşağıdaki gibidir:

$$P_a = \sigma_o t^2 \left[8.462 \left(\frac{R}{t} \right)^{1/2} + 1.814 \right] \quad (2.4)$$

$$P_a = \sigma_o t^2 \left[7.874 \left(\frac{R}{t} \right)^{1/2} + 1.408 \right] \quad (2.5)$$

$$P_a = 11.22\sigma_o t^2 \left(\frac{R}{t}\right)^{1/2} \quad (2.6)$$

Köpük plato gerilmesi (σ_{pl}) aşağıdaki denkleme uydurulmuştur;

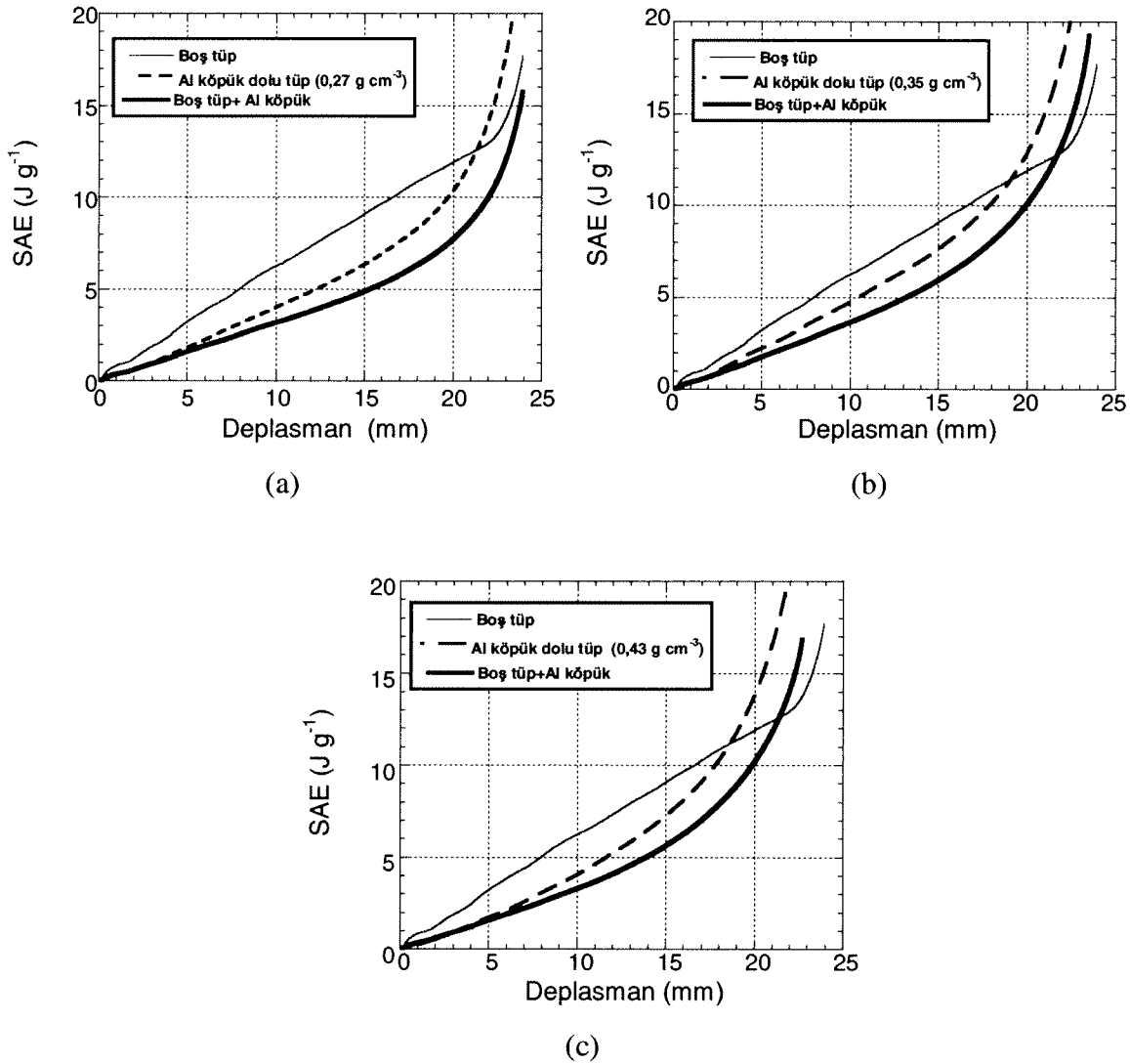
$$\sigma_{pl}^* = K\rho^n \quad (\text{MPa}) \quad (2.7)$$

burada K ve n sabittir. Köpük yoğunluğu (ρ) g cm^{-3} alındığında K ve n'nin değerleri sırasıyla ~8,63 (MPa) ve ~1,47 bulunmuştur.

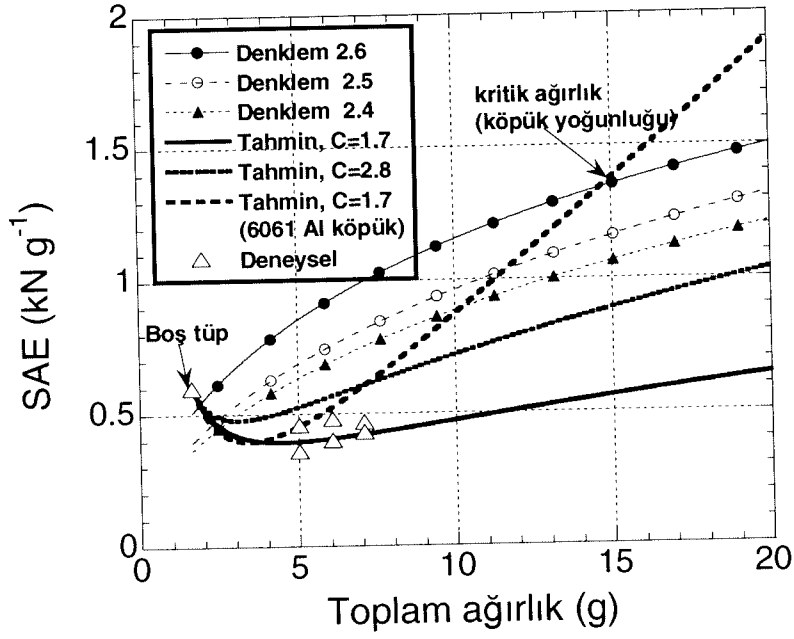
Tüp malzemesi σ_o değeri çekme testleri sonucunda 141 MPa bulunmuştur. Hesaplamalarda tüpün iç yarıçapı sabit 12.21 mm alınmış, kalınlığı ise 0,29 dan 6 mm'e kadar artırılmıştır. Denklem 2.4, 2.5 ve 2.6 kullanılarak toplam tüp ağırlığının fonksiyonu olarak hesaplanan boş tüplerin spesifik enerji emme miktarları Şekil 2.34'deki grafiklerde gösterilmektedir. Test edilen boş tüplerde Denklem 2.6 ile hesaplanan enerji emme miktarları deneysel sonuçlarla oldukça iyi uyum göstermektedir. Bu yüzden Al köpük dolu tüplerin enerji emme değerleri Denklem 2.6 kullanılarak hesaplanmıştır. Yapıştırıcı kullanılarak gerçekleştirilen köpük doldurma işlemi etkileşim etkisinin seviyesini ve dolayısı ile enerji emme miktarını artırmaktadır. Yapıştırıcı kullanımı tüpün enerji emme miktarını iki tür mekanizmayla etkileyebilir: (a) tüp duvar eğilmesine köpüğün gösterdiği direnç ve (b) yapıştırıcının kalkması. Yapıştırıcı kullanımı ile C değerinin 2,8'e ulaştığı bulunmuştur (SANTOSA, 2000). Boş tüplerin ortalama ezilme yükü için Denklem 2.6'ı, Al köpük plato kuvveti için Denklem 2.7'i ve yapıştırıcılı ve yapıştırıcısız durumlara ait C değerleri kullanılarak Al köpük dolu tüplerin enerji emme değerleri hesaplanmış ve Şekil 2.34'de gösterildiği gibi toplam ağırlık cinsinin bir fonksiyonu olarak çizilmiştir. Şekil 2.34'de SAE değerleri ortalama yükün ağırlığa bölümü (KN g^{-1}) olarak gösterilmektedir. Araştırılan duvar kalınlığı sınırları dahilinde yapıştırıcı ve yapıştırıcısız durumlar için, köpük dolu tüpler boş tüpün kalınlaştırılması ile mukayese edildiğinde hiçbir toplam ağırlık (yada Al köpük yoğunluğu) daha verimli olmadığı Şekil 2.34'de görülmektedir. Bu kısmen kullanılan Al köpüğün plato yükünün düşüklüğünden kaynaklanmaktadır. Artan plato yükünün enerji emme miktarına olan etkisini tahmin edebilmek için, Denklem 2.7'de kullanılan parametreler daha önceden Toksoy ve diğerleri (TOKSOY, 2004) tarafından incelenen daha kuvvetli bir Al köpükle, 6061 Al (K=22,4 (MPa), ve n=1,99) değiştirildi. 6061 Al köpük dolgu ile yapışkan kullanımı durumunda tahmin edilen enerji emme değerleri Şekil 2.34'de gösterilmektedir. 6061 Al köpük dolguda kritik toplam ağırlık veya köpük yoğunluğu ($0,6 \text{ g cm}^{-3}$) Şekil 2.34'de açıkça

görülmektedir. Bulunan kritik ağırlık köpük dolgu plato yükünün dolu tüplerin verimliliğine olan etkisini göstermektedir. Al köpük dolu tüpler için benzeri bir kritik toplam ağırlık değeri daha öncede bulunmuştur (SANTOSA, 1998, WIERZBICKI, 1992).

Bu çalışmanın deneysel sonuçları köpük dolgusu ile köpük ve boş tüpün toplam enerji emme miktarlarından daha yüksek enerji emilmesine neden olmasına karşın, tüp kalınlığının artırılması ile karşılaştırıldığında her zaman verimli olamayacağını göstermektedir. Bu yüzden, köpük dolgusunu verimli hale getirmek için, köpük dolgusunun güçlendirme katsayısına ve dolgu köpüğün plato yüküne bağlı olarak uygun köpük-tüp kombinasyonun seçilmesi gerekmektedir.

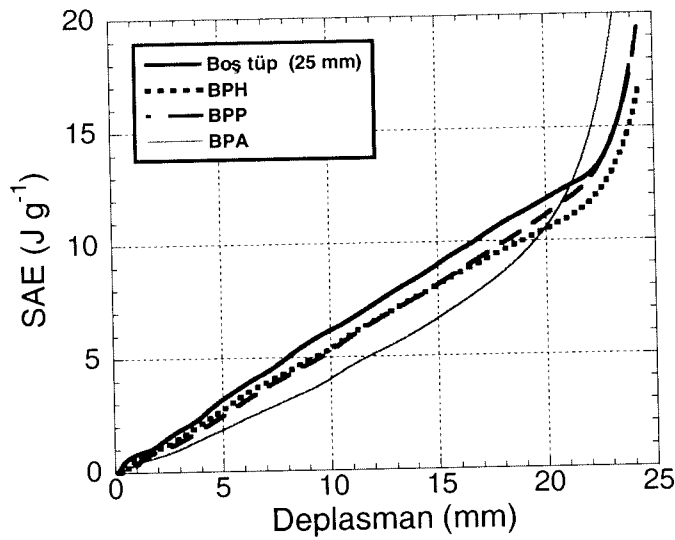


Şekil 2.33 Boş tüp, dolu tüp ve boş tüp+Al köpük enerji emme miktarları, (a) 0,27, (b) 0,35 ve (c) 0,43 g cm⁻³ köpük yoğunlukları.



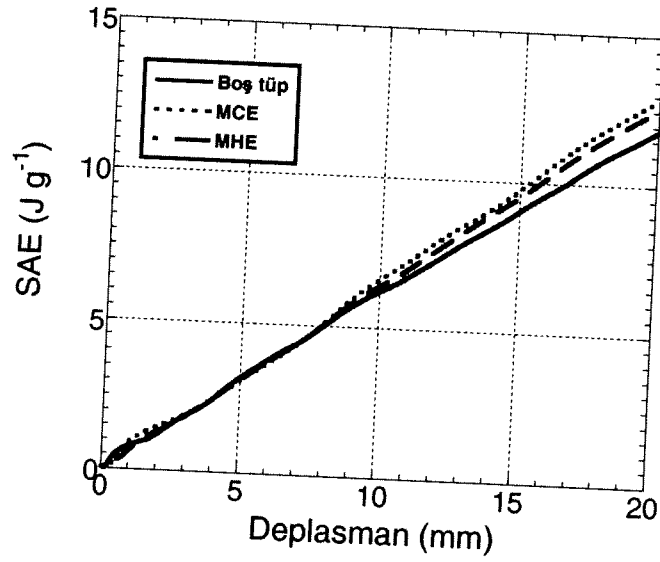
Şekil 2.34 Spesifik enerjinin tüp toplam ağırlığı ile değişimi.

Şekil 2.35’de görüldüğü üzere ikili tüplerin SAE değerleri tekli tüpünkünden daha düşüktür. Kullanılan dolgu köpüğün yoğunluğu SAE değerlerini tekli tüplerin üzerinde artırmakta yetersizdir. Şekil 2.35’de görüldüğü üzere yüksek deplasmanlarda BPA numuneleri Al köpük dolgusunu yoğunluğunun artması nedeni ile artan enerji emme özelliği göstermektedir.

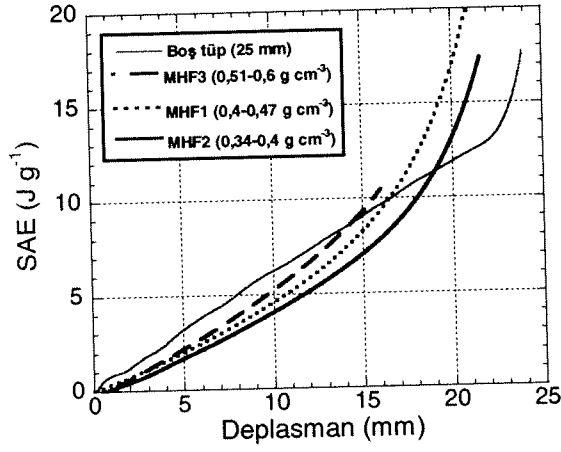


Şekil 2.35 İkili ve boş tüplerde SAE’nin deplasman ile değişimi.

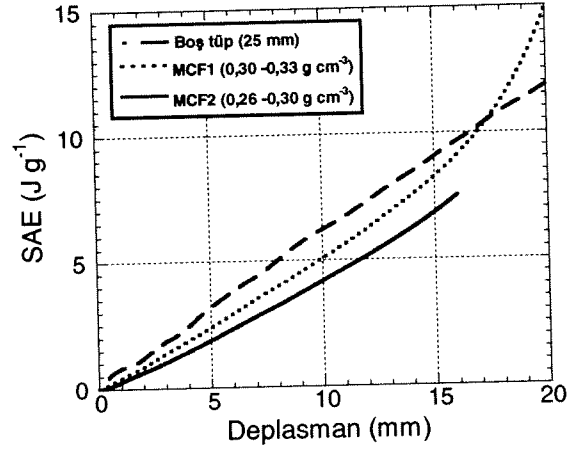
Çoklu boş tüplerin SAE değerleri Şekil 2.36'da gösterildiği gibi, boş tüplerinkinden daha yüksektir. Bu ise tüplerin birbirleri ve basma aparatı duvarı ile oluşturduğu sürtünme kuvvetinin sonucunda oluştuğu düşünülmektedir. MCE kodlu tüplerde SAE değerleri, tüplerle kalıp duvarları arasındaki temas alanlarının geniş olması nedeni ile nispeten daha yüksektir. Çoklu tüplerde köpük dolgusu çoklu tüplerin SAE değerlerini, boş tüplerin SAE değerlerinin üstüne çıkartmakta etkin değildir (Şekil 2.37). Ancak, benzer köpük dolgu yoğunluklarında, tekli köpük dolu tüplere kıyasla, hem altıgen hem de kübik çoklu geometriler daha verimlidir (Şekil 2.38). Aynı zamanda deformasyon arttıkça köpük dolu çoklu geometriler, boş ve köpük dolu tekli tüplere kıyasla daha verimli olmaktadır.



Şekil 2.36 Çoklu ve boş tüplerde SAE'nin deplasman ile değişimi.

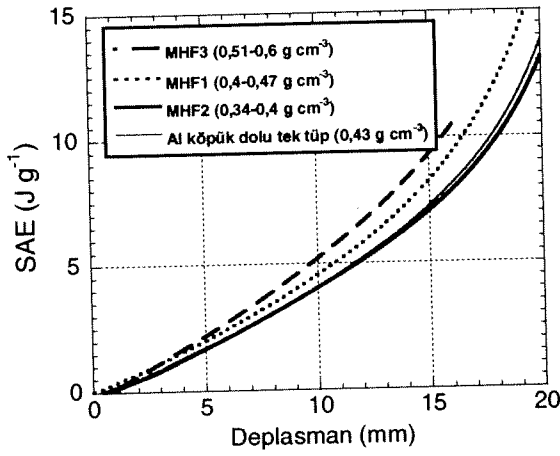


(a)

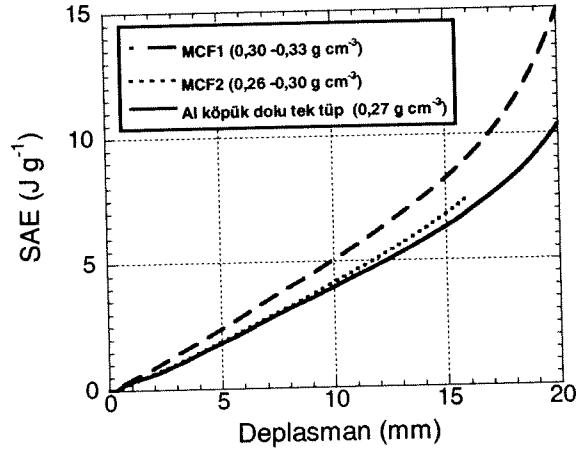


(b)

Şekil 2.37 Çoklu ve boş tüplerde SAE'nin deplasman ile değişimi, (a) altgen ve (b) kübik paket.



(a)



(b)

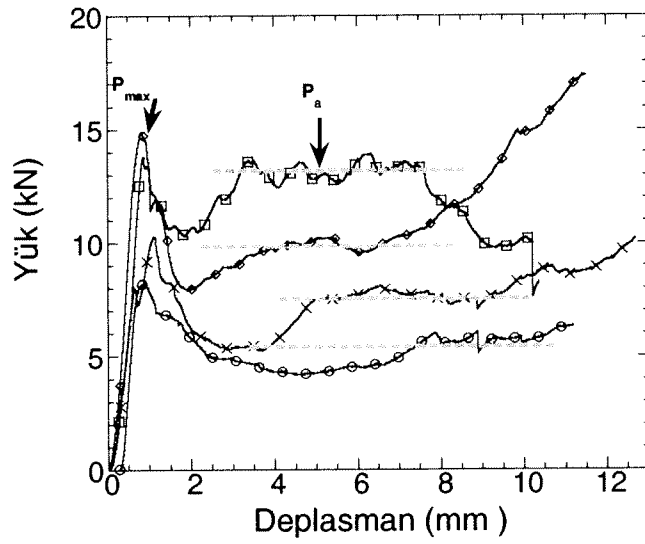
Şekil 2.38 Çoklu dolu tüplerin SAE'lerinin dolu tekli tüp ile karşılaştırılması: (a) altgen ve (b) kübik.

2.9 Boş kompozit tüplerin ezilme davranışları

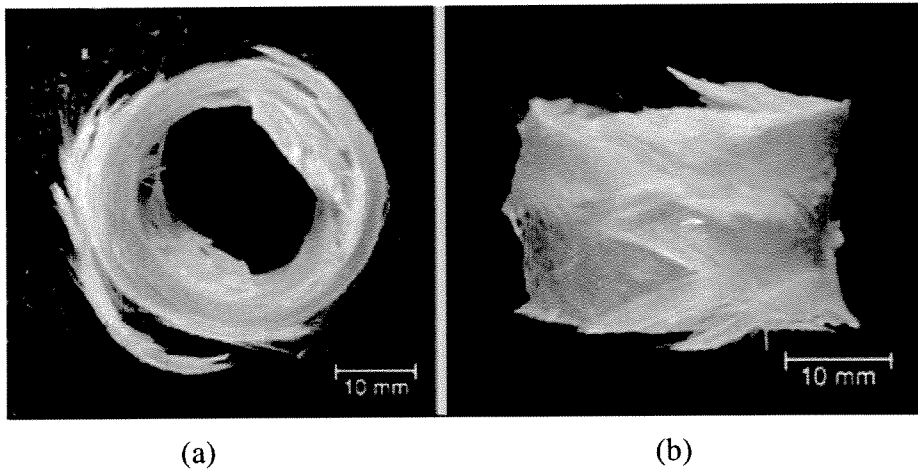
Boş kompozit tüpler üç grupta hazırlanmış ve ezilme testlerine tabii tutulmuşlardır. Bunlar aşağıdaki gibidir:

1. Filament sarma yöntemiyle üretilen tüpler (FW serisi)
2. Tüp sarma yöntemiyle farklı cam kumaşlardan ve farklı kalınlıklarda üretilen kompozit tüpler (TA serisi)
3. Tüp sarma yöntemiyle farklı kalınlıklarda üretilen tüpler (TE)

Filament sarma yöntemiyle hazırlanan sürekli fiber polimerik kompozit tüplere (kalınlık 1-2 mm ve fiber açısı 65°) yapılan dört farklı basma testlerin sonuçları Şekil 2.39'da gösterilmektedir. Bu grafiklerden görüldüğü üzere oluşan ilk maksimum yükü artan ve azalan yük miktarları izlemektedir. Şekil 2.39'da maksimum yük sonrasında ortalama yükler 4,3 ve 13 kN aralığında değişmektedir. Filament sarma yöntemi ile hazırlanan tüpler fiberlerin kalkması ve bükülme ile ilerlemektedir (Şekil 2.40(a) ve (b)). Kalınlıktaki farklılıkların sonucunda ortalama yüklerde oluşan farklılıklar nedeni ile tüp üretimine kumaş sarma metodu devam edilmiştir.



Şekil 2.39 Filament sarma tekniğiyle hazırlanan tüplerin basma test grafikleri (kalınlık 1-2 mm).

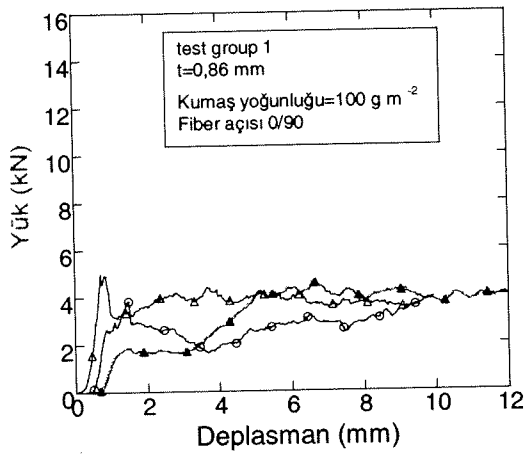


Şekil 2.40 Filament sarma tekniğiyle hazırlanan tüpün ezilme sonrası (a) üstten (fiber ayrışması) ve (b) yandan görüntüleri (bükülme).

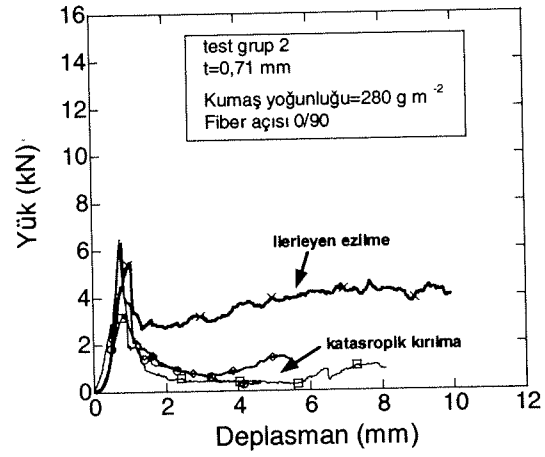
İlk aşamada, kumaş yoğunluğunun ve tüp kalınlığının yük-deplasman grafiklerine etkilerini belirlemek amacı ile kompozit tüp üretiminde iki farklı yoğunluktaki fiber kumaşlar (100 ve 280 g m^{-2}) kullanılmıştır. Hazırlanan tüplerin kumaş yoğunlukları ve et kalınlıkları Tablo 2.9'da listelenmiştir. Tablo 2.9'da gösterildiği üzere farklı et kalınlıklarına sahip dört grupta toplam 16 test numunesi hazırlanmıştır. Bu numunelerin basma test sonuçları Şekil 2.41(a-d)'de sırası ile gösterilmektedir. Bu grafiklerde ve daha sonraki mikroskobik analizler sonucunda iki farklı deformasyon mekanizması bulunmuştur. Bunlar (a) ilerleyen ezilme (Şekil 2.42(a)) ve (b) katastrofik kırılma. Katastrofik kırılma iki yolla oluşmaktadır: (a) basma kayması (Şekil 2.42(b)) ve (b) radyal ve eksensel ayrılmalar (Şekil 2.42(c)). Daha önce Ramakrishna ve Hamada (RAMAKRISHNA, 1998) tarafından belirtildiği üzere katastrofik kırılma maksimum yükten sonra yük değerlerindeki ani düşüşe neden olmaktadır. Maksimum yük sonrası yük değerlerindeki ani düşüş Şekil 2.42(b)'de görülmektedir. Katastrofik kırılma nedeni ile çok az enerji emmektedir. Bu tür ezilmeler daha çok karbon ve cam takviyeli epoksi ve polyester kompozitlerde görülmektedir. Şekil 2.41 kumaş yoğunluğunun tüp kalınlığının ezilme davranışlarına etkilerini de kısmen göstermektedir. Alansal yoğunluğun 100 'den 280 g cm^{-2} 'ye çıkması ile (Şekil 2.41(a) ve (b)) katastrofik kırılma oluşumu artmaktadır. Tüp kalınlığının artması ile (Şekil 2.41(c) ve (d)) ezilme yükleri artmakta ve tüp kalınlığındaki artış aynı zamanda katastrofik kırılma modu oluşumunu da artırmaktadır.

Tablo 2.9 Basma testinde kullanılan kompozit tüplerin kumaş ve et kalınlıkları.

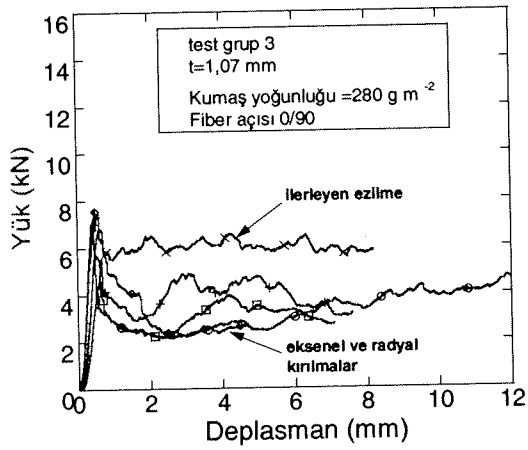
Test kodu	Kumaş yoğunluğu (g m^{-2})	Tüp et kalınlığı (mm)
1	100	0,86
2	280	0,71
3	280	1,07
4	280	1,53



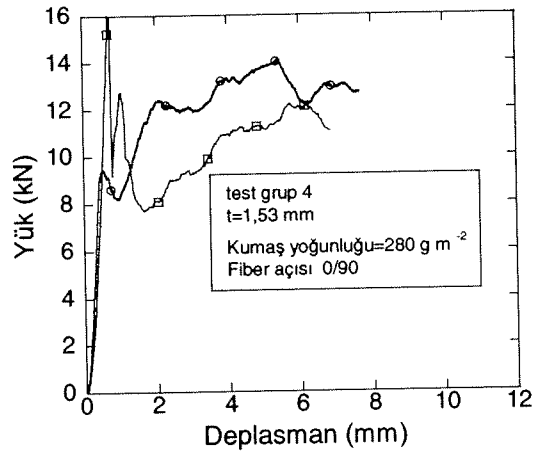
(a)



(b)

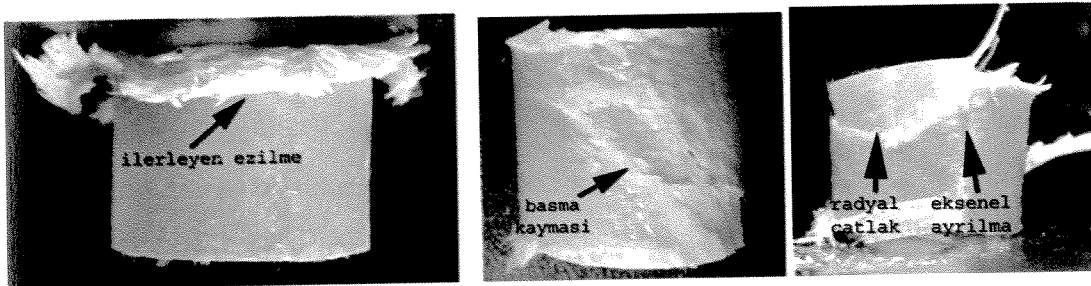


(c)



(d)

Şekil 2.41 [0,90] dokulu cam fiber kumaş kullanılarak hazırlanan farklı kalınlıktaki boş kompozit tüplerin basma testi yük-deplasman grafikleri; kalınlık (a) 0,86, (b)0,71, (c)1,07 ve (d)1,53 mm.



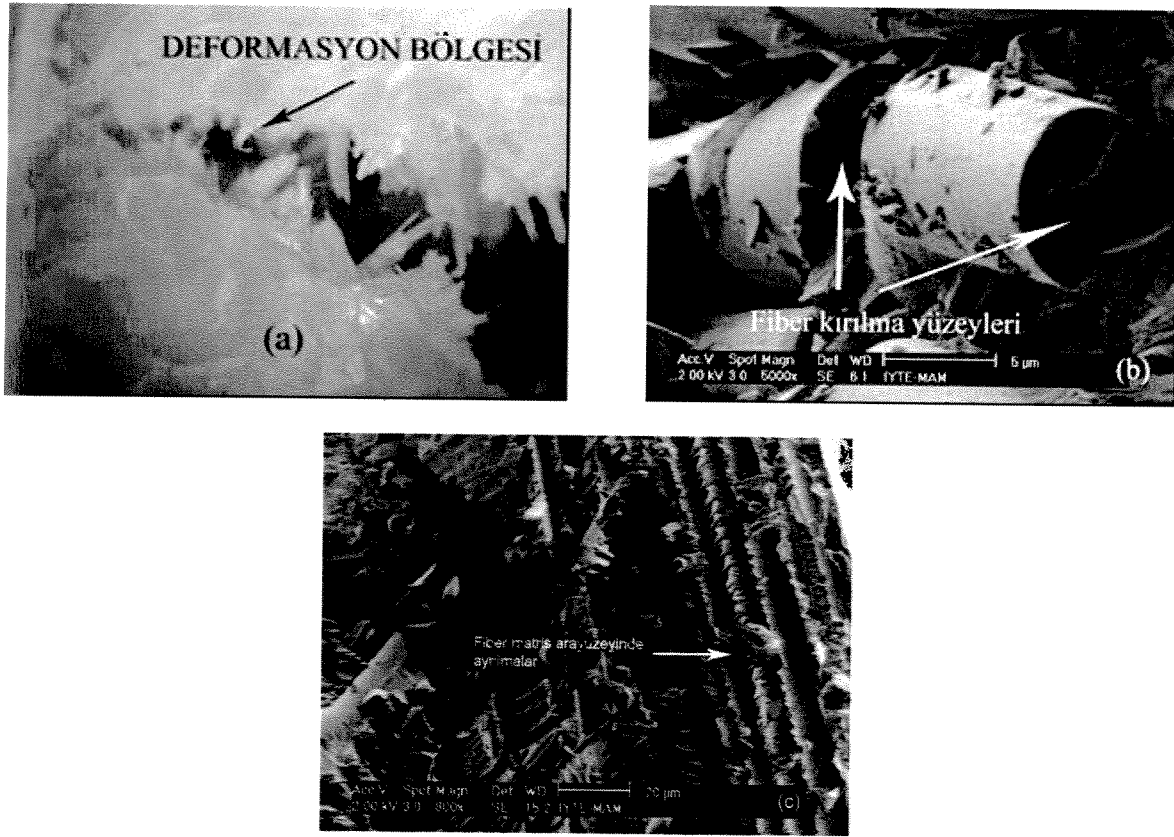
(a)

(b)

(c)

Şekil 2.42 Boş kompozit tüplerin ezilme mekanizmaları a) ilerleyen ezilme, b) basma kayması ve c) radyal ve eksenel ayrılma.

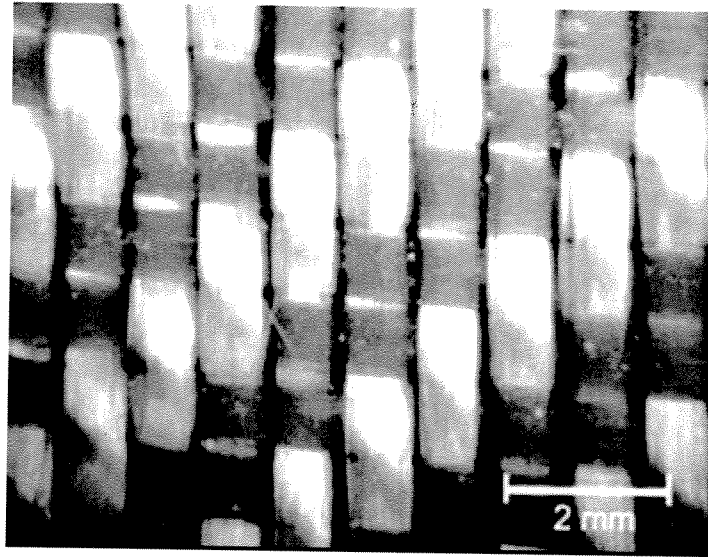
İlerleyen ezilme modunda deformasyon mekanizmaları mikroskobik incelenmiştir. Basma esnasında matris kırılması (Şekil 2.43(a)), fiber kırılması (Şekil 2.43(b)) ve fiber-matris ara yüzeyinde ayrılmalar (Şekil 2.43(c)) oluşmaktadır. Kompozit malzemede mikroskobik boyutta oluşan bu deformasyon mekanizmaları ezilme testi sürecinde soğurduğu enerjinin nedenleridir.



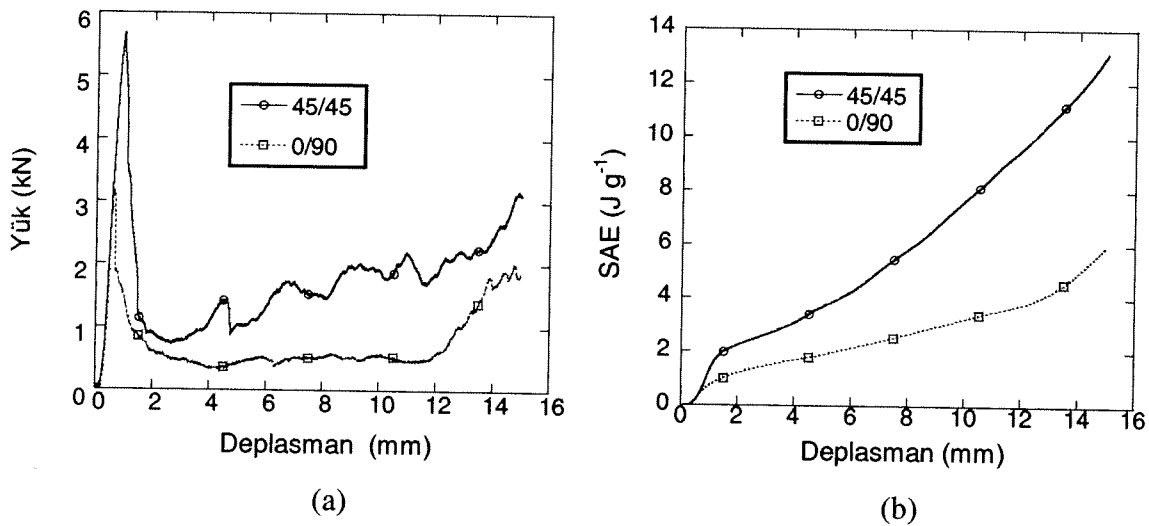
Şekil 2.43 İlerleyen ezilme deformasyon bölgesinde (a) matris kırılması, b) fiber kırılması ve c) matris ve fiber ara yüzeyi ayrılması.

Projenin devamında E-cam 165 g m^{-2} yoğunlukta, [0,90] (2x2 twill) dokulu cam kumaş kullanılarak tüp hazırlanmıştır. E-cam 165 g m^{-2} yoğunlukta kumaş fiber doku yapısı Şekil 2.44'de gösterilmektedir. Bu kumaşla hazırlanan tüplerde fiber açısının ezilme davranışına etkileri incelenmiştir. Ezilme testi eksenine 0/90 ve 45/45 derecelik fiber açılı benzer kalınlıktaki polimerik kompozit tüpler bu amaçla hazırlanmıştır. Bu tüplere ait yük-deplasman ve SAE-deplasman grafikleri sırası ile Şekil 45(a) ve (b)'de gösterilmektedir. Ortalama ezilme yük değerleri 0/90 derece ve 45/45 derece fiber açılı tüpler için sırasıyla 0,63 kN ve 1,65 kN olarak belirlenmiştir. Ortalama ezilme yükü gibi, 45/45 fiber açılı tüplerde SAE

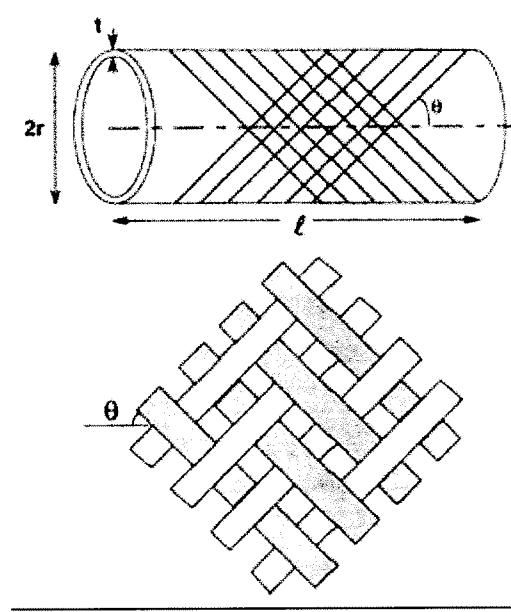
miktarları, 0/90 fiber açılı tüplerden daha yüksektir. 45/45 derecelik fiber açılı tüplerin ortalama ezilme yükleri ve SAE miktarlarının yüksek olması nedeni ile projenin devamında dolu tüplerde kullanılmıştır. Bu tüplerdeki fiber yönü Şekil 2.46'da şematik olarak gösterilmekte olup fiberler tüp eksenine ile 45°'lik açı yapmaktadır.



Şekil 2.44 Polimerik kompozit tüp üretiminde kullanılan 165 g m^{-2} yoğunluktaki E-cam fiber kumaşın dokusu (2x2 twill).

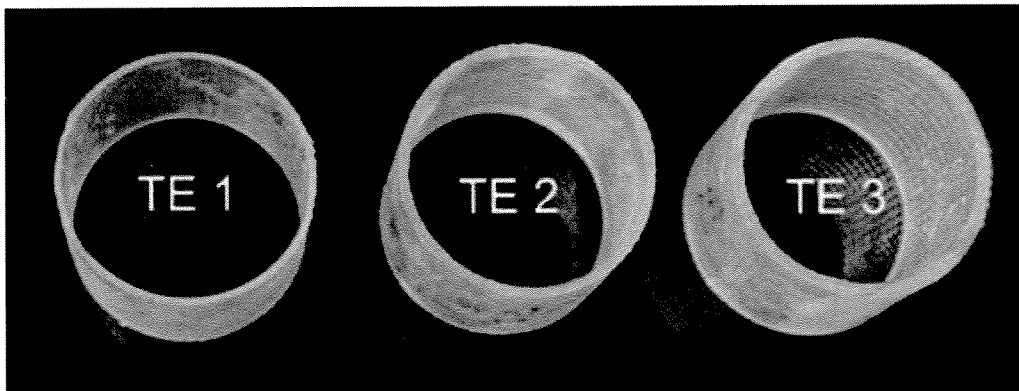


Şekil 2.45 Ezilme eksenine 0/90 ve 45/45 derece açılı kompozit tüplerin a) yük-deplasman ve b) SAE-deplasman grafikleri.



Şekil 2.46 Cam kumaşla üretilen kompozit tüplerde fiberlerin şematik gösterimi.

45/45 fiber açılı kompozit tüplerde et kalınlığının ezilme davranışlarına etkileri incelenmiştir. Bunun için üç farklı ortalama kalınlık değerinde sahip 45/45 fiber açılı kompozit tüpler hazırlanmış ve basma testine tabii tutulmuşlardır. Üç farklı kalınlığa sahip tüpler TE1, TE2 ve TE3 olarak kodlanmış ve bu tüp grupları sırasıyla, ortalama 0,55, 0,82 ve 1,32 mm kalınlığa sahiptir (Şekil 2.47). Tüplerin geometrik özellikleri Tablo 2.10'da sıralanmıştır.



Şekil 2.47 Farklı et kalınlığına sahip kompozit boş tüpler.

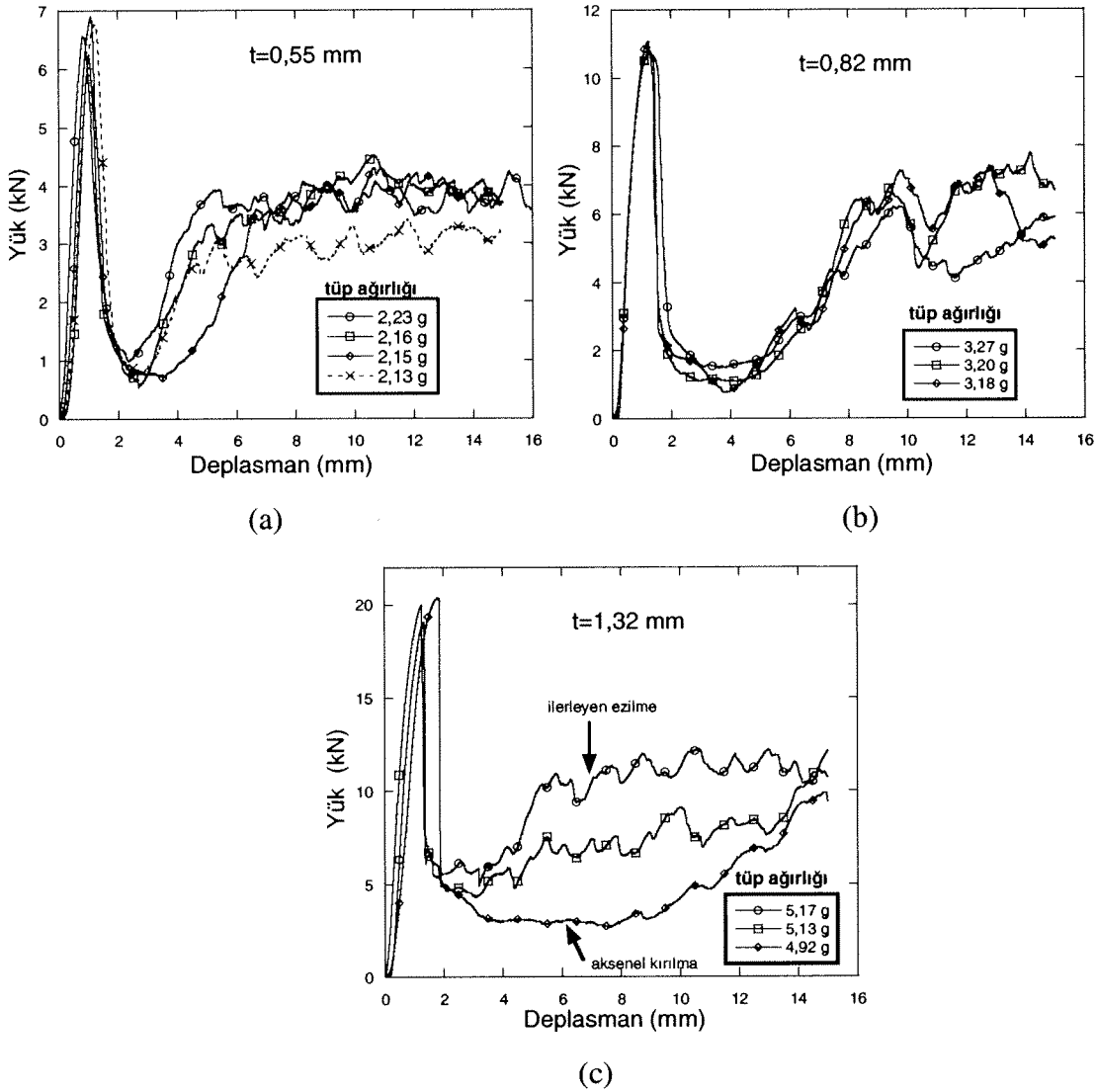
Tablo 2.10 Farklı kalınlıktaki kompozit tüplerin özellikleri.

Test grup	Numune kodu	Kalınlık (mm)	Uzunluk (mm)	Ağırlık (g)	D/t oranı
1	TE1.1	0,62	27	2,15	42,3
	TE1.2	0,53	27	2,09	49,2
	TE1.3	0,49	27	2,16	53,0
	TE1.4	0,41	27	2,13	62,9
	TE1.5	0,59	27	2,23	44,4
2	TE2.1	0,74	27	3,20	35,8
	TE2.2	0,87	27	3,18	30,7
	TE2.3	0,86	27	3,27	31,1
3	TE3.1	1,30	27	5,13	21,2
	TE3.2	1,32	27	5,17	20,9
	TE3.3	1,34	27	4,92	20,7

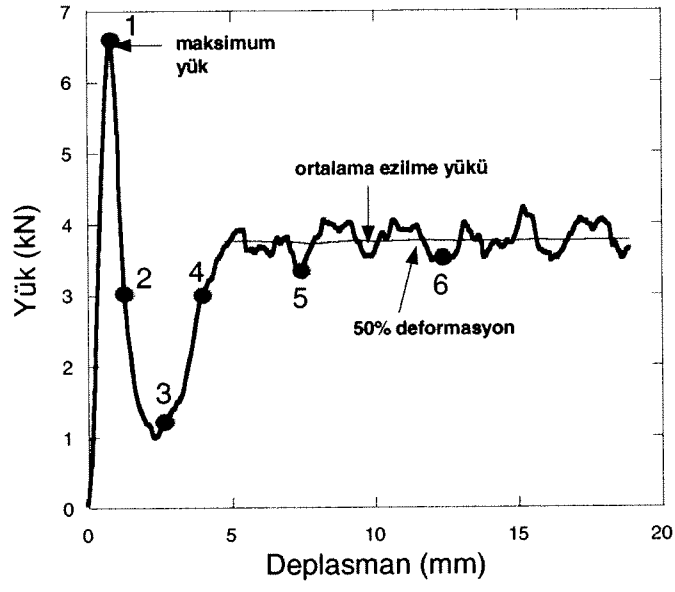
Farklı ortalama et kalınlığına sahip tüplerin yük-deplasman grafikleri sırası ile Şekil 2.48(a-c)'de verilmiştir. Aynı kalınlıkta ilerleyen ezilme davranışı gösteren tüplerin yük-deplasman davranışları birbirlerine çok yakındır (Şekil 2.48(a) ve (b)). Daha önceki deneylerde de gözlenen eksensel yırtılmalar yük değerinde düşmelere neden olmaktadır (Şekil 2.48(c)). Tüp kalınlığı arttıkça ezilme yükleri de artmaktadır. İki tüp haricinde tüm tüpler ilerleyen ezilme ile deforme olmuşlardır. Şekil 2.49(a)'da ilerleyen ezilme gösteren 0,44 mm kalınlıktaki bir tüpün yük-deplasman grafiği ve Şekil 2.49(b)'de ise ezilme görüntüleri numara ile gösterilmektedir. Tüp bu şekillerden görüleceği üzere 1 numaraya kadar elastik deforme olmaktadır. Daha sonra basma aparatı yüzeyine yakın bir yerden ilerleyen ezilme tüp eğilmesi ile başlamaktadır (Şekil 2.49(b), 2). İlerleyen ezilme genelde tüp uç yüzeylerinin inceltilmesi ile gerçekleştirilmektedir (RAMAKRISHNA, 1998, JIMANEZ, 2000). Basma yükü uygulandığında, tüp ucunda oluşan gerilme konsantrasyonu nedeni ile ilerleyen ezilme başlamaktadır. Bu çalışmada ilerleyen ezilmenin tüpün ucundan başlamasının tüp uç yüzeylerinde oluşan hasarlardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Tüplerin kesilmesi esnasında fiber ve matris ara yüzeylerinin kalkması ve tüp yüzeyinin tam düz olmaması tüp uçlarından ezilmenin başlamasına neden olduğu düşünülmektedir. Maksimum yük sonrasında yük değerleri 3 numaraya kadar düşmektedir (Şekil 2.49(b)). Bu noktadan sonra yük değerleri artmakta ve deformasyon ilerleyen ezilmeyle devam etmektedir.

Kompozit tüplerin et kalınlığının artmasıyla, ortalama ezilme yük değeri, maksimum yük değeri ve SAE değerlerinin arttığı Tablo 2.11'de görülmektedir. Projenin devamındaki köpük dolu kompozit tüp testlerinde alüminyum köpük malzemesinin ezilme yük değerlerine yakın

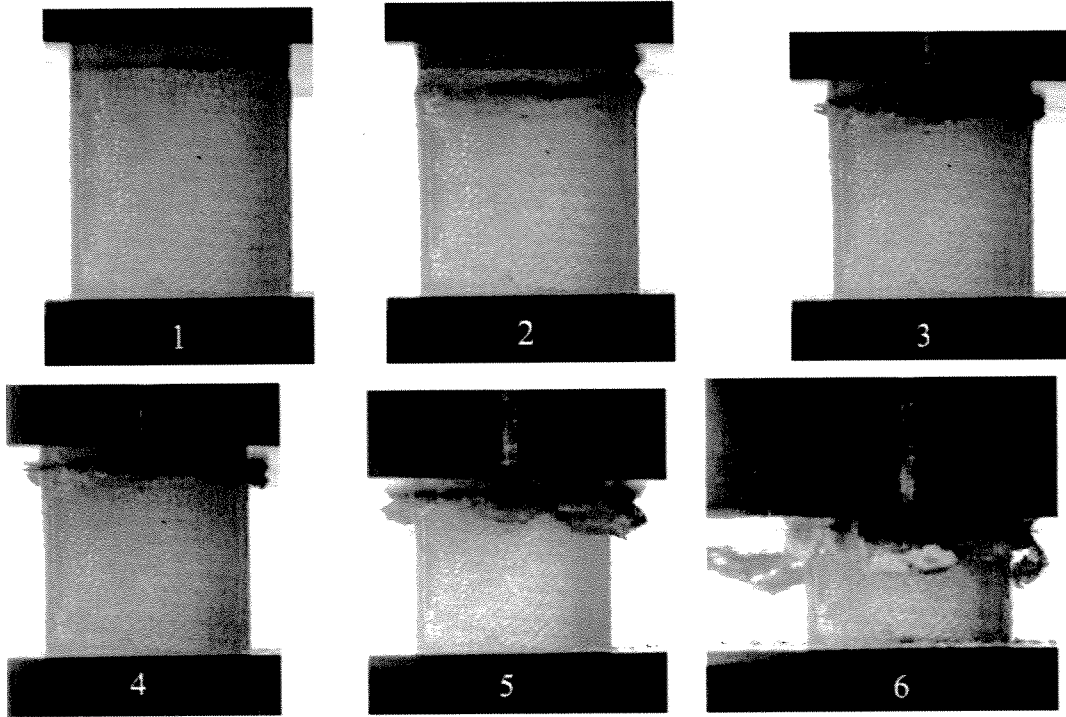
yük değerleri gösteren 0,49-0,70 mm et kalınlığına sahip polimerik kompozit tüpler kullanılmıştır. Bu kalınlıktaki tüpler yaklaşık üç kat cam fiber kumaşın sarılmasıyla hazırlanmıştır.



Şekil 2.48 Farklı ortalama et kalınlığındaki kompozit tüplerin yük-deplasman eğrileri, ortalama kalınlık (a) $t = 0,55$ mm, (b) $t = 0,82$ mm ve (c) $t = 1,32$ mm.



(a)



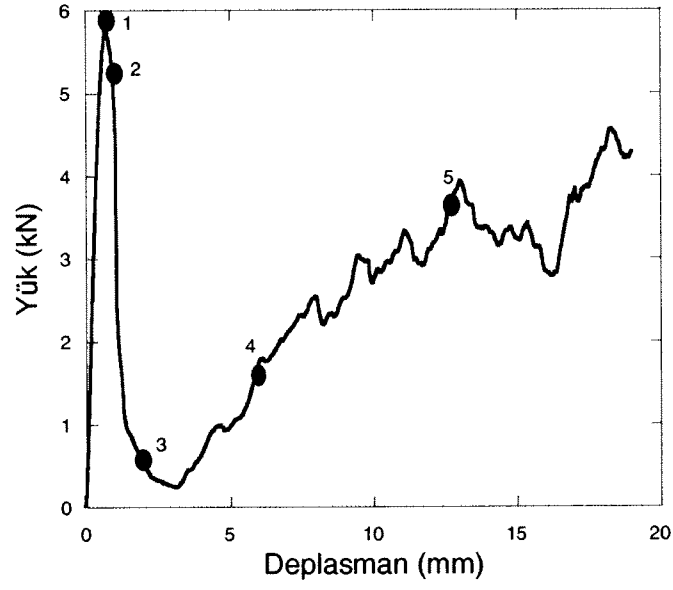
(b)

Şekil 2.49 0,41 mm kalınlığındaki 45/45 fiber açılı kompozit tüpün (a) yük-deplasman grafiği ve (b) ezilme görüntüleri.

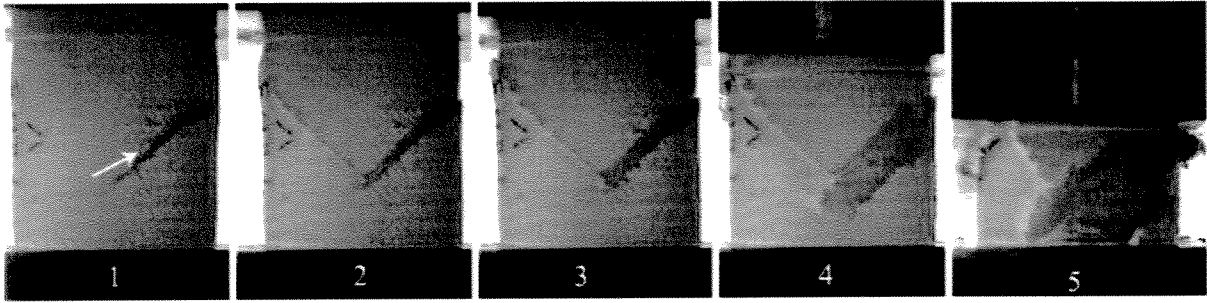
Tablo 2.11 Boş kompozit tüplerin ezilme test sonuçları (TE serisi).

Ortalama kalınlık (mm)	Numune kodu	Maksimum yük (kN)	Ortalama yük %50 deformasyon (kN)	Ezilme modu	SAE %50 deformasyon (J)	SAE %50 deformasyon (J g ⁻¹)
0,55	TE1.1	6,89	3,87	İlerleyen ezilme	45,31	21,09
	TE1.2	6,19	3,88	İlerleyen ezilme	48,08	22,93
	TE1.3	6,77	3,01	İlerleyen ezilme	41,27	19,11
	TE1.4	6,56	3,77	İlerleyen ezilme	45,03	21,14
	TE1.5	5,84	2,80	Eksensel kırılma	28,44	13,52
0,82	TE2.1	10,75	6,45	İlerleyen ezilme	69,32	21,66
	TE2.2	11,08	6,24	İlerleyen ezilme	67,88	21,31
	TE2.3	10,73	5,09	İlerleyen ezilme	63,44	19,39
1,32	TE3.1	19,97	7,69	Eksensel kırılma	115,08	22,43
	TE3.2	20,37	4,82	Eksensel kırılma	82,03	15,88
	TE3.3	19,07	10,72	İlerleyen ezilme	147,00	29,82

Şekil 2.50(a) ve (b)'de katastrofik kırılma ile ezilen kompozit tüpün yük-deplasman ve ezilme görüntüleri sırası ile verilmektedir. Bu şekillerde görüldüğü üzere kompozit tüp basma kayma bandı ile kırılmaktadır. Bu bantlar tüp eksenine diyagonal oluşmakta ve yük değerleri maksimum yükten sonra azalmaktadır. Basma kayma bantlarının tamamen basılması sonrası ezilme yükleri deplasman ile artmaktadır. Basma kayma bandıyla birlikte eksensel yırtılmalarda gözlenmiştir. Şekil 2.51'de kompozit tüplerin ezilme yükleri ve SAE değerleri Al tüp ile karşılaştırılmaktadır. Kompozit tüpün yük değerleri ve SAE değerleri Al boş tüpünkünden daha yüksektir.

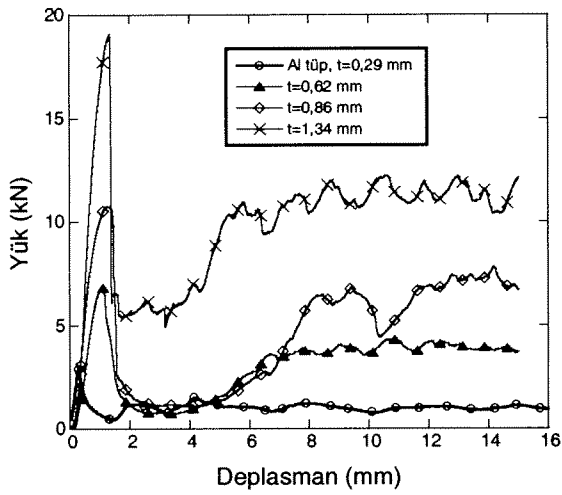


(a)

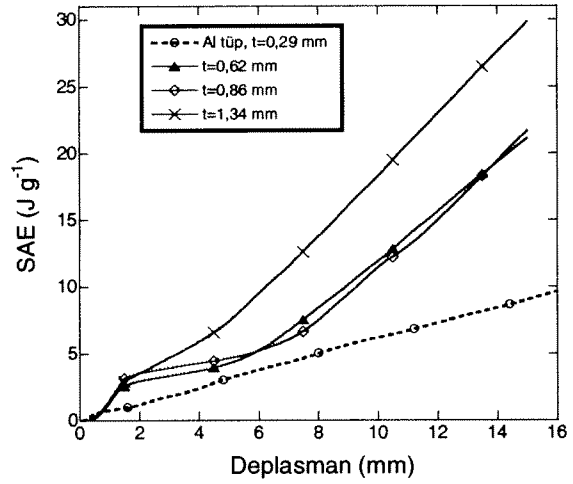


(b)

Şekil 2.50 (a) 0,59 mm kalınlığındaki kompozit tüpün (a) yük-deplasman grafiği ve (b) ezilme görüntüleri.



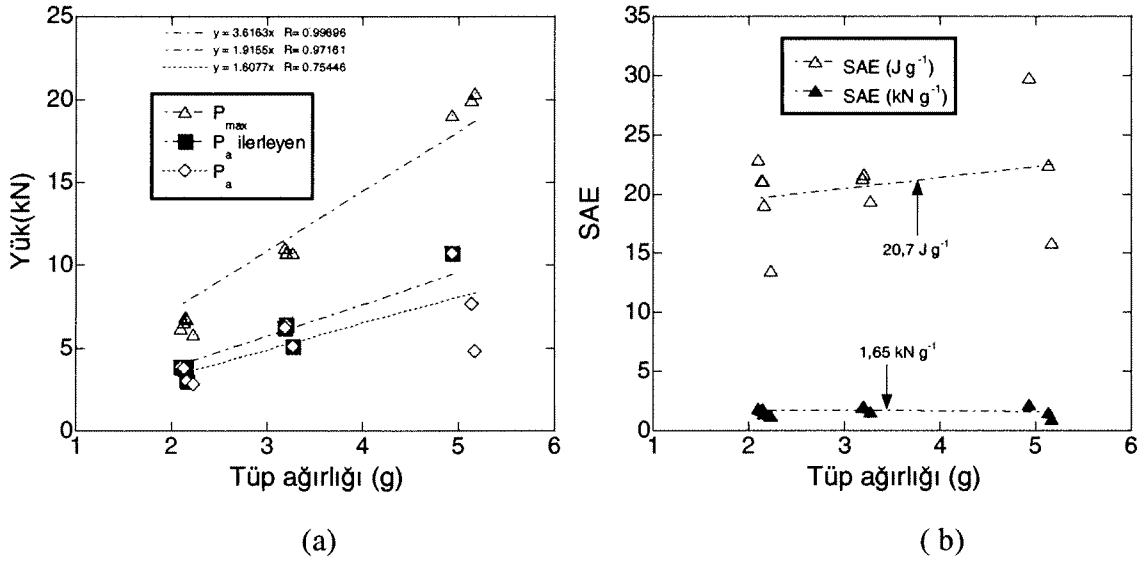
(a)



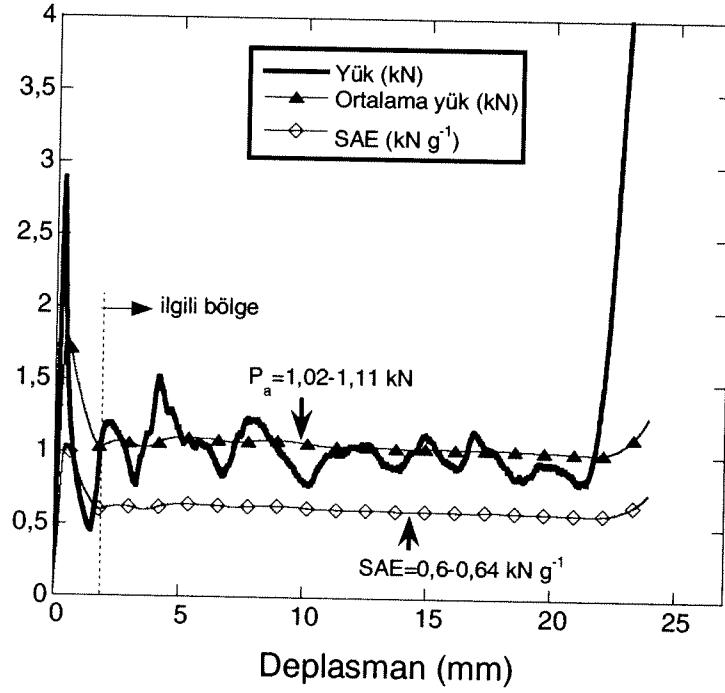
(b)

Şekil 2.51 Kompozit tüplerin (a) yük ve (b) SAE değerlerinin Al tüp ile karşılaştırılması.

Şekil 2.52(a)' da 45/45 derece fiber açılı kompozit tüplerde maksimum ezilme ve ortalama yük değerlerinin tüp ağırlığına göre değişimi gösterilmektedir. Tüp ağırlığı yoğunluğu ve hacmi kapsamı ve tüp kalınlığının bölgesel olarak değişmesi nedeni ile SAE değerlerinin karşılaştırılmasında kullanımı daha uygundur. SAE değerleri ortalama ezilme yükün tüp ağırlığına bölümü ile hesaplandığında (kN g^{-1}) tüp ağırlığıyla çok fazla değişmemektedir. Ortalama ezilme yükü temel alınarak hesaplanan ortalama SAE değeri $1,65 \text{ kN g}^{-1}$ ' dir (Şekil 2.52(b)). Şekil 2.53' de proje kapsamında kullanılan Al tüpün ortalama yük değeri kullanılarak hesaplanan SAE ve yük değerleri gösterilmektedir. Maksimum yükten sonra, kompozit tüplerde de olduğu gibi, ezilme yükü deplasman ile 1,02 ve 1,11 kN değerleri arasında değişmektedir. SAE değerleri ise aynı bölgede $0,60-0,64 \text{ kN g}^{-1}$ arasında değişmektedir. 22 mm'lik deplasmandan sonra ortalama yük değerlerinin artması elmas katlanmaların yoğunlaşmasının bir sonucudur.



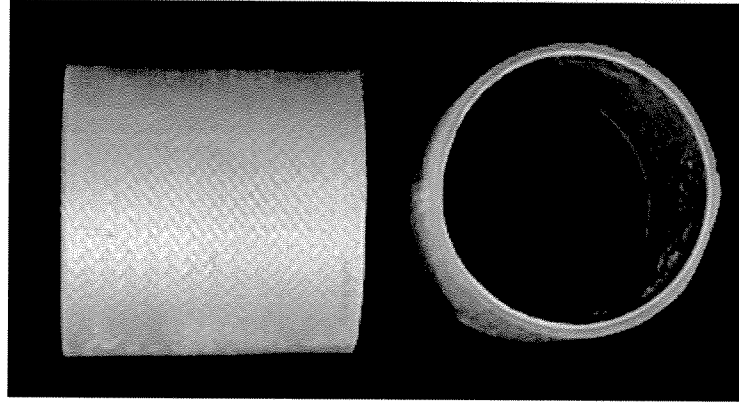
Şekil 2 52 (a) tüp ağırlığının maksimum ve ortalama yük değerlerine ve (b) SAE değerlerine etkisi.



Şekil 2.53 27 mm uzunluğunda 0,29 mm kalınlığındaki Al tüplerin yük, ortalama yük ve SAE-deplasman grafikleri.

2.10 Boş alüminyum-kompozit ikili tüpler

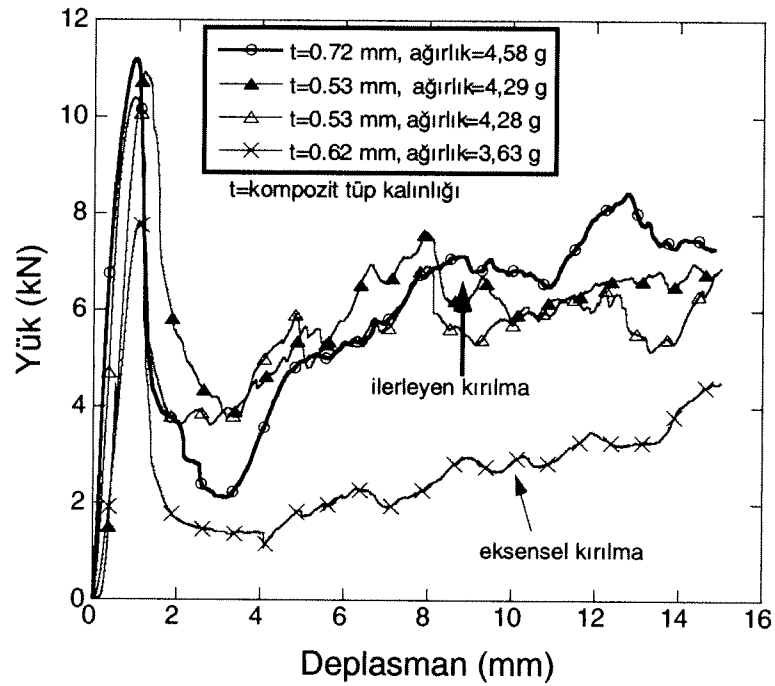
Al-kompozit ikili tüpler, 45/45 derece fiber açılı kompozit tüplerin içine 25 mm dış çaplı Al tüplerin polyester reçineyle yapıştırılması ile hazırlanmış ve Şekil 2.54'de gösterilmiştir. Tablo 2.12'de test edilen tüplerin geometrik özellikleri sıralanmıştır. İkili tüplerin yük-deplasman davranışları Şekil 2.55'de gösterilmektedir. İkili tüplerin deformasyon özellikleri ise Tablo 2.13'de sıralanmıştır. İkili tüplerin deformasyonu esnasında kompozit tüpte ilerleyen ezilme ve eksensel yırtılmalar gözlenmiştir. Boş kompozit tüplerdeki davranışa benzer olarak, eksensel yırtılmalar ezilme yükünü ve SAE değerlerini azaltmaktadır. Eksensel yırtılmalar Şekil 2.55(a)'da görülmekte olup ağırlığı düşük olan tüplerde oluşmaktadır. Aynı grafikte tüp ağırlığı arttıkça maksimum ve ortalama yük değerlerinin de artma eğilimleri açıkça görülmektedir. Numunelerdeki tüp ağırlıklarındaki farklılıklar, tüp kalınlıklarındaki ve tüpleri birbirine yapıştırmak için kullanılan polyester reçinenin ağırlığındaki farklılıklardan kaynaklanmaktadır. Reçine miktarının fazla olması tüpler arasında daha kuvvetli bağların oluşmasına ve ezilmenin ilerleyen ezilme ile devam etmesini sağlayabilir. Deformasyon türünün SAE değerlerine etkisi Şekil 2.56(b)'de görülmektedir.



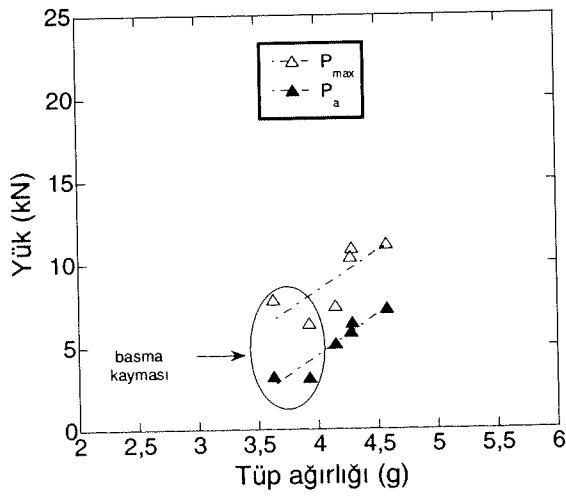
Şekil 2.54 Al-kompozit ikili tüplerin yandan ve üstten görünüşleri.

Tablo 2.12 Boş ikili tüplerin geometrik özellikleri

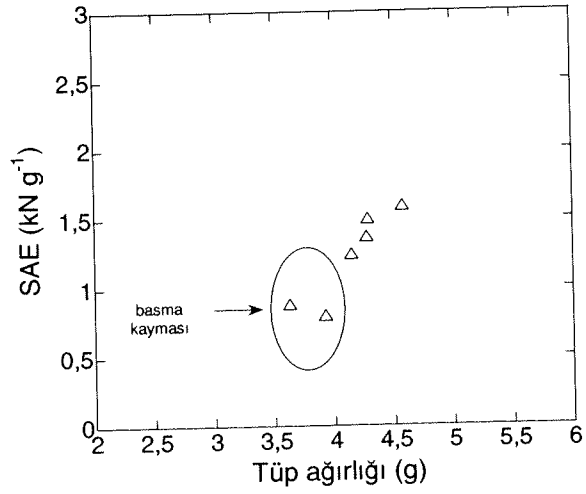
Numune kodu	Toplam ağırlık (g)	Kompozit tüp kalınlığı (mm)	Uzunluk (mm)
TTE1.1	4,29	0,53	27
TTE1.2	3,63	0,61	27
TTE1.3	4,28	0,53	27
TTE1.4	4,58	0,72	27
TTE4.2	4,15	0,60	27
TTE4.3	3,93	0,59	27



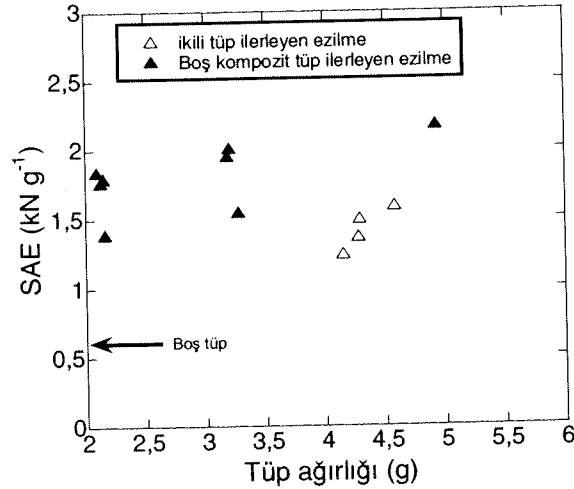
Şekil 2.55 Boş ikili tüplerin yük-deplasman davranışı.



(a)



(b)



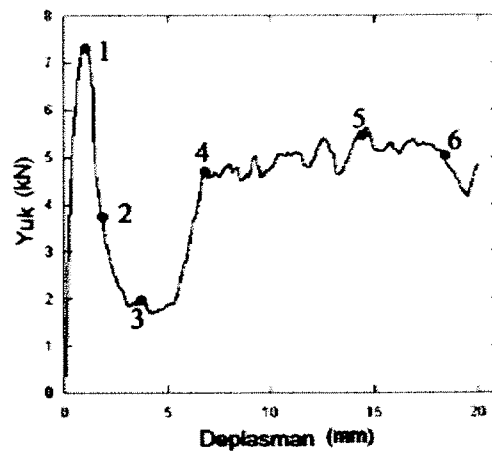
(c)

Şekil 2.56 Tüp ağırlığının boş ikili tüplerde (a) maksimum ve ortalama yük değerlerine ve (b) SAE değerlerine etkisi ve (c) boş ikili tüplerin SAE değerlerinin boş kompozit ve Al tüple karşılaştırılması.

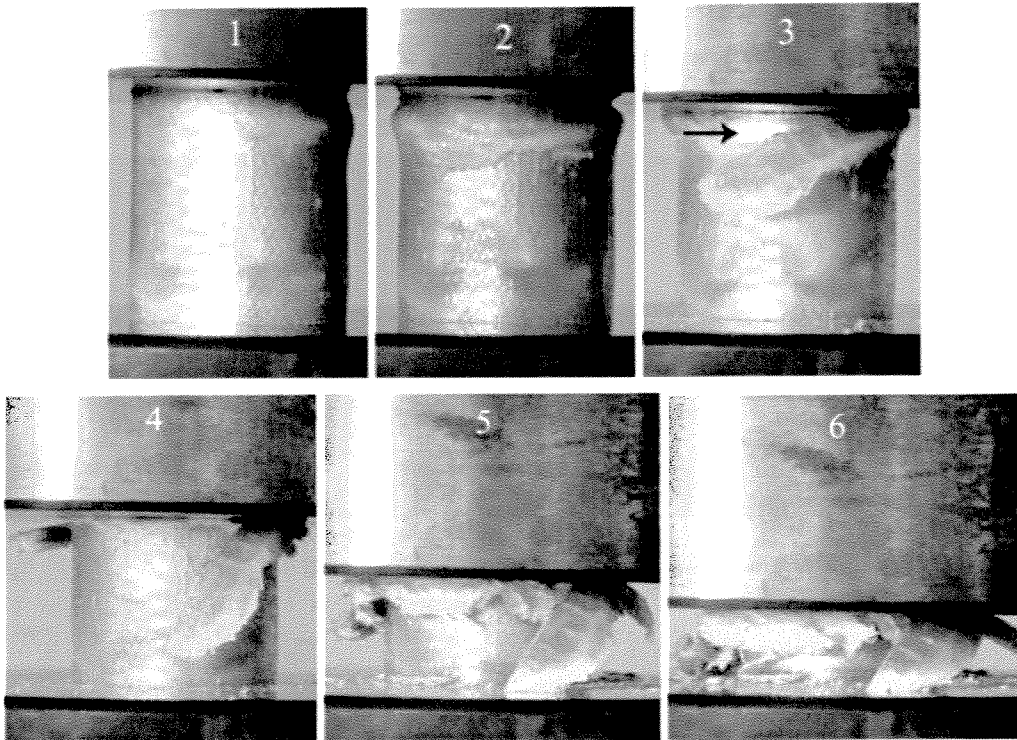
Şekil 2.57(a) ve (b)'de sırasıyla, ilerleyen ezilme ile deforme olan boş ikili tüpe ait yük-deplasman davranışını ve ezilme görüntüleri verilmiştir. Maksimum yük sonrasında tüpün uç kısmındaki bölgesel kırılmadan dolayı yük değerleri 3 numaralı noktaya kadar düşmektedir. Bu boş kompozit tüplerdekine benzer bir davranıştır. Aynı şekildeki 4 numaralı deplasman noktasından sonra tüp ilerleyen ezilmeyle deforme olmakta ve yük değerleri dar bir aralıkta değişerek sabit bir ortalama yük değerine ulaşmaktadır.

Şekil 2.58(a) ve (b)'de ise, sırasıyla, basma kaymasıyla deforme olan boş ikili tüpün yük-deplasman davranışı ve ezilme görüntüleri verilmektedir. Şekil 2.58(b)'de 2 numaralı

görüntüde basma kayma bandı kırılması açıkça görülmektedir. Aynı şekilde 4 numaralı görüntüde elmas modda katlanarak deforme olan Al tüp de açıkça görülmektedir. Maksimum yükün sonrasında Al ve kompozit tüp birlikte ezilmiş ve bundan dolayı da yük değeri deformasyonun son bölgelerine doğru artmaktadır. Bu Ramakrishna ve Hamada'nın (RAMAKRISHNA,1998) önceden rapor ettiği katastrofik ezilme etkisinden farklı bir deformasyon türüdür. Al ve kompozit ikili tüpler ayrılmalarından sonra da birlikte ezilmeye devam etmişlerdir.

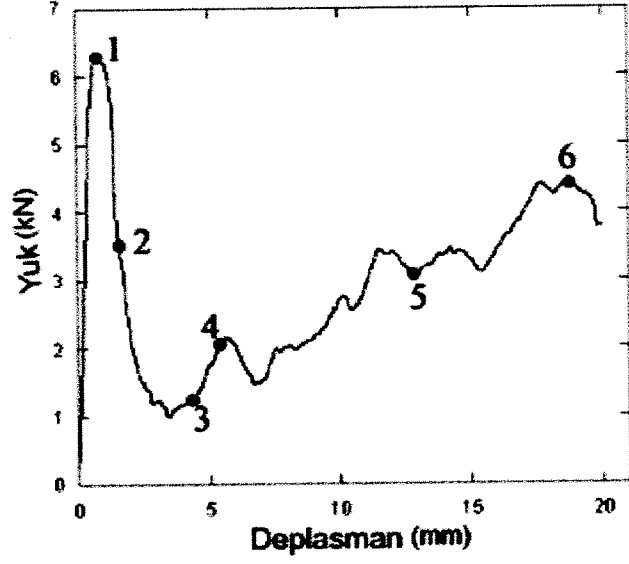


(a)

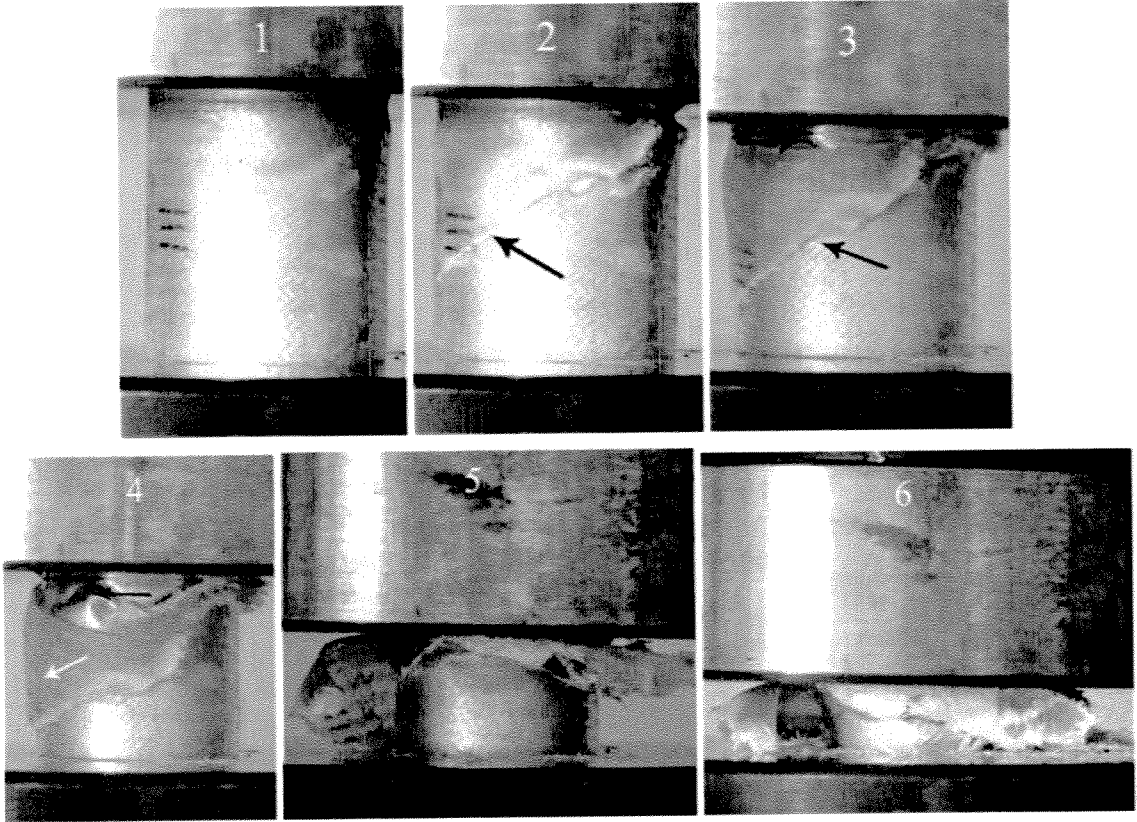


(b)

Şekil 2.57 İlerleyen ezilme ile deforme olan boş ikili tüpün (a) yük-deplasman eğrisi ve (b) ezilme görüntüleri.



(a)

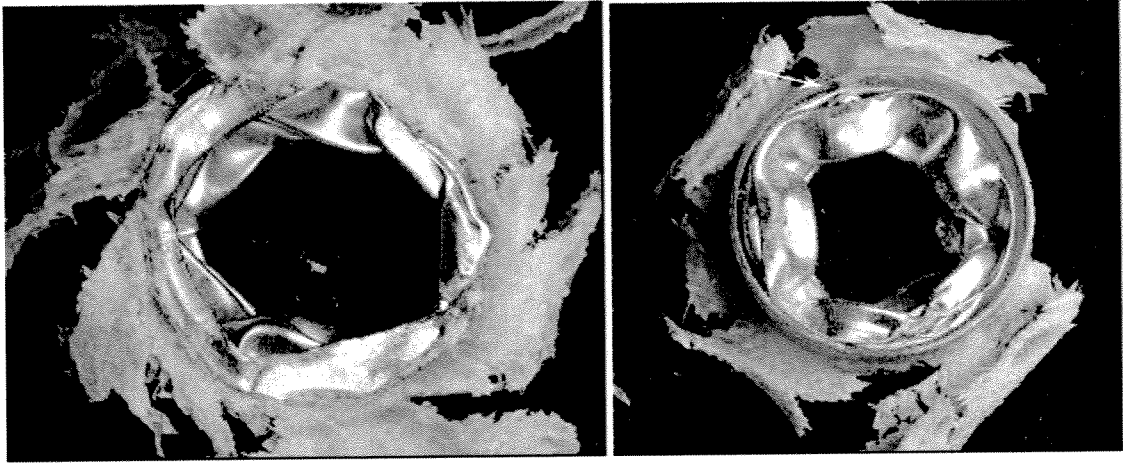


(b)

Şekil 2.58 Basma kayması ile deforme olan boş ikili tüpün (a) yük-deplasman eğrisi ve (b) ezilme görüntüleri.

Tekli kompozit tüplerle ikili tüplerin ezilme davranışları birbirine çok benzediğinden ikili tüplerin deformasyonunda kompozitin baskın olduğu söylenebilir. Bununla birlikte Al tüpün ezilme davranışı ikili tüpte değişmiştir. Şekil 2.59(a) ve (b)'de, sırasıyla 20 mm deplasman

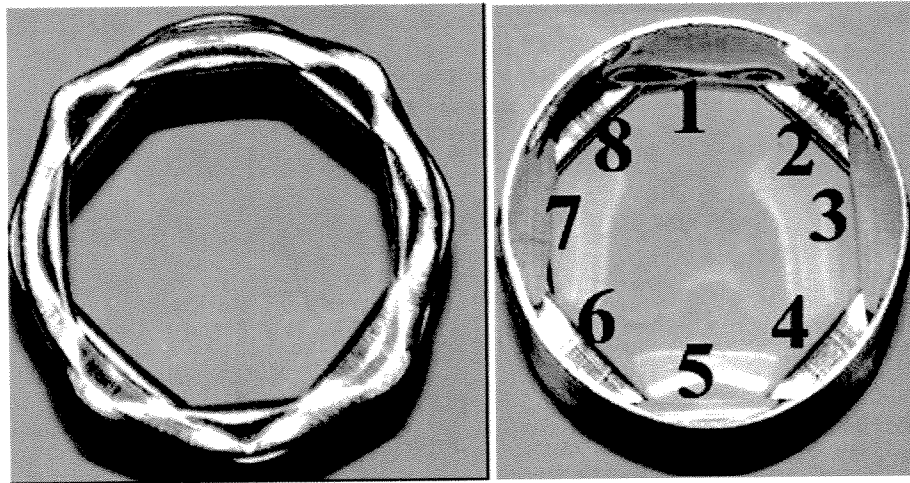
sonrasında ezilmiş ikili tüpün alttan ve üstten görüntüleri gösterilmektedir. Karşılaştırma için tekli Al tüpün deformasyon görüntüleri Şekil 2.60(a) ve (b)'de gösterilmiştir. İkili tüplerde Al tüpün deformasyonu elmas moda benzemekle birlikte katlanma boyları ve şekilleri tekli Al tüpteki kadar homojen değildir. Al tüplerin ezilme mekanizmasındaki bu değişiklik kompozit tüpün Al tüpün dışa doğru katlanmasına karşı gösterdiği direncin sonucudur. Şekil 2.59(a)'da Al metal tüp katlanmaların tüpün içine doğru olduğu açıkça görülmektedir. Baskı kaymasıyla deforme olan ikili tüplerde, ise Al tüp tek Al tüpün ezilmesine daha yakın bir modda ezilmiştir. Ancak, bu tüplerde de ilerleyen ezilme bölgelerinde Al tüpteki katlanma sayıları boş Al tüpünkünden daha fazladır (Şekil 2.61).



(a)

(b)

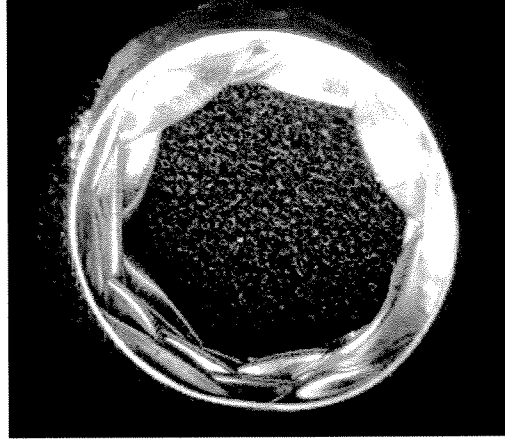
Şekil 2.59 20 mm ezilme sonrasında ikili tüplerin (a) üstten ve (b) alttan görüntüleri.



(a)

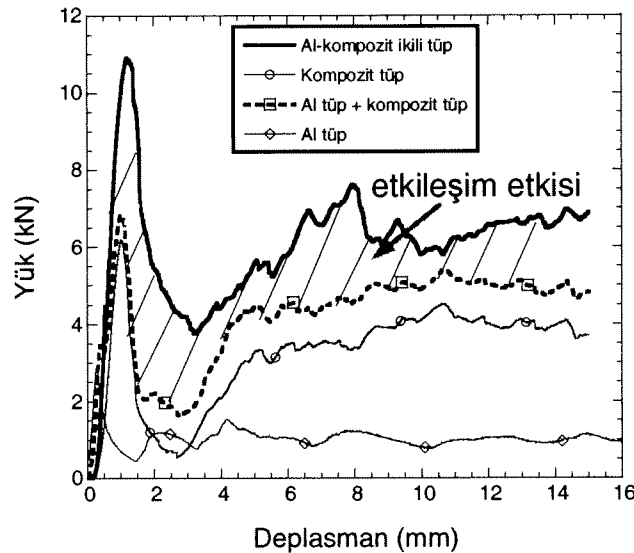
(b)

Şekil 2.60 Ezilmiş tekli Al tüplerin (a) üstten ve (a) alttan görüntüleri.

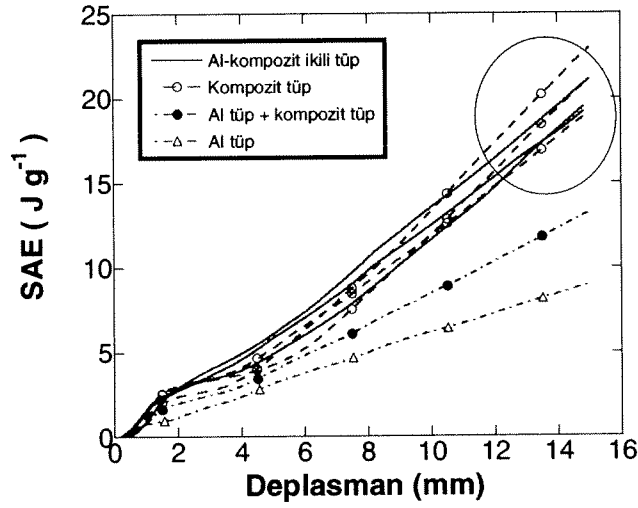


Şekil 2.61 Basma kaymasıyla deforme olmuş ikili tüpün Al tüpünün deformasyon mekanizması, ezilmenin arka yüzeyden görüntüsü.

Şekil 2.62’de, ikili tüpün yük-deplasman davranışı tekli tüplerle ve bunların yük değerlerinin toplamıyla kıyaslanmıştır. İkili tüpün yük değerlerinin iki boş tüpün yük değerlerinin toplamından daha yüksek olması etkileşim etkisidir. Bu etkileşim kompozit tüpün Al tüpün ezilme mekanizmasını değiştirmesi sonucunda oluşmuştur. Şekil 2.63’de ikili tüplerin SAE değeri tekli tüplerin değerleriyle ve bunların matematiksel toplamıyla kıyaslanmıştır. Ezilmenin başlarında ikili tüplerin SAE değerleri kompozit tüpün değerlerinden daha yüksek olmasına rağmen deformasyon ilerledikçe kompozit tüpün SAE değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Ortalama yüke bağlı SAE değerleri kıyaslandığında boş kompozit tüpler ikili tüplerden daha yüksek SAE değerlerine sahiptir.



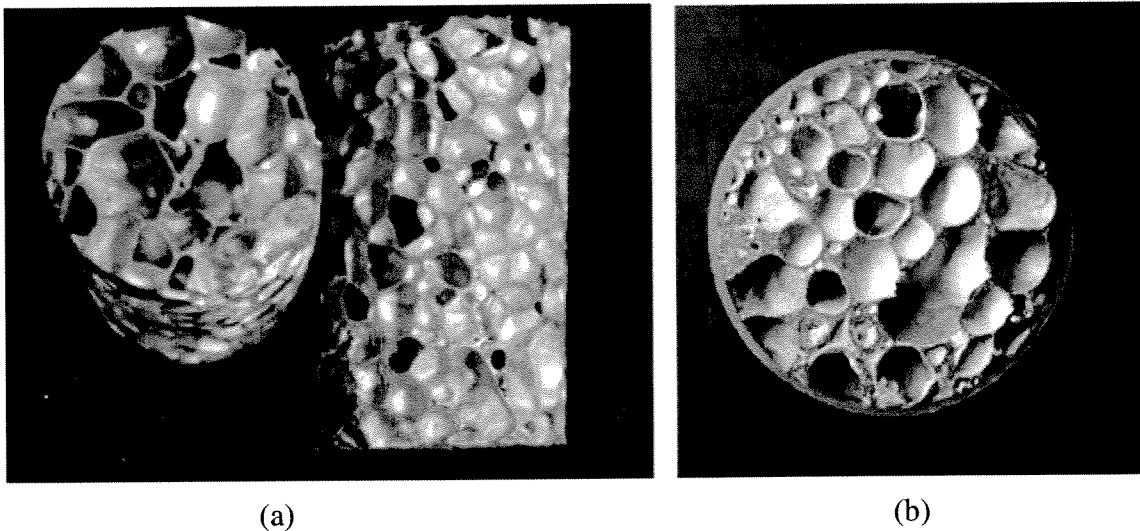
Şekil 2.62 İkili tüplerin ezilme yük değerlerinin tekli tüplerin yük değerleriyle ve bunların toplamıyla kıyaslanması.



Şekil 2.63 İkili tüplerin SAE değerlerinin tekli tüplerin SAE değerleriyle ve bunların toplamıyla kıyaslanması.

2.11 Al-köpük dolu kompozit tüpler

Dolu tüplerde ki metal köpük dolgu malzemesi dış çapları kompozit tüpün iç çapı ile aynı olacak şekilde hassas hazırlanmıştır (Şekil 2.64(a)). Dolgu malzemesi polyester reçine ile tüplerin içine sıkıca yerleştirilmiştir (Şekil 2.64(b)). Tablo 2.13’de test edilen farklı yoğunlukta köpük dolu tüplerin özellikleri sıralanmıştır. Köpük yoğunluğu bu tüplerde $0,25$ ve $0,6 \text{ g cm}^{-3}$ aralığında değişmektedir.

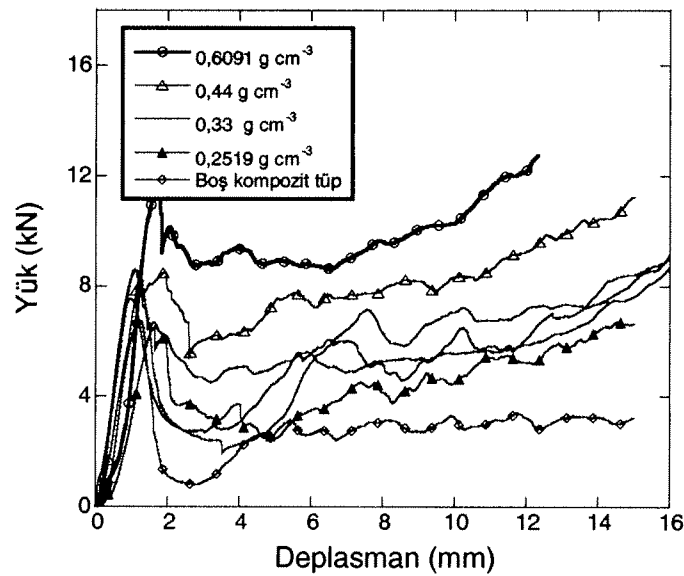


Şekil 2.64 (a) tel erozyonla kesilmiş silindirik Al köpük ve (b) köpük dolu kompozit tüp.

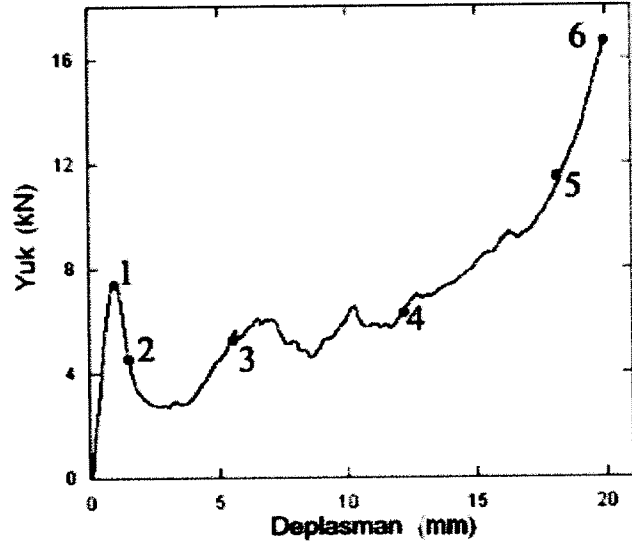
Tablo 2.13 Farklı yoğunlukta Al-köpük dolu kompozit tüplerin özellikleri.

Numune	Köpük yoğunluğu (g cm ⁻³)	Tüp kalınlığı (mm)	Tüp ağırlığı (g)	Toplam ağırlık (g)
TF1-2	0,25	0,64	2,40	5,64
TF1-4	0,29	0,56	2,77	6,49
TF4-2	0,32	0,59	2,61	6,73
TF4-6	0,33	0,49	2,19	6,2
TF4-7	0,33	0,59	2,18	6,45
TF1-5	0,34	0,65	2,75	7,12
TF1-9	0,44	0,56	2,73	8,39
TF1-13	0,61	0,63	2,97	10,78

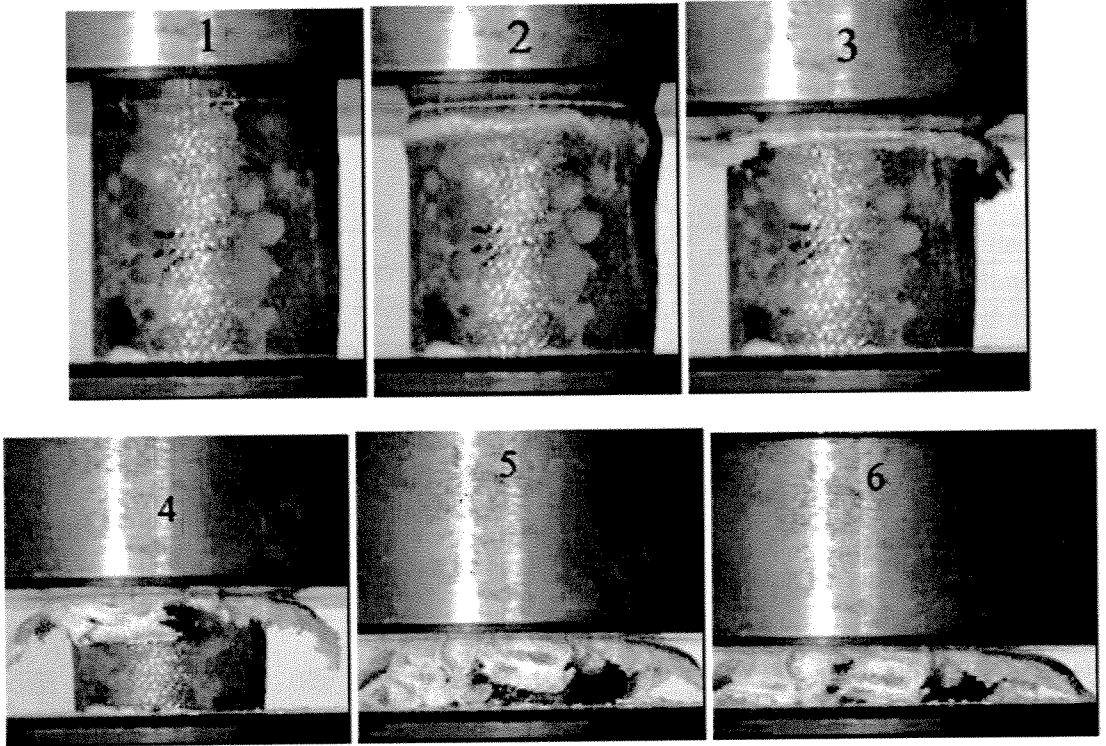
Şekil 2.65’de yük-deplasman grafiklerinden görüldüğü üzere köpük yoğunluğu artıkça dolu tüplerde maksimum ve ortalama ezilme yük değerleri artmaktadır. Köpük dolgusu maksimum yük sonrası yük değerinde gözlenen düşüşleri azaltarak daha kararlı bir tüp ezilme mekanizmasının tetiklenmesine ve sürdürülmesine neden olmaktadır. Bu sonuç ise Al köpük dolu tüplerin hepsinde deformasyonun ilerleyen ezilme ile oluşmasını da desteklemektedir. Şekil 2.66(a) ve (b)’den de görüldüğü üzere dolu kompozit tüp boş kompozit tüpe benzer bir şekilde ilerleyen ezilme davranışı göstermektedir. Ezilme testi sonuçları Tablo 2.14’de özetlenmiştir. Şekil 2.67’de de ise artan köpük yoğunluğunun ortalama ve maksimum yük değerlerini artırdığı gösterilmektedir.



Şekil 2.65 Al köpük dolu kompozit tüplerin yük-deplasman davranışları.

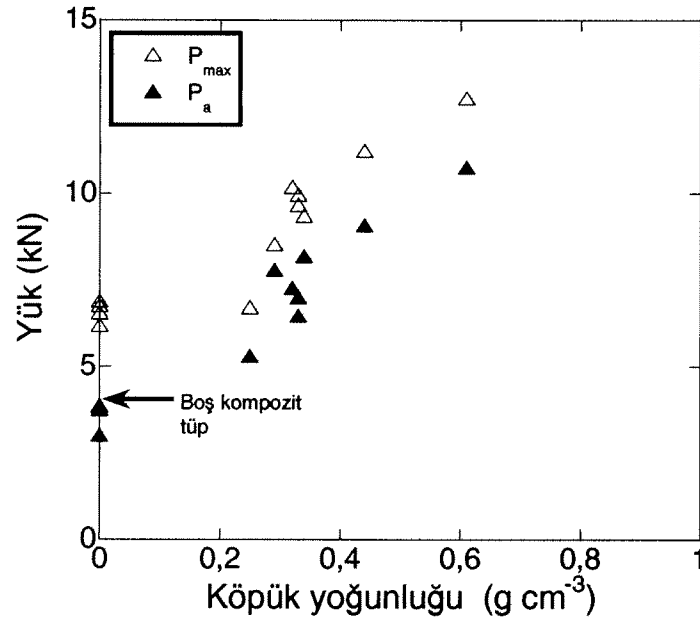


(a)



(b)

Şekil 2.66 Al köpük dolu kompozit tüpün (a) yük-deplasman davranışı ve (b) ezilme görüntüleri.



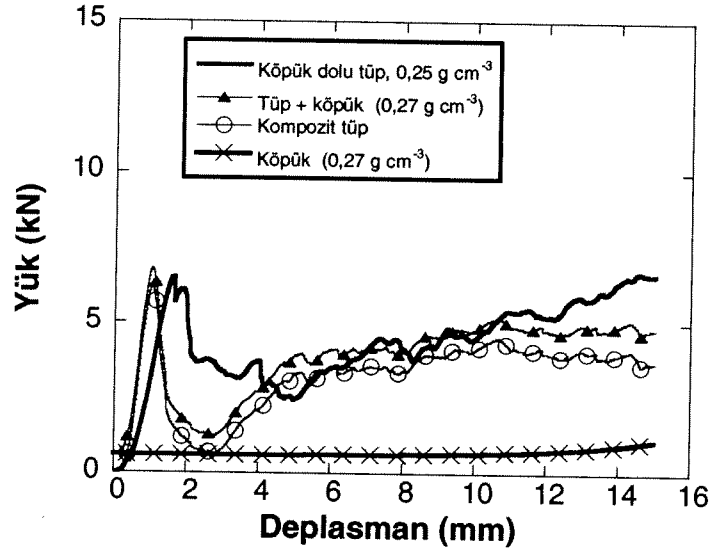
Şekil 2.67 Köpük yoğunluğunun ortalama yük ve maksimum yük değerlerine etkisi.

Tablo 2.14 Köpük dolu kompozit tüplerin ezilme test sonuçları

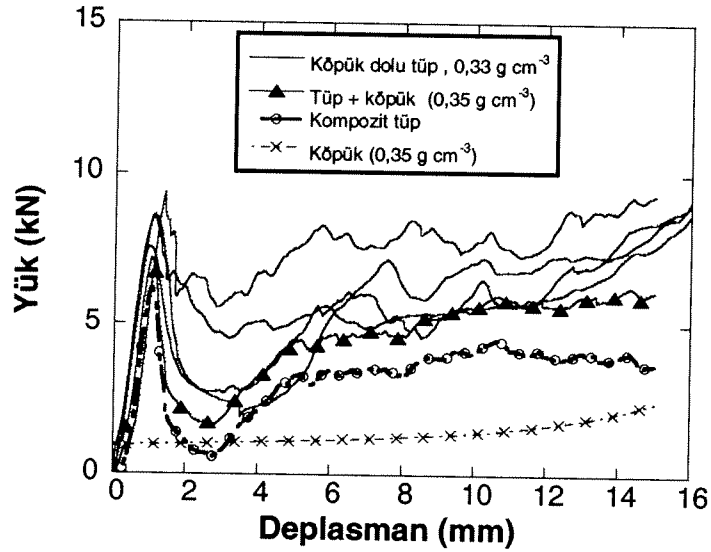
Numune kodu	Köpük yoğunluğu (g cm ⁻³)	Maksimum yük (kN)	Ortalama yük %50 deformasyon (kN)	Ezilme modu
TF1-2	0,2519	6,71	5,32	İlerleyene ezilme
TF1-4	0,2904	8,53	7,79	İlerleyene ezilme
TF4-2	0,32	10,18	7,27	İlerleyene ezilme
TF4-6	0,33	9,96	7,00	İlerleyene ezilme
TF4-7	0,33	9,68	6,46	İlerleyene ezilme
TF1-5	0,3410	9,36	8,19	İlerleyene ezilme
TF1-9	0,4410	11,24	9,09	İlerleyene ezilme
TF1-13	0,6091	12,749	10,76	İlerleyene ezilme

Şekil 2.68(a), (b) ve (c)'de 0,25, 0,33 g cm⁻³ ve 0,44 ve 0,27 g cm⁻³ yoğunlukta köpük dolu kompozit tüplerin ezilme yük değerleri boş tüp, köpük ve bunların toplam yük değeriyle karşılaştırılmıştır. Bu grafiklerde iki farklı etki gözlemlenmiştir. Birincisi, Şekil 2.68(a)'da görüldüğü gibi Al köpük ezilmenin ilk bölgelerindeki yük düşüşünü azaltmasına rağmen ilerleyen ezilme bölgesinde yük değerinde bir artışa neden olmamıştır. Diğeri ise Şekil 2.68(c)'de görüldüğü üzere yük değerlerinde genel bir etkileşim etkisi görülmektedir. Aynı yoğunlukta tüplerde iki olasılığında oluştuğu da gözlemlenmiştir (Şekil 2.68(b)). Bu bulgulara dayanarak şu mekanizmalar önerilmiştir. Tüp ezilmesi tetiklendiğinde tüple köpük birbirinden ayrılıp bireysel deforme olmuş ve etkileşim etkisi oluşmamıştır. İkincisinde ise tüple köpük bütün deplasman değerlerinde birlikte ezilmiş ve bu etkileşim sonucunda da

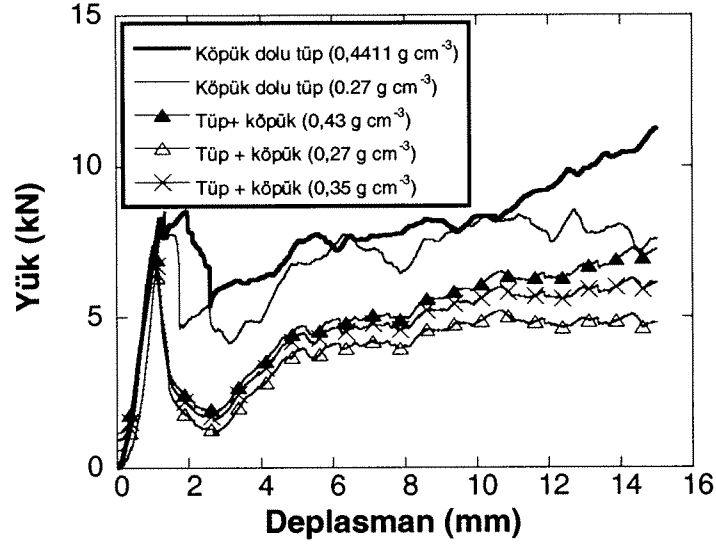
köpük dolu tüplerde yük değerlerinde artış oluşmuştur. Etkileşim etkisi kompozit tüpün köpük dolgunun deformasyonunu sınırlaması ile köpük dolgunun plato gerilmesinin artması ile oluşabilir. Etkileşim etkisinin SAE değerleri üzerine olan etkisi Şekil 2.69'da görülmektedir. Benzer yoğunlukta köpük dolu tüplerde etkileşim olması durumunda SAE değerleri artmaktadır.



(a)

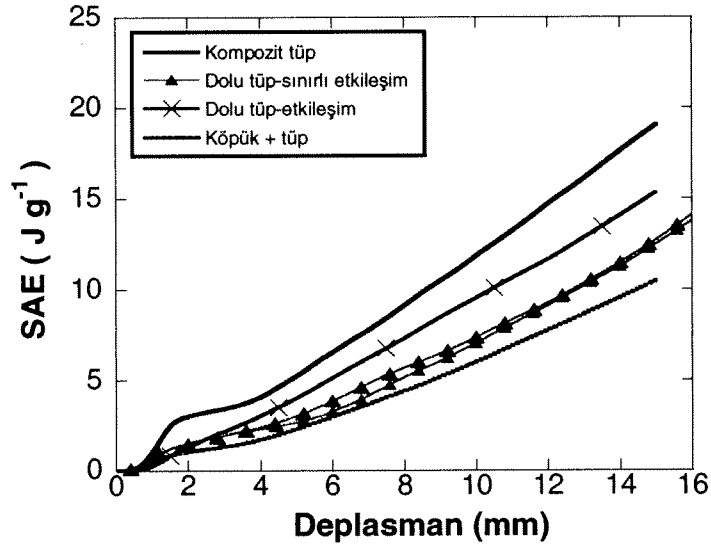


(b)



(c)

Şekil 2.68 (a) $0,25 \text{ g cm}^{-3}$ (b) $0,33 \text{ g cm}^{-3}$ ve (c) $0,44$ ve $0,27 \text{ g cm}^{-3}$ yoğunlukta köpük dolu kompozit tüplerin yük değerlerinin boş kompozit, köpük ve bunların yük değerleri toplamıyla karşılaştırılması.

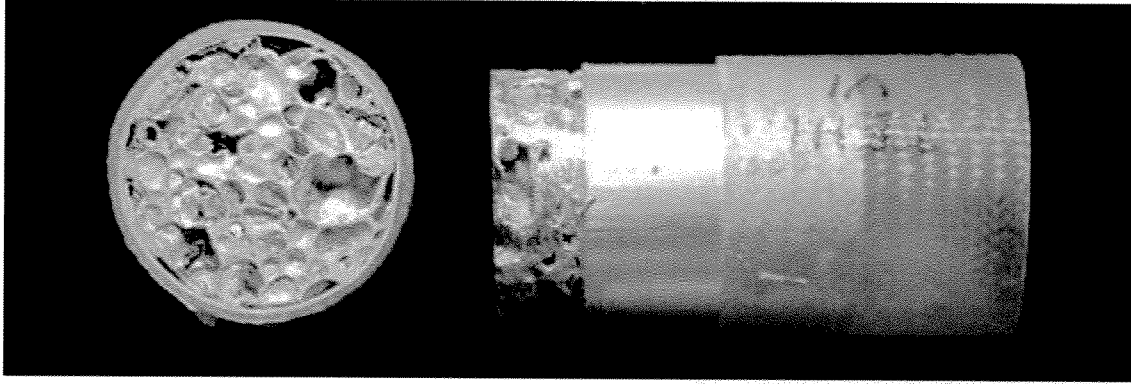


Şekil 2.69 Köpük dolu kompozit tüplerin SAE değerlerinin boş tüp ve köpüğün SAE değerleri toplamıyla karşılaştırılması.

2.12 Al-köpük dolu Al-kompozit ikili tüpler

Al-kompozit ikili tüpler yoğunlukları $0,39$ ve $0,41 \text{ g cm}^{-3}$ aralığında değişen üç ayrı köpükle doldurulmuştur. Hazırlanan bir numunenin üstten ve yandan görünüşleri Şekil 2.70'de gösterilmektedir. Köpük, Al ve kompozit tüp birbirlerine reçine ile yapıştırılmış olup,

köpük ve Al-tüp kompozit tüpe sıkıca geçmektedir. Test edilen tüplerin özellikleri Tablo 2.15’de sıralanmaktadır.

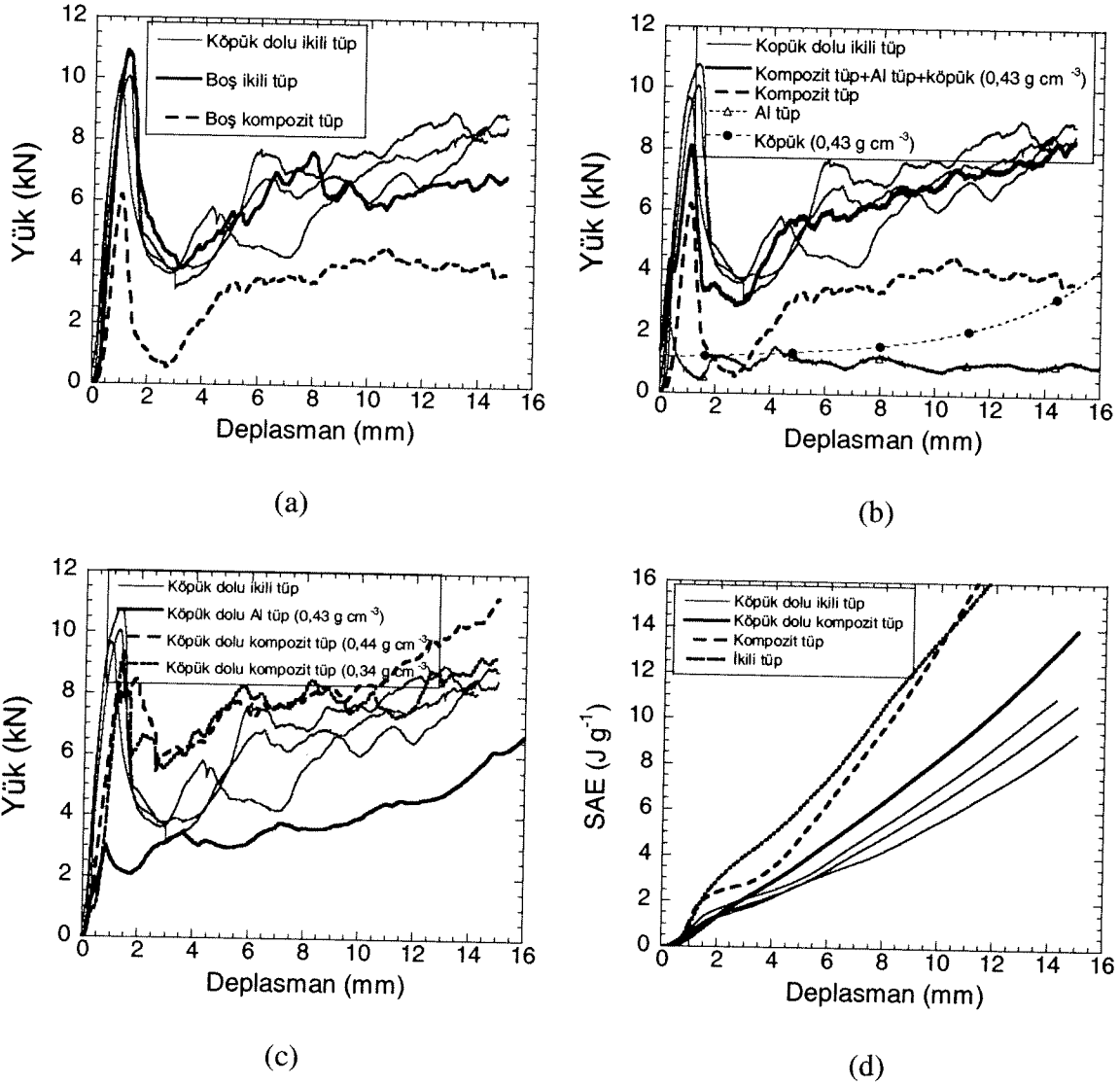


Şekil 2.70 Al köpük dolu Al-Kompozit ikili tüpler, üstten ve yandan görünüş.

Tablo 2.15 Farklı yoğunlukta Al-köpük dolu ikili tüplerin özellikleri.

Numune Kodu	Köpük yoğunluğu (g cm ⁻³)	Kompozit tüp kalınlığı (mm)	Kompozit tüp ağırlığı (g)	Toplam ağırlık (g)	Uzunluk (mm)
TTF 1	0,3859	0,60	2,44	8,82	27
TTF 2	0,4139	0,47	2,19	8,98	27
TTF 3	0,3981	0,62	2,49	9,33	27

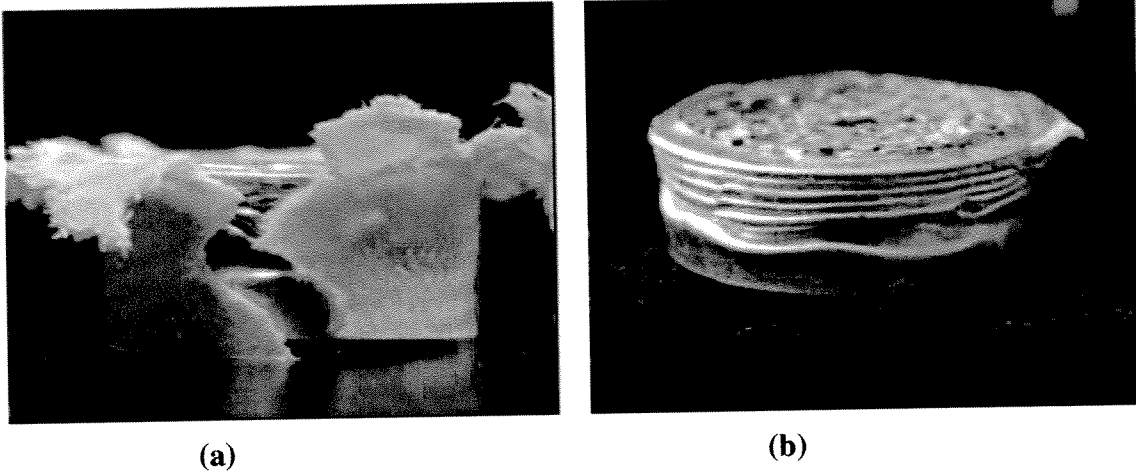
Şekil 2.71(a)’da köpük dolu ikili tüplerin ezilme yük-deplasman davranışları boş ikili ve kompozit tüpün davranışları ile karşılaştırılmaktadır. Köpük dolu ikili tüp boş kompozitten yüksek ezilme yüklerine sahipken, boş ikili tüplerden daha yüksek ezilme yükleri gösterememektedir. Şekil 2.71(b)’de ise ezilme yükleri, köpük ve boş Al ve kompozit tüplerin yüklerinin toplamı ile karşılaştırılmaktadır. Şekil 2.71(c)’de köpük dolu ikili tüplerin yükleri, benzer yoğunlukta köpük dolu kompozit ve Al tüp yükleri ile karşılaştırılmaktadır. Köpük dolu ikili tüp, dolu Al tüpten daha yüksek ezilme yükleri göstermesine karşın, köpük dolu kompozit tüpten daha düşük yüklere sahiptir. Enerji emme özelliklerinde ise, köpük dolu ikili tüpler, boş ikili, boş kompozit ve köpük dolu kompozit tüplerden daha düşük enerji emme özelliği göstermektedir (Şekil 2.71(d)).



Şekil 2.71 Al köpüklerle doldurulmuş ikili tüplerin ezilme testlerine ait yük-deplasman grafikleri: (a) boş kompozit ve ikili tüp, b) köpük dolu ikili tüp ve (c) köpük dolu Al ve kompozit tüp ile karşılaştırma ve (d) SAE-deplasman grafikleri.

Yukarıda belirtilen yük-deplasman ve SAE grafikleri köpük dolu ikili tüplerin ezilme mekanizmaları ile açıklanabilir. Ezilme ile metal tüpte oluşan katlanmalar hem kompozit tüp ve hem de köpük dolgu tarafından engellenmektedir. Bu ise kompozit tüpün eksensel yönde yırtılmasına neden olmaktadır (Şekil 2.72(a)). Ezilme esnasında metal tüp kısmen kompozit tüpten ayrılmaktadır. Kompozit, tüp basma testi esnasında ezilmeye devam etmekte ve ezilme yüklerinin benzer yoğunlukta köpük dolu metal tüpün üzerine çıkartmaktadır (Şekil 2.71(c)). Fakat kompozit tüpün metal tüpten ayrılarak ezilmesi metal tüp ile etkileşimi engellemektedir. Metal tüp ise Şekil 2.72(b)'de görüldüğü gibi ilerleyen simetrik katlanma ile deforme olmaktadır. Eksensel yırtılmaları engellemek için iki yöntem önerilebilir: (a) daha düktil

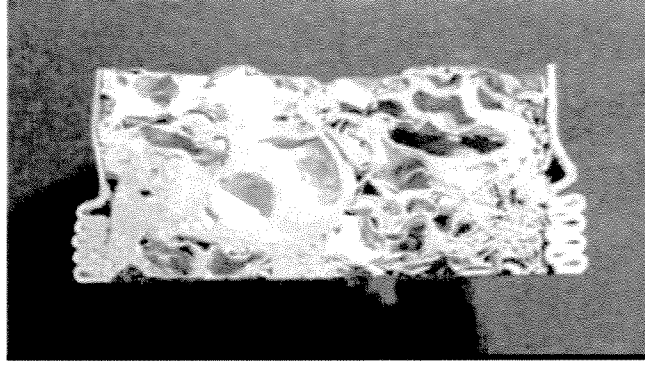
kompozit yapıların kullanılması ve (b) köpük yoğunluğunu azaltarak metal tüpün katlanmasının kolaylaştırılması veya oluşan eksensel yüklerin miktarının azaltılmasıdır. Tablo 2.16’da gösterildiği üzere test edilen köpük dolu üç ikili tüplerde kompozit tüp eksensel yırtılmaktadır. Köpük dolu Al tüpte simetrik katlanmalar oldukça düzenli olmasına karşın (Şekil 2.73) ikili tüplerde Al tüp bazı yerlerde düzensiz katlanmakta ve kısmen katlanmaların arasında kompozit parçacıkları görülmektedir (Şekil 2.74). Bu ise kompozit tüpün kısmen de olsa Al tüpün deformasyonunu kısıtladığını göstermektedir.



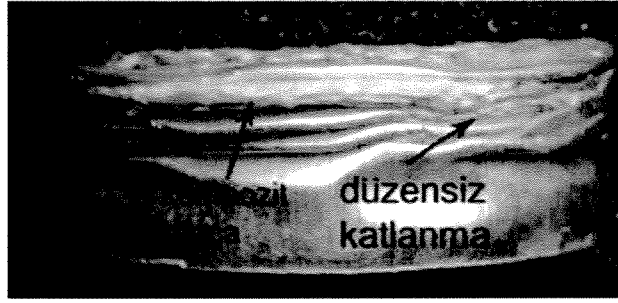
Şekil 2.72 Al köpük dolu ikili tüpün ezilme testi sonrası görüntüleri, (a) ayrılan kompozit tüp ve (b) içteki Al köpük dolu tüpteki katlanmalar.

Tablo 2.16 Köpük dolu ikili tüplerin basma test sonuçları.

Numune kodu	Köpük yoğunluğu (g cm ⁻³)	Maksimum yük (kN)	Ortalama yük % 50 deformasyon (kN)	Kompozit tüp deformasyon türü
TTF 1	0,3859	10,75	7,90	Fiber ekseni yırtılma
TTF 2	0,4139	9,66	6,85	Fiber ekseni yırtılma
TTF 3	0,3981	10,05	7,48	Fiber ekseni yırtılma



Şekil 2.73 Köpük dolu tek Al tüp katlanması.



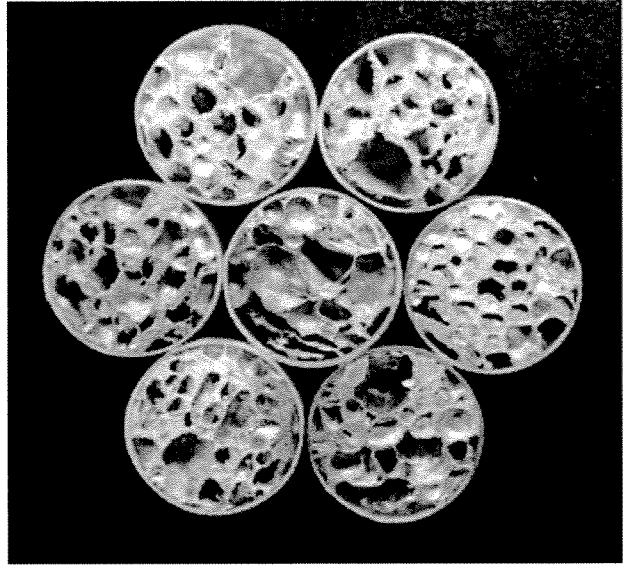
Şekil 2.74 İkili tüplerde kompozitin katlanmalar arasına girmesi ve düzensiz katlanmalar.

2.13 Kompozit çoklu tüpler

Al tüplerle benzer şekilde dolu ve boş kompozit çoklu kübik ve altıgen geometri tüpler hazırlanmıştır (Şekil 2.75). Bu geometrilerde ezilme testlerinde parçalanan kompozit tüp parçaları basma kalıbının duvarları arasına sıkışarak test sonuçlarını oldukça değiştirmiştir. Kompozit tüplerin deformasyon mekanizmasından dolayı kalıp içinde yapılan çoklu tüp sistemi deneylerinden güvenilir sonuçlar alınamamıştır.



(a)



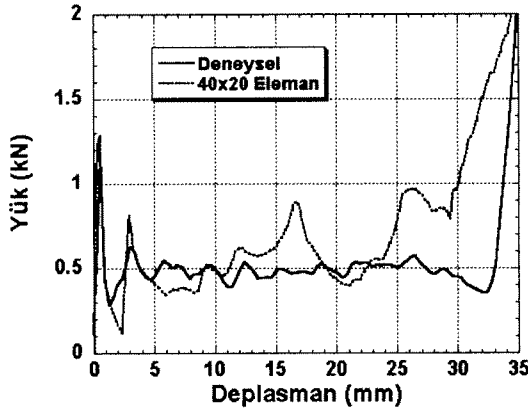
(b)

Şekil 2.75 a) Çoklu tüp ezilme test düzeneği ve b) Al-köpük dolu tüpler

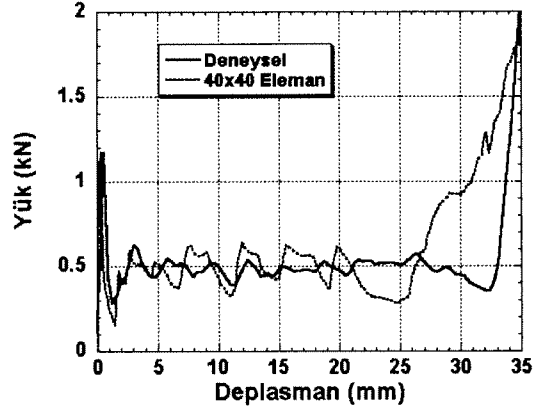
2.14 Modelleme sonuçları

2.14.1 Alüminyum boş tüpler

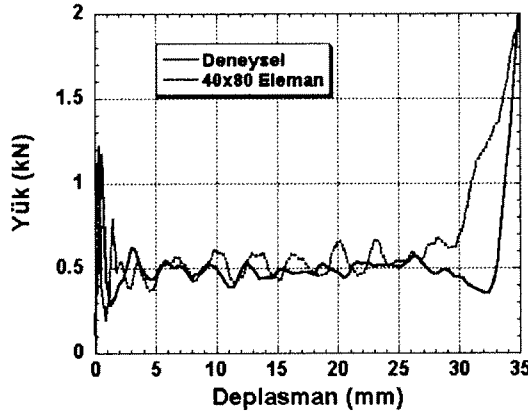
Dört farklı sayıdaki elementlerden oluşturulmuş, 40x20, 40x40, 40x80 ve 40x160, boş tüplerin modellerinin yük-deplasman eğrileri sırası ile Şekil 2.76(a-d)'de 16 mm çaplı tüpler için karşılaştırma amacıyla verilmiştir. Şekil 2.76(c) ve (d)'den görüleceği üzere 40x80 ve 40x160 element sayılarına sahip modellerin yük-deplasman eğrileri deneysel sonuçlarla iyi uyum göstermektedirler. Aynı sonuçlar 25 mm çaplı tüpler içinde elde edilmiştir. Dolayısıyla iki farklı tüp geometrisi içinde 40x80 elemente sahip model nümerik hesaplama verimi göz önüne alınarak seçilmiştir.



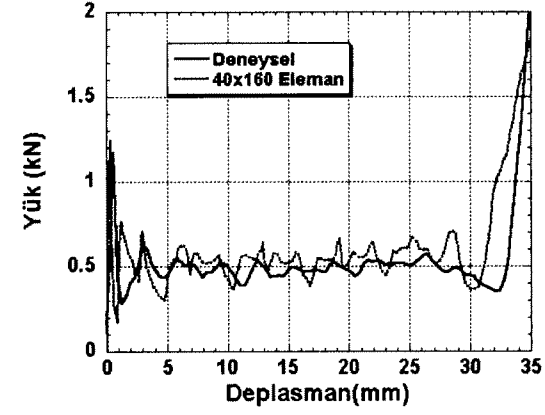
(a)



(b)



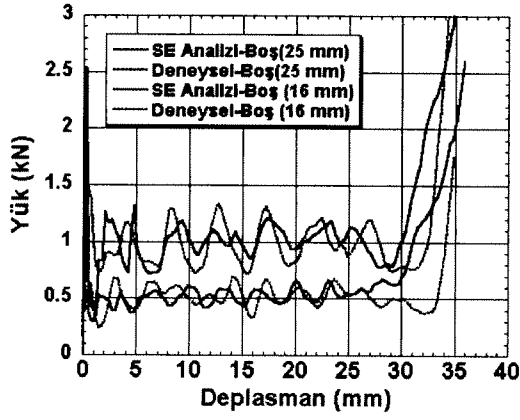
(c)



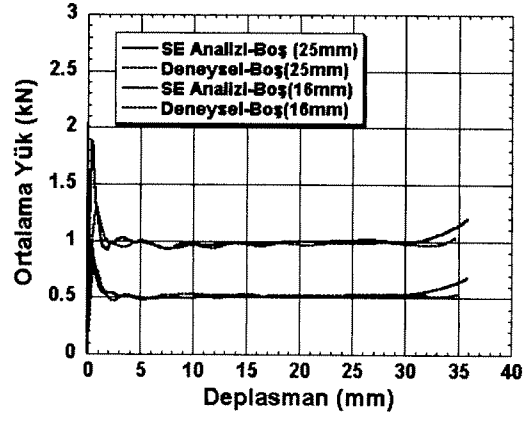
(d)

Şekil 2.76 16mm çaplı boş tüpün farklı ağ sayılarındaki nümerik ve deneysel yük-deplasman grafikleri , element sayıları (a) 40x20, (b) 40x40, (c) 40x80 ve (d) 40x160.

Nümerik modelde ve hem de deneysel testlerde boş 16 mm ve 25 mm çaplı tüpler elmas deformasyon modunda ezilmiş olup, yük-deplasman ve ortalama yük-deplasman eğrileri Şekil 2.77(a) ve (b)'de verilmiştir. İlk ve son katlanmaya ait olan başlangıç bölgesi ile sondaki yoğunlaşma bölgesi dışında deneysel ve nümerik sonuçların birbirleri ile uyum içinde oldukları görülmektedir. 16 mm çaplı tüplerde 9 ile 10 adet katlanma , 25 mm çaplı tüplerde ise 7 ile 8 adet arasında katlanma oluşmaktadır. 16 ve 25 mm çaplı boş tüplerin %15, %30 ve %50 oranında deforme edilmiş deneysel ve nümerik deformasyon şekilleri sırası ile Şekil 2.78 ve 2.79'da verilmişlerdir. Şekillerden de görülebileceği üzere deneysel ve nümerik deformasyon şekilleri de birbirlerine uymaktadırlar. Ayrıca aynı şekillerden her iki tüp içinde katlanmanın ilk olarak eksensel simetrik modda başlayıp daha sonra elmas moduna döndüğü açıkça görülmektedir, benzer davranış çok modlu çökme olarak tanımlanmıştır (SINGACE, 2000(a))

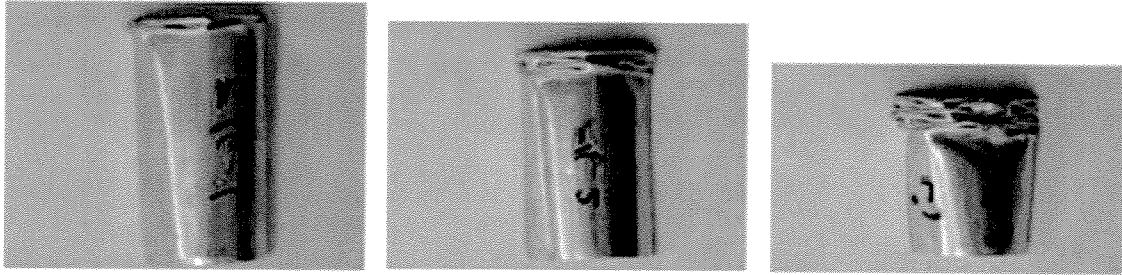


(a)



(b)

Şekil 2.77 Nümerik ve deneysel sonuçların karşılaştırılması, (a) yük-deplasman ve (b) ortalama yük-deplasman grafikleri.

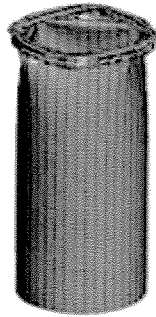


%15

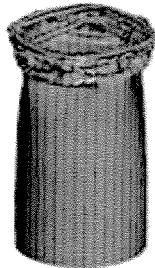
%30

%50

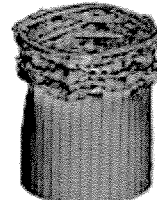
(a)



%15



%30



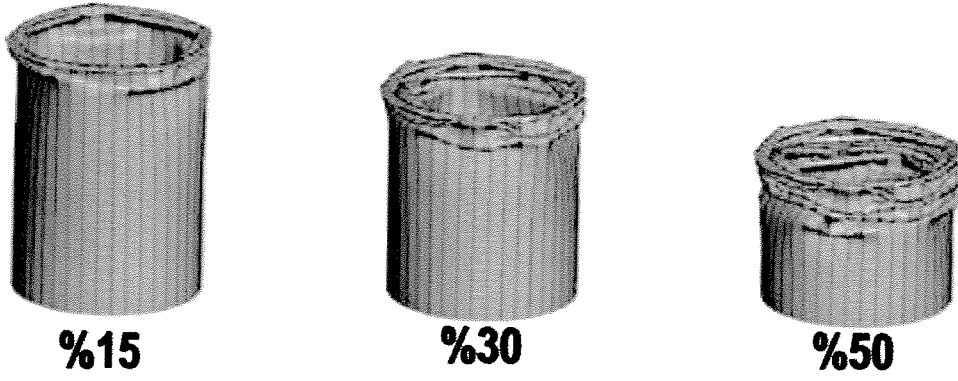
%50

(b)

Şekil 2.78 16 mm'lik tüpün farklı yüzde deformasyonlardaki kesit resimleri: (a) deneysel ve (b) nümerik.



(a)



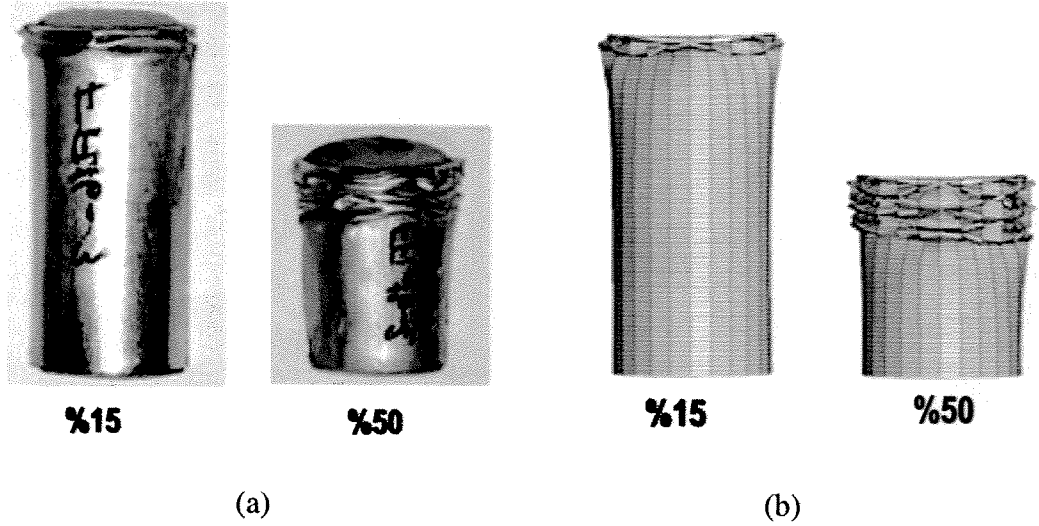
(b)

Şekil 2.79 25 mm' lik tüpün farklı yüzde deformasyonlardaki kesit resimleri: (a) deneysel ve (b) nümerik.

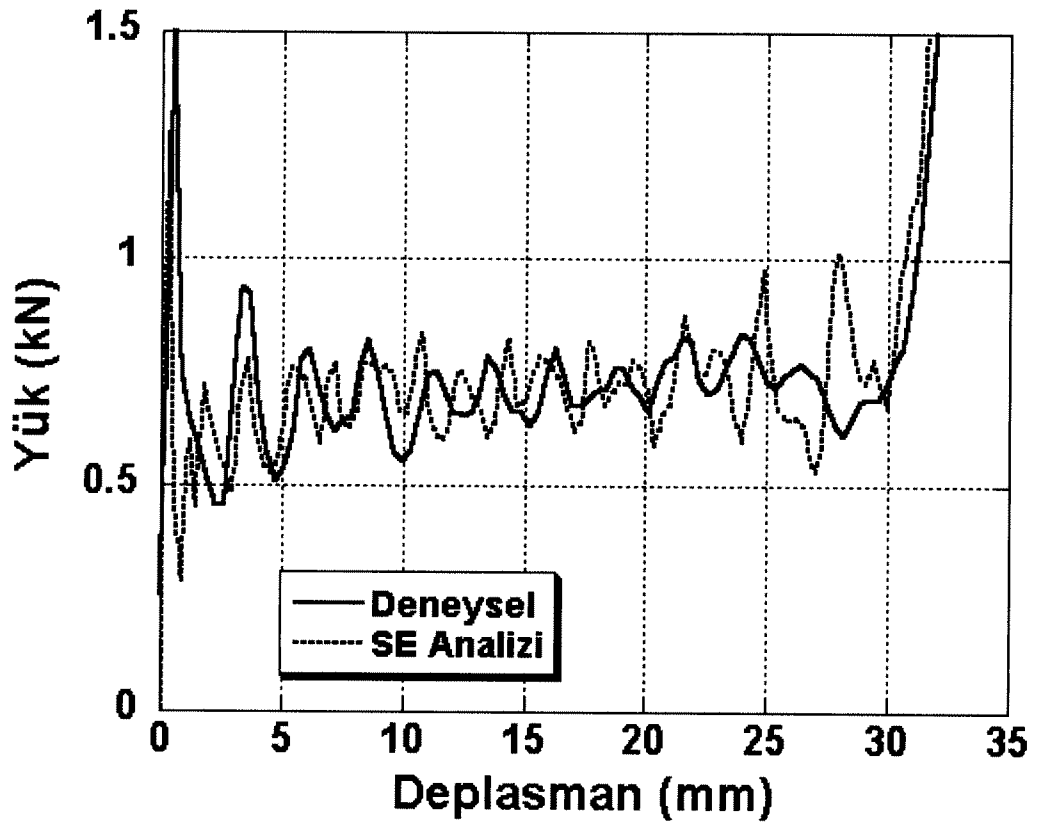
2.14.2 Doldurulmuş alüminyum tüpler

Köpük doldurulmuş 16 mm çaplı tüplerde deformasyon boş tüplerde olduğu gibi elmas modundadır. Şekil 2.80 (a) ve (b) deneysel ve nümerik modelin %15 ve %50 deformasyon değerlerindeki deformasyon şekillerini göstermektedir. Şekillerden de görüleceği üzere deneysel ve nümerik deformasyon şekilleri arasında çok yakın benzerlikler bulunmuştur. Daha önce Al ve çelik tüpler üzerinde yapılan çalışmalarda da bulunduğu gibi (SEITZBERGER, 2000 ve 1997, SANTOSA, 1998 ve 2000) köpük doldurma işlemi katlanma uzunluklarını azaltarak toplam katlanma sayısının artmasına neden olmaktadır (10-11). Şekil 2.81'de, nümerik ve deneysel yük değerleri arasında, boş tüplerde olduğu gibi, iyi bir uyumun olduğunu göstermektedir. 16 mm çaplı tüplerin aksine, 25 mm çaplı tüplerde deformasyon modu elmas deformasyon şeklinden eksensel simetrik moda dönüşmüştür. 25 mm'lik tüpteki

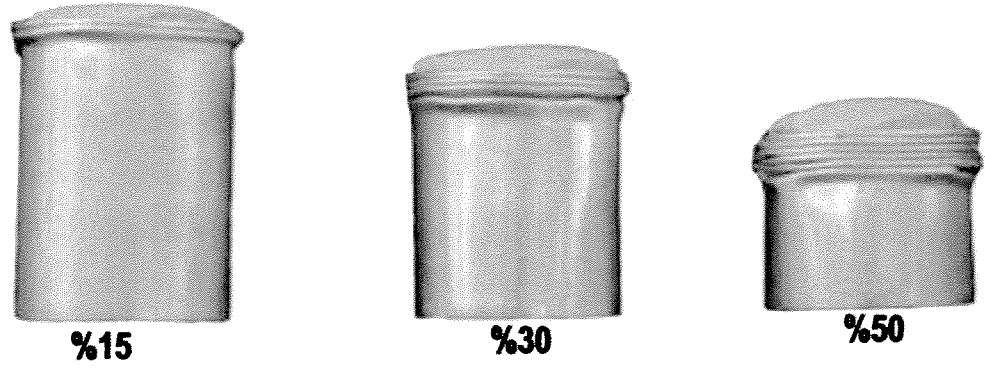
nümerik ve deneysel deformasyon şekli (Şekil 2.82) ve yük-deplasman eğrileri (Şekil 2.83) 16 mm'lik tüpteki gibi yakın benzerlik göstermektedir. Bu tüplerde katlanma sayısı 9-10'dur.



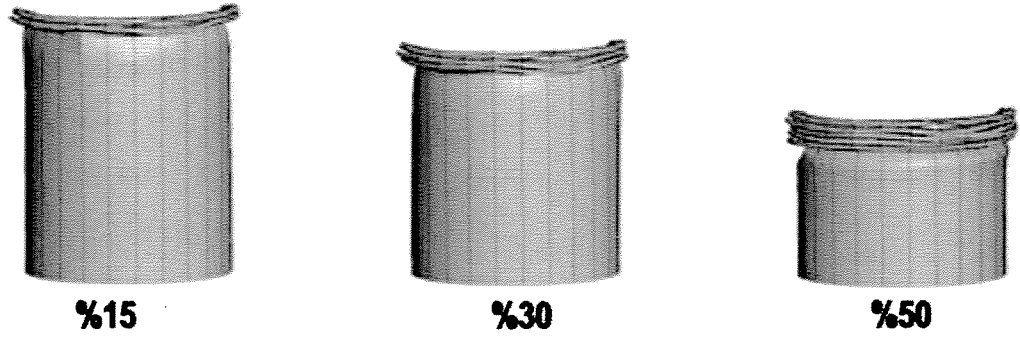
Şekil 2.80 16 mm köpük dolu ($27,8 \text{ kg m}^{-3}$) tüpün farklı yüzde deformasyonlardaki kesit resimleri: (a) deneysel ve (b) nümerik.



Şekil 2.81 16 mm köpük dolu ($27,8 \text{ kg m}^{-3}$) tüpün nümerik ve deneysel yük-deplasman grafikleri.

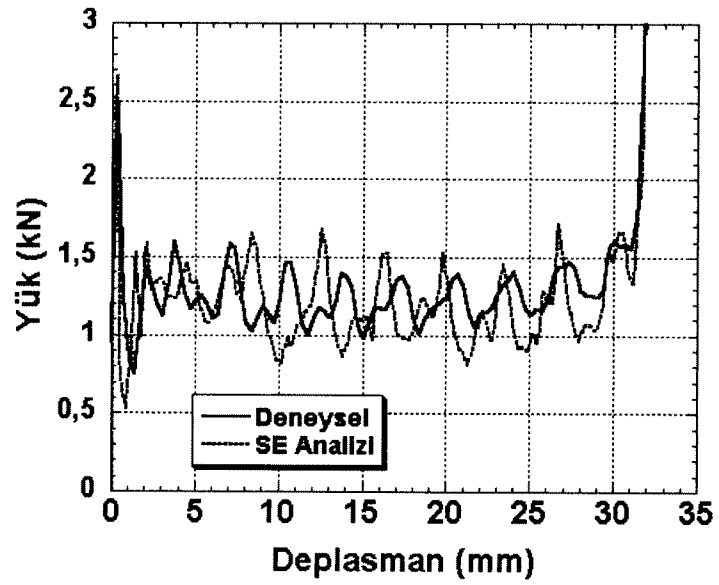


(a)



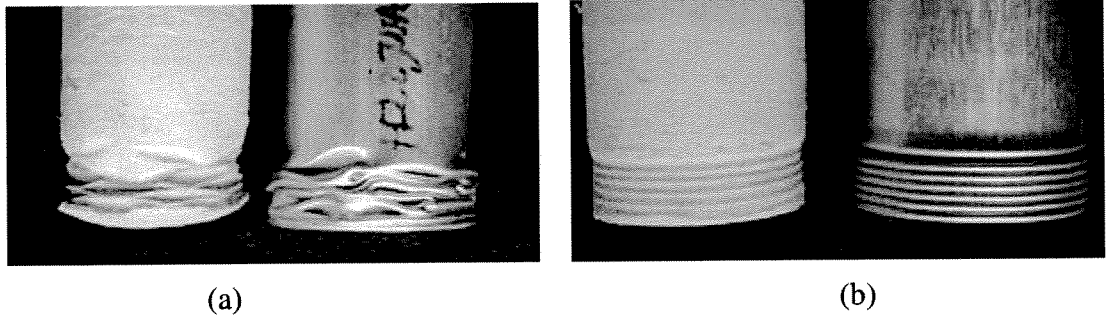
(b)

Şekil 2.82 25 mm köpük dolu ($27,8 \text{ kg m}^{-3}$) tüpün farklı yüzde deformasyonlardaki kesit resimleri: (a) deneysel ve (b) nümerik.

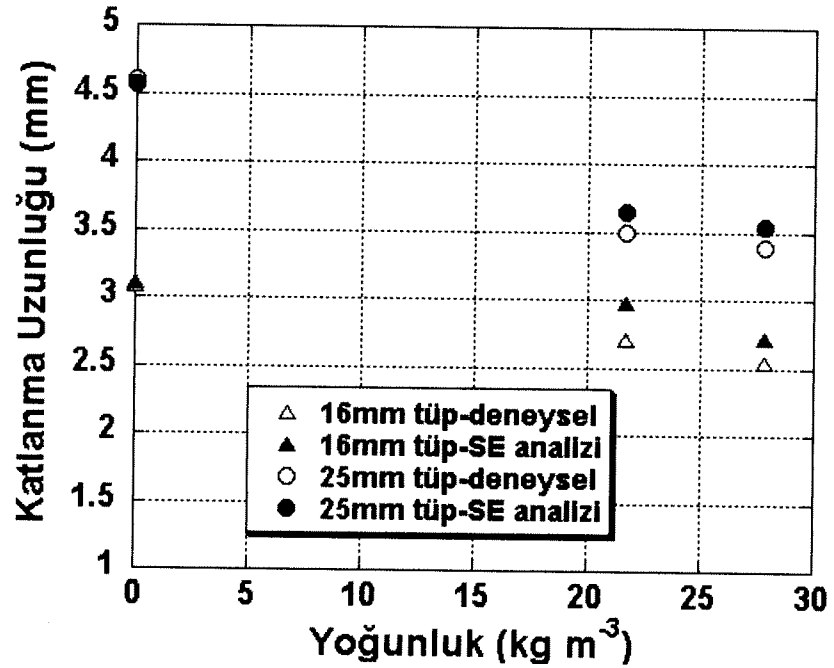


Şekil 2.83 25 mm köpük dolu ($27,8 \text{ kg m}^{-3}$) tüpün nümerik ve deneysel yük-deplasman grafikleri.

Köpük dolgunun katlanmaya gösterdiği direnç veya kısıtlayıcı etkisi köpük dolu tüplerde oluşan katlanma boy azalmasındaki en önemli neden gösterilmektedir. Tüp çeperlerinin deformasyon sırasında katlanırken köpük dolgunun içine girmesi daha kısa katlanma boylarına neden olmakta dolayısı ile aynı mesafede oluşan katlanma sayısı artmaktadır (SANTOSA, 1998). Santosa ve diğerleri (SANTOSA, 2000) kolon yapılarıdaki çeperlerin Al köpük dolgu malzemesi içerisinde ilerlemesinin köpük üzerinde ilave bir baskı kuvvetinin oluşmasına ve bununda kolon yapının bölgesel ezilmesini geciktirdiğini belirtmişlerdir. Benzer ilerleme etkileri deforme edilmiş köpük doldurulmuş tüplerdeki köpük malzemelerin yüzeylerinde de görülmektedir, Şekil 2.84(a) ve (b). Karşılaştırma amacı ile katlanma boylarının deneysel ve nümerik olarak köpük yoğunluğuna bağlı olan değişimi Şekil 2.85’de gösterilmiştir. Nümerik olarak ölçülen katlanma boyları deneysel değerlerden biraz yüksek olmakla beraber yoğunluk artışının katlanma boyunun kısalması üzerindeki etkisi açıkça görülmektedir: buda tüp duvarının katlanmasının dolgu malzemesinin kısıtlama etkisini göstermektedir. 16 mm çaplı tüplere göre 25 mm çaplı tüplerde katlanma boyundaki azalma bu tüplerde deformasyon modunun dolu tüplerde değişmesinin de önemli bir etken olduğu düşünülmektedir. Daha önceki çalışmalarda aynı uzunluğa sahip tüplerde simetrik katlanma sayısının elmas moddan daha yüksek olduğu bulunmuştur (SEITZBERGER, 2000, ANDREWS 1982).



Şekil 2.84 Kısmi ezilmeye uğramış ($27,8 \text{ kg m}^{-3}$) polistiren köpük dolu tüplerin dış yüzeyleri: (a) 16 mm ve (b) 25 mm tüp.

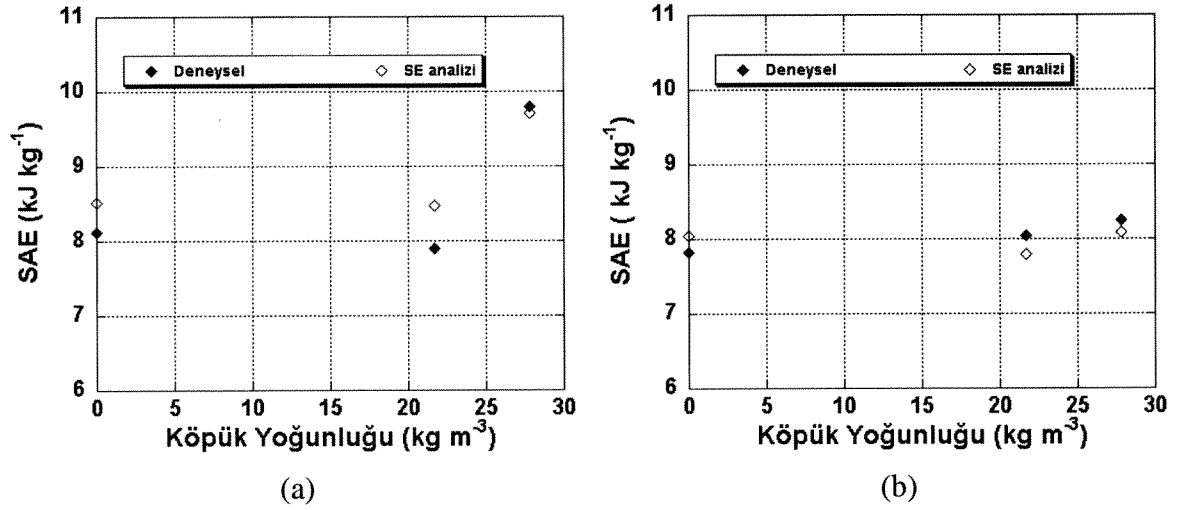


Şekil 2.85 Nümerik ve deneysel katlanma uzunluklarının köpük yoğunluğu ile değişimi.

Elmas moddan simetrik deformasyon moduna geçiş daha önce yapılan Al köpük doldurulmuş Al ve çelik tüplerde, poliüretan doldurulmuş Al tüplerde ve sıkıştırılmış talaş doldurulmuş plastik tüplerde de görülmüştür (GUILLOW, 2001, SANTOSA, 2000, HANSSSEN, 2000(a) ve 2001, SINGACE, 2000(b)). Ayrıca deformasyon modunun elmastan eksensel simetrik moda dönüşmesi köpük doldurmanın kalınlık etkisi olarak tanımlanmıştır. Hanssen ve diğerleri (HANSSSEN, 200(b)) kritik bir Al köpük yoğunluğundan sonra doldurulmuş Al tüplerin deformasyon modunun elmas moddan eksensel simetrik moda değiştiğini bildirmişlerdir. Benzer mod değişimleri poliüretan dolu Al tüplerde köpük yoğunluğunun artması ile elde edilmiştir (GUILLOW, 2001). Bu çalışmada ise 25 mm çaplı tüplerde kullanılan polisitren köpük yoğunluğunun bu kritik değerden yüksek, 16 mm çaplı tüpler içinde düşük kaldığı söylenebilir.

Şekil 2.86(a) ve (b)'de sırası ile 16 mm ve 25 mm çaplı tüpler için %50 deformasyon değerindeki deneysel ve nümerik SAE değerleri verilmiştir. Burada da deneysel ve nümerik değerlerin birbirleri ile uyum içinde oldukları görülmektedir. 16 ve 25 mm çaplı tüpler için deneysel ve nümerik sonuçlar arasındaki farklar sırası ile maksimum %6 ve %2 olarak bulunmuştur. Ayrıca Şekil 2.86'da en düşük yoğunluktaki (21.7 kg m⁻³) polisitren köpük dolu tüplerde SAE değerleri boş tüplerin değerleri ile karşılaştırıldığı zaman neredeyse verimsiz görülmektedir. En yüksek yoğunluktaki (27.8 kg m⁻³) köpük doldurmada ise SAE

değerlerindeki artış oranları 16 mm çaplı tüpler için nümerik olarak %14, deneysel ise %21, 25 mm çaplı tüpler için ise sırası ile %1.5 ve %5 olarak bulunmuştur. Bu artış miktarları Guillow ve diğerlerinin (GUILLOW, 2001) bulduğu, dolu tüplerin ortalama ezilme yüklerinin boş tüp ve dolgu malzemesinin ezilme yüklerinin toplamından yüksek olduğu sonucunun da bir kanıtı olmaktadır. Burada belirtilmesi gereken bir başka nokta boş ve dolu tüplerin enerji emme miktarları aynı kütleye sahip ancak tüp kalınlığı artmış boş tüplerin enerji emme miktarları ile karşılaştırılması gerekmektedir. Alüminyum köpük dolu tüp ve kare yapılar üzerinde yapılan çalışmalar göstermiştir ki kritik bir köpük yoğunluğundan sonra köpük doldurma işlemi verimli olmaktadır (SANTOSA,1998, SEITZBERGER,1997, TOKSOY, 2004) ve bu kritik yoğunluğun altında boş tüpün kalınlığının artırılması köpük doldurmaktan daha verimlidir.



Şekil 2.86 Nümerik ve deneysel SEA miktarları (%50 deformasyon): (a) 16 mm ve (b) 25 mm tüp.

3. SONUÇLAR

Bu projenin ilk kısmında Al ve polisitren kapalı hücreli köpük dolu boş, ikili tüp ve çok tüplü geometrilerin statik hızlarda ezilme davranışları deneysel incelenmiştir. İkinci kısımda ise boş kompozit, hibrid kompozit/metal ve alüminyum köpük dolu kompozit ve hibrid tüplerin ezilme davranışları incelenmiştir. Ayrıca polisitren köpük dolu Al tüplerin ezilme davranışları modellenmiş ve sonuçlar deneylerle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar şöyle sıralanabilir:

(a) Alüminyum tüpler:

Boş Al tüpler elmas modunda ezilmişlerdir. Çalışılan boş tüplerde gözlenen elmas mod, daha önce Al tüplerde gözlendiği üzere (ANDREWS, 1982) düşük et kalınlığı/çap oranının bir sonucudur. Tipik ezilme yük-deplasman grafiği, deformasyon başında oluşan maksimum yükü izleyen daha düşük artan ve azalan yük değerlerinden oluşmaktadır. Bu özellik ince duvarlı tüplerin ezilmesinde oldukça yaygın gözlenmekte olup, basma test plakalarının yatay deformasyonu kısıtlamasından dolayı oluşmaktadır. Tüp uçlarının sınırlandırılması ile katlanma farklı bir şekilde tetiklenebilir. Değişik tüp-uç sınırlandırmaların Al tüplerin ezilme davranışlarına etkileri halihazırda incelenmektedir.

Al köpük dolumu ile Al tüplerin ezilme modu simetrik moda dönüşmüştür. Daha düşük plato gerilmesine sahip polisitren köpük dolumu ise karışık mod ile sonuçlanmıştır. Tüplerde oluşan mod değişimi, köpük dolgunun tüpün kalınlığını artırma etkisinden

kaynaklanmaktadır. Köpük dolgusunun Al boş tüplere etkilere şöyle sıralanabilir: (a) ortalama yük, boş tüp ve köpüğün ortalama yüklerinin toplamının üzerine çıkmakta (etkileşim etkisi) ve (b) katlanma uzunluğu azalmakta ve sayısı ise artmaktadır. Benzer sonuçlar ikili tüplerde de görülmüştür. Tekli tüplerde köpüğün güçlendirme katsayısı 1.7 bulunmuştur. Bu değer daha önce kare tüpler için belirlenen 1.8 değeri ile uyusmaktadır.

Boş tüplere benzer olarak, altıgen ve kare paketli tüplerde köpük dolgusu deformasyon modunu elmadan simetrik deformasyona çevirmiştir. Boş paketli tüplerde ortalama ezilme yükü eşit sayıdaki boş tüplerin ezilme yüklerinin toplamından daha yüksektir. Ortalama ezilme yükündeki bu artış, tüpler ve tüpler ve kalıp duvarları arasındaki sürtünme ve sınırlamaların sonucudur. Bu etki daha fazla tüp bulunan altıgen paketlerde daha yüksektir. Köpük dolu çoklu yapılarda köpük yoğunluğu ile ortalama ezilme yükü artmış ve ortalama ezilme yükü tüp+köpük ortalama yüklerinin üzerine çıkmıştır. Bu sonuçlar çoklu tüplerde ki güçlendirme etkisinin tekli tüplerden daha yüksek olduğunu göstermektedir. İkili tüplerin güçlendirme etkisi çoklu tüplerle benzerdir. Dolayısıyla her iki geometride köpük dolu tüplerde güçlendirme etkisini artırmak için kullanılabilir.

Köpük dolu tüplerde enerji emme boş tüp ve köpüğün enerjilerinin toplamından daha yüksektir. Ancak boş tüpün kalınlığının artırılması ile karşılaştırıldığında köpük dolu tüplerin enerji emme özellikleri kalın tüpten daha düşüktür. Bu çalışma sonucunda, verimli tüp dolgusu için güçlendirme etkisi ve plato gerilmesi esas alınarak uygun tüp-köpük kombinasyonunun seçiminin önemi ortaya çıkmıştır. Etkin köpük dolgusu için seçilen köpüğün yoğunluğunun kritik bir değerin üzerinde olması gerekmektedir. Plato gerilmesi belirlenen köpükler için, kritik yoğunluk analitik veya nümerik yöntemlerle hesaplanabilir. Verimli Al köpük dolgusu için mukavemeti yüksek Al-alaşım veya seramik parçacık takviyeli köpüklerin tercih edilmesi gerekmektedir. Örneğin bu proje kapsamında hazırlanan SiC parçacık takviyeli Al köpüklerin plato gerilmesinin Al köpüklerinkinden daha yüksek olduğu bir başka çalışmada gösterilmiştir (GUDEN, 2006).

Çoklu paketli tüpleri köpük ile doldurmak ile elde edilen SAE miktarı boş tüpten daha yüksek olmamasına karşın, çoklu tüp geometrileri benzer köpük yoğunluklarında ki tek köpük dolu tüplerden daha yüksek SAE'ye sahiptirler. Bu ise oluşan sürtünme ve sınırlamalardan kaynaklanmaktadır.

(b) Kompozit tüpler:

Kompozit boş tüplerde iki farklı ezilme modu gözlenmiştir: ilerleyen ezilme ve katastrofik kırılma (basma bantları). İlerleyen ezilme daha yüksek ortalama yük ve SAE değerleri ile sonuçlanmıştır. Kalınlığın düşük olduğu tüplerde ilerleyen ezilme modunun daha fazla oluşması tüpün uç yüzeylerinde kesme esnasında oluşan hasarlardan ve basma aparatı ile tüp uç yüzeyleri arasındaki homojen olmayan kontaklardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Kompozit tüplerde ilerleyen ezilmenin tetiklenmesinde tüp uç şeklinin önemi bu çalışma ile ortaya çıkmıştır. Uçları işlenmiş kompozit tüplerin ezilme deformasyonunun araştırılması bu yapılarda enerji emme özelliklerin artırılmasında oldukça faydalı olabilir. Boş tüpler ilerleyen ezilme modunda maksimum yük sonrasında sabit bir yük altında deforme olmaktadır. Bu ise ortalama yük kullanılarak SAE hesaplanmasına olanak sağlamıştır.

Hibrid kompozit/metal tüplerde deformasyon kompleks elmas modda oluşmuştur. Bu ise hibrid tüplerde, kompozit ve Al tüplerin SAE toplamlarından daha yüksek SAE'lere neden olmaktadır. SAE değerlerindeki bu artış Al tüp deformasyonuna kompozit tüp tarafından oluşturulan sınırlamanın sonucudur. Ortalama yüke göre SAE hesaplandığında boş kompozit tüp daha yüksek SAE değerlerine sahiptir.

Köpük dolu kompozit tüplerde iki farklı davranış gözlenmiştir. Yüksek köpük yoğunluklarında, köpük dolumu ile SAE değerleri kompozit tüp ve köpüğün SAE toplamlarının üzerine çıkmaktadır. Diğer durumda ise tüp ve köpük ayrı deforme olmaktadır. Bu etkilerin nedenleri tartışılmıştır.

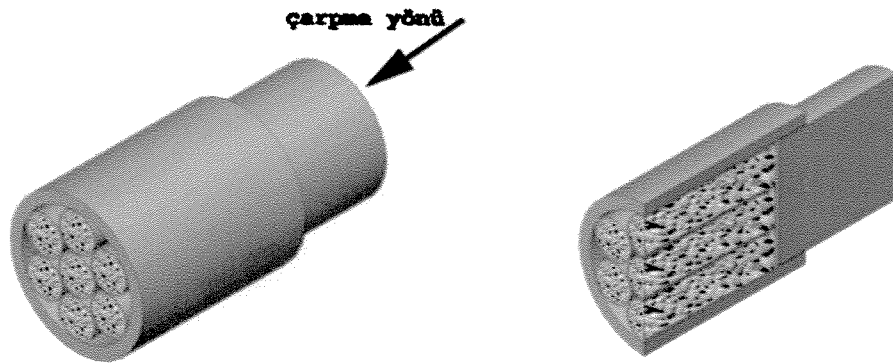
Hibrid tüplerde köpük dolumu SAE değerlerini artırmakta etkisizdir. Bunun temel nedeni ise Al tüpün katlanmasına karşı köpüğün gösterdiği direnç nedeni ile kompozit tüpün ezilme esnasında katastrofik kırılmasıdır.

(c) Modelleme:

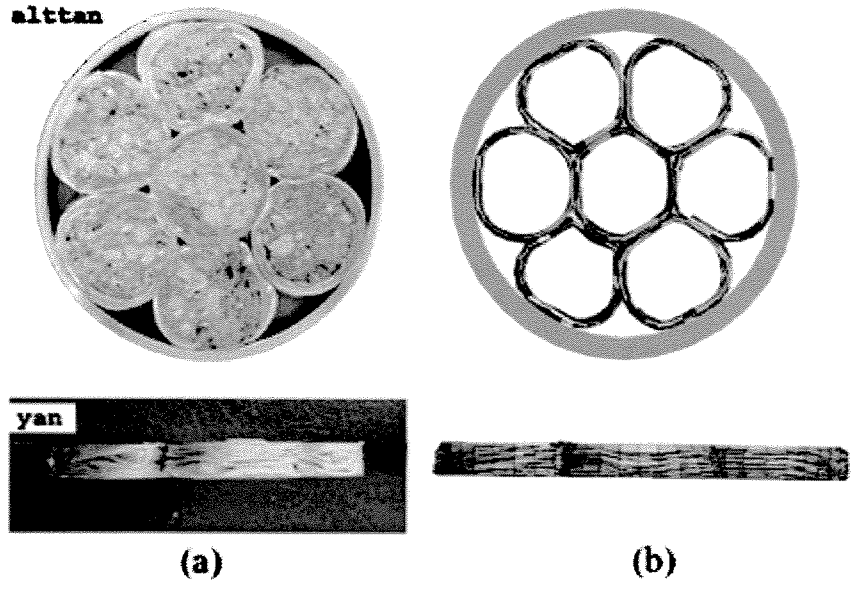
Ekstrüde polisitren köpük dolu Al tüplerin statik ezilme davranışları deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Nümerik sonuçlar PAM-CRASH™ ekspilisit sonlu elemanlar kodu kullanılarak çıkarılmıştır. Değişik yoğunluk oranları ve deformasyon hızları kullanılarak kinetik ve iç enerji değişimleri incelenmiştir. Genel olarak sonlu elemanlar ve deneysel sonuçların birbirlerini sağladıkları görülmüştür. Köpük doldurmanın ince çeperli Al tüplerin

ezilme davranışındaki etkisi model ve deneysel çalışma ile gösterilmiştir. Köpük doldurulmuş tüplerde katlanma sayısı hem elmas hem de eksensel simetrik deformasyonda artmıştır. Ayrıca katlanma sayısı köpük yoğunluğunun artması ile de yükselmiştir. Büyük çaplı tüplerde dolgu malzemesinin deformasyon sırasındaki ezilmeye karşı çalışması, deformasyon modunun elmas modundan eksensel simetrik moda dönmesine sebep olduğu bulunmuştur. Köpük doldurulmuş tüplerde enerji emme miktarı köpük yoğunluğunun artmasıyla artışı gösterilmiş, ayrıca tüp ve köpük malzemenin absorbe ettikleri enerjilerin toplamından daha fazla olduğu gözlenmiştir.

Bu proje sonucunda çoklu paketli köpük dolu tüplerin ve hibrid kompozit/Al tüplerin ezilme kutularında kullanılmalarının (sabit hacim) boş tüplerden daha avantajlı olduğu bulunmuştur. Ağırlığın önemli olduğu durumlarda ise hibrid tüpler boş tüplerle karşılaştırılabilecek SAE değerlerine sahiptirler. Modelleme çalışmaları sonucunda farklı tüp ve köpük dolgu geometrilerin deneysel çalışma sayısını azaltarak modellenebileceği bulunmuştur. İleriye dönük bir çalışmada çoklu ve hibrid tüplerden oluşan gerçek bir ezilme kutusu modellenerek çalışılacaktır. Şekil 3.1’de tasarlanan altıgen paketli köpük dolu tüplerden oluşan ezilme kutusu gösterilmektedir. Şekil 3.2(a) ve (b)’de ise tasarlanan yapının sırasıyla deneysel ve model ezilme görüntüleri verilmektedir. Benzer bir tasarım kübik paketli kutular için de yapılarak, en verimli yapı belirlenecektir.



Şekil 3.1 Tasarlanan altıgen paketli köpük dolu tüplerden oluşan ezilme kutusu ve kesit görünüşü.



Şekil 3.2 Tasarlanan altıgen paketli köpük dolu tüplerin (a) deneysel ve (b) model ezilme görüntüleri.

Yararlanılan kaynaklar

- ABBAS, H. Tyagi, B. L., Arif, M, Grupta, N. K., Curved fold model analysis for axisymmetric axial crushing of tubes, *Thin-Walled Structures*, 2003, in press.
- ABRAMOWICZ, W, Jones, N, Dynamic axial crushing of circular tubes, *International Journal of Impact Engineering*, 2, 263-81, (1984)
- ABRAMOWICZ, W, Jones, N, Dynamic progressive buckling of circular and square tubes, *International Journal of Impact Engineering*, 4, 243-69,(1986).
- ABRAMOWICZ, W., Wierzbicki, T., Axial crushing of foam-filled columns, *Journal of Mechanical Science*, 30, 263, (1988).
- AKKAYA, Ş., Altıntaş, H. Statistical analysis of highways traffic accidents in Turkey: 1989-1999, V Ulusal Ekonometri ve İstatistik Sempozyumu, Çukurova University (2001)pp:19-22 .
- ALEXANDER, J. M., An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading, *Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, 13,10-15, (1960).
- ANDREWS K.R.F, England G.L., Ghani, E., Classification of the axial collapse of cylindrical tubes under quasi-static loading. *Int J Mech Sci* 25, 687-96,(1982).
- ASHBY, M., Evans, A. G., Fleck, N.A., Gibson, L. J., Hutchinson J. W., Wadley, H. N. G., *Metal foams design guide*, Cambridge (1999).
- BANHART, J., Baumeister, J., Deformation characteristics of metal foams, *J. Materials Science*, 33,1431-1440,(1998).
- BANHART, J., Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams, *Progress in Materials Science*, 46, 559-632,(2001).
- BARDI, F.C., Yun, H. D., Kyriakides, S., On the axisymmetric progressive crushing of circular tubes under axial compression, *International Journal of Solid Structures*, 40, 2003, in press.
- BEALS, J. T., Thompson, M. S., Density gradient effects on aluminum foam compression behavior, *J. Materials Science*, 32, 3595-3600, (1997).
- ELBİR, S., Yılmaz, S., Güden, M., Kapalı hücreli Alüminyum köpük metallerin üretim metodları ve mekanik özellikleri , *Metaller Dergisi*, 120,35-42, (1999).
- ELBİR S., Yılmaz, S, Toksoy, A. K., Güden, M., Hall, I. W., SiC-particulate aluminum composite foams produced by powder compacts: foaming and compression behavior, *J. Materials Science*, 38, 4745-4755,(2003)
- EVANS, A. G., Hutchinson, J. W., Ashby, M. F., Multifunctionally of cellular metal systems, *Progress in Materials Science*, 43, 121-171, (1999).
- GIBSON, L. J., Ashby, M. F., *Cellular solids: structures and properties*, Cambridge University Press (1997).
- GRENESTEDT, J. L., Influence of imperfections on effective properties of cellular solids, *MRS Symposium Proceeding Vol. 521*, San Francisco (1998).
- GRUPTA, N. K., Abbas, H., Some considerations in axisymmetric folding of metallic round tubes, *International Journal of Impact Engineering*, 25, 331-344, (2001).

- GUDEN M, Yüksel S, Compression behavior of SiC-particulate foams produced by foaming from powder compacts, *J. Materials Science* (2006 basımda)
- GUILLOW, S.R., Lu. G., Grezbieta, R.H., Quasi-static compression of thin-walled circular aluminum tubes, *Int. J. Mechanical Sciences*, 43,2103-23,(2001).
- HALL, I. W., Guden M., Yu, C. J., Crushing of aluminum closed-cell foams: density and strain effects, *Script Mater.*, 43,515-521, (2000).
- HANSSSEN A.,G., Langseth, M., Hopperstad, O.P., Static and dynamic crushing of circular aluminum extrusions with aluminum foam filler. *International Journal of Impact Engineering*, 24, 475-507,(2000b).
- HANSSSEN, A. G., Langseth, M., Hopperstad, O. S., Static crushing of square aluminum extrusions with aluminum foam filler, *International Journal of Mechanical Science*, 41, 967-993, (1999).
- HANSSSEN, A. G., Langseth, M., Hopperstad, O. S., Static and dynamic crushing of square aluminum extrusions with aluminum foam filler, *International Journal of Impact Engineering*, 24, 347-383, (2000).
- HANSSSEN, A. G., Langseth, M., Hopperstad, O. S., Crash Behavior of Foam-based Components: Validation of Numerical Simulations, *Advanced Engineering Materials*, 10, 771-776,(2002).
- JIMANEZ, M.A., Miravete, A., Larrode, E., Revuelta, D., Effect of trigger geometry on energy absorption in composite profiles, *Composite Structures*, 48,107-111,(2000).
- JONES, N., Abramowicz, W., Static and dynamic axial crushing of circular and square tubes", In : Reid SR, editor, *Metal Forming and Impact Mechanics*, New york: Pergamon Press, 1985, 225-47.
- LAMPINEN, B.H., Jeryan, R.A., Effectiveness of polyurethane foam in energy absorbing structures, *SAE paper* 820494, 1982.
- MAITI, S. K., Gibson, L. J., Ashby, M. F., Deformation and energy absorption diagram for cellular solids, *Acta Mater.* 32,963-1975, (1984).
- MCCULLOUGH, K. Y. G., Fleck N. A., Ashby, M. F., Uniaxial stress-strain behavior of aluminum alloy foams, *Acta Mater.*, 47,2323-2330, (1999).
- PUGSLEY, AG., Macaulay, M., The large scale crumpling of thin cylindrical columns, *Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, 13, 1-9, (1960).
- RAMAKRISHNA, S., Hamada, H. Energy Absorption Characteristics of Crash Worthy Structural Composite Materials, *Engineering Materials*, 141-143, 585-620,(1998).
- REDDY, T. Y., Wall, R. J., Axial compression of foam filled thin-walled circular tubes, *International Journal of Impact Engineering*, 7,151-166(1988).REID, S.R., Reddy T.Y., Gray M.D., Static and dynamic axial crushing of foam filled sheet metal tubes, *Int. J. Mechanical Science*, 23,295-322,(1986).
- SANTOSA, S., Wierzbicki, T., Crash behavior of box columns filled with aluminum honeycomb or foam, *Comput. Stuct.*; 68,343-67, (1998).
- SANTOSA, S., Wierzbicki, T., Hanssen, A. G., Langseth, M., Experimental and numerical studies of foam-filled sections, *International Journal of Impact Engineering*, 24, 509-534, (2000).

- SEITZBERGER, M., Rammerstorfer, F. G., Gradinger, R., Degischer, H. P., Blaimschein, M., Walch, C., Experimental studies on the quasi-static axial crushing of steel columns filled with aluminum foam, *International Journal of Solids and Structures*, 37,4125-47, (2000)
- SEITZBERGER M, Rammerstorfer FG, Degischer HP. Crushing of axially compressed steel tubes filled with aluminum foam. *Acta Mech*, 125,93-105, (1997).
- SHERWOOD, J. A., Forest, C. C., Constitutive modeling and simulation of energy absorbing polyurethane foam under impact loading, *Plastics and Plastics Composites*, ed:V. J., Stokes MD-Vol, 29, (1991) Pp: 347-370.
- SIMONE, A. E., Gibson, L. J., The effect of cell face curvature and corrugations on the stiffness and strength of metallic foams, *Acta Mater.*, 4, 3929-3935, (1998).
- SIMONE, A. E., Gibson, L. J., Effect of solid distribution on the stiffness and strength of metallic foams, *Acta Mater*, 46,2139-2150, (1998).
- SINGACE A.,A., Collapse behaviour of plastic tubes filled with wood sawdust, *Thin-walled Structures*, 37,163-87, (2000b)
- SINGACE, A. A., El-Sobky, H. Interplay of factors influencing collapse modes in axially crushed tubes. *IJ Crash*, 5:279-97, (2000a)
- SINGACE, A.A., Elbosky, H., Further experimental investigation on the eccentricity factor in the progressive crushing of tubes, *International Journal of Solid Structures*, 33, 3517-3538,(1996).
- SINGACE, A.A., Axial crushing analysis of the tubes deforming in the multi-lobe mode, *International Journal of Mechanical Science*, 41, 868-890, (1999).
- SINGACE, A.A., Elbosky, H., On the eccentricity factor in the progressive crushing of tubes, *International Journal of Solid Structures*, 32, 3589-3602,(1995).
- SUGIMURA Y., Mayer, J., He, M. Y., Bart-Smith, H., Grenestedt, J., Evans, A. G., On the mechanical performance of closed cell Al alloy foams, *Acta Mater.* 12,5245-5259, (1997).
- THORNTON, P. H., Energy absorptions by foam filled structures, *SAE paper* 800372, 1980.
- TOKSOY, A. K., Guden, M. The strengthening effect of polystyrene foam filling in aluminum thin-walled cylindrical tubes, *Thin-walled Structures*, 43, 333-350,(2005).
- TOKSOY, A K, Tanoglu, M., Guden, M., Hall, I. W., Effect of adhesive on the strengthening of aluminum foam-filled circular tubes. *J. Materials Science*, 39,1503-1506,(2004).
- WIERZBICKI, T., Bhat, S.U., Abramowicz, W., Brodtkin, D., A two folding elements model of progressive crushing of tubes, *International Journal of Solids and Structures*, 29, 3269-3288,(1992).
- WIERZBICKI, T., Abramowicz, W., Axial crushing of multi corner sheet metal columns, *Journal of Applied Mechanics*, 50, 727-734, (1983).
- WIERZBICKI, T., Abramowicz, W., On the crushing mechanics of thin-walled structures, *Journal of Applied Mechanics*, 56, 113-120, (1989).
- WIERZBICKI, T, Bhat S U, Abramowicz W, Brodtkin D. Alexander revisited- a two folding elements model of progressive crushing of tubes. *International Journal of Solids and Structures*, 29,3269-3288 (1992).

PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Kodu: 102M033 (MİSAG 227)
Proje Başlığı: Çoklu Alüminyum Kapalı Hücreli Köpük Dolu Alüminyum ve Polimerik Kompozit Tüplerin Ezilme Davranışlarının Belirlenmesi
Proje Yürütücüsü ve Yardımcı Araştırmacılar: Doç. Dr. Mustafa Güden, Doç. Dr. Metin Tanoğlu, Halit Kavi ve Sinan Yüksel
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi: İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü. Makina Müh. Böl. 35437 Gülbahçe Kampusu Urla-İZMİR
Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi: İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü. Makina Müh. Böl. 35437 Gülbahçe Kampusu Urla-İZMİR
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri: 1/9/2002-1/3/2005
Öz : Bu projenin ilk kısmında Al ve polistiren kapalı hücreli köpük dolu boş, ikili tüp ve çok tüplü geometrilerin statik hızlarda ezilme davranışları deneysel incelenmiştir. İkinci kısımda ise boş kompozit, hibrid kompozit/metal ve alüminyum köpük dolu kompozit ve hibrid tüplerin ezilme davranışları incelenmiştir. Proje sonucunda çoklu paketli köpük dolu tüplerin ve hibrid kompozit/Al tüplerin ezilme kutularında kullanılmalarının (sabit hacim) boş tüplerden daha avantajlı olduğu bulunmuştur. Ağırlığın önemli olduğu durumlarda ise hibrid tüpler boş tüplerle karşılaştırılabilecek spesifik enerji emme değerlerine sahiptirler. Modelleme çalışmaları sonucunda farklı tüp ve köpük dolgu geometrilerin deneysel çalışma sayısını azaltarak modellenebileceği bulunmuştur.
Anahtar Kelimeler: Tüp, kompozit, alüminyum köpük, modelleme, basma testi
Projeden Kaynaklanan Yayınlar: Hakemli SCI dergiler (Kabul ve basılanlar) 1. M. Güden, S. Yüksel Compression behavior of SiC-particulate foams produced by foaming from powder compacts J. Materials Science (kabül, basımda, 2006) 2. M. Guden, H. Kavi, A. K. Toksoy Interaction effect and energy absorption in polystyrene foam filled thin-walled aluminum tubes J. Materials Science (kabül, basımda, 2006). 3. L. Aktay, A K. Toksoy, M. Guden Quasi-static axial crushing of extruded polystyrene foam-filled thin-walled aluminum tubes:experimental and numerical analysis Materials and Design 27 (2006) 556-565.

4. K. Toksoy, M. Güden The strengthening effect of polystyrene foam filling in aluminum thin-walled cylindrical tubes Thin-walled Structures 43(2005) 333-350.

5. Guden M, Kavi H, Toksoy AK. Predicting energy absorption in a foam-filled thin-walled aluminum tube based on experimentally determined strengthening coefficient. Materials and Design 27 (2006) 263-269.

Hakemli SCI dergiler (sunulanlar)

6. L. Aktay, A. F. Johnson, A. K. Toksoy, B.-H. Kröplin, M. Güden, The smooth particle hydrodynamics and coupled finite element/smooth particle hydrodynamics modeling of the progressive axial crushing of foam-filled aluminum tubes Part I: monolithic structural components, Mechanics of Materials (sunuldu)

7. L. Aktay, B.-H. Kröplin, M. Güden, The smooth particle hydrodynamics and coupled finite element/smooth particle hydrodynamics modeling of the progressive axial crushing of foam-filled aluminum tubes Mechanics of Materials (sunuldu)

Konferanslar

1. M. Güden, Powder Metallurgy processing of aluminium closed-cell foams 9. Denizli Malzeme Sempozyumu, 14-17 April 2004, Denizli, Turkey.

2. H. Kavi, S. Yüksel, M. Tanoğlu, M. Güden, Crushing behavior of aluminum foam filled aluminum tubes, 9. Denizli Malzeme Sempozyumu, 14-17 April 2004, Denizli, Turkey.

3. K. Toksoy, M. Güden, Compression behavior of extruded polystyrene foams, 9. Denizli Malzeme Sempozyumu, 14-17 April 2004, Denizli, Turkey.

4. M. Güden Foaming and Compression Behavior of SiC-Particulate Aluminum Closed-Cell Foams Produced by Powder Compacts, Syntactic and composite foams, International Engineering Conferences, 1-5 August, Banff, Canada.

5. M. Güden Processing and characterization of SiC-particulate reinforced Aluminum foams with enhanced mechanical, thermal and sound absorption properties, Kazakh-British Technical University, 2005 year Akademik Konferans, Almaty, Mayıs 2005.

Bilim Dalı: Malzeme

Doçentlik B. Dalı Kodu: Mekanik Metalurji