

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ORCID : - - -

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :

ORCID : - - -

Trabzon

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın hazırlanmasında bilgi, birikim ve tecrübeleriyle her zaman yanımda olan ve bana yol gösteren değerli danışmanım Prof. Dr. Hasan GEDİKLİ'ye teşekkür ederim. Tez izleme komitesinde bulunan ve bu süreçte bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren Prof. Dr. Bülent ÖZTÜRK ve Prof. Dr. Recep GÜMRÜK'e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca bana yardımını hiç esirgemeyen Öğr. Gör. Ali İhsan BUDUR'a, Arş. Gör. Dr. Mehmet SEYHAN'a, Arş. Gör. Doğan ACAR'a ve Arş. Gör. Durukan Burak DİLEK'e vermiş olduğu katkılardan dolayı teşekkür ederim. İlk okuldan bugüne gelmemde emeği olan ismini zikredemeyeceğim bütün hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim. Ayrıca daha önce vefat eden babama, tez yazma sürecinde vefat eden anneme ve her daim yanımda olan kardeşlerim ve aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Tez yazma sürecinde ve öncesinde bana hep destek olan ve benim sorumluluklarımı paylaşan değerli eşim Yasemin'e çok teşekkür ederim.

Zaferle değil sefer ile mükellefiz, Allah seferimizi mübarek eylesin.

Dursun MERİÇ

Trabzon, 2023

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Yapısal parametrelerin ince cidarlı tüplerin enerji sönümleme performansı üzerine olan etkilerinin incelenmesi ve optimizasyonu” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Hasan GEDİKLİ’nin sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 25/01/2023

Dursun Meriç

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ	IV
İÇİNDEKİLER	V
ÖZET.....	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
TABLolar DİZİNİ	XVI
SEMBOLLER DİZİNİ	XVII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Enerji Sönümleyici Yapılar	2
1.2.1. Metalik Tüpler	5
1.2.2. Kompozit Malzemeler ve Tüpler.....	9
1.2.3. Metalik Köpükler ve Köpük Dolgulu Yapılar	22
1.2.4. Hibrit Tüpler	27
1.3. Enerji Sönümleyici Yapıların Modellenmesi	31
1.3.1. Kompozit Malzemelerin Modellenmesi	31
1.3.1.1. Nano Ölçekli Modelleme	32
1.3.1.2. Mikro Ölçekli Modelleme	32
1.3.1.3. Meso Ölçekli Modelleme	33
1.3.1.4. Makro Ölçekli Modelleme.....	33
1.3.2. Köpük Malzemelerin Modellenmesi	43
1.4. Optimizasyon.....	45
1.4.1. Tasarım Değişkenleri.....	47
1.4.2. Örneklem Noktalarının Belirlenmesi.....	47
1.4.3. Kısıtlar	48
1.4.4. Amaç Fonksiyonları	48
1.4.5. Değişken Sınırları	49
1.4.6. Meta Modelin Kurulması	50

1.4.7.	Optimizasyon Algoritması.....	50
1.5.	Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	52
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR	54
2.1.	DeneySEL Çalışmalar	54
2.1.1.	Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi	54
2.1.1.1.	Kompozit Plakaların ve Tüplerin Üretilmesi.....	54
2.1.1.2.	Mekanik Deneyler	55
2.1.2.	Tüplerin Statik Deneyleri	59
2.1.3.	Tüplerin Dinamik Deneyleri.....	62
2.2.	Sayısal Çalışmalar	62
2.2.1.	Metalik Tüplerin Modellenmesi	63
2.2.2.	Kompozit Tüplerin Modellenmesi	64
2.2.3.	Hibrit Tüplerin Modellenmesi	66
2.2.3.1.	İkili Hibrit Tüplerin Modellenmesi	66
2.2.3.2.	Alüminyum Köpük Malzemesinin Modellenmesi	67
2.3.	Optimizasyonlar Çalışmaları	69
2.3.1.	Metalik Tüplerin Optimizasyonu.....	70
2.3.2.	Kompozit Tüplerin Optimizasyonu	72
2.3.3.	Hibrit Tüplerin Optimizasyonu	72
3.	BULGULAR VE İRDELEME	74
3.1.	Malzemelerin Mekanik Özellikleri.....	74
3.2.	Tüplerin Statik Deney Sonuçları ve Sayısal Karşılaştırılması.....	78
3.3.	Tüplerin Dinamik Deney Sonuçları.....	83
3.4.	Metalik Tüpler Üzerine Gerçekleştirilen Çalışmalardan Elde Edilen Bulgular	87
3.4.1.	Üniform Kalınlıklı Tüpler İçin Kuvvet-Yer Değiştirme Grafikleri.....	87
3.4.2.	DKT'ler İçin Kuvvet Yer Değiştirme Grafikleri	93
3.4.3.	DKT'lerin Optimizasyon Sonuçları	96
3.5.	Kompozit Tüpler Üzerine Gerçekleştirilen Çalışmalardan Elde Edilen Bulgular	102
3.5.1.	Fiber Açısının SE ve Pik Kuvvete Etkisi	102
3.5.2.	Kompozit Tüplerin Optimizasyon Sonuçları.....	108
3.6.	Hibrit Tüpler Üzerine Gerçekleştirilen Çalışmalardan Elde Edilen Bulgular	109
3.6.1.	Köpük Dolgusunun SE ÇKO ve Pik Kuvvete Etkisi.....	110
3.6.2.	Hibrit Tüplerin Optimizasyon Sonuçları	118
4.	SONUÇLAR	123

5.	ÖNERİLER	126
6.	KAYNAKLAR.....	127
7.	EKLER	142
	ÖZGEÇMİŞ.....	158



Doktora Tezi

ÖZET

YAPISAL PARAMETRELERİN İNCE CİDARLI TÜPLERİN ENERJİ SÖNÜMLEME PERFORMANSI ÜZERİNE OLAN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ VE OPTİMİZASYONU

Dursun MERİÇ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Hasan GEDİKLİ
2023, 141 Sayfa

İnce cidarlı tüpler enerji sönmüleyici yapılar olarak kara, deniz ve hava taşıtlarında yaygın kullanılmaktadırlar. Metal, kompozit ve metal-kompozit şeklinde farklı malzemelerden üretilen ince cidarlı tüplerin tasarımında kalınlık değışimi, koniklik açısı, elyaf açi dizilimi ve köpük dolgusu gibi yapısal parametreler kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında yapısal parametrelerin enerji sönmüleme performansına olan etkileri sayısal ve deneysel olarak üç bölümde araştırılmıştır. Birinci bölümde; 0° (düz), 5° ve 10° konik açılı sekiz farklı kalınlık bölgesine sahip değışken kalınlıklı metalik tüplerin enerji sönmüleme davranışları incelenmiştir. Bölge kalınlıklarındaki değışimin enerji sönmüleme üzerindeki etkisi sayısal olarak belirlenmiş ve bölge kalınlıkları optimize edilmiştir. İkinci bölümde; 0°, 5° ve 10° koniklik açısına ve altı elyaf katmanına sahip kompozit tüplerin elyaf açi dizilimlerinin enerji sönmüleme davranışına olan etkileri incelenmiş ve elyaf açi dizilimi optimize edilmiştir. Elyaf açi dizilimi değıştirilerek düz tüplerde sönmülenen enerji değeri % 118 artmıştır. Üçüncü bölümde ise kompozit, alüminyum ve çelik malzemedan yapılmış uç uca eklenmiş fonksiyonel köpük dolgulu hibrit tüplerin enerji sönmüleme davranışları incelenmiş ve optimize edilmiştir. Köpük dolgulu hibrit tüplerin enerji sönmüleme performansının içi boş tüplere göre % 435'e kadar arttığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: İnce cidarlı tüpler, Hibrit enerji sönmüleyiciler, Metalik köpük, Düzgün parçacık hidrodinamiği, Çok amaçlı optimizasyon

PhD. Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION AND OPTIMIZATION OF THE EFFECTS OF STRUCTURAL PARAMETERS ON THE ENERGY ABSORPTION PERFORMANCE OF THIN WALLED TUBES

Dursun MERİÇ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Hasan GEDİKLİ
2023, 141 Pages,

Thin-walled tubes widely used as energy absorbing structures in land, sea and air vehicles. Structural parameters such as thickness variation, conical angles, fiber orientation angel and foam filling are used in the design of thin-walled tubes produced from different materials such as metal, composite and metal-composite. In this thesis, the effects of these structural parameters on the energy absorption behavior were investigated numerically and experimentally. In the first chapter; the energy absorption behaviors of variable thickness metallic tubes with eight different thickness parts with 0° (straight), 5° and 10° conical angles were investigated. The effect of the change in part thickness on the energy absorption was determined numerically and the part thicknesses were optimized. In the second chapter; the effects of fiber orientation angle of composite tubes with 0° (straight), 5° and 10° conical angles and six fiber plies on the energy absorption behavior were investigated and the fiber orientation angle was optimized. In the third chapter, the energy absorption behavior of the functional foam filled end-to-end added hybrid tubes made of composite, aluminum and steel materials were investigated and optimized. In conclusion the energy absorption performance of foam filled hybrid tubes increased by 435% compared to hollow tubes.

Keywords: Thin-walled tubes, Hybrid energy absorbers, Metallic foam, Solid particle hydrodynamics, Multi-objective optimization

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1.	1966-2021 yılları arasında Türkiye’de bulunan motorlu taşıt sayısı [1].	1
Şekil 1.2.	Araçlarda kullanılan enerji sönümleyici ince cidarlı yapılar [4].	2
Şekil 1.3.	Eksenel yükleme koşulları altında metalik tüplerin deformasyon modları. (a) akordeon (genişletilebilir, eksenel simetrik veya halka) modu; (b) elmas (genişletilemez veya simetrik olmayan) mod; (c) karma mod; ve (d) üç çevresel loblu elmas modu [11].	5
Şekil 1.4.	Farklı kesit geometrilerinin enerji sönümleme davranışına etkisi (a) üçgen, (b) kare, (c) dikdörtgen, (d) beşgen, (e) altıgen, (f) sekizgen ve (g) daire [17].	6
Şekil 1.5.	FDT ve üniform kalınlıklı tüplerin kuvvet-yer değiştirme eğrileri ve deformasyon şekilleri [27].	8
Şekil 1.6.	2015-2021 arasında global ölçekte kompozit kullanımı.....	10
Şekil 1.7.	Kompozit malzemelerin sınıflandırılması [40].	10
Şekil 1.8.	Vakum torbalama yöntemi [44].	11
Şekil 1.9.	(a) katastrofik ve (b) ilerleyici hasar için tipik kuvvet yer değiştirme grafikleri	12
Şekil 1.10.	Hasar başlatıcı farklı tetikleme mekanizmaları [46].	13
Şekil 1.11.	Enine kesme hasar modu [45].	13
Şekil 1.12.	Gevrek kırılmalı hasar modu [45].	14
Şekil 1.13.	Lamina bükülmesi hasar modu [45].	15
Şekil 1.14.	Yerel burkulma hasar modu [45].	16
Şekil 1.15.	(a) tüplerin açılı [48] ve (b) yanal çarpışması [52].	17
Şekil 1.16.	Küçük ölçekli farklı geometrik şekillere sahip cam/polyester kompozit tüplerin kırılma ve enerji sönümleme performansının incelenmesi [57].	18
Şekil 1.17.	Cam fiber dokuma kumaş tüplerde elyaf açısının enerji sönümleme kapasitesine etkisi [65].	19
Şekil 1.18.	Filaman sarma yöntemi ile üretilmiş GFRP tüplerin sarım açısının optimizasyonu [70].	20

Şekil 1.19. (a) açık ve (b) kapalı hücreli köpük [76].	22
Şekil 1.20. Hücresel metal üretim yöntemleri	22
Şekil 1.21. Metal köpükler için tipik gerilme-şekil değiştirme grafiği	24
Şekil 1.22. Köpük dolgulu ve boş konik çelik tüplerin deformasyon şekillerinin karşılaştırılması [79].	25
Şekil 1.23. Fonksiyonel derecelendirilmiş köpük dolgulu çarpışma kutularının eğilme davranışının sayısal olarak incelenmesi [93].	26
Şekil 1.24. Farklı şekillerde hibritleşme örnekleri: (a) çoklu fiber takviyeli kompozitlerle üretilen hibrit yapılar, (b) metal-kompozit hibritleşmesi ve (c) hücresel malzemeler ile hibritleşme [101].	28
Şekil 1.25. Hibrid tüplerin tipik çökme modları: (a) bileşik elmas, (b) bileşik parçalanma, (c) delaminasyon ve (d) katastrofik hasar [109].	29
Şekil 1.26. Metal-kompozit hibrit tüplerin eksenel çarpışması [113].	30
Şekil 1.27. Kompozit yapılar için modelleme ölçekleri	31
Şekil 1.28. Dörtgen ve altıgen fiber matris düzeni için çeşitli periyodik elemanlar ve birim hücreler. [136].	33
Şekil 1.29. Kompozit dokuma kumaşların makro ölçekli modeli [139].	34
Şekil 1.30. Oluklu kompozit numunenin kabuk elemanlı modeli [142].	35
Şekil 1.31. Tek katmanlı kompozit model için kuvvet yer değiştirme grafiği (a) filtreli ve ham veri, (b) deney ve sayısal karşılaştırması [142].	36
Şekil 1.32. Optimum tasarım prosedürünün akış şeması	46
Şekil 1.33. CFRP/Al hibrit tüplerin optimizasyonu [184].	52
Şekil 2.1. Kompozit plaka üretim aşamaları: (a) tek yönlü kumaş, (b) kumaşın kesilmesi, (c) kumaşların dizilmesi ve reçine emdirilmesi, (d) vakum işlemi, (e) üretilmiş tek yönlü plaka	54
Şekil 2.2. Şematik kompozit tüp üretimi	55
Şekil 2.3. (a) metal tüp üzerinden eksenel doğrultuda deney numunesinin elde edilmesi, (b) Al6063 ve (c) St52 deney numuneleri	55
Şekil 2.4. (a) fiber ve (b) fibere dik yöndeki çekme deney numune geometrileri ve boyutları, (c) fiber ve (d) fibere dik numune görünümü	57
Şekil 2.5. (a) fiber ve (b) fibere dik yöndeki basma deney numune geometrileri ve boyutları, (c) basma fıkstürü kesit görünümü ve (d) basma fıkstürü	58

Şekil 2.6. (a) düzlem içi kesme deneyi için numune geometri ve boyutları, (b) görünümü.....	59
Şekil 2.7. İkili tüplerin birleştirilmesi için kullanılan ara aparat, (a) teknik resmi ve (b) görüntüsü	60
Şekil 2.8. (a) tekli ve (b) ikili tüpler.....	61
Şekil 2.9. Serbest ağırlık düşürme deney sistemi	62
Şekil 2.10. Konik açılı bir metalik tüpün geometrik özellikleri	63
Şekil 2.11. Metalik tüpün sonlu elemanlar modeli	64
Şekil 2.12. Kompozit tüpün sonlu elemanlar modeli.....	65
Şekil 2.13. Tekli tüplerin sonlu elemanlar modeli.....	67
Şekil 2.14. İkili tüplerin sonlu elemanlar modeli.....	67
Şekil 2.15. (a) tekli ve (b) ikili köpük dolgulu tüpler	69
Şekil 2.16. DKT'nin optimizasyon modeli	70
Şekil 2.17. Optimizasyon akış şeması	71
Şekil 3.1. Metalik malzemelerin gerçek gerilme-gerçek birim şekil değiştirme grafiği ..	74
Şekil 3.2. Kompozit numunelere fiber yönünde uygulanan çekme deneyi sonuçları.....	75
Şekil 3.3. Kompozit numunelere fibere dik yönde uygulanan çekme deneyi sonuçları...	76
Şekil 3.4. Karbon kompozit numunelere fiber yönünde uygulanan basma deneyi sonuçları.....	76
Şekil 3.5. Karbon kompozit numunelere fibere dik yönde uygulanan basma deneyi sonuçları.....	77
Şekil 3.6. Karbon kompozit numunelere uygulanan düzlem içi kesme deneyi sonuçları	77
Şekil 3.7. S_Al tüp için deneysel ve sayısal kuvvet-yer değiştirme eğrileri ve deformasyon şekilleri.....	79
Şekil 3.8. S_St tüp için deneysel ve sayısal kuvvet- yer değiştirme eğrileri ve deformasyon şekilleri.....	79
Şekil 3.9. S_C tüp için deneysel ve sayısal kuvvet- yer değiştirme eğrileri ve deformasyon şekilleri.....	80
Şekil 3.10. D_St-Al tüp deneysel ve sayısal kuvvet- yer değiştirme eğrileri ve deformasyon şekilleri.....	81

Şekil 3.11. D_Al-C tüp deneysel ve sayısal kuvvet- yer değiştirme eğrileri ve deformasyon şekilleri.....	82
Şekil 3.12. D_St-C tüp deneysel ve sayısal kuvvet- yer değiştirme eğrileri ve deformasyon şekilleri.....	82
Şekil 3.13. S_Al tüp için yer değiştirmeye göre kuvvet ve enerji değişimleri	84
Şekil 3.14. S_St tüp için yer değiştirmeye göre kuvvet ve enerji değişimleri	84
Şekil 3.15. S_C tüp için yer değiştirmeye göre kuvvet ve enerji değişimleri.....	85
Şekil 3.16. D_Al-St tüp için yer değiştirmeye göre kuvvet ve enerji değişimleri	85
Şekil 3.17. D_Al-C tüp yer değiştirmeye göre kuvvet ve enerji değişimleri.....	86
Şekil 3.18. D_St-C tüp için yer değiştirmeye göre kuvvet ve enerji değişimleri	87
Şekil 3.19. 0°, 5°, 10° konik açılı, 0.5 mm üniform kalınlığa sahip tüplerin deformasyon şekilleri ve kuvvet- yer değiştirme grafikleri.....	88
Şekil 3.20. 0°, 5°, 10° konik açılı, 1.5 mm üniform kalınlığa sahip tüplerin deformasyon şekilleri ve kuvvet- yer değiştirme grafikleri.....	89
Şekil 3.21. 0°, 5°, 10° konik açılı, 2.5 mm üniform kalınlığa sahip tüplerin deformasyon şekilleri ve kuvvet- yer değiştirme grafikleri.....	90
Şekil 3.22. 0°, 5°, 10° konik açılı, 4 mm üniform kalınlığa sahip tüplerin deformasyon şekilleri ve kuvvet- yer değiştirme grafikleri.....	91
Şekil 3.23. 0°, 5° ve 10° konik açılı (a) 0.5, (b) 1.5, (c) 2.5 ve (d) 4 mm üniform kalınlığa sahip tüplerin enerji-zaman grafikleri.....	92
Şekil 3.24. 0° DKT'lerin hasarlı ve hasarsız analizlerde maksimum ve minimum ÖES değerini veren ÖN'leri için şekil değiştirmeler ve kuvvet-yer değiştirme eğrileri.....	93
Şekil 3.25. 5° konik açılı DKT'lerin hasarlı ve hasarsız analizlerde maksimum ve minimum ÖES değerini veren ÖN'leri için şekil değiştirmeler ve kuvvet-yer değiştirme eğrileri.....	94
Şekil 3.26. 10° konik açılı DKT'lerin hasarlı ve hasarsız analizlerde maksimum ve minimum ÖES değerini veren ÖN'leri için şekil değiştirmeler ve kuvvet-yer değiştirme eğrileri.....	95
Şekil 3.27. 0°, 5° ve 10° konik açılı DKT'lerde (a) hasarlı ve (b) hasarsız şartlarda ÇAO sonucu optimum DKT kalınlıklarının kesit görünümü.....	97
Şekil 3.28. 0° optimum bölge kalınlığına sahip DKT'lerin (a) kuvvet – yer değiştirme ve (b) ortalama kuvvet- yer değiştirme eğrileri	98

Şekil 3.29. 5° konik açılı optimum bölge kalınlığına sahip DKT'lerin (a) kuvvet – yer değiştirme ve (b) ortalama kuvvet- yer değiştirme eğrileri	99
Şekil 3.30. 10° konik açılı optimum bölge kalınlığına sahip DKT'lerin (a) kuvvet – yer değiştirme ve (b) ortalama kuvvet- yer değiştirme eğrileri	99
Şekil 3.31. Hasarsız şartlarda 0°, 5° ve 10° optimum bölge kalınlığına sahip DKT'lerin adım adım şekil değiştirmeleri.....	100
Şekil 3.32. Hasarlı şartlarda 0°, 5° ve 10° optimum bölge kalınlığına sahip DKT'lerin adım adım şekil değiştirmeleri.....	101
Şekil 3.33. Düz (0°) kompozit tüpler için fiber açısı dizilimine göre SE değerleri	103
Şekil 3.34. 5° koniklik açılı kompozit tüpler için fiber açısı dizilimine göre SE değerleri.	104
Şekil 3.35. 10° koniklik açılı kompozit tüpler için fiber açısı dizilimine göre SE değerleri	105
Şekil 3.36. Düz (0°) kompozit tüpler için fiber açısı dizilimine göre pik kuvvet değerleri	106
Şekil 3.37. 5° koniklik açılı kompozit tüpler için fiber açısı dizilimine göre pik kuvvet değerleri	106
Şekil 3.38. 10° konik açılı kompozit tüpler için fiber açısı dizilimine göre pik kuvvet değerleri	107
Şekil 3.39. Optimum fiber açısı hizalamasına sahip düz tüp için deneysel ve sayısal modelin karşılaştırılması (a) kuvvet-yer değiştirme grafiği, (b) deney öncesi ve sonrası deney numunesi, (c) sayısal analiz	109
Şekil 3.40. Alüminyum köpük için analitik ve sayısal gerilme-şekil değiştirme eğrisi ...	110
Şekil 3.41. Özgül enerji sönümlemenin Köpük 1 yoğunluğuna göre değişimi	111
Şekil 3.42. Özgül enerji sönümlemenin Köpük 2 yoğunluğuna göre değişimi	111
Şekil 3.43. Özgül enerji sönümlemenin Köpük 3 yoğunluğuna göre değişimi	112
Şekil 3.44. Cidar kalınlığına göre ÖES değişimleri.....	113
Şekil 3.45. Köpük 1'in yoğunluğuna göre pik kuvvetin değişimleri.....	113
Şekil 3.46. Köpük 2'nin yoğunluğuna göre pik kuvvetin değişimleri.....	114
Şekil 3.47. Köpük 3'ün yoğunluğuna göre pik kuvvetin değişimleri	114
Şekil 3.48. Cidar kalınlığına göre pik kuvvet değişimleri	115
Şekil 3.49. Köpük 1'in yoğunluğuna göre ÇKO'nun değişimleri	116
Şekil 3.50. Köpük 2'nin yoğunluğuna göre ÇKO'nun değişimleri	117

Şekil 3.51. Köpük 3'ün yoğunluğuna göre ÇKO'nun değişimleri	117
Şekil 3.52. Cidar kalınlığına göre ÇKO değişimleri.....	118
Şekil 3.53. Optimum kalınlık ve köpük yoğunluğuna sahip tekli tüplerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri.....	120
Şekil 3.54. Optimum kalınlık ve köpük yoğunluğuna sahip ikili tüplerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri.....	120
Şekil 3.55. 1,5 mm cidar kalınlıklarına sahip içi boş ve köpüklü (500 kg/m ³ (Köpük 1), 750 kg/m ³ (Köpük 2) ve 1000 kg/m ³ (Köpük 3)) optimum cidar kalınlığına ve köpük yoğunluğuna sahip tüpler (Tablo 3.8) için sönmölenen enerji değerleri	121
Şekil 3.56. 1,5 mm cidar kalınlıklarına sahip içi boş ve köpüklü (500 kg/m ³ (Köpük 1), 750 kg/m ³ (Köpük 2) ve 1000 kg/m ³ (Köpük 3)) optimum cidar kalınlığına ve köpük yoğunluğuna sahip tüpler (Tablo 3.8) için sönmölenen enerji değerleri	122

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.1. MAT138 ve Tiebreak kontak değişkenleri	38
Tablo 1.2. MAT54/55 malzeme kartı.....	40
Tablo 2.1. Kompozit plakalara gerçekleştirilen deneyler	56
Tablo 2.2. Hazırlanan deney numuneleri	60
Tablo 2.3. MAT54/55 için malzeme sabitleri ve kalibre edilen değerler	66
Tablo 2.4. Alüminyum köpük için plato gerilmesine göre gerilme- şekil değiştirme [191].....	68
Tablo 2.5. Kompozit malzemeler için deneysel belirlenen mekanik özellikler.....	78
Tablo 3.1. 0.5 mm, 1.5 mm, 2.5 mm ve 4 mm üniform kalınlığa sahip tüpler için pik kuvvet ve SE değerleri.....	92
Tablo 3.2. Maksimum ve minimum ÖES değerini veren ÖN'ler için SE ve pik kuvvet değerleri	96
Tablo 3.3. Hasarlı ve hasarsız şartlarda DKT'ler için optimum böyle kalınlıkları.....	97
Tablo 3.4. Hasarlı ve hasarsız şartlarda DKT'lerin optimizasyonundan elde edilen en küçük R^2 değerleri	102
Tablo 3.5. Koniklik açlarına göre maksimum ve minimum SE değerine sahip ÖN'ler.	103
Tablo 3.6. ÇAO ile elde edilen optimum fiber aç hizalaması.....	108
Tablo 3.7. Kompozit tüplerin optimizasyonundan elde edilen en küçük R^2 değerleri	109
Tablo 3.8. Hibrit tüplerin ÇAO ile elde edilen et kalınlıkları ve köpük yoğunlukları.....	119
Tablo 3.9. İkili hibrit tüplerin optimizasyonundan elde edilen en küçük R^2 değerleri	122

SEMBOLLER DİZİNİ

ABS	: Kilitlenme karşıtı frenleme sistemi
ALPH	: Doğrusal olmayan terim için kayma gerilmesi parametresi
ASTM	: Amerikan test ve malzemeler topluluğu
CN	: Normal sertlik
CT2CN	: Teğetsel rijitliğin normal rijitliğe oranı
CFRP	: Karbon fiberle güçlendirilmiş polimer
CRIT	: Hasar kriteri
ÇAO	: Çok amaçlı optimizasyon
ÇKO	: Çarpışma kuvveti oranı
DFAILT	: Fiber yönü çekme şekil değiştirmesi
DFAILC	: Fiber yönü basma şekil değiştirmesi
DFAILM	: Matris yönü hasar şekil değiştirmesi
DFAILS	: Kayma için hasa şekil değiştirmesi
DKT	: Değişken kalınlıklı tüp
DPH:	: Düzgün parçacık hidrodinamiği
E_1	: Fiber yönündeki elastisite modülü
E_2	: Matris yönündeki elastisite modülü
E_{tie}	: Temas yüzeylerinin hasara uğraması ile ortaya çıkan enerji
EFS	: Etkili hasar değiştirme katsayısı
EN	: Normal sertlik
ERATEN	: Mod I için enerji bırakma hızı
ERATES	: Mod I için enerji bırakma oranı
ESC	: Elektronik denge kontrolü
ET/EN	: Teğetsel rijitliğin normal rijitliğe oranı
Fort	: Ortalama kuvvet
F_{mak} :	: Maksimum kuvvet
F_{pik} :	: Pik kuvvet
FBRT	: Fiber yönü çekme hasarı zayıflatma katsayısı
FDT	: Fonksiyonel derecelendirilmiş tüp

G_{12}	: Düzlemsel kayma modülü
GA	: Genetik algoritma
GFRP	: Cam fiberle güçlendirilmiş polimer
GIC	: Mod I için enerji bırakma hızı
GIIC	: Mod I için enerji bırakma oranı
HIC	: Kafa travması kriteri
Low-pass	: Alçak geçiren filtre
m	: Kütle
NFLS	: Normal yönde en yüksek çekme dayanımı
ÖES	: Özgül enerji sönümleme
ÖN	: Örneklem noktası
P	: Örneklem nokta sayısı
PARAM	: Karma mod ölçütlerinin üssü
PFL	: Crashfront algoritması başlatma katsayısı
R^2	: Meta model doğruluk kontrol parametresi
RO	: Kompozit malzeme yoğunluğu
S	: Teğetsel yönde en yüksek çekme dayanımı
SE	: Sönümlenen enerji
SEY	: Sonlu elemanlar yöntemi
SFLS	: Teğetsel yönde en yüksek çekme dayanımı
SLIMC1	: Fiber basma hasarı sonrası artık gerilim katsayısı
SLIMC2	: Matris basma hasarı sonrası artık gerilim katsayısı
SLIMT1	: Fiber çekme hasarı sonrası artık gerilim katsayısı
SLIMT2	: Matris çekme hasarı sonrası artık gerilim katsayısı
SLIMS	: Kayma hasarı sonrası artık gerilim katsayısı
SOFT	: Çarpışma cephesi azaltma faktörü
T	: Normal yönde en yüksek çekme dayanımı
TFAIL	: Zaman adımlı hasar kriteri
Trigger	: Kompozit yapılarda hasarı başlatıcı mekanizma
XMU	: Karma mod ölçütlerinin üssü
YCFAC	: Fiber yönü basma hasarı zayıflatma katsayısı
X_i, g_j, h_k	: Değişken
$X_i^{(L)}$	: Değişken alt sınırı

$X_i^{(u)}$	: Değişken üst sınırı
C_f	: Köpükler için malzeme sabiti
$e_{t,f}$	: Fiber yönü çekme hasar kriteri
$e_{c,f}$	: Fiber yönü basma hasar kriteri
$e_{t,m}$	: Matris yönü çekme hasar kriteri
$e_{c,m}$	: Matris yönü basma hasar kriteri
τ_{12}	: Kayma Gerilmesi
ρ_f	: Köpük yoğunluğu
ρ_{fo}	: Köpük malzemesinin katı hal yoğunluğu
X_t	: Fiber yönü çekme dayanımı
X_c	: Fiber yönündeki basma dayanımı
Y_t	: Matris yönündeki çekme dayanımı
Y_c	: Matris yönündeki basma dayanımı
S_c	: Düzlemsel kayma dayanımı
Δ	: Konum
ε_1	: 1 yönü şekil değiştirme
ε_2	: 2 yönü şekil değiştirme
ε_3	: 3 yönü şekil değiştirme
σ_f	: Köpüğün akma gerilmesi
σ_n	: Normal gerilme
σ_s	: Kayma gerilmesi
σ_1	: Fiber yönü çekme dayanımı
σ_2	: Matris yönü çekme dayanımı
ν_{21}	: Poisson oranı
ef	: Fiber yönü çekme hasar kriteri
ec	: Fiber yönü basma hasar kriteri
em	: Matris yönü çekme hasar kriteri
ed	: Matris yönü basma hasar kriteri
β	: Fiber çekme modunda kayma için ağırlıklandırma faktörü
σ_1	: Fiber yönü çekme gerilmesi
σ_2	: Matris yönü çekme gerilmesi
σ_{12}	: Düzlemsel kayma gerilmesi
y_i	: Gerçek değer

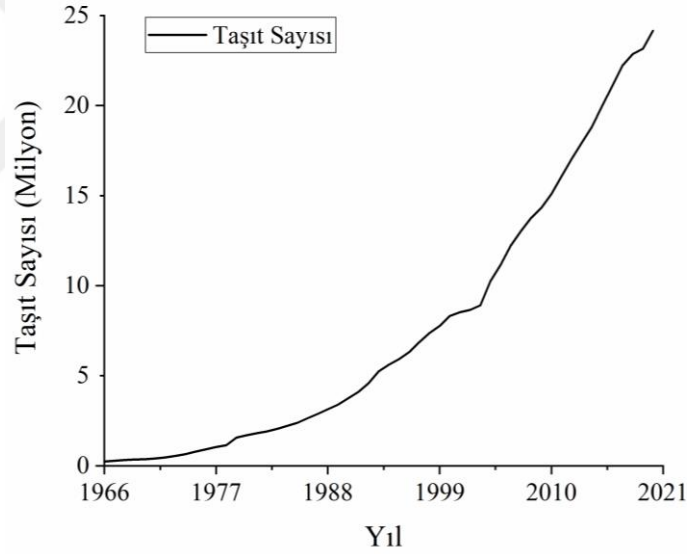
$\hat{y}_i$: Meta modelin tahmini değeri
 $\bar{y}$: y değerlerinin ortalaması



1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

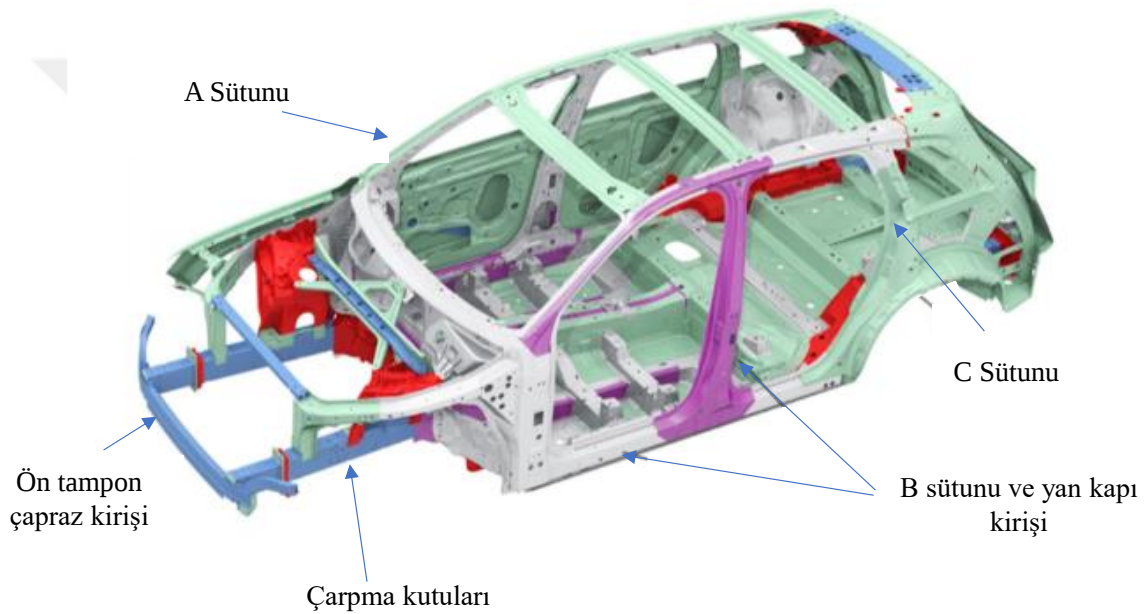
İnsanoğlu var oluşundan bu yana bir yerden başka bir yere seyahat etmek ve yük taşımak için farklı araçlar kullanmıştır. İçten yanmalı motor teknolojisinin gelişmesi ve maliyetlerin düşmesi ile 20. yüzyıl başından bu yana otomobil, otobüs, kamyon ve tren vb. yük ve yolcu taşımacılığı için yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Şekil 1.1’de 1966 yılından günümüze Türkiye’deki motorlu araç sayısındaki artış görülmektedir. Bu yaygınlaşmaya bağlı olarak araçların sebep olduğu ölümlü ve yaralanmalı kazalar artmaktadır.



Şekil 1.1. 1966-2021 yılları arasında Türkiye’de bulunan motorlu taşıt sayısı [1].

Kazaların meydana gelmesini önlemek için ABS (Anti-lock braking systems), ESC (Electronic stability control), şerit takip sistemi, sensörler ve kameralar gibi aktif güvenlik önlemlerinin yanı sıra kaza sonucu ortaya çıkan olumsuz durumları azaltmak için ince cidarlı yapılar, çarpışma kutuları, hava yastığı, emniyet kemeri gibi pasif güvenlik önlemleri de geliştirilmiştir. Şekil 1.2’de araç gövdesinde bulunan ince cidarlı yapılar ve çarpışma kutuları görülmektedir.

İnce cidarlı yapılar kalınlıkları, diğer iki boyut özellikleri ile karşılaştırıldığında küçük olan; kinetik enerjiyi tamamen ya da kısmen sürtünme, elastik deformasyon ve plastik deformasyon enerjisine dönüştüren üç boyutlu elemanlardır [2]. Bu yapılar, kademeli deforme olarak ve büyük miktarda kinetik enerjiyi sönümleyerek araç çarpışmalarında yolcu ve kargo güvenliğini arttırmaktadır. Günümüz otomotiv endüstrisinin yakıt verimliliği ve çevre koruma konusundaki öncelikleri göz önüne alındığında, ince cidarlı yapılar tasarımı, üretim kolaylığı, hafiflikleri, düşük maliyetleri ve üstün enerji sönümleme kabiliyetleri sebebiyle araçlarda pasif güvenlik elemanları olarak yaygın şekilde kullanılmaktadırlar [3].



Şekil 1.2. Araçlarda kullanılan enerji sönümleyici ince cidarlı yapılar [4].

1.2. Enerji Sönümleyici Yapılar

Enerji sönümleyici sistemler, çarpışma sırasında ortaya çıkan kinetik enerjiyi tamamen veya kısmen sürtünme, ısı ve plastik şekil değiştirme gibi enerjinin başka bir türüne geri dönüşümsüz olarak çeviren yapılardır. Araçlarda kullanılan pasif güvenlik tedbirleri enerji sönümleyici sistemlerin en yaygın uygulamalarıdır. Enerji sönümleyici sistemler binlerce yıldır kullanılmaktadır. Eski zamanlarda insanların kendilerini saldırılardan korumak için kullandıkları kalkan ve zırh enerji sönümleyici sistemlerin ilk örneklerindendir. Sanayi devriminde buhar motoru, devamında içten yanmalı motorun icadı ile insanların hayatındaki

araç sayısında büyük bir artış olmuştur. Bu durum enerji sönümleyici sistemlere olan ihtiyacı arttırmıştır.

Enerji sönümleyici sistemlerin tasarımında aşağıdaki prensiplerden bahsedilebilir:

1. Kinetik enerjiyi plastik deformasyon, viskoz deformasyon, sürtünme, kırılma vb. gibi geri dönüşü olmayan enerji şekillerine dönüştürmelidir. Kinetik enerjinin elastik şekil değiştirme enerjisi gibi tersinir enerjiye dönüştürüldüğü durumlarda, geri tepme sebebiyle daha da olumsuz durumlar ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle, iyi bir enerji sönümleyici, kinetik enerjiyi mümkün olduğu kadar sönümlemelidir.
2. Pik darbe kuvveti veya ani yavaşlama ivmesi, kaza sonucu yolcu üzerinde ortaya çıkacak hasarın en aza indirilebilmesi veya önlenbilmesi için bir eşik değerinin altında olmalıdır. Yaralanma kriterlerine göre aynı momentum ile darbe kuvveti sabit kalırsa kafa travması kriteri (HIC) indeksi minimuma inecektir. Aksi durumda ani yavaşlama ivmesinin artmasıyla HIC indeksi keskin bir şekilde yükselir.
3. Enerji sönümleyicinin deformasyon mesafesi mümkün olduğu kadar uzun olmalıdır. Sönümlenen enerji (SE), kuvvet-yer değiştirmeye grafiğinin altındaki alana eşit olduğundan, belirli bir kinetik enerji için deformasyon mesafesi (strok) ne kadar uzun olursa, darbe kuvveti o kadar küçük olur. Ancak, kullanılabilecek alan genellikle çok sınırlıdır.
4. Enerji sönümleyici yapılar hafif olmalı ve yüksek özgül enerji sönümleme (ÖES) kapasitesine sahip olmalıdır. Hafiflik hem aracın kütesinin hem de emisyon oranlarının azaltılmasında önemlidir.
5. Pratik uygulamalar için imalat kolaylığı, maliyet, çevre dostu olması vb. gibi diğer faktörler de dikkate alınmalıdır.

Bu ilkelere göre ince cidarlı tüpler, kompozit tüpler, hibrit tüpler, hücresel malzemeler, sandviç yapılar vb. gibi çeşitli enerji sönümleyici malzeme ve yapılar incelenmiş, farklı uygulamalar yapılmıştır. Enerji sönümleyici sistemler, yalnızca önceden tanımlanmış çarpma/çarpışma senaryolarında etkin bir şekilde çalışmak üzere tasarlandığından diğer koşullarda genellikle aynı performansı gösteremezler. Örneğin çoğu otomobil tamponu belirli hızlarda ve simetrik önden çarpışmalar için tasarlanmıştır ancak açılı ve yüksek hızlı çarpışmalarda aynı etkinliği gösteremezler [5]. Enerji sönümleyicilerin verimliliğini daha da artırma ve farklı çarpışma senaryoları altındaki performanslarını iyileştirme çalışmaları devam etmektedir.

Enerji sönümleyici sistemlerin çarpışma performansını değerlendirmek, farklı yapıların performansını karşılaştırmak için uygun kriterlerin belirlenmesi gerekmektedir. Belirlenen kriterler deneysel ve sayısal sonuçları, farklı yapıların enerji sönümleme performanslarını karşılaştırabilmelidir. Yapılan çalışmalarda, bir grup parametre kullanılmış ve bu parametrelerin performans değerlendirilmesinde başarılı olduğu görülmüştür [6-7]. Bu parametrelerden en yaygın kullanılanı, enerji sönümleyici sistem tarafından sönümlenen toplam enerji miktarını gösteren SE değeridir ve aşağıdaki gibi hesaplanır,

$$SE = \int_0^{\delta} F(\delta) d\delta \quad 1.1$$

burada $F(\delta)$ çarpışma kuvvetini, δ çarpışma mesafesini göstermektedir. Bir diğer parametre ise ÖES değeridir. ÖES enerji sönümleyici sistem tarafından sönümlenen toplam enerjinin sistemin toplam kütlesine bölünmesi ile hesaplanır

$$\text{ÖES} = \frac{SE}{m} \quad 1.2$$

burada m enerji sönümleyici sistemin kütlesini göstermektedir. Ortalama kuvvet, çarpışma anında ortaya çıkan kuvvetin ortalamasıdır ve SE'nin çarpışma mesafesine oranı olarak hesaplanır,

$$F_{ort} = \frac{SE}{\delta} \quad 1.3$$

Pik kuvvet (F_{pik}), çarpışma sırasında yapının ilk deformasyona başlaması için gereken maksimum kuvvet değerini gösterir,

$$F_{pik} = F_{mak} | \text{ilk deformasyon} \quad 1.4$$

Maksimum kuvvet (F_{mak}), çarpışma sırasında kuvvet değerinin ulaştığı maksimum değeri gösterir,

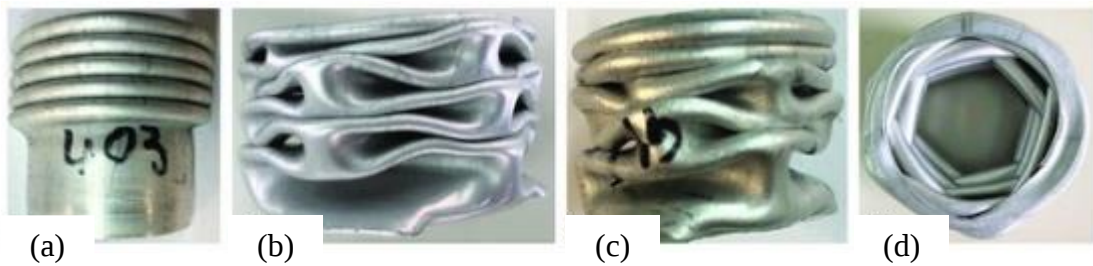
$$F_{mak} = F_{mak} \mid \text{Çarpışma süresince} \quad 1.5$$

Çarpışma kuvveti oranı (ÇKO), ortalama kuvvetin pik kuvvete oranı olarak hesaplanır. Kuvvet yer değiştirme eğrisinin üniformluğunu gösterir ve ÇKO'nun yüksek olması enerji sönümleyici sistemin verimliliğinin yüksek olduğunu gösterir.

$$\text{ÇKO} = \frac{F_{ort}}{F_{pik}} \quad 1.6$$

1.2.1. Metalik Tüpler

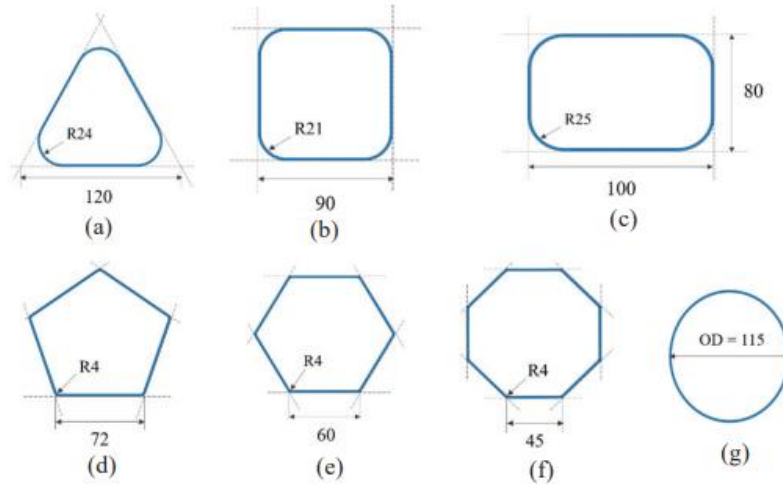
Çeşitli kesit profillerine sahip ince duvarlı metal tüpler, yüksek mukavemet-ağırlık oranı, düşük maliyeti ve üstün enerji sönümleme kapasiteleri nedeniyle otomobil, tren, helikopter, uçak ve gemi gövdelerinde enerji sönümleyici yapılar olarak yaygın şekilde kullanılmaktadırlar. Son 60 yılda endüstride ve üniversitelerde çalışan araştırmacılar, ince cidarlı metal tüplerin eksenel çarpışma, yanal çarpışma, açılı çarpışma ve yapısal çökme mekanizmalarını anlamak için birçok araştırma yapmışlardır [8]. Bu araştırmalarda dairesel ve kare ince cidarlı tüpler, araştırmacılar tarafından en fazla incelenen yapılardır. Johnson vd. [9] araştırmalarında basit yapısal elemanların baskın deformasyon biçimlerini araştırmışlardır.



Şekil 1.3. Eksenel yükleme koşulları altında metalik tüplerin deformasyon modları. (a) akordeon (genişletilebilir, eksenel simetrik veya halka) modu; (b) elmas (genişletilemez veya simetrik olmayan) mod; (c) karma mod; ve (d) üç çevresel loblu elmas modu [10].

Andrews vd. [11] deformasyon modunun geometrik özellikler tarafından belirlendiğine dikkat çekmiş ve tüp uzunluğunun et kalınlığına (L/t) ve tüp çapının et

kalınlığına (D/t) oranlarının çökme modu üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yaptıkları deneylerden daha kalın tüplerin aksel simetrik (akordeon) modda çöktüğünü, buna karşın nispeten daha ince tüplerin elmas modunda deforme olduğunu göstermişlerdir. Şekil 1.3'te aksel yüklemeye şartların altında dairesel kesitli tüp için tipik deformasyon şekilleri görülmektedir [10]. Abramowicz vd. [12–14] dairesel ve kare ince duvarlı çelik tüplerin çeşitli deformasyon modlarını karakterize etmek için bir dizi detaylı deneysel çalışma yürütmüşlerdir. Öne sürdükleri teorik model ile deneylerden elde ettikleri ortalama kuvvetin değerlerini doğru bir şekilde tahmin etmişlerdir. Gupta vd. [15] tavlanmış ve tavlanmamış ince cidarlı alüminyum ve yumuşak çelik dairesel tüpler üzerinde aksel bir çarpışma testi gerçekleştirerek ortalama kuvveti belirlemek için ampirik bir model geliştirmişlerdir. Isıl işlemin aksel olarak çarpma altındaki tüplerin çökme modu üzerindeki etkisinin incelediği çalışmalarında Reddy ve Zhang [16] deformasyon sertleşmesinin ortadan kaldırılmasının deformasyon modunu değıştirmediği ve bazı durumlarda tüplerde genel bir stabilite kaybına neden olduğu göstermişlerdir.



Şekil 1.4. Farklı kesit geometrilerinin enerji sönümleme davranışına etkisi
(a) üçgen, (b) kare, (c) dikdörtgen, (d) beşgen, (e) altıgen, (f) sekizgen ve (g) daire [17].

Dairesel ve kare kesitli geometrilerin yanında Şekil 1.4'te görüldüğü gibi üçgen, dikdörtgen, beşgen, altıgen, sekizgen vb. farklı kesit geometrilerine sahip tüpler de araştırmacılar tarafından incelenmiştir [17]. Kim vd. [18] çalışmalarında, bir otomobil gövdesinin ön yan ray yapısının tasarımını ele almak için şapka tipi enine kesiti güçlendirmenin çeşitli yollarını araştırmışlardır. White vd. [19,20] ayrıca şapka tipi ince

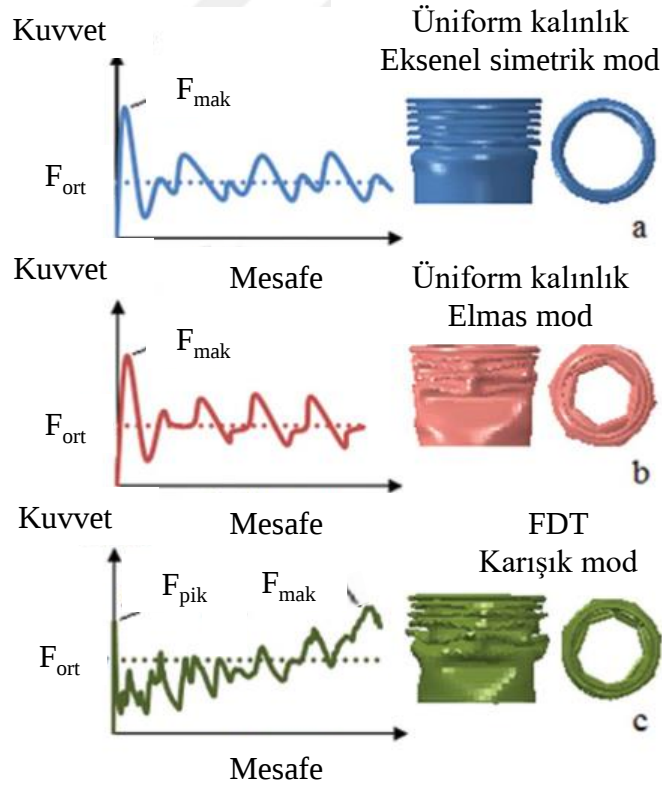
cidarlı kesitin ezilme davranışını teorik ve deneysel olarak araştırmışlardır. Mamalis vd. [21,22] aksenal sıkıştırma altında ince duvarlı dairesel konik ve düz silindirlerin çökme davranışı üzerinde deneysel çalışmalar yapmış, konik ve konik olmayan dairesel tüplerin davranışını karşılaştırmışlardır. Oluklu tüplerin ezilme davranışı Singace vd. [23] tarafından incelenmiştir. Çalışmalarında enerji sönümleme elemanının kontrollü bir davranış sergilemesi için oluklu tüplerin uygun bir seçim olacağını ifade etmişlerdir. Chirwa vd. [24] tarafından konik ince duvarlı metal ters bükümlü enerji sönümleyen tüpler araştırılmıştır. Bu çalışmada, çeşitli dış yüklere ve sınır koşullarına sahip konik tüpler incelenmiştir. Yeni bir teorik tahmin yöntemi geliştirmişler ve yaklaşımlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında iyi bir uyum sağladığını göstermişlerdir.

Yukarıda bahsedilen ince cidarlı enerji sönümleyici yapıların çarpışma dayanıklılığı kapsamlı bir şekilde çalışılmış olmasına rağmen, cidar kalınlığı değişiminin ince cidarlı enerji sönümleyicilerin çarpışma davranışı üzerindeki etkileri hakkında sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır [25,26]. Tasarım esnekliğini artırdığı ve daha verimli malzeme kullanımı sağladığı için, değişken kalınlıktaki metal levhalar birçok alanda kullanılmaktadır. Uygulamada kaynak dikişli plakalar ve haddelenmiş plakalar olmak üzere iki farklı şekli mevcuttur. Kaynak dikişli plaka yapıları lazer, elektron ışını veya sürtünmeli karıştırma kaynaklı saclardan yapılmıştır. Kaynak dikişli plakalarda bölgeler arası kalınlık değişimi, yapılarının bağlantı bölgelerinde gerilme yoğunlaşmasına neden olmaktadır ve bu durum kaynak dikişli plakaların en büyük dezavantajıdır. Haddelenmiş plakalar ise soğuk haddelenerek yapılmıştır ve sürekli kalınlık değişimine sahiptir; bu nedenle gerilme yığılması gibi problemler ile karşılaşmamaktadır [27].

Çarpışma durumunda üniform kalınlığa sahip ince cidarlı tüplerin yerine haddelenerek üretilmiş değişken kalınlığa sahip fonksiyonel derecelendirilmiş tüplerin (FDT) kullanımı dikkat çekmektedir. İnce cidarlı enerji sönümleyicilerin ağırlığını azaltırken çarpışmaya dayanımını en üst düzeye çıkarmak için kalınlık değişimi önemli bir rol oynayabilmektedir. Değişken kalınlık ile yapı boyunca değişken sertlik elde edilerek deformasyon modları ve çarpışmaya dayanıklılık parametreleri daha verimli şekilde kontrol edilebilmektedir [28].

Bu amaçla Sun vd. [28], sonlu elemanla yöntemi (SEY) kullanarak ince cidarlı enerji sönümleyicilerin ezilme özelliklerini incelemiş ve farklı kalınlık gradyan modellerinin örnek yapıların çarpışma dayanıklılığı üzerindeki etkisini değerlendirmişlerdir. Çalışmalarında FDT yapıların, genel ezilme davranışında tek tip kalınlıklı muadillerinden üstün olduğunu göstermişlerdir. Zhang vd. [29] farklı kalınlıktaki özel kaynaklı tüplerin aksenal çarpışma

davranışını araştırmış, optimum kalınlık oranına ve kaynak hattı pozisyonuna sahip kaynaklı tüplerin geleneksel ince cidarlı tüplerden daha iyi performansa sahip olduğu belirlemiştir. Başka bir çalışmada, Jandaghi Shahi ve Marzbanrad, [30] eksenel yükleme altında alüminyumdan yapılmış parçalı tüplerin ezilme davranışını incelemiştir. Çalışmalarında parçalı kalınlığa sahip tüplerin üniform kalınlığa sahip tüplere göre düşük pik kuvvet ve daha yüksek SE kapasitesine sahip olduğunu göstermişlerdir. Li vd. FDT'nin, aynı ağırlığa sahip düz üniform kalınlıkta ve konik üniform kalınlıktaki tüplere göre eğik yüklere dayanma kapasitesinin daha yüksek olduğuna dikkat çekmişlerdir. Zhang vd. [31,32] eksenel ve eğik darbe yüklemesi altında dairesel konik FDT'lerin enerji sönmüleme özelliklerini araştırarak kademeli FDT'lerin yalnızca eksenel yükler altında değil, aynı zamanda eğik yükler altında da daha iyi performansa sahip olduğunu belirlemiştir. Baykasoğlu ve Çetin [27], eksenel darbe yükü altında alüminyum esaslı dairesel tüplerin kalınlık aralığını ve en boy oranını araştırarak FDT'nin geleneksel olarak tasarlanmış tek tip kalınlıktaki muadillerine kıyasla çarpma özelliklerinin kontrolünün daha iyi sağlanabileceği sonucuna varmışlardır (Şekil 1.5).



Şekil 1.5. FDT ve üniform kalınlıklı tüplerin kuvvet-yer değiştirme eğrileri ve deformasyon şekilleri [27].

Omid vd. [33] yanal yüklere maruz kalan ters dönen FDT'nin optimizasyonunu çalışmış ve ters dönen FDT'nin eğik darbe yükleri altında tek tip kalınlıktaki muadillerinden daha iyi olduğunu göstermişlerdir. Qin vd. [34] üniform kalınlığa sahip bal peteği yapısını en düşük pik kuvvet ve en yüksek ÖES için optimize ettikleri çalışmalarında optimal geometrik parametrelere sahip fonksiyonel derecelendirilmiş bal peteğinin, geleneksel petek yapısına kıyasla çarpışma performansında kayda değer bir iyileştirme ve enerji sönmeme potansiyeli sunduğunu belirlemişlerdir. Salehi vd. [35] fonksiyonel olarak derecelendirilmiş köpük dolgulu tüplerin darbe yüklemesi altında deformasyon davranışı ve çarpışmaya karşı dayanıklılığını araştırmışlardır. Araştırmaları sonucunda çok katmanlı köpük dolgulu tüplerin deformasyonunun düşük mukavemetli bileşenlerden başladığını ve daha sonra kademeli gerilim artışı yoluyla yüksek mukavemetli bileşenlerin deforme olduğunu göstermişlerdir.

1.2.2. Kompozit Malzemeler ve Tüpler

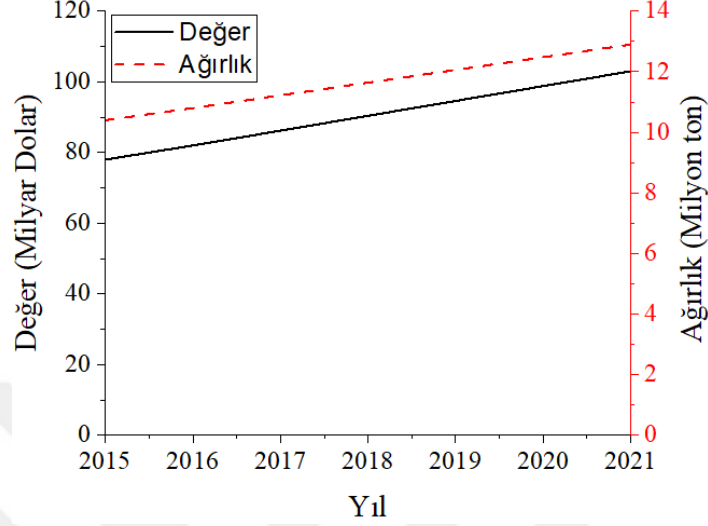
Kompozit Malzemeler

İki ya da daha fazla birbirinden farklı özelliklere sahip malzemenin birbiri içinde çözünmeden birleşerek oluşturdukları yeni karışıma kompozit malzeme denir. Kompozit malzemelerin yapısında takviye ve matris olmak üzere iki ana unsur bulunmalıdır. Takviye, mukavemet ve sertlik sağlarken çoğu durumda, matristen daha sert, daha güçlü ve daha rijittir. Matris ise takviye olarak kullanılan yapıların bir arada bulunmasını sağlayan, yapıştırıcı görevi gören unsurdur.

Kompozit malzemeyi oluşturan bileşenler önemli ölçüde farklı fiziksel ve/veya kimyasal özellikler sergilemektedirler. İki veya daha fazla malzemenin birleştirilmesiyle bileşenlerden farklı özelliklere sahip yeni bir malzeme ortaya çıkmaktadır. Ortaya çıkan kompozit malzemeler bileşenlere kıyasla hafiflik; yüksek dayanım, korozyon direnci, yüksek darbe dayanımı, tasarım esnekliği, parça azalması, boyutsal kararlılık, ısı ve elektrik iletkenliklerinin düşüklüğü, radar görünmezliği, manyetiklenmeme, uzun ömürlü olma ve yüksek özgül mukavemet gibi bir çok üstün özellik sergilemektedir [36].

Kompozit malzemelerin tarihçesi Mısır'lılar ve Mezopotamya'lı yerleşimcilerin güçlü ve dayanıklı binalar oluşturmak için çamur ve saman karışımını kullandıkları MÖ 1500'lere kadar uzanmaktadır [37]. Üstün özellikleri sebebiyle kompozit yapıların endüstride kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Şekil 1.6'da görüldüğü gibi 2015 yılında 78 milyar dolar

olan kompozit malzeme pazarının değerinin 2021 yılında 103 milyar dolara ulaşmıştır. 2016-2021 döneminde yıllık ortalama değer artış hızı yaklaşık yüzde 5 olmuştur [38].



Şekil 1.6. 2015-2021 arasında global ölçekte kompozit kullanımı

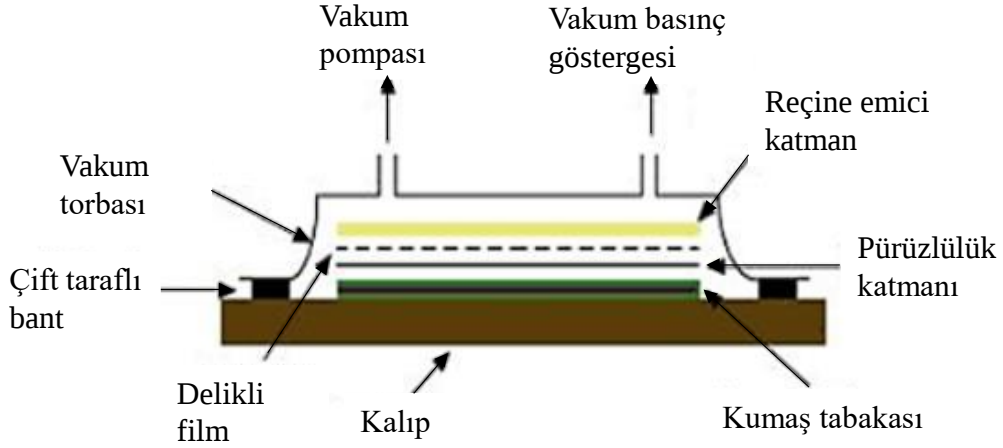
Kompozit malzemelerin sınıflandırılması Şekil 1.7’de görülmektedir. Başlıca kompozit malzemeler fiber takviyeli, parçacık takviyeli ve yapısal kompozitler olmak üzere üçe ayrılır. Fiber takviyeli kompozitler fiber özelliklerine göre sürekli ve kırılmış elyaf takviyeli, parçacık takviyeli kompozitler iri parçacık ve dağılım sertleştirmeli parçacık takviyeli, yapısal kompozitler ise laminatlar ve sandviç paneller olmak üzere ikiye ayrılırlar. Bunun dışında kompozit malzemeleri üretimde kullanılan reçine özelliklerine göre metal matrisli, seramik matrisli ve polimer matrisli olarak sınıflandırmak mümkündür [39].



Şekil 1.7. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması [40].

Kompozit malzemeleri üretmenin birçok farklı yöntemi vardır. Farklı üretim yöntemlerinin varlığı üretilcek kompozit malzemede hangi üretim yönteminin izlenmesi gerektiği seçimini zorlaştırmaktadır. Bunun yanında iki farklı yöntem ile aynı özellikleri sahip yapıları üretebilmesi de üretim yöntemini seçmeyi zorlaştıran bir başka unsurdur [40].

Vakum torbalama üretim tekniği (Şekil 1.8), kompozit kumaş malzemesinin kalıp ya da düz bir yüzeye istenilen kalınlıkta ve dizilimde elle yatırılması ve reçinenin elle kalıp içine dağıtılması sonrasında yapılan bir uygulamadır. Bu yöntemdeki negatif basınç uygulaması, kompozit yapı içindeki havanın dışarı çekilmesini sağlayarak hava kabarcıklarından arınmış katmanlı bir kompozit yapı imalatını mümkün kılmaktadır. Bu yöntem, elle yatırma yöntemiyle kompozit malzeme üretim yönteminin dezavantajlarını ortadan kaldırmak suretiyle daha hafif ve daha sağlam kompozit yapılarının üretilmesine imkan tanımaktadır. Üretilen katmanlı yapıdaki hava kabarcıklarının sebep olduğu boşluklar en aza indirilmekte ve bu sayede çatlak başlangıç kaynakları yok edilerek, yapının dayanımı önemli ölçüde artmaktadır. Vakum işleminin uygulaması ile katmanlı yapı içindeki fazla reçine emilmekte ve böylece katmanlı yapının lif-reçine oranının artması sağlanmaktadır. Bu yöntem dışında el yatırma, vakum infüzyon, püskürtme, elyaf sarma, profil çekme ve reçine transfer gibi farklı yöntemler bulunmaktadır.

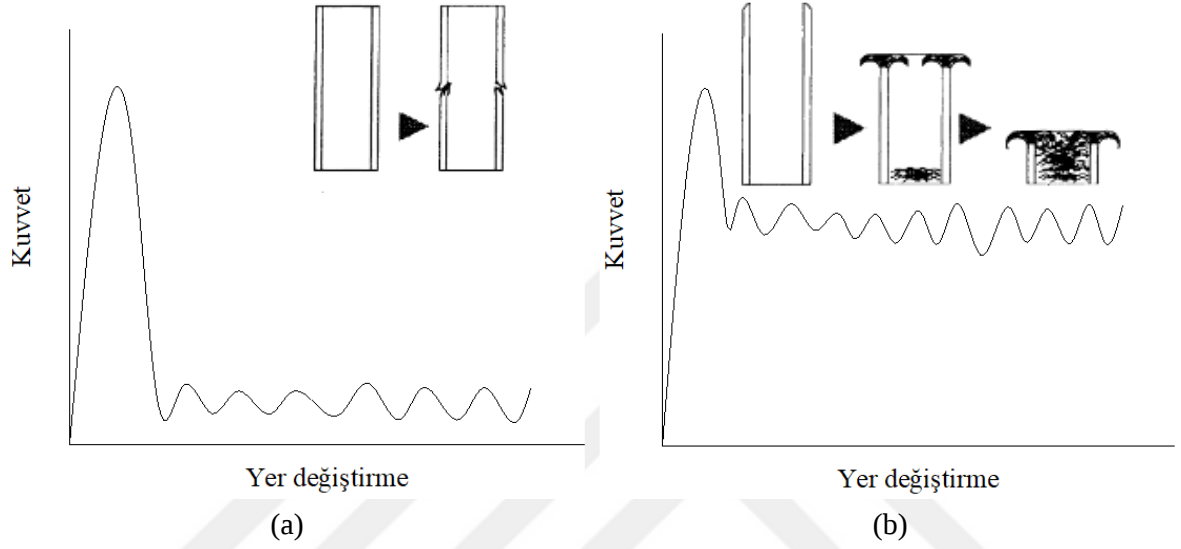


Şekil 1.8. Vakum torbalama yöntemi [41].

Kompozit Tüplerde Hasar Mekanizmaları

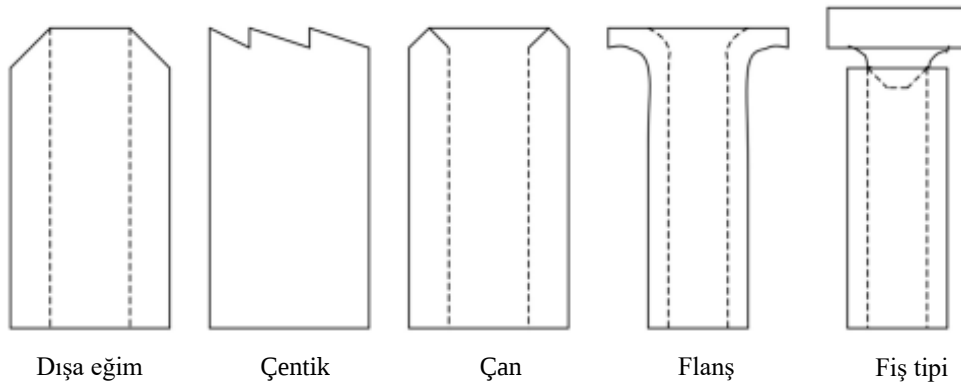
Kompozit tüpler aksel yüklemeye altında enerji sönmelerken katastrofik (yıkıcı) ve ilerleyici olmak üzere iki farklı şekilde hasara uğrarlar. Katastrofik hasar modunda kompozit tüpler ani şekilde tamamen hasara uğrarken Şekil 1.9'daki gibi kuvvet değeri hızlı bir şekilde

yükselir ve sonrasında hasarın başlamasıyla birlikte sıfıra yakın ortalama kuvvet ile deformasyon devam eder. Katastrofik hasar mekanizması, fiber takviyeli kompozitlerde katmanlar arası çatlak büyümesi veya katman içi kararsız çatlaklar olduğu durumlarda meydana geldiği için yüksek pik kuvvet ve düşük enerji sönümleme gibi istenmeyen özelliklere sahiptir [42].



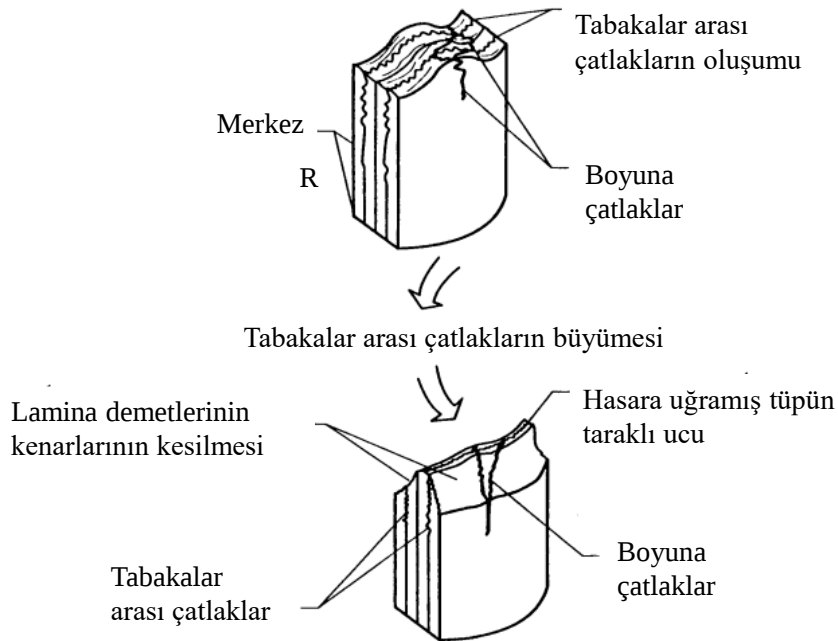
Şekil 1.9. (a) katastrofik ve (b) ilerleyici hasar için tipik kuvvet- yer değiştirme grafikleri

Kompozit tüplerin bir ucuna deformasyonu başlatmak amacıyla Şekil 1.10'de görüldüğü gibi gerilmeyi artırıcı farklı tetikleyici (trigger) mekanizmalar oluşturarak ilerleyici hasar elde edilebilir. İlerleyici hasar Şekil 1.9'da gösterildiği gibi düşük pik kuvvet ve sonrasında yüksek ortalama kuvvet sağlamaktadır. Çarpma anında hasar tetikleyicinin olduğu uçtan başlayarak kontrollü bir şekilde gövde boyunca ilerler. İlerleyici hasara uğrayan tüpler için dört farklı hasar modu tanımlanmaktadır. Bunlar; enine kesme, gevrek kırılma, lamina eğilmesi ve yerel burkulmadır. Enine kesme, gevrek kırılma ve lamina eğilmesi hasar modları, yalnızca gevrek fiber takviyeli kompozitlerde görülmektedir. Hem sünek hem de kırılgan fiber takviyeli kompozitler, yerel burkulma hasar modunu sergileyebilmektedir. Kompozit malzemeler genellikle bu hasar modlarının bir kombinasyonunu sergilemektedir. Bu hasar modları, kompoziti oluşturan takviye ve matris malzemelerin ve kompozitin yapısının mekanik özelliklerinin bir fonksiyonudur. [42].



Şekil 1.10. Hasar başlatıcı farklı tetikleme mekanizmaları [43].

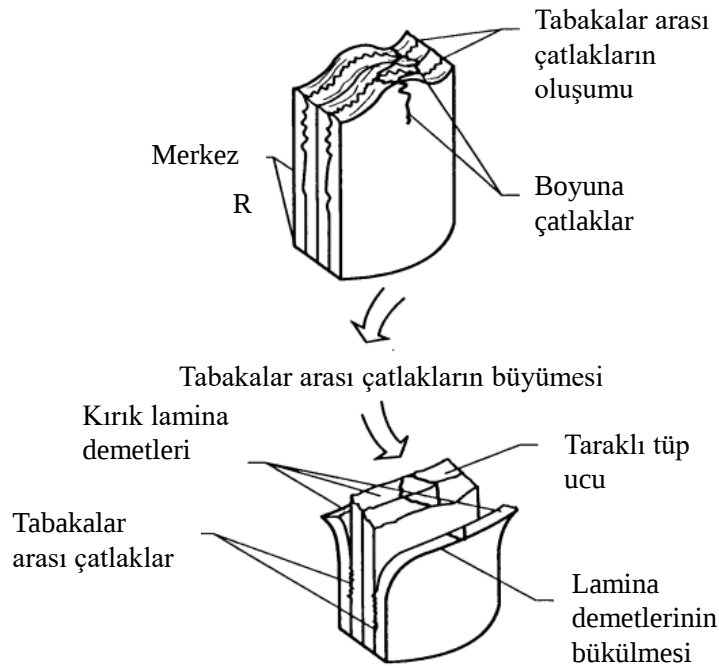
Enine kesme modu, lamina demetleri oluşturan bir veya birden fazla katmanlar arası ve uzunlamasına çatlaklara sahip konik şekilli laminanın enine kesiti ile karakterize edilmektedir. Kompozit tüpün çarpışma yüzeyi, Şekil 1.11'de görüldüğü gibi, yükün tüpün yüzeyi boyunca eşit olarak aktarılmaması için tarak şeklindedir. Bu hasar modunda ana enerji sönümlenme mekanizması, lamina demetlerinin kenarlarının enine kaymasıdır. Katmanlar arası ve boyuna çatlakların sayısı, konumu ve uzunluğu, kompozit tüpün yapısının ve bileşen malzeme özelliklerinin bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır.



Şekil 1.11. Enine kesme hasar modu [42].

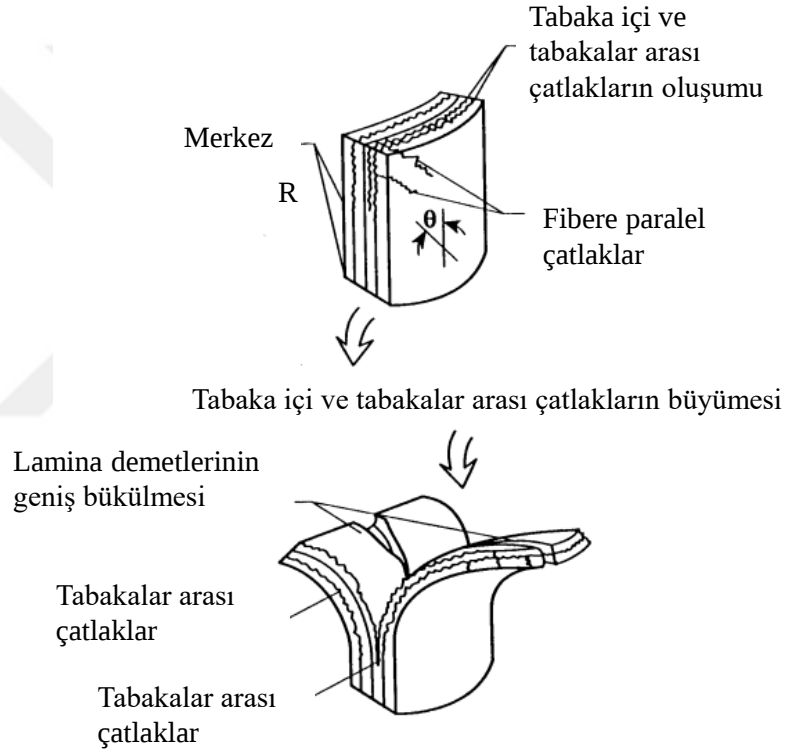
Katmanlar arası ve boyuna çatlakların uzunluğu laminatın kalınlığından daha azdır ve bu çatlaklar tekli veya çoklu laminadan oluşan lamina demetleri oluşturmaktadır. Lamina demetleri, uygulanan yüke direnmek için kolon görevi görmektedir. Yük uygulandığında, tabakalar arası çatlaklar kolonun kenarları kesilene kadar büyür ve Şekil 1.11'deki gibi konik şekilli bir enine kesit oluşturmaktadır.

Gevrek kırılmalı hasar modu, enine kesme moduna benzer hasar özellikleri sergilemektedir. Bu modlar arasındaki benzerlikler; lamineler arası ve boyuna çatlaklar, tarak şeklinde ezilme yüzeyi ve Şekil 1.12'te gösterildiği gibi temel enerji sönmüleme mekanizmasıdır (lamina demetlerinin bozulması). Bununla birlikte, gevrek kırılmalı hasar modundaki katmanlar arası çatlakların uzunluğu, enine kesme modundaki tek bir laminat uzunluğuna kıyasla bir ile on laminat kalınlığı arasındadır. Uzun lamina demetleri, her bir lamina demetinin kırılmasında daha fazla malzeme kullanılmasına neden olur. Kırık lamina demeti ne kadar uzun olursa, hasar modu o kadar az verimli olmaktadır. Gevrek kırılma modundaki lamina demetleri, bir miktar bükülme sergiler ve genellikle tabana yakın bölgelerden kırılmaktadır. Bir lamina demetinde hasar meydana geldiğinde, uygulanan yük numune içinde yeniden dağıtılır ve döngüsel çatlak büyümesi süreci ve lamina demeti kırılmaları tekrarlanır.



Şekil 1.12. Gevrek kırılmalı hasar modu [42].

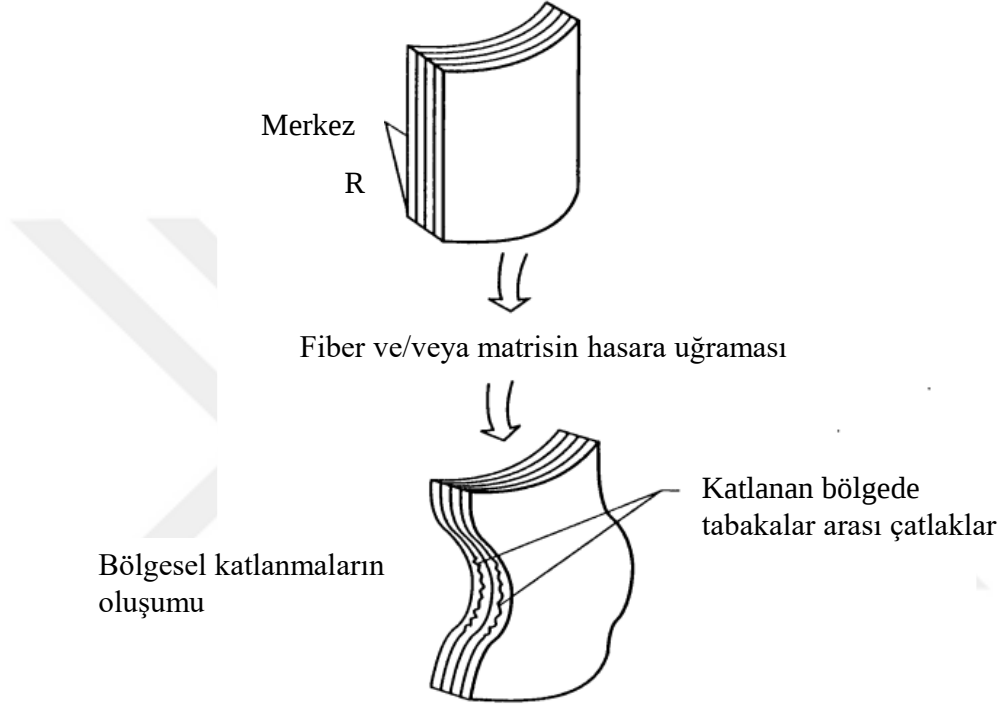
Lamina bükme hasar modu; Şekil 1.13'teki gibi çok uzun katmanlar arası, katmanlar arası ve fibere paralel çatlaklar ile karakterize edilirken bu hasar modunda lamina demetleri kırılmamaktadır. Katmanlar arası çatlaklar bitişik katmanların ara yüzeyinde, katman içi çatlaklar ise ayrı katmanlar içinde oluşur ve büyür. Fibere paralel çatlaklar, bir lamina içinde veya ortak fiber oryantasyonuna sahip birkaç bitişik lamina içinde fiber yönüne paralel olarak yayılır. Katmanlar arası, katman içi ve fibere paralel çatlakların uzunluğu genellikle laminat kalınlığının on katından fazladır. Lamina demetlerinin boylarının uzunluğu ve lamina demetlerinin kırılmaması dolayısı ile verimsiz bir hasar modudur.



Şekil 1.13. Lamina bükülmesi hasar modu [42].

Hem gevrek fiber takviyeli hem de sünek fiber takviyeli kompozit malzemeler tarafından sergilenen yerel burkulma modu sünek metallerin sergilediği davranışa benzerdir. Bu hasar modu, Şekil 1.14'te gösterildiği gibi, malzemenin plastik deformasyonu yoluyla yerel katlanmaların oluşmasıyla enerji sönmölmektedir. Kevlar gibi sünek elyaf takviyeli kompozit malzemeler bükölmüş elyafların sıkıştırma tarafı boyunca katlanma bölgesinde plastik olarak deforme olmaktadır. Lifler ayrıca katlanan liflerin gerilim tarafı boyunca bölünebilir ve katlar arasında lokal delaminasyonlar meydana gelebilir. Sünek elyaf takviyeli

kompozitler, deformasyondan sonra bozulmadan kalır ve bütünlük gösterir. Sünek elyaf takviyeli kompozitlerin deformasyon sonrası bütünlüğü, elyaf ve matris plastik davranışının ve elyaf bölünmesinin bir sonucudur. Fiberler kırılmadığında, enine kesme ve gevrek kırılma hasar modları tarafından sergilenen malzemenin ilerleyici hasarının aksine kompozit yapı bozulmadan kalmaktadır.



Şekil 1.14. Yerel burkulma hasar modu [42].

Kompozit Tüpler

Kompozit tüplerin enerji sönmleme davranışları ile ilgili ilk çalışmalar 1970’li yıllarda başlamıştır [44]. İlk çalışmaların üzerinden 50 yıldan uzun bir süre geçmiş olmasına rağmen bu alandaki çalışmalar devam etmektedir. Dairesel kesitli alüminyum ve karbon fiber takviyeli tüplerin, statik aksenal ve 5°, 10°, 20° ve 30° açılı eğik çarpışmaya dayanıklılıklarını karakterize etmek için deneysel olarak yaptıkları çalışmalarında Sun vd. [45] (Şekil 1.15 a) 0° ila 10° aralığındaki çarpışma açılarının hem alüminyum hem de kompozit tüpler için enerji sönmleme üzerinde çok az etkisi olduğunu bulmuşlardır. Karbon/epoksi kompozit tüplerin ÖES davranışını iyileştirmek için sedef yapısını taklit eden süreksiz ve birbirine bağlı bir tasarım stratejisi kullandıkları çalışmalarında Xin vd. [46] kat

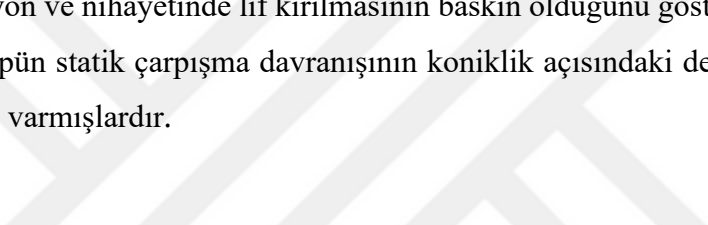
seviyesinde iyi tasarlanmış bir süreksizliği olan tek yönlü kompozit tüplerin, tek yönlü sürekli tüplere göre ÖES'yi %51'in üzerinde iyileştirebildiğini göstermişlerdir. Chen vd. [47] eksenel çarpışma için kare karbon fiber tüplerin yük taşıma kapasitesi ve hasar davranışı üzerindeki enine ön darbe hasarının etkisini araştırmıştır. Çalışmalarında hasarlı tüplerin, darbe öncesi hasar olmayan tüpler ile kıyaslandığında pik kuvvet, ortalama kuvvet ve enerji sönümlene açısından sırasıyla %38, %58.5 ve %58.3'e varan azalma sağladığını göstermişlerdir. Sun vd. [48] alüminyum, karbon elyaf takviyeli ve cam elyaf takviyeli polimer malzemelerle ince cidarlı dairesel tüplerin 0° , 10° , 20° ve 30° eğik yanal çarpışmaya dayanıklılık özelliklerini deneysel, sayısal ve analitik yöntemlerle araştırmışlardır.



Şekil 1.15. (a) tüplerin açılı [45] ve (b) yanal çarpışması [49].

Chambe vd. [50] karbon-aramidin hibrit bileşimi ve dokuma veya örgülü kumaş ile 0/90 tek yönlü hibrit konfigürasyonu da dahil olmak üzere, farklı malzeme ve mimarilere sahip kompozit tüplerin enerji sönümlene davranışlarını araştırmışlardır. Çalışmalarında çarpışma açısındaki artışla ilk pik kuvvetin azaldığını, ayrıca çarpışma açısının artması ile cam fiber tüpün enerji sönümlemesinin azalırken alüminyum ve karbon fiber tüplerin enerji sönümlemesinin arttığını bulmuşlardır. Shunfeng vd. [49] (Şekil 1.15 b) çap-kalınlık (D/T) oranı veya kalınlık gibi farklı geometrik konfigürasyona sahip dairesel alüminyum, cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli tüplerin yanal ezilme davranışlarını karakterize etmeyi amaçlamışlardır. Deneysel çalışmaları ile dairesel tüplerin yük taşıma kapasitelerinin, SE ve ÖES değerlerinin artan D/T oranı ile azaldığını ortaya koymuşlardır. Daha küçük D/T oranına sahip, kalın kompozitlerin daha iyi dayanım gösterdiğini, bu durumun yanal sıkıştırma boyunca meydana gelen uygun hasar modlarından kaynaklandığı bulmuşlardır.

on ve nihayetinde lif kırılmasının baskın olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, statik çarpışma davranışının koniklik açısındaki değişimle ilişkili olduğunu düşündürmektedir. Bu sonuçlar, koniklik açısının artmasıyla birlikte, statik çarpışma davranışının koniklik açısındaki değişimle ilişkili olduğunu düşündürmektedir.

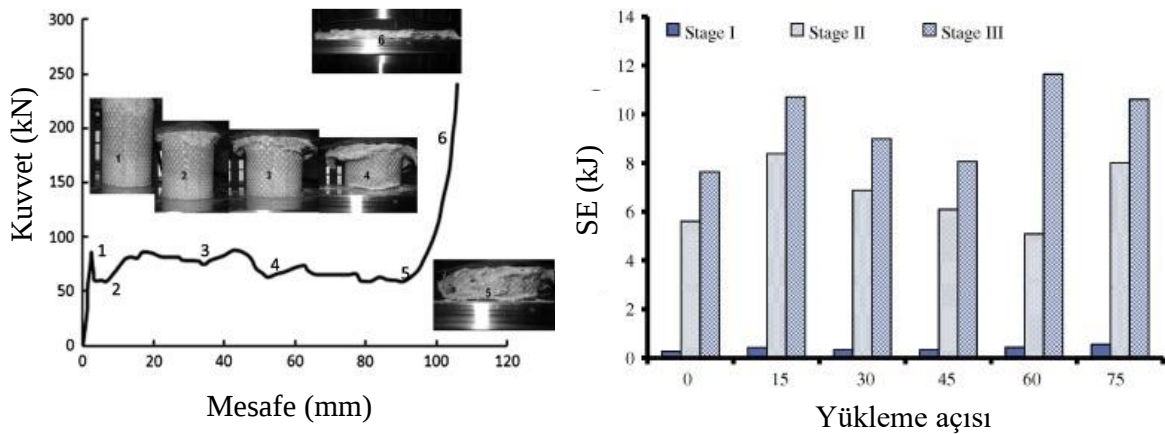


on ve nihayetinde lif kırılmasının baskın olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, statik çarpışma davranışının koniklik açısındaki değişimle ilişkili olduğunu düşündürmektedir. Bu sonuçlar, koniklik açısının artmasıyla birlikte, statik çarpışma davranışının koniklik açısındaki değişimle ilişkili olduğunu düşündürmektedir.

on ve nihayetinde lif kırılmasının baskın olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, statik çarpışma davranışının koniklik açısındaki değişimle ilişkili olduğunu düşündürmektedir. Bu sonuçlar, koniklik açısının artmasıyla birlikte, statik çarpışma davranışının koniklik açısındaki değişimle ilişkili olduğunu düşündürmektedir.

eksenel yüklemeye maruz kaldıklarında enerji sönümleme davranışlarını incelemişlerdir. Kompozit konik tüplerin enerji sönümleme kapasitesini geliştirmek için kalınlığını, ortalama çapını arttırmanın yanında konikliğini azaltmanın yararlı olduğunu ortaya koymuşlardır. Başka bir çalışmada Boria vd. [56] konik kompozit tüplerin enerji sönümleme davranışını analitik olarak araştırmıştır. Önerdikleri basit analitik yaklaşım ile eksenel olarak yüklemeye maruz kalan konik kompozit tüplerin enerji sönümleme değerlerini yeterli doğrulukta tahmin etmişlerdir. Nia vd. [57] 20° koniklik açısına sahip kompozit kesik-konik yapının geometrisini, topoloji optimizasyon yöntemi kullanılarak optimize etmişlerdir. Ahmad [58] boş ve köpük ile doldurulmuş konik tüplerin darbe ve enerji sönümleme davranışını, eksenel ve eğik yükleme koşulları altında araştırdığı çalışmada köpük dolgululu konik tüplerin, ilk pik kuvvetinde önemli bir artış olmaksızın hem eksenel hem de eğik darbe yüklemesi için enerji sönümleme kapasitesini arttırdığı ve kuvvet değerini stabilize ettiğini bulmuştur.

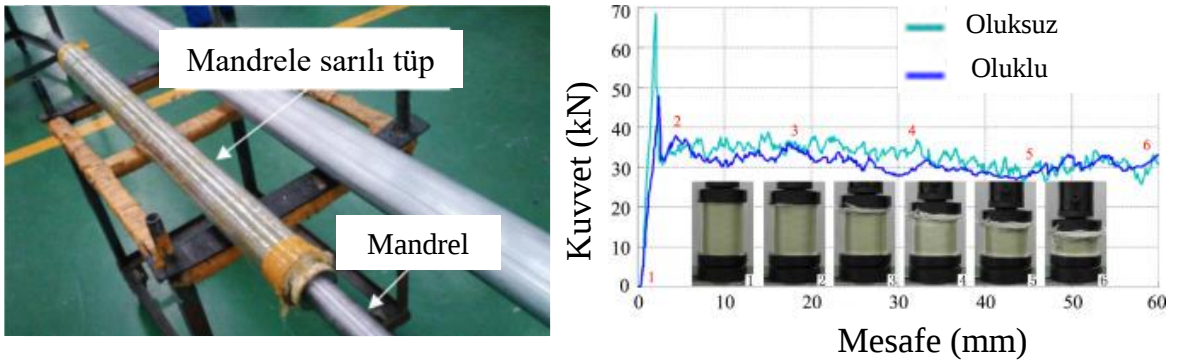
Kesit ve konikliğin yanında kompozit tüplerde enerji sönümleme davranışını etkileyen en önemli faktörlerden biri de fiber açısı dizilimidir. Thornton vd. [59] kare ve dairesel kesitli tüplerde yaptıkları çalışmalarında fiber dizilimindeki değişimlerin daha yüksek enerji sönümleme ve mukavemete yol açtığını belirlemişlerdir. Ayrıca dizilimdeki değişimlerin delaminasyon ve katastrofik hasar ile karşılaşılmasını için dengelenmesi gerektiğini ifade etmişlerdir.



Şekil 1.17. Cam fiber dokuma kumaş tüplerde elyaf açısının enerji sönümleme kapasitesine etkisi [60].

Schmueser vd. [61] karbon-epoksi, cam-epoksi ve aramid-epoksi kompozit malzeme sistemlerinin enerji sönümleme ve hasar özelliklerini karakterize etmek ve sonuçları alüminyum ve çelik ile karşılaştırmak için yürüttükleri çalışmalarında enerji sönümleme için

test sonuçlarının, fiber açısı ve malzemeye bağlı olarak önemli ölçüde değişiklik gösterdiğini, karbon-epoksi, cam-epoksi tüplerin, 1024 çelik tüplerden daha yüksek ÖES değerine sahip olduğunu belirlemişlerdir. Hull [62] fiber filaman sarma açısının arttıkça ÖES değerinin arttığını belirterek bu ilişkinin $\pm 65^\circ$ 'ye kadarki sarma açılarına kadar geçerli olduğunu sonrasında azaldığını göstermiştir. Mahdi vd. [60] aksenal çarpışmaya maruz kalmış farklı elyaf dizilimlerine ($0^\circ/90^\circ$, $15^\circ/-75^\circ$, $30^\circ/-60^\circ$, $45^\circ/-45^\circ$, $60^\circ/-30^\circ$ ve $75^\circ/-15^\circ$) sahip kompozit tüplerin enerji sönümleme davranışlarını araştırdıkları çalışmalarında $15^\circ/-75^\circ$ ve $75^\circ/-15^\circ$ dizilime sahip tüplerin avantaj sağladığı sonucuna varmışlardır (Şekil 1.17). Park vd. [63], grafit/epoksi kare tüplerin enerji sönümleme özellikleri üzerinde istifleme sırasının etkisini araştırmıştır. $[(0^\circ)_8]_T$ veya $[(90^\circ)_8]_T$ dizilimli kompozit tüplerin zayıf enerji sönümleme özellikleri gösterdiğini ortaya koymuşlardır. Ayrıca $[(+45^\circ/-45^\circ)_4]_T$ ve $[(+60^\circ/-60^\circ)_4]_T$ istiflemelerinin, kompozit kare tüpün enerji sönümleme özelliklerini geliştirmeye katkıda bulunduğunu da göstermişlerdir. Mehdi vd. [64] aksenal olarak ezilmiş pamuk/epoksi kompozit tüplerin davranışını araştırmak için deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. Çalışmalarında 90° ve 80° 'lik iki fiber oryantasyon açısı kullanmışlardır. 90° yerine 80° fiber oryantasyon açısına sahip fabrikasyon kompozit tüpler kullanıldığında yük taşıma kapasitesinde ve enerji sönümlemede artış olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Leon ve Vinaly [65] tüp çapının ve kat istiflemesinin enerji sönümleme üzerindeki etkisi kapsamlı bir şekilde araştırmışlardır. Buldukları sayısal sonuçları başka çalışmalarda yapılan deneylerle karşılaştırmış ve sonuçların birbirleriyle uyumlu olduğunu göstermişlerdir.

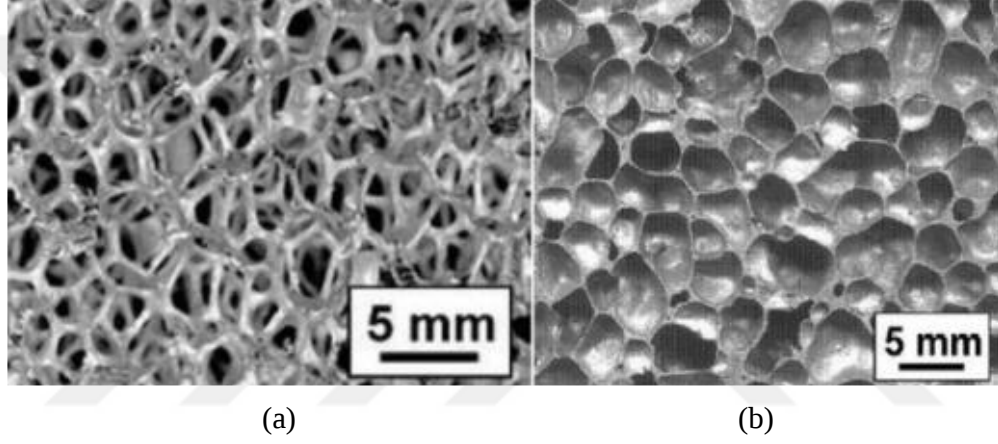


Şekil 1.18. Filaman sarma yöntemi ile üretilmiş GFRP tüplerin sarım açısının optimizasyonu [66].

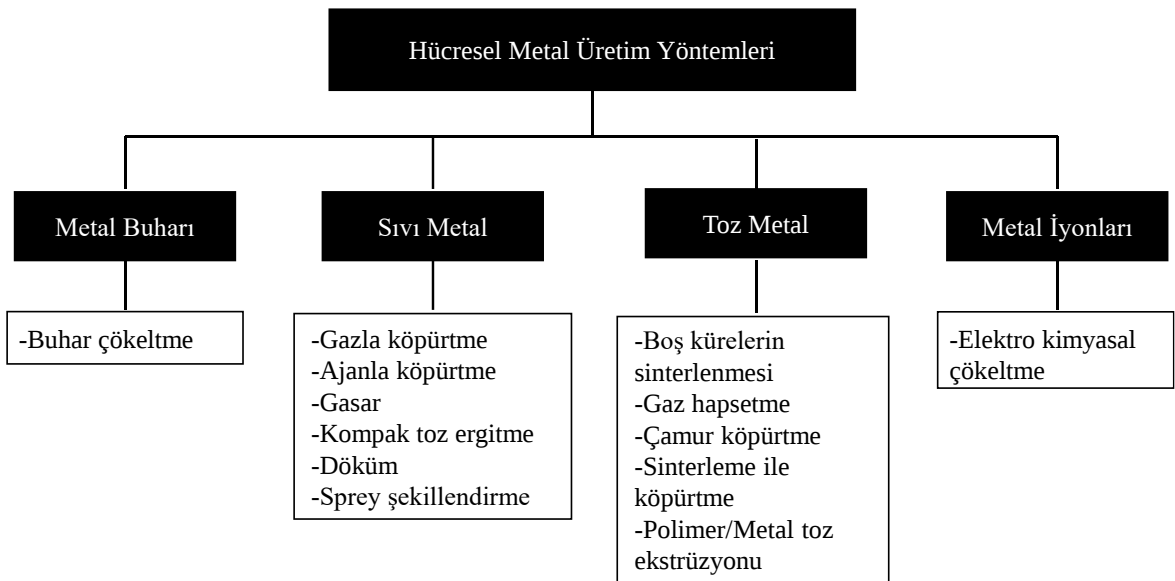
Dayong vd. [67] 759/5224 dokuma cam kumaştan/epoksiden yapılmış ve farklı fiber yönelimlerine sahip kompozit tüplerin çarpışma özellikleri ve enerji sönümleme kapasitesi eksenel statik ve darbeli koşullar altında incelemiştir. Uygun fiber oryantasyonu seçilerek enerji sönümleme kapasitesinin geliştirilebileceğini ve darbeli kırma testlerindeki enerji sönümleme kapasitesinin statik testlerdekilere göre düşük olduğunu bulmuşlardır. Zhang vd. [66] Şekil 1.18'da görülen cam elyaf takviyeli dairesel tüplerin istifleme sırasının ve elyaf oryantasyonunun enerji sönümleme performansı üzerindeki etkilerini, eksenel statik sıkıştırma, ağırlık düşürme testleri ve sayısal simülasyon ile araştırmışlardır. Çalışmalarındaki deneysel ve sayısal sonuçlar, eksenel yerleşimlerin uygun şekilde seçilmesinin kompozit tüplerin ÖES değerinin iyileştirebileceğini göstermiştir. Rahip vd. [68] cam elyaf takviyeli tüplerin, çarpışmaya dayanımlarını belirlemek için statik eksenel sıkıştırma testleri gerçekleştirmişlerdir. Bu amaçla, bu çalışmada 45° , 55° , 65° ve 90° olmak üzere dört farklı fiber istifleme sağıp tüpler kullanarak 45° istifleme sağıp tüp numunesinin en iyi ÖES değeri sağıp olduğunu bulmuşlardır. Eksenel orta hızlı darbe yüklemesine maruz kalan hibrit kenaf/cam elyafı ile güçlendirilmiş epoksi tüplerin davranışı ve mukavemetinin deneysel olarak araştırıldığı çalışmalarında Supian vd. [69] $\pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$ ve $\pm 70^\circ$ hibrit kenaf/cam elyafı ile güçlendirilmiş epoksi ve cam elyafı ile güçlendirilmiş epoksi olmak üzere üç farklı oryantasyon seçmişlerdir. Hibrit kompozit tüplerin $\theta=30^\circ$, 45° ve 70° 'deki sarım oryantasyon parametresinin, cam fibere kıyasla enerji sönümleme özelliklerini sırasıyla %33, %34 ve %56 oranında arttırdığını gözlemlemişlerdir. Çift konsol giriş , uç çentikli eğilme ve karışık mod eğilme testlerinde farklı yükleme yönlerine maruz kalan karbon fiber laminatların asimetrik istifleme dizilerinin delaminasyon kırılma davranışına odaklandıkları çalışmalarında Rased vd. [70] numunelerin kenarlarındaki gözlemler ile delaminasyon davranışının numune istifleme sırasına bağımlı olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Supian vd. [71] statik sıkıştırma yükü altında hibrit kenaf/cam elyaf takviyeli epoksi ve cam elyaf takviyeli epoksinin üç farklı sarım açısı içeren ($\theta = 30^\circ$, 45° ve 70°) tüpün çarpışmaya dayanıklılık performansı incelemiştir. Yüksek sarım yönelimli hibrit kenaf/cam kompozit tüpün enerji sönümlemek için en iyi sarım yönelimine sağıp olduğunu göstermişlerdir.

1.2.3. Metalik Köpükler ve Köpük Dolgulu Yapılar

Metalik köpükler, gözeneklere sahip içerisi boşluklu (%40-90) katı bir metalden oluşan hücresel yapılardır. Bu yapılar, yüksek sertlik, düşük kütle ve yüksek darbe enerjisi sönümlleme gibi farklı malzemelerin özelliklerini bir araya getirdikleri için dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadırlar [72]. Şekil 1.19’de görüldüğü gibi metalik köpüklerin açık hücreli ve kapalı hücreli olmak üzere iki çeşidi bulunmaktadır. Açık hücreli metalik köpüklerde hücreler birbiriyle bağlantılı bir halde iken kapalı hücreli metalik köpüklerde hücrelerin içerisinde gaz hapsedilmiş ve birbirinden yalıtılmıştır.



Şekil 1.19. (a) açık ve (b) kapalı hücreli köpük [73].

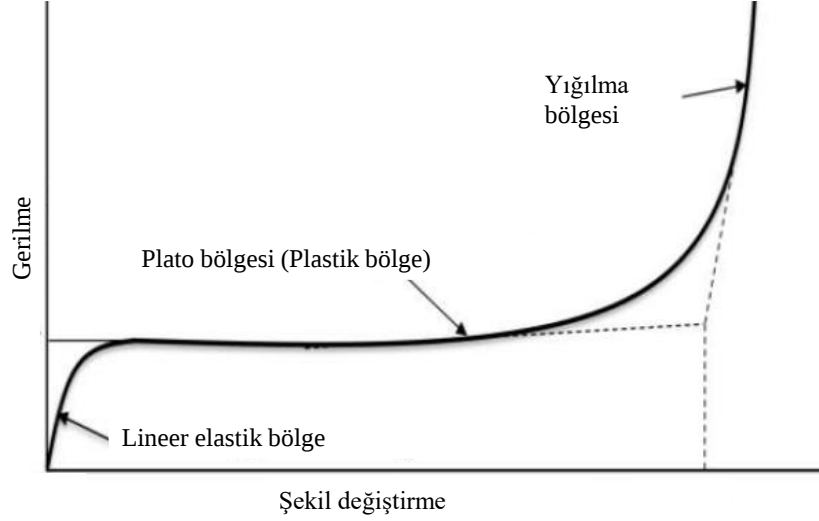


Şekil 1.20. Hücresel metal üretim yöntemleri

Metalik köpük üretim yöntemlerini farklı sınıflandırma metotları bulunmaktadır. Bu sınıflandırmalardan biri de Şekil 1.20’de görülen metallerin üretim sürecinde bulundukları madde haline göreler. Buna göre üretim yöntemleri sıvı metal, toz formda katı metal, metal iyon çözelti ve metal buharı ya da gaz metal karışımı olarak sınıflandırılabilir.

Metal buharı yönteminde metal buharı, vakum odasında oluşturularak soğuk bir öncü yüzey üzerine yoğunlaştırılması ile elde edilmektedir. Yoğuşturulan metal, katmanlar halinde birikerek buhar yoğunluğu ve bekleme süresine bağlı olarak belirli bir film kalınlığına ulaşır. Sıvı metalden metal ve gözenekli bir malzeme, direkt köpürtme ya da polimerik köpük aracılığıyla dolaylı köpürtme yöntemi veya akışkan sıvı metalin çevresine sonradan gözenek boşluğu olacak katı haldeki boşluk tutucu dolgu malzemesi yöntemi kullanılarak üretilmektedir. Hücresel metalik yapıların üretiminde toz halindeki katı metal de kullanılabilir. Bu süreçte metal tozu tamamen katı halde kalarak sinterleme veya diğer katı hal işlemlerinden geçer. Bu durum üretim sonucu elde edilen hücresel yapının yüzey şekli için çok önemlidir. Yüzey geriliminin sadece sıvı halde olması kapalı gözenekli yapıların oluşma eğilimini artırır. Oysaki sinterlenmiş gözenekli ürünler, sinterlere bağlanan partiküllerin olduğu izole halde ve açık görünümündedir. Elektro kimyasal kaplama yönteminin başlangıç maddesi metal iyonlarıdır. Metal iyonları açık gözenekli yapıya sahip iletken bir polimer köpüğün duvarlarına çöktürülerek ve sonrasında polimerin ısıtılarak uzaklaştırılmasıyla gerçekleştirilir.

Şekil 1.21’de metalik köpüklerin tipik gerilme-şekil değiştirme grafiği görülmektedir. Grafikte lineer elastik, plato ve çökme olmak üzere üç farklı bölge bulunmaktadır. Düşük şekil değiştirme oranlarının olduğu lineer elastik bölgede metalik köpükler elastik davranış gösterirler. Şekil değiştirmenin artması ile gerilme-şekil değiştirme grafiğinde uzun ve yatay olan plato bölgesi bulunmaktadır. Bu bölgede köpük malzeme hücrelerin yıkılması ile enerji sönümler ve şekil değiştirme oranı artmasına rağmen gerilme değeri neredeyse sabit kalmaktadır. Sonrasında kuvvet değerinin keskin bir şekilde arttığı yığılma bölgesi başlar. Yığılma bölgesinde köpük malzemede gözeneklerin kapanmasıyla meydana gelir. Gözenekler tamamen kapandığında gözenek duvarları birbirine temas eder ve temastan sonra kuvvet uygulamaya devam edilmesi halinde katı malzemenin kendisi sıkıştırılmaya başlar. Bu durum gerilme-şekil değiştirme grafiğinin son bölgesinde gerilme değerinin hızla artmasına sebep olmaktadır.



Şekil 1.21. Metal köpükler için tipik gerilme-şekil değiştirme grafiği

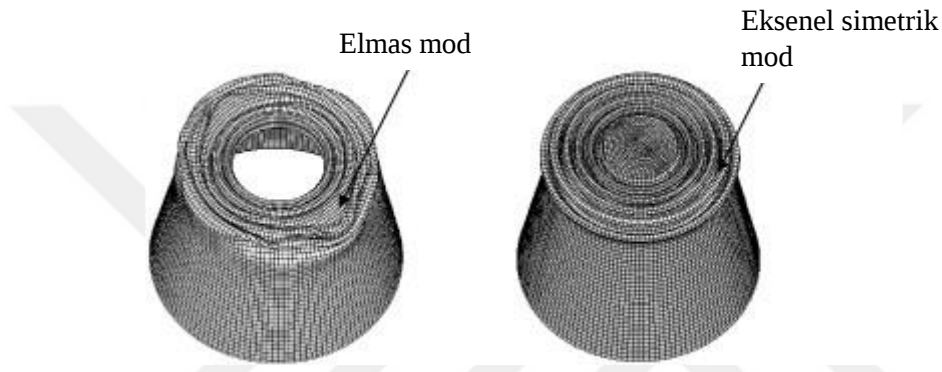
Genel olarak, hücresel malzemenin mekanik özellikleri, köpüğün bağıl yoğunluğunun bir fonksiyonudur [74]. Köpük malzemesinin mekanik mukavemeti, köpük içindeki bağıl yoğunluğun artmasıyla artar. Bu davranış, plato gerilimi (σ_f) ile köpük bağıl yoğunluk (ρ_f/ρ_{fo}) arasındaki Denklem 1.7'de gösterildiği gibi ifade edilir [75].

$$\sigma_f = C_f \left(\frac{\rho_f}{\rho_{fo}} \right)^n \quad 1.7$$

burada ρ_f köpük yoğunluğu, ρ_{fo} temel malzemenin yoğunluğu, C_f ve n ise köpükler için tek eksenli sıkıştırma testi verilerinden elde edilen malzeme sabitleridir.

Metal köpükler gibi hücresel malzemeler yüksek şekil değiştirmelere maruz kaldıkları durumlarda darbe enerjisini sönmleme konusunda üstün bir yetenek sergilemektedirler. Bu nedenle metalik köpükler Şekil 1.22'te görüldüğü ince cidarlı yapılarda dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadırlar [76]. Literatürde, sabit yükte büyük deformasyona maruz kalabildikleri için metalik köpük malzemeler, ideal enerji sönmleyiciler olarak kabul edilmektedirler. Bunun yanında ince cidarlı yapılarda köpük dolgu malzemelerinin varlığı, yapının çarpışma stabilitesini ve çökme modunu iyileştirmeye yardımcı olarak genel çarpışma dayanıklılığını arttırmaktadır [76]. Bu bağlamda, ilk olarak dairesel ve kare ince duvarlı tüplerin enerji sönmleme özellikleri üzerinde köpük dolgu maddesinin etkisi araştırılmıştır. Reid vd. [77,78] statik ve dinamik yükler altında kare köpük dolgulu

kolonların ezilme davranışı üzerinde kapsamlı bir deneysel çalışma gerçekleştirmişlerdir. Hanssen vd. [79,80], hem statik hem de dinamik eksenel yükleme koşulları altında alüminyum köpüklerle doldurulmuş alüminyum tüplerin davranışını tahmin etmek için analitik formüller bulmuşlardır. Santosa vd. [81], alüminyum petek dolgusunun kare tüplerin eksenel ezilme direnci üzerindeki etkisini araştırmış ve tüplerin alüminyum petek ile doldurulmasının tüplerin duvarını kalınlaştırmaktan daha fazla tercih edilebileceğini göstermişlerdir.

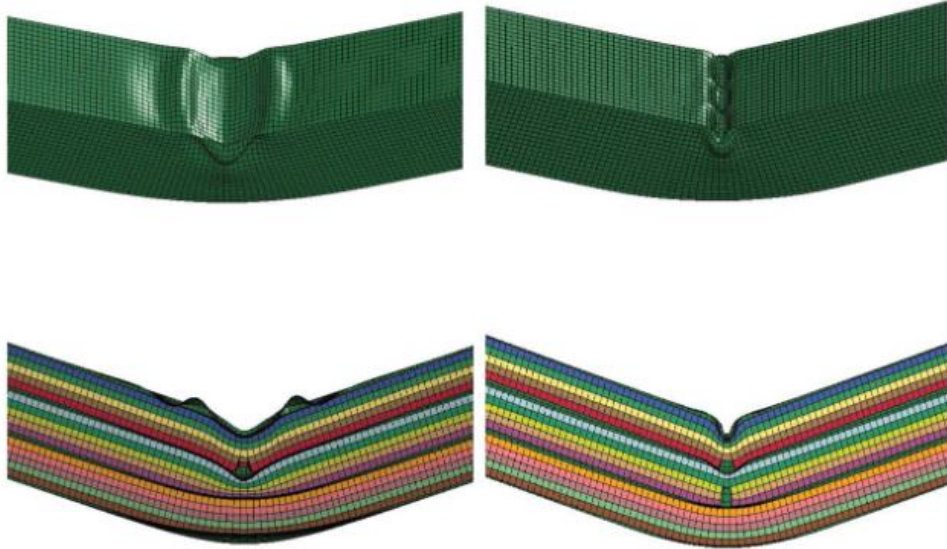


Şekil 1.22. Köpük dolgulu ve boş konik çelik tüplerin deformasyon şekillerinin karşılaştırılması [76].

Köpük dolgusu, ince cidarlı tüplerin enerji sönümleme kapasitesini arttırmakla birlikte enerji sönümlemenin köpük yoğunluğuna da yüksek oranda bağımlı olduğu bilinmektedir. Burada köpük yoğunluğu ne kadar yüksekse enerji sönümleme de o kadar yüksek olacaktır. Reyes vd. [82] yüksek yoğunluklu alüminyum köpüğün, ince duvarlı kare tüplerde enerji sönümlemeyi önemli ölçüde artırırken boş tüp ile karşılaştırıldığında ÖES değerlerini azalttığını göstermişlerdir. İnce duvarlı dairesel ve kare tüplerin yüksek yoğunluklu köpüklerle doldurulmasının ÖES'de bir azalmaya neden olabileceği görülmektedir [76]. Bu nedenle, tüp geometrisinin ve uygun köpük yoğunluğunun seçimi, bu tür yapıların çarpışma dayanıklılığını optimize etmek için kritik öneme sahiptir.

Köpük malzemelerinin yaklaşık olarak aynı mikroskobik hücreleri/gözenekleri içerdiği varsayılmaktadır. Köpüklerin genel özelliklerinin tipik olarak izotropik ve homojen olduğu, yani tek biçimli köpük malzemeleri olduğu varsayılır. Son yıllarda farklı özelliklere sahip fonksiyonel olarak [83] derecelendirilmiş köpüklerin dolgu malzemesi olarak kullanımı ile ilgili araştırmalar artmaktadır. Örneğin, Gupta [84,85] fonksiyonel olarak derecelendirilmiş köpük üretmiş ve deneysel olarak enerji sönümlemeyi iyileştirebileceğini

göstermiştir. Hangai vd. [86] sürtünme karıştırma kaynağı yolu öncü köpürme yöntemi ile A1050–A6061 malzemelerinden üretilmiş fonksiyonel derecelendirilmiş alüminyum köpüğün taban malzemelerinin gücüne bağlı olarak çoklu plato gerilmeleri ve kontrollü deformasyon davranışı gibi yeni mekanik özellikler sergileme potansiyeline sahip olduğunu belirtmişlerdir. Mohammadiha vd. [87] eğik darbe yüklemesine maruz kalan fonksiyonel derecelendirilmiş petek ile doldurulmuş kare kesitli çarpma kutularının çarpışma dayanımını iyileştirdiğini sonucuna varmışlardır. Çarpma dayanıklılığını araştırmak için fonksiyonel olarak derecelendirilmiş köpük ile doldurulmuş yeni bir tampon kirişini araştırdıkları çalışmalarında Xiao vd. [88] fonksiyonel köpük dolgulu tampon kirişinin, temel tampon kirişine kıyasla ağırlığı yaklaşık %14.4 oranında azaltırken binek otomobilin çarpışmaya dayanıklılık performansını sağladığını göstermişlerdir. Hu Liu vd. [89] sıcaklık gradyanlı ortamlarda yoğunluk dereceli köpük çubukların darbe performansını incelemek için çift şok dalgası teorisine dayanan analitik bir model sundukları çalışmalarında sıcaklık gradyanının çoğu durumda fonksiyonel köpüklerin enerji sönmleme kapasitesini azaltabileceğini ifade etmişlerdir. Yin vd. [90] farklı enine kesit konfigürasyonlarına sahip dokuz fonksiyonel köpük malzeme dolgulu yapıların bükülme dayanıklılığını incelemişlerdir. Fonksiyonel derecelendirilmiş köpük dolgulu tüplerde bükülme dayanıklılığının, derecelendirilmiş fonksiyonel parametresinden önemli ölçüde etkilendiğini göstermişlerdir (Şekil 1.23).



Şekil 1.23. Fonksiyonel derecelendirilmiş köpük dolgulu çarpışma kutularının eğilme davranışının sayısal olarak incelenmesi [90].

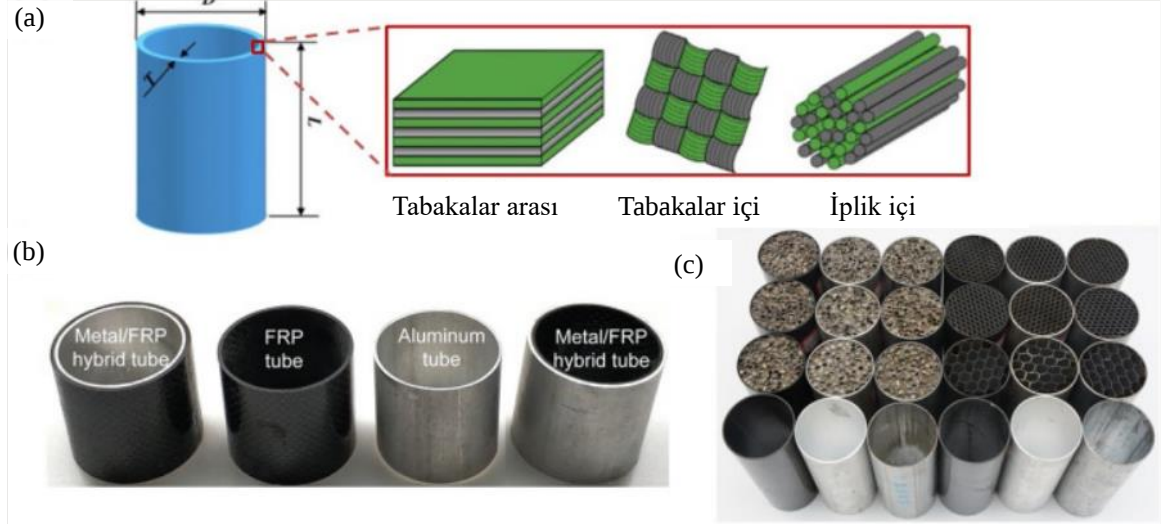
Zhejian vd. [83] köpük dolgulu fonksiyonel dereceli kıvrımlı yapıların dinamik ezilme tepkileri ve enerji sönümlemesini inceledikleri çalışmalarında 10 m/s çarpışma hızı altında pozitif dereceli yapıların negatif dereceli yapılara göre önemli ölçüde pik kuvveti azaltırken enerji sönümlemeyi arttırdığını ve daha stabil kuvvet- yer değiştirme eğrisi verdiğini bulmuşlardır. Najibi vd. [91] fonksiyonel olarak derecelendirilmiş köpük dolgulu ince duvarlı tüplerin enerji sönümleme özelliklerini statik koşullarda inceleyerek katmanlı numuneler üzerinde gerçekleştirilen simülasyonlar ile 13 katmanlı numunenin, eksenel doğrultuda sürekli yoğunluk değişimleri için uygun bir yaklaşım olduğunu göstermişlerdir. Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş köpük dolgulu tüplerin düşme ağırlıklı darbe yüklemesi altında deformasyon davranışını ve çarpışmaya karşı dayanıklılığını araştırdıkları çalışmalarında Salehi vd. [35] çok katmanlı köpük dolgulu tüplerin deformasyonunun düşük mukavemetli bileşenlerden başladığını ve daha sonra kademeli gerilim artışı yoluyla yüksek mukavemetli bileşenlerde yayıldığını ortaya koymuşlardır. Shunfeng vd. [92] tek eksenli sıkıştırma yükleri altında fonksiyonel olarak derecelendirilmiş polimerik köpüğün tepkilerini tahmin etmek için analitik bir model geliştirmişlerdir. Çalışmalarında düşük ile orta derecede şekil değiştirme hızları için ($10^{-3}\text{s}^{-1} \sim 10^2\text{s}^{-1}$) analitik modelin, fonksiyonel derecelendirilmiş köpüğün gerilmesi-şekil değiştirme ilişkilerini tahmin etmek için uygulanabilir olduğu sonucuna varmışlardır.

1.2.4. Hibrit Tüpler

Enerji sönümleyici sistemlerde hibrit yapılar, mevcutta bulunan farklı üstün özellikli iki veya daha fazla malzemenin daha iyi enerji sönümleyecek şekilde konfigüre edilerek bir araya getirilmesi şeklinde oluşturulan yapılardır. Metal esaslı enerji sönümleyiciler, iyi enerji sönümleme özelliklerine sahip olmalarına rağmen ağırlıkları yüksektir. Kompozit esaslı enerji sönümleyiciler ise iyi enerji sönümleyici özelliklerine rağmen maliyetleri yüksektir. Bu iki farklı yapının birleştirilmesi ile uygun maliyetli, hafif ve üstün enerji sönümleyici yapılar elde etmek mümkündür[93,94].

Şekil 1.24'de görüldüğü gibi hibrit yapılar, bileşen malzemelerine göre üç ana kategoriye ayrılabilir: (a) çoklu fiber takviyeli kompozitlerle üretilen hibrit yapılar; (b) metalik malzemelerden ve kompozitlerden (metal/kompozit hibrit malzemeler) oluşan hibrit yapılar; (c) hücreli malzemelerden ve kompozitlerden oluşan hibrit yapılar. Çoklu fiber takviyeli kompozitler hibrit ince cidarlı tüplere, araç tamponlarına, darbe önleyici başlıklara

ve zırh malzemelerine [95]; metal kompozit hibrit yapılar araçların A, B ve C sütunlarına (Şekil 1.2) [96]; hücresel malzemeden oluşan kompozit ince cidarlı yapılar helikopterler ve otomobiller [97] için çarpışma kutularına uygulanmaktadır.

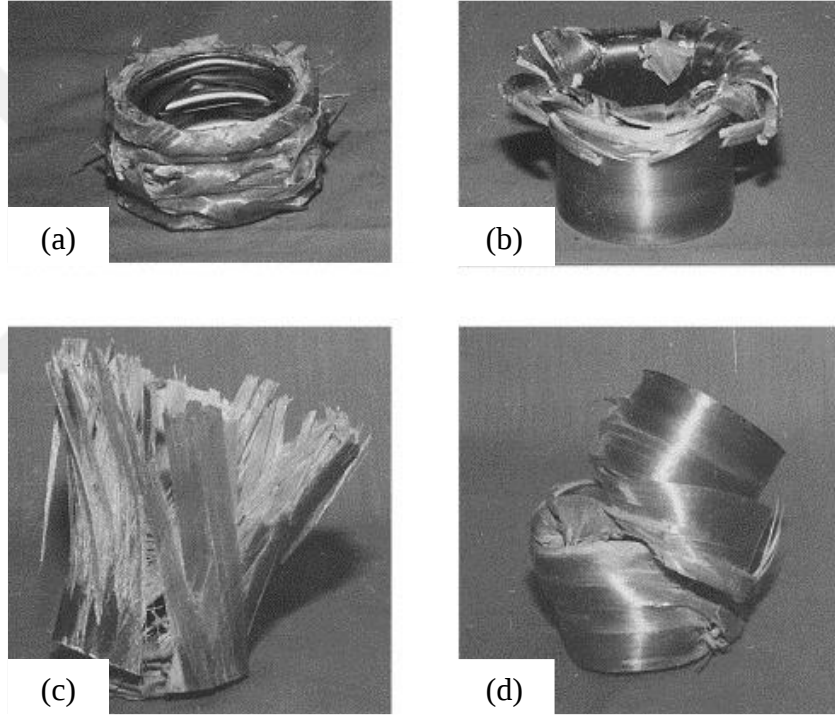


Şekil 1.24. Farklı şekillerde hibritleşme örnekleri: (a) çoklu fiber takviyeli kompozitlerle üretilen hibrit yapılar, (b) metal-kompozit hibritleşmesi ve (c) hücresel malzemeler ile hibritleşme [98].

Çoklu fiber takviyeli kompozitlerle üretilen hibrit malzemeler ve yapılar farklı tipteki lifler ile Şekil 1.24 (a)'da gösterildiği gibi belirli ara katman, katman içi veya iplik içi formlarda oluşturulabilirler. Literatürde fiberler genel olarak, doğal fiber (bambu, sisal, ipek, ağaç, palmye, keten vb. gibi) ve sentetik fiber (karbon, cam, aramid vb. gibi) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Sentetik fiberler genellikle üstün mekanik özelliklere sahiptir fakat malzeme üretim maliyetleri daha yüksektir; doğal fiberler ise sentetik muadillerine göre düşük üretim maliyeti, kabul edilebilir özgül mukavemet özellikleri, düşük yoğunluk ve biyolojik olarak parçalanabilirlik gibi birçok avantaja sahiptirler [99]. Çoklu fiber takviyeli kompozitler ile üretilen hibritlerin yapısında birden fazla tip fiberin kullanılması, genellikle hibrit olmayan kompozitlerin eksikliklerinin üstesinden gelinmesini sağlarken üretim maliyetini de düşürmektedir [100].

Metal/kompozit hibrit tüpler Şekil 1.24 (b)'de görüldüğü gibi genellikle metal tüpler ile kompozit tüplerin farklı konfigürasyonlarda iç içe yerleştirilmesi [101,102], metal tüplerin dışına fiber sarılması [103] şeklinde oluşturulan yapılardır. Metal/kompozit hibrit tüplerin çarpışma mukavemeti ve enerji sönmeme kapasitesini araştırmak amacıyla ilk

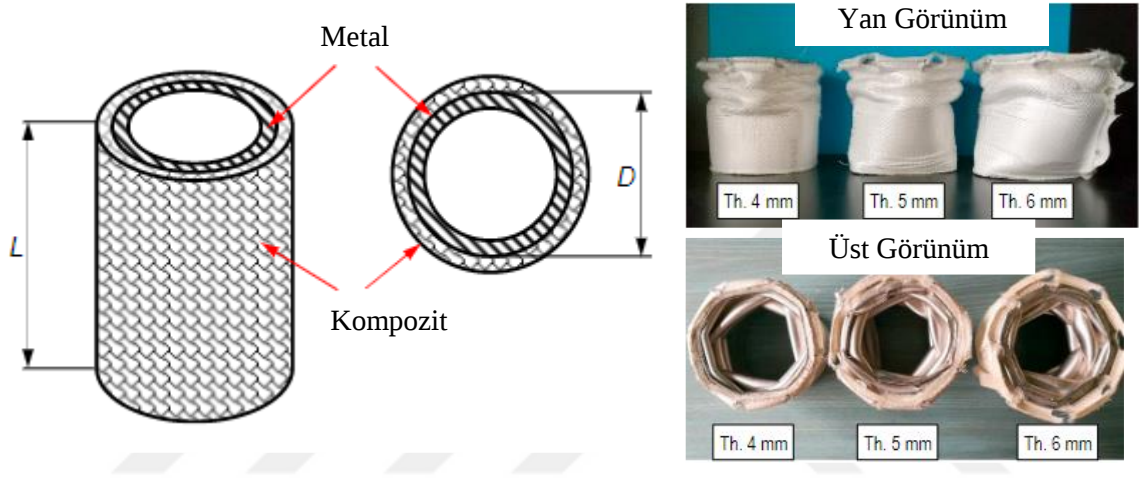
çalışma Wang [104] tarafından deneysel ve analitik olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmasında kompozit tüpün içine çelik tüp koyarak oluşturulmuş hibrit tüplerin kompozitin mükemmel mekanik ve hafiflik özelliği ile metalin üstün tokluğu ve rekabetçi malzeme maliyet özelliklerini birleştirmeyi mümkün kıldığını böylece enerji sönümlemede büyük bir potansiyel sergilediğini göstermektedir. Sonrasında Hanefi ve Wierzbicki [105] dıştan güçlendirilmiş metal tüplerin statik çarpma için basitleştirilmiş bir analitik modelini oluşturdukları çalışmalarında, öne sürdükleri analitik modelin bileşik metal/kompozit tüplerin ortalama çarpma kuvveti ve yerel katlanma uzunluğunu tahmin etmede deneysel verilerle iyi bir uyum içinde olduğunu göstermişlerdir.



Şekil 1.25. Hibrit tüplerin tipik çökme modları: (a) bileşik elmas, (b) bileşik parçalanma, (c) delaminasyon ve (d) katastrofik hasar [106].

Hanefi ve Wierzbicki tarafından önerilen basitleştirilmiş analitik modeli, Song vd. [106] tarafından malzeme şekil değiştirme hızı etkilerini de içerecek şekilde genişletilmiştir ve Şekil 1.25’de görülen hibrit tüplerin ortalama kuvvetlerini başarıyla tahmin etmişlerdir. Wang [107] cam elyaf takviyeli plastik kompozit ile dışarıdan takviye edilen ince cidarlı dairesel tüplerde eksenel darbenin etkisini statik ve dinamik olarak incelemiştir. Bu çalışmada takviyeli tüpler statik yükleme koşulları altında takviyesiz olanlardan daha yoğun

katlanmalar ile elmas modunda deforme olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Wang [108] takviyesiz metal tüplerin eksenel çarpışması için Alexander'ın [109] klasik çözümüne dayalı olarak, halka çökme modu ile fiber takviyeli metal tüplerin ortalama ezilme kuvvetini tahmin etmek için teorik bir model önermiştir. Bu model ile takviye liflerin sarma yönünün çarpma kuvvetine olan etkisi incelemiştir. Statik şartlarda ortalama çarpma kuvvetini tahmin etmeye yönelik bu model, eksenel darbe yükü altında fiber takviyeli metal tüplerin dinamik ortalama çarpma kuvveti tahmini için de genişletilmiştir.



Şekil 1.26. Metal-kompozit hibrit tüplerin eksenel çarpışması [110].

Tian ise Alexander'ın [109] takviyesiz tüpler için olan teorik modelini iki metal tüp arasında fiber takviyeli tüpler için geliştirmiştir. Boria vd. [110] Şekil 1.26'da görülen metal-kompozit hibrit tüplerin eksenel çarpışma davranışını statik ve dinamik olarak inceledikleri çalışmalarında metal tüpün kompozit tüpün çarpışma davranışını stabilize ettiğini göstermişlerdir. Bambach vd. [111] eksenel darbeye maruz kalan kare kesitli içi boş hibrit çelik-kompozit tüplerin statik ve dinamik davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Hibrit çelik-kompozit tüplerin ÖES ve çarpışmaya dayanıklılık özelliklerinin sadece çelik ve sadece kompozit tüplerinkinin toplamından daha fazla olduğu göstermişlerdir. Guo vd. [112] dinamik dış ters dönmeye maruz kalan kompozit takviyeli tüplerin enerji sönmüleme özelliklerini incelemek için teorik bir denklem geliştirmiş ve doğrulamak için bir sonlu elemanlar yöntemini kullanmışlardır. Sonlu eleman sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, teorik yöntemin uygulanabilirliği ortaya koymuşlardır. Kompozit tabakanın (fiber tabaka kalınlığı ve fiber takviyeli oryantasyonu), dinamik yüklemenin ve tüp kesit şeklinin takviyeli tüplerin

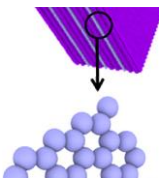
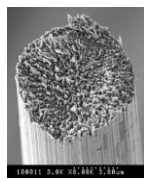
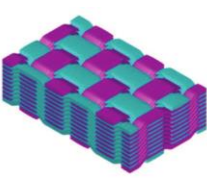
ters dönme özellikleri üzerindeki etkileri açıklamışlardır. Cam elyaf fiber ile güçlendirilmiş alüminyumdan yapılmış dairesel kesitli çarpışma kutularının dinamik ezilme davranışının araştırıldığı çalışmalarında Rosalia vd. [113] farklı kompozit cidar kalınlıkları ve fiber kat yönelimleri için enerji sönümleme kapasitesi ve hasar davranışını araştırmıştır. Sonuçlar alüminyum çarpışma kutusuna kompozit katmanların eklenmesinin çarpışma kutusunun enerji sönümleme kapasitesini iyileştireceğini göstermiştir. Meriç ve Gedikli [114] eksenel doğrultuda metal-metal ve metal kompozit şeklinde hibritleştirilmiş köpük dolgulu tüplerin enerji sönümleme davranışlarını araştırdıkları çalışmalarında köpük dolgulu hibrit tüplerin geleneksel tüplere göre enerji sönümleme davranışını geliştirdiğini göstermişlerdir.

Şekil 1.17 (c)'de görüldüğü gibi hücre malzemeler ile hibritleşme, ince cidarlı tüpler içine köpük, petek yapı vb. doldurarak gerçekleştirilir. Bu yöntemin enerji sönümleme kapasitesini geliştirmek için etkili bir yaklaşım olduğu kanıtlanmıştır [31]. Köpük dolgular ile ilgili daha detaylı bilgi Bölüm 1.2.3'te verilmiştir.

1.3. Enerji Sönümleyici Yapıların Modellenmesi

1.3.1. Kompozit Malzemelerin Modellenmesi

Bilgisayar teknolojisinin gelişmesi ve daha güçlü işlemcilerin üretilmesiyle kompozit malzemelerin modellenmesinde sonlu elemanlar yönteminin kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Literatürde kompozit malzemelerin modellenmesinde nano, mikro, meso ve makro ölçekli olmak üzere dört farklı yaklaşım kullanılmaktadır. Şekil 1.27'de farklı boyutlardaki kompozit yapılar için modelleme ölçekleri görülmektedir. Nano ve mikro ölçekte kompozit yapılar izotropik modellenirken meso ve makro ölçekte ortotropik olarak modellenirler [115].

Ölçek	Nano/Atomik 10^{-9}	Mikro 10^{-6}	Meso 10^{-2}	Makro 10^1
Obje				

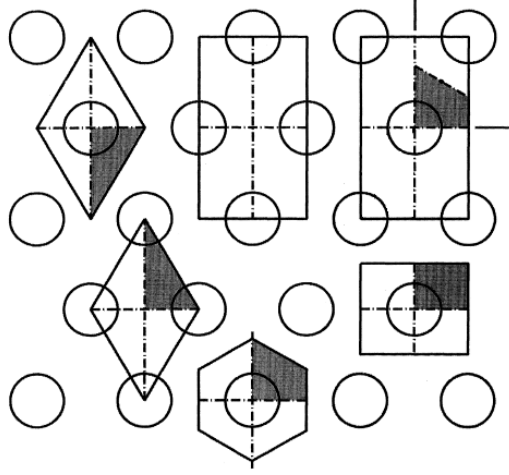
Şekil 1.27. Kompozit yapılar için modelleme ölçekleri

1.3.1.1. Nano Ölçekli Modelleme

Nanokompozitler, performans özelliklerini iyileştirmek için matris malzemesinin bir veya daha fazla nano malzeme ile güçlendirildiği kompozit malzemelerdir [116]. Nano kompozitlerde en yaygın matris olarak kullanılan malzemeler; polimerler [117,118] (epoksi, naylon, poliepoksit, polieterimid), seramikler [119] (alümina, cam, porselen) ve metallerdir (demir, titanyum, magnezyum) [120]. Nano kompozit katkısı yüksek elastisite modülü, yüksek dayanım, büyük şekil değiştirme özelliği ve düşük yoğunluk gibi mükemmel özellikler sağlamaktadır. Nano kompozitlerin mekanik özelliklerinin modellenmesinde iki ana yaklaşım vardır. Bunlar doğrudan yöntemler kullanılarak moleküler dinamik simülasyonu ve süreklilik yöntemleri kullanılarak sonlu eleman simülasyonudur. Moleküler dinamik simülasyonu, Newton'un hareket denklemlerini varsayılan atomlar arası potansiyeller aracılığıyla etkileşime giren atomlarla çözerek nano ölçekte malzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemeye izin veren bir tekniktir [121].

1.3.1.2. Mikro Ölçekli Modelleme

Mikro ölçekli modelleme; kompozit yapının fiber ve matris özelliklerini, fiber matris ara yüz etkileşimini, mukavemetini ve çeşitli karmaşık mikro düzey bileşenlerin temsil edecek birim hücre yapısının seçilmesi ve modellenmesi şeklindedir [122]. Mikro ölçekte, iplikler içindeki tek tek elyaflar, elyaf hasarları, elyaf enerji sönümlemesi, elyaftan elyafa etkileşimler ve iplikten elyafa etkileşimler gibi dokuma kumaşlar için önemli etkileşimler modellenir. Bu yaklaşımda kompozit malzemenin, idealize edilmiş, tekrarlanabilir ve periyodik hücresel bir yapıya sahip olduğu varsayılır. Tekrarlı yapıdan hücre seçiminde en yaygın varsayım [123], liflerin birbirine paralel olarak hizalanması ve her bir lifin aynı çapta dairesel bir enine kesite sahip olduğu altıgen veya kare bir kafes şeklinde düzenlenmesidir. Bu düzenlemelerin birinden, Şekil 1.28'da gösterildiği gibi birçok tekrarlanabilir birim hücre tanımlanabilir.



Şekil 1.28. Dörtgen ve altıgen fiber matris düzeni için çeşitli periyodik elemanlar ve birim hücreler. [124].

1.3.1.3. Meso Ölçekli Modelleme

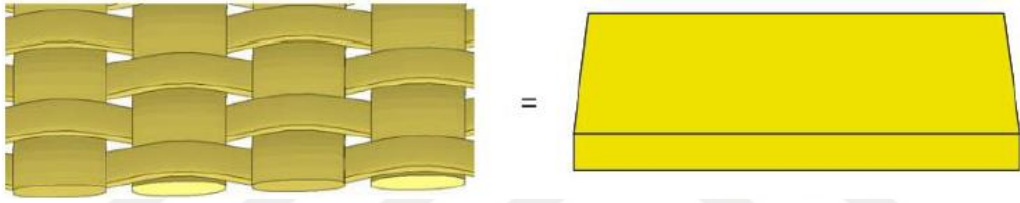
Şekil 1.27’de görüldüğü gibi meso ölçekli modelleme tek katman (lamine) seviyesinde kompozit laminatın davranışını tahmin etmek için kullanılır. Bu seviyede yayılmış çatlak mekanizmaları, malzeme bozunma/hasar modelleri ve kohezyonlu bölge modelleri ile tabakalar arası ve tabaka içi tüm hasar mekanizmaları açıklanabilir. Ayrıca iplik kesitleri, ipliklerin dalgalanması ve iplikler arası sürtünme etkisi de modellenebilir [125,126]. Meso ölçekli sonlu elemanlar modellemesi, yeterli doğruluğu korurken düşük hesaplama yüküne sahip olduğu için literatürde en yaygın kullanılan sayısal modelleme tekniklerinden biridir. Bu modellerde lamine, homojen ve sürekli olarak kabul edilen altı yüzlü katı veya kabuk elemanlar kullanılarak homojenize iplikler olarak modellenir.

Meso ölçekli modellemede her bir katmanın davranışının komşu katmanlardan bağımsız olduğu kabul edilir. Bu kabul laminatın plastik davranışının komşu katlar arasındaki hasar mekanizmalarının etkileşiminden bağımsız olduğu anlamına gelir.

1.3.1.4. Makro Ölçekli Modelleme

Makro ölçekli modelleme tekniğinde yapının bütünsel tepkileri, nano, mikro ve meso ölçekte modellenen elyafan elyafa veya iplikten ipliğe etkileşimler dikkate alınmadan modellenmesi amaçlanır. Bu modeller, bir bütün olarak laminat açısından yapının genel tepkisini simüle etmek için oluşturulur. Makro ölçekli modeller lamineler arası hasar

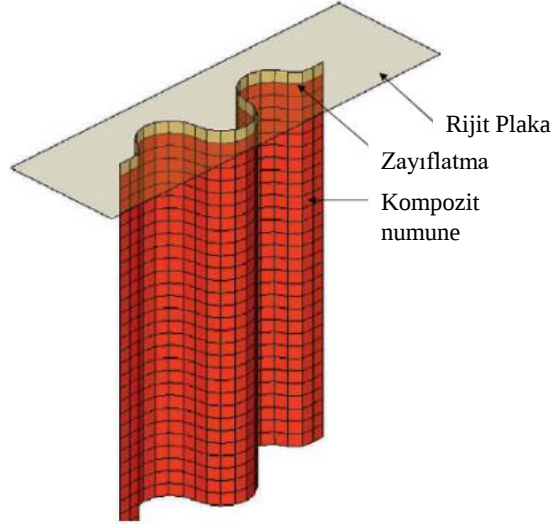
olaylarının ayrıntılarını tahmin etme yeteneğine sahip değildir. Lamineler, yüzlerce elyaftan oluşan ipliklerden oluşsa da yapı içerisinde ince, homojen plakaları andırırlar. Bu nedenle, Şekil 1.29'da gösterildiği gibi, makro ölçekli sonlu elemanlar modellerinde dokuma kumaşların homojen plakalar olduğu varsayılmaktadır. Makro ölçekli sonlu elemanlar modellerinde dokuma kumaşlar, kumaşın kalınlığının diğer düzlem içi boyutlara kıyasla küçük olması ve deformasyon sırasında neredeyse sabit kalmasından dolayı kabuk veya membran elemanlar ile modellenir. Mikro-/meso- ölçekte, homojenleştirilmiş yerel malzeme özelliklerini tahmin etmek için kurulan mikro-/meso- sonlu elemanlar modellerinden elde edilen homojenleştirilmiş özellikler, daha sonra yapının makro ölçekli mekanik davranışlarını simüle etmek için girdiler olarak makro ölçekli sonlu elemanlar modellerinde kullanılır.



Şekil 1.29. Kompozit dokuma kumaşların makro ölçekli modeli [127].

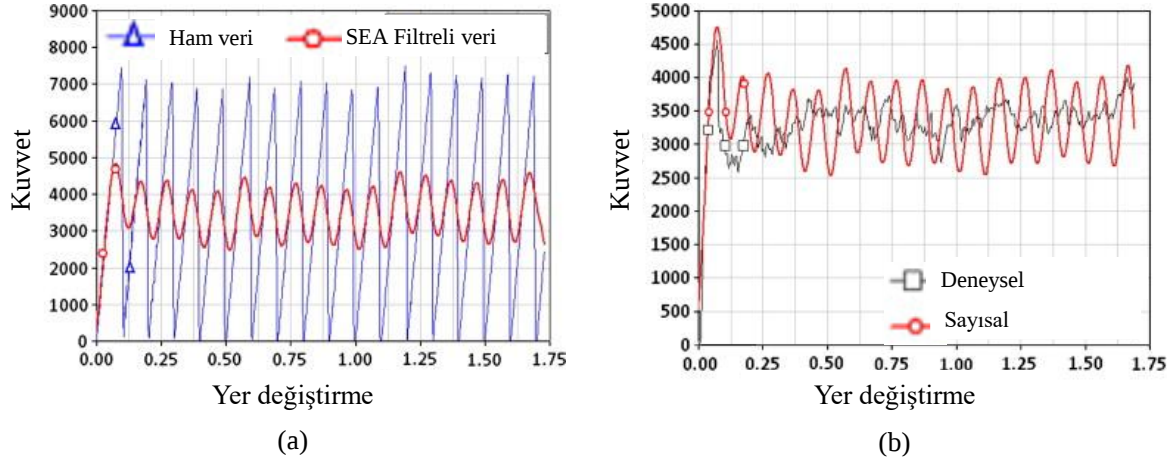
Tek katmanlı modelleme

Tek katmanlı modellemede, kompozit yapıları modellemek için tek bir kabuk eleman katmanı kullanılmaktadır. Bu yöntem ile değişken yüklere maruz laminada meydana gelen lamineler arası hasarı (deleminasyon) doğru bir şekilde tahmin etmek mümkün olmasa da toplam yükleme kapasitesi ve enerji sönümleme miktarı doğru olarak tahmin edilebilmektedir [128]. Bu yaklaşımın en önemli avantajı çözüm zamanını azaltmasıdır [129]. Şekil 1.30'de görüldüğü gibi tek katmanlı yaklaşımda ilerleyici hasarı başlatmak için çarpışmanın başladığı uçtaki elemanların kalınlıkları azaltılarak hasar tetikleyici mekanizmanın (trigger) modellenmesi gerçekleştirilir.



Şekil 1.30. Oluklu kompozit numunenin kabuk elemanlı modeli [130].

Rijit plakanın hareketiyle kompozit yapı ile rijit plaka arasında temas başlar. Sonrasında zayıflatılmış bölgede hasar kriterlerine ulaşıncaya kadar kuvvet değeri artmaya devam eder. Hasar kriterine ulaşılması sonucu zayıflatılmış bölgede bulunan elemanlar silinir ve rijit plaka-kompozit yapı arasındaki temas ortadan kalkar. Tek katmanlı modelde satır satır elemanların silinmesi sonucu kuvvet-yer değiştirme grafiğinde rijit plaka ile kompozit yapı arasında temas halindeyken kuvvet değerinde ani yükselmeler, temasın ortadan kalkması ile kuvvet değerinin sıfıra düştüğü tekrarlı desenler görülür. Kuvvet yer değiştirme grafiğindeki deneyde görülmeyen bu durumu ortadan kaldırmak için Şekil 1.31’de görüldüğü gibi alçak geçiren (Low-pass) dijital filtre uygulanır. Filtreleme yoluyla kuvvet-yer değiştirme grafiğindeki, ortalama kuvvet değişmeden kalırken ani yükselişler ve sıfıra düşmeler yumuşatılır. Bu yaklaşımda kompozit yapıda bulunan her bir elyaf katmanına karşılık gelecek şekilde sonlu elemanlar modelinde kabuk elemana integrasyon noktası eklenir [131,132].



şekil 1.31. Tek katmanlı kompozit model için kuvvet yer değiştirme grafiği (a) filtreli ve ham veri, (b) deney ve sayısal karşılaştırması [130].

Tek katmanlı modelleme yöntemi ile çeşitli kompozit yapılarının çarpışma davranışları üzerine önemli çalışmalar yapılmıştır. Boria vd. [133] formula yarışları için tasarlanan darbe zayıflatıcıları koheziv bölęeli solid ve tek katmanlı kabuk eleman olarak LS-DYNA ile modellemiş ve deney ile uyumlu olduğunu göstermişlerdir. Guohua vd. [134] kare kesitli kompozit tüpleri tek ve çok katmanlı olarak modellemişlerdir. Kare kesitli tüplerin çok ve tek katmanlı modellemesini yapan Bussadori vd. [135] tek katmanlı modelin kare kesitli tüpler tarafından SE'yi doğru tahmin ettiğini ama tek katmanlı modelin fiziksel gerçeklik ile uyumlu olmadığını göstermişlerdir. Zarei vd. [136] kare ve altığen kesitli kompozit tüplerin enerji sönümlemesini araştırdıkları çalışmalarında, kompozit tüpleri tek katmanlı olarak modellemişlerdir. Zhang vd. [137] LS-DYNA yazılımını kullanarak dairesel kesitli, kare kesitli ve konik kompozit tüplerin ÖES davranışlarını araştırmışlardır. alışmalarında cam fiber kompozit tüpleri tek katmanlı ve çok katmanlı olarak modellemişlerdir. Liu vd. [138] sırasıyla çatı çarpması ve direk yan çarpması altında CFRP elektrikli araç gövdesinin yapısal çarpışmaya dayanıklılığını araştırmak için tek katmanlı kabuk modelini kullanmışlardır.

Çok Katmanlı Modelleme

Çok katmanlı modellemede, kompozit yapıları modellemek için birden fazla kabuk eleman katmanı kullanılmaktadır. Bu yaklaşım, kompozit parçaların katmanlar arası ve katmanlar içi davranışını modelleyebildiğinden daha gerçekçi bir modelleme imkanı sunmaktadır. Bununla beraber katmanlar arası etkileşim ve matris davranışının

modellenmesi sebebiyle çok katmanlı modelleme tekniği daha karmaşıktır. Bu durum hesaplama yükünü arttırmakta ve modellemeyi zorlaştırmaktadır [139].

Kompozit yapılar kalıcı deformasyona uğrarken fiber kırılması, fiber matris bağlarının ayrılması, matris çatlaması ve delaminasyon gibi bir dizi hasar mekanizmalarıyla enerji sönmölmektedirler [140]. Katmanlı kompozit yapılarda ise basma yükleme ve darbe altında komşu katmanlar arasındaki reçine bakımından zengin ara yüzdeki delaminasyonlar ana hasar kaynaklarından biridir. Delaminasyon, uygulanan yükleme nedeniyle katların sınırlarındaki tabakalar arası gerilmeler arttığında ve tabakaların ayrılmasına neden olduğunda meydana gelir. Bunun yanında delaminasyona, kompozit üretim işlemi sırasında kirlenmiş liflerin varlığı, liflerin yetersiz ıslanması, reçinenin sertleşmesiyle büzölme ve düzlem dışı darbeler de sebep olmaktadır. Kompozit yapılarda delaminasyonun varlığı ve büyümesi, bir yapının genel burkulma mukavemetini önemli ölçüde azaltır. Delaminasyon önemli bir enerji sönmöme mekanizmasıdır ve yapıların eğilmedeki yük taşıma kapasitesini ve yorulma ömrünü azaltır [141].

Kompozit yapılardaki tek veya çoklu çatlak ilerlemesini tahmin etmek için doğrusal elastik kırılma mekaniğinde; sanal çatlak uzantısı, J-integrali, sanal çatlak kapatma ve sertlik türevi gibi teknikler bulunmaktadır. Ancak bu yöntemler delaminasyonun başlangıcını tahmin etmek için kullanılamaz ve bu nedenle çatlağın başlangıç konumunun ve ilerleme yönünün bilindiği problemlerle sınırlıdır [142]. Bunların yanında lamineler arası davranışı modellemek için geliştirilen tekniklerden biri de kohezyonlu bölge modelidir [143]. Kohezyonlu bölge modelleri delaminasyonu, uzatılmış bir çatlak ucu veya yapışkan bölge boyunca yapışma kuvveti olarak görür. Kohezyonlu bölge elemanları herhangi bir fiziksel malzemeyi temsil etmez ancak koheziv elementler ayrılırken meydana gelen kohezyon kuvvetlerini tanımlar.

LS-DYNA'da delaminasyonu simüle etmek için kullanılabilecek birçok malzeme modeli vardır. Bu malzeme modelleri MAT138, MAT184, MAT185, MAT186 ve MAT240'tır. Bu malzeme modellerinin yanında delaminasyon CONTACT_AUTOMATIC_ONE_WAY _SURFACE_ TO_SURFACE_TIEBREAK temas kartı ile de modellenabilmektedir. Bu temas algoritması, sıfır kalınlıkta kohezif bölge elemanlarının kullanılmasına eşdeğerdir (Tablo 1.1) ve lineer bir yay oluşturarak başlangıçta temas halinde olan düğüm noktalarını bağlar ve maksimum gerilme kriteri ulaşıldığında yüzeyler ayrılmaya başlar[128].

Tablo 1.1. MAT138 ve Tiebreak kontak değişkenleri

Tiebreak Kontak	MAT138	Tanımı	Birimi
NFLS	T	Normal yönde en yüksek çekme dayanımı	Gerilme
SFLS	S	Teğetsel yönde en yüksek çekme dayanımı	Gerilme
PARAM	XMU	Karma mod ölçütlerinin üssü	Birimsiz
ERATEN	GIC	Mod I için enerji bırakma hızı	Enerji
ERATES	GIIC	Mod II için enerji bırakma oranı	Enerji
CT2CN	ET/EN	Teğetsel rijitliğin normal rijitliklere oranı	Birimsiz
CN	EN	Normal sertlik	Enerji

Bu ayrılma, kritik ayrılmaya mesafesine ulaşılan ve yay kaldırılana kadar lineer bir hasar eğrisi ile gerilimin ölçeklenmesine yol açar [144].

$$\left(\frac{\sigma_n^2}{NFLS}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_s^2}{SFLS}\right)^2 = 1 \quad 1.8$$

burada σ_n , σ_s , sırasıyla temas yüzeyinde etkili olan normal gerilme ve kayma gerilmesini; NFLS ve SFLS ise temas yüzeyinin normal ve kayma gerilmesi dayanımını göstermektedir. Hasar başlangıcında iki yüzey ayrılmaya başlar ve daha sonra ara yüzey gerilimleri, ayırma mesafesinin doğrusal bir fonksiyonu olarak küçülür. Ayrışmanın devam etmesi ve ara yüz hasarının tamamlandığı kritik mesafe olan PARAM'a ulaşıldığında, hasar meydana gelerek temas silinir ve delaminasyon ilerler.

$$PARAM = \frac{2 \times E_{tie}}{S} \quad 1.9$$

burada

$$S = \sqrt{\max(\sigma_n, 0)^2 + (\sigma_s^2)^2} \quad 1.10$$

burada, temas ara yüzünün hasara uğraması nedeniyle, açığa çıkan enerji E_{tie} 'dir. Deneme ve yanılma prosedürleriyle, temasın hasar süreci üzerindeki göreceli etkilerini belirlemek için

Mod-I ve Mod-II'nin duyarlılık çalışması yapılmalıdır. Kompozit hasar simülasyonları için, Mod-I kırılmasının, temas kopması hasar süreci sırasında baskın bir hasar modu olduğuna dikkat edilmelidir.

Lamine kompozit malzemelerin sahip olduğu hasar modlarının karmaşık fiziksel doğası, bu tür malzeme sistemlerini elastik bölgenin ötesinde sayısal olarak simüle etmeyi zorlaştırmaktadır. Kompozitler için mevcut hasar kriterlerinin çeşitli eksiklikleri olduğu kabul edilmekte, bu da hasarın başlangıcını tahmin etmeyi zorlaştırmaktadır [145]. LS-DYNA, ABAQUS, RADIOSS ve PAM-CRASH gibi dinamik etkileri ve çarpışma olaylarının incelendiği sonlu elemanlar yazılımları kompozit yapıların elastik, hasar ve hasar sonrası davranışlarını tahmin etmek için çeşitli malzeme modelleri geliştirmişlerdir. Bu malzeme modelleri, malzemenin deneyle ölçülebilen fiziksel özelliklerini (örneğin, mukavemet, elastisite modülü) hesaba katar, ancak fiziksel bir anlamı olmayan veya deneysel olarak belirlenemeyen yazılıma özgü parametreleri de içermektedir. Mevcut sonlu elemanlar yaklaşımları, deney ve simülasyon arasındaki uyumluluğu sağlamak için bu malzeme modellerinin kapsamlı bir şekilde ayarlanmasını ve kalibrasyonunu gerektirmektedir.

LS-DYNA ve MAT54/55 malzeme modeli, uçaklarda yabancı cisim çarpma senaryolarının yanı sıra çarpışma koşulları altında ilerleyici hasara maruz kalan kompozit malzemeleri simüle etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır [146,147]. Bu malzeme modeli, minimum girdi parametreleri gerektirdiği için nispeten basit bir malzeme modelidir ve büyük ölçekli yapısal hasar simülasyonları için kullanılmaktadır. Bu özelliği sadece simülasyonun için hesaplama süresini azaltmakla kalmaz, aynı zamanda girdi parametreleri oluşturmak için gerekli malzeme testlerini de azaltır [148].

MAT54/55 malzeme modelinde kullanılan bütün parametreler Tablo 1.2'de görülmektedir. Tablo 1.2'de mavi renkli (kalın yazılmış) olan parametreler tek yönlü kumaştan üretilen kompozit plakalara ASTM (American Society for Testing and Materials) D3039/D3039M, ASTM D3410 ve ASTM D3518 testlerine göre sırasıyla çekme, basma ve düzlem içi kayma testleri yapılarak elde edilmektedir. Yeşil renkli (ince ve italik) parametreler fiziksel olmayan malzeme parametreleridir ve deneme yanılma yöntemi ile kalibre edilir. Kırmızı renkte (diğerleri) olan parametreler ise kompozit malzemenin yerel eksenlerini (malzeme yönünü) ayarlamak için kullanılan parametrelerdir. Bazı durumlarda deney ve sayısal analiz arasındaki uyumu sağlamak amacıyla Card 4' ve Card 5'teki mavi renkli parametreler de deneme yanılma yöntemi ile kalibre edilmektedir [132].

Tablo 1.2. MAT54/55 malzeme kartı

Card 1	MID	RO	EA	EB	(EC)	PRBA	(PRCA)	(PRCB)
Card 2	GAB	GBA	GCA	(KF)	AOPT			
Card 3				A1	A2	A3	MANGE	
Card 4	V1	V2	V3	D1	D2	D3	DFAILM	DFAILS
Card 5	TFAIL	ALPH	SOFT	FBRT	YCFAC	DFAILT	DFAILC	EPS
Card 6	XC	XT	YC	YT	SC	CRIT	BETA	
Card 7	PFL	EPSF	EPSR	TSMD	SOFT2			
Card 8	SLIMT1	SLIMC1	SLIMT2	SLIMC2	SLIMS	NCYRD	SOFTG	
Card 9	LCXC	LCXT	LCYX	LCYC	LCSC	DT		

Elastik bölgede, elyaf için MAT54'teki malzeme gerilime-şekil değiştirme eğrileri şu şekilde verilir:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E_1}(\sigma_1 - \nu_1 \sigma_2) \quad 1.11$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E_2}(\sigma_2 - \nu_2 \sigma_1) \quad 1.12$$

$$2\varepsilon_{12} = \frac{1}{G_{12}}\tau_{12} + \alpha\tau_{12}^3 \quad 1.13$$

burada alt indisler; 1 fiber yönünü, 2 matris yönünü, 12 kesme yönünü göstermektedir. Denklem 1.13'teki α giriş parametresi, doğrusal olmayan kayma gerilimi terimi için bir ağırlık faktörüdür. ALPH deneysel olarak ölçülemez ancak deneme yanılma yoluyla kalibre edilmesi gerekmektedir.

Malzeme modeli kartında bulunan CRIT parametresinin 54 olması durumunda Chang-Chang, 55 olması durumunda Tsai-Wu hasar kriteri seçilir. Chang-Chang hasar modelinde aşağıda verilen dört kriterden biri sağlanması durumunda hasar oluşmaktadır:

Fiber yönlü çekme hasarı:

$$e_{t,f} = \left(\frac{\sigma_1}{X_T}\right)^2 + \beta \left(\frac{\tau_{12}}{S_C}\right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 & \text{hasar} \\ < 0 & \text{elastik} \end{cases} \quad 1.14$$

Fiber yönlü basma hasarı:

$$e_{c,f} = \left(\frac{\sigma_1}{X_C}\right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 & \text{hasar} \\ < 0 & \text{elastik} \end{cases} \quad 1.15$$

Matris yönlü çekme hasarı:

$$e_{t,m} = \left(\frac{\sigma_2}{Y_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_C}\right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 & \text{hasar} \\ < 0 & \text{elastik} \end{cases} \quad 1.16$$

Matris yönlü basma hasarı:

$$e_{c,m} = \left(\frac{\sigma_2}{2S_C}\right)^2 + \frac{\sigma_2}{Y_C} \left(\frac{Y_C^2}{4S_C^2} - 1\right) + \left(\frac{\tau_{12}}{S_C}\right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 & \text{hasar} \\ < 0 & \text{elastik} \end{cases} \quad 1.17$$

Tsai-Wu hasar kriterinde çekme ve basma matrisi modunda aşağıda verilen kriterin sağlanması durumunda hasar oluşur:

$$e_{t-c,m}^2 = \left(\frac{\sigma_2^2}{Y_C Y_T}\right) + \left(\frac{\tau_{12}^2}{S_C}\right)^2 + \frac{(Y_C - Y_T)\sigma_2}{Y_C Y_T} - 1 \begin{cases} \geq 0 & \text{hasar} \\ < 0 & \text{elastik} \end{cases} \quad 1.18$$

burada alt indisler; T çekme, C basma, S ise kayma gerilmesini göstermektedir. Eleman içindeki bir lamine katında Denklem 1.14, 1.15, 1.16, 1.17 ve 1.18'deki koşullardan biri aşıldığında, o katın belirtilen tüm elastik özellikleri sıfır olur.

FBRT ve YCFAC mukavemet azaltma parametreleri, matris hasarı meydana geldiğinde kalan lamine katlarının bozulmamış elyaf mukavemetlerini düşürmek için kullanılır. Bu mukavemet azaltma işlemi aşağıdaki denklemler kullanılarak uygulanmaktadır:

$$X_T = X_T^* * FBRT \quad 1.19$$

$$X_C = Y_C^* * YCFAC \quad 1.20$$

FBRT faktörü fiber çekme dayanımındaki yüzde azalmayı ifade ettiği için değeri 0 ile 1 arasındadır. FBRT ve YCFAC parametrelerinin değeri deneysel olarak ölçülemez ve deneme yanılma yoluyla belirlenmesi gerekmektedir.

Bu dayanıma ile alakalı kriterlere ek olarak, her bir lamine katı için şekil değiştirmelerin, şekil değiştirme hasar değerlerini aşması durumunda hasar meydana gelmektedir. Tek yönlü bir lamina için, DFAILT ve DFAILC parametreleri fiber yönündeki çekme ve basma deformasyonları, DFAILM ise matris yönündeki hasar için şekil değiştirme değeridir. DFAILT pozitif olmalıyken DFAILC negatif olmalıdır. DFAILT, DFAILC veya DFAILM sıfır alınırsa, bu parametreler tamamen yok sayılır ve hasar yalnızca Chang-Chang hasar kriterine göre oluşur. DFAILT, DFAILC ve DFAILM sıfır değilse, şekil değiştirmelerden biri şekil değiştirme hasar değerini aşarsa hasar meydana gelir. DFAILS kayma için bir şekil değiştirme hasar kriteri olsa da dikkate alınmaz, bu durum DFAILS değerinin aşılması durumunda hasar oluşmadığı anlamına gelir. Hasara kadar olan tüm şekil değiştirmeler, tek yönlü laminanın deneyleri aracılığıyla ölçülebilir, ancak bunlar bilinmiyorsa LS-DYNA'da kullanıcıya genel bir EFS (etkili hasar şekil değiştirmesi) parametresi kullanma imkanı tanımaktadır. EFS parametresi gerçek bir fiziksel özellik değildir ve yalnızca deneme yanılma yoluyla tahmin edilebilir. Tanımlanan EFS değeri sıfırdan büyükse, program tarafından hesaplanan EFS değeri tanımlanan EFS değerini aştığında hasar oluşur. EFS değeri sıfır ise bu parametre dikkate alınmaz.

Hasarın oluşması, eleman zaman adımı TFAIL aşıldığında da meydana gelmektedir. TFAIL değeri, LS-DYNA'nın eleman silmek için bir minimum zaman adımı dikkate alıp almadığını ve bu minimum zaman adımının ne olduğunu belirlemektedir. Bu seçenek, artık yük taşımayan ancak tanımlanan hasar kriterinden hiçbirine ulaşamayan, geometrisi oldukça bozulmuş elemanların hesaplama yükü getirmemesi için kullanılmaktadır. Bu oldukça şekli bozulmuş ve yük taşımayan elemanlar zaman adımının düşmesine ve analiz süresinin gereksiz yere uzamasına sebep olmaktadır. TFAIL parametresi ile tanımlanan zaman adımına gelindiğinde bu elemanlar silinir ve böylece analiz süresi gereksiz uzamamış olur. TFAIL parametresi aşağıdaki gibi işlev görmektedir;

$TFAIL \leq 0$: Zaman adımı sebebiyle eleman silinmez

$0 \leq TFAIL \leq 1$: Elemanın zaman adımı $TFAIL$ 'den küçükse silinir

$TFAIL \geq 1$: Eleman $\frac{\text{anlık zaman adımı}}{\text{orjinal zaman adımı}} \leq TFAIL$ olduğunda silinir

SOFT parametresi veya çarpışma cephesi azaltma faktörü, çarpışma cephesinin hemen önündeki elemanların, yani temas halinde olan elemanlar silindikten sonra yüklenecek olan eleman sırasının gücünü azaltmak için kullanılan matematiksel bir çözümdür. Bu parametre, yük temas halindeki eleman sırasından diğerine geçerken kararsızlığı önlemek ve stabil çarpışmayı sağlamak için kullanılmaktadır. Hasara yaklaşırken, yük temas halindeki eleman sırasında zirveye ulaşır ve hasar sonrasında aniden sıfıra düşer. SOFT parametresi sıfıra ayarlanırsa (dolayısıyla devre dışı bırakılır), bu ani geçiş, bölümün kararsız burkulmasına neden olabilir. Aktif olması için, SOFT parametresinin değeri 0 ile 1 aralığında tanımlanmalıdır. SOFT parametresinin 1 olması, temasta olan elemanlara komşu elemanların mukavemetini koruduğunu ve yumuşama olmadığını gösterir. Sıfıra yakın SOFT değerleri için ise mukavemet tamamen azalır. Birden büyük SOFT değerleri parametreyi devre dışı bırakır ve model, SOFT sıfırmış gibi davranır. Bu parametre deneysel olarak ölçülemediğinden deneme yanılma yoluyla kalibre edilmesi gerekmektedir.

Bir elemanın tüm katmanları, crashfront algoritması başlatılmadan ve yumuşatma azaltma faktörü uygulanmadan önce hasara uğramalıdır. PFL parametresi kullanılarak, eleman silinmeden önce crashfront algoritması başlatılabilir. PFL, komşu elemanlarda mukavemet azalana kadar katmanların yüzde kaçının başarısız olacağını belirtir. Simülasyona PFL parametresinin eklenmesi yumuşama kuvvetinin yayılmasını artıracaktır.

İdeal plastik davranışa ek olarak, tüm yönlerde artık gerilimler: Fiber için SLIMT1, matris için SLIMT2, fiber basma için SLIMC1, matris basması için SLIMC2 ve kayma için SLIMS şeklinde tanımlanabilir. Bu parametrelerin tanımlanması ile maksimum gerilme hasar kriterleri artık gerilim seviyesine düşecektir.

1.3.2. Köpük Malzemelerin Modellenmesi

Karmaşık geometri, heterojen yapı ve lineer olmayan mekanik özelliklere sahip olması metalik köpüklerin modellenmesini zorlaştırmaktadır. Bu yapıların modellenmesi, üretim ve uygulanmada faydalı bilgiler vermesi açısından önemlidir. Bu sebeple son yıllarda birçok

araştırma metalik köpüklerin modellenmesi ve sayısal simülasyonu üzerine odaklanmıştır [149–151].

Sayısal modelleme çalışmaları boyut ölçeğine göre mikroskobik, mezoskopik ve makroskobik olarak sınıflandırılabilir. Mikroskobik boyutların ölçeği, gözenek boyutuyla temsil edilir. Mekanik davranışla yapısal ilişkiyi elde etmek için duvarlar, kenarlar ve düğümlerden oluşan tek bir gözenek (ya da birkaç) dikkate alınır. Malzemelerin özelliği böylece istatistiksel yöntemle seçilen tek bir hücreden elde edilir. Matematiksel genel denklemler bir gözenek üzerine kurulur ve deneysel sonuçlar ile bu teorik denklemlerin doğrulanması sağlanır. Mezoskopik ölçek, "mikro" ve "makro" arasındaki ölçektir. Makroskopik boyutların ölçeği, bir gözenek boyutundan yüz veya bin kat daha fazladır yani yapının tümünün modellenmesidir. Bu boyutta gözeneklerin homojen ve sürekli olduğu varsayılır [152].

Sonlu elemanlar yöntemi (SEY), farklı yükleme koşullarında yapısal davranışları tahmin etmek için geliştirilmiş etkili bir yöntemdir ancak dinamik yükler altındaki büyük deformasyonlarda güvenilirliği daha azdır. Ayrıca, SEY, eleman bağlantısı gerektiren sürekli ortam mekaniği formülasyonlarına dayandığından, malzeme parçalanmasını içeren hasarları simüle etmesi zordur. Alternatif olarak, ağsız yöntemler geliştirilmiş ve malzeme hasarı ve büyük şekil değiştirmeleri içeren sayısal simülasyonlara uygulanmıştır. Ağsız yöntemler, SEY’de kullanılan elemanları problem sınırları içindeki bir dizi nokta veya parçacıkla değiştirir. Bu sebeple ağsız yöntemlerde, elemanlar arası bağlantı SEY’de olduğu gibi kritik değildir [153].

Düzgün parçacık hidrodinamiği (DPH), Lucy [154] ve Gingold [155] tarafından 3 boyutlu açık uzayda astrofiziksel problemleri çözmek için geliştirilen hesaplama mekaniğindeki en eski parçacık yöntemlerinden biridir. DPH düzgün alan değişkenlerini hesaplamak için temsili parçacık enterpolasyon yöntemini kullanan ağsız bir Lagrange yöntemidir. Her temsili parçacığın bir kütlesi, Lagrange pozisyonu, Lagrange hızı ve iç enerjisi vardır; diğer nicelikler enterpolasyon yoluyla veya temel ilişkilerden türetilir. Ağsız yaklaşımın avantajı, diğer sayısal teknikler kullanılarak etkin bir şekilde çözülemeyen problemleri çözme yeteneğine sahip olmasıdır. DPH, büyük deformasyonları simüle ederken yapılandırılmış ağ tabanlı Lagrange yaklaşımlarını sınırlayan ağ şekil değiştirme problemlerinden etkilenmez [156]. Ortaya çıkışından bu yana DPH dinamik yüklemeler [157] ve metal şekillendirme [158] işlemlerinin modellenmesinde kullanılmıştır. Aktay vd. [153] köpük dolgulu alüminyum tüplerin statik çarpışma davranışını SEY ve DPH

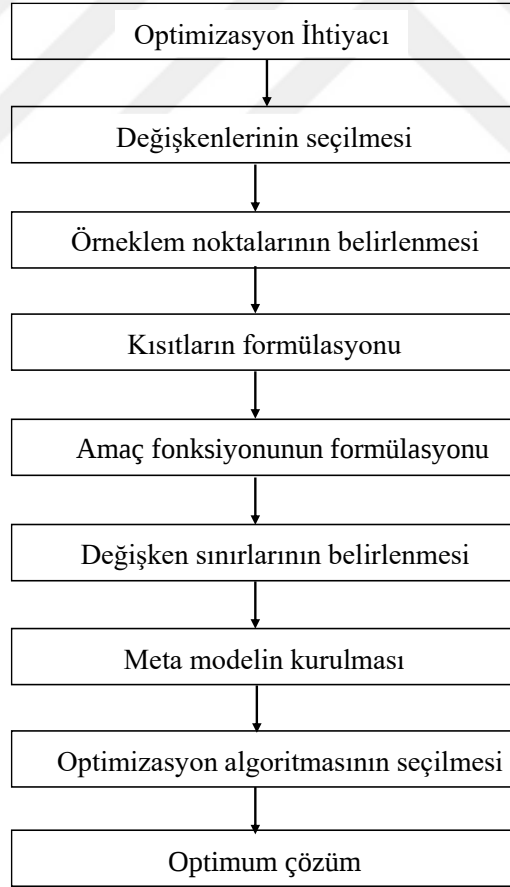
yöntemleri ile incelemişlerdir. Çalışmalarında sayısal simülasyonların, kuvvet-şekil değiştirme eğrilerini, deformasyon şekillerini, kat uzunluklarını ve SE değerlerini deneysel sonuçlara tatmin edici derecede yakın olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca SEY/DPH modelleme yönteminin köpük dolgulu tüplerin çarpışma davranışını tahmin etmede başarılı olduğunu kanıtlamışlardır. Başka bir çalışmada Aktay vd. [159] boş ve alüminyum köpük dolgulu alüminyum tekli, ikili ve çok (altıgen ve kare dolgulu) tüplü konfigürasyonların statik eksenel çarpışma davranışı deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Sayısal çalışmalarında SEY/DPH yöntemlerini beraberce kullanmışlardır. Test edilen tüp konfigürasyonları arasında sadece altıgen ve kare dolgulu boş tüp tasarımlarının boş tüpe göre daha iyi ÖES değerleri gösterdiğini bulmuşlardır. Gedikli [160] SEY ve DPH yöntemini beraber kullanarak kaynak dikişli tüplerin enerji sönmleme davranışını araştırmıştır. Çalışmasında farklı malzemelerden yapılan kaynak dikişli tüplerin üst parça kalınlığı ve köpük yoğunluğu artmasıyla ÖES ve pik kuvvetinin arttığını göstermiştir. Meriç ve Gedikli [6] farklı malzemelerden yapılmış köpük dolgulu konik tüplerin enerji sönmleme davranışlarını SEY ve DPH yöntemlerini beraber kullanarak araştırmışlardır. Çalışmalarında SEY ve DPH yönteminin köpük dolgulu tüplerin enerji sönmleme davranışını tahmin etmede başarılı olduğunu gösterirken 5° koniklik açısına sahip boş ve köpük dolgulu tüplerin en iyi enerji sönmleme davranışını sergilediğini bulmuşlardır.

1.4. Optimizasyon

Optimizasyon Latince bir kelime olan ve en iyi, en uygun, en elverişli anlamına gelen optimum kelimesinden türemiştir. Sözlük anlamı ise eldeki kaynakları en iyi ve ekonomik bir şekilde kullanarak mümkün olan en iyi sonuca ulaşmaktır. Çarpışma mühendisliğinde optimizasyon, aracın kütlesini ve maliyetini en aza indirerek çarpışma anında maksimum enerji sönmleme kapasitesine ve minimum çarpışma pik kuvvetine sahip tasarım değişikliklerinin yapılması amacıyla gerçekleştirilir. Optimizasyon algoritması, tatmin edici veya optimum bir çözüm bulunana kadar çeşitli çözümleri karşılaştırarak ve tekrarlı olarak yürütülen bir işlemdir. Gelişen bilgisayar teknolojisi ile optimizasyon, bilgisayar destekli tasarım faaliyetlerinin bir aşaması haline gelmiştir. Günümüzde deterministik ve stokastik olmak üzere yaygın olarak kullanılan iki farklı optimizasyon algoritması çeşidi vardır. Deterministik optimizasyonda bir çözümü diğerlerine taşımak için belirli kurallar kullanılır.

Stokastik optimizasyon algoritmaları ise doğada muhtemel çeviri kuralları içerir. Bu algoritmalar, deterministik algoritmaların sahip olmadığı belirli özellikler nedeniyle popülerlik kazanmaktadır [161].

Optimum tasarım ilk problem bilgisi kullanılarak oluşturulan birkaç alternatif çözümü karşılaştırarak elde edilir. Bu yöntemde öncelikle her bir tasarım çözümünün uygulanabilirliği araştırılır. Daha sonra her bir çözümün altında yatan amacın (ÖES, hafiflik, maliyet, kar, vb.) tahmini karşılaştırılır ve en iyi çözüm benimsenir. Bütün mühendislik tasarım problemleri için tek formülasyon prosedürünü uygulamak imkansızdır çünkü herhangi bir tasarım problemindeki amaç ve buna bağlı olarak tasarım parametreleri üründen ürüne değişiklik gösterir, farklı problemlerde farklı teknikler kullanılır. Formülasyonun amacı, daha sonra bir optimizasyon algoritması kullanılarak çözülebilen optimum tasarım probleminin matematiksel bir modelini oluşturmaktır. Şekil 1.32’te optimal bir tasarım formülasyonunda yer alan adımların ana hatlarını göstermektedir.



Şekil 1.32. Optimum tasarım prosedürünün akış şeması

1.4.1. Tasarım Değişkenleri

Optimizasyon probleminin formülasyonu, ilk olarak optimizasyon sürecinde değişen temel tasarım değişkenlerinin tanımlanmasıyla başlar. Tasarım problemi genellikle, bazıları tasarlanan sistemin çalışmasına oldukça duyarlı, bazıları daha az duyarlı olan birden çok tasarım parametresini içerir. Bunlara optimizasyon işlemi açısından tasarım değişkenleri denir. Diğer (daha az duyarlı) tasarım parametreleri genellikle sabit kalır ya da tasarım değişkenlerine bağlı olarak değişir. Optimizasyon probleminin formülasyonunda uygulanacak ilk kural tasarım değişkenlerinin sayısını mümkün olduğunca az tutmak olacaktır. Bu kabuller ile gerçekleştirilen optimizasyon işleminin sonucu, yenilenmiş bir formülasyona daha fazla tasarım değişkeninin dahil edilip edilmeyeceğini veya önceden düşünülen bazı tasarım değişkenlerinin yeni tasarım değişkenleriyle değiştirilip değiştirilmeyeceğini gösterir.

1.4.2. Örneklem Noktalarının Belirlenmesi

Örneklem noktalarının (ÖN) ya da başka bir deyişle deneysel tasarım noktalarının belirlenmesi, tasarım değişkenlerinin sınırlarını içerisinde kalan çözüm uzayını temsil edecek en uygun deney ya da sayısal analiz noktalarının belirlenmesi işlemidir. Bu amaçla Ls-Opt yazılımında Faktöriyel Dizayn, Koshal Dizayn, Merkezi Kompozit Dizayn, D-optimal Dizayn, Latin Hiperküp Dizayn, Boşluk Doldurma Şeması, Rastgele Numara Belirleme ve Makul Deneysel Dizayn gibi seçenekler bulunmaktadır [162].

Bilinmeyen ve doğrusal olmayan bir ilişkinin modellenmesinde, yeterli düzeyde tatmin edici bir parametrik regresyon modeli mevcut olmadığında ve kısıtlamalar belirsiz olduğunda, iyi bir deneysel tasarımın, tasarım uzayında düzgün bir şekilde dağılmış bir dizi nokta olduğuna inanılabilir. Boşluk doldurma şemaları, yaklaşım modeline güçlü varsayımlar getirmez ve her bir değişken için orta sayıda deneysel nokta ile çok sayıda seviyeye izin verir. Bu tasarımlar özellikle sinir ağları (ileri beslemeli ağlar, radyal temel fonksiyonlar) ve Kriging gibi parametrik olmayan modellerle birlikte kullanışlıdır [163,164].

1.4.3. Kısıtlar

Kısıtlar, tasarım değişkenleri ve diğer tasarım parametreleri arasındaki fiziksel fenomenleri ve belirli kaynak sınırlamalarını karşılayan bazı işlevsel ilişkileri temsil eder. Dikkate alınıp formülasyona dahil edilecek kısıtlamaların niteliği ve niceliği kullanıcıya bağlıdır. Tam matematiksel ifadelerle sahip kısıtlar olabileceği gibi matematiksel olarak ifade edilemeyen kısıtlar da olabilir. Örneğin, maksimum gerilme bir yapının tasarımı için kısıttır. Yapı düzenli şekle sahipse, boyutlarla maksimum gerilme arasında tam bir matematiksel ilişkiye bulunur. Ancak düzensiz şekil durumunda, maksimum stresi hesaplamak için sonlu eleman analizi ya da sayısal hesaplama gerekli olabilir. Kısıtlamalar eşitlik ya da eşitsizlik formunda olabilir. Bir yapıda kabul edilebilir maksimum gerilme kısıtı eşitsizlik şeklinde kısıtken çökme miktarının belirli bir değerde olmasının istenmesi eşitlik şeklinde kısıttır.

1.4.4. Amaç Fonksiyonları

Şekil 1.32’teki formülasyon prosedüründeki bir sonraki adım, tasarım değişkenleri ve diğer problem parametreleri açısından amaç fonksiyonunu bulmaktır. Genel olarak mühendislik problemlerinin optimizasyon hedefleri, toplam üretim maliyetinin minimizasyonu, yapının toplam ağırlığının minimizasyonu ya da bir ürünün veya yapının toplam ömrünün maksimize edilmesini vb. konuları içerir. Hedeflerin çoğu sayısallaştırılabilir de (matematiksel biçimde ifade edilebilse de), matematiksel olarak formüle edilmesi mümkün olmayan bazı hedefler (tasarımın estetik yönü, bir araba süspansiyon tasarımının sürüş özellikleri ve bir tasarımın güvenilirliği gibi) vardır. Böyle bir durumda yaklaşık bir matematiksel ifade kullanılır.

Optimizasyon problemlerinde, tasarımcı aynı anda birden fazla amacı optimize etmek isteyebilir. Böyle durumlarda Çok Amaçlı Optimizasyon (ÇAO) algoritmaları devreye girer. ÇAO algoritmaları çok daha karmaşıktır ve hesaplama yükü daha fazladır. Bu nedenle amaç fonksiyonu olarak en önemli amaç seçilir ve diğer amaçlar değerleri belirli bir aralıkta sınırlandırılarak kısıtlar olarak optimizasyon sürecine dahil edilir.

Optimizasyon algoritmaları genellikle minimizasyon problemleri veya maksimizasyon problemleri için yazılmıştır. Düalite ilkesi, algoritmanın tamamında bir değişiklik yerine amaç fonksiyonunda küçük bir değişiklik ile minimizasyon veya maksimizasyon için aynı algoritmanın kullanılmasına izin verir. Bir minimizasyon

problemını çözmek için kullanılan algoritma amaç fonksiyonu -1 ile çarpılarak kolayca bir maksimizasyon problemine dönüştürülebilir. Bu durumun tersi de mümkündür.

1.4.5. Değişken Sınırları

Formülasyon prosedürünün son görevi her bir tasarım değişkeni için minimum ve maksimum sınırları belirlemektir. Bazı optimizasyon algoritmaları bu bilgiyi gerektirmez. Bu algoritmalarda, kısıtlar çözüm uzayını tamamen çevreler ve çözüm uzayının tamamı için optimum araştırması yapar. Diğer problemler, bu sınırlar içinde arama algoritmasını gerektirir. Genel olarak, tüm N tasarım değişkenleri, aşağıdaki gibi minimum ve maksimum sınırlar içinde kalacak şekilde sınırlandırılmıştır.

$$x_i^{(L)} \leq x_i \leq x_i^{(u)} \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad 1.21$$

Herhangi bir problemde, değişkenlerin sınırlarını belirlemek zor olabilir. Bu durumu düzeltmenin bir yolu, optimum çözüm hakkında bir tahminde bulunmak ve minimum ve maksimum sınırları, optimum çözümün bu iki sınır içinde kalması için ayarlamaktır. Optimum çözüme karşılık gelen herhangi bir tasarım değişkeninin minimum veya maksimum sınırın üzerinde veya yakınında olduğu bulunursa, seçilen sınır ayarlanabilir ve optimizasyon algoritması yeniden simüle edilebilir. Yukarıdaki dört görev tamamlandıktan sonra, optimizasyon problemi doğrusal olmayan programlama formatı olarak bilinen özel bir formatta matematiksel olarak yazılabilir.

Minimize / Maksimize $f(x)$

Göre

$$g_j(x) \geq 0 \quad j = 1, 2, 3, \dots, J \quad 1.22$$

$$h_k(x) = 0 \quad k = 1, 2, 3, \dots, K \quad 1.23$$

$$x_i^{(L)} \leq x_i \leq x_i^{(u)} \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad 1.24$$

Burada; $X = (X_1, X_2, \dots, X_N)^T$ tasarım değişkenlerini, $f(x)$ amaç fonksiyonunu, J eşitsizlik kısıtlamaları sayısı ve $g_j(x) \geq 0$ eşitsizlik kısıtlama fonksiyonlarını, K eşitlik kısıtlama sayısı ve $h_k(x) = 0$ eşitlik kısıtlama fonksiyonlarını göstermektedir.

1.4.6. Meta Modelin Kurulması

Meta modelleme teknikleri, değişken tarama, optimizasyon ve güvenilirlik gibi tasarım araştırması amacıyla vekil tasarım modellerinin oluşturulmasına imkan veren üst modelleme teknikleridir. Ls-Opt yazılımı, Polinom Yanıt Yüzeyleri, Yapay Sinir Ağları (YSA), Radyal Temel İşlev Ağları, Kriging ve Destek Vektör Regresyonu olmak üzere beş farklı meta modelleme tekniği kullanma yeteneği sağlamaktadır [165]. Bu yaklaşımların tümü, optimizasyon veya güvenilirlik için tahmin yeteneği sağlamada faydalı olabilir. Lineer polinomlar, daha az doğru olsa da değişken tarama için oldukça uygundur. Bu teknikler meta modelleri oluşturmak için kullanılan regresyon yöntemlerinde farklılık gösterir. Polinom Yanıt Yüzeyi ve Radyal Temel İşlev Ağları yöntemleri doğrusal regresyon kullanırken, Yapay Sinir Ağları ise doğrusal olmayan regresyon içeren optimizasyon algoritması kullanır.

Optimizasyon işleminde meta modelin doğruluğunu kontrol etmek amacıyla Denklem 1.25'te verilen R^2 tahmincisi yaygın olarak kullanılmaktadır. R^2 tahmincisinin 1 olması durumu, kullanılan meta modelin mükemmel olduğunu gösterir. Yani ÖN'de elde edilen değer y_i ile meta model tarafından tahmin edilen değer $\hat{y}_i$ 'nin aynı olduğu anlaşılır.

$$R^2 = \frac{\sum_i^P (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_i^P (y_i - \bar{y})^2} \quad 1.25$$

Burada P ÖN'lerin sayısını, y_i karşılık gelen değerleri, $\hat{y}_i$ meta modelin tahmini değerini, $\bar{y}$ ise y değerlerinin ortalamasını göstermektedir [165].

1.4.7. Optimizasyon Algoritması

Genel olarak optimizasyon algoritmaları deterministik algoritmalar ve stokastik algoritmalar olmak üzere iki kategoriye ayrılabilir. Deterministik algoritmalar belirgin bir yol izler ve hem tasarım değişkenlerinin hem de fonksiyonların izlediği yol ve değerleri tekrarlanabilir. Öte yandan, stokastik algoritmalar her zaman bir miktar rastgeleliğe sahiptir. Stokastik algoritmalar bazı sözde rastgele sayılar kullandığından, nihai sonuçlarda büyük bir fark olmasa da programı her çalıştırdığınızda popülasyondaki dizeler veya çözümler farklı olacaktır. Ayrıca, deterministik ve stokastik algoritmaların bir karışımı veya melezi olan

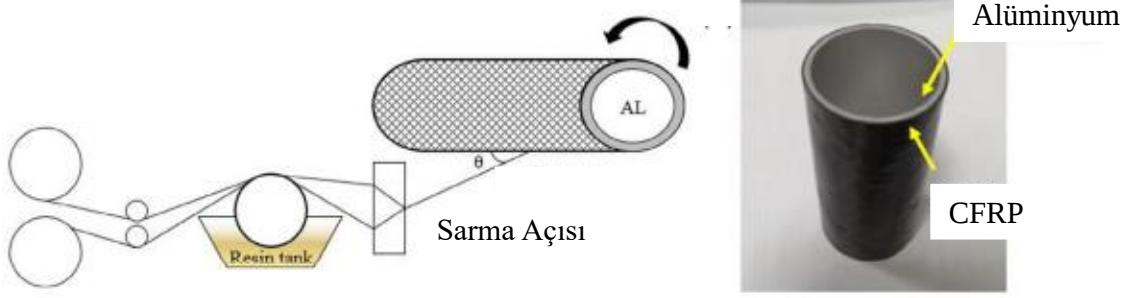
üçüncü bir algoritma türü vardır. Hibrit algoritmalar rastgele bileşenler içerdiği için optimizasyon literatüründe sıklıkla stokastik algoritma olarak sınıflandırılır[163].

Genetik algoritmalar (GA), Darwin'in "en uygun olanın hayatta kalması" ilkesini taklit eden, doğadan ilham alan arama algoritmalarıdır. Doğadan ilham alan algoritmalar kavramı ilk olarak 1960'ların ortalarında Holland [166] tarafından uygulanmış sonrasında Goldberg [166] ve öğrencilerinin çalışmalarının ardından mühendislik optimizasyon uygulamalarındaki kullanımı ivme kazanmıştır. GA ve çoğu geleneksel optimizasyon yöntemi arasındaki farklar şunlardır [165]:

- GA, optimal noktaların aranmasını sağlamak için türev bilgisi gerektirmez.
- Geleneksel yöntemler her yinelemede tek bir nokta kullanırken, GA popülasyon tabanlı bir yaklaşımdır.
- GA global bir optimize edicidir, oysa geleneksel yöntemler yerel optimumda takılıp kalabilir.
- GA, olasılıksal bir optimizasyon yöntemidir, yani daha düşük bir çözüm (doğru tasarım değişkenleri yapısını geliştirmeye yardımcı olabilir) ayrıca arama sürecine katılma olasılığı sıfırdan farklı olabilir.
- GA kullanmanın hesaplama yükü, türev tabanlı yöntemlere kıyasla yüksek olabilir.

Optimizasyon, çarpışma mühendisliğinde enerji sönümleyici olarak kullanılacak yapının yapısal ve geometrik olarak en iyi enerji sönümleme davranışını elde etmek amacıyla kullanılır. Burada öncelikli amaç SE miktarını maksimize etmenin yanında ÖES ve ÇKO'yu yükseltmek; ilk pik kuvvet ve maksimum kuvvet değerlerini ise düşürmektir. Bu amaçla ince cidarlı yapının malzemesi, et kalınlığı, kesit alanı geometrisi, uzunluğu gibi parametreler optimize edilmeye çalışılır. Bu alanda yapılan ilk optimizasyon çalışmaları 1990 yıllarda yapılmaya başlanmıştır. Yamazaki ve Han [167], minimum sayıda sonlu eleman analizini kullanmak amacıyla kare ve dairesel tüplerin çarpışma enerjisini maksimize etmek için yaklaşık bir yanıt yüzeyi kullanmışlardır. Marklund ve Nilsson [168] güvenlik koşullarından ödün vermeden bir araç B sütununun kütlesini %25 oranında azaltmak için doğrusal ve ikinci dereceden yaklaşımlar kullanmışlardır. Sobieszcanski vd. [169] gürültü, titreşim, sertlik ve çarpışma kısıtlamaları altında gerçek boyutlu bir araç gövdesi için sonlu eleman modeli ile boyut optimizasyonunu kullanarak araç gövdesinin kütlesini azaltmışlardır. Janson vd. sınırlı sayıda tasarım değişkeni ile sac metal şekillendirme ve çarpışmaya dayanıklılık tasarımının mühendislik problemlerine meta modelleri ve yanıt

yüzeylerini başarıyla uygulamışlardır[170]. Hou vd. sonlu elemanlar yönteminin bütün ÖN'ler için meta model yaklaşımıyla altıgen metal tüplerde ÖES ve pik kuvveti amaç fonksiyonu olarak belirleyerek optimizasyon gerçekleştirmişlerdir [171].



Şekil 1.33. CFRP/Al hibrit tüplerin optimizasyonu [172].

Başka bir makalelerinde Hou vd. [173] vekil tabanlı meta modelleme yoluyla hibrit köpük dolgulu ince duvarlı metal yapının optimizasyonunu çalışmışlardır. Ma vd. [174] ince cidarlı origami desenli kare kesitli tüpler için gerçekleştirdikleri optimizasyon çalışmalarında, optimum konfigürasyon için ÖES'yi %29.2 artırırken ilk pik kuvveti %56.5 azaltmışlardır. Qihua vd. [172] Şekil 1.33'de görülen üç nokta eğilme ve eksenel çarpışma altında CFRP/Al hibrit dairesel tüplerin enerji sönümlleme davranışını sayısal ve deneysel olarak inceledikleri çalışmalarında alüminyum tüp üzerine CFRP sarma açısı ve alüminyum tüpün et kalınlığını optimize etmişlerdir. Sarma açısı ve et kalınlığının üç noktalı eğilme ve eksenel sıkıştırma altında hibrit tüpün ÖES üzerinde farklı etkilere sahip olduğunu göstermişlerdir. Benzer şekilde filaman sarma ile CFRP/Al tüpün üç nokta eğilme testi ile enerji sönümlleme davranışının araştırdıkları çalışmalarında Cuiping vd. [175] sarma açısı, katman sayısı ve alüminyum tüpün kalınlığının optimize etmişlerdir. Optimizasyon sonucunda sarma açısı $\theta = 15^\circ$, et kalınlığı $t = 1.65$ mm ve katman sayısı $n = 3$ olduğu durumda pik kuvvet ve kütlenin sırasıyla %10.8, %13 oranında azaldığını bulmuşlardır.

1.5. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Geleneksel malzemelerden yapılmış ince cidarlı tüplerin enerji sönümlleme davranışlarıyla ilgili çalışmalar son 60 yıldan bu yana yapılmaktadır. Bu amaçla dairesel,

kare, elips vb. farklı kesit geometrileri ve çelik, alüminyum vb. farklı malzemelerin enerji sönümlene davranışları araştırılmıştır. Enerji sönümlene performansını geliştirmek amacıyla ince cidarlı tüplere oluklandırma, radyal yönde delik delme, ters çevirme (inversion), fonksiyonel derecelendirme gibi işlemler yapılmıştır. Literatürde yapılan fonksiyonel derecelendirme çalışmalarında çoğunlukla kalınlık değişim parametresine bağlı kalınlık değişimleri incelenmiş olup eksenel doğrultuda iki, üç ve dört kalınlık bölgesi tüpler araştırılmıştır. Bu tezin ilk bölümünde dairesel kesitli; 0° , 5° ve 10° konik açılı; eksenel doğrultuda sekiz kalınlık bölgesine sahip metalik tüplerin enerji sönümlene davranışları araştırılmıştır. 0° , 5° ve 10° koniklik açılarında en düşük pik kuvvet ve en yüksek ÖES için bölge kalınlık değerleri GA ile CAO kullanılarak belirlenmiştir.

Malzeme teknolojisinin gelişmesi ile özgül mukavemeti yüksek kompozit malzemelerin üretimi artmış ve ekonomik olarak sürdürülebilir düzeylere gelmiştir. Fiber takviyeli kompozit tüplerde, fiber açısı diziliminin enerji sönümlene davranışı üzerine önemli etkisi bulunmaktadır. Bu etkiyi incelemek amacıyla altı tek yönlü elyaf katmanına sahip 0° , 5° ve 10° konik açılı karbon fiber tüpler, çok katmanlı kabuk yaklaşımı ile SEY kullanılarak modellenmiştir. Elyaf açısı dizilimindeki değişimlerin pik kuvvet ve SE değerlerine olan etkileri belirlenmiştir. En düşük pik kuvvet ve en yüksek SE değerleri için elyaf açısı dizilimleri GA ile CAO kullanılarak belirlenmiştir.

Metal ve kompozit gibi farklı malzemelerin üstün özelliklerini birleştirerek daha iyi enerji sönümleyici yapılar elde etmek amacıyla hibritleşme son yıllarda oldukça yaygın kullanılmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalarda hibritleşme, çoğunlukla radyal doğrultuda metal kompozit tüplerin iç içe ve değişik konfigürasyonlarda yerleştirilmesi ya da metal tüplerin üzerine kompozit elyaf sarılması şeklinde oluşturulmuştur. Bu tezin son kısmında Al6063, St52 ve karbon fiberden yapılmış ikili olarak uç uca birleştirilmiş hibrit tüplerin enerji sönümlene davranışları araştırılmıştır. Ayrıca sayısal olarak hibrit tüplerin içine üç farklı yoğunluğa sahip fonksiyonel alüminyum köpük yerleştirilmiştir. Tekli ve ikili hibrit tüplerde fonksiyonel köpük dolgusunun ve tüplerin et kalınlıklarının SE, ÇKO ve pik kuvvete etkisi incelenmiştir. Bunun yanında en düşük pik kuvvet ve en yüksek SE değerlerini elde etmek amacıyla et kalınlıkları ve köpük yoğunlukları için GA ile CAO çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

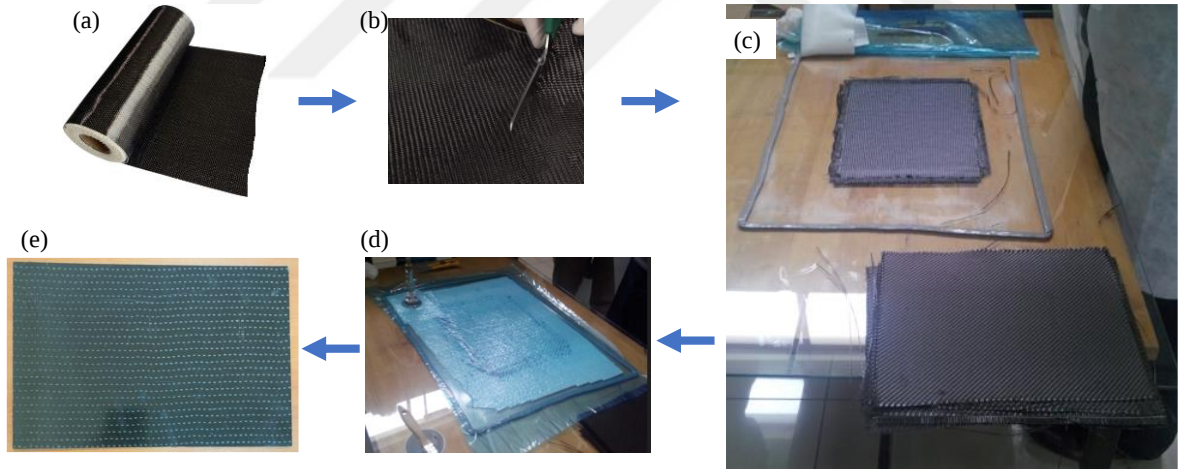
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Deneysel Çalışmalar

2.1.1. Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

2.1.1.1. Kompozit Plakaların ve Tüplerin Üretilmesi

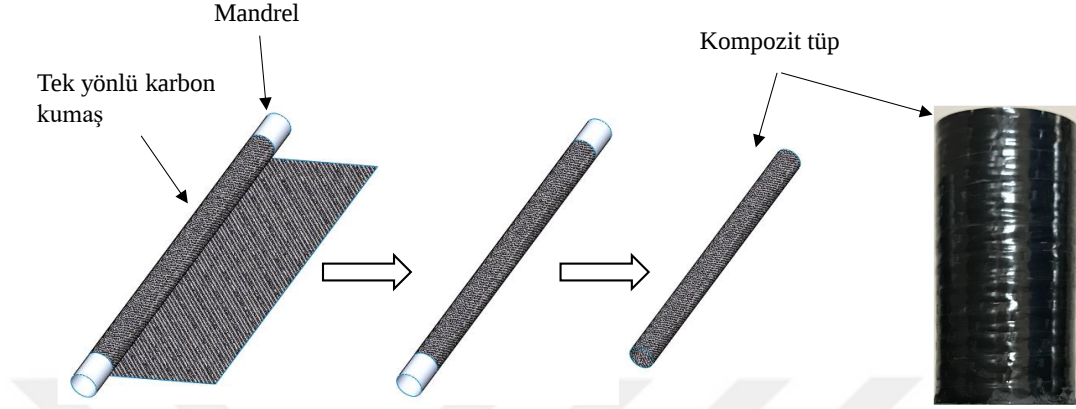
Karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlemek için üç bin fiberli (3K) tek yönlü kumaş kullanılarak 1 (4 kat) ve 2 (8 kat) mm kalınlığa sahip plakalar üretilmiştir. Vakum torbalama yöntemi ile üretilen plakalarda MGS L160 reçine ve H160 sertleştirici kullanılmıştır. Üretimde kullanılan sertleştiricinin reçineye oranı $1/5 \pm 2$ gramdır. Üretilen plakalar $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 2 saat boyunca kürlenerek oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Şekil 2.1'de plaka üretim aşamaları görülmektedir.



Şekil 2.1. Kompozit plaka üretim aşamaları: (a) tek yönlü kumaş, (b) kumaşın kesilmesi, (c) kumaşların dizilmesi ve reçine emdirilmesi, (d) vakum işlemi, (e) üretilmiş tek yönlü plaka

Kompozit tüpler, tek yönlü karbon fiber kumaş kullanılarak $[0/90]_3$ diziliminde, iç çapları 37 mm olan metal mandrele eksenel doğrultuda sarılarak ve sonrasında kürlenerek üretilmiştir. Kürlenme ve kalıptan çıkarma sonrasında tüpler gerçekleştirilecek deneylere uygun olarak Şekil 2.2'de görüldüğü gibi 80 mm uzunlukta kesilmiştir. Gerçekleştirilen

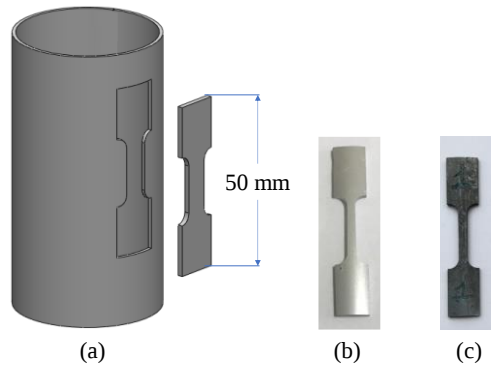
üretimin yanında aynı üretim ve işlem parametrelerine sahip kompozit tüpler İzoreel firmasından da temin edilmiştir.



Şekil 2.2. Şematik kompozit tüp üretimi

2.1.1.2. Mekanik Deneyler

Seykoç ve Borusan şirketlerinden temin edilen Al6063 ve St52 malzemelerinden yapılmış tüplerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.3'te görüldüğü gibi, çekme deney numuneleri ASTM E8 – E8M standardının büyük çaplı tüplerden çekme numunesi elde edilmesi bölümüne göre tüp üzerinden eksenel doğrultuda ve $\frac{1}{2}$ oranında ölçeklendirilerek (L=50 mm) CNC Tel Erozyon tezgâhı kullanılarak elde edilmiştir. Çekme deneyleri Instron 3382 universal deney sisteminde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.3. (a) metal tüp üzerinden eksenel doğrultuda deney numunesinin elde edilmesi, (b) Al6063 ve (c) St52 deney numuneleri

Tek yönlü kumaştan üretilen kompozit plakaların mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla ASTM D3039/D3039M, ASTM D3410 ve ASTM D3518 standartlarına göre sırasıyla çekme, basma ve düzlem içi kesme deneyleri için numuneler kesilmiştir. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda Tablo 2.1’de detayları verilen mekanik özellikler belirlenmiştir.

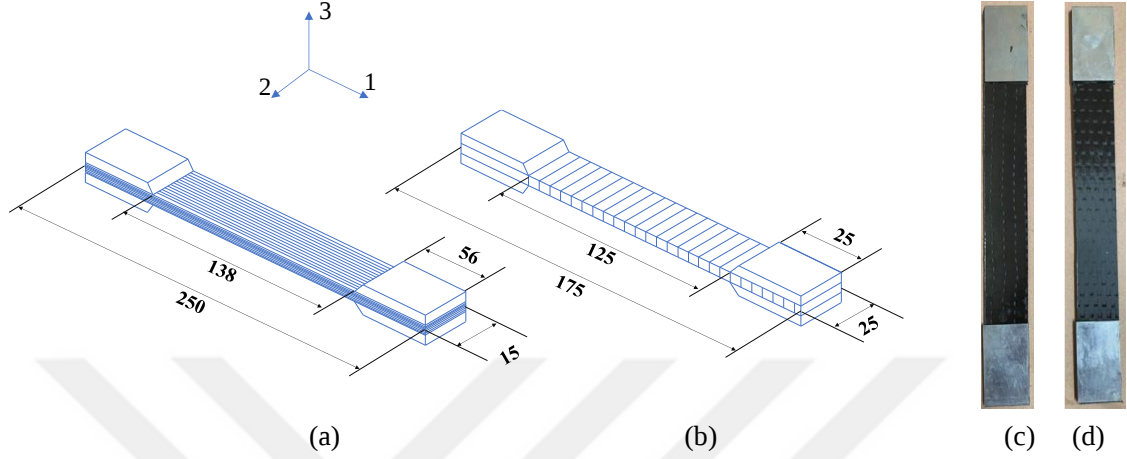
Tablo 2.1. Kompozit plakalara gerçekleştirilen deneyler

Özellik	Simgesi	Deney Standardı
Fiber yönünde çekme dayanımı	X_t	D3039
Fiber yönünde elastisite modülü	E_1	
Poisson oranı	ν_{21}	
Fibere dik yönde çekme dayanımı	Y_t	
Fibere dik yönde elastisite modülü	E_2	
Kayma modülü	G_{12}	D3518
Kayma dayanımı	S_c	
Fiber yönünde basma dayanımı	X_c	D3410
Fibere dik yönde basma dayanımı	Y_c	

Çekme Deneyleri

Tek yönlü olarak Karbon-elyaf/Epoksi-reçineden üretimi gerçekleştirilen kompozitlere ilk olarak çekme deneyleri yapılmıştır. Deney numuneleri, tek yönlü olarak üretilen plakalardan Şekil 2.4’te detayları verilen ASTM D3039/D3039M standardındaki ölçülere göre fiber ve fibere dik yönde kesilmiştir. Fiber yönü çekme numuneleri $[0]_4$ diziliminde 1 mm kalınlıkta, fibere dik yöndeki çekme numuneleri ise $[90]_8$ diziliminde ve 2 mm kalınlığa sahip olacak şekilde üretilmiştir. Çekme deneyleri ile fiber yönünde çekme dayanımı (X_T), fiber yönünde elastisite modülü (E_1), fibere dik yönde çekme dayanımı (Y_T), fibere dik yönde elastisite modülü (E_2) ve Poisson oranı (ν_{21}) değerleri elde edilir. Fiber ve fibere dik yöndeki elastisite modülleri gerilme-şekil değiştirme eğrisi üzerinden elde edilmiştir. Bu yöntemde %0.2 şekil değiştirme değerinden gerilme-şekil değiştirme eğrisinin doğrusal özellik gösteren ilk bölgesine paralel çizilerek gerilme-şekil değiştirme eğrisini kestiği nokta bulunur. Elastisite modülü, akma noktası kabul edilen bu noktanın gerilme değerinin şekil değiştirme değerine bölünmesi ile bulunur. Çekme deneyleri

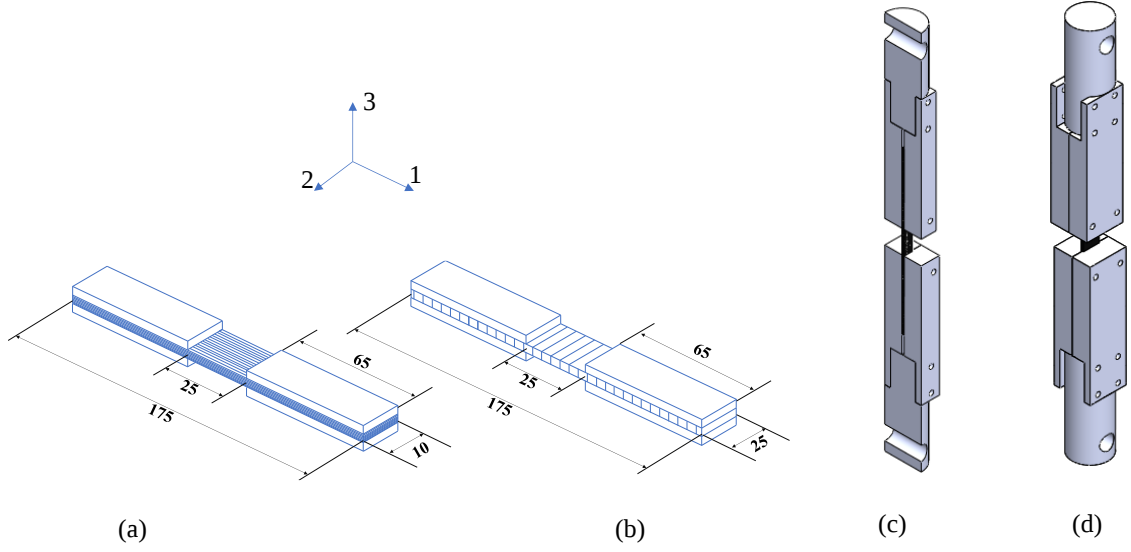
Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde bulunan Instron 3382 üniversal deney cihazında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.4. (a) fiber ve (b) fibere dik yöndeki çekme deney numune geometrileri ve boyutları, (c) fiber ve (d) fibere dik numune görünümü

Basma Deneyleri

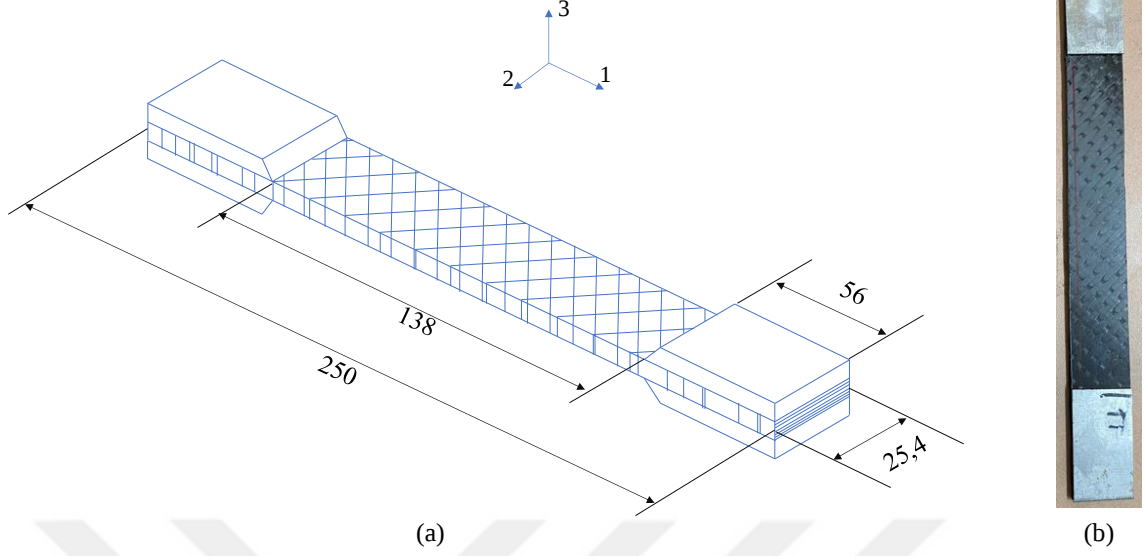
Basma deneyleri için deney numuneleri tek yönlü kumaştan üretilen plakalardan fiber ve fibere dik yönde Şekil 2.5 (a) ve (b)' detayları verilen ASTM D3410 standardına göre kesilmiştir. Fiber ve fibere dik yönde yapılan basma deneyleri sonucunda, fiber yönünde basma dayanımı (X_C) ve fibere dik yönde basma dayanım (Y_C) değerleri elde edilmiştir. Basma deneyleri Karadeniz Teknik Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünde bulunan Instron 3382 üniversal deney cihazında gerçekleştirilmiştir. Basma deneyleri yapılırken Şekil 2.5 (c) ve (d)'de sırasıyla kesit ve üç boyutlu görünümü verilen basma test fikstürü kullanılmıştır.



Şekil 2.5. (a) fiber ve (b) fibere dik yöndeki basma deney numune geometrileri ve boyutları, (c) basma fiksürü kesit görünümü ve (d) basma fiksürü

Düzlem İçi Kesme Deneyleri

Düzlem içi kesme deneyleri, tek yönlü kumaştan $[0/90]_4$ dizilimli ve 2 mm kalınlıklı olarak üretilen plakalardan ölçü detayları Şekil 2.6'da verilen ASTM D3518 standardına göre 45° açı ile kesilen deney numunelerine çekme deneyi yapılarak gerçekleştirilmiştir. Düzlem içi kesme deneyinde numune saf kayma gerilmesi oluşturacak yüklere maruz bırakılmakta ve şekil değiştirmeler ölçülmektedir. Bu deney sonucunda kayma modülü (G_{12}) ve kayma dayanımı (S_C) belirlenmiştir. Kayma modülü, ASTM D3039 çekme testindeki gibi belirlenmiştir. Düzlem içi kesme deneyleri Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde bulunan Instron 3382 universal deney cihazında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.6. (a) düzlem içi kesme deneyi için numune geometri ve boyutları, (b) görünümü

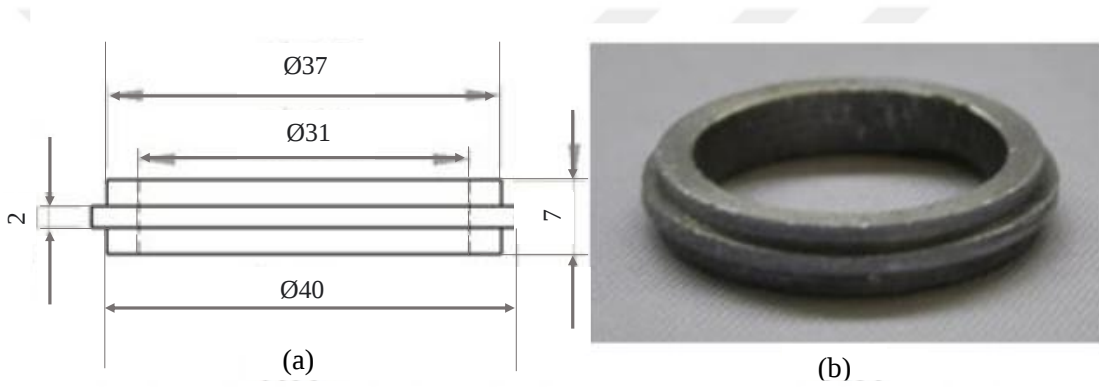
2.1.2. Tüplerin Statik Deneyleri

Tekli ve ikili tüplerin statik şartlarda enerji sönümleme davranışını belirlemek amacıyla detayları Tablo 2.2’de görüntüleri ise Şekil 2.8’de verilen deney numuneleri hazırlanmıştır. Tekli tüpler 1.5 mm et kalınlıklı 80 mm boyunda ve Al6063, St 52 ve kompozit malzemelerden hazırlanmıştır. Tekli alüminyum, çelik ve kompozit tüpler sırasıyla S_Al, S_St, S_C şeklinde kodlanmıştır. İkili tüpler ise 1.5 mm et kalınlıklı 39 mm uzunluklu iki tüp ve 2 mm ara aparat kullanılarak toplam boy 80 mm olacak şekilde hazırlanmıştır. İkili tüplerde de Al6063, St 52 ve kompozit malzemeli tüpler kullanılmıştır. İkili tüplerde alüminyum-çelik, alüminyum-kompozit ve çelik-kompozit tüpler için sırasıyla D_St-Al, D_Al-C ve D_St-C numune kodları kullanılmıştır.

İkili tüplerin deney esnasında birleştirilmesi için teknik resmi ve görüntüsü Şekil 2.7’de verilen ara aparat kullanılmıştır. Ara aparat ile ikili tüpler arasında bağlantı sıkı geçme şeklindedir.

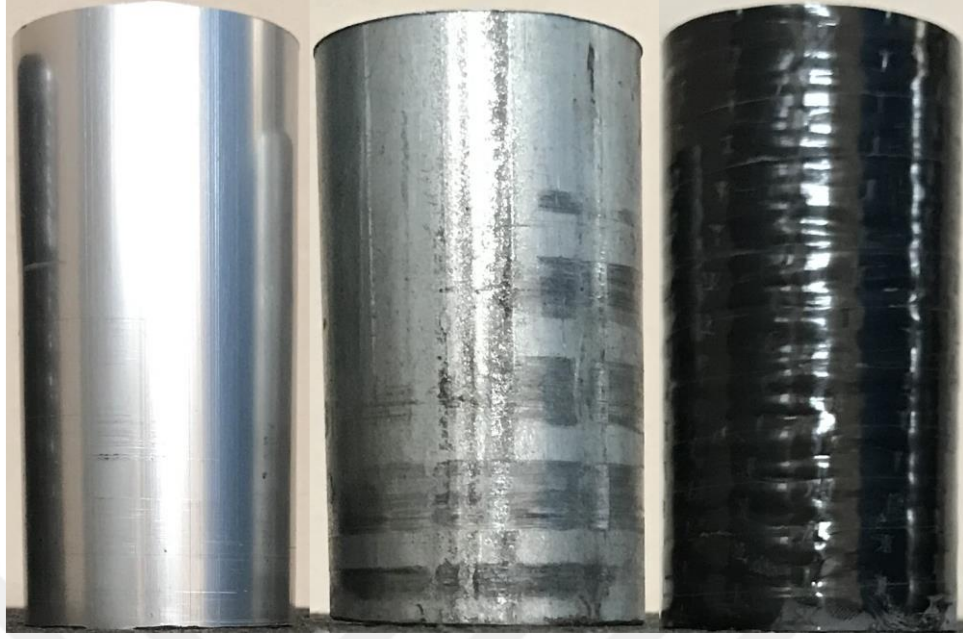
Tablo 2.2. Hazırlanan deney numuneleri

Numune	Uzunluk (mm)			Kalınlık (mm)	Dış Çap (mm)	Elyaf açısı
	Al	St	CFRP			
Tekli	S_Al	80	-	1.5	40	-
	S_St	-	80	1.5		-
	S_C	-	80	1.5		(0°/90°) ₃
İkili	D_St-Al	39	39	1.5	40	-
	D_Al-C	39	-	1.5		(0°/90°) ₃
	D_St-C	-	39	1.5		(0°/90°) ₃



Şekil 2.7. İkili tüplerin birleştirilmesi için kullanılan ara aparat, (a) teknik resmi ve (b) görüntüsü

Tekli ve ikili tüpler için statik basma deneyleri Instron 3382 üniversal deney cihazında 0.16 mm/s hızda gerçekleştirilmiştir.



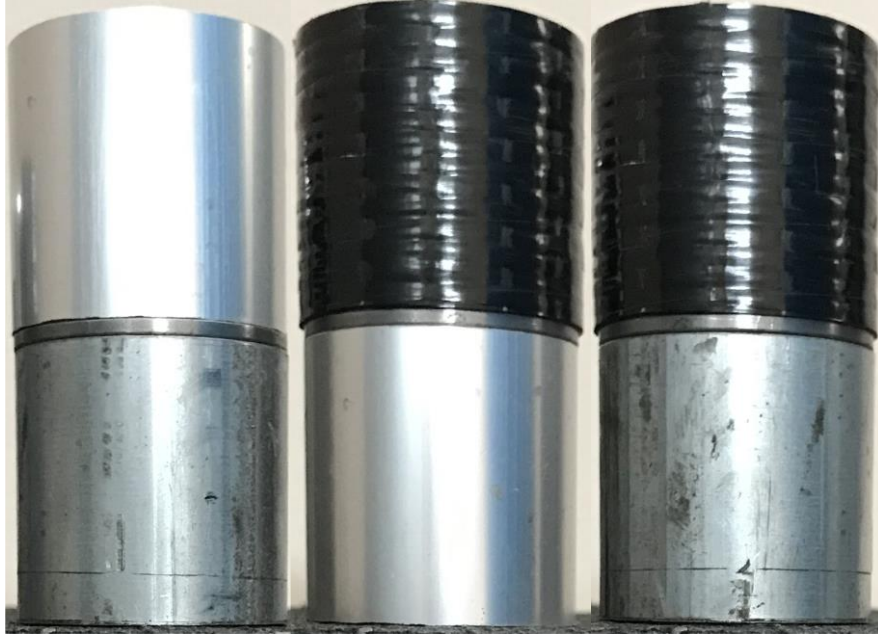
S_Al

S_St

S_C

Tekli Tüpler

(a)



D_St-Al

D_Al-C

D_St-C

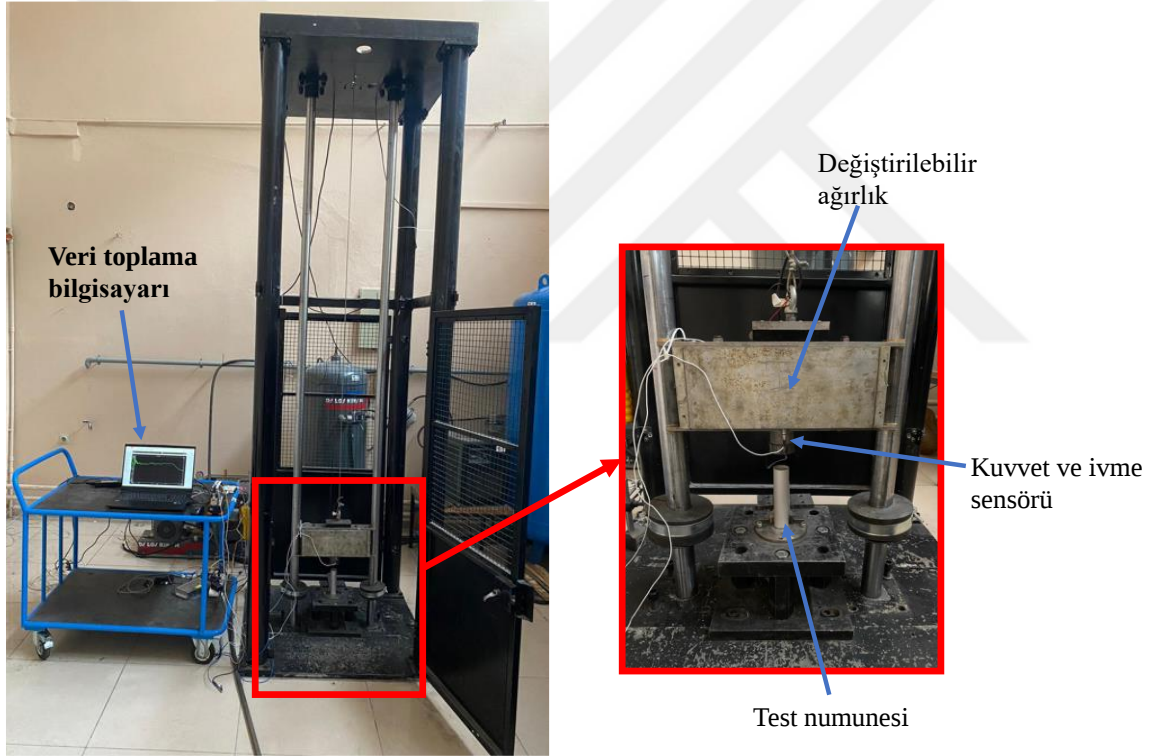
İkili Tüpler

(b)

Şekil 2.8. (a) tekli ve (b) ikili tüpler

2.1.3. Tüplerin Dinamik Deneyleri

Tekli ve ikili tüplerin dinamik şartlarda enerji sönümleme davranışını belirlemek amacıyla detayları Tablo 2.2’de, görüntüleri Şekil 2.8’de verilen deney numuneleri hazırlanmıştır. Dinamik deneyler Şekil 2.9’da görülen serbest ağırlık düşürme deney sisteminde yapılmıştır. Serbest ağırlık düşürme deney sisteminde, düşme ağırlığı 5 kg’dan 60 kg’a kadar arttırılabilirken maksimum çarpma hızı 6.5 m/s olmaktadır. Kuvvet ve ivme sensörlerinden 16 kanallı DEWE-43A veri toplama kartı ile 20 kHz örneklem hızında alınmış ve kuvvet-zaman, ivme-zaman grafikleri elde edilmiştir. Bunun yanında DEWESOFT yazılımı ile kuvvet- yer değiştirme grafikleri elde edilmiştir.



Şekil 2.9. Serbest ağırlık düşürme deney sistemi

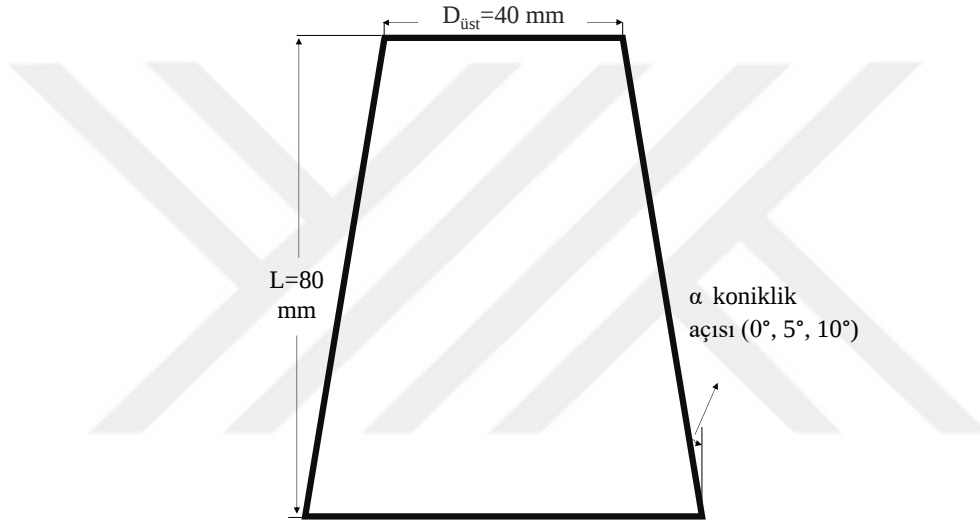
2.2. Sayısal Çalışmalar

Sayısal çalışmalar, Ls-Opt modülünü içeren explicit kaynak kodlu ticari bir yazılım olan LS-DYNA programında gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizlerde ilk olarak 0°, 5° ve 10° konik açılı metalik tüplerin statik basma testleri modellenmiştir. İkinci olarak altı elyaf katmanına sahip 0°, 5° ve 10° konik açılı kompozit tüplerin elyaf açısı diziliminin modelleme

alışmaları gerçekleştirilmiştir. Son olarak farklı yoğunluklara sahip fonksiyonel kpk ile doldurulmuş tekli ve ikili hibrit tpelerin sayısal modelleme çalışmaları yapılmıştır.

2.2.1. Metalik Tpelerin Modellenmesi

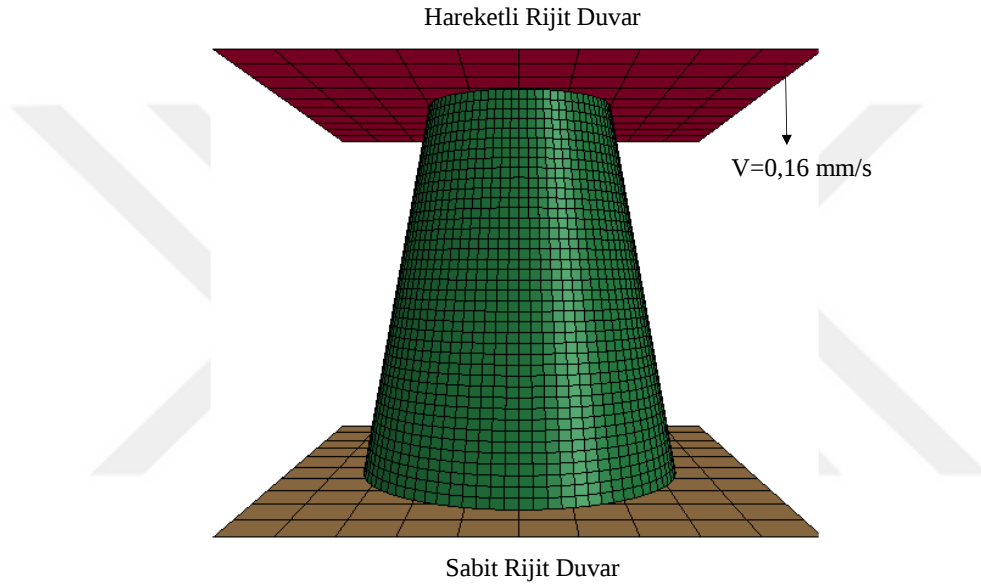
Dairesel kesitli, 0° , 5° ve 10° konik açılı Al6063 malzemesinden yapılmış metalik tp Şekil 2.10’da görülmektedir. Toplam boyu 80 mm olan tüpün st ucu sabit ve apı (D) 40 mm seçilmiş olup alt ucun çapı 0° , 5° ve 10° konik açısına göre değişmektedir.



Şekil 2.10. Konik açılı bir metalik tüpün geometrik zellikleri

Metalik tüpün sonlu elemanlar modeli ise Şekil 2.11’de görülmektedir. Tüpün sonlu elemanlar modelinde dört düğüm noktalı, dört kenarlı ve kalınlık yönünde 7 integrasyon noktasına sahip Belytschko-Tsay eleman formülasyonlu kabuk (Shell) elemanlar kullanılmıştır. Farklı ağ boyutları için sayısal analizler gerçekleştirilmiş, deneysel veriye en uygun ve kısa çözüm zamanını sağlayan 2x2 mm ağ boyutu seçilmiştir. Çekme deneyi sonucu elde edilen gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme eğrisi PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY malzeme modeline girilmiştir. Tüpün kendi kendine teması için “CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE”, hareketli rijit duvar-tp ve sabit rijit duvar-tp arasındaki temas için ise “CONTACT_NODES_TO_SURFACE” kontak kartları kullanılmıştır. Temas eden yüzeyler arasında dinamik sürtünme katsayısı 0.1, statik sürtünme katsayısı 0.2 olarak alınmıştır. stte bulunan hareketli rijit duvara

“BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID” kartı ile 0.16 mm/s sabit hız tanımlanmışken altta bulunan sabit rijit duvarın bütün öteleme ve dönme serbestlikleri kısıtlanmıştır. Sonlu elemanlar analizini durdurmak amacıyla “TERMINATION_NODE” kartı ile üst hareketli duvarın düşey yöndeki yer değiştirmesi 50 mm ile sınırlanmıştır. Statik analizlerin çözüm zamanını kısaltmak için kütle ölçekleme (mass scaling) yaklaşımı kullanılmıştır. Ayrıca sayısal analizlerde kullanılan malzeme modelinde şekil değiştirme hızına bağlı parametreler kullanılmamıştır.



Şekil 2.11. Metalik tüpün sonlu elemanlar modeli

2.2.2. Kompozit Tüplerin Modellenmesi

Geometrik özellikleri Şekil 2.10’da verilen metalik tüp ile aynı olan kompozit tüpleri modellemek amacıyla çok katmanlı kabuk eleman yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yaklaşımda kompozit tüpte bulunan her bir kumaş katmanı kabuk elemanlı bir tüp ile temsil edilmektedir. Ancak katman sayısının fazla olduğu durumlarda bu yaklaşım tarzı çözüm zamanını arttırmaktadır. Çözüm zamanını kabul edilebilir bir düzeye çekmek amacıyla katman sayısını temsil etmek için kabuk elemanlı tüplere kalınlık yönünde integrasyon noktası eklenmesi yaklaşımı kullanılmaktadır. Bu çalışmada kullanılan altı kumaş katmanına sahip 0°, 5° ve 10° konik açılı kompozit tüpleri modellemek amacıyla Şekil 2.12’de görüldüğü gibi, 3 farklı tüp, kalınlıkları yönünde ikişer integrasyon noktasına sahip olacak şekilde modellenmiştir. Böylece her bir tüp için atanan 2 integrasyon noktaları ile altı kumaş

“CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE” kartı kullanılmıştır. Analizlerde dinamik ve statik sürtünme katsayıları sırası ile 0.1 ve 0.2 alınmıştır. Hareketli ve sabit duvarlar için rijit malzeme modeli tanımlanmıştır. Sabit duvarın doğrusal ve açısız hareketleri kısıtlanırken hareketli duvara “BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID” kartı ile 0.16 mm/s hız tanımlanmıştır.

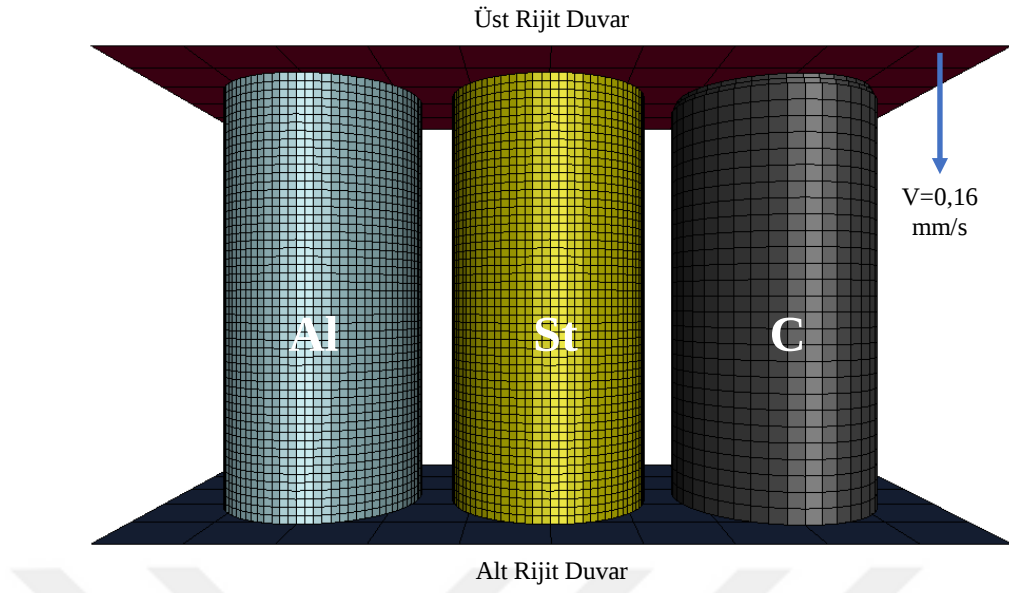
Tablo 2.3. MAT54/55 için malzeme sabitleri ve kalibre edilen değerler

Sembol	Açıklama	Değer	Birim
R _o	Yoğunluk	2000	kg/m ³
E ₁	Fiber doğrultusunda elastisite modülü	117.4	GPa
E ₂	Fibere dik doğrultuda elastisite modülü	7.8	GPa
ν_{12}	Poisson oranı ba	0.021	
G ₁₂	Kayma modülü ab.	3.76	GPa
X _C	Fiber doğrultusunda basma gerilmesi	400	MPa
X _T	Fiber doğrultusunda çekme gerilmesi	1.917	GPa
Y _C	Fibere dik doğrultuda basma gerilmesi	430	MPa
Y _T	Fibere dik doğrultuda çekme gerilmesi	39	MPa
S _C	Kayma gerilmesi	110	MPa
TFAIL	Zaman adımlı hasar kriteri	8 e ⁻⁹	
ALPH	Doğrusal olmayan terim için kayma gerilmesi	0	
SOFT	Çarpışma cephesi azaltma faktörü	0.95	
EFS	Etkili hasar değiştirme katsayısı	0.95	

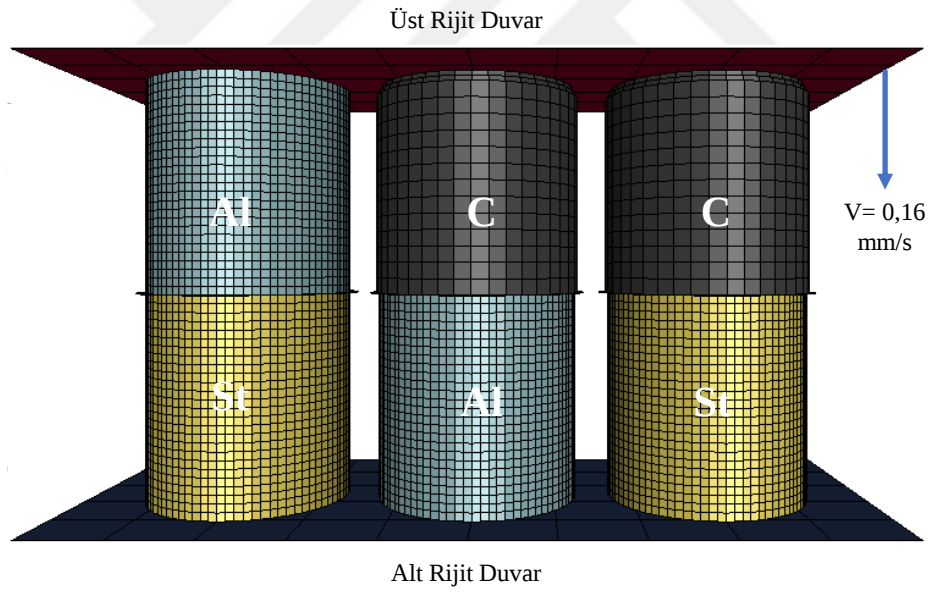
2.2.3. Hibrit Tüplerin Modellenmesi

2.2.3.1. İkili Hibrit Tüplerin Modellenmesi

Bu bölümde, tekli (metal, kompozit) ve üst üste birleştirilmiş ikili (metal-metal ve metal-kompozit) hibrit tüpler modellenmiştir. Al6063, St 52 ve kompozit malzemelerinden yapılmış tüplerin enerji sönümleme davranışları, tekli ve ikişerli birleştirilerek sayısal olarak araştırılmıştır. Sonlu elemanlar modeli Şekil 2.13 ve Şekil 2.14’te görülen tekli ve ikili hibrit tüplerin modellenmesinde Bölüm 2.2.1 ve Bölüm 2.2.2’deki yaklaşımlar kullanılmıştır. Analizlerdeki ara aparat, kabuk elemanlar ve rijit malzeme modeli kullanılarak modellenmiştir.



Şekil 2.13. Tekli tüplerin sonlu elemanlar modeli



Şekil 2.14. İkili tüplerin sonlu elemanlar modeli

2.2.3.2. Alüminyum Köpük Malzemesinin Modellenmesi

Tekli ve ikili tüplerde enerji sönmüleme davranışını iyileştirmek için Şekil 2.15'te görüldüğü gibi tüplerin içlerine sırasıyla 500kg/m^3 (Köpük 1), 750kg/m^3 (Köpük 2) ve 1000kg/m^3 (Köpük 3) yoğunluğa sahip olacak şekilde metalik köpük dolgular eklenmiştir. Köpük malzemenin modellenmesi için büyük deformasyon durumlarına yakınsama

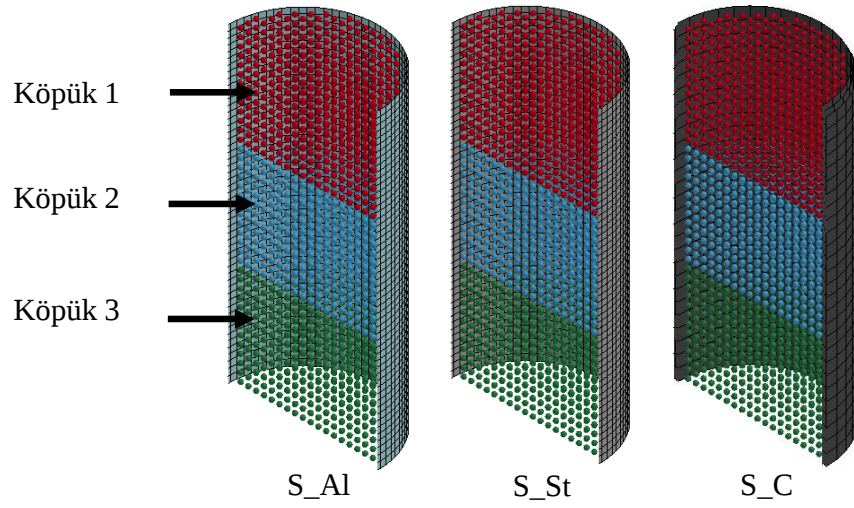
problemlerini engellemek amacıyla [153] DPH yöntemi ve “MAT_CRUSHABLE_FOAM” malzeme modeli kullanılmıştır. Köpük ile tüpler arasında “CONTACT_AUTOMATIC_NODES_TO_SURFACE” kartı aktif edilmiştir. Köpük malzemeler için önemli ve ayırt edici bir özellik olan plato gerilmesinin köpük yoğunluğuna bağlı değişimi Denklem 2.1’deki gibi karakterize edilebilmektedir[176–178].

$$\sigma_{pl}^{köpük} = C \left(\frac{\rho^{köpük}}{\rho_0} \right)^q \quad 2.1$$

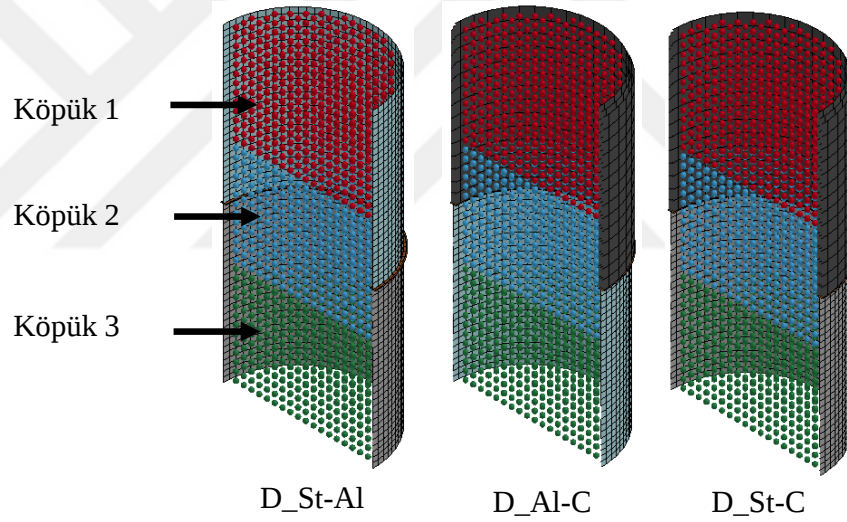
Burada σ_p plato gerilmesini, ρ_0 ana köpük malzemesinin yoğunluğunu, C ve q malzeme sabitlerini göstermektedir. Analizlerde kullanılan köpük malzemesinin sabitleri; yoğunluk 2700 kg/m^3 , $C=526 \text{ MPa}$, $q=2.17$ ve gerilme şekil değiştirme ilişkisi Tablo 2.4’teki gibi literatürden alınmıştır [173].

Tablo 2.4. Alüminyum köpük için plato gerilmesine göre gerilme- şekil değiştirme [179].

Gerilme	0	σ_p/E	0.6	0.7	0.75	0.8
Şekil değiştirme	0	σ_p	σ_p	$1.35\sigma_p$	$5\sigma_p$	$0.05E$



Tekli Tüpler
(a)



İkili Tüpler
(b)

Şekil 2.15. (a) tekli ve (b) ikili köpük dolgulu tüpler

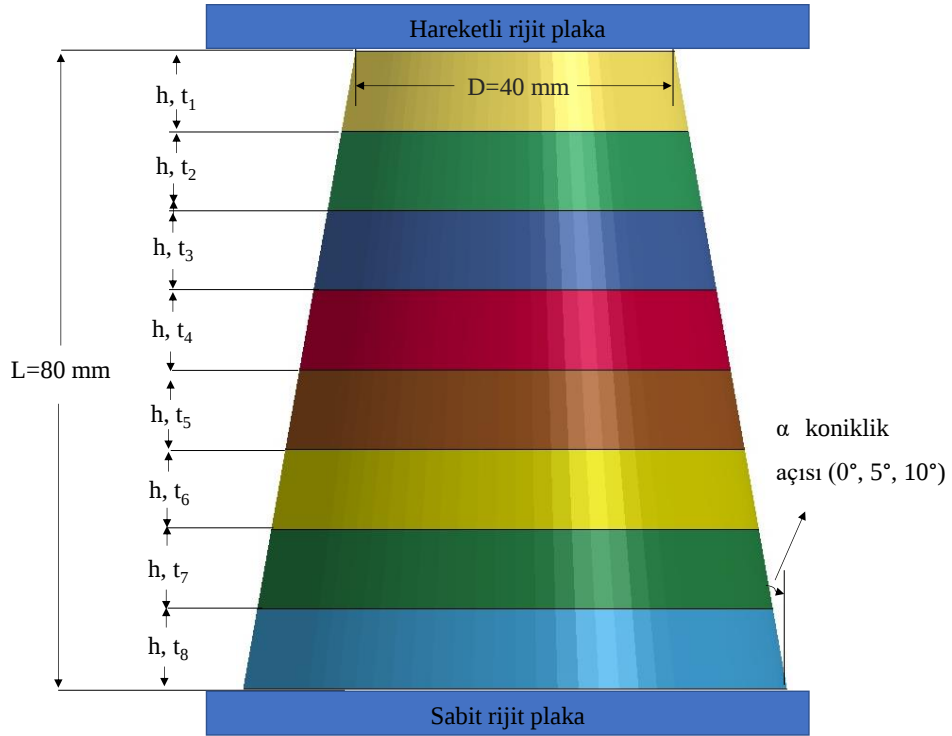
2.3. Optimizasyonlar Çalışmaları

Bu tezde üç farklı optimizasyon çalışması Ls-Opt yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İlk optimizasyon çalışmasında; eksenel doğrultuda sekiz farklı kalınlık bölgesine ayrılmış metalik tüplerin bölge kalınlık değişiminin enerji sönmleme davranışına etkisi incelenmiş ve en uygun bölge kalınlıkları ÇAO ile belirlenmiştir. İkinci çalışmada

kompozit tüplerde elyaf açılı diziliminin enerji sönümlenme performansına olan etkileri incelenmiş ve en uygun elyaf açılı dizilimi belirlenmiştir. Son olarak tekli ve ikili tüplerin farklı yoğunluklara sahip köpük dolgulu olduğu durumlarda enerji sönümlenme davranışı araştırılmıştır. ÇAO ile et kalınlıkları ve köpük yoğunlukları optimize edilmiştir.

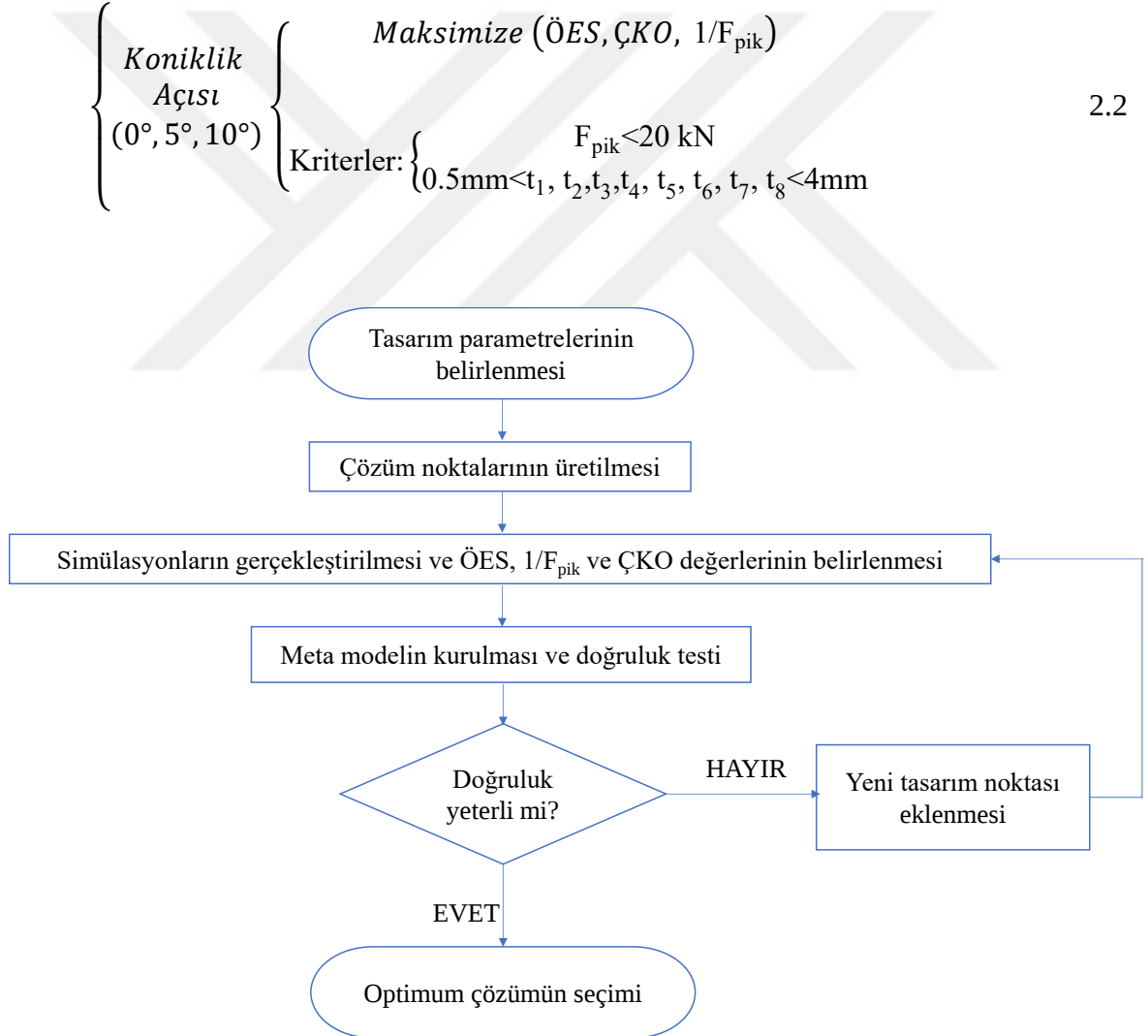
2.3.1. Metalik Tüplerin Optimizasyonu

Metalik tüplerin çarpışma performanslarını geliştirmek ve eksenel yönde farklı kalınlık bölgelerine sahip olması durumunda en uygun bölge kalınlıklarını belirlemek amacıyla Şekil 2.16’da görülen Değişken Kalınlıklı Tüp (DKT) için Genetik algoritma (GA) kullanılarak çok amaçlı optimizasyon (ÇAO) çalışmaları gerçekleştirilmiştir. DKT, 10 mm uzunluğa sahip sekiz bölgeye ayrılmıştır. 0° , 5° ve 10° konik açılı DKT’lerin her biri için boşluk doldurma şeması ile 68 örneklem noktası (ÖN) (Ek-1) belirlenmiş, her bir ÖN için sayısal analizler (204 adet) gerçekleştirilmiştir. DKT’lerde bölge kalınlıklarının farklılığı sebebiyle yırtılma ve yarıлма durumu söz konusu olabileceğinden sayısal analizler hasarlı ve hasarsız olarak yapılmış, hasarlı analizler için “ADD_EROSION” kartı aktif edilmiş ve karttaki etkin plastik şekil değiştirme (effective plastic strain) değeri 1 olarak girilmiştir.



Şekil 2.16. DKT’nin optimizasyon modeli

Çarpışma anında anlık yavaşlama sonucu ortaya çıkan ani yavaşlama ivmeleri, araç içindeki yolcularda iç kanama, yaralanma ve ölümlerin en büyük sebeplerinden biridir. Bu sebeple sayısal analizlerde maksimum kuvvetin sınırı ± 200 kN olarak seçilmişken [180,181] ilk pik kuvvet değeri ise ± 20 kN ile sınırlandırılmıştır. Bölge kalınlık değerleri 1.0- 4.0 mm arasında değişken alınmıştır. Maksimum ÖES, $1/F_{pik}$, ÇKO'yu elde etmek amacıyla Denklem 2.2'deki çoklu optimizasyon kısıtları için Şekil 2.17'de akış şeması verilen ÇAO analizi yapılmıştır. Optimizasyon işlemi sayısal analizlerin hasar kriterli olması ve olmaması durumları için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon işleminin doğruluğu için Bölüm 1.4.6 bahsedilen R^2 tahminci değerlerine bakılmıştır.



Şekil 2.17. Optimizasyon akış şeması

2.3.2. Kompozit Tüplerin Optimizasyonu

Altı elyaf katmanına sahip ve detayları Şekil 2.12’de verilen 0° , 5° ve 10° konik açılı kompozit tüpler için en uygun elyaf açısı dizilimini belirlemek amacıyla ÇAO çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Farklı konik açıları için boşluk doldurma şeması kullanılarak elyaf açısı değerleri için 43 ÖN (Ek-5) belirlenmiştir. Belirlenen ÖN’lerde en yüksek SE ve ÇKO’yu en düşük pik kuvvet değerleri ile aynı anda sağlayan elyaf açısı dizilimi GA ile belirlenmeye çalışılmıştır. ÇAO için amaç ve kısıtlar Denklem 2.3’te görülmektedir.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Koniklik} \\ \text{Açısı} \\ (0^\circ, 5^\circ, 10^\circ) \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \text{Maksimize } (SE, \text{ÇKO}, 1/F_{\text{pik}}) \\ \text{Kriter } \{-90 < \alpha_{in1}, \alpha_{in2}, \alpha_{mid1}, \alpha_{mid2}, \alpha_{out1}, \alpha_{out2} < 90\} \end{array} \right. \quad 2.3$$

Burada α_{in1} ve α_{in2} 1. tüpteki (iç), α_{mid1} ve α_{mid2} 2. tüpteki (orta), α_{out1} ve α_{out2} 3.tüpteki (dış) elyaf katman açılarını göstermektedir. Elyaf açıları değerleri -90° ile $+90^\circ$ arasında 10° aralıklı olacak şekilde seçilmiştir. Optimizasyon işleminin doğruluğu için Bölüm 1.4.6’daki gibi R^2 tahminci değerlerine bakılmıştır.

2.3.3. Hibrit Tüplerin Optimizasyonu

Köpük dolgulu tekli ve ikili tüplerin enerji sönmüleme davranışlarını daha iyi anlamak ve geliştirmek amacıyla ÇAO analizleri gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon işleminde tekli ve ikili tüplerde et kalınlıkları (t_A , t_S) 1.0 – 4.0 mm, köpük yoğunlukları (f_{d1} , f_{d2} , f_{d3}) ise 500-1500 kg/m³ arasında değişken seçilmiş ve boşluk doldurma şeması ile elde edilen ÖN’ler (Ek-6, Ek-7, Ek-8, Ek-9, Ek-10, Ek-11) için sayısal analizler gerçekleştirilmiştir.

Optimizasyon işleminde, Denklem 2.4’teki gibi 150 kN maksimum kuvveti aşmayacak şekilde en yüksek ÖES, ÇKO ve $1/F_{\text{pik}}$ değerlerini verecek et kalınlıkları ve köpük yoğunluklarının elde edilmesi hedeflenmiştir. Çok katmanlı kabuk eleman yaklaşımındaki kısıtlamalar dolayısı ile kompozit tüplerin kalınlıkları optimizasyon işlemine dahil edilmemiştir.

$$\left\{ \begin{array}{l} S_A \\ S_{St} \\ S_C \\ D_{Al-St} \\ D_{Al-C} \\ D_{St-C} \end{array} \right. \left(\begin{array}{l} (t_a, f_{d1}, f_{d2}, f_{d3}) \\ (t_s, f_{d1}, f_{d2}, f_{d3}) \\ (f_{d1}, f_{d2}, f_{d3}) \\ (t_s, t_a, f_{d1}, f_{d2}, f_{d3}) \\ (t_a, f_{d1}, f_{d2}, f_{d3}) \\ (t_s, f_{d1}, f_{d2}, f_{d3}) \end{array} \right) \left\{ \begin{array}{l} \text{Maksimize } (\ddot{O}ES, \text{ÇKO}, 1/F_{\text{pik}}) \\ \text{Kriterler} \left\{ \begin{array}{l} 1500 \geq f_{d1}, f_{d2}, f_{d3} \geq 500 \\ 4 \geq t_a, t_s \geq 1 \\ (F_{\text{mak}} < 150 \text{ kN}) \end{array} \right. \end{array} \right. \quad 2.4$$

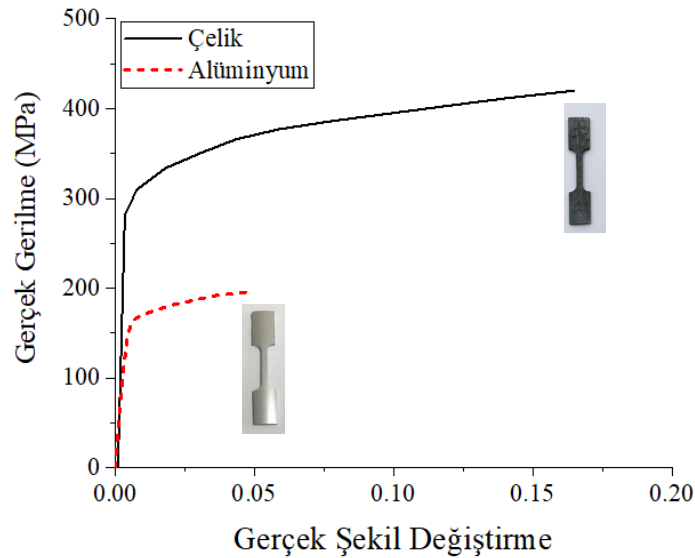
burada f_{d1} , f_{d2} , f_{d3} , sırasıyla birinci, ikinci ve üçüncü köpük yoğunluklarını; t_a alüminyum parça kalınlığını; t_s çelik parça kalınlığını göstermektedir. Optimizasyon işleminin doğruluğu için Bölüm 1.4.6’da bahsedilen R^2 tahminci değerlerine bakılmıştır.

3. BULGULAR VE İRDELEME

Bu kısımda ilk olarak Al6063, St52 ve kompozit malzemelerden üretilmiş tüplerin mekanik özelliklerini belirlemek için yapılan deneylerin sonuçları verilmiştir. İkinci olarak, tekli ve ikili hibrit tüplere statik şartlarda gerçekleştirilen deneylerin sayısal analizler ile karşılaştırılması verilmiştir. Üçüncü olarak, tekli ve ikili hibrit tüplere dinamik şartlarda gerçekleştirilen deneylerinin sonuçları verilmiştir. Dördüncü olarak değişken kalınlıklı metalik tüpler için gerçekleştirilen sayısal analiz ve optimizasyon çalışmalarının sonuçları verilmiştir. Beşinci olarak kompozit tüpler için gerçekleştirilen sayısal analiz ve optimizasyon çalışmalarının sonuçları verilmiştir. Son olarak köpük dolgulu tekli ve ikili hibrit tüplerin sayısal analizleri ve optimizasyon çalışmalarının sonuçları verilmiştir.

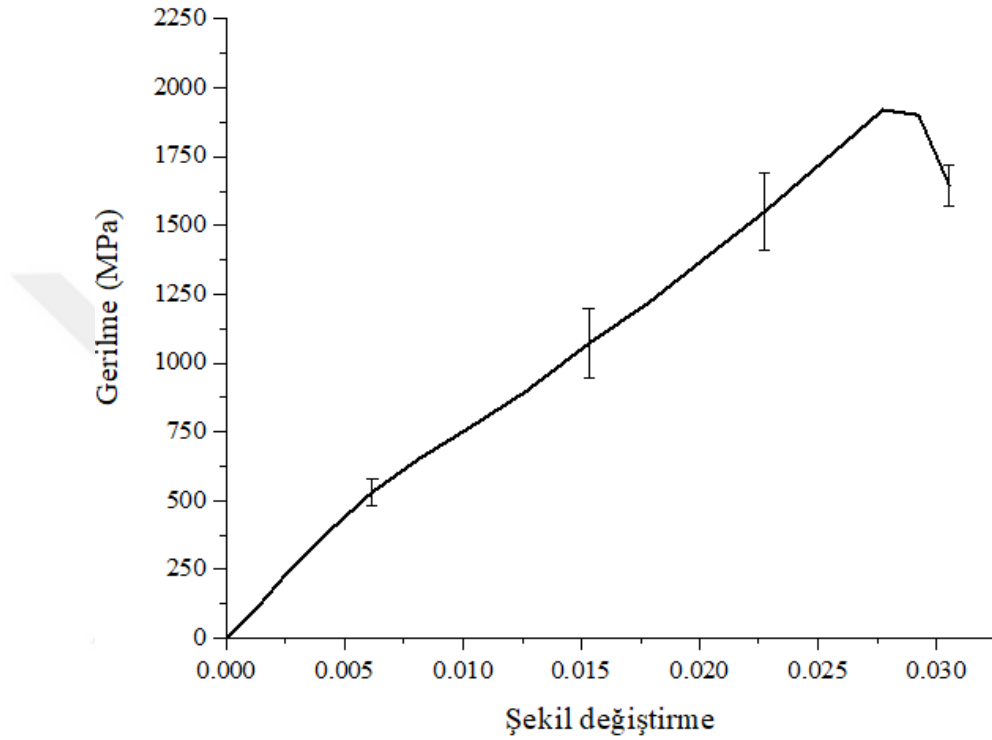
3.1. Malzemelerin Mekanik Özellikleri

Şekil 3.1’de, Al6063 ve St52 malzemelerinden yapılmış tüplerin üzerinden alınmış örnek numunelere uygulanan çekme deneyi sonuçları verilmiştir. Deney sonucu elde edilen grafiklerin literatürle uyumlu olduğu görülmüştür [182,183].



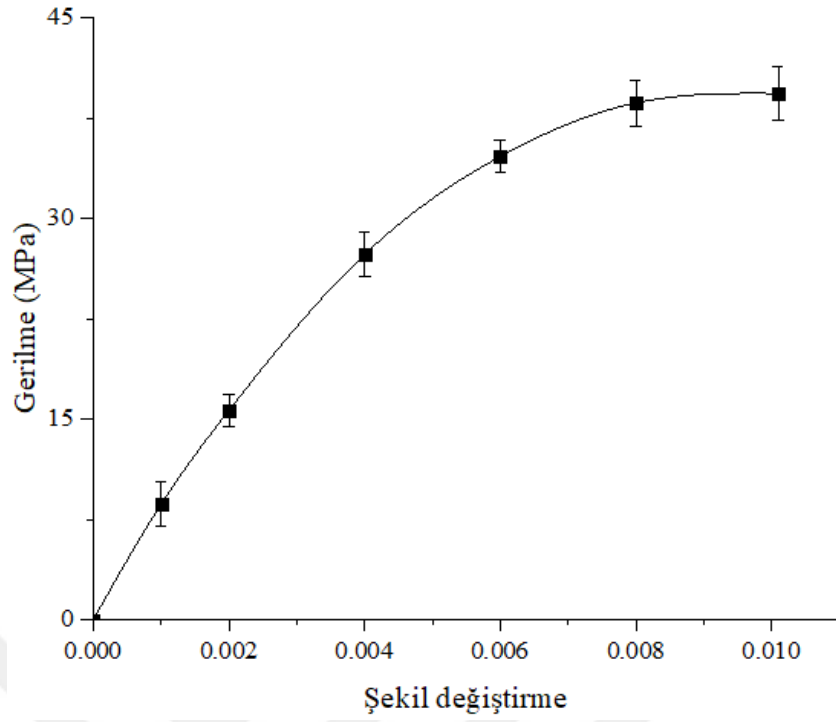
Şekil 3.1. Metalik malzemelerin gerçek gerilme-gerçek birim şekil değişirme grafiği

Vakum torbalama yöntemi ile üretilen kompozit plakaların mekanik özelliklerini belirlemek için ASTM D3039, ASTM D3410 ve ASTM D3518 standartlarına göre test numunelerine çekme, basma ve düzlem içi kesme deneyleri uygulanmıştır. Gerçekleştirilen deneyler ile kompozit malzemelerin mekanik özellikleri belirlenmiştir.

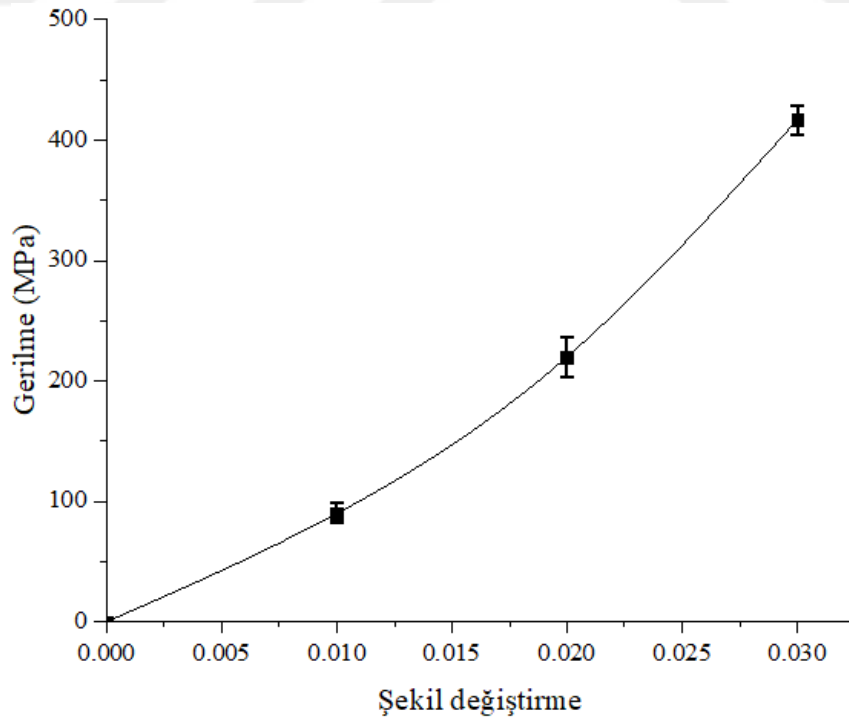


Şekil 3.2. Kompozit numunelere fiber yönünde uygulanan çekme deneyi sonuçları

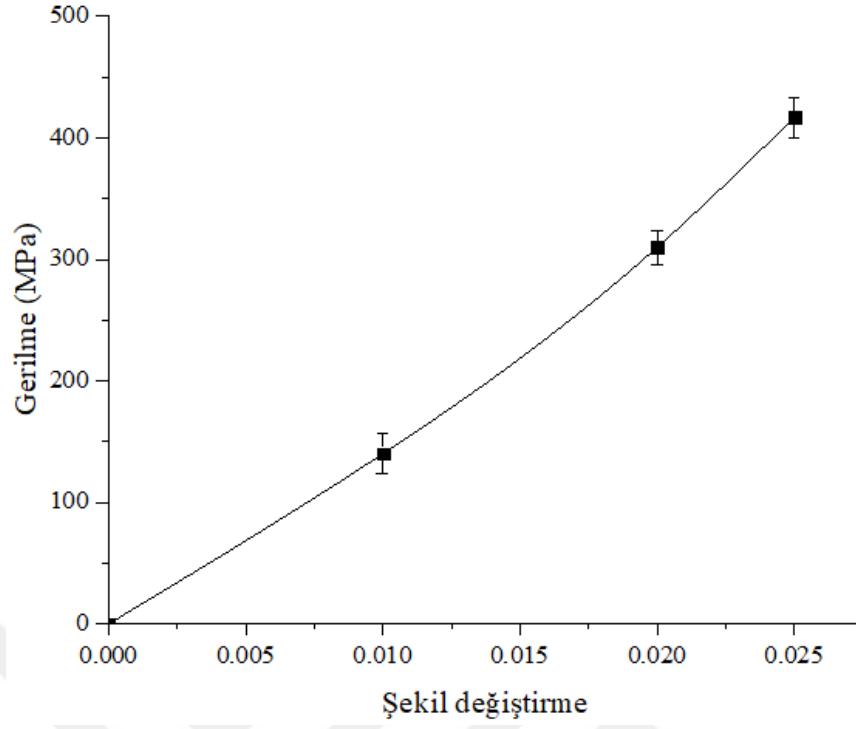
Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te tek yönlü karbon kumaştan üretilmiş plakalardan fiber ve fibere dik yönde kesilen numunelere gerçekleştirilen çekme deneylerinden elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri hata çizgileri ile verilmiştir. Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'te ise tek yönlü karbon kumaştan üretilmiş plakalardan fiber ve fibere dik yönde kesilen numunelere ASTM D3410 standardına göre gerçekleştirilmiş basma deneylerinden elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri hata çizgileri ile görülmektedir.



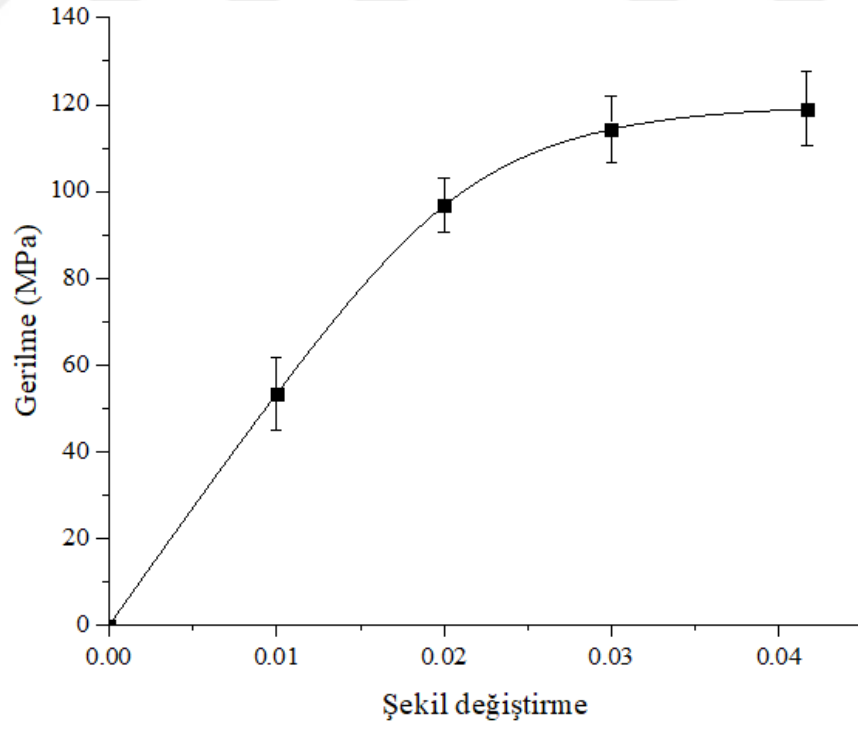
Şekil 3.3. Kompozit numunelere fibere dik yönde uygulanan çekme deneyi sonuçları



Şekil 3.4. Karbon kompozit numunelere fiber yönünde uygulanan basma deneyi sonuçları



Şekil 3.5. Karbon kompozit numunelere fibere dik yönde uygulanan basma deneyi sonuçları



Şekil 3.6. Karbon kompozit numunelere uygulanan düzlem içi kesme deneyi sonuçları

[0/90]₄ dizilimli olarak tek yönlü karbon kumaştan üretilmiş plakadan 45° açılı olarak kesilmiş numunelerin düzlem içi kesme deneyleri sonucunda elde edilen gerilme- şekil değiştirme eğrileri hata çizgileri ile Şekil 3.6’da verilmiştir.

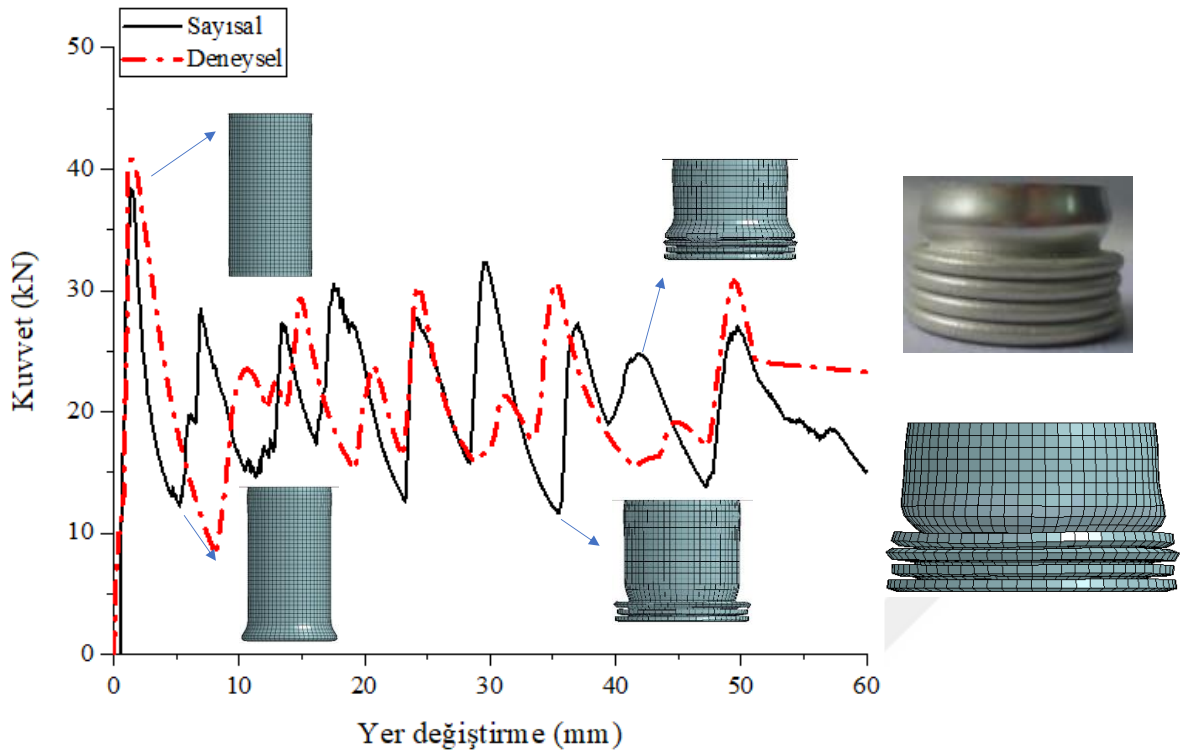
Tablo 2.5’de kompozit malzemelere gerçekleştirilen deneyler sonucu elde edilen mekanik özellikler ve standart sapma değerleri görülmektedir.

Tablo 2.5. Kompozit malzemeler için deneysel belirlenen mekanik özellikler

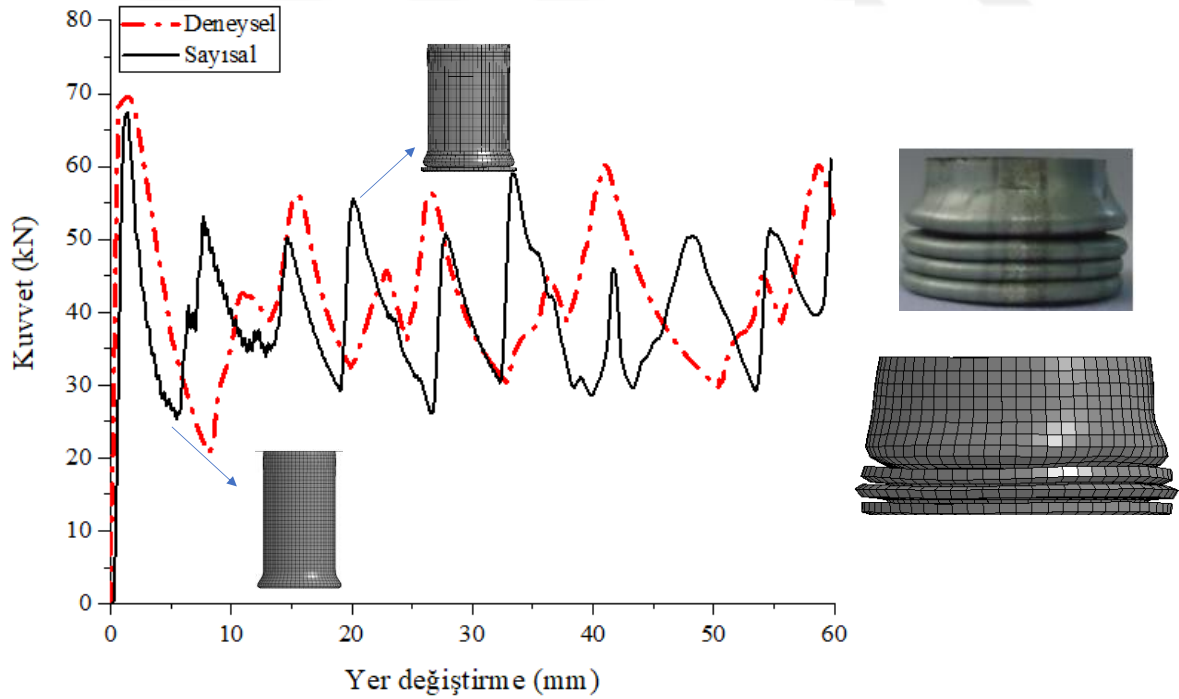
Sembol	Açıklama	Değer	Birim	Standart Sapma
E ₁	Fiber doğrultusunda elastisite modülü	117.4	GPa	13
E ₂	Fibere dik doğrultuda elastisite modülü	7.8	GPa	0.26
ν_{21}	Poisson oranı ba	0.021		0.0012
G ₁₂	Kayma modülü ab.	3.76	GPa	0.23
X _C	Fiber doğrultusunda basma gerilmesi	400	MPa	17.55
X _T	Fiber doğrultusunda çekme gerilmesi	1.917	GPa	58.84
Y _C	Fibere dik doğrultuda basma gerilmesi	430	MPa	11.6
Y _T	Fibere dik doğrultuda çekme gerilmesi	39	MPa	2.47
S _C	Kayma gerilmesi	110	MPa	7.5

3.2. Tüplerin Statik Deney Sonuçları ve Sayısal Karşılaştırılması

Tüpler için oluşturulan sonlu elemanlar modellerinin doğruluğu; Al6063, St52 ve kompozit malzemelerden yapılmış 80 mm uzunluğa, 1.5 mm et kalınlığına sahip tekli ve ikili düz tüplerin deneysel ve sayısal sonuçlarının karşılaştırılmasıyla sağlanmıştır. Karşılaştırmalarda deneysel ve sayısal kuvvet- yer değiştirme grafikleri ve deformasyon şekilleri kullanılmıştır. Şekil 3.7’de, Al6063 alüminyum alaşımı için deney ve sayısal analiz sonuçları verilmiştir. Şekil 3.7den görülebileceği gibi sayısal analiz sonuçları ile deney sonuçları birbiriyle uyumludur. Kuvvet-yer değiştirme grafiğinden kuvvet değerinin ilk katlanma başlayana kadar artarak maksimum bir değere ulaştığı (pik kuvvet), sonra ikinci katlanma gerçekleşene kadar azaldığı görülmüştür. Bu davranış diğer katlanma durumlarında da benzer şekilde gerçekleşmiştir. S_Al tüp için pik kuvvet değeri; sayısal analizde 38.35 kN olarak belirlenmişken deneyde 40.77 kN olarak belirlenmiştir.

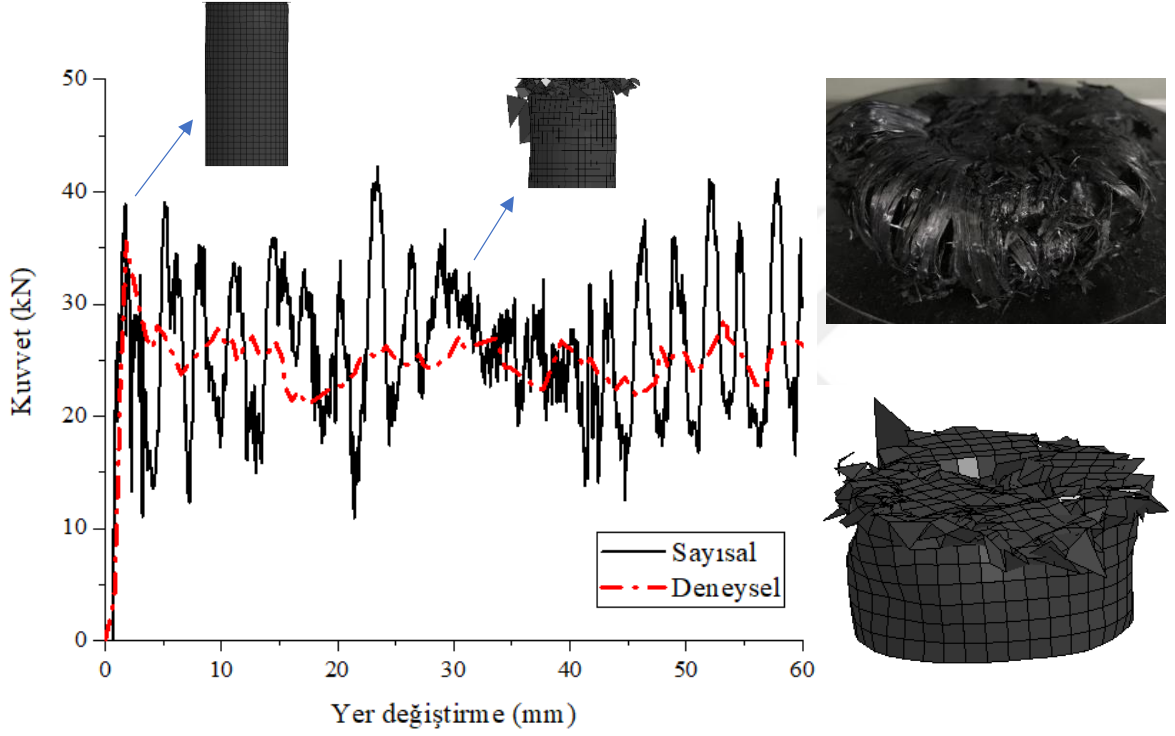


şekil 3.7. S_Al tp için deneyisel ve sayısal kuvvet-yer değiştirme eğrileri ve deformasyon şekilleri



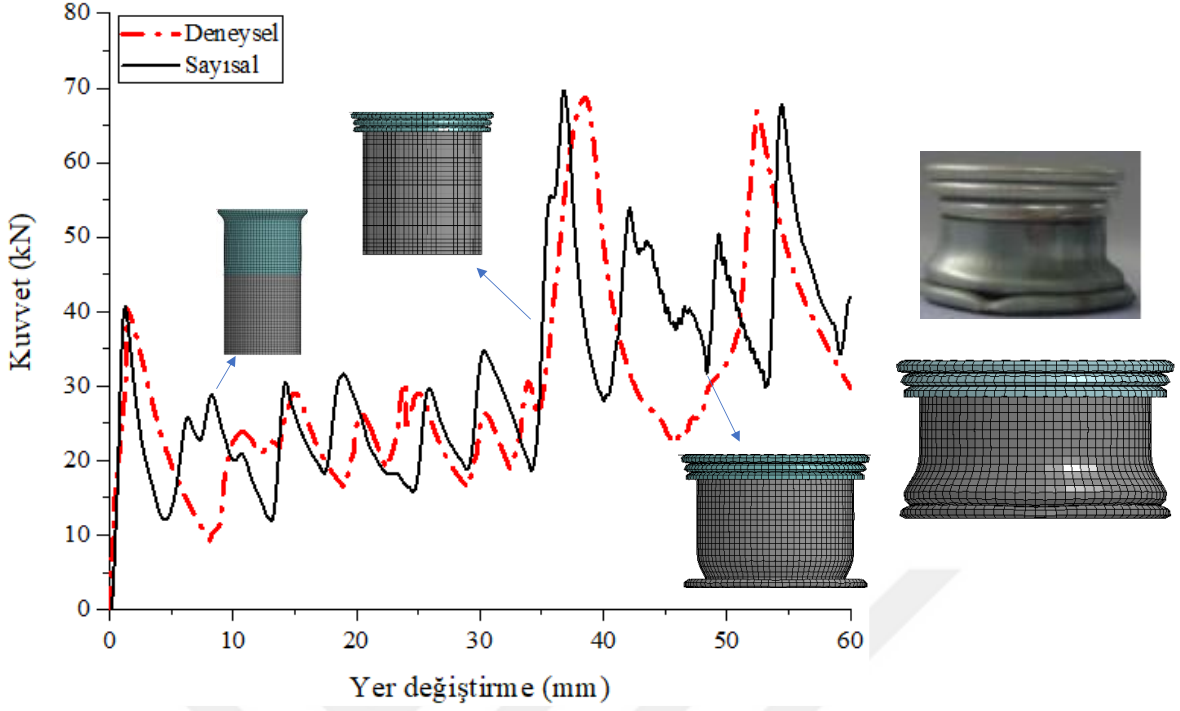
şekil 3.8. S_St tp için deneyisel ve sayısal kuvvet- yer değiştirme eğrileri ve deformasyon şekilleri

Şekil 3.8'te S_St tüp için deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması deformasyon şekilleri ve kuvvet-yer değiştirme grafikleri verilmiştir. S_St tüp için sayısal olarak pik kuvvet değeri 67.84 kN olurken deney sonucunda pik kuvvet değeri 69.42 kN olmuştur. S_Al ve S_St tüpler için sayısal ve deneysel deformasyon şekilleri birbiriyle uyumlu olup, deformasyonlar aksenal simetrik modda gerçekleşmiştir.



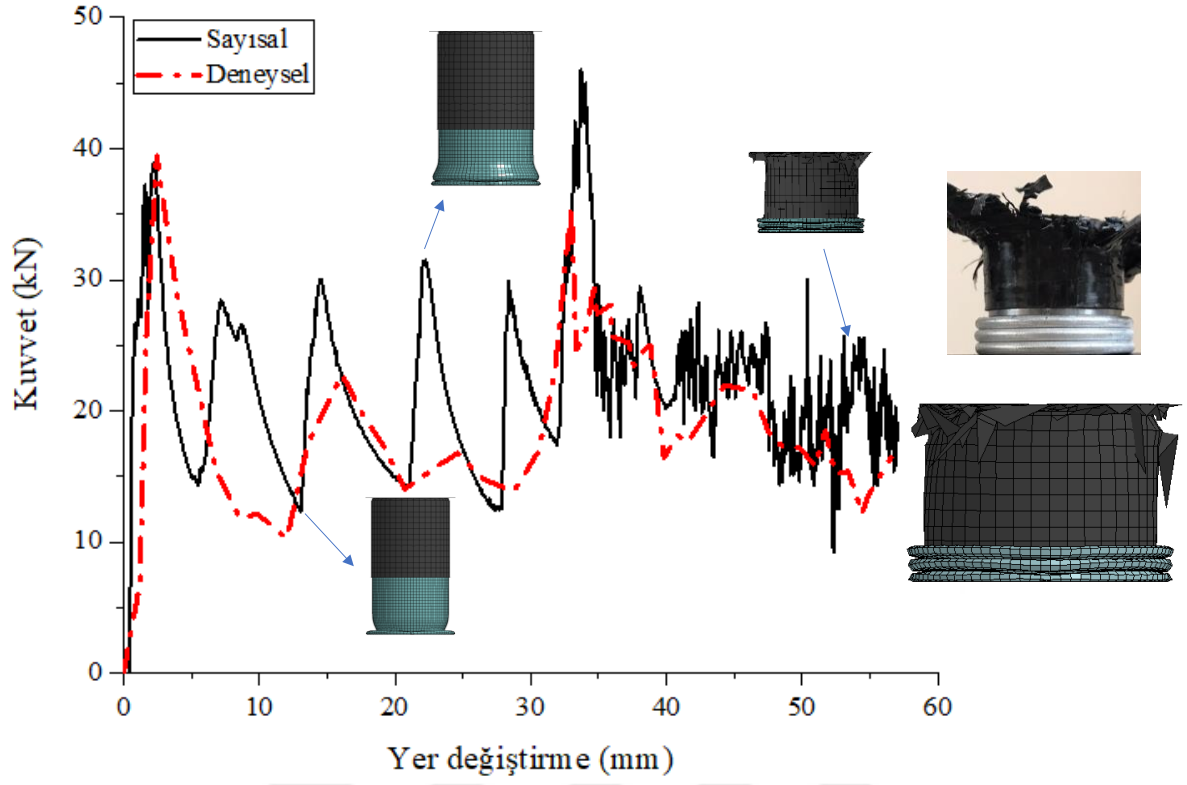
Şekil 3.9. S_C tüp için deneysel ve sayısal kuvvet- yer değiştirme eğrileri ve deformasyon şekilleri

Şekil 3.9'te S_C tüp için sayısal analiz ve deneyden elde edilen sonuçlar verilmiştir. S_C tüpte ilerleyici hasar görülmüştür. Hasar, ilk olarak aksenal doğrultuda tetiklenen bölgeden yerel lamina eğilmeleri ile başlamış, sonrasında aksenal doğrultuda çatlak oluşumu ve delaminasyon ile deformasyon mesafesince devam etmiştir. S_C tüp için sayısal analiz ve deney için ilk pik kuvvet değerleri sırasıyla 39.05 kN ve 36.82 kN olarak gerçekleşmiştir.

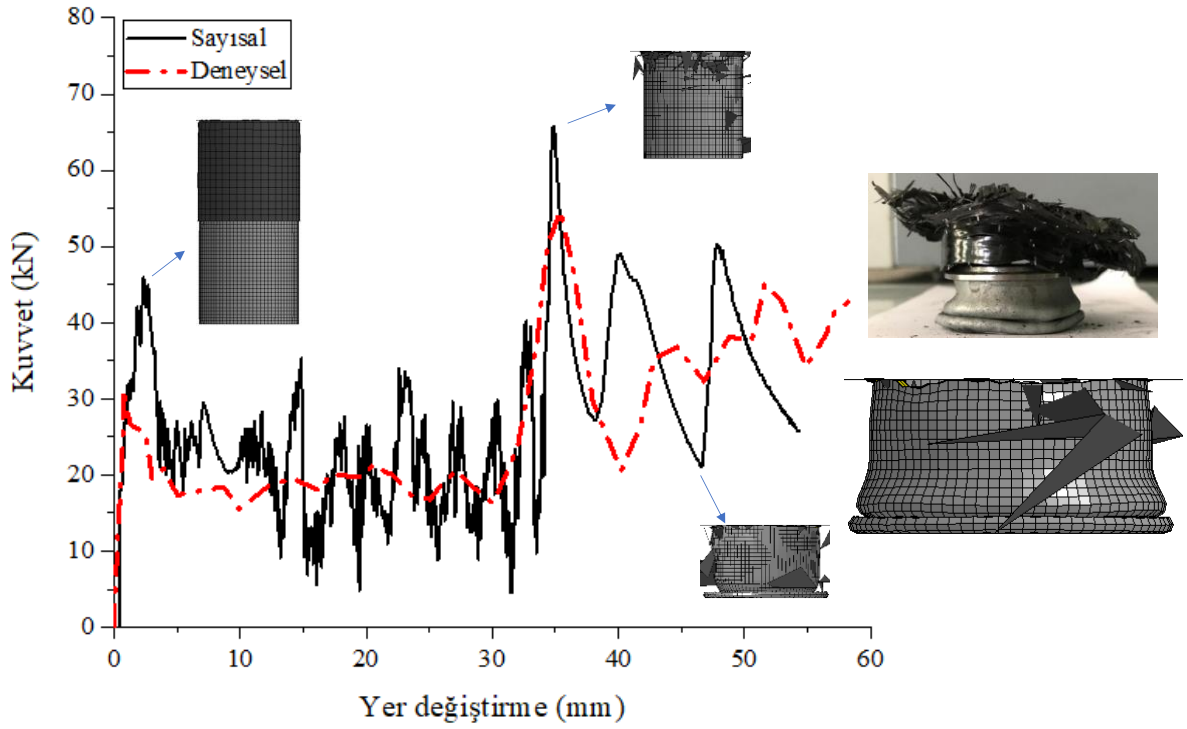


şekil 3.10. D_St-Al tp deneysel ve sayısal kuvvet- yer değiştirme eğrileri ve deformasyon şekilleri

şekil 3.10, şekil 3.11 ve şekil 3.12’de sırasıyla D_St-Al, D_Al-C ve D_St-C tüpte sayısal analiz ve deneyden elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri ve deformasyon şekilleri görülmektedir. İekli tüplerde ilk deformasyon mukavemeti düşük olan tüpte başlayıp maksimum deformasyon mesafesine ulaşılmasının ardından mukavemeti yüksek olan tp deformasyona uğramıştır. Mukavemeti yüksek olan tüpün deformasyonuna geçilmesi sebebiyle ikili tüplerin kuvvet- yer değiştirme grafiklerinin 30-40 mm deformasyon mesafesinde kuvvet değerlerinde bir artış meydana gelmiştir. D_St-Al tüpte, deformasyon ilk olarak alüminyum tüpte başlamış sayısal analiz ve deney için ilk pik kuvvet değerleri sırasıyla 40.17 kN ve 40.33 kN olarak gerçekleşmiştir. D_St-Al tüpte, alüminyum tüpün maksimum deformasyon mesafesine ulaşılması sonucu elik tüpün deformasyonu başlamıştır. elik tüp için sayısal ve deneysel pik kuvvet değerleri sırasıyla 70.25 ve 68.66 kN olmuştur. D_St-Al tüpte, alüminyum ve elik tüp eksenel simetrik modda deformasyona uğramıştır.



Şekil 3.11. D_Al-C tüp deneysel ve sayısal kuvvet- yer değiştirme eğrileri ve deformasyon şekilleri



Şekil 3.12. D_St-C tüp deneysel ve sayısal kuvvet- yer değiştirme eğrileri ve deformasyon şekilleri

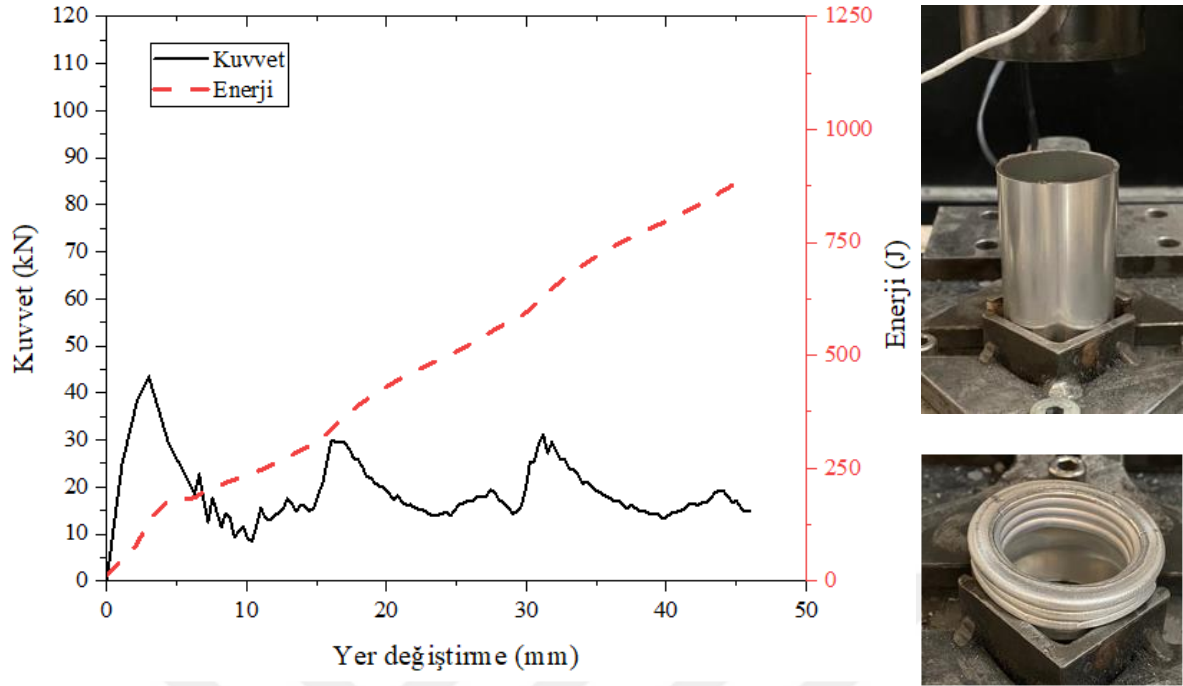
D_Al-C tüpte ilk olarak alüminyum tüp deformasyona başlarken D_St-C tüpte ilk deformasyon kompozit tüpte başlamıştır. D_Al-C tüpte ilk pik kuvvet değerleri sayısal analiz ve deney için sırasıyla 38.95 kN ve 39.12 kN olurken ikinci pik kuvvet değerleri ise 46.29 kN ve 36.78 kN olarak gerçekleşmiştir. D_St-C ilk pik kuvvet değerleri sayısal analiz ve deney için 45.63 kN ve 30.46 kN olurken ikinci pik kuvvet değerleri 66.19 kN ve 55.08 kN olarak gerçekleşmiştir. İkili hibrit tüplerde kompozit tüpler ilerleyici hasara uğrarken metalik tüpler eksenel simetrik modda deforme olmuştur.

3.3. Tüplerin Dinamik Deney Sonuçları

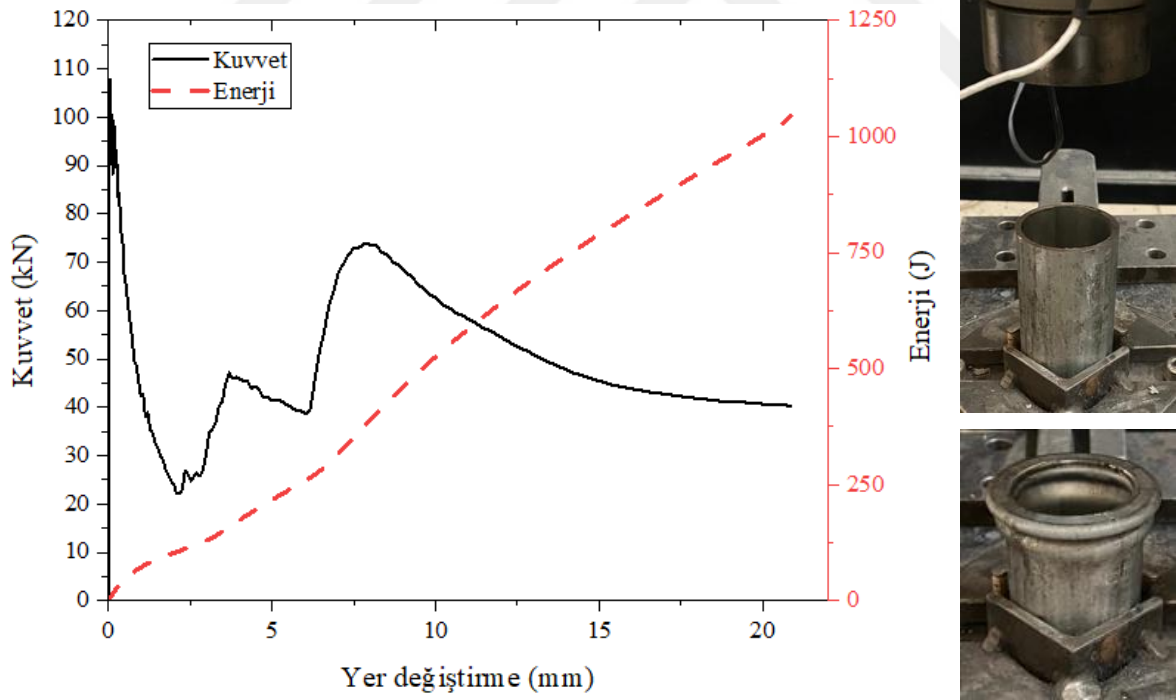
Serbest ağırlık düşürme deneyleri, 50 kg serbest kütleli vurucu plakanın 2.15 m yükseklikten bırakılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Bu şartlar altında çarpışma enerjisi ve çarpma hızı sırasıyla 1.06 kJ ve 6.5 m/s olmaktadır. Şekil 3.13’de S_Al tüp için kuvvet- yer değiştirme, enerji- yer değiştirme grafikleri ve deformasyon şekilleri görülmektedir. S_Al tüp eksenel simetrik modda deforme olurken ilk katlanmada 43.45 kN pik kuvvet değerinde gerçekleşmiştir. 46 mm deformasyon mesafesinde üç katlanma oluşmuş ve toplam enerji sönmülenmeden çarpışma mesafesinin sonuna gelinmiştir. Statik ve dinamik deneylerde alüminyum tüpteki pik kuvvet değerleri sırasıyla 40.77 kN ve 43.45 kN olarak elde edilmiştir. Literatürle uyumlu olarak alüminyumun şekil değiştirme hız duyarlılığı düşük olduğundan pik kuvvet değerlerinde büyük farklılık görülmemiştir [184]. S_Al tüpte 46 mm deformasyon mesafesinde 0.84 kJ enerji sönmülenmiştir.

S_St tüp için deformasyon şekli, kuvvet- yer değiştirme ve enerji- yer değiştirme eğrileri Şekil 3.14’te görülmektedir. S_St tüpte ilk katlanma 103.53 kN değerinde başlamış ve ikinci katlanma tamamlanmadan 21 mm çarpışma mesafesinde sistem enerjisinin tamamı sönmülenmiştir. Statik ve dinamik deneylerde çelik tüpteki pik kuvvet değerleri sırasıyla 69.42 kN ve 103.53 kN olarak elde edilmiştir. Çelik tüpte (S_St) şekil değiştirme hızına bağlı olarak pik kuvvet değeri literatürle uyumlu olarak önemli derecede artmıştır [185].

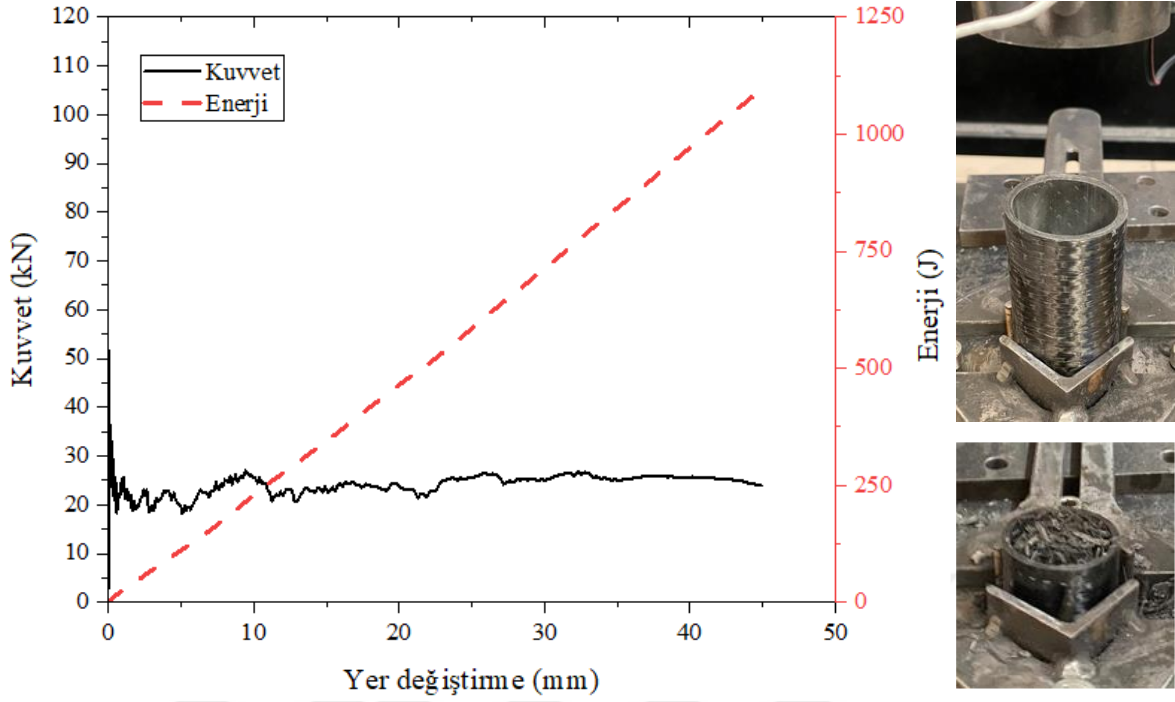
Şekil 3.15’de S_C tüp için deformasyon şekli, kuvvet- yer değiştirme ve enerji- yer değiştirme eğrileri görülmektedir. S_C tüpte pik kuvvet 51.65 kN olmuş ve kompozit tüp deformasyon mesafesinin sonuna kadar ilerleyici hasara uğramıştır. İlerleyici hasarda kuvvet değeri 20-25 kN arasında yatay bir seyir izlemiştir. S_C tüp 44 mm deformasyon mesafesinde sistemin enerjisinin tamamını sönmülemiştir.



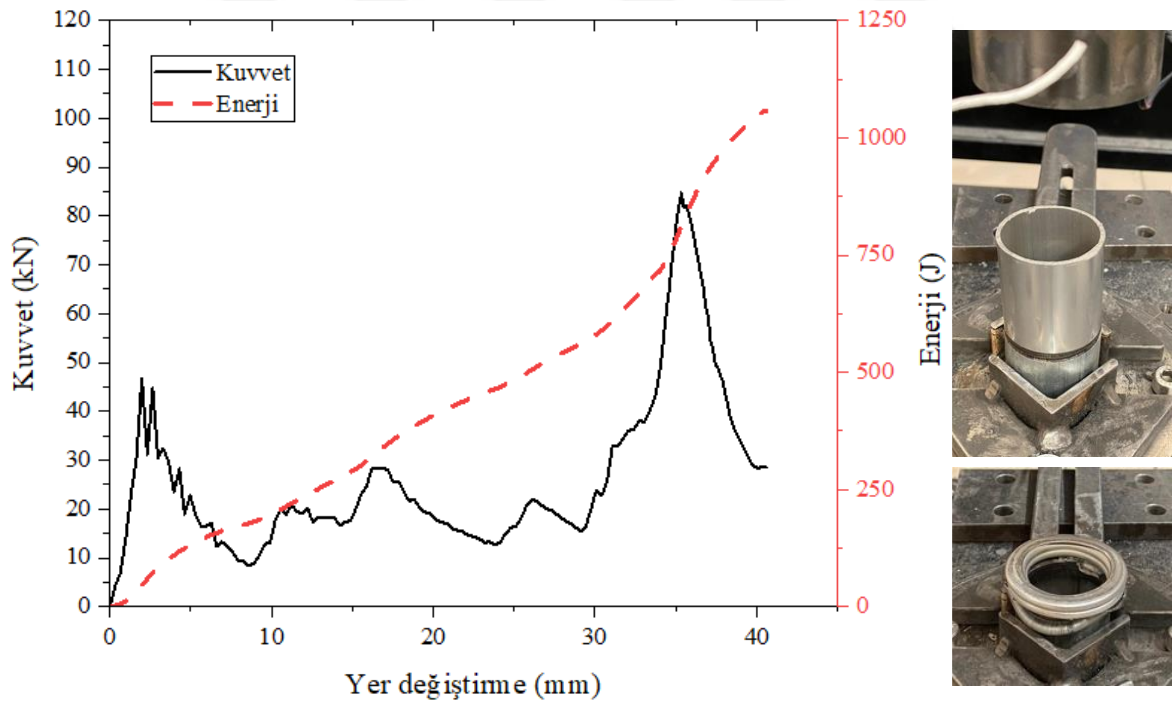
şekil 3.13. S_Al tp için yer değiştirmeye göre kuvvet ve enerji değişimleri



şekil 3.14. S_St tp için yer değiştirmeye göre kuvvet ve enerji değişimleri

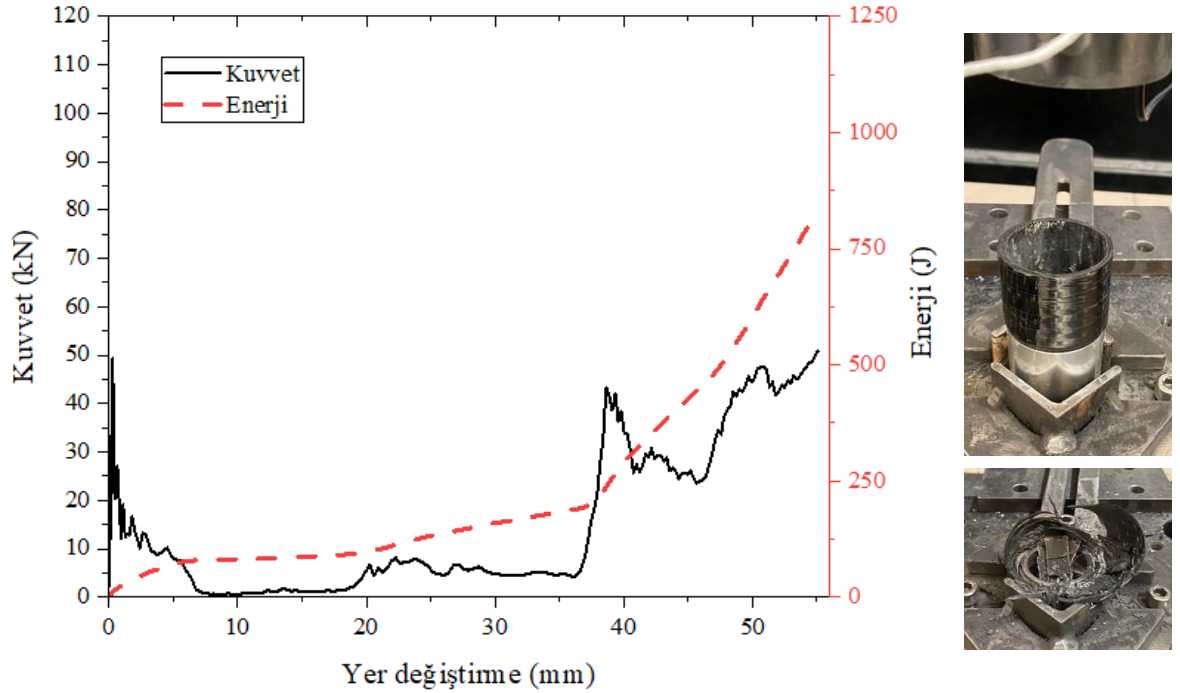


şekil 3.15. S_C tp için yer değiştirmeye göre kuvvet ve enerji değişimleri

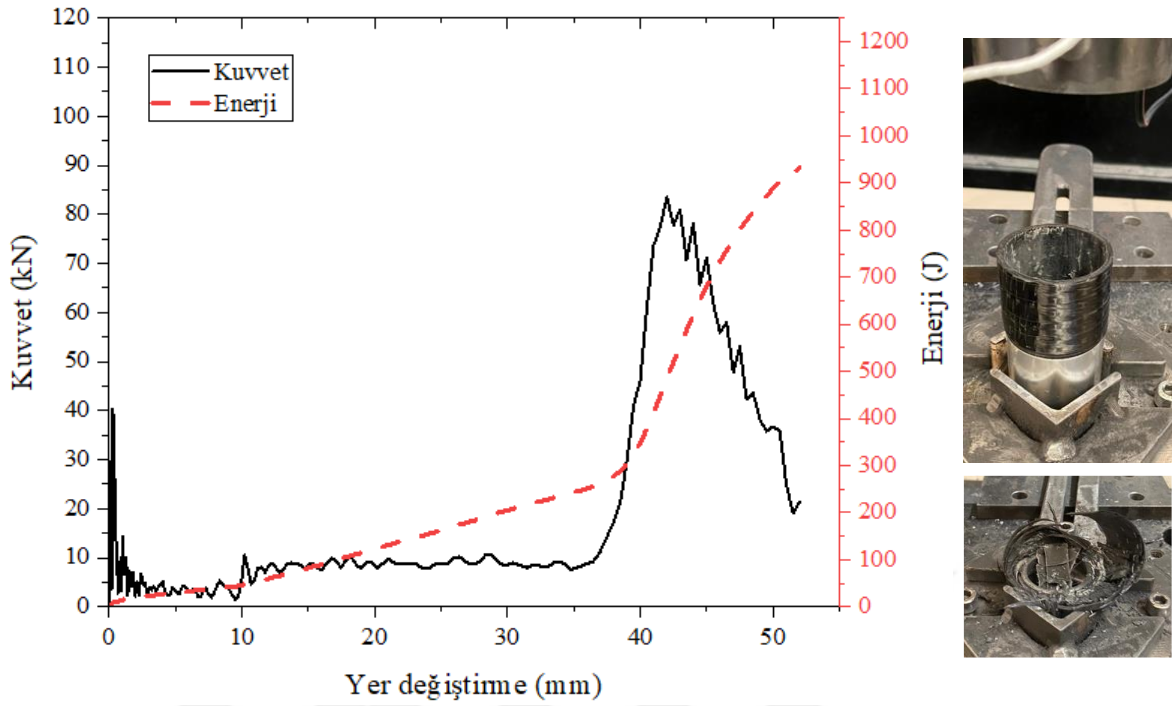


şekil 3.16. D_St-Al tp için yer değiştirmeye göre kuvvet ve enerji değişimleri

Şekil 3.16’de D_St-Al tüp için kuvvet-yer değiştirme, enerji-yer değiştirme eğrileri ve deformasyon şekilleri görülmektedir. D_St-Al tüpte ilk deformasyon; alüminyum tüpte başlamış ve pik kuvvet değeri 44.81 kN olarak alüminyum tüpün iki katlanması ile tamamlanmıştır. Alüminyum tüpün iki katlanmasından sonra ikinci olarak çelik tüpte deformasyon başlamış ve pik kuvvet değeri 84.68 kN olarak gerçekleşmiştir. D_St-Al tüpün pik kuvvet değeri, S_St tüpün dinamik şartlarda elde edilen pik kuvvet değerinden düşük çıkmıştır. Bunun nedenlerinden biri ara aparatın çelik tüpün içine geçerek çeliğin karışık modda deformasyona uğramasıdır. D_St-Al tüp 41 mm deformasyon mesafesinde sistemin toplam enerjisini sönmülmüştür. Şekil 3.17 ve Şekil 3.18’de D_Al-C ve D_St-C tüpler için kuvvet- yer değiştirme, enerji- yer değiştirme eğrileri ve deformasyon şekilleri görülmektedir. D_Al-C tüpte ilk deformasyon, statik deneyden farklı olarak, alüminyum tüpte başlamışken D_St-C tüpte ilk deformasyon kompozit tüpte başlamıştır. D_Al-C ve D_St-C tüpte kompozit tüpün yarılmaması ile pik kuvvet (49.43 kN ve 40.38 kN) değeri sonrası ikinci tüpün deformasyon mesafesine kadar ortalama kuvvet değeri (5-10 kN arası) düşük seyretmiştir. İkinci tüpün deformasyona başlaması ile kuvvet değerleri D_Al-C tüp için 43.3 kN, D_St-C tüp için ise 83.55 kN olarak gerçekleşmiştir. D_Al-C ve D_St-C tüpler için dinamik deneylerde SE değerleri sırasıyla 0.82 kJ ve 0.93 kJ olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 3.17. D_Al-C tüp yer değiştirmeye göre kuvvet ve enerji değişimleri

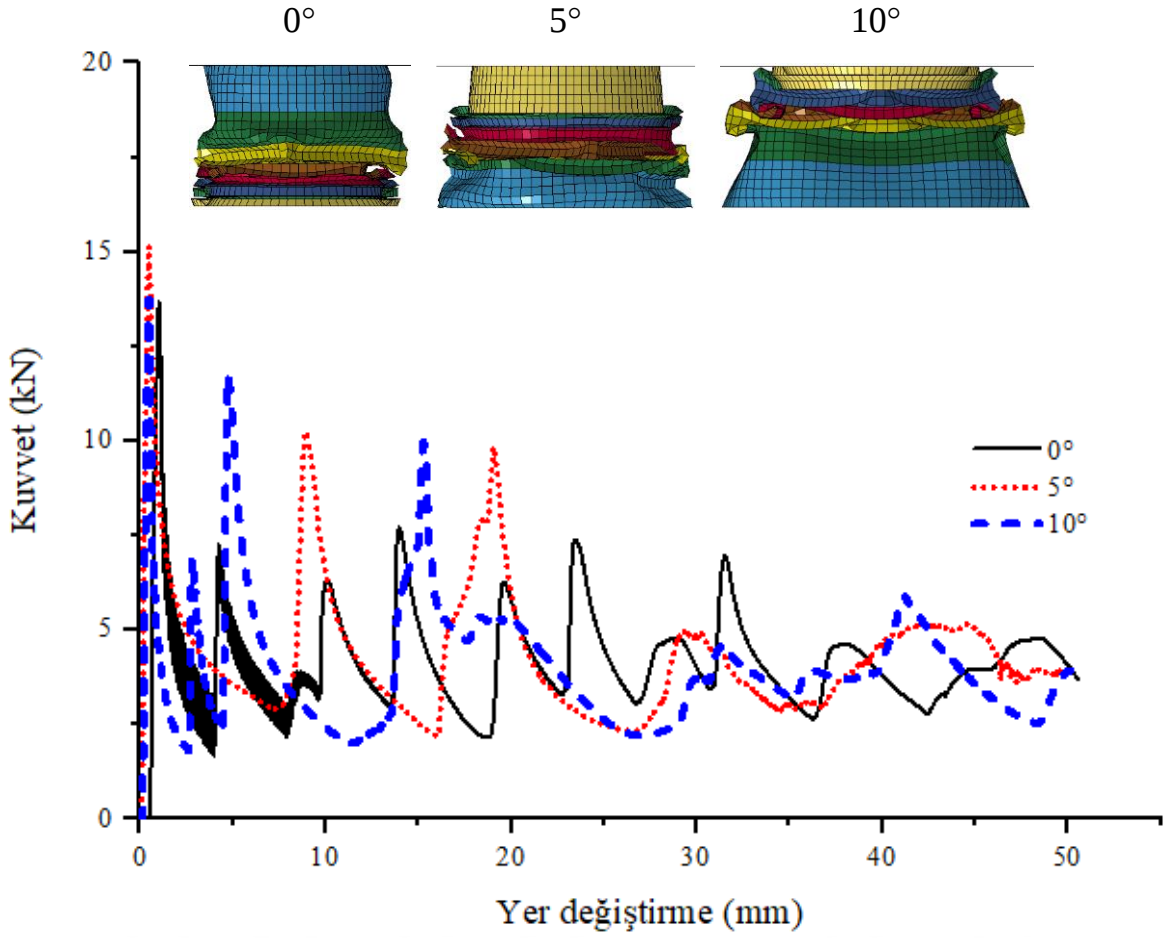


şekil 3.18. D_St-C tp için yer değiştirmeye göre kuvvet ve enerji değişimleri

3.4. Metalik Tüpler zerine Gerçekleştirilen alışmalardan Elde Edilen Bulgular

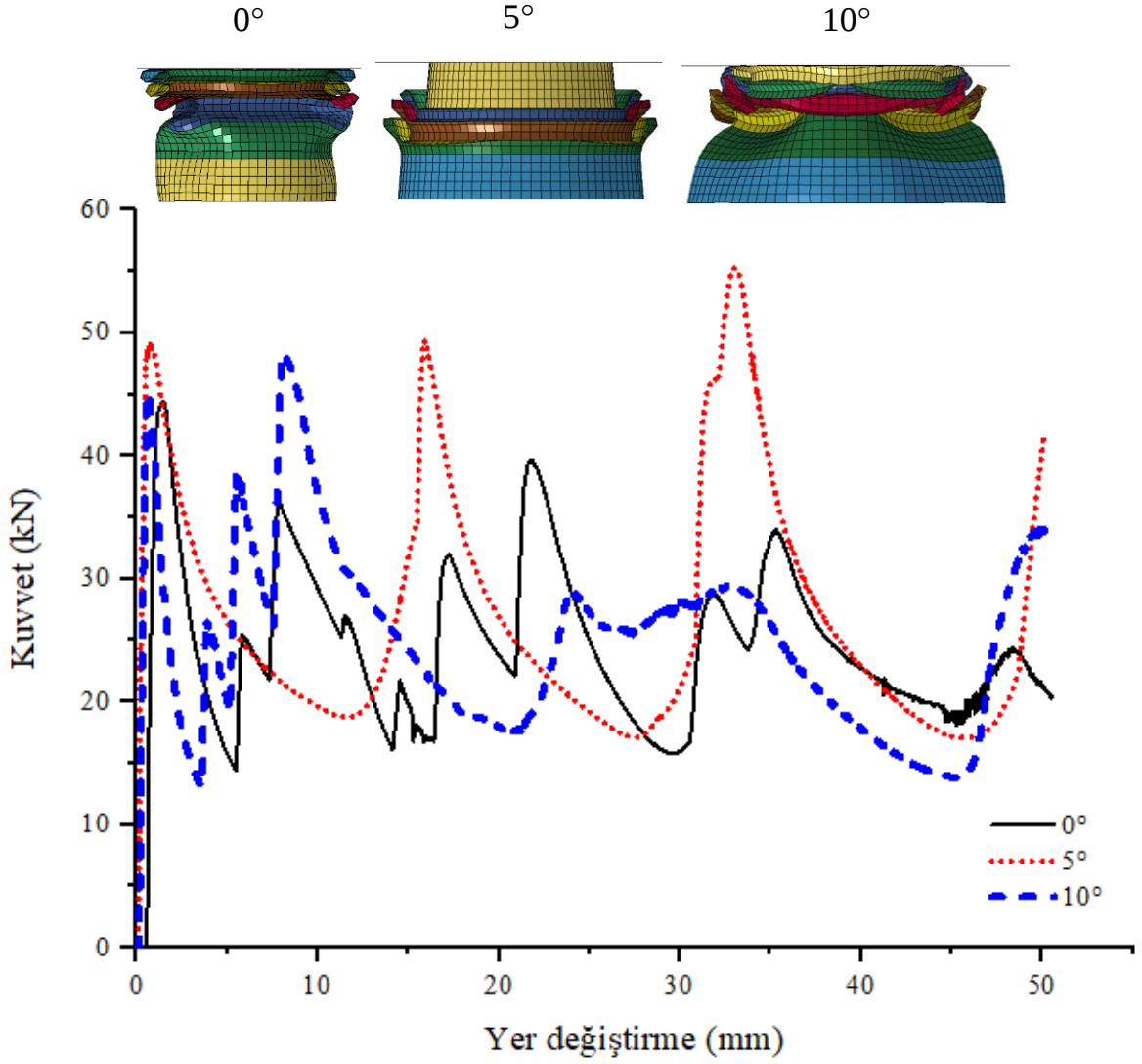
3.4.1. Üniform Kalınlıklı Tüpler için Kuvvet-Yer Değiştirme Grafikleri

0°, 5° ve 10° konik açılı 0.5 mm kalınlığa sahip tüpler için elde edilen deformasyon şekilleri ve kuvvet-yer değiştirme eğrileri şekil 3.19’da verilmiştir. Farklı koniklik açıları için ilk şekil değiştirmeler başlayanaya kadar kuvvet değerleri artmış ve pik kuvvetler 0° tp için 13.71 kN, 5° konik açılı tp için 15.12 kN ve 10° konik açılı tp için ise 13.76 kN olarak gerçekleşmiştir. Literatürde daha önce yapılmış çalışmalarda grldğu gibi ilk pik kuvvet değerleri 5° konik tüpler için artarken 10° konik tüpler için azalmıştır[186].



Şekil 3.19. 0°, 5°, 10° konik açılı, 0.5 mm üniform kalınlığa sahip tüplerin deformasyon şekilleri ve kuvvet- yer değiştirme grafikleri

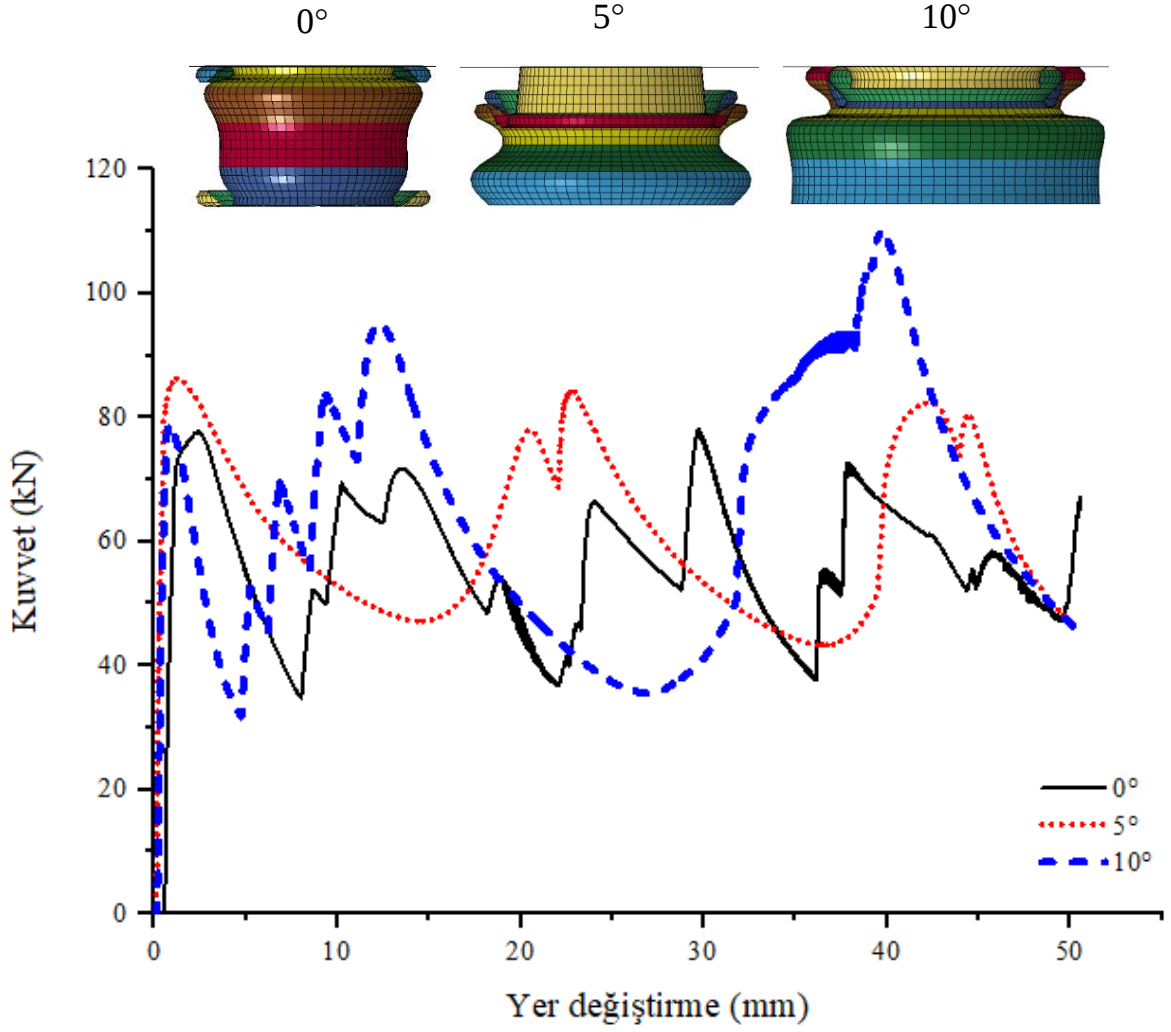
Düz tüpte (0°) şekil değiştirmeler, 8. bölgeden başlayıp sırasıyla 7, 6, 5, 4, 3 ve 2. bölgede; 5° konik açılı tüp için şekil değiştirmeler 2. bölgede başlayıp sırasıyla 3 ve 4. bölgelerin simetrik modda, 5, 6, 7 ve 8. bölgelerin karışık modda katlanmasıyla; 10° konik açılı tüpte ise şekil değiştirmeler 1. ve 2. bölgelerde simetrik modda başlayıp diğer bölgelerde karışık modda devam etmiştir.



Şekil 3.20. 0°, 5°, 10° konik açılı, 1.5 mm üniform kalınlığa sahip tüplerin deformasyon şekilleri ve kuvvet- yer değiştirme grafikleri

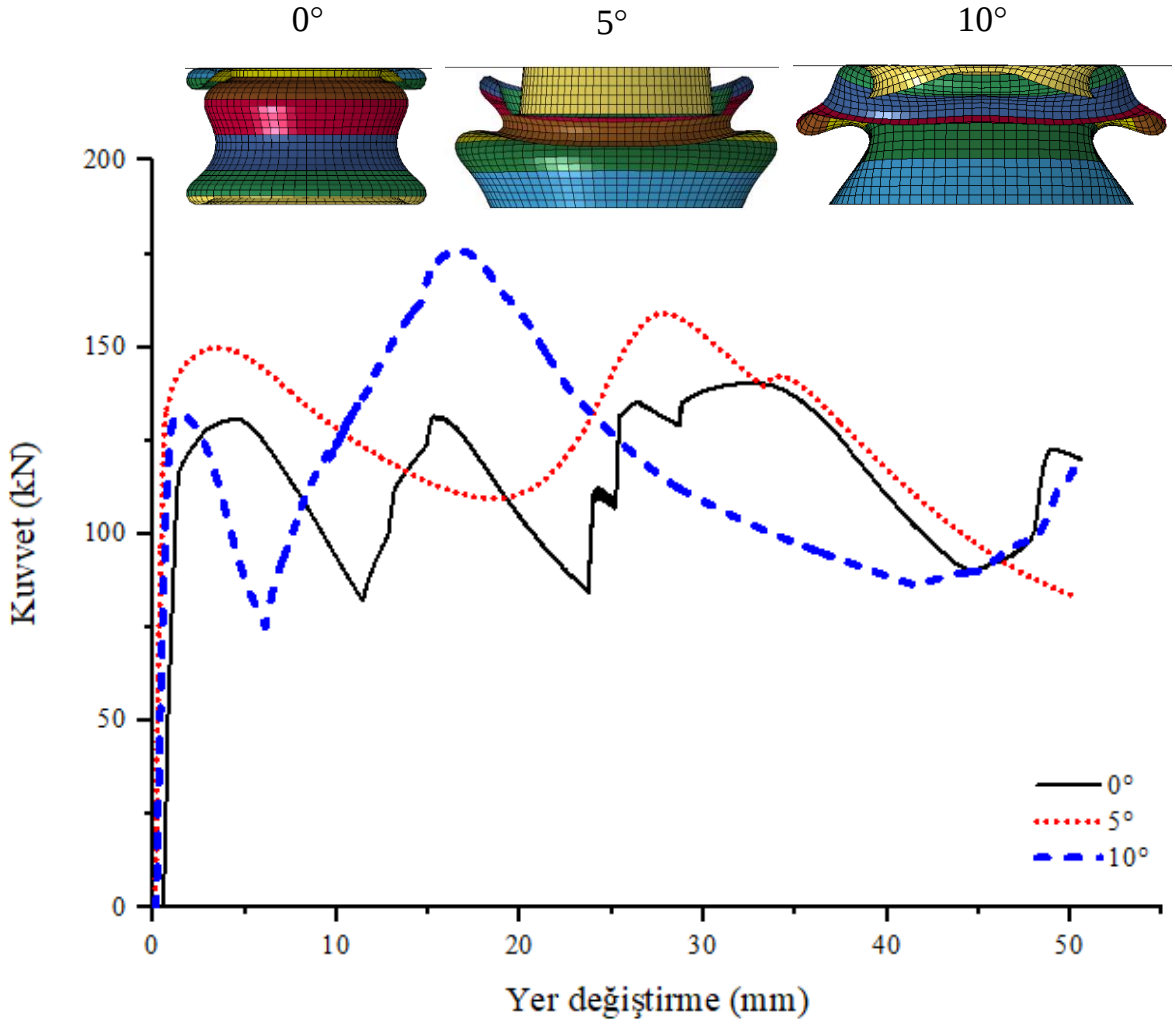
1.5 mm üniform kalınlığa sahip 0°, 5° ve 10° konik açılı tüpler için deformasyon şekilleri ve kuvvet- yer değiştirme eğrileri Şekil 3.20’de görülmektedir. Pik kuvvet değerleri; 0° konik açılı tüp için 44.35 kN, 5° konik açılı tüp için 49.02 kN ve 10° konik açılı tüp için ise 45.12 kN olarak gerçekleşmiştir.

2.5 mm üniform kalınlıklı tüpler için şekil değiştirmeler ve kuvvet- yer değiştirme eğrileri Şekil 3.21’de görülmektedir. 2.5 mm tüpler için pik kuvvet değerleri; 0° konik açılı tüp için 77.63 kN, 5° konik açılı tüp için 86.29 kN ve 10° konik açılı tüp için 78.75 kN olarak elde edilmiştir.



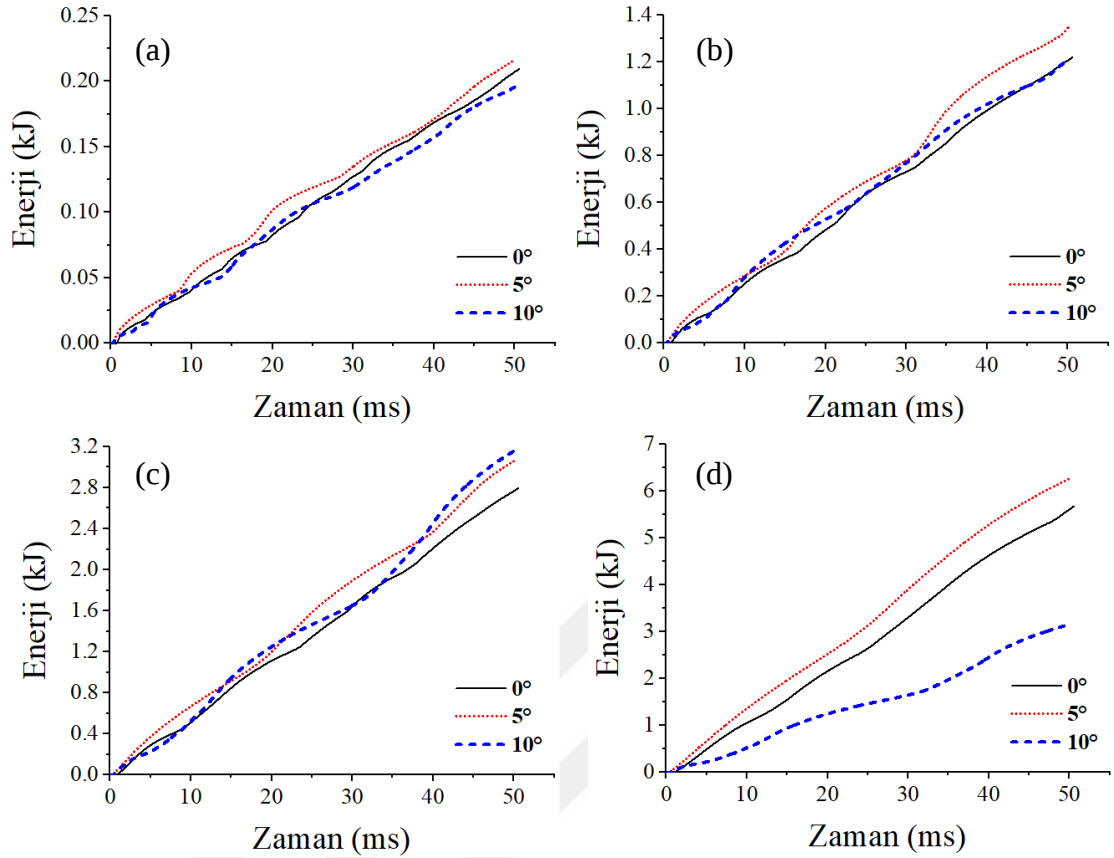
Şekil 3.21. 0°, 5°, 10° konik açılı, 2.5 mm üniform kalınlığa sahip tüplerin deformasyon şekilleri ve kuvvet- yer değiştirme grafikleri

4 mm üniform kalınlığa sahip tüplerin şekil değiştirmeleri ve kuvvet- yer değiştirme eğrileri Şekil 3.22’te görülmektedir. Şekilden görülebileceği gibi 0° tüpte pik kuvvet değeri 130.61 kN, 5° konik açılı tüpte 149.87 kN ve 10° konik açılı tüpte 132.12 kN olarak elde edilmiştir. 0° tüpte ilk şekil değiştirme 1. bölgede başlayıp sırasıyla 7, 8, 2, 3 ve 4. bölgeler ile devam etmiştir. 5° konik açılı tüpte ise ilk şekil değiştirme 2. ve 3. bölgenin 4. bölge içine kıvrılması ile başlayıp sırasıyla 5, 6, 7 ve 8. bölgelerin şekil değiştirmesi ile devam etmiştir. Üniform kalınlığa sahip 10° konik açılı tüpte ise ilk şekil değiştirme 1 ve 2. bölgenin içe kıvrılması ile başlayıp 3, 4, 5 ve 6. bölgenin 7 ve 8. bölgenin üzerine katlanması ile devam etmiştir. 0.5, 1.5, 2.5 ve 4 mm üniform kalınlığa sahip tüplerde pik kuvvet değerleri 5° koniklik açılarında artarken, 10° koniklik açılarında azalmıştır.



şekil 3.22. 0°, 5°, 10° konik açılı, 4 mm üniform kalınlığa sahip tüplerin deformasyon şekilleri ve kuvvet- yer değiştirme grafikleri

0.5, 1.5, 2.5 ve 4 mm üniform kalınlığa sahip tüplerin 0°, 5° ve 10° koniklik açılılarına göre enerji-zaman grafikleri şekil 3.23'te, SE ve pik kuvvet değerleri ise Tablo 3.1'de verilmiştir. Sayısal analizlerden 0.5 mm üniform kalınlığa sahip 0° tüpte 0.209 kJ, 5° konik açılı tüpte 0.216 kJ ve 10° konik açılı tüpte 0.196 kJ SE değerleri elde edilmiştir. 1.5 mm üniform kalınlığa sahip 0° tüpte 1.21 kJ, 5° konik açılı tüpte 1.34 kJ ve 10° konik açılı tüpte ise 1.21 kJ SE değerleri elde edilmiştir. 2.5 ve 4 mm üniform kalınlığa sahip tüplerde SE değerleri 0° tüplerde 2.79 kJ ve 5.67 kJ, 5° konik açılı tüplerde 3.26 kJ ve 6.27 kJ, 10° konik açılı tüplerde ise 3.16 kJ ve 5.72 kJ olarak gerçekleşmiştir. İlk pik kuvvet değerlerine benzer şekilde SE değerleri de literatüre ile uyumlu şekilde 5° konik açılı tüplerde artarken 10° konik açılı tüplerde azalmıştır [6].



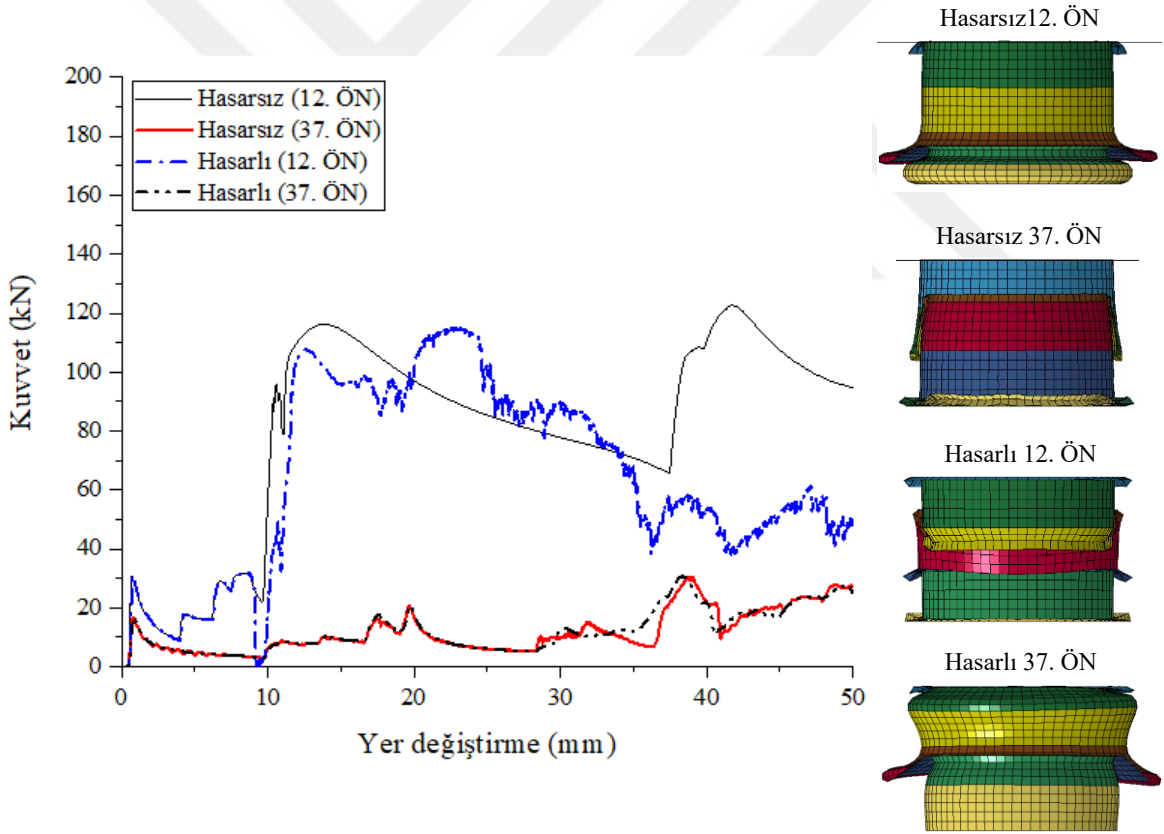
Şekil 3.23. 0°, 5° ve 10° konik açılı (a) 0.5, (b) 1.5, (c) 2.5 ve (d) 4 mm üniform kalınlığa sahip tüplerin enerji-zaman grafikleri

Tablo 3.1. 0.5 mm, 1.5 mm, 2.5 mm ve 4 mm üniform kalınlığa sahip tüpler için pik kuvvet ve SE değerleri

Koniklik Açısı (°)	Et Kalınlığı (mm)	Pik Kuvvet (kN)	SE (kJ)
0 (Düz)	0.5	13.71	0.209
	1.5	44.35	1.21
	2.5	77.63	2.79
	4	130.61	5.67
5	0.5	15.12	0.216
	1.5	49.02	1.34
	2.5	86.29	3.26
	4	149.87	6.27
10	0.5	13.76	0.196
	1.5	45.12	1.21
	2.5	78.75	3.16
	4	132.12	5.72

3.4.2. DKT'ler İçin Kuvvet Yer Değiştirme Grafikleri

Şekil 3.24'te 0° tüplerde hasarsız şartlarda en yüksek ÖES değerlerini veren örneklem noktaları (ÖN) ve aynı ÖN'lerin hasarlı analiz şartlarındaki şekil değiştirmeleri ve kuvvet-yer değiştirme grafikleri görülmektedir. Şekil 3.24'ten 12. (en yüksek) ve 37. (en düşük) ÖN'ler için ilk pik kuvvetler; hasarsız analiz şartlarında sırasıyla 30.86 kN ve 17.39 kN iken hasarlı analiz şartlarında sırasıyla 30.62 kN ve 16.90 kN olarak gerçekleşmiştir. Hasarsız analiz şartlarında 12. ÖN için şekil değiştirme en küçük bölge kalınlığına sahip 1. bölgeden başlamış; ikinci en küçük bölge kalınlığı sahip 5. bölge ile devam etmiştir. Sonrasında 4, 5 ve 6. bölgelerin 7 ve 8. bölgeler üstüne yığılması ile son bulmuştur. 37. ÖN için ise 3. bölgeden başlamış sonrasında 4, 7, 8, 2 ve 1. bölgelerin şekil değiştirmesiyle devam etmiştir.

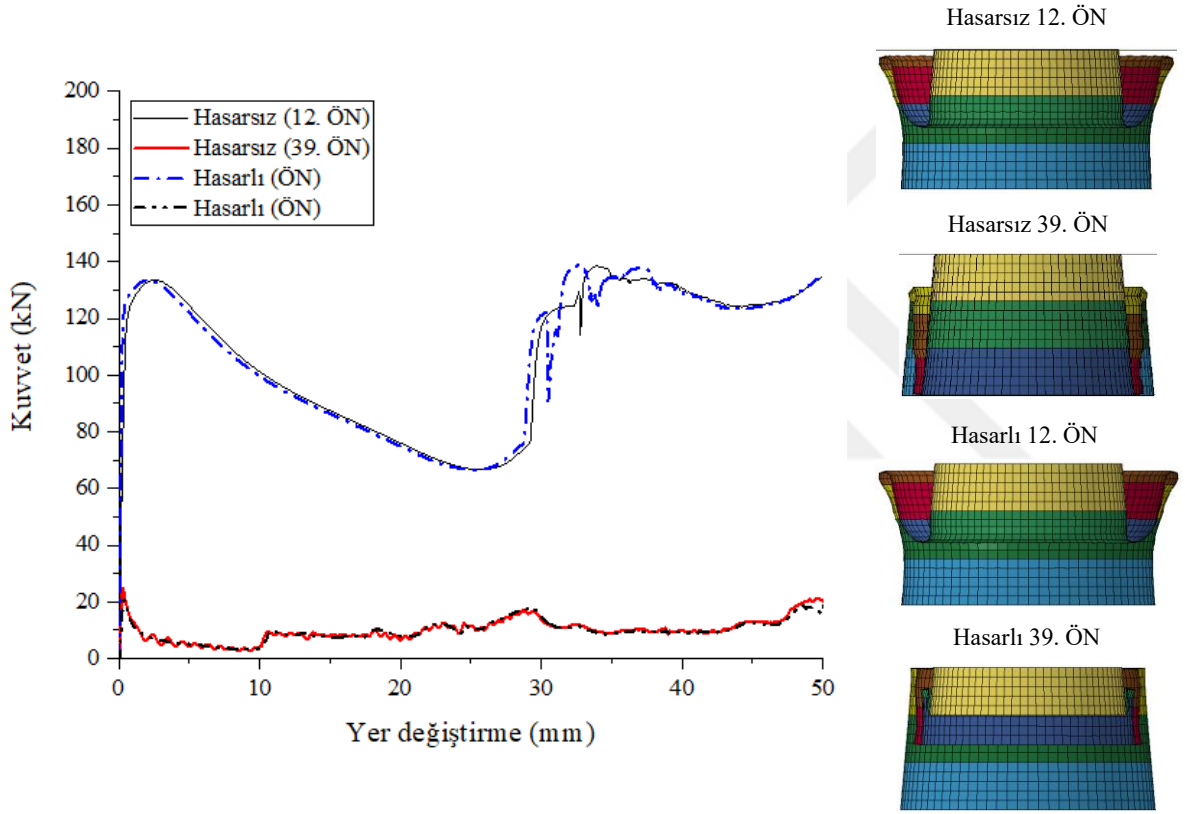


Şekil 3.24. 0° DKT'lerin hasarlı ve hasarsız analizlerde maksimum ve minimum ÖES değerini veren ÖN'leri için şekil değiştirmeler ve kuvvet-yer değiştirme eğrileri

Hasarlı analiz şartlarında ise 12. ÖN için şekil değiştirme 1. bölgede başlamış, birinci bölgenin hasara uğraması ile üst plaka ile DKT arasında temas kesilmiş ve kuvvet değeri

sıfıra inmiştir. Şekil değiştirme üst plakanın DKT ile tekrar temasa geçmesiyle 2, 3, 4, ve 5. bölgelerde devam etmiş ve 6. bölgede sona ermiştir. ÖN 37 için ise 3.bölgede başlayıp 4, 7 ve 8. bölgeler ile devam etmiş ve 2. bölgede sonlanmıştır.

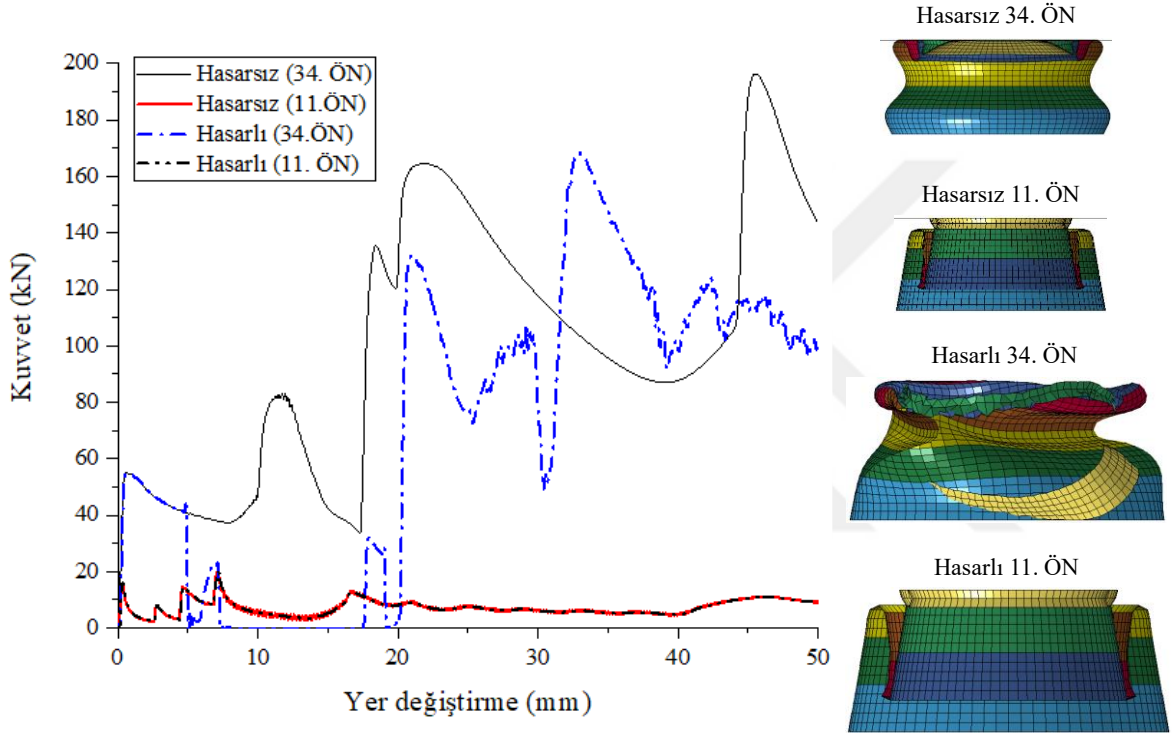
5° konik açılı DKT'ler için gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen maksimum ve minimum ÖES değerleri veren ÖN'lerde şekil değiştirmeler ve kuvvet– yer değiştirme grafikleri Şekil 3.25'te verilmiştir. Hasarsız analizlerde 12. ve 39. ÖN'lerde pik kuvvet değerleri 133.51 kN ve 25.12 kN olurken hasarlı analizlerde 12. ve 39. ÖN'lerde 133.44 kN ve 25.02 kN olmuştur. 5° konik açılı DKT'lerde hasar oluşmamıştır.



Şekil 3.25. 5° konik açılı DKT'lerin hasarlı ve hasarsız analizlerde maksimum ve minimum ÖES değerini veren ÖN'leri için şekil değiştirmeler ve kuvvet– yer değiştirme eğrileri

10° konik açılı hasarlı ve hasarsız sayısal analizlerde DKT'lerin 34 ve 11. ÖN'lerinde şekil değiştirmeleri ve kuvvet– yer değiştirme grafikleri Şekil 3.26'da görülmektedir. ÖN 34'te şekil değiştirme 1. bölgenin 2. bölgeye geçmesiyle başlamış; 3 ve 4. bölgelerin 5, 6, 7 ve 8. bölgelere geçmesi ile sürmüştür. ÖN 11'de 1. bölgenin içe katlanması ile başlamıştır. Sonrasında 4, 5 ve 6. bölgelerin 7 ve 8. bölgelerin içine katlanmasıyla sona ermiştir. 34. ve

11. ÖN'lerde pik kuvvet değerleri 55.53 kN ve 16.27 kN olmuştur. Hasarlı sayısal analizlerde ÖN 34'te şekil değiştirme 2 ve 3. bölgelerle başlamış, 5 ve 6. bölgelerin şekil değiştirmesi ile devam etmiştir. 2. bölgenin hasara uğramasıyla DKT'nin 1. bölgesinin üst plaka ile teması kesilmiş ve yırtılma sonucu DKT'nin içine düşmesi nedeniyle 5-20 mm arasında kuvvet sıfır olmuştur. ÖN 11'de şekil değiştirme 1. bölgeden başlayarak 4. bölgenin 5 ve 6. bölgelerin içine katlanması ile devam etmiştir.



Şekil 3.26. 10° konik açılı DKT'lerin hasarlı ve hasarsız analizlerde maksimum ve minimum ÖES değerini veren ÖN'leri için şekil değiştirmeler ve kuvvet-yer değiştirme eğrileri

0°, 5° ve 10° koniklik açılarında gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizlerinin hasarlı ve hasarsız şartlarda maksimum ve minimum ÖES'ler için SE ve ilk pik kuvvet değerleri Tablo 3.2'de görülmektedir. 0° DKT'lerde maksimum ve minimum ÖES değerleri elde edilen ÖN'ler hasarlı şartlarda 12 ve 12 hasarsız şartlarda ise 12 ve 37 olmuştur. 5° konik açılı DKT için hasarlı şartlarda maksimum ve minimum ÖES 3. ve 10. ÖN'lerde hasarsız şartlarda ise 12. ve 39. ÖN'lerde elde edilmiştir. 10° DKT'ler için ise hasarsız şartlarda maksimum ve minimum ÖES 34. ve 11. ÖN'lerde hasarlı şartlarda ise 57. ve 12. ÖN'lerde gerçekleşmiştir. ÖN'lerde bölge kalınlıkları arasındaki farkın büyük olması durumunda içe

geçme ve içe katlanma oluşmaktadır. Bu durum şekil değiştirmeleri arttırmakta, hasarlı analizlerde yırtılma ve kopmalar meydana gelmektedir. Oluşan hasar ile DKT ile üst plaka arasında temas ortadan kalkmakta ve tekrar temasa geçilene kadar kuvvet sıfır olmaktadır. Kuvvetin sıfır olması ile SE değerlerinde düşüş meydana gelmektedir.

Tablo 3.2. Maksimum ve minimum ÖES değerini veren ÖN'ler için SE ve pik kuvvet değerleri

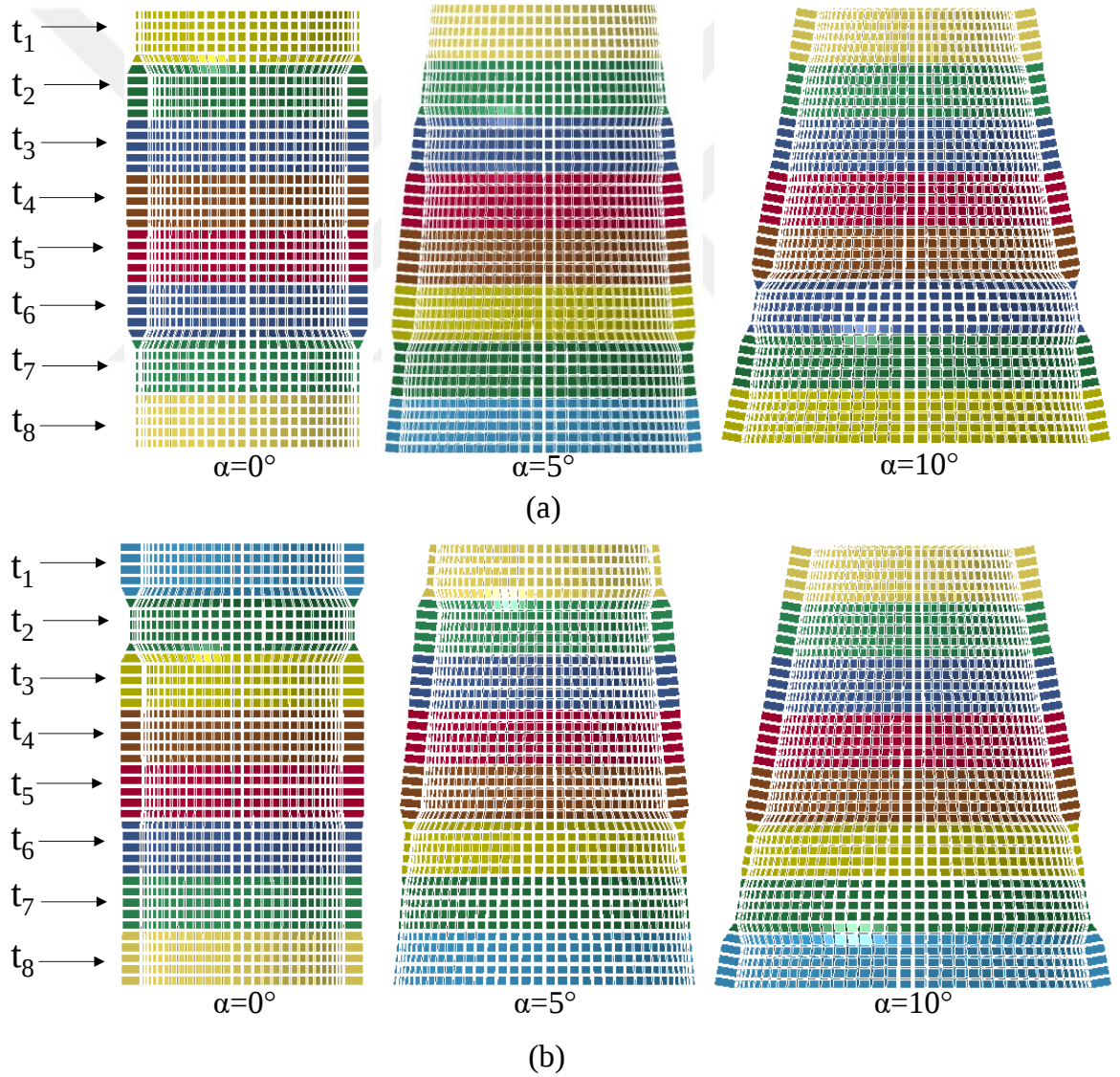
Koniklik Açısı (°)	Pik Kuvvet (kN)				SE (kJ)			
	Hasarlı		Hasarsız		Hasarlı		Hasarsız	
	En yüksek	En düşük	En yüksek	En düşük	En yüksek	En Düşük	En yüksek	En düşük
0 (Düz)	30.82	27.81	30.86	17.39	3.12	0.41	4.04	0.61
5	23.83	39.98	133.51	25.12	2.63	0.44	5.33	0.45
10	33.74	31.07	55.53	16.27	2.94	0.45	4.91	0.36

3.4.3. DKT'lerin Optimizasyon Sonuçları

0°, 5° ve 10° konik açılı DKT'ler için optimizasyon sonucu hasarlı ve hasarsız şartlarda elde edilen bölge kalınlıkları Tablo 3.3'te verilmiştir. Şekil 3.27'de hasarlı ve hasarsız şartlarda 0°, 5° ve 10° konik açıları için optimum bölge kalınlık değerlerine sahip DKT'lerin kesitleri görülmektedir. Tablo 3.3'ten görüleceği gibi hasarsız şartlarda optimum DKT kalınlıkları; 0° DKT'lerde 0.55-3.97 mm, 5° konik DKT'lerde 0.50-3.99 mm ve 10° konik DKT'lerde ise 0.52-3.92 mm aralıklarında değişmiştir. Hasarlı şartlarda ise optimum bölge kalınlık değerleri 0° DKT'lerde 0.53-3.99 mm, 5° DKT'lerde 0.60-3.96 mm ve 10° DKT'lerde ise 0.54-3.95 mm arasında gerçekleşmiştir. CAO sonucu elde edilen optimum bölge kalınlıklarında küçük kalınlığa sahip bölge kalınlıkları ile büyük kalınlığa sahip bölgelerin aynı anda bulunduğu görülmektedir. Bu durum ilk pik kuvvetin düşük olmasını sağlarken SE değerinin yüksek olmasını sağlamaktadır.

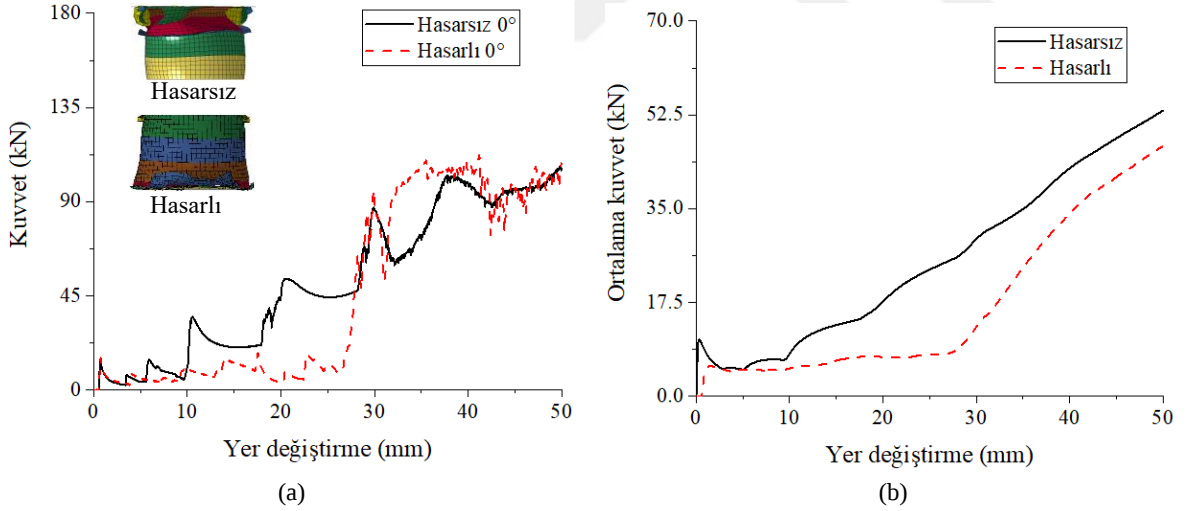
Tablo 3.3. Hasarlı ve hasarsız şartlarda DKT'ler için optimum böyle kalınlıkları

	Koniklik Açısı (°)	Bölge Kalınlıkları (mm)								Pik Kuvvet (kN)	SE (kJ)
		t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₅	t ₆	t ₇	t ₈		
HASARSIZ	0	3.76	0.55	3.88	3.79	3.97	3.22	3.14	3.34	14.51	2.57
	5	1.41	3.98	3.99	3.76	3.86	1.26	0.50	0.50	16.50	2.30
	10	3.86	3.63	3.85	3.92	1.10	1.40	0.52	3.74	17.43	3.11
HASARLI	0	0.64	3.82	3.96	3.99	3.76	3.62	0.68	0.53	15.26	2.09
	5	0.60	0.53	2.34	3.74	3.96	3.96	2.11	2.52	15.20	2.10
	10	3.99	3.13	3.28	3.95	3.92	0.54	3.14	3.74	22.24	2.08

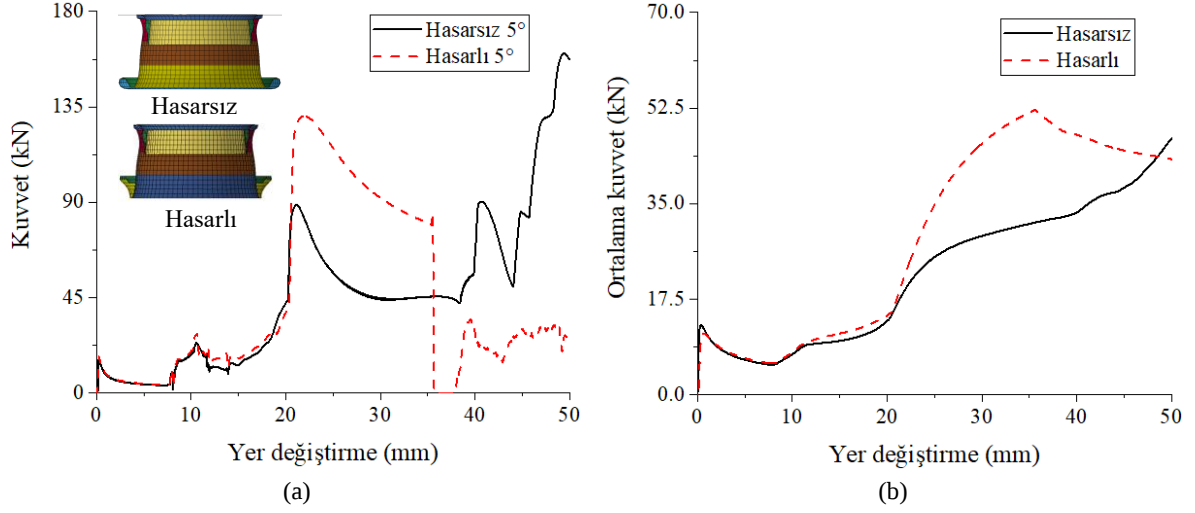


Şekil 3.27. 0°, 5° ve 10° konik açılı DKT'lerde (a) hasarlı ve (b) hasarsız şartlarda ÇAO sonucu optimum DKT kalınlıklarının kesit görünümü

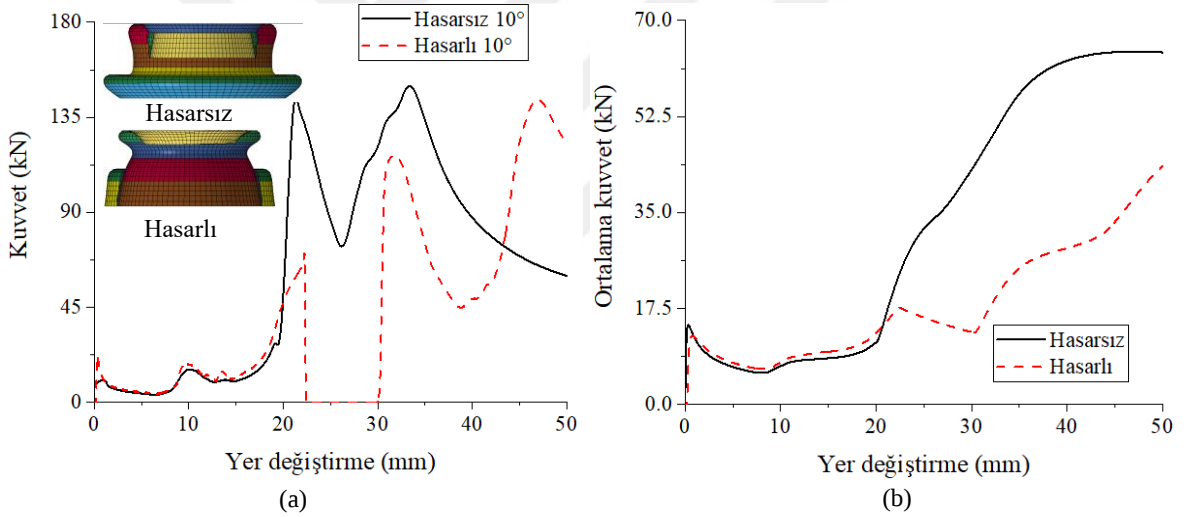
Şekil 3.28, Şekil 3.29 ve Şekil 3.30’da hasarlı ve hasarsız şartlarda sırasıyla 0° (Düz), 5° ve 10° konik açılı DKT’ler için optimizasyon sonucu elde edilen optimum bölge kalınlıklarının sonlu elemanlar analizinden elde edilen kuvvet – yer değiştirme ve ortalama kuvvet- yer değiştirme eğrileri görülmektedir. Şekillerden görülebileceği gibi kuvvet-yer değiştirme eğrileri CAO’da kısıt olarak verilen ilk pik kuvvetin düşük olması şartını sağlamaktadır. Kuvvet değerleri düşük ilk pik kuvvetten başlayarak sürekli artmıştır. 0° , 5° ve 10° konik açılı DKT’lerde hasarsız şartlarda pik kuvvetler sırasıyla 14.51 kN, 16.5 kN, 17.43 kN ve SE değerleri sırasıyla 2.57 kJ, 2.30 kJ, 3.11 kJ olmuştur. Hasarlı şartlarda ise 0° , 5° ve 10° koniklik açılarına göre SE değerleri 2.09 kJ, 2.10 kJ ve 2.08 kJ; pik kuvvetler ise 15.26 kN, 15.20 kN ve 22.24 kN olarak gerçekleşmiştir. 0° tüpte ortalama kuvvet değerleri (Şekil 3.28 (b)); hasarsız şartlarda 9.88 kN değerinden başlayıp 10 mm yer değiştirme mesafesine kadar yatay bir seyir izledikten sonra sürekli artarak 51.41 kN değerine, hasarlı şartlarda 5.71 kN değerinden başlayıp 41.83 değerine ulaşmıştır. Hasarlı şartlarda ortalama kuvvet değişimi yer değiştirme 28 mm’ye ulaşana kadar yatay bir seyir izlemiş ve sonrasında sürekli artmıştır.



Şekil 3.28. 0° optimum bölge kalınlığına sahip DKT’lerin (a) kuvvet – yer değiştirme ve (b) ortalama kuvvet- yer değiştirme eğrileri



Şekil 3.29. 5° konik açılı optimum bölge kalınlığına sahip DKT'lerin (a) kuvvet – yer değiştirme ve (b) ortalama kuvvet- yer değiştirme eğrileri

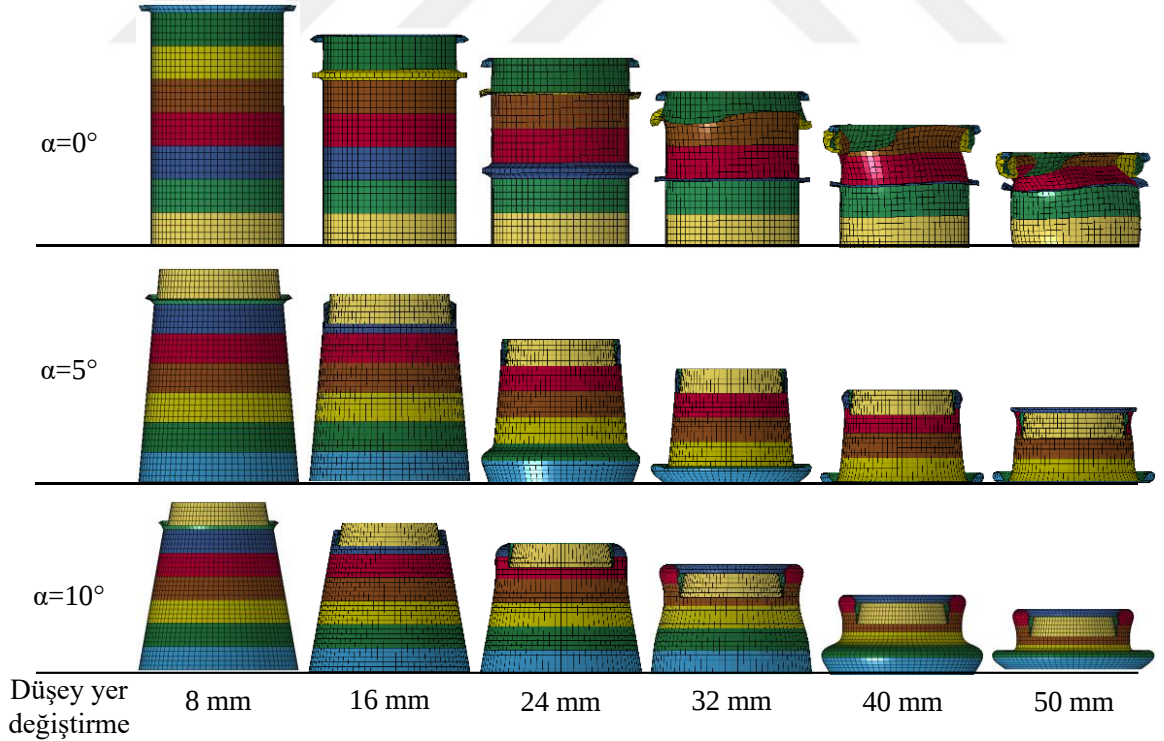


Şekil 3.30. 10° konik açılı optimum bölge kalınlığına sahip DKT'lerin (a) kuvvet – yer değiştirme ve (b) ortalama kuvvet- yer değiştirme eğrileri

Şekil 3.29 (b)'den görüleceği gibi 5° konik açılı hasarlı ve hasarsız şartlarda ortalama kuvvet değeri 11.15 kN ile başlamıştır. Sonrasında hasarlı ve hasarsız şartlarda ortalama kuvvet değişimleri 21 mm yer değiştirme mesafesine kadar benzer bir eğilim göstermiştir. Hasarlı şartlarda 36 mm yer değiştirme mesafesinde hasarın oluşması ve kuvvet değerinin sıfıra inmesi ile ortalama kuvvet değerinde bir düşüş meydana gelmiştir. Hasarlı ve hasarsız şartlar için 50 mm yer değiştirmede ortalama kuvvet değerleri sırasıyla 42.05 kN ve 46.8 kN olarak gerçekleşmiştir. Şekil 3.30 (c)'de ise 10° konik açılı tüpün ortalama kuvvet

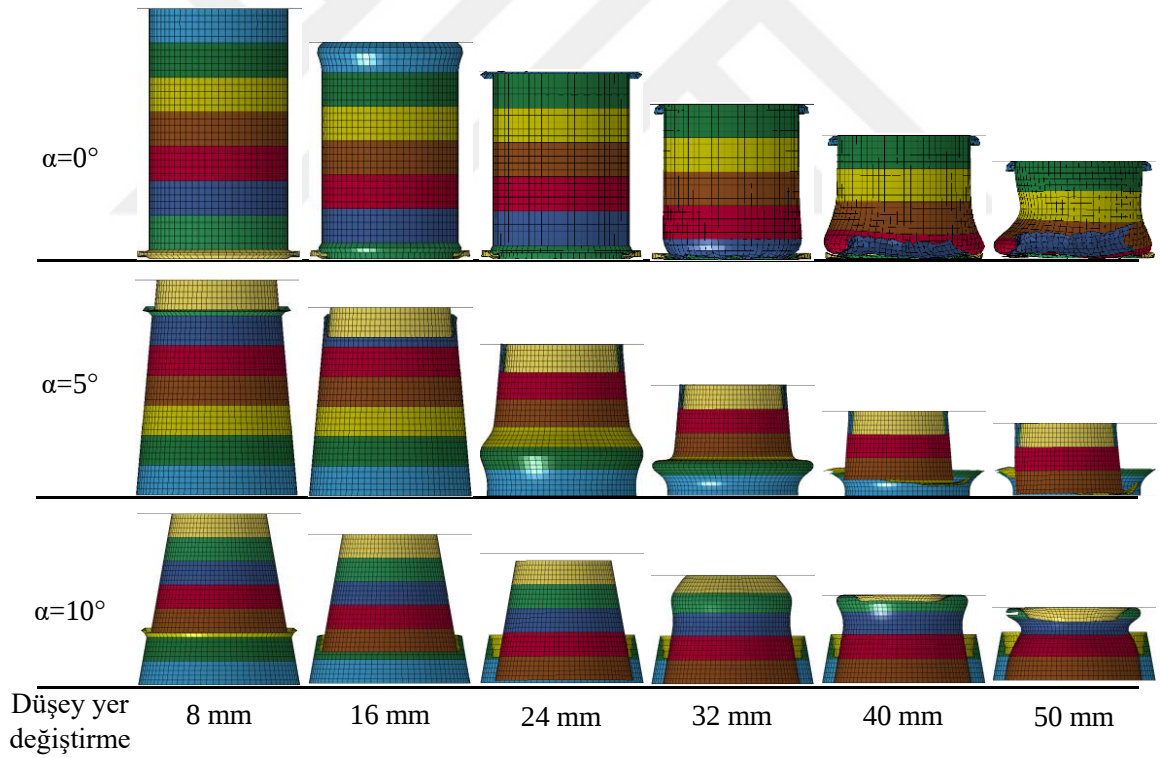
değerlerindeki değişim görülmektedir. 21 mm şekil değiştirme mesafesine kadar benzer bir eğilim gösteren ortalama kuvvet değerleri 50 mm mesafe sonucunda hasarlı ve hasarsız şartlar için 41.67 kN ve 62.2 kN olmuştur.

Optimum bölge kalınlığına sahip 0° , 5° ve 10° konik açılı DKT'lerin hasarsız şartlarda gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizleri sonucu elde edilen katlanma şekillerinin kesit görünümüleri adım adım Şekil 3.31'de görülmektedir. Şekil 3.31'den görülebileceği gibi 0° DKT için şekil değiştirme en küçük bölge kalınlıklarına sahip olan 1., 3. ve 5. bölgeler ile başlayıp; 2. bölgenin 4. bölge üstüne yığılması ile devam ederek 6. bölgenin şekil değiştirmesi ile sonlanmıştır. 5° DKT için şekil değiştirmeler en küçük bölge kalınlıklı 2. bölgenin 3. bölgenin içine doğru geçmesi ile başlamış, 7. bölgenin 8. bölge içine doğru geçmesi ile devam etmiş, 3. ve 4. bölgelerin şekil değiştirmesiyle sona ermiştir. 10° DKT için ilk şekil değiştirme 2. bölgenin 3. ve 4. bölgelerin içine doğru geçmesi ile başlayarak; 6. ve 7. bölgenin 8. bölgenin içine doğru geçmesiyle sonlanmıştır. 0° , 5° ve 10° DKT'lerde optimum bölge kalınlıkları için gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizlerinde büyük bölge kalınlığına sahip bölgelerin içe geçmesiyle kuvvette bir artış olduğu görülmektedir.



Şekil 3.31. Hasarsız şartlarda 0° , 5° ve 10° optimum bölge kalınlığına sahip DKT'lerin adım adım şekil değiştirmeleri

Hasarlı şartlarda optimum bölge kalınlığına sahip DKT'lerin adım adım şekil değiştirmesi Şekil 3.32'de verilmiştir. 0° DKT için şekil değiştirmeler 8. bölgede başlamış 7, 2, 6. bölgeler ile devam ederek 5. bölgenin şekil değiştirmesiyle sonlanmıştır. 5° konik açılı DKT için şekil değiştirmeler 2. bölge ile başlamış, 2. bölgenin 3. bölgeye geçmesiyle devam etmiş, 6. ve 7. bölgelerin deformasyonu ile devam ederken 7. bölgenin şekil değiştirmesi sırasında hasar meydana gelmiş ve üst rijit plakanın 36-38 mm arasındaki hareketi sırasında DKT ile arasındaki temas ortadan kalkmıştır. 10° konik açılı DKT için şekil değiştirme en küçük kalınlıklı 6. bölgede başlamıştır. 6. bölgenin 7 ve 8. bölgeler içene doğru geçişi esnasında hasarın oluşmasıyla kopma meydana gelmiştir. Üst plaka ile DKT arasında temas ortadan kalkmış 23-30 şekil değiştirme mesafelerinde kuvvet sıfıra düşmüştür. Tekrar temasın sağlanmasıyla 1, 2 ve 3. bölgelerde şekil değiştirmeler devam etmiştir.



Şekil 3.32. Hasarlı şartlarda 0° , 5° ve 10° optimum bölge kalınlığına sahip DKT'lerin adım adım şekil değiştirmeleri

Değişken kalınlıklı tüplerde, 0° , 5° ve 10° koniklik açılarında hasarlı ve hasarsız şartlar için 68 ÖN boşluk doldurma şeması ile seçilerek toplamda 408 analiz gerçekleştirilmiştir.

Bu analizlerden hasarlı ve hasarsız şartlarda SE değerleri için elde edilen en düşük R^2 değerleri Tablo 3.4’de görülmektedir. Tablodan görüleceği gibi en düşük R^2 değerleri 0° , 5° ve 10° koniklik açılarında hasarlı şartlar için sırasıyla 0.92, 0.98, 0.95 olurken hasarsız şartlar için 0.97, 0.93, 0.98 olmuştur.

Tablo 3.4. Hasarlı ve hasarsız şartlarda DKT’lerin optimizasyonundan elde edilen en küçük R^2 değerleri

Koniklik	R^2 değerleri	
	Hasarlı	Hasarsız
	SE	SE
0°	0.92	0.97
5°	0.98	0.93
10°	0.95	0.98

3.5. Kompozit Tüpler Üzerine Gerçekleştirilen Çalışmalardan Elde Edilen Bulgular

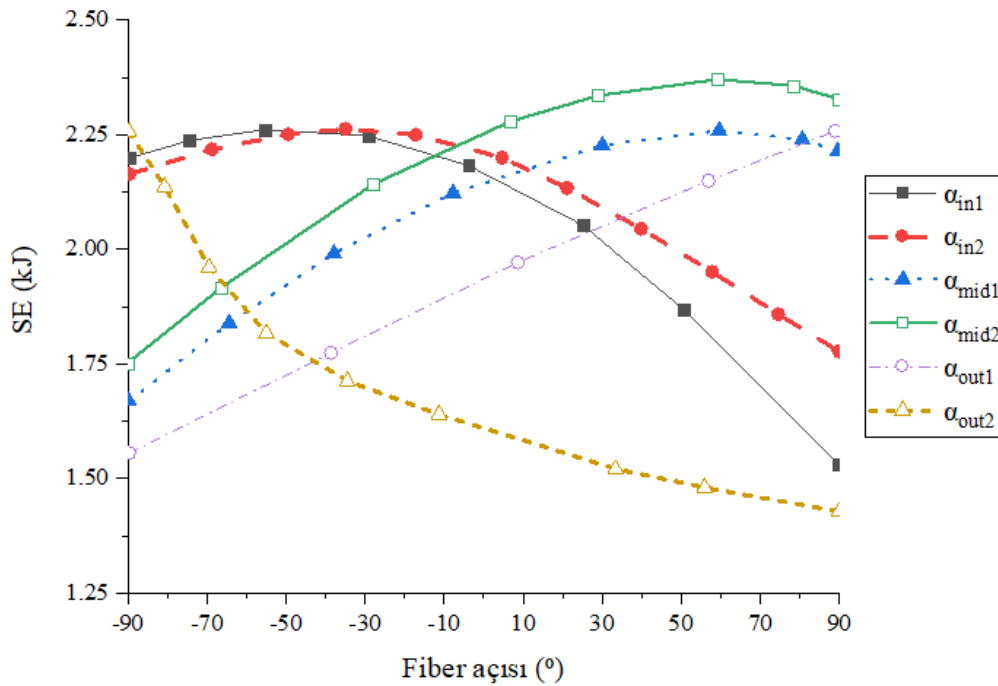
3.5.1. Fiber Açısının SE ve Pik Kuvvete Etkisi

Bu bölümde 0° , 5° ve 10° koniklik açıları için ÇAO ile elde edilen amaç ve kısıt fonksiyonlarına göre her bir elyaf katmanının SE ve pik kuvvet değerlerine olan etkileri incelenmiştir. Tablo 3.5’te her bir koniklik açısında seçilen 43 ÖN için gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizlerinden en yüksek ve en düşük SE değerlerine sahip olan ÖN’lerin SE ve pik kuvvet değerleri verilmiştir. En yüksek SE değerine sahip ÖN’ler artan koniklik açısına göre sırasıyla 7, 36 ve 16 olurken en düşük SE değerine sahip ÖN’ler 2, 8 ve 8 olmuştur. Tablo 3.5’ten elyaf açısı dizilimini değiştirerek SE değerlerini düz tüplerde 0.71 kJ’den 1.55 kJ’e, 5° konik açılı tüplerde 1.47 kJ’den 1.98 kJ’e ve 10° konik açılı tüplerde ise 1.35 kJ’den 1.12 kJ’e yükseltmenin mümkün olduğu görülmektedir.

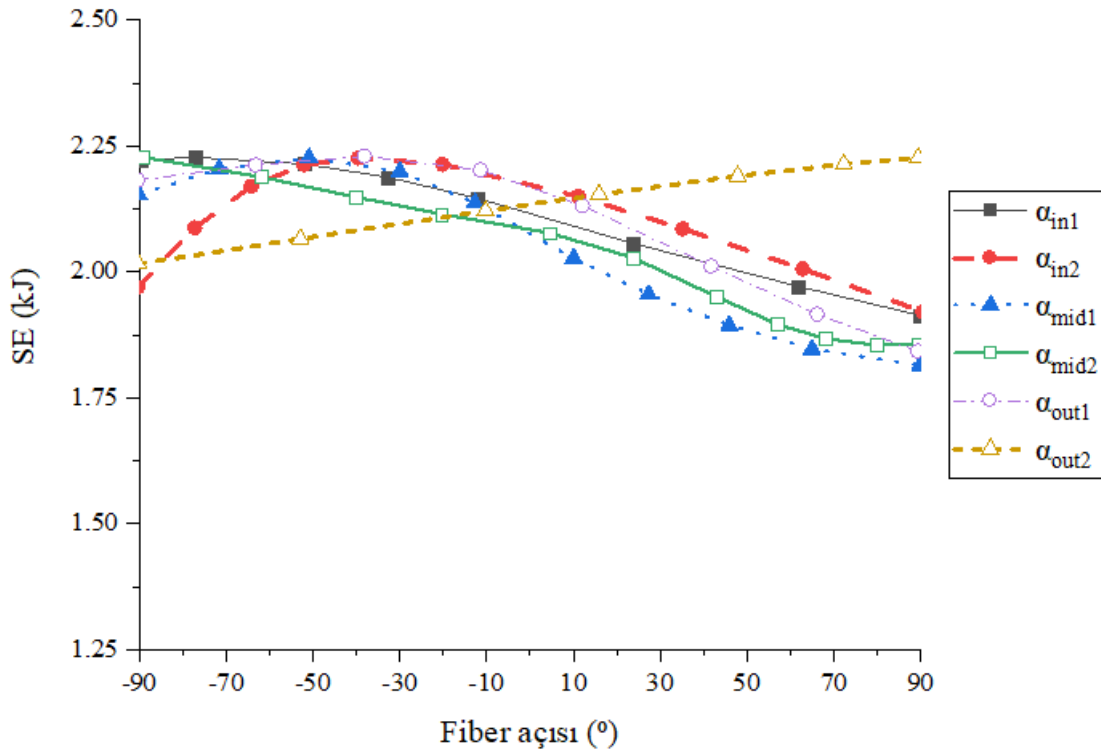
Tablo 3.5. Koniklik açlarına göre maksimum ve minimum SE değerine sahip ÖN'ler

Koniklik Açısı (°)	Maksimum			Minimum		
	ÖN	SE (kJ)	Pik Kuvvet (kN)	ÖN	SE (kJ)	Pik Kuvvet (kN)
0	7	1.55	49.56	2	0.71	31.33
5	36	1.98	48.84	8	1.47	48.20
10	16	1.98	50.15	8	1.35	45.24

Şekil 3.33'te 0° tüplerde elyaf açlarına bağlı SE değerlerinin değişimleri görülmektedir. Grafikten görüleceği gibi α_{in1} için SE değerleri -90° elyaf açısı için 2.19 kJ ile başlamış -30° 'de 2.24 kJ ile en yüksek değerine ulaşmış ve 90° 'de 1.53 kJ ile sona ermiştir. α_{in2} için -90° 'de 2.16 kJ ile başlayıp -35° 'de 2.26 ile pik noktasına ulaşmış ve 90° 'de 1.77 kJ ile sona ermiştir. Ortada bulunan tüpün ilk katmanı olan α_{mid1} için SE değerleri -90° 'de 1.66 kJ ile başlamış 80° 'de 2.23 kJ ile en yüksek değerine ulaşırken 90° 'de 2.21 kJ ile sona ermiş; ikinci katman olan α_{mid2} için ise 90° 'de 1.66 kJ ile başlamış 80° 'de 2,23 kJ ile en yüksek değerine ulaşmış ve 90° 'de 2.21 kJ ile sona ermiştir. Dış tüpte, α_{out1} için SE değerleri -90° 'de 1.55 kJ ile başlamış 90° 'de 2.25 kJ ile sona ermiş; α_{out2} için ise -90° 'de 2.25 kJ ile başlayıp parabolik olarak azalarak 90° 'de 1.42 kJ ile sona ermiştir.

Şekil 3.33. Düz (0°) kompozit tüpler için fiber açı dizilimine göre SE değerleri

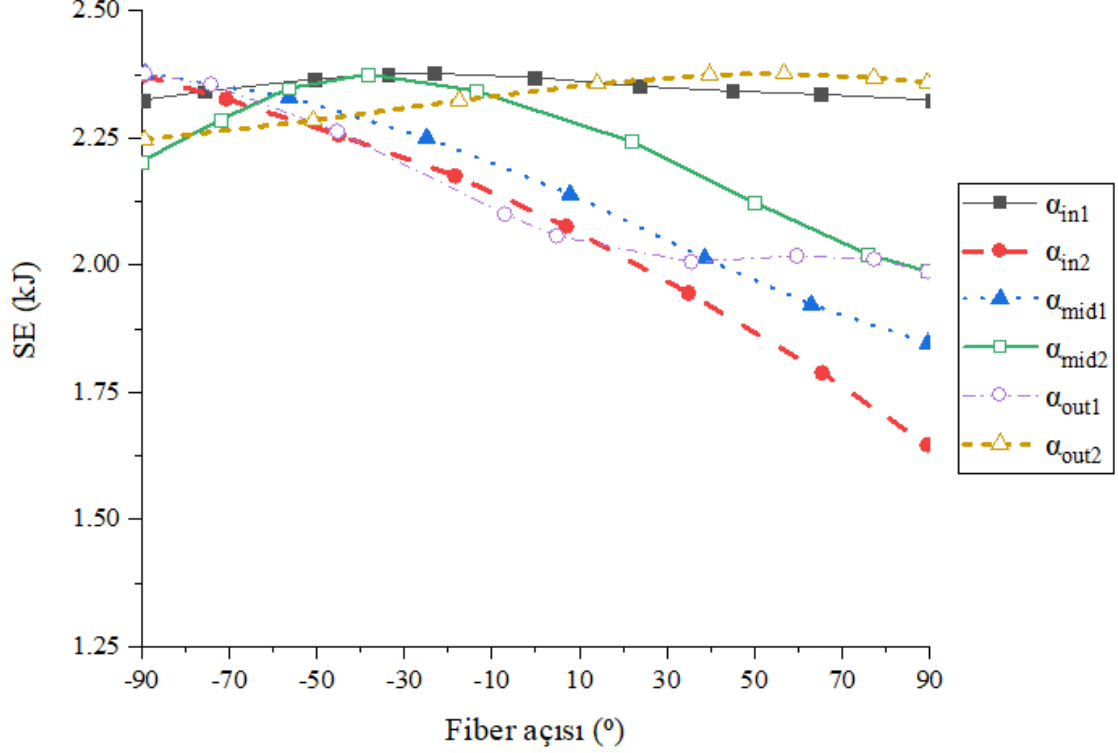
Şekil 3.34'te 5° konikliğe sahip tüplerde elyaf açılarına bağlı SE değerlerinin değişimleri görülmektedir. İç tüpte α_{in1} için SE değerleri -90° 'de 2.22 kJ ile başlayıp azalarak 90° 'de 1.91 kJ, α_{in2} için ise -90° 'de 1.96 kJ ile başlayıp 40° 'de 2.22 kJ ile en yüksek değerine ulaşp 90° 'de 1.92 kJ olmuştur. α_{mid1} için -90° 'de 2.15 kJ ile başlayıp 30° 'de 2.19 kJ ile en yüksek değerine ulaşp 90° 'de 1.81 kJ ile sona ererken α_{mid2} için ise -90° 'de 2.22 kJ ile başlayıp 90° 'de 1.85 kJ ile sona ermiştir. α_{out1} 'de SE değerleri -90° 'de 2.18 kJ ile başlayıp 40° 'de 2.23 kJ ile en yüksek değerine ulaşp 90° 'de 1.84 kJ olarak gerçekleşirken α_{out2} 'de -90° 'de 2.01 kJ'den artarak 90° 'de 2.22 kJ olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 3.34. 5° koniklik açılı kompozit tüpler için fiber açı dizilimine göre SE değerleri

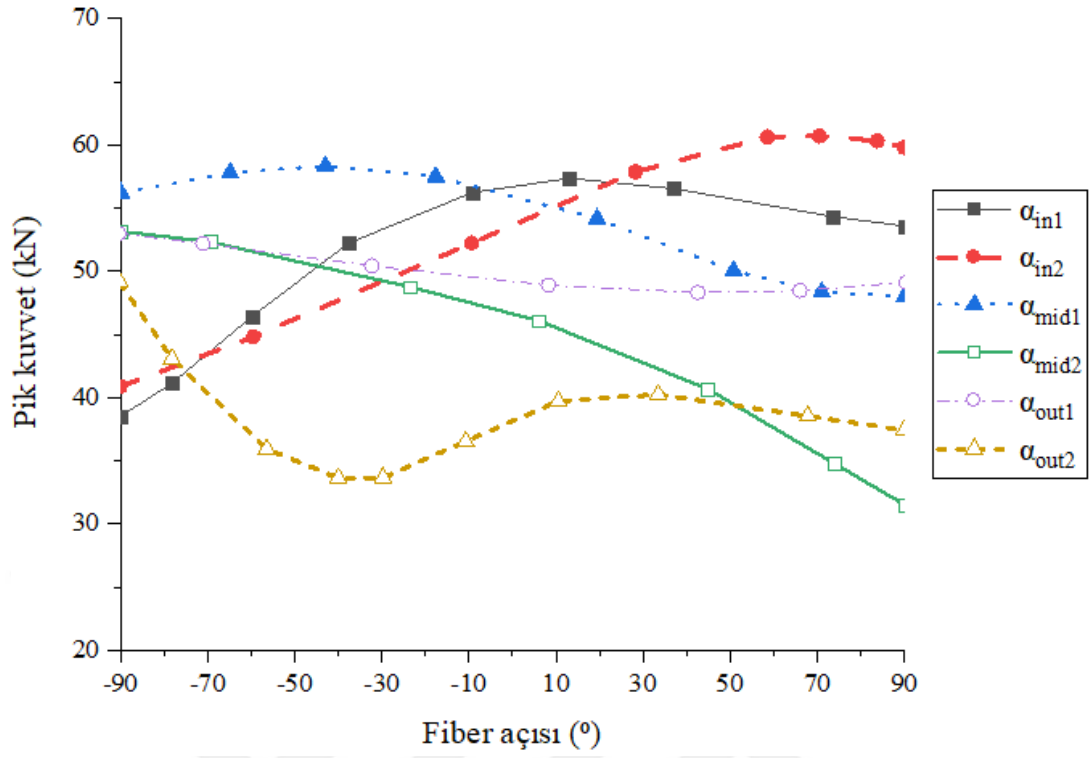
10° konikliğe sahip tüplerde elyaf açılarına bağlı SE değerlerinin değişimleri Şekil 3.35'te görülmektedir. SE değerleri α_{in1} için -90° 'de 2.32 kJ ile başlayıp -20° 'de 2.37 kJ değerine ulaşp 90° 'de 2.32 kJ ile sona ermiştir. α_{in2} için ise -90° 'de 2.37 kJ ile başlayıp azalarak 90° 'de 1.64 kJ olmuştur. Orta tüpün ilk katmanı olan α_{mid1} için -90° 'de 2.37 kJ ile başlayıp 90° 'de 1.84 kJ olurken ikinci katman olan α_{mid2} için -90° 'de 2.20 kJ ile başlayıp -40° 'de 2.37 kJ ile en yüksek değerine ulaşp 90° 'de 1.98 kJ olmuştur. Dış tüpte, α_{out1} için SE

değerleri -90° 'de 2.37 kJ ile başlayıp 90° 'de 1.98 kJ olmuş, α_{out2} için ise -90° 'de 2.24 kJ ile başlayıp 60° 'de 2.37 kJ değerine ulaşp 90° 'de 2.35 kJ olmuştur.

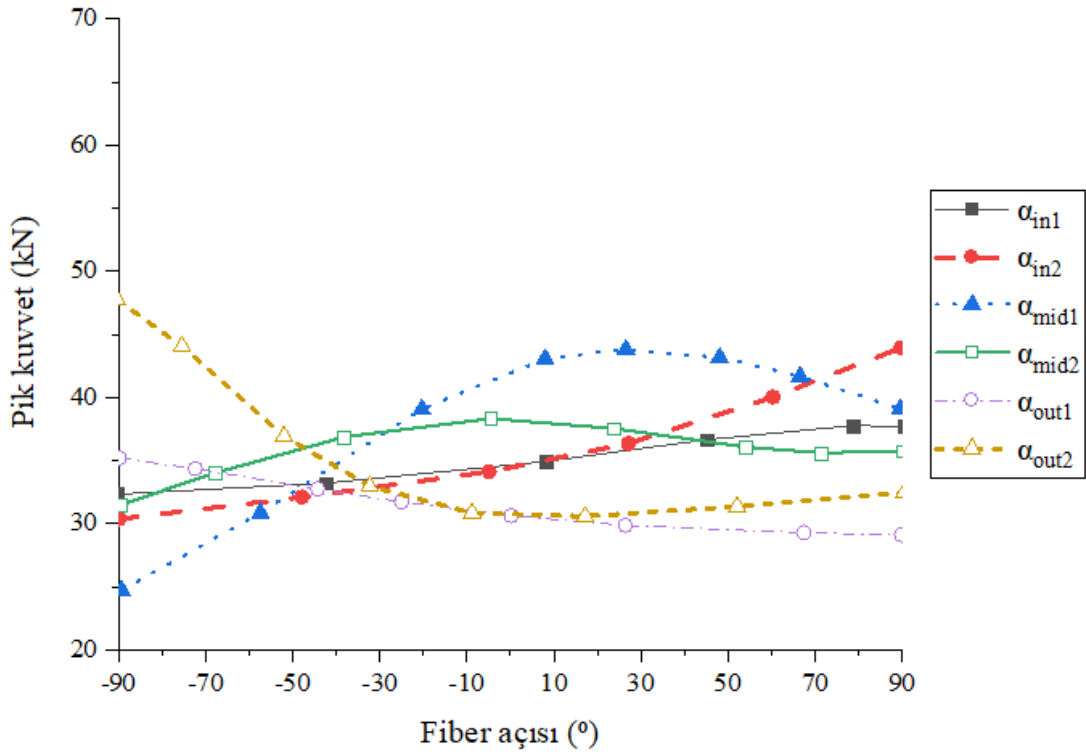


Şekil 3.35. 10° koniklik açılı kompozit tüpler için fiber açı dizilimine göre SE değerleri

Şekil 3.36'da düz kompozit tüp için elyaf açısına göre pik kuvvet değerlerinin değişimleri görülmektedir. α_{in1} için pik kuvvet değerleri -90° 'de 38.54 kN ile başlamış 10° 'de 57.36 kN'a ulaşmış ve 90° 'de 53.59 kN ile sona ererken, α_{in2} için -90° 'de 40.88 kN ile başlamış 70° 'de 60.71 kN ile en yüksek değerine ulaşmış ve 90° 'de 59.80 kN sonlanmıştır. Orta tüpte α_{mid1} için -90° 'de 56.21 kN'dan artarak -40° 'de 58.34 kN'a ulaşmış ve 90° 'de 48.01 kN'a düşmüştür. α_{mid2} için ise -90° 'de 53.18 kN'dan azalarak 90° 'de 31.51 kN'a düşmüştür. α_{out1} için -90° 'de 52.99 kN, 90° 'de ise 49.13 kN olarak gerçekleşmiş. α_{out2} için ise -90° 'de 49.12 kN, 90° 'de 37.42 kN olarak gerçekleşirken aradaki elyaf açılarında dalgalı bir seyir izlemiştir.



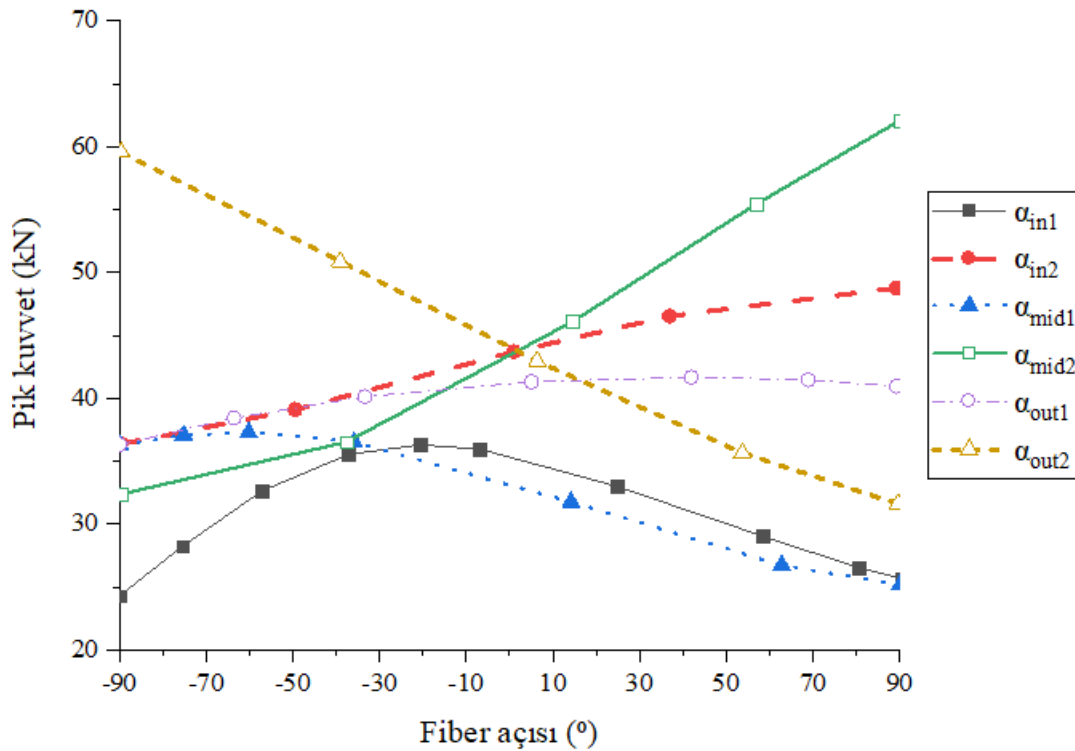
Şekil 3.36. Düz (0°) kompozit tüpler için fiber açı dizilimine göre pik kuvvet değerleri



Şekil 3.37. 5° koniklik açılı kompozit tüpler için fiber açı dizilimine göre pik kuvvet değerleri

5° konik açılı tüp için elyaf açısına göre pik kuvvet değerlerinin değişimleri Şekil 3.37’de görülmektedir. α_{in1} için pik kuvvet değerleri -90°’de 32.35 kN’dan artarak 90°’de 37.71 kN olmuştur. α_{in2} için ise benzer şekilde -90°’de 30.38 kN’dan artarak 90°’de 43.49 kN olarak gerçekleşmiştir. Orta tüpte α_{mid1} için -90°’de 24.75 kN’dan başlayarak 25°’de 43.81 kN’a kadar yükselmiş ve sonrasında azalarak 90°’de 39.12 kN olmuştur. α_{mid2} için ise -90°’de 31.48 kN’dan 90°’de 35.77 kN’a dalgalı bir seyir izleyerek yükselmiştir. Dış tüpte ise pik kuvvet değerleri α_{out1} için -90°’de 35.21 kN’dan 90°’de 29.13 kN’a, α_{out2} için -90°’de 47.76 kN’dan 90°’de 32.50 kN’a düşmüştür.

Şekil 3.38’de ise 10° konik açılı kompozit tüp için elyaf açısına göre pik kuvvet değerlerinin değişimleri görülmektedir. İç tüpte α_{in1} için pik kuvvet değerleri -90°’de 24.31 kN’dan artarak -20°’de 36.31 kN’a yükselmiş ve sonrasında azalarak 90°’de 25.72 kN olmuştur. α_{in2} için ise -90°’de 36.39 kN’dan artarak 90°’de 48.77 kN’a yükselmiştir. α_{mid1} için -90°’de 36.27 kN’dan artmaya başlayarak -60°’de en yüksek değerinden ulaşıp 90°’de 25.20 kN’a düşmüştür. α_{mid2} için -90°’de 32.40 kN’dan artarak 90°’de 62.09 kN’a yükselmiştir. α_{out1} için -90°’de 36.32 kN’dan artarak 90°’de 40.97 kN, α_{out1} için ise -90°’de 59.57 kN’dan azalarak 90°’de 31.63 kN olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 3.38. 10° konik açılı kompozit tüpler için fiber açısı dizilimine göre pik kuvvet değerleri

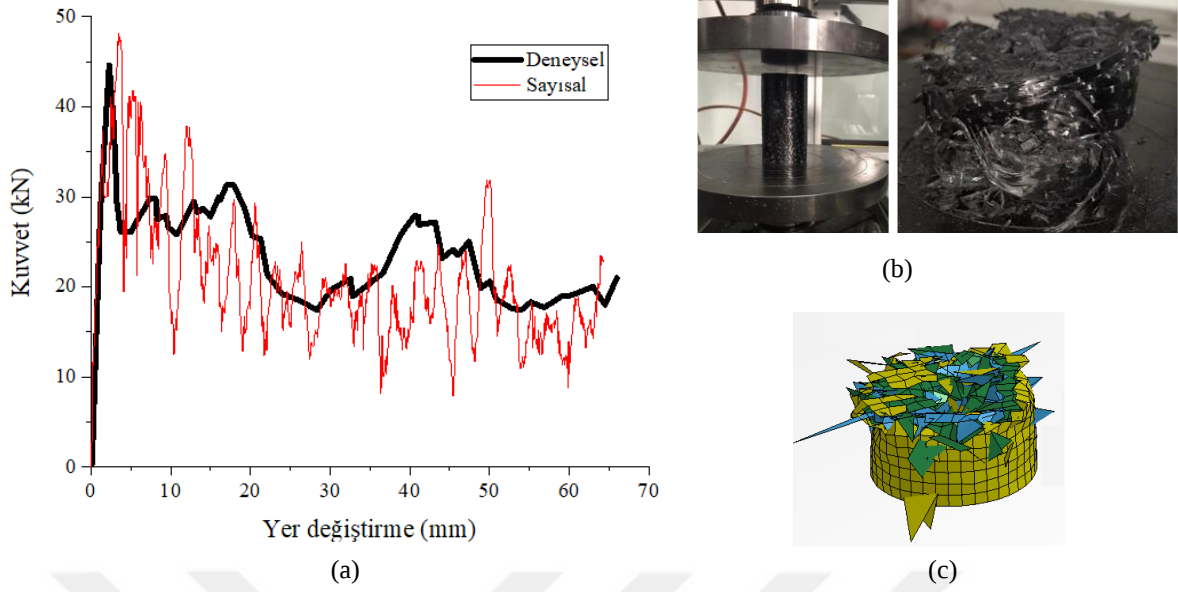
3.5.2. Kompozit Tüplerin Optimizasyon Sonuçları

Tablo 3.6’da altı elyaf katmanına sahip 0° , 5° ve 10° konik açılı kompozit tüplerin optimizasyon sonucunda elde edilen optimum elyaf açıları, SE’ler ve pik kuvvet değerleri verilmektedir. Düz tüplerde optimum elyaf açısı dizilimi -50° , 30° , 60° , -30° , 90° , -90° ; 5° tüplerde -80° , -40° , 50° , -90° , -40° , 90° ve 10° tüplerde ise -20° , 90° , -90° , 40° , -90° , 50° olarak gerçekleşmiştir. Artan koniklik açısına göre pik kuvvet değerleri 47.77 kN, 41.09 kN ve 37.13 kN olarak gerçekleşirken SE değerleri ise 1.34 kJ, 1.58 kJ ve 1.54 kJ olarak gerçekleşmiştir.

Tablo 3.6. ÇAO ile elde edilen optimum fiber açısı hizalaması

Koniklik açısı ($^\circ$)	α_{in1}	α_{in2}	α_{mid1}	α_{mid2}	α_{out1}	α_{out2}	SE (kJ)	Pik Kuvvet (kN)
0 (Düz)	-50	30	60	-30	90	-90	1.50	48.21
5	-80	-40	50	-90	-40	90	1.78	43.83
10	-20	90	-90	40	-90	50	1.84	38.17

Optimum elyaf açısı dizilimine sahip konik kompozit tüplerin üretilmesindeki zorluklar nedeniyle sadece optimum elyaf açısı dizilimli düz tüp üretilmiştir. Şekil 3.39’da optimum elyaf açısı dizilimli düz tüpün statik basma deneyinin sayısal analiz ile karşılaştırılması ve deformasyon öncesi ve sonrası fotoğrafları görülmektedir. Şekil 3.39 (a)’dan sayısal analiz ile deney sonuçlarından elde edilen kuvvet- yer değiştirme grafiklerinin, Şekil 3.39 (b) ve (c)’den deformasyon sonrası görüntülerinin uyumlu olduğu görülmektedir.



şekil 3.39. Optimum fiber açı hizalamasına sahip düz tüp için deneysel ve sayısal modelin karşılaştırılması (a) kuvvet-yer değiştirme grafiği, (b) deney öncesi ve sonrası deney numunesi, (c) sayısal analiz

Kompozit tüplerin elyaf açı diziliminin optimizasyon işleminin doğruluğu 0°, 5° ve 10° koniklik açıları için gerçekleştirilen toplam 129 sayısal analiz için hesaplanan R^2 değerlerine bakılarak belirlenmiştir. SE ve ÇKO için en düşük R^2 değerleri Tablo 3.7’de verilmiştir. Tablodan görüleceği gibi en düşük R^2 değerleri SE ve ÇKO için 0.95 olmuştur.

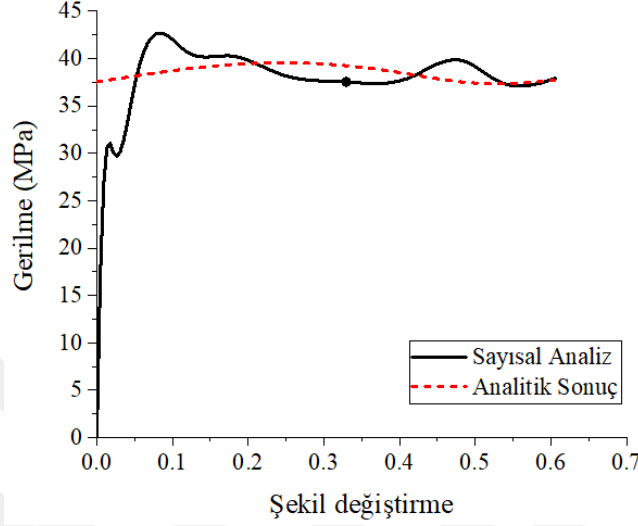
Tablo 3.7. Kompozit tüplerin optimizasyonundan elde edilen en küçük R^2 değerleri

Koniklik Açısı (°)	R^2 değerleri	
	SE	ÇKO
0	0.97	0.95
5	0.95	0.98
10	0.97	0.97

3.6. Hibrit Tüpler Üzerine Gerçekleştirilen Çalışmalardan Elde Edilen Bulgular

Düzgün parçacık hidrodinamiği (DPH) modelinin doğruluğu Tablo 2.4 ve Denklem 2.1’den elde edilen analitik gerilme-şekil değiştirme eğrisi ile sayısal analizden elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrisinin karşılaştırılması ile sağlanmıştır. şekil 3.40’te köpük

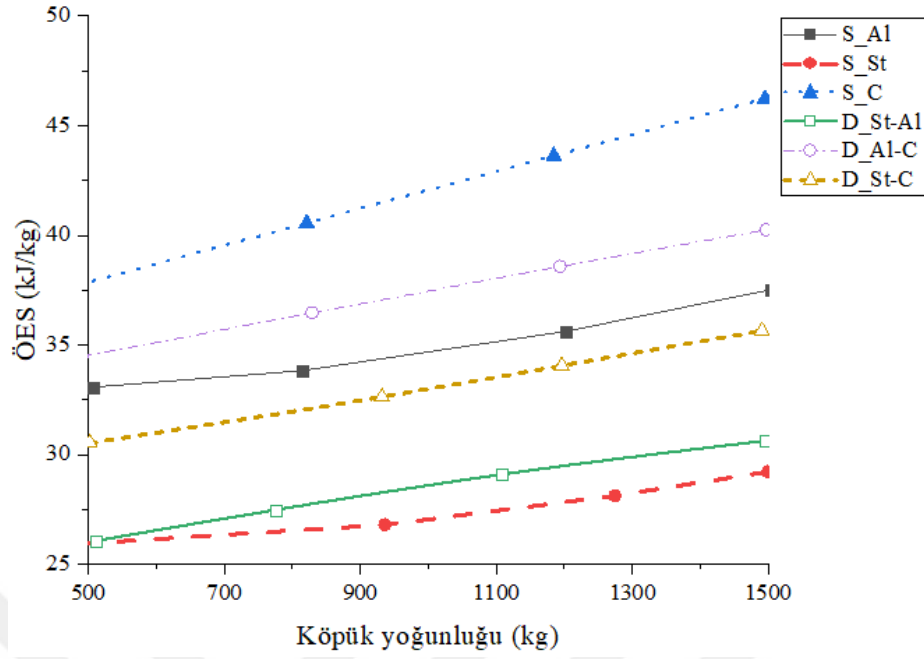
malzeme için enerji sönümlemede önemli bir özellik olan plato gerilmesinin analitik ve sayısal karşılaştırılması verilmektedir. Şekilden görüldüğü gibi hem analitik hem de sayısal plato gerilme sonuçları birbirleriyle uyumlu çıkmıştır.



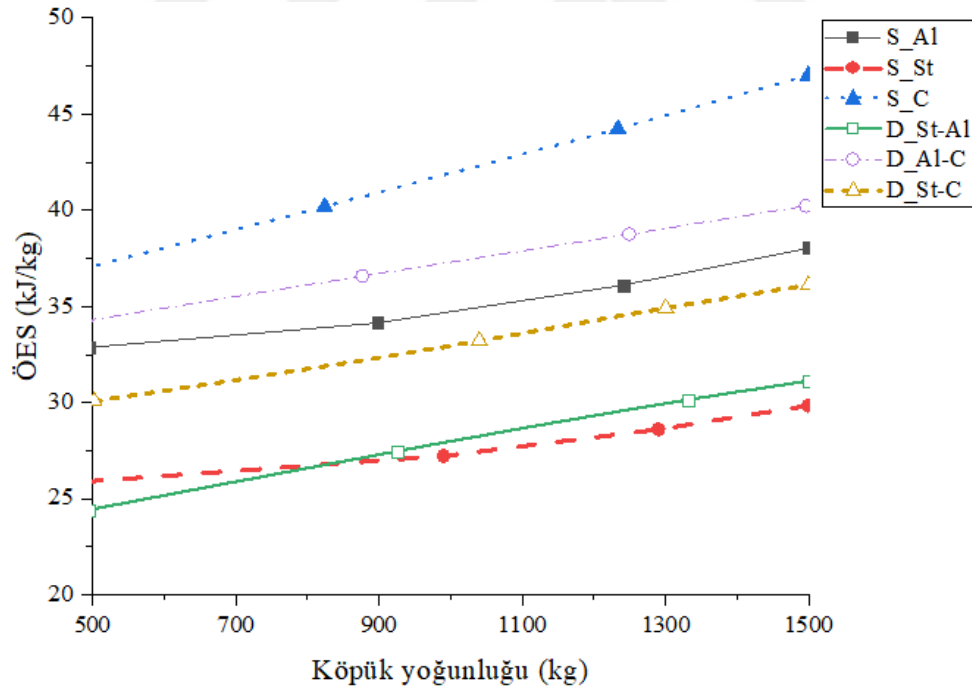
Şekil 3.40. Alüminyum köpük için analitik ve sayısal gerilme-şekil değiştirme eğrisi

3.6.1. Köpük Dolgusunun SE ÇKO ve Pik Kuvvete Etkisi

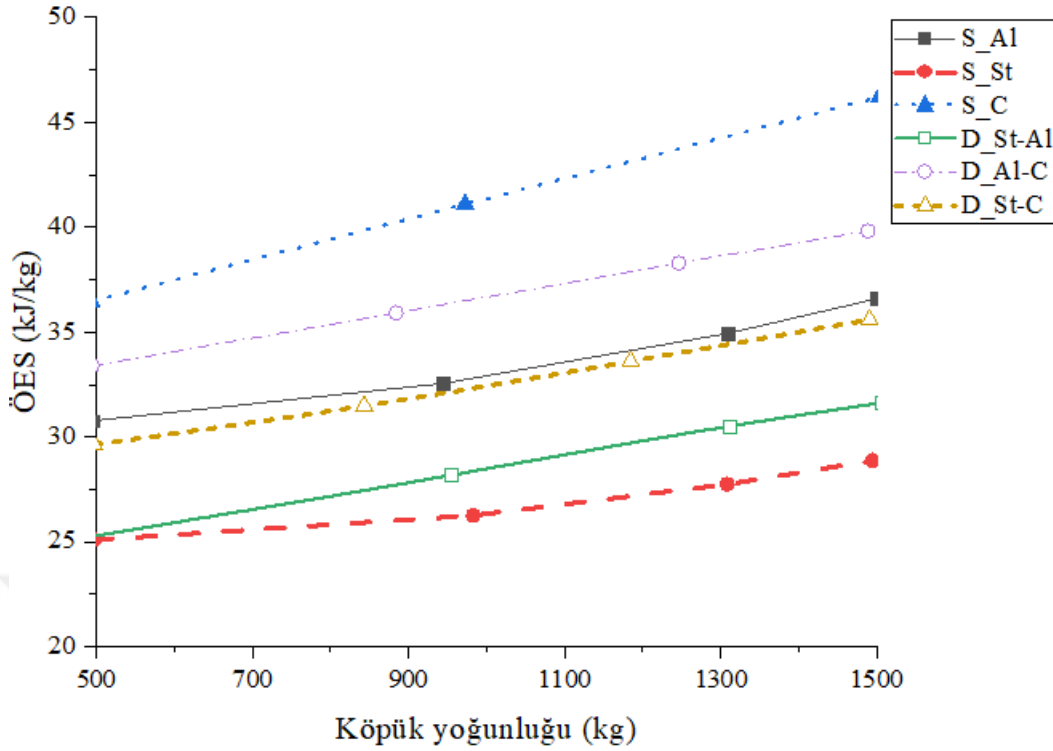
Bu bölümde tekli ve ikili tüplerde dolgu malzemesi olarak kullanılan Köpük 1 (500 kg/m^3), Köpük 2 (750 kg/m^3) ve Köpük 3 (1000 kg/m^3)'ün ÖES, ÇKO ve pik kuvvete etkileri incelenmiştir. ÇAO için elde edilen amaç fonksiyonlarına göre köpük yoğunluğuna bağlı grafikler çizilmiştir. Şekil 3.41, Şekil 3.42 ve Şekil 3.43'ten görülebileceği gibi tekli ve ikili tüplerin tümünde sırasıyla Köpük 1, Köpük 2 ve Köpük 3 yoğunluklarının artması ile ÖES değerlerinde artış meydana gelmiştir. En yüksek ÖES artışı Köpük 1 için S_C tüpte, Köpük 2 için için D_AL-St tüpte ve Köpük 3 için S_C tüpte meydana gelmiştir. D_AL-St tüp, çelik bölgesinden deformasyona başladığı ya da çelik bölgenin ikinci olarak deforme olmaya başladığı durumlarda Köpük 2 ile etkileşime geçmektedir. Bundan dolayı D_AL-St tüpte, Köpük 2'nin ÖES'ye etkisi daha fazla olmaktadır.



Şekil 3.41. Özgül enerji sönümlemenin Köpük 1 yoğunluğuna göre değişimi



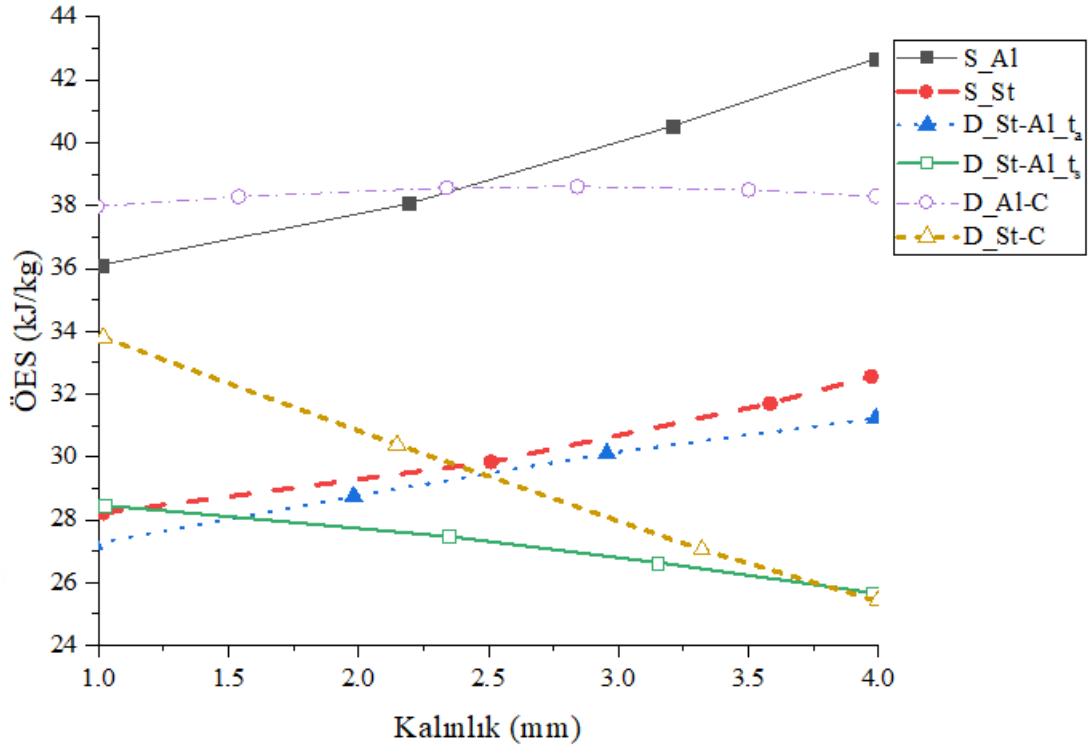
Şekil 3.42. Özgül enerji sönümlemenin Köpük 2 yoğunluğuna göre değişimi



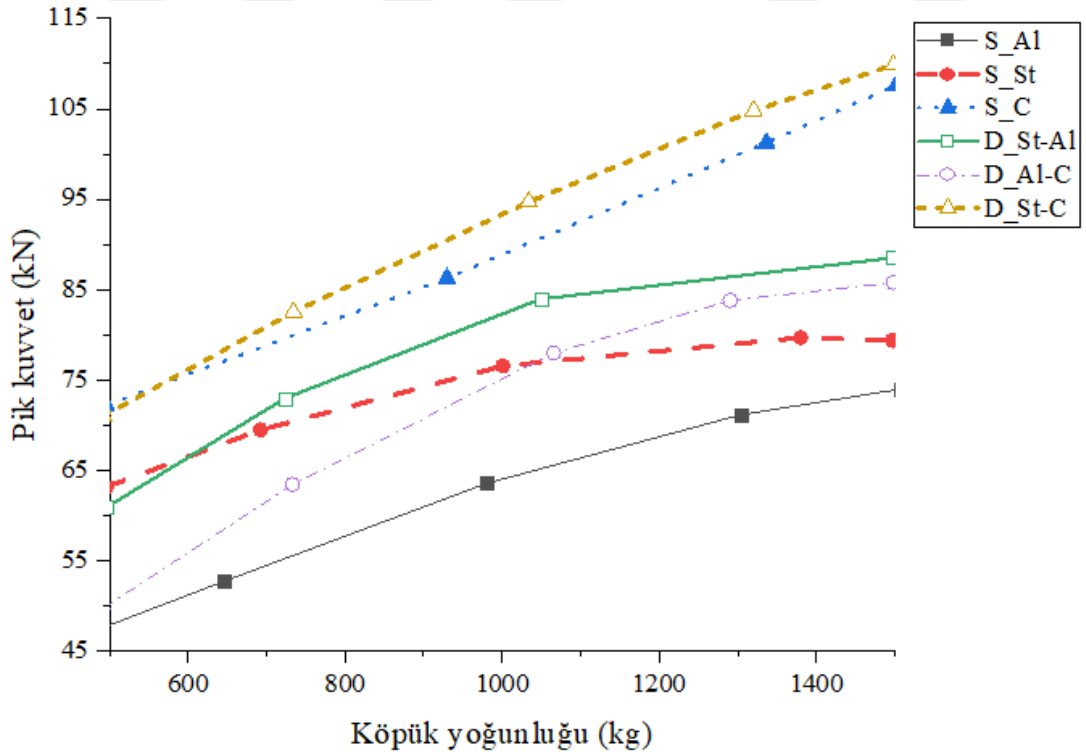
Şekil 3.43. Özgöl enerji sönümlemenin Köpük 3 yoğunluğuna göre değişimi

Şekil 3.44'te tekli ve ikili tüplerde cidar kalınlığına göre ÖES değerlerindeki değişim görülmektedir. ÖES değerleri, tekli metalik tüplerde (S_St ve S_Al) cidar kalınlığının artması ile literatürden de görülebileceği gibi [186,187] artmaktadır. İkili metalik tüplerde ÖES değerleri, alüminyum tüpün cidar kalınlığına (D_St-Al_{ta}) göre artarken çelik tüpün (D_St-Al_{ts}) cidar kalınlığına göre azalmaktadır. Bu azalışta, artan çelik tüp kalınlığına bağlı olarak toplam kütlenin artması ve toplam çarpışma mesafesi olan 50 mm'nin yalnız 10 mm'lik kısmının çelik tüpte gerçekleşmesi etkili olmuştur.

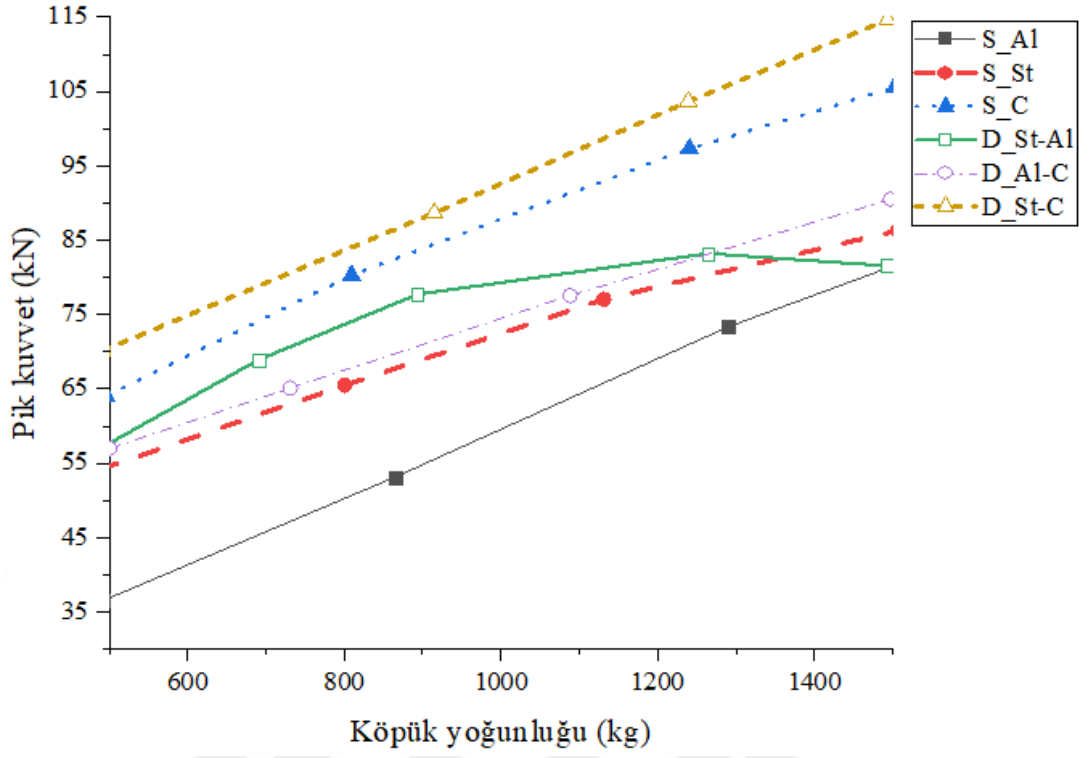
Köpük yoğunluğuna bağlı pik kuvvet değerlerinin değişimleri Şekil 3.45, Şekil 3.46 ve Şekil 3.47'de görülmektedir. Tekli ve ikili tüplerin tümünde köpük yoğunluğunun artması ile literatürde [188] de olduğu gibi, pik kuvvet değerleri artmaktadır.



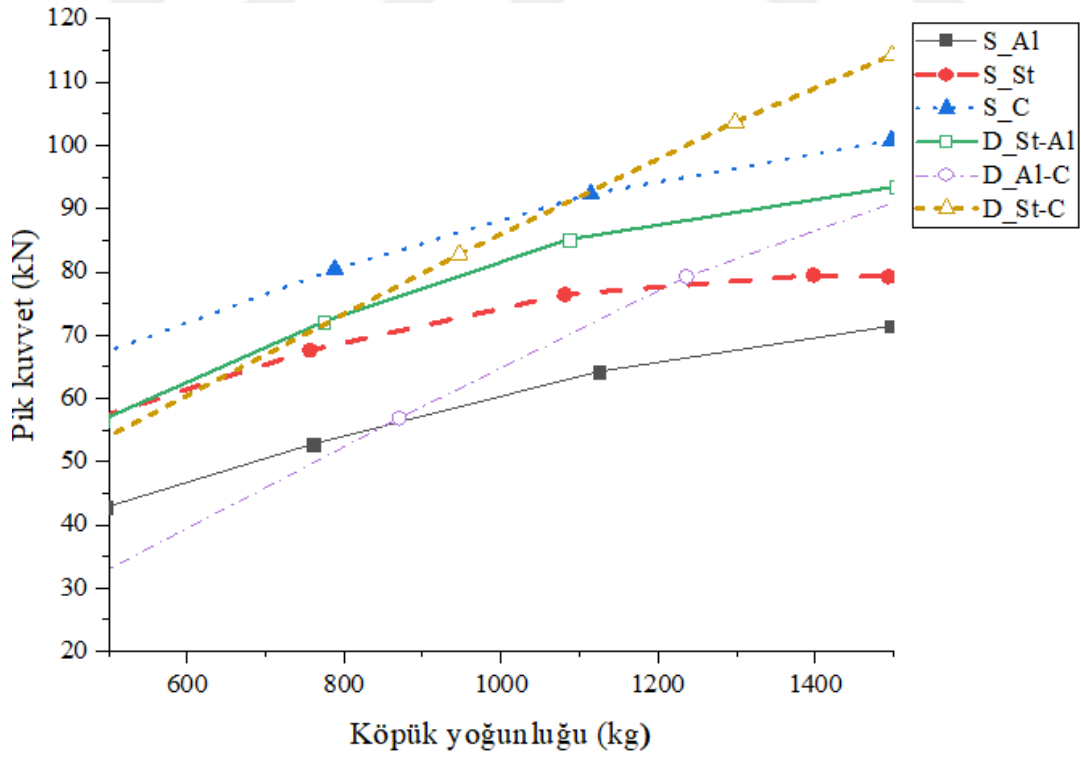
Şekil 3.44. Cidar kalınlığına göre ÖES değişimleri



Şekil 3.45. Köpük 1'in yoğunluğuna göre pik kuvvetin değişimleri

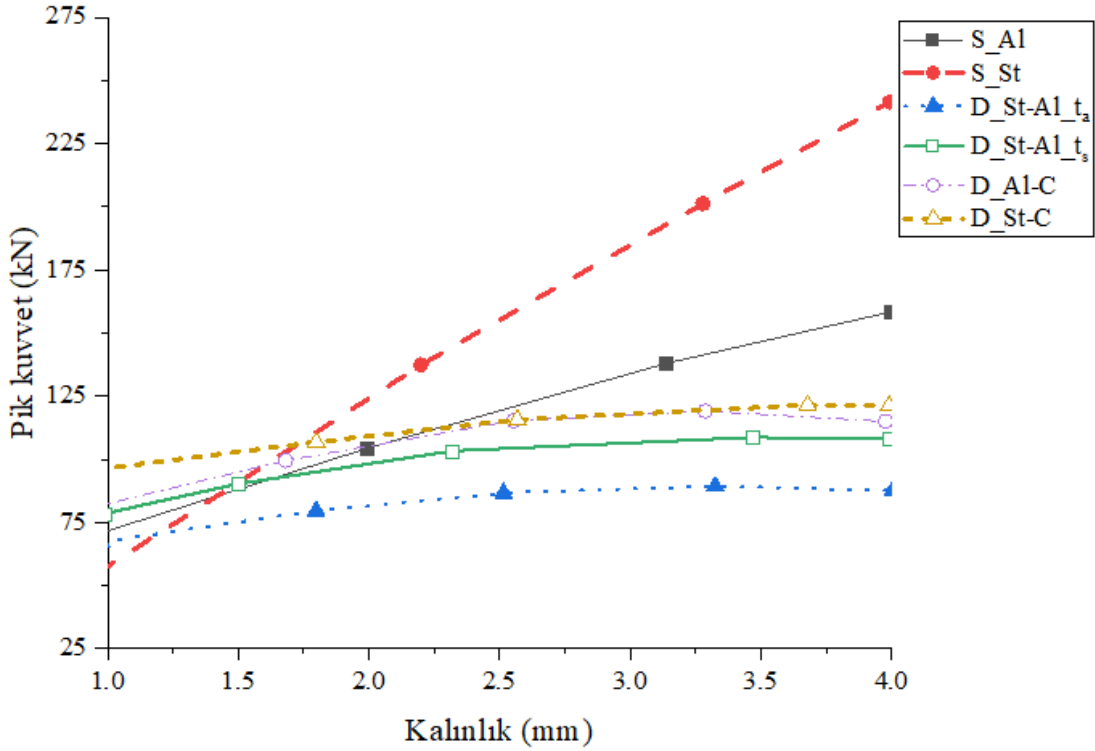


Şekil 3.46. Köpük 2'nin yoğunluğuna göre pik kuvvetin değişimleri



Şekil 3.47. Köpük 3'ün yoğunluğuna göre pik kuvvetin değişimleri

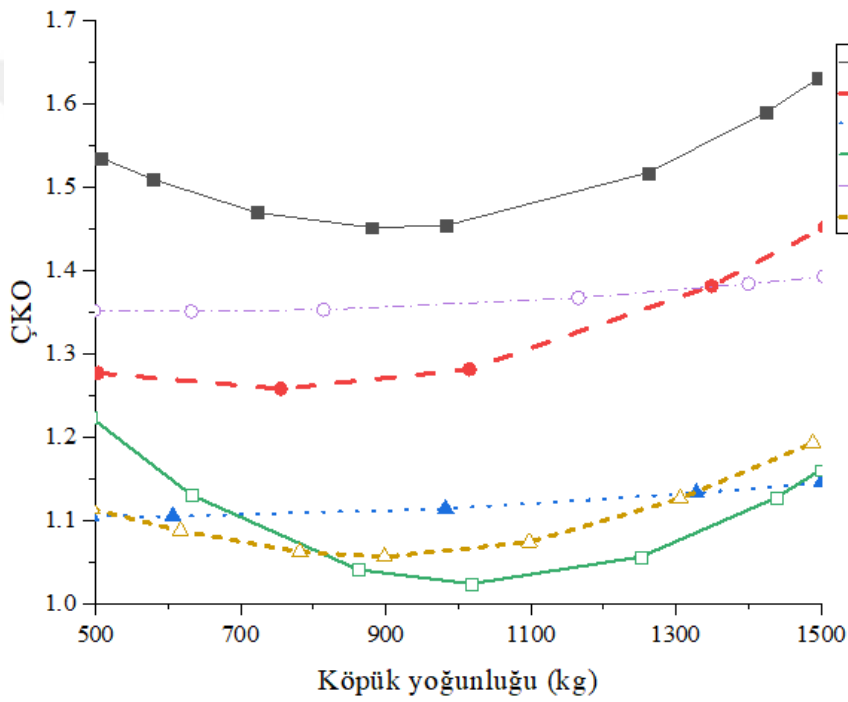
Şekil 3.48’de cidar kalınlığına bağlı olarak pik kuvvet değerlerinin değişimi görülmektedir. Tekli metalik tüplerde cidar kalınlığına bağlı olarak pik kuvvet değerlerinde literatürde görüldüğü gibi artış meydana gelmiştir [189,190]. D_St-C tüpte ilk deformasyon kompozit tüpte başladığı için çelik tüpün cidar kalınlığının pik kuvvet üzerine etkisi görülmemiştir. D_Al-C tüpte ise alüminyumun düşük cidar kalınlıklarında ilk deformasyon alüminyum tüpte başlarken cidar kalınlığının artması ile ilk deformasyon kompozit tüpte başlamıştır. Bu sebeple D_Al-C tüpte, alüminyumun cidar kalınlığının pik kuvvete etkisi S_Al tüp kadar görülmemiştir.



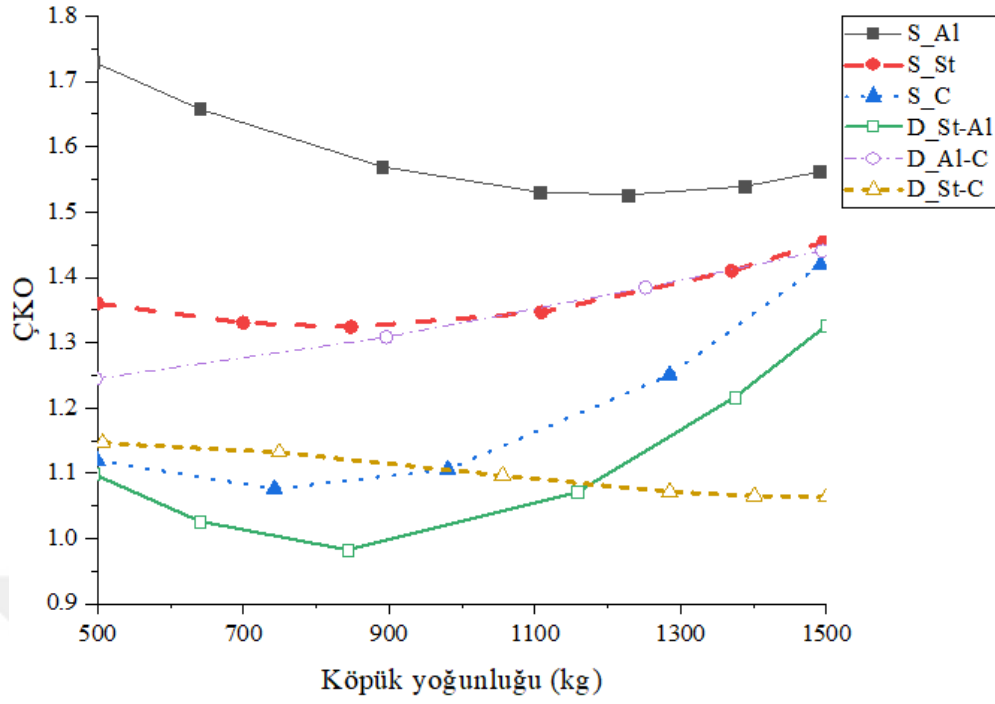
Şekil 3.48. Cidar kalınlığına göre pik kuvvet değişimleri

Şekil 3.49, Şekil 3.50 ve Şekil 3.51’den Köpük 1, Köpük 2 ve Köpük 3 için ÇKO değerlerinin değişimi görülmektedir. ÇKO değerleri genel olarak ortalama kuvvetin pik kuvvete oranı şeklinde hesaplanmaktadır. İçi boş geleneksel tüpler için pik kuvvet (F_{pik}) değerleri deformasyon boyunca ortaya çıkan en yüksek kuvvet (F_{mak}) değeri olurken (Şekil 1.5 a), tekli ve ikili hibrit tüplerde pik kuvvet değerleri ile maksimum kuvvet değerleri aynı olmamaktadır (Şekil 1.5 c). Optimizasyon çalışmalarında maksimum kuvvetin üst sınırı 150 kN olarak seçilmiştir. ÇKO, pik kuvveti düşürmek amacıyla literatürde daha önce de

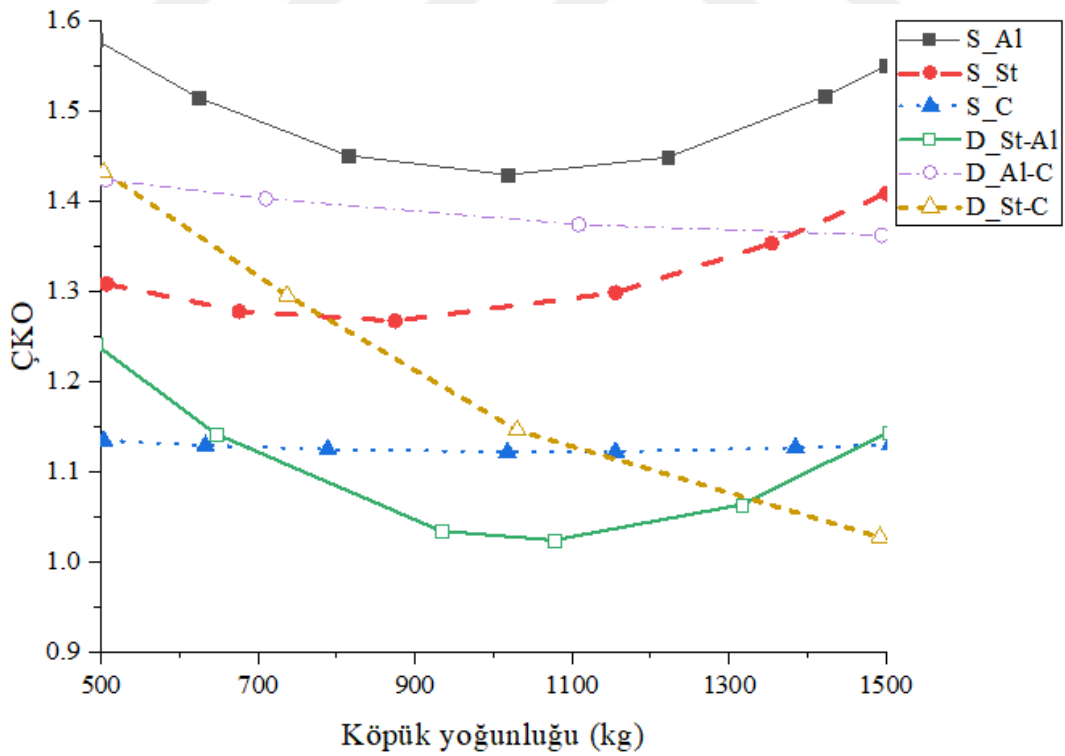
görüldüğü gibi [114,191] ortalama kuvvetin pik kuvvete oranı şeklinde hesaplanmıştır. S_Al, S_St ve D_St-Al tüplerde Köpük 1, Köpük 2 ve Köpük 3 için köpük yoğunluğunun artması ile ÇKO önce azalırken sonra artmıştır. Bunun nedeni, köpük yoğunluklarının belirli bir değere kadar pik kuvvet değişimi üzerine etkisinin olmamasıdır. Başka bir ifade ile düşük köpük yoğunluklarında, pik kuvvet üzerine tüplerin et kalınlıkları daha etkilidir. S_C tüpte, köpük yoğunluğuna göre Köpük 1 ve Köpük 3 için yatay bir seyir izlerken Köpük 2 için önce azalmış sonra artmıştır. D_St-C tüpte ise ÇKO değerleri köpük yoğunluğunun artması ile Köpük 1 için artarken Köpük 2 ve Köpük 3 için azalmıştır.



Şekil 3.49. Köpük 1'in yoğunluğuna göre ÇKO'nun değişimleri

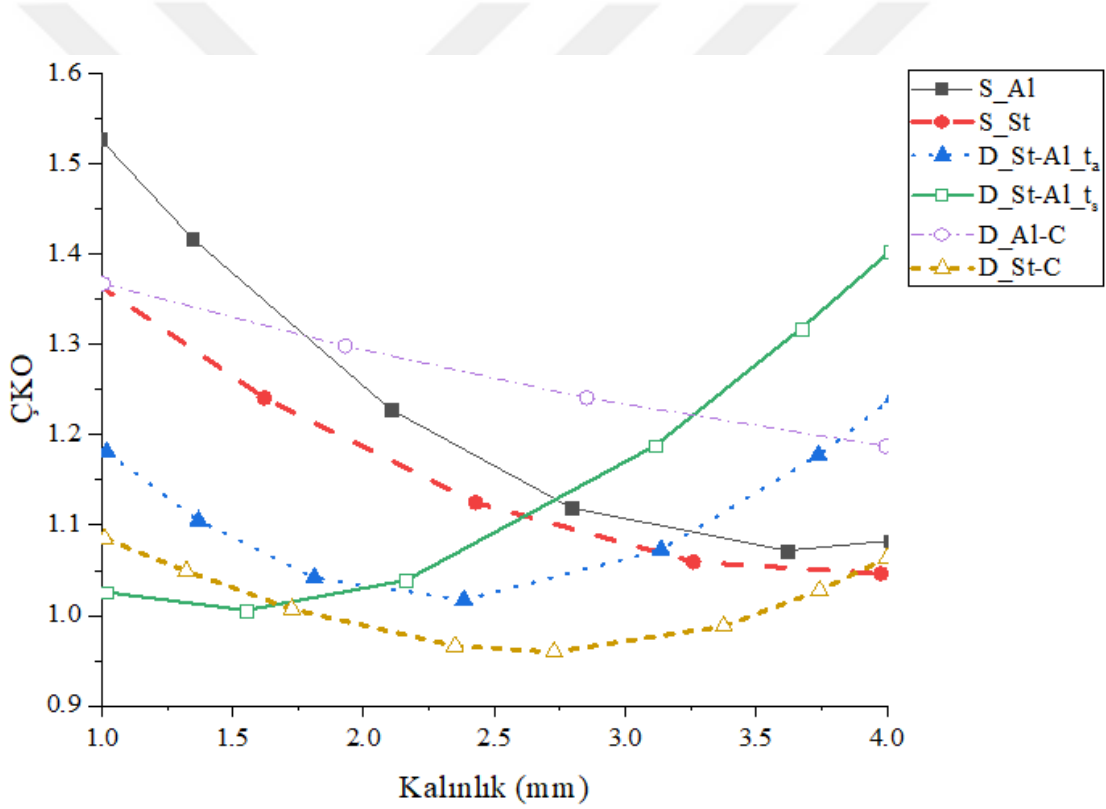


Şekil 3.50. Köpük 2'nin yoğunluğuna göre ÇKO'nun değişimleri



Şekil 3.51. Köpük 3'ün yoğunluğuna göre ÇKO'nun değişimleri

Şekil 3.52’de cidar kalınlığına göre ÇKO’daki değişimler görülmektedir. Şekilden artan cidar kalınlığına göre ÇKO değerlerinin, $D_St-Al_{t_a}$ ve $D_St-Al_{t_s}$ kalınlığı hariç, azaldığı görülmektedir. Kalınlığın artmasına bağlı olarak pik kuvvet değerlerinde, ortalama kuvvete göre daha yüksek oranda artış meydana geleceğinden ÇKO değerlerinin düşmesi beklenen bir durumdur [192]. D_St-Al tüp için gerçekleştirilen analizlerde alüminyum ve çelik tüp kalınlıklarına göre ilk deformasyonun başladığı tüp değişmektedir. Çelik tüpün kalınlığının artması ile alüminyum tüp ilk deforme olacak ve bu durum pik kuvvet değerini azaltacaktır. Benzer şekilde alüminyum tüp kalınlığının artması ile ilk deformasyon çelik tüpte başlayacaktır. Bu durum pik kuvvet değerlerini azaltacağından D_ST-Al tüpte ÇKO değerlerinde artış meydana gelmektedir.



Şekil 3.52. Cidar kalınlığına göre ÇKO değişimleri

3.6.2. Hibrit Tüplerin Optimizasyon Sonuçları

ÇAO ile elde edilen optimum cidar kalınlıkları ve köpük yoğunlukları Tablo 3.1’de görülmektedir. Optimizasyonda ÖES değerlerinin en yüksek olması amaç olarak seçilmiştir. Metalik köpüklerin ÖES değerlerinin metallere göre yüksek olması, tekli ve ikili tüplerde cidar kalınlıklarının en düşük değerleri almasına sebep olmuştur. Köpük yoğunlukları ise

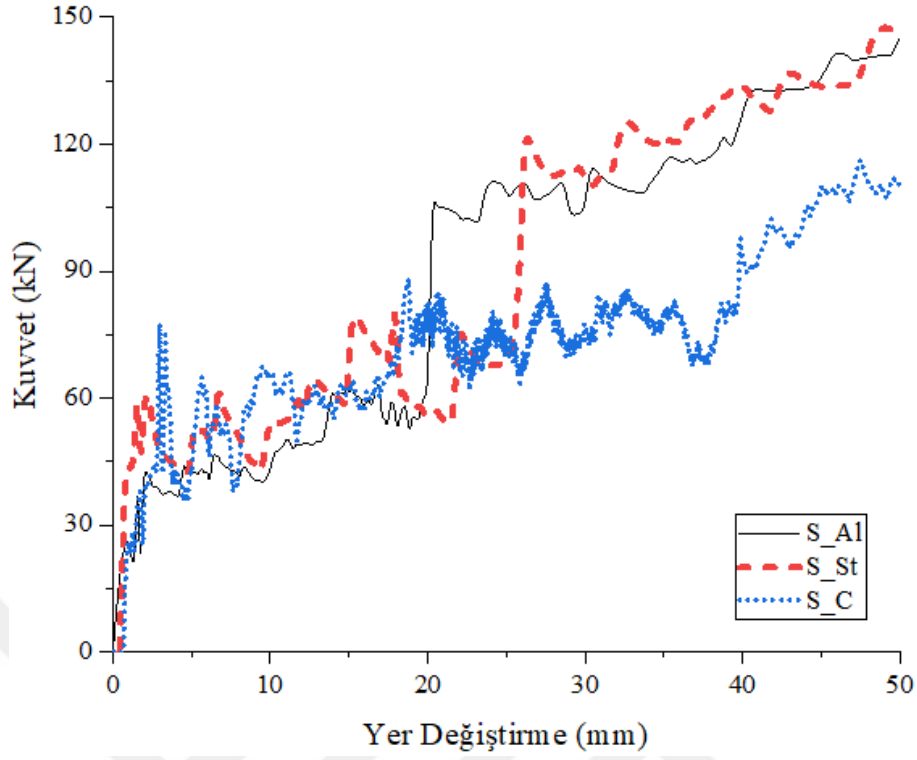
optimizasyonda sınır şartı olarak tanımlanan 150 kN değerini aşmayacak şekilde maksimum değerlerini almıştır.

Tablo 3.8. Hibrit tüplerin ÇAO ile elde edilen et kalınlıkları ve köpük yoğunlukları

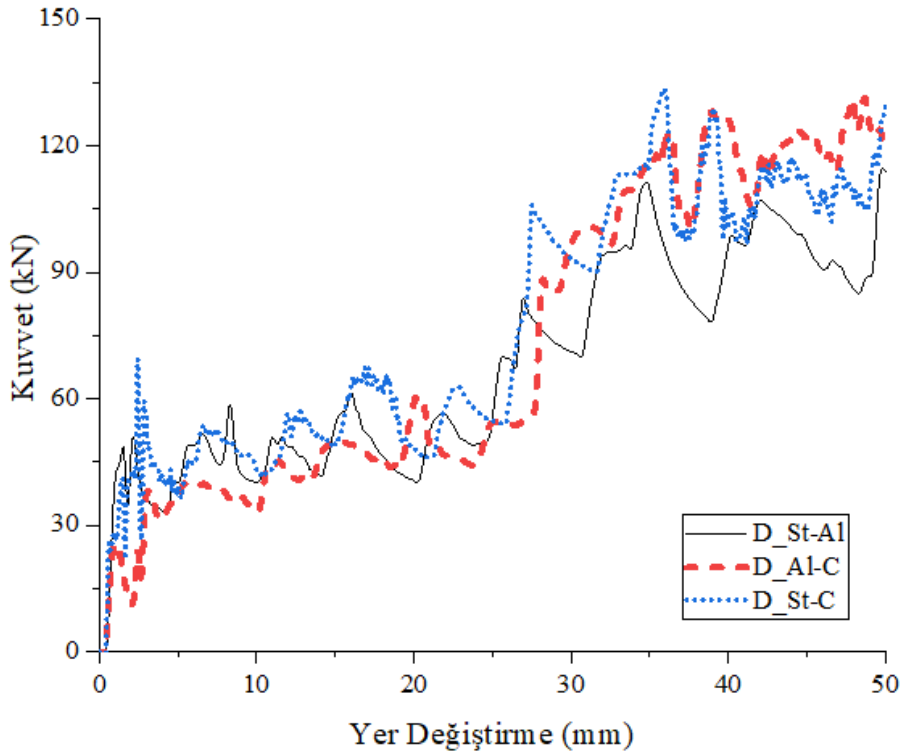
	t_a (mm)	t_s (mm)	Köpük 1 (kg/m³)	Köpük 2 (kg/m³)	Köpük 3 (kg/m³)
S_Al	1	-	1288	1243	1450
S_St	-	1	1302	1212	1390
S_C	-	-	1156	1136	1203
D_St-Al	1.9	1	974	1073	998.4
D_Al-C	1	-	1162	1181	1267
D_St-C	-	1	1151	1136	1210

Optimum cidar kalınlığı ve köpük yoğunluğuna sahip tekli ve ikili tüpler için sayısal analizlerden elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri Şekil 3.53 ve Şekil 3.54'te görülmektedir. Köpük dolgulu tekli ve ikili tüplerde gerilme-şekil değiştirme grafikleri köpük malzemesinin sıkışması sebebiyle sürekli artan bir eğilim göstermiştir.

Metalik köpüklerin gerilme-şekil değiştirme diyagramında doğrusal, plato ve çökme bölgeleri bulunmaktadır. Sayısal analizlerde; ilk deformasyon en düşük yoğunluklu köpüğün doğrusal bölgesinde başlamış, plato bölgesine ulaşmadan ikinci düşük yoğunluklu köpüğün doğrusal bölgesinin deformasyonu ile devam etmiştir. İkinci düşük yoğunluklu köpük için de plato bölgesine ulaşmadan yüksek yoğunluklu köpüğün doğrusal bölgesinde deformasyon başlamıştır. Böylece bütün köpükler için doğrusal bölge deformasyonları tamamlanmış, sonrasında plato bölgesi deformasyonları başlamıştır. Şekil 3.53'de tekli tüpler için 20-25 mm deformasyon mesafesinde doğrusal bölge deformasyonlarının bitmesi ve plato bölgesi deformasyonlarının başlaması ile kuvvet değerinde bir artış olduğu görülmüştür. Şekil 3.54'den görülebileceği gibi ikili tüplerde daha düşük mukavemete sahip tüpün deformasyonun bitmesi ve ikinci tüpün deformasyona başlaması ile kuvvet değerlerinde bir artış olmuştur.



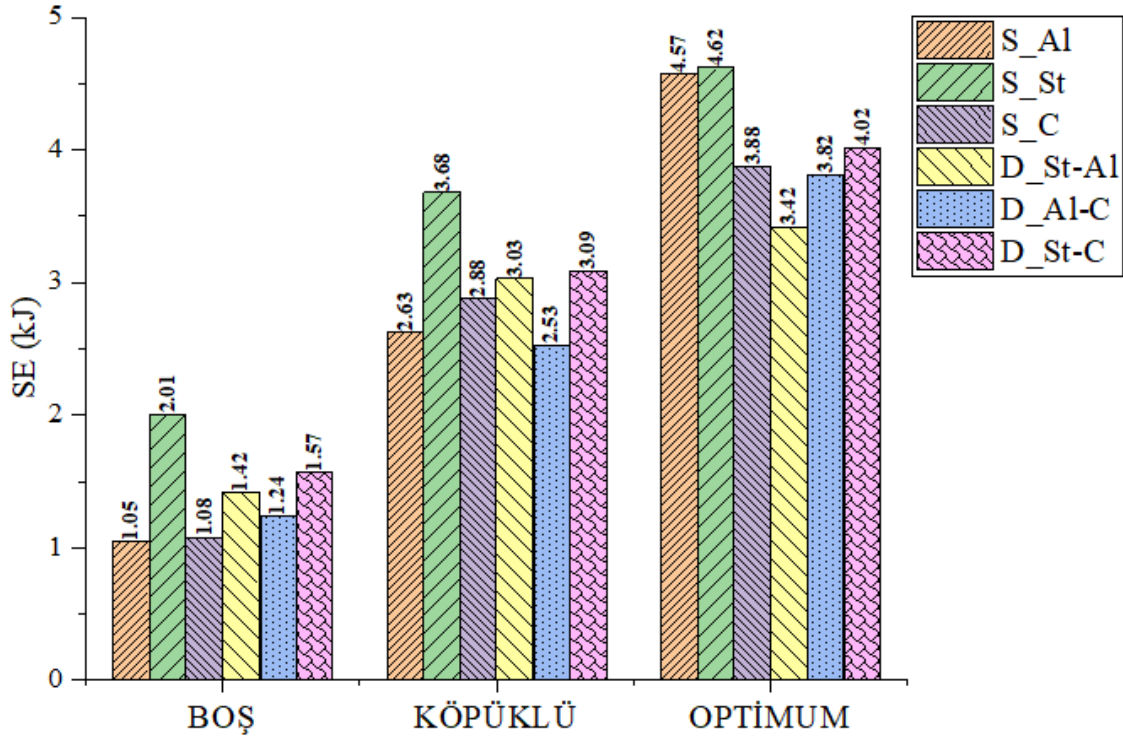
Şekil 3.53. Optimum kalınlık ve köpük yoğunluğuna sahip tekli tüplerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri



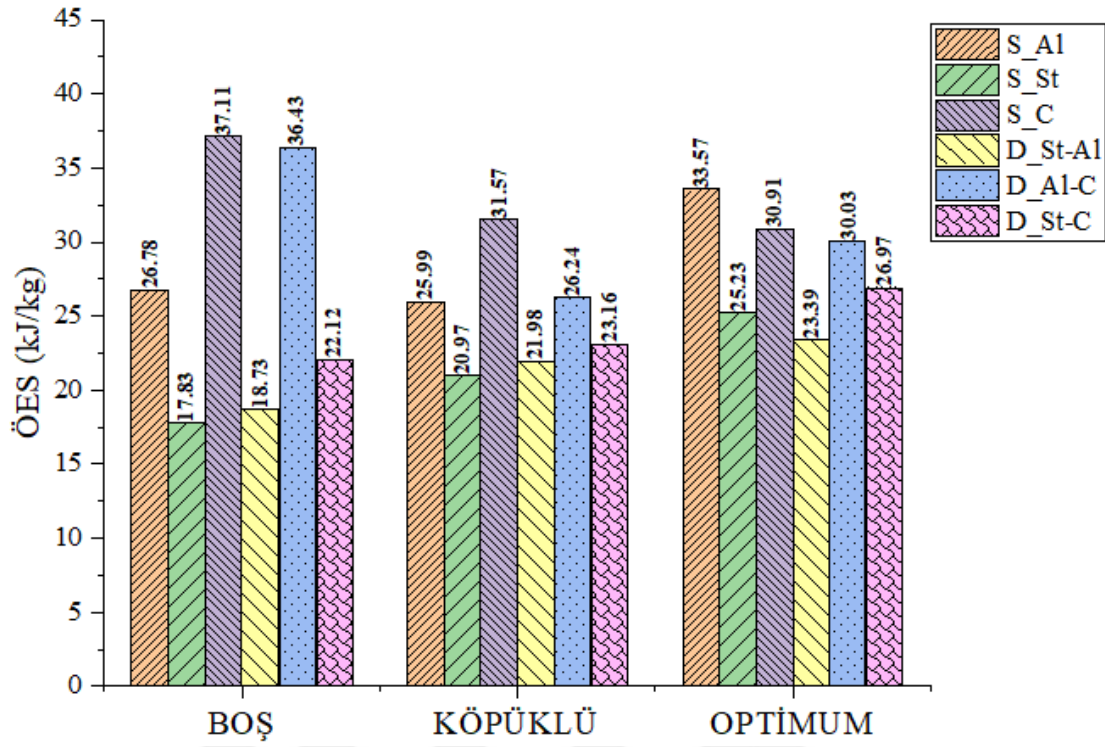
Şekil 3.54. Optimum kalınlık ve köpük yoğunluğuna sahip ikili tüplerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri

Şekil 3.55 ve Şekil 3.56'da 1.5 mm cidar kalınlıklarına sahip içi boş; 500 kg/m³ yoğunluklu Köpük 1, 750 kg/m³ yoğunluklu Köpük 2 ve 1000 kg/m³ yoğunluklu Köpük 3 dolgulu ve Tablo 3.8'de verilen optimum et kalınlığı ve köpük dolgusuna sahip tüpler için SE ve ÖES değerleri verilmiştir. S_Al, S_St, S_C, D_St-Al, D_Al-C ve D_St-C tüpler için sönümlenen enerji değerleri içi boş durumda sırasıyla 1.05 kJ, 2.01 kJ, 1.07 kJ, 1.41 kJ, 1.24 kJ, 1.57 kJ; köpük dolgulu durumda sırasıyla 2.63 kJ, 3.68 kJ, 2.88 kJ, 3.03 kJ, 2.53 kJ, 3.09 kJ ve optimizasyon analizi sonucunda sırasıyla 4.57 kJ, 4.62 kJ, 3.88 kJ, 3.42 kJ, 3.82 kJ, 4.02 kJ olarak gerçekleşmiştir.

Şekil 3.56'dan görülebileceği gibi optimum et kalınlığı ve köpük yoğunluğuna sahip S_Al, S_St, D_St-Al, D_St-C tüplerin ÖES değerleri içi boş ve köpük dolgulu tüplere göre daha yüksek hesaplanmıştır. S_Al, S_St, D_St-Al, D_St-C tüplerin ÖES değerleri; içi boş durumda sırasıyla 26.78 kJ/kg, 17.83 kJ/kg, 18.73 kJ/kg, 22.12 kJ/kg, köpük dolgulu durumda sırasıyla 25.99 kJ/kg, 20.97 kJ/kg, 21.98 kJ/kg ve 23.16 kJ/kg ve optimizasyon analizi sonucunda sırasıyla 33.57 kJ/kg, 25.23 kJ/kg, 23.39 kJ/kg ve 26.97 kJ/kg olarak elde edilmiştir.



Şekil 3.55. 1,5 mm cidar kalınlıklarına sahip içi boş ve köpüklü (500 kg/m³ (Köpük 1), 750 kg/m³ (Köpük 2) ve 1000 kg/m³ (Köpük 3)) optimum cidar kalınlığına ve köpük yoğunluğuna sahip tüpler (Tablo 3.8) için sönümlenen enerji değerleri



Şekil 3.56. 1,5 mm cidar kalınlıklarına sahip içi boş ve köpüklü (500 kg/m^3 (Köpük 1), 750 kg/m^3 (Köpük 2) ve 1000 kg/m^3 (Köpük 3)) optimum cidar kalınlığına ve köpük yoğunluğuna sahip tüpler (Tablo 3.8) için sönmölen enerji değöerleri

Tekli ve ikili hibrit tüplerin optimizasyon analizlerinde S_Al, S_St, S_C, D_St-Al, D_Al-C ve D_St-C tüpler için toplamda 140 analiz gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerden elde edilen en düşük R^2 değöerleri Tablo 3.9’da görölmektedir. Tablodan görölebileceğı gibi ÖES ve F_{pik} için en düşük R^2 değöerleri sırasıyla 0.87, 0.93 olarak geröekleşmiştir.

Tablo 3.9. İkili hibrit tüplerin optimizasyonundan elde edilen en küçük R^2 değöerleri

	R ² değöerleri	
	ÖES	Pik Kuvvet
S_Al	0.93	0.98
S_St	0.92	0.99
S_C	0.95	0.97
D_St-Al	0.94	0.94
D_Al-C	0.98	0.94
D_St-C	0.87	0.93

4. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında; ince cidarlı tüplerin koniklik, et kalınlığı, kalınlık değişimi, kompozit elyaf açılı dizilimi, köpük dolgusu, hibritleşme şekli gibi yapısal parametrelerin enerji sönümlenme davranışına etkisi incelenmiştir. Çalışmanın ilk bölümünde 0° , 5° ve 10° konik açılı sekiz farklı kalınlık bölgesine sahip metalik değişken kalınlıklı tüplerin (DKT) enerji sönümlenme davranışları sayısal olarak incelenmiştir. Bölge kalınlık değerleri için en düşük pik kuvvet ve en yüksek özgül enerji sönümlenme (ÖES) değerlerini elde etmek amacıyla çok amaçlı optimizasyon (ÇAO) çalışması genetik algoritma (GA) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde; 0° , 5° ve 10° koniklik açılına ve tek yönlü altı elyaf katmanına sahip kompozit tüplerin enerji sönümlenme davranışları sayısal olarak araştırılmıştır. Altı elyaf katmanının elyaf açılı dizilimleri için en düşük pik kuvvet ve en yüksek sönümlenen enerji (SE) değerlerini elde etmek amacıyla ÇAO çalışması GA kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın üçüncü bölümünde ise kompozit, alüminyum ve çelik malzemelerden yapılmış tekli ve uç uca birleştirilmiş ikili hibrit tüplerin enerji sönümlenme davranışları araştırılmıştır. Tekli ve ikili tüplerde farklı yoğunluklara sahip Köpük 1, Köpük 2 ve Köpük 3 dolguları, fonksiyonel köpük dolgusunun enerji sönümlenme davranışına etkilerini belirlemek amacıyla dolgu malzemesi olarak kullanılmıştır. Bunun yanında tekli ve ikili tüplerde et kalınlıkları (kompozit tüp hariç) ve köpük yoğunlukları için en düşük pik kuvvet ve en yüksek ÖES değerlerini elde etmek amacıyla ÇAO çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Ünlorm kalınlıklı tüplerde bölge kalınlık değerlerinin artmasıyla SE ve pik kuvvetler artmıştır.
2. Ünlorm kalınlıklı tüplerde en yüksek SE ve pik kuvvet değerleri 5° konik açılı tüplerde elde edilmiştir.
3. DKT'lerde, ÇAO sonucu cidar kalınlıkları değiştirilerek en yüksek ÖES değeri ve en düşük pik kuvvet değeri aynı anda elde edilmiştir.
4. DKT'ler için hasarlı şartlarda gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen SE değerlerinde hasarsız şartlara göre düşüş meydana gelmiştir.

5. 10° konik açılı optimum bölge kalınlıklı DKT'nin hasarsız şartlarda pik kuvvet değeri 0° ve 5° konik açılı DKT'lere göre sırasıyla %17 ve %5,6 artarken, SE değeri %21 ve %35 oranında artmıştır.
6. ÇAO ile elde edilen bölge kalınlıklarında DKT'lerin ilk şekil değiştirmeye düşük kalınlıklı bölgeden başlaması pik kuvvet değerlerini düşürmüştür.
7. ÇAO ile hasarsız şartlar için en düşük pik kuvvet ve en yüksek ÖES değeri 10° konik açılı DKT'de gerçekleşirken; hasarlı şartlarda 5° konik açılı DKT'de gerçekleşmiştir.
8. Kompozit tüplerde
9. Tablo 3.6'dan görüleceği gibi doğru elyaf açısı dizilimi seçilerek SE değerleri, 0° tüplerde %118, 5° tüplerde %35, 10° tüplerde %47 oranında artmıştır.
10. Optimum elyaf açısı dizilimine sahip kompozit tüplerde en yüksek SE değeri 5° konik açılı tüpte gerçekleşmiştir.
11. ÇAO işlemi sonucunda tekli ve ikili hibrit tüplerin tümünde SE değerlerinde artış meydana gelmiştir. Optimum köpük yoğunluğu ve cidar kalınlık değerlerine sahip S_Al, S_St, S_C, D_St-Al, D_Al-C ve D_St-C tüplerin SE değerleri; boş tüplere göre sırasıyla %435, %229, %360, %241, %307 ve %255 artarken köpük dolgulu tüplere göre sırasıyla %173, %125, %134, %113, %151 ve %130 artmıştır.
12. ÇAO işlemi sonucunda, S_C ve D_Al-C tüpler hariç, bütün tüp konfigürasyonlarında ÖES değerleri artmıştır. Optimum köpük yoğunluğu ve cidar kalınlık değerlerine sahip S_Al, S_St, D_St-Al, D_St-C tüplerde ÖES değerleri; boş tüplere göre sırasıyla %25.35, %41.49, %24.91 ve %21.94 artarken köpük dolgulu tüplere göre %15.52, %20.26, %6.41 ve %16.48 artmıştır.
13. Eksenel doğrultuda uç uca konumlandırılmış ikili hibrit tüplerde ilk şekil değiştirmenin düşük mukavemete sahip tüpte başlaması ile pik kuvvet değerleri azalmıştır.
14. Tekli ve ikili hibrit tüplerin tümünde cidar kalınlıklarının artması ile pik kuvvet değerlerinde artış meydana gelmiştir. D_St-Al ve D_St-C'de çelik tüpün cidar kalınlığının artması ile ÖES değerleri azalmıştır. S_Al, S_St, D_Al-C ve D_St-C'de çelik ve alüminyum tüp cidar kalınlıklarının artması ile ÖES değerlerinde de artış meydana gelmiştir.
15. Köpük 1, Köpük 2 ve Köpük 3 yoğunluklarının artmasıyla tekli ve ikili hibrit tüplerin tümünde ÖES ve pik kuvvet değerlerinde artış meydana gelmiştir.

16. İkili tüplerde düşük mukavemetli malzemeler ile yüksek mukavemetli malzemeler üst üste kullanılarak ÖES değerlerinden ödün vermeden SE değerlerinde artış meydana gelmiştir.



5. ÖNERİLER

1. DKT'lerdeki katman sayıları ve katman geçiş yerlerinde yırtılmayı önleyici mekanizmalar üzerine çalışmalar yapılabilir.
2. Karbon fiberden imal edilmiş tüplerden farklı olarak cam fiber, kevlar, kenevir vb. diğer fiberlerde fiber açısı hizalamasının çarpışma davranışı üzerine çalışmalar gerçekleştirilebilir.
3. Farklı katman sayıları ve kesit geometrileri için elyaf açısı diziliminin çarpışma davranışına etkisi incelenebilir.
4. İki'den fazla malzemeden yapılmış tüplerin eksenel yönde uç uca birleştirilmesi ile ortaya çıkacak üçlü, dördü vb. tüplerin eksenel çarpışma davranışı incelenebilir.
5. Bu çalışmada incelenen yapıların yanal ve açılı çarpışma davranışları incelenebilir.

6. KAYNAKLAR

1. TÜİK - Veri Portalı. <https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=Ulastirma-ve-Haberlesme-112>. Erişim Eyl. 22, 2021.
2. Murray, N. W., Introduction to the theory of thin-walled structures, (1984) 447.
3. Albak, E. İ., Crashworthiness design for multi-cell circumferentially corrugated thin-walled tubes with sub-sections under multiple loading conditions, Thin-Walled Structures, 164,(2021) 107886.
4. Baroutaji, A., Sajjia, M., ve Olabi, A. G., On the crashworthiness performance of thin-walled energy absorbers: Recent advances and future developments, Thin-Walled Structures, 118,(2017) 137–163.
5. Zhang, X., Conceptual Study of Adaptive Energy Absorbers. The Hong Kong University of Science and Technology, (2009).
6. Meric, D., ve Gedikli, H., Energy absorption behavior of tailor-welded tapered tubes under axial impact loading using coupled FEM/SPH method, Thin-Walled Structures, 104,(2016) 17–33.
7. Meriç, D., ve Gedikli, H., Effect of fiber angle alignment on energy absorbing behavior of conical composite tubes, International Journal of Crashworthiness, (2021).
8. Isaac, C. W., ve Ezekwem, C., A review of the crashworthiness performance of energy absorbing composite structure within the context of materials, manufacturing and maintenance for sustainability, Composite Structures, 257,(2021) 113081.
9. Johnson, W., ve Reid, S. R., Metallic Energy Dissipating Systems, Applied Mechanics Reviews, 31,3 (1978) 277–288.
10. Lykacos, S. S. A., Kostazos, P. K., Venetsanos, O.-V., ve Manolakos, D. E., Crashworthiness Performance of Aluminium, GFRP and Hybrid Aluminium/GFRP Circular Tubes under Quasi-Static and Dynamic Axial Loading Conditions: A Comparative Experimental Study, Dynamics, 1,1 (2021) 22–48.
11. Andrews, K. R. F., England, G. L., ve Ghani, E., Classification of the axial collapse of cylindrical tubes under quasi-static loading, International Journal of Mechanical Sciences, 25,9–10 (1983) 687–696.
12. Abramowicz, W., ve Jones, N., Dynamic axial crushing of circular tubes, International Journal of Impact Engineering, 2,3 (1984) 263–281.
13. Abramowicz, W., ve Jones, N., Dynamic axial crushing of square tubes, International Journal of Impact Engineering, 2,2 (1984) 179–208.

14. Abramowicz, W., ve Jones, N., Dynamic progressive buckling of circular and square tubes, International Journal of Impact Engineering, 4,4 (1986) 243–270.
15. Gupta, N. K., ve Gupta, S. K., Effect of annealing, size and cut-outs on axial collapse behaviour of circular tubes, International Journal of Mechanical Sciences, 35,7 (1993) 597–613.
16. Reddy, T. Y., ve Zhang, E., Effect Of Strain-Hardening On The Behaviour Of Axially Crushed Cylindrical Tubes, Advances in Engineering Plasticity and its Applications, (1993) 755–762.
17. Reddy, T. J., Narayanamurthy, V., ve Rao, Y. V. D., Study on Crush Tube's Geometric Cross-sections and Topology for Axial Crashworthiness, Defence Science Journal, 70,3 (2020) 249–259.
18. Kim, H. S., ve Wierzbicki, T., Effect of the cross-sectional shape of hat-type cross-sections on crash resistance of an “S”-frame, Thin-Walled Structures, 39,7 (2001) 535–554.
19. White, M. D., ve Jones, N., Experimental quasi-static axial crushing of top-hat and double-hat thin-walled sections, International Journal of Mechanical Sciences, 41,2 (1999) 179–208.
20. White, M. D., Jones, N., ve Abramowicz, W., A theoretical analysis for the quasi-static axial crushing of top-hat and double-hat thin-walled sections, International Journal of Mechanical Sciences, 41,2 (1999) 209–233.
21. Mamalis, A. G., Manolakos, D. E., Saigal, S., Viegelaan, G., ve Johnson, W., Extensible plastic collapse of thin-wall frusta as energy absorbers, International Journal of Mechanical Sciences, 28,4 (1986) 219–229.
22. Mamalis, A. G., ve Johnson, W., The quasi-static crumpling of thin-walled circular cylinders and frusta under axial compression, International Journal of Mechanical Sciences, 25,9–10 (1983) 713.
23. Singace, A. A., ve El-Sobky, H., Behaviour of axially crushed corrugated tubes, International Journal of Mechanical Sciences, 39,3 (1997) 249–268.
24. Chirwa, E. C., Theoretical analysis of tapered thin-walled metal inverbucktube, International Journal of Mechanical Sciences, 35,3–4 (1993) 325–351.
25. Hariharan, K., Kalaivani, K., ve Balachandran, G., Foil Optimization in Tailor Welded Blank of an Automotive Floor Component, Materials and Manufacturing Processes, 27,9 (2012) 936–942.
26. Yang, R. J., Fu, Y., ve Li, G., Application of Tailor Rolled Blank in Vehicle Front End for Frontal Impact, SAE Technical Papers, (2007).
27. Baykasoglu, C., ve Cetin, M. T., Energy absorption of circular aluminium tubes with functionally graded thickness under axial impact loading, International Journal of Crashworthiness, 20,1 (2014) 95–106.

28. Sun, G., Xu, F., Li, G., ve Li, Q., Crashing analysis and multiobjective optimization for thin-walled structures with functionally graded thickness, International Journal of Impact Engineering, 64,(2014) 62–74.
29. ZHANG Li-ling, GAO Feng, D. F., Experimental and numerical investigation of axial crushing of dissimilar thickness tailor-welded tubes, Journal Of Plasticity Engineering, 4 (2006) 919.
30. Jandaghi Shahi, V., ve Marzbanrad, J., Analytical and experimental studies on quasi-static axial crush behavior of thin-walled tailor-made aluminum tubes, Thin-Walled Structures, 60,(2012) 24–37.
31. Li, G., Xu, F., Sun, G., ve Li, Q., A comparative study on thin-walled structures with functionally graded thickness (FGT) and tapered tubes withstanding oblique impact loading, International Journal of Impact Engineering, 77,(2015) 68–83.
32. Zhang, X., ve Zhang, H., Relative merits of conical tubes with graded thickness subjected to oblique impact loads, International Journal of Mechanical Sciences, 98,(2015) 111–125.
33. Mohammadiha, O., ve Ghariblu, H., Optimal shape design of functionally graded thickness inversion tubes subjected to oblique loading, Structural and Multidisciplinary Optimization, 56,3 (2017) 587–601.
34. Qin, R., Zhou, J., ve Chen, B., Crashworthiness Design and Multiobjective Optimization for Hexagon Honeycomb Structure with Functionally Graded Thickness, Advances in Materials Science and Engineering, 2019,(2019).
35. SALEHI, M., MIRBAGHERI, S. M. H., ve RAMIANI, A. J., Efficient energy absorption of functionally-graded metallic foam-filled tubes under impact loading, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 31,1 (2021) 92–110.
36. Campbell, F. C., Introduction to Composite Materials and Processes: Unique Materials that Require Unique Processes, Manufacturing Processes for Advanced Composites, (2004) 1–37.
37. Mustafa Akay., An introduction to polymer matrix composites. Bristol, (2015).
38. A Review of the Global Composites Market and Turkish Composites Market. <https://www.reinforcer.com/en/category/detail/A-Review-of-the-Global-Composites-Market-and-Turkish-Composites-Market/61/350/0>. Erişim Şub. 14, 2022.
39. Zweben, C., Composite Materials, Mechanical Engineers' Handbook, 1,(2015) 1–37.
40. Dawoud, M. M., Saleh, H. M., Dawoud, M. M., ve Saleh, H. M., Introductory Chapter: Background on Composite Materials. IntechOpen, (2018).
41. Durgun, İ., Vatansever, O., Ertan, R., ve Yavuz, N., Experimental Comparison Of Composite Part Manufacturing Processes Used In Automotive Industry, Makina ve Mühendis, 649,(2014) 5864.

42. Farley, G. L., Energy-Absorption Capability Of Composite Tubes And Beams. Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, (1989).
43. Rabiee, A., ve Ghasemnejad, H., Progressive Crushing of Polymer Matrix Composite Tubular Structures: Review, Open Journal of Composite Materials, 7,(2017) 14–48.
44. Thornton, P. H., Energy Absorption in Composite Structures, Journal of Composite Materials, 13,3 (1979) 247–262.
45. Sun, G., Li, S., Li, G., ve Li, Q., On crashing behaviors of aluminium/CFRP tubes subjected to axial and oblique loading: An experimental study, Composites Part B: Engineering, 145,(2018) 47–56.
46. Xin, Z., Zhang, X., Duan, Y., ve Xu, W., Nacre-inspired design of CFRP composite for improved energy absorption properties, Composite Structures, 184,(2018) 102–109.
47. Chen, D., Sun, G., Meng, M., Li, G., ve Li, Q., Residual crashworthiness of CFRP structures with pre-impact damage – An experimental and numerical study, International Journal of Mechanical Sciences, 149,(2018) 122–135.
48. Sun, G., Guo, X., Li, S., Ruan, D., ve Li, Q., Comparative study on aluminum/GFRP/CFRP tubes for oblique lateral crushing, Thin-Walled Structures, 152,(2020) 106420.
49. Li, S., Guo, X., Li, Q., Ruan, D., ve Sun, G., On lateral compression of circular aluminum, CFRP and GFRP tubes, Composite Structures, 232,(2020) 111534.
50. Chambe, J. E., Bouvet, C., Dorival, O., ve Ferrero, J.-F., Energy absorption capacity of composite thin-wall circular tubes under axial crushing with different trigger initiations, Journal of Composite Materials, (2019).
51. Mamalis, A. G., ve Johnson, W., The quasi-static crumpling of thin-walled circular cylinders and frusta under axial compression, International Journal of Mechanical Sciences, 25,9–10 (1983) 713–732.
52. Mamalis, A. G., Manolacos, D. E., Demosthenous, G. A., ve Ioannidis, M. B., Experimental determination of splitting in axially collapsed thick-walled fibre-reinforced composite frusta, Thin-Walled Structures, 28,3–4 (1997) 279–296.
53. Mahdi, E., Hamouda, A. M. S., Sahari, B. B., ve Khalid, Y. A., Effect of Material and Geometry on Crushing Behaviour of Laminated Conical Composite Shells, Applied Composite Materials, 9,5 (2002) 265–290.
54. Palanivelu, S., Paepegem, W. Van, Degrieck, J., Vantomme, J., Kakogiannis, D., Ackeren, J. Van, Hemelrijck, D. Van, ve Wastiels, J., Crushing and energy absorption performance of different geometrical shapes of small-scale glass/polyester composite tubes under quasi-static loading conditions, Composite Structures, 93,2 (2011) 992–1007.

55. Boria, S., Scattina, A., ve Belingardi, G., Axial energy absorption of CFRP truncated cones, Composite Structures, 130,(2015) 18–28.
56. Boria, S., ve Pettinari, S., Energy absorbed by composite conical structures in axial crushing, Advanced Composites Letters, 23,1 (2014) 11–16.
57. Nia, A. B., Nejad, A. F., Xin, L., Ayob, A., ve Yahya, M. Y., Energy absorption assessment of conical composite structures subjected to quasi-static loading through optimization based method, Mechanics & Industry, 21,1 (2020) 113.
58. Ahmad, Z., Impact and energy absorption of empty and foam-filled conical tubes. Queensland University Of Technology, (2009).
59. Thornton, P. H., ve Edwards, P. J., Energy Absorption in Composite Tubes, Journal of Composite Materials, 16,6 (1982) 521–545.
60. Mahdi, E., Hamouda, A. M. S., ve Sebaey, T. A., The effect of fiber orientation on the energy absorption capability of axially crushed composite tubes, Materials & Design (1980-2015), 56,(2014) 923–928.
61. Schmueser, D. W., ve Wickliffe, L. E., Impact Energy Absorption of Continuous Fiber Composite Tubes, Journal of Engineering Materials and Technology, 109,1 (1987) 72–77.
62. Hull, D., A unified approach to progressive crushing of fibre-reinforced composite tubes, Composites Science and Technology, 40,4 (1991) 377–421.
63. Park, H. C., Choi, Y., ve Yoon, K. J., Crush Energy Absorbing Characteristics of Graphite/Epoxy Square Tubes, Key Engineering Materials, 183–187,187 PART 2 (2000) 1099–1104.
64. Mahdi, E., Mokhtar, A. S., Asari, N. A., Elfaki, F., ve Abdullah, E. J., Nonlinear finite element analysis of axially crushed cotton fibre composite corrugated tubes, Composite Structures, 75,1–4 (2006) 39–48.
65. Pickett, L., ve Dayal, V., Effect of tube geometry and ply-angle on energy absorption of a circular glass/epoxy crush tube – A numerical study, Composites Part B: Engineering, 43,8 (2012) 2960–2967.
66. Zhang, Z., Hou, S., Liu, Q., ve Han, X., Winding orientation optimization design of composite tubes based on quasi-static and dynamic experiments, Thin-Walled Structures, 127,(2018) 425–433.
67. Hu, D., Zhang, C., Ma, X., ve Song, B., Effect of fiber orientation on energy absorption characteristics of glass cloth/epoxy composite tubes under axial quasi-static and impact crushing condition, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 90,(2016) 489–501.
68. Khan, R. A., Mahdi, E., ve Cabibihan, J. J., Effect of Fibre Orientation on the Quasi-Static Axial Crushing Behaviour of Glass Fibre Reinforced Polyvinyl Chloride Composite Tubes, Materials, 14,9 (2021) 2235.

69. Supian, A. B. M., Sapuan, S. M., Zuhri, M. Y. M., Zainudin, E. S., Ya, H. H., ve Hisham, H. N., Effect of winding orientation on energy absorption and failure modes of filament wound kenaf/glass fibre reinforced epoxy hybrid composite tubes under intermediate-velocity impact (IVI) load, Journal of Materials Research and Technology, 10,(2021) 1–14.
70. Abd Rased, M. F., ve Yoon, S. H., Experimental study on effects of asymmetrical stacking sequence on carbon fiber/epoxy filament wound specimens in DCB, ENF, and MMB tests, Composite Structures, 264,(2021) 113749.
71. Supian, A. B. M., Sapuan, S. M., Zuhri, M. Y. M., Zainudin, E. S., ve Ya, H. H., Crashworthiness performance of hybrid kenaf/glass fiber reinforced epoxy tube on winding orientation effect under quasi-static compression load, Defence Technology, 16,5 (2020) 1051–1061.
72. Atturan, U. A., Nandam, S. H., Murty, B. S., ve Sankaran, S., Processing and characterization of in-situ TiB₂ stabilized closed cell aluminium alloy composite foams, Materials & Design, 101,(2016) 245–253.
73. Samborski, S., Rozylo, P., Cwieka, K., ve Skibiński, J., Elastic Properties of Open Cell Metallic Foams—Modeling of Pore Size Variation Effect, Materials, 15,19 (2022) 6818.
74. Hanssen, A. G., Hopperstad, O. S., ve Langseth, M., Design of aluminium foam-filled crash boxes of square and circular cross-sections, International Journal of Crashworthiness, 6,2 (2010) 177–188.
75. Bouix, R., Viot, P., ve Lataillade, J. L., Polypropylene foam behaviour under dynamic loadings: Strain rate, density and microstructure effects, International Journal of Impact Engineering, 36,2 (2009) 329–342.
76. Ahmad, Z., ve Thambiratnam, D. P., Dynamic computer simulation and energy absorption of foam-filled conical tubes under axial impact loading, Computers and Structures, 87,3–4 (2009) 186–197.
77. Reid, S. R., ve Reddy, T. Y., Axial crushing of foam-filled tapered sheet metal tubes, International Journal of Mechanical Sciences, 28,10 (1986) 643–656.
78. Reid, S. R., Reddy, T. Y., ve Gray, M. D., Static and dynamic axial crushing of foam-filled sheet metal tubes, International Journal of Mechanical Sciences, 28,5 (1986) 295–322.
79. Hanssen, A. G., Langseth, M., ve Hopperstad, O. S., Static and dynamic crushing of square aluminum extrusions with aluminum foam filler, International Journal of Impact Engineering, 24,4 (2000) 347–383.
80. Santosa, S. P., Wierzbicki, T., Hanssen, A. G., ve Langseth, M., Experimental and numerical studies of foam-filled sections, International Journal of Impact Engineering, 24,5 (2000) 509–534.

81. Santosa, S., ve Wierzbicki, T., Crash behavior of box columns filled with aluminum honeycomb or foam, Computers and Structures, 68,4 (1998) 343–367.
82. Reyes, A., Hopperstad, O. S., Hanssen, A. G., ve Langseth, M., Modeling of material failure in foam-based components, International Journal of Impact Engineering, 30,7 (2004) 805–834.
83. Li, Z., Chen, W., ve Hao, H., Functionally graded truncated square pyramid folded structures with foam filler under dynamic crushing, Composites Part B: Engineering, 177,(2019) 107410.
84. Gupta, N., A functionally graded syntactic foam material for high energy absorption under compression, Materials Letters, 61,4–5 (2007) 979–982.
85. Gupta, N., ve Ricci, W., Comparison of compressive properties of layered syntactic foams having gradient in microballoon volume fraction and wall thickness, Materials Science and Engineering A, 427,1–2 (2006) 331–342.
86. Hangai, Y., Saito, K., Utsunomiya, T., Kuwazuru, O., ve Yoshikawa, N., Fabrication and compression properties of functionally graded foam with uniform pore structures consisting of dissimilar A1050 and A6061 aluminum alloys, Materials Science and Engineering: A, 613,(2014) 163–170.
87. Mohammadiha, O., Beheshti, H., ve Aboutalebi, F. H., Multi-objective optimisation of functionally graded honeycomb filled crash boxes under oblique impact loading, International Journal of Crashworthiness, 20,1 (2014) 44–59.
88. Xiao, Z., Fang, J., Sun, G., ve Li, Q., Crashworthiness design for functionally graded foam-filled bumper beam, Advances in Engineering Software, 85,(2015) 81–95.
89. Liu, H., Ding, S., ve Ng, B. F., Impact response and energy absorption of functionally graded foam under temperature gradient environment, Composites Part B: Engineering, 172,(2019) 516–532.
90. Yin, H., Chen, C., Hu, T., ve Wen, G., Optimisation for bending crashworthiness of functionally graded foam-filled cellular structure, International Journal of Crashworthiness, 23,4 (2017) 446–460.
91. Najibi, A., Ghazifard, P., ve Alizadeh, P., Numerical crashworthiness analysis of a novel functionally graded foam-filled tube, Journal of Sandwich Structures and Materials, 23,5 (2021) 1635–1661.
92. Li, S., ve Li, Q. M., Response of functionally graded polymeric foam under axial compression, International Journal of Mechanical Sciences, 210,(2021) 106750.
93. Reuter, C., ve Tröster, T., Crashworthiness and numerical simulation of hybrid aluminium-CFRP tubes under axial impact, Thin-Walled Structures, 117,(2017) 1–9.
94. Zhu, G., Sun, G., Yu, H., Li, S., ve Li, Q., Energy absorption of metal, composite and metal/composite hybrid structures under oblique crushing loading, International Journal of Mechanical Sciences, 135,(2018) 458–483.

95. Kim, D. H., Kim, H. G., ve Kim, H. S., Design optimization and manufacture of hybrid glass/carbon fiber reinforced composite bumper beam for automobile vehicle, Composite Structures, 131,(2015) 742–752.
96. Lee, M. sik, Seo, H. yoon, ve Kang, C. gil., Comparison of collision test results for center-pillar reinforcements with TWB and CR420/CFRP hybrid composite materials using experimental and theoretical methods, Composite Structures, 168,(2017) 698–709.
97. Sun, G., Wang, Z., Yu, H., Gong, Z., ve Li, Q., Experimental and numerical investigation into the crashworthiness of metal-foam-composite hybrid structures, Composite Structures, 209,(2019) 535–547.
98. Supian, A. B. M., Sapuan, S. M., Zuhri, M. Y. M., Zainudin, E. S., ve Ya, H. H., Hybrid reinforced thermoset polymer composite in energy absorption tube application: A review, Defence Technology, 14,4 (2018) 291–305.
99. Hapuarachchi, T. D., Ren, G., Fan, M., Hogg, P. J., ve Peijs, T., Fire retardancy of natural fibre reinforced sheet moulding compound, Applied Composite Materials, 14,4 (2007) 251–264.
100. Safri, S. N. A., Sultan, M. T. H., Jawaid, M., ve Jayakrishna, K., Impact behaviour of hybrid composites for structural applications: A review, Composites Part B: Engineering, 133,(2018) 112–121.
101. Yang, H., Lei, H., Lu, G., Zhang, Z., Li, X., ve Liu, Y., Energy absorption and failure pattern of hybrid composite tubes under quasi-static axial compression, Composites Part B: Engineering, 198,(2020) 108217.
102. Boria, S., Scattina, A., ve Belingardi, G., Axial crushing of metal-composite hybrid tubes: Experimental analysis, Procedia Structural Integrity, 8,(2018) 102–117.
103. Pan, Z., Qiao, F., Wang, M., Wu, Z., ve Ying, Z., A novel damage mechanism analysis of integrally braided CFRP and CFRP/Aluminum hybrid composite tube subjected to transverse impact, Materials & Design, 206,(2021) 109815.
104. M. WANG Xuguang., Comportement A L’ecrasement De Structures Tubulaires. Fransa Liyon, (1991).
105. Hanefi, E. H., ve Wierzbicki, T., Axial resistance and energy absorption of externally reinforced metal tubes, Composites Part B: Engineering, 27,5 (1996) 387–394.
106. Song, H. W., Wan, Z. M., Xie, Z. M., ve Du, X. W., Axial impact behavior and energy absorption efficiency of composite wrapped metal tubes, International Journal of Impact Engineering, 24,4 (2000) 385–401.
107. Wang, X. G., Bloch, J. A., ve Cesari, D., Static and Dynamic Axial Crushing of Externally Reinforced Tubes, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 206,5 (1992) 355–360.

108. X Wang, ve G Lu., Axial crushing force of externally fibre-reinforced metal tubes - X Wang, G Lu, 2002, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 216,9 (2002) 863–874.
109. Alexander, J. M., An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading, Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, 13,1 (1960) 10–15.
110. Boria, S., Scattina, A., ve Belingardi, G., Axial crushing of metal-composite hybrid tubes: Experimental analysis, Procedia Structural Integrity, 8,(2018) 102–117.
111. Bambach, M. R., Elchalakani, M., ve Zhao, X. L., Composite steel–CFRP SHS tubes under axial impact, Composite Structures, 87,3 (2009) 282–292.
112. Guo, D., Fang, C. Q., Wang, X., ve Lu, G., Dynamic inversion characteristics of composite reinforced tubes, European Journal of Mechanics - A/Solids, 63,(2017) 53–67.
113. Asti Rosalia, C., Setya Putra, I., Dirgantara, T., Jusuf, A., ve Hadi, B. K., Experimental study on the crashworthiness response of hybrid Al/GFRP crash-box structures under axial compression loading, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1007,1 (2020) 012016.
114. Meriç, D., ve Gedikli, H., Multi-objective optimization of energy absorbing behavior of foam-filled hybrid composite tubes, Composite Structures, 279,(2022) 114771.
115. Soroush, M., Malekzadeh Fard, K., ve Shahravi, M., Finite Element Simulation of Interlaminar and Intralaminar Damage in Laminated Composite Plates Subjected to Impact, Latin American Journal of Solids and Structures, 15,6 (2018).
116. Hu, H., Onyebueke, L., ve Abatan, A., Characterizing and Modeling Mechanical Properties of Nanocomposites-Review and Evaluation, Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering, 9,4 (2010) 275–319.
117. Mahato, K. K., Dutta, K., ve Chandra Ray, B., Assessment of mechanical, thermal and morphological behavior of nano-Al₂O₃ embedded glass fiber/epoxy composites at in-situ elevated temperatures, Composites Part B: Engineering, 166,(2019) 688–700.
118. Saraç, İ., Adin, H., ve Temiz, Ş., Investigation of the effect of use of Nano-Al₂O₃, Nano-TiO₂ and Nano-SiO₂ powders on strength of single lap joints bonded with epoxy adhesive, Composites Part B: Engineering, 166,(2019) 472–482.
119. Peigney, A., Laurent, C., Flahaut, E., Rousset, A., Peigney, A., Laurent, C., Flahaut, E., ve Rousset, A., Carbon nanotubes in novel ceramic matrix nanocomposites, Ceramics International, 26,6 (2000) 677–683.
120. Teja Reddy, S., Manohar, H. S., ve Anand, S. N., Effect of carbon black nano-fillers on tribological properties of Al6061-Aluminium metal matrix composites, Materials Today: Proceedings, 20,(2020) 202–207.

121. Rapaport, D. C., The Art of Molecular Dynamics Simulation. Cambridge University Press, (2004).
122. Dewangan, M. K., ve Panigrahi, S. K., Finite element analysis of hybrid 3D orthogonal woven composite subjected to ballistic impact with multi-scale modeling, Polymers for Advanced Technologies, 32,3 (2021) 964–979.
123. Hull, D., ve Clyne, T. W., An Introduction to Composite Materials, An Introduction to Composite Materials, (1996).
124. Li, S., On the unit cell for micromechanical analysis of fibre-reinforced composites, Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 455,1983 (1999) 815–838.
125. Zhou, Y., Ding, S., Zhang, Z., Li, H., Lin, Y., Sun, M., ve Wang, M., The Ballistic responses of thread-quilted plain weaves with increased yarn–yarn friction, Thin-Walled Structures, 171,(2022) 108762.
126. Palta, E., Multi-Scale Finite Element Modeling Of Multi-Ply Woven Fabrics Under Ballistic Impacts. The University of North Carolina at Charlotte, (2019).
127. Fang, H., Gutowski, M., Disogra, M., ve Wang, Q., A numerical and experimental study of woven fabric material under ballistic impacts, Advances in Engineering Software, 96,(2016) 14–28.
128. Rabiee, A., ve Ghasemnejad, H., Finite Element Modelling Approach for Progressive Crushing of Composite Tubular Absorbers in LS-DYNA: Review and Findings, Journal of Composites Science 2022, Vol. 6, Page 11, 6,1 (2021) 11.
129. Huang, J., ve Wang, X., Numerical and experimental investigations on the axial crushing response of composite tubes, Composite Structures, 91,2 (2009) 222–228.
130. Feraboli, P., Crushing Behavior of Laminated Composite Structural Elements: Experiment and LS-DYNA Simulation. New Jersey, (2016).
131. Andersson, M., Crash behavior of composite structures A CAE benchmarking study. Chalmers University Of Technology, (2014).
132. Feraboli, P., Wade, B., Deleo, F., Rassaian, M., Higgins, M., ve Byar, A., LS-DYNA MAT54 modeling of the axial crushing of a composite tape sinusoidal specimen, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 42,11 (2011) 1809–1825.
133. Boria, S., Obradovic, J., ve Belingardi, G., Experimental and numerical investigations of the impact behaviour of composite frontal crash structures, Composites Part B: Engineering, 79,(2015) 20–27.
134. Zhu, G., Sun, G., Li, G., Cheng, A., ve Li, Q., Modeling for CFRP structures subjected to quasi-static crushing, Composite Structures, 184,(2018) 41–55.

135. Bussadori, B. P., Schuffenhauer, K., ve Scattina, A., Modelling of CFRP crushing structures in explicit crash analysis, Composites Part B: Engineering, 60,(2014) 725–735.
136. Zarei, H., ve Matthias Kröger, D.-I., Crashworthiness Investigation and Optimization of Empty and Foam Filled Composite Crash Box, Woven Fabric Engineering, (2010).
137. Zhang, Z., Sun, W., Zhao, Y., ve Hou, S., Crashworthiness of different composite tubes by experiments and simulations, Composites Part B: Engineering, 143,(2018) 86–95.
138. Liu, Q., Lin, Y., Zong, Z., Sun, G., ve Li, Q., Lightweight design of carbon twill weave fabric composite body structure for electric vehicle, Composite Structures, 97,(2013) 231–238.
139. Karagiozova, D., Pouria, |, Ataabadi, B., ve Alves, M., Finite element modeling of CFRP composite tubes under low velocity axial impact, Polymer Composites, 42,3 (2020) 1543–1564.
140. Farley, G. L., ve Jones, R. M., Crushing Characteristics of Composite Tubes with “Near-Elliptical” Cross Sections:, Journal of Composite Materials, 26,12 (2016) 1741–1751.
141. Dogan, F., Hadavinia, H., Donchev, T., ve Bhonge, P. S., Delamination of impacted composite structures by cohesive zone interface elements and tiebreak contact, Central European Journal of Engineering, 2,4 (2012) 612–626.
142. Gordnian, K., Hadavinia, H., Mason, P. J., ve Madenci, E., Determination of fracture energy and tensile cohesive strength in Mode I delamination of angle-ply laminated composites, Composite Structures, 82,4 (2008) 577–586.
143. Hillerborg, A., Modéer, M., ve Petersson, P. E., Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements, Cement and Concrete Research, 6,6 (1976) 773–781.
144. Software Technology Corporation, L., Ls-Dyna Keyword User’s Manual Volume II Material Models, (2014).
145. Soden, P. D., Kaddour, A. S., ve Hinton, M. J., Recommendations for designers and researchers resulting from the world-wide failure exercise, Composites Science and Technology, 64,3–4 (2004) 589–604.
146. Matthias Hörmann, ve Wacker, M., Simulation of the Crash Performance of Crash Boxes based on Advanced Thermoplastic Composite. (2005).
147. Fasanella, E. L., Jackson, K. E., ve Jackson, K. E., Best Practices for Crash Modeling and Simulation. <http://www.sti.nasa.gov>. Erişim Şub. 9, 2022.
148. Wade, B., Feraboli, P., ve Osborne, M., Simulating laminated composites using LS-DYNA material model MAT54 part I: [0] and [90] ply single-element investigation. Seattle, (2017).

149. Gibson, L. J., ve Ashby, M. F., Cellular solids: Structure and properties, second edition, Cellular Solids: Structure and Properties, Second Edition, (2014) 1–510.
150. Weaire, D., Coughlan, S., ve Fortes, A. M., The modeling of liquid and solid foams, Journal of Materials Processing Technology, 55,3–4 (1995) 178–185.
151. Weaire, D., ve Drenckhan, W., Structure and dynamics of confined foams: A review of recent progress, Advances in Colloid and Interface Science, 137,1 (2008) 20–26.
152. Deshpande, V. S., ve Fleck, N. A., Isotropic constitutive models for metallic foams, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 48,6–7 (2000) 1253–1283.
153. Aktay, L., Johnson, A. F., Toksoy, A. K., Kröplin, B. H., ve Güden, M., Modeling the progressive axial crushing of foam-filled aluminum tubes using smooth particle hydrodynamics and coupled finite element model/smooth particle hydrodynamics, Materials and Design, 29,3 (2008) 569–575.
154. Lucy, L. B., Lucy, ve B., L., A numerical approach to the testing of the fission hypothesis., Astronomical Journal, 82,(1977) 1013–1024.
155. Gingold, R. A., ve Monaghan, J. J., Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 181,3 (1977) 375–389.
156. Vignjevic, R., ve Campbell, J., Review of development of the smooth particle hydrodynamics (SPH) method. İçinde Predictive Modeling of Dynamic Processes (S. Hiermaier, ed.), Springer US, (2009), 367–396.
157. Johnson, G. R., Stryk, R. A., ve Beissel, S. R., SPH for high velocity impact computations, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 139,1–4 (1996) 347–373.
158. Bonet, J., ve Kulasegaram, S., Correction and stabilization of smooth particle hydrodynamics methods with applications in metal forming simulations, International Journal For Numerical Methods In Engineering, 47,(2000) 1189–1214.
159. Aktay, L., Kröplin, B.-H., Toksoy, A. K., ve Güden, M., Finite element and coupled finite element/smooth particle hydrodynamics modeling of the quasi-static crushing of empty and foam-filled single, bitubular and constraint hexagonal- and square-packed aluminum tubes, Materials & Design, 29,5 (2008) 952–962.
160. Gedikli, H., Crashworthiness optimization of foam-filled tailor-welded tube using coupled finite element and smooth particle hydrodynamics method, Thin-Walled Structures, 67,(2013) 34–48.
161. Gunantara, N., A review of multi-objective optimization: Methods and its applications, Cogent Engineering, 5,1 (2018) 1–16.
162. Stander, N., Basudhar, A., Roux, W., Liebold, K., Trent Eggleston, D.-M., Goel, T., ve Craig, K., LS-OPT ® User's Manual A Design Optimization And Probabilistic Analysis Tool For The Engineering Analyst, (2020).

163. Yang, X.-S., Engineering optimization: an introduction with metaheuristic applications. John Wiley, (2010).
164. Ye, K. Q., Li, W., ve Sudjianto, A., Algorithmic construction of optimal symmetric Latin hypercube designs, Journal of Statistical Planning and Inference, 90,1 (2000) 145–159.
165. Stander, N., Basudhar, A., Roux, W., Witowski, K., Trent Eggleston, D.-M., Goel, T., ve Craig, K., LS-OPT ® User's Manual A Design Optimization And Probabilistic Analysis Tool For The Engineering Analyst. (2019).
166. Goldberg, D. E., ve Holland, J. H., Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning David E. Goldberg The University of Alabama T, Machine Learning, 3,2 (1979) 95–99.
167. Yamazaki, K., ve Han, J., Maximization of the crushing energy absorption of tubes, Structural Optimization, 16,(1998) 37–46.
168. Marklund, P. O., ve Nilsson, L., Optimization of a car body component subjected to side impact, Structural and Multidisciplinary Optimization 2001 21:5, 21,5 (2001) 383–392.
169. Sobieszczanski-Sobieski, J., Kodiyalam, S., ve Yang, R. J., Optimization of car body under constraints of Noise, Vibration, and Harshness (NVH), and crash, Struct Multidisc Optim, 1,II (2000) 295–306.
170. Jansson, T., Nilsson, L., ve Redhe, M., Using surrogate models and response surfaces in structural optimization-with application to crashworthiness design and sheet metal forming, Struct Multidisc Optim, 25,(2003) 129–140.
171. Hou, S., Li, Q., Long, S., Yang, X., ve Li, W., Design optimization of regular hexagonal thin-walled columns with crashworthiness criteria, Finite Elements in Analysis and Design, 43,6–7 (2007) 555–565.
172. Ma, Q., Zha, Y., Dong, B., ve Gan, X., Structure design and multiobjective optimization of CFRP/aluminum hybrid crash box, Polymer Composites, 41,10 (2020) 4202–4220.
173. Hou, S., Li, Q., Long, S., Yang, X., ve Li, W., Crashworthiness design for foam filled thin-wall structures, Materials and Design, 30,6 (2009) 2024–2032.
174. Ma, J., Hou, D., Chen, Y., ve You, Z., Quasi-static axial crushing of thin-walled tubes with a kite-shape rigid origami pattern: Numerical simulation, Thin-Walled Structures, 100,(2016) 38–47.
175. Bai, C., Zhou, T., Ma, Q., ve Gan, X., Multi-objective crashworthiness optimization of CFRP/Al hybrid tube under transverse loading, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 41,9–10 (2022) 364–382.

176. Reyes, A., Hopperstad, O. S., Hanssen, A. G., ve Langseth, M., Modeling of material failure in foam-based components, International Journal of Impact Engineering, 30,7 (2004) 805–834.
177. Yu, J. L., Li, J. R., ve Hu, S. S., Strain-rate effect and micro-structural optimization of cellular metals, Mechanics of Materials, 38,1–2 (2006) 160–170.
178. Gibson, L. J., ve Ashby, M. F., Cellular solids: Structure and properties, second edition. Cambridge University Press, (2014).
179. Hou, S., Li, Q., Long, S., Yang, X., ve Li, W., Crashworthiness design for foam filled thin-wall structures, Materials & Design, 30,6 (2009) 2024–2032.
180. S., A., A., M., ve NouraeiH., Nonlinear finite element analysis of the crush behaviour of functionally graded foam-filled columns, Finite Elements in Analysis and Design, 61,(2012) 50–59.
181. Zarei, H. R., ve Kröger, M., Crashworthiness optimization of empty and filled aluminum crash boxes, International Journal of Crashworthiness, 12,3 (2007) 255–264.
182. Usta, F., Ertaş, O. F., Atalp, A., Türkmen, H. S., Kazancı, Z., ve Scarpa, F., Impact behavior of triggered and non-triggered crash tubes with auxetic lattices, Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design, 2,2 (2019) 119–127.
183. Aerens, R., Vorkov, V., ve Duflou, J. R., Physics of large radius air bending, Procedia Manufacturing, 29,(2019) 161–168.
184. Eren, Z., Eksenel Darbe Yüğü Uygulanan İççe Tüplerin Çarpışma Ve Ezilme Davranışının Sayısal Ve Deneysel Olarak İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, (2016).
185. Khalifeh, A. R., Banaraki, A. D., Manesh, H. D., ve Banaraki, M. D., Investigating of the tensile mechanical properties of structural steels at high strain rates, Materials Science and Engineering: A, 712,(2018) 232–239.
186. Meriç, D., ve Gedikli, H., Numerical investigation of energy absorption behaviors of variable thickness tubes, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35,4 (2020) 1939–1956.
187. Isaac, C. W., ve Oluwale, O., Energy absorption improvement of circular tubes with externally press-fitted ring around tube surface subjected under axial and oblique impact loading, Thin-Walled Structures, 109,(2016) 352–366.
188. Zarei, H. R., ve Kröger, M., Crashworthiness optimization of empty and filled aluminum crash boxes, International Journal of Crashworthiness, 12,3 (2007) 255–264.
189. Kuznetsov, A., Telichev, I., ve Wu, C. Q., 14 th International LS-DYNA Users Conference Effect of Thin-walled Tube Geometry on Its Crashworthiness Performance. (2016).

190. Lu, B., Shen, C., Zhang, J., Zheng, D., ve Zhang, T., Study on energy absorption performance of variable thickness CFRP/aluminum hybrid square tubes under axial loading, Composite Structures, 276,(2021) 114469.
191. Zhou, C., Ming, S., Xia, C., Wang, B., Bi, X., Hao, P., ve Ren, M., The energy absorption of rectangular and slotted windowed tubes under axial crushing, International Journal of Mechanical Sciences, 141,(2018) 89–100.
192. Nagel, G., Impact and Energy Absorption of Straight and Tapered Rectangular Tubes. Queensland University of Technology, (2005).



7. EKLER

Ek 1. 0°, 5° ve 10 ° konik açılı Değişken Kalınlıklı Tüplerin (DKT) 68 örneklem noktası (ÖN) için hasarsız durumda sayısal analizlerden elde edilen sönmelenen enerji (SE) değerleri

ÖN	Bölge Kalınlıkları (mm)								SE (kJ)		
	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₅	t ₆	t ₇	t ₈	0°	5°	10°
1	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.19	1.35	1.22
2	1.01	1.19	0.64	0.66	3.81	3.93	3.74	3.52	1.73	1.73	0.88
3	0.64	3.82	3.96	3.99	3.76	3.62	0.68	0.53	2.50	3.74	0.68
4	3.38	0.75	1.11	3.99	3.78	1.19	3.95	1.65	1.61	1.50	1.57
5	1.10	3.86	3.30	0.57	0.77	3.79	2.85	3.97	1.17	1.18	0.88
6	0.59	3.60	1.45	3.63	0.56	3.98	3.97	1.93	1.56	2.30	1.43
7	0.54	0.52	3.76	2.85	3.38	1.72	0.53	0.55	1.03	1.28	0.41
8	4.00	0.50	3.53	1.38	3.46	0.50	4.00	3.99	0.97	0.95	0.86
9	3.80	0.97	3.73	1.88	1.44	3.95	3.83	0.70	1.74	1.54	1.69
10	0.69	3.95	3.23	1.10	3.12	3.62	3.95	1.18	2.42	3.06	0.92
11	0.58	0.98	3.74	0.55	3.84	1.21	3.62	2.96	1.04	1.45	0.30
12	1.06	3.63	3.91	3.89	3.11	3.76	3.35	3.91	4.04	5.33	2.69
13	3.31	0.69	3.92	0.67	4.00	1.56	2.33	0.73	1.05	1.05	0.78
14	3.86	3.63	3.85	3.92	1.10	1.40	0.52	3.74	2.13	2.35	3.14
15	3.33	0.54	2.52	0.70	3.39	3.87	0.52	3.57	0.82	0.69	0.56
16	0.53	0.61	0.55	1.28	1.29	3.99	3.94	0.53	0.61	0.57	0.37
17	0.66	3.35	0.72	0.58	3.17	0.52	3.79	0.53	0.49	0.46	0.34
18	0.50	0.80	0.90	3.61	0.72	3.95	0.81	0.54	0.50	0.73	0.43
19	0.60	3.84	3.97	0.52	0.53	0.55	3.49	1.16	0.62	0.55	0.31
20	0.51	0.50	3.98	0.66	0.80	3.05	2.92	0.50	0.53	0.51	0.33
21	3.71	2.27	0.51	3.97	2.28	1.70	0.84	0.57	1.07	1.12	0.88
22	3.92	2.77	3.06	2.99	3.95	4.00	1.11	1.48	2.47	3.59	2.69
23	3.97	0.51	3.73	0.56	0.50	1.88	1.73	3.99	0.85	0.46	0.93
24	1.50	3.77	0.91	1.37	3.79	3.88	1.08	3.82	1.78	1.61	1.09
25	3.99	3.13	3.28	3.95	3.92	0.54	3.14	3.74	2.73	3.04	2.60
26	3.99	3.93	1.26	1.33	0.52	0.62	0.54	1.32	0.71	0.63	0.81
27	3.62	0.88	0.65	0.91	3.15	2.95	3.60	0.61	1.34	0.66	0.85
28	2.51	0.55	0.56	2.98	0.76	0.76	3.62	3.71	0.79	0.63	0.80
29	3.74	2.62	3.26	0.73	3.71	3.81	3.78	3.91	3.10	3.25	2.51
30	3.95	3.47	0.71	1.88	1.77	0.55	3.92	0.51	0.92	0.81	0.66
31	0.64	2.34	3.93	0.60	3.89	3.37	0.60	2.41	1.08	1.83	0.45
32	0.59	0.69	1.84	3.96	0.54	1.05	3.99	0.52	0.61	0.59	0.46

Ek-1'in devamı

33	2.73	3.85	2.63	2.40	3.96	0.74	1.63	0.56	1.78	1.81	1.75
34	3.94	1.50	3.32	3.81	0.55	3.77	3.92	3.93	2.63	2.55	4.91
35	0.83	1.03	3.86	3.97	3.52	0.70	2.15	4.00	1.75	1.86	0.70
36	1.35	3.86	0.53	0.99	0.55	1.81	0.54	3.96	0.63	0.53	0.48
37	3.87	3.76	0.57	0.57	3.62	3.11	0.71	0.74	0.48	0.67	0.42
38	3.81	4.00	1.96	3.49	0.50	4.00	0.86	0.81	2.82	2.61	3.15
39	3.86	3.99	1.83	0.61	0.58	0.68	3.59	3.94	0.69	0.45	0.95
40	3.75	3.76	0.57	3.97	0.57	0.51	2.08	3.51	0.96	0.51	0.80
41	1.77	3.92	3.98	2.70	0.53	1.01	0.67	0.86	1.27	1.61	1.39
42	3.88	0.54	3.60	3.89	0.58	0.66	2.45	0.62	0.60	0.61	0.67
43	1.86	3.90	3.99	2.31	3.93	0.94	0.72	3.88	2.19	2.96	1.53
44	2.69	0.52	0.50	0.51	3.96	0.77	2.62	3.29	0.67	0.58	0.48
45	2.98	3.79	0.74	0.65	1.29	3.73	3.39	1.81	1.13	0.85	1.20
46	3.60	3.92	1.22	0.75	3.84	0.56	1.73	3.95	1.66	0.94	0.75
47	3.85	3.99	0.95	3.48	2.66	3.08	3.75	3.97	3.55	3.03	3.16
48	1.10	3.89	0.70	3.88	1.26	0.51	2.71	0.96	0.79	0.81	0.62
49	0.63	0.53	2.17	1.63	0.51	3.87	3.99	3.84	1.00	0.86	0.72
50	3.94	3.11	1.71	2.23	0.52	4.00	1.14	3.85	1.65	1.93	2.60
51	0.53	3.62	0.56	1.07	3.92	0.58	0.50	2.20	0.53	0.47	0.39
52	2.69	2.08	3.74	0.83	0.61	3.99	0.52	1.54	0.86	0.67	1.26
53	2.15	3.92	3.94	3.98	1.87	1.61	3.99	1.30	2.90	3.37	2.70
54	1.84	1.95	3.89	2.31	0.98	1.13	3.93	3.99	1.67	1.88	2.04
55	0.54	1.64	3.23	3.53	3.94	0.64	3.85	0.56	1.23	2.08	0.40
56	3.87	3.92	3.84	0.51	2.08	1.92	3.41	1.24	1.67	1.35	1.29
57	3.86	3.71	2.84	3.65	0.55	3.88	2.33	0.68	2.25	2.60	3.49
58	1.24	1.08	3.99	3.88	0.67	3.97	1.91	2.26	1.34	1.81	1.92
59	3.82	1.95	0.59	3.13	3.80	2.37	0.64	3.84	1.48	1.25	0.94
60	0.93	0.87	0.66	3.97	3.88	0.76	0.86	1.99	0.69	0.70	0.54
61	0.50	3.49	1.78	4.00	4.00	4.00	0.50	2.94	1.96	3.12	1.09
62	3.95	0.54	2.61	0.53	1.01	0.56	3.79	1.05	0.60	0.52	0.48
63	0.84	3.65	1.55	3.28	3.06	2.85	2.39	2.00	2.49	3.20	0.88
64	1.78	0.51	0.50	3.25	0.98	3.36	0.93	4.00	0.88	0.81	0.99
65	3.78	1.19	3.99	3.39	3.43	0.63	0.52	2.12	1.57	1.46	1.12
66	1.74	3.39	0.51	3.58	3.75	3.80	2.49	0.52	1.76	1.84	1.05
67	0.51	1.10	3.66	1.30	0.53	2.37	0.59	3.98	0.70	0.84	0.57
68	0.81	3.50	2.06	3.97	1.78	2.49	0.56	3.11	1.55	2.72	0.96

Ek 2. 0°, 5° ve 10 ° konik açılı Değişken Kalınlıklı Tüplerin (DKT) 68 örneklem noktası (ÖN) için hasarsız durumda sayısal analizlerden elde edilen pik kuvvet (F_{pik}) değerleri

ÖN	Bölge Kalınlıkları (mm)								Pik Kuvvet (kN)		
	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₅	t ₆	t ₇	t ₈	0°	5°	10°
1	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	44.35	49.12	45.12
2	1.01	1.19	0.64	0.66	3.81	3.93	3.74	3.52	19.13	21.82	22.63
3	0.64	3.82	3.96	3.99	3.76	3.62	0.68	0.53	16.54	23.65	17.77
4	3.38	0.75	1.11	3.99	3.78	1.19	3.95	1.65	22.54	24.48	24.93
5	1.10	3.86	3.30	0.57	0.77	3.79	2.85	3.97	17.23	20.73	22.04
6	0.59	3.60	1.45	3.63	0.56	3.98	3.97	1.93	15.89	20.69	16.05
7	0.54	0.52	3.76	2.85	3.38	1.72	0.53	0.55	14.90	15.53	15.01
8	4.00	0.50	3.53	1.38	3.46	0.50	4.00	3.99	14.27	15.82	16.00
9	3.80	0.97	3.73	1.88	1.44	3.95	3.83	0.70	20.53	26.83	31.63
10	0.69	3.95	3.23	1.10	3.12	3.62	3.95	1.18	18.96	39.88	18.92
11	0.58	0.98	3.74	0.55	3.84	1.21	3.62	2.96	15.83	18.31	16.28
12	1.06	3.63	3.91	3.89	3.11	3.76	3.35	3.91	30.86	132.43	31.09
13	3.31	0.69	3.92	0.67	4.00	1.56	2.33	0.73	19.85	21.87	22.45
14	3.86	3.63	3.85	3.92	1.10	1.40	0.52	3.74	17.77	24.75	25.79
15	3.33	0.54	2.52	0.70	3.39	3.87	0.52	3.57	15.51	17.22	17.04
16	0.53	0.61	0.55	1.28	1.29	3.99	3.94	0.53	14.40	17.70	14.63
17	0.66	3.35	0.72	0.58	3.17	0.52	3.79	0.53	14.88	18.64	18.27
18	0.50	0.80	0.90	3.61	0.72	3.95	0.81	0.54	13.66	19.72	13.83
19	0.60	3.84	3.97	0.52	0.53	0.55	3.49	1.16	15.54	19.31	16.51
20	0.51	0.50	3.98	0.66	0.80	3.05	2.92	0.50	13.74	15.01	13.91
21	3.71	2.27	0.51	3.97	2.28	1.70	0.84	0.57	14.57	16.64	17.81
22	3.92	2.77	3.06	2.99	3.95	4.00	1.11	1.48	36.27	46.52	53.84
23	3.97	0.51	3.73	0.56	0.50	1.88	1.73	3.99	14.64	16.21	16.37
24	1.50	3.77	0.91	1.37	3.79	3.88	1.08	3.82	27.80	31.54	33.13
25	3.99	3.13	3.28	3.95	3.92	0.54	3.14	3.74	17.94	23.05	24.66
26	3.99	3.93	1.26	1.33	0.52	0.62	0.54	1.32	16.79	22.33	24.10
27	3.62	0.88	0.65	0.91	3.15	2.95	3.60	0.61	17.64	22.73	23.11
28	2.51	0.55	0.56	2.98	0.76	0.76	3.62	3.71	15.97	17.53	17.88
29	3.74	2.62	3.26	0.73	3.71	3.81	3.78	3.91	22.65	28.78	27.94
30	3.95	3.47	0.71	1.88	1.77	0.55	3.92	0.51	14.72	18.95	21.93
31	0.64	2.34	3.93	0.60	3.89	3.37	0.60	2.41	17.35	19.93	17.82
32	0.59	0.69	1.84	3.96	0.54	1.05	3.99	0.52	14.47	18.11	16.26

Ek-2'in devamı

33	2.73	3.85	2.63	2.40	3.96	0.74	1.63	0.56	16.89	22.87	25.26
34	3.94	1.50	3.32	3.81	0.55	3.77	3.92	3.93	16.52	23.01	55.60
35	0.83	1.03	3.86	3.97	3.52	0.70	2.15	4.00	21.53	26.75	23.95
36	1.35	3.86	0.53	0.99	0.55	1.81	0.54	3.96	15.71	17.45	18.53
37	3.87	3.76	0.57	0.57	3.62	3.11	0.71	0.74	17.66	19.38	20.45
38	3.81	4.00	1.96	3.49	0.50	4.00	0.86	0.81	15.77	18.48	46.31
39	3.86	3.99	1.83	0.61	0.58	0.68	3.59	3.94	18.57	25.12	23.29
40	3.75	3.76	0.57	3.97	0.57	0.51	2.08	3.51	15.29	19.04	20.18
41	1.77	3.92	3.98	2.70	0.53	1.01	0.67	0.86	17.31	22.40	31.11
42	3.88	0.54	3.60	3.89	0.58	0.66	2.45	0.62	15.40	16.64	17.09
43	1.86	3.90	3.99	2.31	3.93	0.94	0.72	3.88	23.35	30.44	33.29
44	2.69	0.52	0.50	0.51	3.96	0.77	2.62	3.29	14.76	16.79	16.77
45	2.98	3.79	0.74	0.65	1.29	3.73	3.39	1.81	20.11	25.06	24.56
46	3.60	3.92	1.22	0.75	3.84	0.56	1.73	3.95	17.09	21.33	22.97
47	3.85	3.99	0.95	3.48	2.66	3.08	3.75	3.97	30.26	36.81	35.85
48	1.10	3.89	0.70	3.88	1.26	0.51	2.71	0.96	15.53	18.95	20.76
49	0.63	0.53	2.17	1.63	0.51	3.87	3.99	3.84	14.49	15.71	16.77
50	3.94	3.11	1.71	2.23	0.52	4.00	1.14	3.85	16.30	21.54	56.34
51	0.53	3.62	0.56	1.07	3.92	0.58	0.50	2.20	14.34	17.78	14.36
52	2.69	2.08	3.74	0.83	0.61	3.99	0.52	1.54	15.68	19.43	23.10
53	2.15	3.92	3.94	3.98	1.87	1.61	3.99	1.30	39.64	52.90	64.80
54	1.84	1.95	3.89	2.31	0.98	1.13	3.93	3.99	30.52	36.62	52.07
55	0.54	1.64	3.23	3.53	3.94	0.64	3.85	0.56	14.75	19.43	14.83
56	3.87	3.92	3.84	0.51	2.08	1.92	3.41	1.24	15.93	21.41	19.69
57	3.86	3.71	2.84	3.65	0.55	3.88	2.33	0.68	16.53	22.96	30.67
58	1.24	1.08	3.99	3.88	0.67	3.97	1.91	2.26	20.25	24.39	36.12
59	3.82	1.95	0.59	3.13	3.80	2.37	0.64	3.84	17.44	19.38	20.69
60	0.93	0.87	0.66	3.97	3.88	0.76	0.86	1.99	19.33	21.71	22.98
61	0.50	3.49	1.78	4.00	4.00	4.00	0.50	2.94	15.45	21.59	16.85
62	3.95	0.54	2.61	0.53	1.01	0.56	3.79	1.05	15.41	17.64	16.95
63	0.84	3.65	1.55	3.28	3.06	2.85	2.39	2.00	23.65	38.98	14.40
64	1.78	0.51	0.50	3.25	0.98	3.36	0.93	4.00	14.73	15.90	16.55
65	3.78	1.19	3.99	3.39	3.43	0.63	0.52	2.12	16.04	21.50	23.58
66	1.74	3.39	0.51	3.58	3.75	3.80	2.49	0.52	14.90	16.95	17.37
67	0.51	1.10	3.66	1.30	0.53	2.37	0.59	3.98	13.93	18.19	13.93
68	0.81	3.50	2.06	3.97	1.78	2.49	0.56	3.11	16.54	22.34	22.89

Ek 3. 0°, 5° ve 10 ° konik açılı Değişken Kalınlıklı Tüplerin (DKT) 68 örneklem noktası (ÖN) için hasarlı durumda sayısal analizlerden elde edilen sönümlenen enerji (SE) değerleri

ÖN	Bölge Kalınlıkları (mm)								SE (kJ)		
	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₅	t ₆	t ₇	t ₈	0°	5°	10°
1	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.21	1.34	1.31
2	1.01	1.19	0.64	0.66	3.81	3.93	3.74	3.52	1.89	1.90	0.88
3	3.96	0.72	2.85	3.96	0.53	0.58	3.76	3.62	2.49	3.04	0.68
4	3.38	0.75	1.11	3.99	3.78	1.19	3.95	1.65	1.69	1.65	1.63
5	1.10	3.86	3.30	0.57	0.77	3.79	2.85	3.97	1.18	1.21	0.88
6	0.59	3.60	1.45	3.63	0.56	3.98	3.97	1.93	1.65	1.05	1.44
7	0.54	0.52	3.76	2.85	3.38	1.72	0.53	0.55	1.05	1.13	0.43
8	4.00	0.50	3.53	1.38	3.46	0.50	4.00	3.99	0.96	0.95	0.86
9	3.80	0.97	3.73	1.88	1.44	3.95	3.83	0.70	1.81	1.48	1.71
10	0.69	3.95	3.23	1.10	3.12	3.62	3.95	1.18	2.47	1.12	0.94
11	0.58	0.98	3.74	0.55	3.84	1.21	3.62	2.96	1.04	1.41	0.36
12	1.06	3.63	3.91	3.89	3.11	3.76	3.35	3.91	4.21	5.30	1.08
13	3.31	0.69	3.92	0.67	4.00	1.56	2.33	0.73	1.05	1.10	0.83
14	3.86	3.63	3.85	3.92	1.10	1.40	0.52	3.74	1.82	2.31	3.16
15	3.33	0.54	2.52	0.70	3.39	3.87	0.52	3.57	0.83	0.69	0.56
16	0.53	0.61	0.55	1.28	1.29	3.99	3.94	0.53	0.53	0.59	0.44
17	0.66	3.35	0.72	0.58	3.17	0.52	3.79	0.53	0.46	0.46	0.32
18	0.50	0.80	0.90	3.61	0.72	3.95	0.81	0.54	0.51	0.78	0.47
19	0.60	3.84	3.97	0.52	0.53	0.55	3.49	1.16	0.66	0.55	0.31
20	0.51	0.50	3.98	0.66	0.80	3.05	2.92	0.50	0.50	0.52	0.33
21	3.71	2.27	0.51	3.97	2.28	1.70	0.84	0.57	1.10	1.11	0.89
22	3.92	2.77	3.06	2.99	3.95	4.00	1.11	1.48	2.62	2.45	2.74
23	3.97	0.51	3.73	0.56	0.50	1.88	1.73	3.99	0.91	0.45	0.93
24	1.50	3.77	0.91	1.37	3.79	3.88	1.08	3.82	1.77	1.60	1.09
25	0.58	3.22	1.98	2.22	3.15	1.96	2.25	3.74	2.51	2.29	2.62
26	3.99	3.93	1.26	1.33	0.52	0.62	0.54	1.32	0.72	0.65	0.81
27	3.62	0.88	0.65	0.91	3.15	2.95	3.60	0.61	1.30	0.69	0.86
28	2.51	0.55	0.56	2.98	0.76	0.76	3.62	3.71	0.76	0.63	0.80
29	3.74	2.62	3.26	0.73	3.71	3.81	3.78	3.91	3.01	3.25	2.50
30	3.95	3.47	0.71	1.88	1.77	0.55	3.92	0.51	0.91	0.80	0.67
31	0.64	2.34	3.93	0.60	3.89	3.37	0.60	2.41	1.06	1.47	0.45
32	0.59	0.69	1.84	3.96	0.54	1.05	3.99	0.52	0.60	0.59	0.54

Ek-3'ün devamı

33	2.73	3.85	2.63	2.40	3.96	0.74	1.63	0.56	1.80	1.84	1.78
34	3.94	1.50	3.32	3.81	0.55	3.77	3.92	3.93	1.75	1.64	4.42
35	0.83	1.03	3.86	3.97	3.52	0.70	2.15	4.00	1.82	1.70	0.70
36	1.35	3.86	0.53	0.99	0.55	1.81	0.54	3.96	0.62	0.53	0.48
37	3.87	3.76	0.57	0.57	3.62	3.11	0.71	0.74	0.64	0.68	0.42
38	3.81	4.00	1.96	3.49	0.50	4.00	0.86	0.81	2.98	3.09	3.33
39	3.86	3.99	1.83	0.61	0.58	0.68	3.59	3.94	0.69	0.49	0.95
40	3.75	3.76	0.57	3.97	0.57	0.51	2.08	3.51	1.01	0.51	0.82
41	1.77	3.92	3.98	2.70	0.53	1.01	0.67	0.86	1.23	1.65	1.43
42	3.88	0.54	3.60	3.89	0.58	0.66	2.45	0.62	0.58	0.63	0.70
43	1.86	3.90	3.99	2.31	3.93	0.94	0.72	3.88	2.21	3.01	1.59
44	2.69	0.52	0.50	0.51	3.96	0.77	2.62	3.29	0.67	0.58	0.48
45	2.98	3.79	0.74	0.65	1.29	3.73	3.39	1.81	1.17	0.86	1.42
46	3.60	3.92	1.22	0.75	3.84	0.56	1.73	3.95	1.64	0.94	0.75
47	3.85	3.99	0.95	3.48	2.66	3.08	3.75	3.97	3.56	1.95	3.16
48	1.10	3.89	0.70	3.88	1.26	0.51	2.71	0.96	0.80	0.90	0.62
49	0.63	0.53	2.17	1.63	0.51	3.87	3.99	3.84	1.01	0.87	0.72
50	3.94	3.11	1.71	2.23	0.52	4.00	1.14	3.85	1.84	1.23	2.62
51	0.53	3.62	0.56	1.07	3.92	0.58	0.50	2.20	0.56	0.47	0.39
52	2.69	2.08	3.74	0.83	0.61	3.99	0.52	1.54	0.88	0.63	1.26
53	2.15	3.92	3.94	3.98	1.87	1.61	3.99	1.30	2.05	2.92	2.81
54	1.84	1.95	3.89	2.31	0.98	1.13	3.93	3.99	1.66	1.89	2.04
55	0.54	1.64	3.23	3.53	3.94	0.64	3.85	0.56	1.19	1.18	0.42
56	3.87	3.92	3.84	0.51	2.08	1.92	3.41	1.24	1.73	1.43	1.39
57	3.86	3.71	2.84	3.65	0.55	3.88	2.33	0.68	2.31	2.27	3.54
58	1.24	1.08	3.99	3.88	0.67	3.97	1.91	2.26	1.38	1.88	1.26
59	3.82	1.95	0.59	3.13	3.80	2.37	0.64	3.84	1.52	1.27	0.95
60	0.93	0.87	0.66	3.97	3.88	0.76	0.86	1.99	0.69	0.70	0.54
61	0.50	3.49	1.78	4.00	4.00	4.00	0.50	2.94	1.82	2.09	1.09
62	3.95	0.54	2.61	0.53	1.01	0.56	3.79	1.05	0.60	0.52	0.48
63	0.84	3.65	1.55	3.28	3.06	2.85	2.39	2.00	2.55	2.23	0.88
64	1.78	0.51	0.50	3.25	0.98	3.36	0.93	4.00	0.87	0.81	1.01
65	3.78	1.19	3.99	3.39	3.43	0.63	0.52	2.12	1.61	1.12	0.89
66	1.74	3.39	0.51	3.58	3.75	3.80	2.49	0.52	1.72	1.96	1.06
67	0.51	1.10	3.66	1.30	0.53	2.37	0.59	3.98	0.70	0.85	0.57
68	0.81	3.50	2.06	3.97	1.78	2.49	0.56	3.11	1.56	1.80	0.96

Ek 4. 0°, 5° ve 10 ° konik açılı Değişken Kalınlıklı Tüplerin (DKT) 68 örneklem noktası (ÖN) için hasarlı durumda sayısal analizlerden elde edilen pik kuvvet (F_{pik}) değerleri

ÖN	Bölge Kalınlıkları (mm)								Pik Kuvvet (kN)		
	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₅	t ₆	t ₇	t ₈	0°	5°	10°
1	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	44.35	49.10	45.13
2	1.01	1.19	0.64	0.66	3.81	3.93	3.74	3.52	19.18	21.75	22.62
3	3.96	0.72	2.85	3.96	0.53	0.58	3.76	3.62	16.72	23.83	17.75
4	3.38	0.75	1.11	3.99	3.78	1.19	3.95	1.65	22.54	24.49	24.99
5	1.10	3.86	3.30	0.57	0.77	3.79	2.85	3.97	17.23	20.69	22.02
6	0.59	3.60	1.45	3.63	0.56	3.98	3.97	1.93	15.89	20.43	16.06
7	0.54	0.52	3.76	2.85	3.38	1.72	0.53	0.55	14.91	15.53	15.01
8	4.00	0.50	3.53	1.38	3.46	0.50	4.00	3.99	14.26	15.82	16.00
9	3.80	0.97	3.73	1.88	1.44	3.95	3.83	0.70	21.83	29.01	32.91
10	0.69	3.95	3.23	1.10	3.12	3.62	3.95	1.18	18.96	39.98	18.94
11	0.58	0.98	3.74	0.55	3.84	1.21	3.62	2.96	15.83	18.26	16.27
12	1.06	3.63	3.91	3.89	3.11	3.76	3.35	3.91	30.83	132.37	31.08
13	3.31	0.69	3.92	0.67	4.00	1.56	2.33	0.73	19.84	21.90	22.47
14	3.86	3.63	3.85	3.92	1.10	1.40	0.52	3.74	17.75	24.70	25.70
15	3.33	0.54	2.52	0.70	3.39	3.87	0.52	3.57	15.51	17.37	17.05
16	0.53	0.61	0.55	1.28	1.29	3.99	3.94	0.53	14.52	17.72	14.57
17	0.66	3.35	0.72	0.58	3.17	0.52	3.79	0.53	15.11	18.70	18.37
18	0.50	0.80	0.90	3.61	0.72	3.95	0.81	0.54	13.66	20.48	13.87
19	0.60	3.84	3.97	0.52	0.53	0.55	3.49	1.16	15.55	19.33	16.51
20	0.51	0.50	3.98	0.66	0.80	3.05	2.92	0.50	13.89	14.96	13.92
21	3.71	2.27	0.51	3.97	2.28	1.70	0.84	0.57	14.50	16.59	17.80
22	3.92	2.77	3.06	2.99	3.95	4.00	1.11	1.48	36.15	46.75	53.79
23	3.97	0.51	3.73	0.56	0.50	1.88	1.73	3.99	14.64	16.17	16.26
24	1.50	3.77	0.91	1.37	3.79	3.88	1.08	3.82	27.82	31.60	33.16
25	0.58	3.22	1.98	2.22	3.15	1.96	2.25	3.74	17.94	22.98	24.65
26	3.99	3.93	1.26	1.33	0.52	0.62	0.54	1.32	16.78	22.34	24.12
27	3.62	0.88	0.65	0.91	3.15	2.95	3.60	0.61	18.54	22.62	22.96
28	2.51	0.55	0.56	2.98	0.76	0.76	3.62	3.71	15.97	17.53	17.77
29	3.74	2.62	3.26	0.73	3.71	3.81	3.78	3.91	22.63	28.93	27.86
30	3.95	3.47	0.71	1.88	1.77	0.55	3.92	0.51	15.31	18.83	22.81
31	0.64	2.34	3.93	0.60	3.89	3.37	0.60	2.41	17.35	20.13	17.80
32	0.59	0.69	1.84	3.96	0.54	1.05	3.99	0.52	14.77	18.40	16.23

Ek-4'ün devamı

33	2.73	3.85	2.63	2.40	3.96	0.74	1.63	0.56	17.84	24.62	27.79
34	3.94	1.50	3.32	3.81	0.55	3.77	3.92	3.93	16.53	23.13	55.68
35	0.83	1.03	3.86	3.97	3.52	0.70	2.15	4.00	21.53	26.81	23.96
36	1.35	3.86	0.53	0.99	0.55	1.81	0.54	3.96	15.66	17.19	18.87
37	3.87	3.76	0.57	0.57	3.62	3.11	0.71	0.74	17.65	19.24	20.41
38	3.81	4.00	1.96	3.49	0.50	4.00	0.86	0.81	15.75	18.46	17.44
39	3.86	3.99	1.83	0.61	0.58	0.68	3.59	3.94	18.57	25.13	23.24
40	3.75	3.76	0.57	3.97	0.57	0.51	2.08	3.51	15.30	19.14	20.21
41	1.77	3.92	3.98	2.70	0.53	1.01	0.67	0.86	17.31	22.49	30.82
42	3.88	0.54	3.60	3.89	0.58	0.66	2.45	0.62	15.42	16.55	17.13
43	1.86	3.90	3.99	2.31	3.93	0.94	0.72	3.88	23.30	30.60	33.22
44	2.69	0.52	0.50	0.51	3.96	0.77	2.62	3.29	14.77	16.97	16.81
45	2.98	3.79	0.74	0.65	1.29	3.73	3.39	1.81	20.14	25.55	24.81
46	3.60	3.92	1.22	0.75	3.84	0.56	1.73	3.95	17.07	21.13	22.86
47	3.85	3.99	0.95	3.48	2.66	3.08	3.75	3.97	30.25	36.87	35.78
48	1.10	3.89	0.70	3.88	1.26	0.51	2.71	0.96	15.56	19.26	20.74
49	0.63	0.53	2.17	1.63	0.51	3.87	3.99	3.84	14.50	15.69	16.79
50	3.94	3.11	1.71	2.23	0.52	4.00	1.14	3.85	16.30	21.56	56.36
51	0.53	3.62	0.56	1.07	3.92	0.58	0.50	2.20	14.34	17.81	14.36
52	2.69	2.08	3.74	0.83	0.61	3.99	0.52	1.54	15.68	19.55	23.14
53	2.15	3.92	3.94	3.98	1.87	1.61	3.99	1.30	42.56	56.83	68.86
54	1.84	1.95	3.89	2.31	0.98	1.13	3.93	3.99	30.52	36.47	52.10
55	0.54	1.64	3.23	3.53	3.94	0.64	3.85	0.56	14.77	21.75	14.83
56	3.87	3.92	3.84	0.51	2.08	1.92	3.41	1.24	15.92	21.33	19.68
57	3.86	3.71	2.84	3.65	0.55	3.88	2.33	0.68	16.55	23.26	33.75
58	1.24	1.08	3.99	3.88	0.67	3.97	1.91	2.26	20.26	24.29	36.12
59	3.82	1.95	0.59	3.13	3.80	2.37	0.64	3.84	17.44	19.47	20.63
60	0.93	0.87	0.66	3.97	3.88	0.76	0.86	1.99	19.34	21.72	22.98
61	0.50	3.49	1.78	4.00	4.00	4.00	0.50	2.94	15.44	16.16	16.84
62	3.95	0.54	2.61	0.53	1.01	0.56	3.79	1.05	15.44	17.58	16.96
63	0.84	3.65	1.55	3.28	3.06	2.85	2.39	2.00	14.51	38.86	14.40
64	1.78	0.51	0.50	3.25	0.98	3.36	0.93	4.00	14.61	15.90	16.52
65	3.78	1.19	3.99	3.39	3.43	0.63	0.52	2.12	16.02	21.49	23.50
66	1.74	3.39	0.51	3.58	3.75	3.80	2.49	0.52	14.89	16.91	17.22
67	0.51	1.10	3.66	1.30	0.53	2.37	0.59	3.98	13.93	18.42	13.93
68	0.81	3.50	2.06	3.97	1.78	2.49	0.56	3.11	16.54	22.40	22.91

Ek 5. 0°, 5° ve 10 ° konik açılı kompozit tüplerin 43 örneklem noktası (ÖN) için sayısal analizlerden elde edilen sönümlenen enerji (SE) ve pik kuvvet (F_{pik}) değerleri

ÖN	Elyaf Açılı						SE (kJ)			Pik Kuvvet (kN)		
	α_{in1}	α_{in2}	α_{mid1}	α_{mid2}	α_{out1}	α_{out2}	0°	5°	10°	0°	5°	10°
1	0	90	0	90	0	90	1.47	1.87	1.80	41.10	56.39	46.91
2	80	80	-60	-50	90	-50	0.71	1.68	1.55	31.33	37.14	44.34
3	20	30	-90	20	0	20	1.24	1.96	1.92	45.44	53.77	52.19
4	-80	40	90	50	-60	90	1.37	1.77	1.76	38.76	38.40	46.65
5	90	-60	-70	80	80	80	1.33	1.72	1.60	31.48	36.11	41.34
6	20	80	70	-50	90	-80	1.47	1.85	1.85	54.54	37.54	38.88
7	20	-60	-50	60	80	-80	1.56	1.84	1.70	49.56	41.61	40.63
8	-50	-70	40	60	50	50	1.16	1.48	1.35	39.24	48.20	45.25
9	90	90	40	-10	90	20	1.20	1.90	1.91	35.06	40.68	66.27
10	70	70	-80	90	90	70	0.99	1.67	1.61	27.12	56.09	33.04
11	-60	40	-80	30	80	-80	1.45	1.84	1.81	42.22	38.76	51.14
12	-60	70	40	60	50	-80	1.44	1.71	1.65	41.94	38.75	39.13
13	70	-80	80	-20	80	-60	1.43	1.93	1.75	45.71	50.00	53.06
14	90	-80	60	60	-70	50	0.99	1.69	1.53	30.60	46.21	40.77
15	70	80	-70	70	30	-90	1.33	1.77	1.74	35.75	40.22	45.73
16	80	90	40	20	-80	-10	1.30	1.96	1.99	35.47	48.20	50.15
17	20	-50	90	90	40	-30	0.79	1.89	1.82	26.11	43.75	33.54
18	90	20	40	70	20	20	1.28	1.62	1.53	43.54	45.92	50.75
19	-80	40	-90	90	40	20	0.72	1.89	1.73	25.81	33.70	42.37
20	-70	-80	-80	40	90	90	1.37	1.77	1.77	36.22	32.62	42.31
21	-80	70	-80	-70	80	30	1.15	1.80	1.83	35.89	36.68	42.71
22	-60	90	40	-90	20	90	1.50	1.71	1.70	37.82	42.15	43.57
23	-30	30	-40	20	80	90	1.51	1.92	1.89	50.87	44.90	44.94
24	-40	-30	40	-90	80	-70	1.53	1.76	1.69	46.35	48.94	50.00
25	80	80	-80	-60	70	80	1.10	1.72	1.63	33.51	40.17	42.01
26	30	90	90	90	80	80	0.83	1.61	1.61	25.40	40.88	38.25
27	-70	80	20	-70	40	-30	1.37	1.74	1.57	41.74	64.00	59.76
28	70	20	40	-60	20	80	1.52	1.85	1.76	50.94	42.18	56.19
29	30	90	70	-60	-90	70	1.40	1.73	1.70	46.61	45.99	39.65
30	20	-70	80	20	-70	-80	1.51	1.86	1.82	46.27	47.54	44.18
31	30	-90	90	-90	50	90	1.22	1.64	1.66	41.81	41.42	35.35
32	-80	-20	90	-70	30	20	1.27	1.91	1.68	37.11	39.92	49.60

Ek-5'in devamı

33	-90	50	40	80	50	50	1.25	1.72	1.59	37.86	46.28	49.64
34	70	80	60	40	20	-80	1.30	1.77	1.69	40.13	41.27	44.40
35	-30	60	70	70	-80	-20	1.20	1.89	1.88	42.16	56.81	36.62
36	-30	60	90	-10	80	40	1.34	1.99	1.90	42.15	48.84	39.76
37	30	0	80	-70	-20	-70	1.00	1.90	1.78	47.56	37.81	44.56
38	20	80	-50	-70	-80	40	1.29	1.89	1.68	49.88	53.27	40.95
39	60	-60	-60	80	-40	90	1.43	1.76	1.74	41.90	41.28	46.86
40	-70	30	50	-60	-90	30	1.45	1.96	1.78	44.65	44.61	42.01
41	70	-80	70	50	70	70	1.15	1.76	1.61	34.82	40.99	43.07
42	30	50	-40	50	-80	-90	1.48	1.79	1.96	40.92	43.06	57.86
43	70	50	90	60	-60	90	1.38	1.75	1.77	39.72	35.26	50.18

Ek 6. S_Al tütün 23 örneklem noktası (ÖN) için sayısal analizlerden elde edilen sönmölenen enerji (SE), pik kuvvet (F_{pik}) ve ortalama kuvvet (F_{ort}) değerleri

ÖN	Köpük 1	Köpük 2	Köpük 3	t_a	SE (kJ)	Pik Kuvvet (kN)	Ort Kuvvet (kN)
1	500	750	1000	1.50	2.61	55.94	52.20
2	1049	501	805	2.22	3.56	74.32	71.69
3	830	515	1498	2.37	4.43	79.69	89.44
4	1029	979	1302	3.93	7.12	144.36	142.89
5	734	1493	1500	2.73	7.26	115.20	145.88
6	500	1195	1500	1.04	3.98	47.42	79.53
7	853	1026	501	1.07	2.41	35.47	48.19
8	908	500	500	4.00	5.39	129.87	107.40
9	1486	1471	781	3.82	8.07	145.44	162.41
10	865	1489	503	3.57	6.22	116.20	124.42
11	502	933	612	3.08	4.34	102.19	85.91
12	510	1498	879	1.05	3.21	41.00	64.38
13	1448	836	580	3.34	5.96	113.66	118.73
14	1493	1399	1497	3.42	8.53	156.61	171.65
15	516	531	1157	3.94	5.74	129.10	113.44
16	1499	1476	1450	1.11	5.80	90.11	117.21
17	1498	524	503	1.00	2.41	29.15	48.22
18	1127	1492	976	2.18	5.94	111.90	119.41
19	1487	514	1179	3.47	6.98	113.93	139.46
20	500	1361	1043	4.00	7.09	129.96	142.88
21	1491	505	1494	1.55	5.42	54.19	108.27
22	1088	985	1215	1.02	3.56	53.77	71.41
23	1499	1183	700	1.02	4.30	44.72	85.87

t_a : Alüminyum tütün cidar kalınlığı

Ek 7. S_St tüpün 23 örnekleme noktası ( N) için sayısal analizlerden elde edilen sönümlenen enerji (SE), pik kuvvet (F_{pik}) ve ortalama kuvvet (F_{ort}) değerleri

�N	Köpük 1	Köpük 2	Köpük 3	t_s	SE (kJ)	Pik Kuvvet (kN)	Ort Kuvvet (kN)
1	500	750	1000	1.50	3.64	85.38	72.88
2	1049	501	805	2.22	5.31	120.54	107.08
3	830	515	1498	2.37	6.44	129.33	129.19
4	1029	979	1302	3.93	11.44	229.25	227.40
5	734	1493	1500	2.73	9.92	173.30	198.52
6	500	1195	1500	1.04	4.55	63.99	90.75
7	853	1026	501	1.07	3.02	54.56	60.27
8	908	500	500	4.00	9.70	221.72	192.59
9	1486	1471	781	3.82	13.07	233.10	260.94
10	865	1489	503	3.57	10.09	197.17	199.77
11	502	933	612	3.08	7.26	168.79	146.16
12	510	1498	879	1.05	3.86	57.43	77.37
13	1448	836	580	3.34	9.24	188.79	186.47
14	1493	1399	1497	3.42	11.80	210.94	237.84
15	516	531	1157	3.94	10.09	219.68	197.98
16	1499	1476	1450	1.11	6.43	93.36	129.72
17	1498	524	503	1.00	2.96	45.32	59.22
18	1127	1492	976	2.18	7.79	151.34	156.60
19	1487	514	1179	3.47	10.45	191.84	210.73
20	500	1361	1043	4.00	10.58	180.50	211.60
21	1491	505	1494	1.55	6.55	84.72	131.11
22	1088	985	1215	1.02	4.17	71.75	83.58
23	1499	1183	700	1.02	4.88	62.85	97.68

t_s :  elik tüp cıdar kalınlığı

Ek 8. S_C tütün 16 örneklem noktası (ÖN) için sayısal analizlerden elde edilen sönümlenen enerji (SE), pik kuvvet (F_{pik}) ve ortalama kuvvet (F_{ort}) değerleri

ÖN	Köpük 1	Köpük 2	Köpük 3	SE (kJ)	Pik Kuvvet (kN)	Ort Kuvvet (kN)
1	500	750	1000	2.90	57.24	55.54
2	1476	900	1471	6.47	95.97	124.02
3	722	1290	1007	4.29	73.19	82.86
4	1223	849	942	4.24	88.95	81.35
5	503	1451	1500	5.74	70.44	110.38
6	1152	1500	686	5.09	73.60	97.90
7	545	1486	502	3.28	58.08	63.53
8	1482	516	510	3.19	57.67	61.53
9	1486	1077	501	4.44	64.15	85.39
10	1071	1497	1489	7.07	121.82	134.74
11	541	500	1500	3.29	61.81	63.21
12	1085	506	1363	4.22	55.05	81.17
13	849	1005	520	3.14	61.01	60.64
14	1492	1334	1108	6.42	120.71	123.82
15	596	501	504	2.07	54.32	39.90
16	827	991	1489	4.83	89.50	93.21

Ek 9. D_Al-St tütün 32 örneklem noktası (ÖN) için sayısal analizlerden elde edilen sönümlenen enerji (SE), pik kuvvet (F_{pik}) ve ortalama kuvvet (F_{ort}) değerleri

ÖN	Köpük 1	Köpük 2	Köpük 3	t_a	t_s	SE (kJ)	Pik Kuvvet (kN)	Ort Kuvvet (kN)
1	500	750	1000	1.50	1.50	2.99	61.51	59.95
2	1477	1396	1488	3.99	3.97	10.62	227.24	214.89
3	1494	1500	1500	1.00	1.07	6.05	130.73	122.83
4	604	1435	1329	3.76	1.25	6.44	77.90	129.02
5	1471	530	1478	1.50	2.65	6.56	64.31	131.45
6	521	1464	1488	1.07	1.86	5.75	53.19	115.40
7	1257	1481	621	1.81	3.92	7.21	66.32	145.78
8	1069	879	1106	3.32	2.54	6.91	138.22	138.48
9	627	1453	615	3.99	4.00	7.92	136.83	158.46
10	1479	1044	931	1.55	1.81	5.24	83.08	105.23
11	1486	512	1437	3.96	3.82	9.70	142.89	194.79
12	1498	821	736	3.92	1.01	5.12	60.75	102.89
13	1099	566	507	1.18	1.08	2.33	42.73	46.83
14	1444	1136	592	3.98	3.90	8.92	137.27	179.60
15	714	501	580	3.86	3.69	6.26	128.02	125.96
16	1446	502	1462	3.86	1.23	6.69	68.36	134.20
17	945	931	1131	1.05	3.37	5.36	76.53	107.85
18	535	711	510	1.28	3.98	3.93	41.68	78.48
19	1426	1375	1464	3.73	1.36	7.44	155.40	150.13
20	969	1453	561	1.21	1.04	3.78	45.26	76.03
21	620	624	1422	3.96	1.06	4.42	70.35	89.32
22	502	960	1238	3.96	3.97	8.05	143.32	160.60
23	1438	1442	1461	1.00	3.94	7.60	120.96	154.47
24	1142	1472	533	3.60	1.56	6.20	80.17	124.45
25	855	501	1498	2.55	3.97	6.51	107.55	130.98
26	556	1498	776	1.01	2.94	4.57	41.52	92.00
27	1013	976	1499	2.01	1.00	4.93	92.47	99.48
28	1491	770	509	1.01	3.97	5.16	39.77	104.99
29	848	1490	1339	2.62	3.59	8.33	128.96	167.53
30	1383	510	508	2.85	2.75	5.13	90.99	102.94
31	723	508	652	3.80	1.04	3.29	46.80	66.16
32	542	1053	505	2.83	2.37	4.45	88.89	89.39

t_a : Alüminyum tüp cidar kalınlığı

t_s : Çelik tüp cidar kalınlığı

Ek 10. D_Al-C tüpün 23 örneklem noktası ( N) için sayısal analizlerden elde edilen sönümlenen enerji (SE), pik kuvvet (F_{pik}) ve ortalama kuvvet (F_{ort}) değerleri

�N	Köpük 1	Köpük 2	Köpük 3	t_a	SE (kJ)	Pik Kuvvet (kN)	Ort Kuvvet (kN)
1	500	750	1000	1.00	2.53	35.01	49.21
2	738	502	1498	2.11	3.79	83.24	73.72
3	1484	508	1474	1.63	5.72	67.49	111.48
4	500	1500	857	1.00	3.60	31.21	70.23
5	1094	1495	1500	2.72	7.39	131.43	143.83
6	510	1367	1500	1.64	5.54	76.18	107.65
7	975	954	1088	2.91	4.28	103.08	83.48
8	1478	503	1008	3.99	4.98	75.88	96.61
9	974	942	502	3.99	3.88	65.24	75.67
10	588	1476	768	3.88	4.50	68.90	87.76
11	685	515	501	2.28	2.42	61.35	47.32
12	1348	1492	736	1.04	5.44	46.96	105.83
13	1496	1240	546	2.99	5.38	68.82	104.14
14	1454	1498	1090	3.99	7.58	120.60	146.95
15	593	776	1496	4.00	4.69	92.34	90.03
16	1500	1499	1436	1.06	5.19	116.17	98.95
17	1498	502	503	2.41	3.42	69.02	66.54
18	516	1488	1489	3.89	6.34	88.94	122.58
19	1497	966	1498	3.53	7.32	109.80	142.66
20	511	529	858	4.00	3.14	72.00	60.41
21	872	1242	500	2.13	3.64	56.50	70.66
22	1037	992	1374	1.01	4.77	76.29	92.61
23	1139	781	722	1.00	3.09	44.71	60.19

t_a : Alüminyum t p cıdar kalınlığı

Ek 11. D_St-C tüpün 23 örneklem noktası (ÖN) için sayısal analizlerden elde edilen sönmölenen enerji (SE), pik kuvvet (F_{pik}) ve ortalama kuvvet (F_{ort}) değerleri

ÖN	Köpük 1	Köpük 2	Köpük 3	t_s	SE (kJ)	Pik Kuvvet (kN)	Ort Kuvvet (kN)
1	500	750	1000	1.50	3.07	75.77	60.10
2	1049	501	805	2.22	3.67	68.86	71.64
3	830	515	1498	2.37	4.53	89.36	88.19
4	1029	979	1302	3.93	6.08	119.34	118.68
5	734	1493	1500	2.73	7.09	102.95	137.07
6	500	1195	1500	1.04	4.90	76.21	94.83
7	853	1026	501	1.07	3.25	56.29	62.84
8	908	500	500	4.00	3.88	70.22	75.78
9	1486	1471	781	3.82	7.67	97.70	149.58
10	865	1489	503	3.57	5.29	70.20	102.76
11	502	933	612	3.08	3.64	68.15	70.38
12	510	1498	879	1.05	4.02	57.88	78.21
13	1448	836	580	3.34	4.96	71.88	96.95
14	1493	1399	1497	3.42	7.67	163.24	150.52
15	516	531	1157	3.94	4.20	86.81	81.97
16	1499	1476	1450	1.11	6.89	157.30	131.76
17	1498	524	503	1.00	3.19	43.55	62.27
18	1127	1492	976	2.18	6.16	113.23	119.12
19	1487	514	1179	3.47	6.10	81.75	117.64
20	500	1361	1043	4.00	5.76	82.18	111.83
21	1491	505	1494	1.55	5.94	88.27	115.79
22	1088	985	1215	1.02	4.98	88.69	96.74
23	1499	1183	700	1.02	5.12	59.60	99.29

t_s : Çelik tüp cidar kalınlığı

ÖZGEÇMİŞ

Dursun MERİÇ, İlk okulu İstanbul Beykoz Ahmet Akça İlköğretim okulunda tamamladı. Orta okul ve lise eğitimini Üsküdar İmam Hatip Lisesinde tamamladıktan sonra Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden 2006 yılında mezun oldu. Bir süre özel sektörde çeşitli firmalarda çalıştıktan sonra 2010 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi A. Kanca MYO'da öğretim görevlisi olarak çalışmaya başladı. 2014 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine mühendisliği bölümünden 'Farklı Malzemelerden Yapılmış Tüplerin Statik ve Dinamik Yükler Altında Enerji Sönümleme Karakteristiklerinin DeneySEL ve Sayısal Olarak Belirlenmesi' isimli teziyle yüksek lisans eğitimini tamamladı. Sonrasında Karadeniz teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde doktora eğitimine başladı. Halen A. Kanca MYO'daki görevine devam etmekte olup İngilizce bilmektedir.

Bu doktora tezi kapsamında yayınlanmış makaleler:

1. Meriç D., Gedikli H. Multi-objective optimization of energy absorbing behavior of foam-filled hybrid composite tubes. Composite Structures, cilt.279, ss.114771, 2022.
2. Meriç D., Gedikli H. Effect of fiber angle alignment on energy absorbing behavior of conical composite tubes. International Journal of Crashworthiness, cilt.28, ss.22-42, 2021.
3. Meriç D., Gedikli H. Numerical investigation of energy absorption behaviors of variable thickness tubes. Journal Of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, cilt.35, sa.4, ss.1939-1956, 2020.