

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

**FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ İNCE
CİDARLI TÜPLERİN ÇARPIŞMA DAYANIMLARININ
İNCELENMESİ**

Merve TUNAY ÇETİN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
Yrd. Doç. Dr. Cengiz BAYKASOĞLU**

**OCAK 2015
ÇORUM**

Merve TUNAY ÇETİN tarafından hazırlanan “Fonksiyonel Derecelendirilmiş İnce Cidarlı Tüplerin Çarpışma Dayanımlarının İncelenmesi” adlı tez çalışması 16/01/2015 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği / ~~oy çokluğu~~ ile Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans / ~~Doktora tezi~~ olarak kabul edilmiştir.

Yrd. Doç. Dr. Cengiz BAYKASOĞLU (Danışman).....

Yrd. Doç. Dr. Mehmet Burak BİLGİN

Yrd. Doç. Dr. Muhammed Emin ERDİN.....

Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun 23/01/2015. tarih ve ..2015/11... sayılı kararı ile Merve TUNAY ÇETİN’in Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans / ~~Doktora derecesi~~ alması onanmıştır.

Prof. Dr. Ali KILIÇARSLAN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BEYANI

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan ederim.



Merve TUNAY ÇETİN

FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ İNCE CİDARLI TÜPLERİN ÇARPIŞMA DAYANIMLARININ İNCELENMESİ

Merve TUNAY ÇETİN

HİTİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2014

ÖZET

Bu tez çalışmasında, eksenel ve eğik darbe yüklemeleri altında fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kalınlıklı ve eşdeğer kalınlıklı ince cidarlı alüminyum silindirik tüplerin çarpışma davranışları sistematik olarak incelenmiştir. Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kalınlıklı ince cidarlı yapılar daha verimli malzeme kullanımı ve malzeme yapısı üzerinde değişken dayanımların oluşmasını sağlar. Bu sayede, geleneksel olarak üretilen eşdeğer kalınlıklı ince cidarlı yapılarla kıyaslandığında çarpışma parametrelerinin daha etkili bir şekilde kontrol edebilirler. Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kalınlıklı tüplerin incelenmesi için sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak eksenel yönde ve farklı kalınlıkta eğim verilerek oluşturulmuş tüpler sabit rijit bir duvara çarptırılarak incelenmiştir. Dinamik çarpışma simülasyonları Abaqus/Explicit ticari sonlu elemanlar benzetimi paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca sonlu elemanlar modeli literatürde bulunan önceki deneysel ve sayısal sonuçlarla doğrulanmıştır. Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kalınlıklı tüplerin verimliliğini ve çarpışma performanslarını gösterebilmek için aynı ağırlıkta ve eşdeğer kalınlıktaki tüplerle karşılaştırılmıştır. Bu çalışma ile ayrıca çeşitli uzunluk/çap oranlarındaki fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kalınlıklı ince cidarlı tüplerin çarpışma davranışları da incelenmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kalınlıklı tüplerin eşdeğer kalınlıklı tüplere göre darbelere karşı daha üstün performansa sahip olduğu gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kalınlık, sonlu elemanlar metodu, ince cidarlı silindirik tüpler, çarpışma dayanımı

**CRASHWORTHINESS INVESTIGATION OF THIN WALLED TUBES
WITH FUNCTIONALLY GRADED THICKNESS**

Merve TUNAY ÇETİN

HITIT UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2014

ABSTRACT

In this thesis, the crash behavior of aluminum thin-walled cylindrical tubes with functionally graded thicknesses (FGT) are systematically investigated under axial and oblique impact loading. The FGT materials provide more efficient material usage and variable stiffness over the structure. By means, it allows to control the crashworthiness parameters of energy absorbers more efficiently by comparison with traditionally produced uniform thickness (UT) materials. To consider crash behavior of FGT tubes, different thickness gradient patterns are examined axial dimension of the tubes and impact fixed rigid wall by using finite element (FE) method. The commercial finite element code, Abaqus/Explicit is used to apply dynamic analysis. Additionally, the FE model is validated with previously introduced numerical and experimental results in literature in order to show crashworthiness performance of the FGT tubes and efficiency of the FGT tubes are compared with the UT tubes at the same weight. The study also has shown that crashworthiness behavior of various length/ diameter ratios on the FGT tubes are researched. According to simulation conclusions, it can be seen from this study that the FGT tubes have superior crashworthiness performance than the UT tubes.

Keywords: Functionally graded thickness, finite element method, cylindrical thin-walled tubes, crashworthiness

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca bilgi ve deneyimlerini benden esirgemeyen, teşvik ve destekleri ile her türlü problemin üstesinden gelmemde bana yardımcı olan saygıdeğer danışmanım Yrd. Doç. Dr. Cengiz BAYKASOĞLU'na, en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez savunma sınavı jürimde bulunan değerli öğretim üyelerine teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca maddi desteklerinden dolayı TUBİTAK'a (2210-A Yurtiçi Genel Yüksek Lisans Burs Programı) teşekkürü bir borç bilirim.

Yüksek Lisans öğrenimim sırasında yardımlarını ve desteğini esirgemeyen başta Hitit Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölüm Başkanı Prof. Dr. Halil AYKUL olmak üzere tüm değerli öğretim üyelerine,

Etkin ve eğlenceli çalışma ortamı oluşturdukları için Makina Mühendisliği Bölümü çalışma arkadaşlarıma,

Arkadaşlıkları ve paylaşımları için diğer bölümlerindeki arkadaşlarıma,

Hayatım boyunca desteklerini her zaman hissettiğim canım aileme,

Son olarak, bu süreç boyunca ihtiyacım olan her anda yanımda olan sevgili eşim Erhan ÇETİN'e

...ve gelişiyile bana hayat enerjisi veren canım oğlum Erhan Emir'e sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ	1
2. İNCE CİDARLI YAPILARIN ENERJİ SÖNÜM ÖZELLİKLERİNİ BELİRLEMEK İÇİN GELİŞTİRİLEN TEORİK MODELLER.....	11
3. ÇARPIŞMA DAYANIM PARAMETRELERİ.....	16
3.1. Toplam Sönümlenen Enerji	16
3.2. Maksimum Çarpışma Kuvveti.....	17
3.3. Ortalama Çarpışma Kuvveti	17
3.4. Çarpışma Kuvveti Verimi.....	17
3.5. Özgül Enerji Sönümü	17
3.6. Deformasyon Mod Şekilleri	18
4. FONKSİYONEL OLARAK DERECELENDİRİLMİŞ TÜPLERİN EKSENEL VE EĞİK YÜKLER ALTINDAKİ DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ.....	20
4.1. Sonlu Elemanlar Modeli	20
4.2. Sonlu Elemanlar Modelinin Doğrulanması	23
5. SAYISAL SONUÇLAR	27
5.1. Eksenel Yükleme İçin Sayısal Sonuçlar	27

	Sayfa
5.2. Eğik Yükleme İçin Sayısal Sonuçlar	40
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	49
KAYNAKLAR	51
ÖZGEÇMİŞ	58

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Rijit plakanın değişik hız parametreleri.....	24
Çizelge 4.2. Sonlu elemanlar modellerinin sonuçlarının önceden belirlenmiş sonuçlarla karşılaştırılması	24
Çizelge 4.3. Eşdeğer kalınlıklı tüplerin F_{ort} sonuçlarının karşılaştırılması.....	26

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Alexander (1960) tarafından kabul edilen aksenal simetrik çökme mekanizması.....	12
Şekil 2.2. Abramowicz ve Jones (1984,1986) tarafından kullanılan aksenal simetrik deformasyon şekli.....	13
Şekil 2.3. Aksenal simetrik deformasyon şekli için Grzebieta (1990a) tarafından varsayılan çökme mekanizması.....	14
Şekil 2.4. Wierzbicki (1992) ve Singace ve ark. (1995,1996) tarafından kabul edilen aksenal simetrik model.....	15
Şekil 3.1. Tipik kuvvet – yer değiştirme grafiği	16
Şekil 3.2. FDK ve EK tüplerin tipik deformasyon şekilleri ve ilgili kuvvet-yer değiştirme eğrileri	19
Şekil 3.3. Silindirik 6060-T5 alüminyum tüpler için farklı deformasyon şekillerinin çizelgesi (Guillow ve ark.,2001)	19
Şekil 4.1. Sonlu elemanlar modellerinin bileşenleri (a) aksenal yükleme, (b) eğik yükleme, (c) eğik yükleme açısı	20
Şekil 4.2. Al 6063 T5 alüminyum alaşımı için birim şekil değişimi-gerilme eğrisi (Karagiozova ve ark. 2005)	21
Şekil 4.3. Artan üst (n) değerleri için çeşitli kalınlık değişimleri	23
Şekil 4.4. S1 modelinin sonlu elemanlar ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması (a) çarpışma kuvveti- yer değiştirme eğrisi, (b) deneysel çarpışma numunesi ve (c) sonlu eleman numunesi	25
Şekil 5.1. Eşdeğer kalınlıklı tüplerin farklı n ve kalınlık değişimleri için (a) ağırlık değerleri ve (b) eşdeğer kalınlık değerleri	28
Şekil 5.2. Eşdeğer ve fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kalınlıklı tüplerin farklı n ve kalınlık değişimleri için tüplerin başlangıç ve maksimum çarpışma kuvveti değerleri	29
Şekil 5.3. (a) Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş ve (b) eşdeğer kalınlıklı tüplerin kuvvet- yer değiştirme ve sönmölenen enerji- yer değiştirme eğrileri	30

Şekil	Sayfa
Şekil 5.4. (a) Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş tüplerin çarpışma kuvvet verimliliği ve (b) eşdeğer kalınlıklı tüplerin çarpışma kuvvet verimliliği değerleri.....	32
Şekil 5.5. (a) Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş tüplerin özgül enerji sönümü değerleri ve (b) eşdeğer kalınlıklı tüplerin özgül enerji sönümü değerleri	33
Şekil 5.6. Seçilmiş bazı fonksiyonel olarak derecelendirilmiş ve eşdeğer kalınlıklı tüplerin farklı n değerlerindeki deformasyon şekilleri	35
Şekil 5.7. Farklı n ve boy/çap değerlerinde fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kalınlıklı tüplerin sönümledikleri toplam enerji değerleri.....	36
Şekil 5.8. Farklı n ve boy/çap değerlerinde fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kalınlıklı tüplerin özgül enerji sönümü değerleri.....	37
Şekil 5.9. Farklı n ve boy/çap değerlerinde fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kalınlıklı tüplerin başlangıç çarpışma kuvveti değerleri.....	38
Şekil 5.10. Farklı n ve boy/çap değerlerinde fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kalınlıklı tüplerin maksimum çarpışma kuvveti değerleri.....	38
Şekil 5.11. Farklı n ve boy/çap değerlerinde fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kalınlıklı tüplerin ortalama çarpışma kuvveti değerleri.....	39
Şekil 5.12. Farklı n ve boy/çap değerlerinde fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kalınlıklı tüplerin çarpışma kuvveti verimliliği değerleri	39
Şekil 5.13. (a) EK ve (b) FDK tüplerin eğik yüklemeler altında kuvvet- yer değiştirme eğrileri	40
Şekil 5.14.(a) EK ve (b) FDK tüplerin eğik yüklemeler altında sönümlenen enerji - yer değiştirme eğrileri	41
Şekil 5.15. Yükleme açıları (a) $\theta=10^\circ$, (b) $\theta=20^\circ$ ve (c) $\theta=30^\circ$ için değişen n değerlerinde özgül enerji sönümü değerleri.....	43
Şekil 5.16. Yükleme açıları (a) $\theta=10^\circ$, (b) $\theta=20^\circ$ ve (c) $\theta=30^\circ$ için değişen n değerlerinde ortalama çarpışma kuvveti değerleri	44
Şekil 5.17. Yükleme açısı 10° olan seçilmiş bazı fonksiyonel olarak derecelendirilmiş ve eşdeğer kalınlıklı tüplerin farklı n değerlerindeki deformasyon şekilleri	45

Şekil	Sayfa
Şekil 5.18. Yükleme açısı 20° olan seçilmiş bazı fonksiyonel olarak derecelendirilmiş ve eşdeğer kalınlıklı tüplerin farklı n değerlerindeki deformasyon şekilleri.....	46
Şekil 5.19. Yükleme açısı 30° olan seçilmiş bazı fonksiyonel olarak derecelendirilmiş ve eşdeğer kalınlıklı tüplerin farklı n değerlerindeki deformasyon şekilleri.....	47

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
σ_0	Ortalama akma dayanımı
σ^0	Statik gerilme
$\sigma_{0,2}$	% 0,2 akma dayanımı
$\bar{\sigma}$	Dinamik gerilme
δ_t	Toplam yer değiştirme
μ	Sürtünme katsayısı
σ_u	Malzemenin çekme dayanımı
ρ	Yoğunluk
ν	Poisson oranı
$\dot{\epsilon}^{pl}$	Elastik olmayan şekil değiştirme hızı
θ	Yükleme açısı
Δt	Kalınlık değişimi
C	Malzeme sabiti
D	Silindirik tüpün çapı
d	Cowper-Symonds üstelleri
E	Young modülü
E_K^{FDK}	FDK tüpün ilk kinetik enerjisi
e	Eksantriklik faktörü
F_{ilk}	Başlangıç çarpışma kuvveti
F_{mak}	Maksimum çarpışma kuvveti
F_{ort}	Ortalama çarpışma kuvveti
F(δ)	Anlık çarpışma kuvveti
H	Plastik yarı dalga boyu
L	Tüplerin ilk boyu

Simgeler	Açıklama
M_0	Silindirik tüpün plastik momenti
m	Enerji sönümleyinin kütlesi
m_{EK}	Eşdeğer kalınlıklı tüpün kütlesi
N	Çevresel katlanma sayısı
n	Çarpışma üsteli
P	Cowper- Symonds üstelleri
t	Et kalınlığı
R	Silindirik tüpün yarıçapı
$t(x)$	Kalınlık değişim fonksiyonu
t_{min}	En düşük tüp kalınlığı
t_{mak}	En büyük tüp kalınlığı
t_{EK}	Eşdeğer kalınlıklı tüpün kalınlığı
v_0	İnce cidarlı tüpün ilk hızı
x	Tüpün alt uç noktasından üst uç noktasına olan uzaklığı

Kısaltmalar	Açıklama
ÇKV	Çarpışma Kuvveti Verimliliği
EK	Eşdeğer Kalınlıklı
FDK	Fonksiyonel Olarak Derecelendirilmiş Kalınlıklı
ÖES	Özgül Enerji Sönümü
TSE	Sönümlenen Toplam Enerji

1.GİRİŞ

Günümüz araç tasarımlarının ana amaçlarından birisi, trafik kazası nedeniyle meydana gelebilecek olası ölüm ve yaralanmaların en aza indirilmesidir. Bu sebeple özellikle karayolu ve demiryolu araçlarında çarpışma güvenliğini sağlamaya yönelik çalışmalar günümüzde oldukça popülerlik kazanmıştır. Çarpışma güvenliğine verilen bu önem ve meydana gelen teknolojik gelişmeler sonucunda çarpışmaya karşı çok daha dayanıklı araçlar ortaya çıkmaya başlamıştır. Sadece statik yüklenme durumlarını dikkate alarak tasarlanan karayolu ve demiryolu araçlarının, arzulanan çarpışma güvenliğini sağlamadıkları görülmüştür. Bunun en önemli sebebi kaza anında meydana gelen deformasyon ve ivmelerin kontrolsüz bir şekilde ve yolcu güvenliğini tehlikeye atacak ölçüde olmasıdır (Baykasoğlu ve ark., 2011). Son yıllarda çarpışma anında maksimum yolcu güvenliğini sağlamak ve ekipmanın minimum hasara uğraması için araçlarda pasif güvenlik sistemleri geliştirilmektedir. Çarpışma enerji sönmüleyici olarak bu pasif güvenlik sistemlerinin en önemlilerinden biri ince cidarlı yapısal elemanlardır (Marsolek ve Reimerdes, 2004; Meran ve ark., 2014; Mamalis ve ark., 2001). Bu elemanlar araçların stratejik noktalarına yerleştirilerek, çarpışma anında çarpışma enerjisinin belirli bir seviyesinin bu elemanlar vasıtasıyla kontrollü bir şekilde sönmülmesi amaçlanır. Bu sayede çarpışma meydana geldiğinde yolcuların güvenliğinin mümkün olduğu kadar korunması ve araç parçalarının mümkün olduğu kadar az hasar görmesi sağlanır (Abramowicz, 2003). Geçtiğimiz yıllarda ince cidarlı yapıların çarpışma davranışlarını geliştirmek için kapsamlı çalışmalar yürütülmüştür. Bu noktada ince cidarlı yapıların çarpışma davranışını incelemek ve geliştirmek için farklı malzemeler örneğin; çelik, alüminyum, kompozit (Langseth ve Hopperstad, 1996; Hsu ve Jones, 2004; Mamalis ve ark., 2009), kesit alanı farklı şekiller örneğin; kare, dairesel, üçgensel (Langseth ve ark., 1998; Lee ve ark., 1999; Mamalis ve ark., 2001; Arnold ve Altenhof, 2004; Zhang ve Zhang, 2012; Fan ve ark., 2013; Hong ve ark., 2013; Song ve ark., 2013; Alavi Nia ve Parsapour, 2014), farklı yarı tepe açılı geometriler örneğin; düz ve konik (Reid ve Reddy, 1986; Gupta ve ark., 1997; Hou ve ark., 2011; Ghamarian ve Zarei, 2012) ve değişik geometrik yapıları örneğin; origami ve gözenekli (Hou ve ark., 2008; Alavinia ve Hamedani, 2010) tüpler literatürde incelenmiştir. Yukarıda belirtilen ince cidarlı yapılar dayanım, ağırlık,

üretim süreci ve maliyet parametreleri gözönüne alındığında birbirlerine kıyasla avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Bu yüzden ince cidarlı çarpışma enerjisi sönümleyicilerin çarpışma davranışlarının en iyileştirilmesi için bu parametreler göz önünde bulundurularak yeni malzemeler ve yapısal şekillerin geliştirilmesi önemlidir. İnce cidarlı tüplerin çarpışma performansları incelenirken genel olarak özgül enerji sönümü (ÖES), çarpışma kuvveti verimliliği (ÇKV) ve başlangıç çarpışma kuvveti (F_{ilk}) parametreleri dikkate alınır. Bu parametrelerden F_{ilk} ' in maksimum yolcu güvenliği için minimum olması ve etkin bir enerji sönümü için ÖES, ÇKV değerlerinin maksimum olması istenir. İnce cidarlı tüplerin çarpışma dayanımlarının araştırılması ile ilgili yapılan önemli çalışmalar takip eden satırlarda kısaca özetlenmiştir. Metalik ince cidarlı çarpışma enerjisi sönümleyicileri hakkındaki çoğu araştırmalar kare ya da dairesel kesit alanlı düz yapılar üzerinde yoğunlaştırılmıştır. Metalik ince cidarlı çarpışma enerjisi sönümleyicileri düşük ağırlık ve kolay üretim sürecinin yanında yüksek dayanımlara sahip olduklarından dolayı demiryolu, karayolu ve uzay uygulamalarında geniş bir uygulama alanına sahiptir. Bu enerji sönümleyiciler aşamalı burkulma ve eğilme ile darbe enerjisini yok ederler. Böylece çarpışma enerjisi belli bölgelerde sönümlenirken diğer bölgeler dayanımını korumaya devam eder. Metalik ince cidarlı çarpışma enerji sönümleyicileri genel olarak çelik ve alüminyumdan yapılır. Fakat, düşük ağırlığından dolayı ince cidarlı enerji sönümleyici olarak alüminyumun kullanımı gitgide artmaktadır. Alüminyumdan yapılmış kare kesitli tüplerin eksenel yükleme altındaki davranışları Langseth ve Hopperstad (1996), tarafından detaylı bir şekilde incelenmiştir. Çalışmalarında, değişik et kalınlıkları ve çarpışma hızları temel değişken parametreler olarak kabul edilmiş, ince cidarlı enerji sönümleyicilerin çarpışma davranışları statik ve dinamik yükler altında karşılaştırılmışlardır. Sonuç olarak 2.5 mm et kalınlığına sahip enerji sönümleyicide sadece simetrik deformasyon biçimleri gözlenirken daha düşük et kalınlığına sahip olan enerji sönümleyicide hem simetrik hem de simetrik ve asimetrik deformasyon şekilleri görülmüştür. Ayrıca çarpışma sırasında meydana gelen katlanmanın simetrik olduğu durumda daha fazla enerji sönümlendiği görülmüştür. Hsu ve Jones (2004), paslanmaz çelik, alüminyum ve yumuşak çelikten üretilen silindirik ince cidarlı enerji sönümleyicilerin yarı-statik ve dinamik yükleme altında çarpışma performanslarını incelemiştir. Mamalis ve

ark. (2009), içi alüminyum ve polimerik köpük ile doldurulmuş kare kesitli kompozit tüplerin çarpışma davranışlarını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Langseth ve ark. (1998), alüminyumdan yapılmış kare kesitli ince cidarlı tüplere statik ve dinamik testler uygulayarak çarpışma davranışlarını incelemiştir. Lee ve ark. (1999)' nın yaptığı başka bir çalışmada, alüminyumdan yapılmış ince cidarlı tüpler kullanılarak araçların çarpışma sırasında en uygun enerji sönümleme kapasitesine sahip yapısal elemanlar geliştirilmiştir. Enerji sönümleyici yapılar olarak kare kesitli tüpler kullanılmıştır. Uygulanan statik test sonucunda enerji sönümleyici elemanlara sahip olan yapıların enerji sönümleyici elemanlara sahip olmayan yapılara göre enerji sönümleme kapasitesinin % 15-20 daha fazla olduğu görülmüştür. Ayrıca enerji sönümleme kapasitesinin artışının kalınlık/genişlik oranına bağlı olduğu ve enerji sönümleyicinin daha kalın ve daha uzun olduğunda enerji sönümleme kapasitesinin daha yüksek olduğu sonuçlarına ulaşmışlardır. Metalik kare kesitli ince cidarlı enerji sönümleyicilerin çarpışma davranışları eksenel yükleme altında Mamalis ve ark. (2001) tarafından incelenmiştir. Arnold ve Altenhof (2004), alüminyumdan yapılmış kare kesitli ince cidarlı tüplerin yarı-statik eksenel yük altındaki enerji sönümleme özelliklerini incelemiştir. Zhang ve Zhang (2012), yarı-statik eksenel yükleme altında altıgen ve eşkenar dörtgen geometrisine sahip enerji sönümleyicilerin özellikleri üzerinde çalışma yapmışlardır. Fan ve ark. (2013), dört farklı kesit alanına sahip enerji sönümleyici tüplerin statik yükleme altında çarpışma davranışlarını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Çap/kalınlık oranı 50'den küçük ve 12 kenara sahip yıldız şeklindeki tüplerin daha iyi enerji sönümleme kapasitesine sahip olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Yapılan diğer bir çalışmada, Hong ve ark. (2013), statik eksenel yükleme altında üçgen tüplerin enerji sönümleme kabiliyetlerini ve katlanma şekillerini deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Song ve ark. (2013), üçgen, kare ve beşgen kesit alanına sahip ince cidarlı pencereci tüplerin eksenel yöndeki çarpışma davranışlarını ve başlangıç burkulma modlarını incelemiştir. Alavi Nia ve Parsapour (2014), ise statik yükleme altında alüminyumdan yapılmış üçgen, kare, altıgen ve sekizgen kesitlerde hem çok hücreli hem de içi boş tüplerin çarpışma dayanımları üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmada deneysel sonuçlar nümerik simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Ayrıca çok hücreli yapıdaki tüplerin enerji sönümleme

kabiliyetinin içi boş yapıdaki tüplere göre daha fazla olduğu ve altıgen ile sekizgen kesitli çok hücreli yapıların özgül enerji sönümleme özelliklerinin daha büyük olduğu sonuçları çıkarılmıştır. Reid ve Reddy (1986), konik metal tüpler ile eşdeğer kesit alanına sahip alüminyum ince cidarlı tüplerin çarpışma davranışlarını yarı-statik ve dinamik yükleme altında incelemiştir. Gupta ve ark. (1997), farklı yarı koniklik açısına sahip alüminyum ince cidarlı tüplerin farklı kalınlık/çap oranlarında enerji sönümleme, başlangıç çarpışma kuvveti ve ortalama çarpışma kuvveti parametrelerini incelemiştir. İçi boş ve köpükle doldurulmuş konik ince cidarlı tüplerin çarpışma davranışları Hou ve ark. (2011) tarafından çalışmalarında incelenmiştir. Ghamarian ve Zarei (2012), ucu kapalı silindirik ve konik tüplerin aksenal yarı-statik yükleme altında deneysel ve sayısal sonuçlarını incelemiştir. Hou ve ark. (2008), kare kesitli tek hücreli, çift hücreli, üç hücreli ve dört hücreli enerji sönümleyicileri geliştirmişlerdir. Yaptıkları bu çalışmada 10 m/s hızda ve üzerlerine 500 kg ağırlık asılı olan enerji sönümleyiciler rijit bir duvara çarpıtılmıştır. Tasarım değişkeni olarak genişlik ve et kalınlığını ele alıp özgül enerji sönümü ve maksimum çarpma kuvvetini incelemiştir. Sonuç olarak, maksimum çarpışma kuvveti sabitken tüpteki hücre sayısı artırıldığında özgül enerji sönümünün de arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Alavinia ve Hamedani (2010), hacim, yükseklik, ortalama kesit alanı ve et kalınlığına sahip çeşitli şekillerdeki (kare, dikdörtgen, üçgen kesit) ince cidarlı alüminyum tüplerin enerji sönümleme kapasitelerini ve tüplerin şekil değişimlerini incelemiştir. Silindirik tüplerin sönümledikleri enerji miktarının yüksek olduğu, ayrıca açılı duvarlara sahip tüplerin çarpışma kuvveti verimliliği, düz duvarlara sahip tüplerden daha yüksek olduğu sonuçlarına ulaşmışlardır.

Çarpışma anında enerjinin daha iyi sönümlenmesi için içi köpükle doldurulmuş enerji sönümleyicileri de kullanılmaktadır (Hanssen ve ark., 1999; Mirfendereski ve ark., 2008; Ghamarian ve Tahaye Abadi, 2011). Enerji sönümleyici tüplerin içi hem metal hem de metal olmayan köpük malzemeleriyle doldurularak yüksek enerji sönümü sağlanabilmektedir. Ağırlık yönünden büyük avantaj sağlamasından dolayı alüminyum köpüklerin uygulamalarına sıkça rastlanmaktadır. Hanssen ve ark. (1999) ise, yarı-statik ve dinamik yükleme altında AA6060 alüminyum malzemesinden yapılmış ve yine içi aynı malzemedan köpük ile doldurulmuş ince cidarlı silindirik

tüplerin aksenel deformasyon davranışlarını incelemişlerdir. Tüplerin boyu 230 mm ve çapı 80 mm olarak belirlenip, tasarım değişkeni olarak duvar kalınlığı ve köpük yoğunluğu dikkate alınmıştır. Statik ve dinamik yüke maruz bırakılan dikdörtgen kesitli ince cidarlı konik boruların çarpışma dayanımları Mirfendereski ve ark. (2008) tarafından incelenmiştir. Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak hem içi boş hem de içi dolu tüplerin çarpışma dayanımlarının bulunması amaçlanmıştır. Dikdörtgen tüplerin çarpışma dayanımlarının belirlenmesinde köpük yoğunluğu, eğimli yüzey sayısı, koniklik açısı ve et kalınlığı gibi parametreler çalışmadaki temel değişken parametrelerini oluşturmaktadır. Aksenel statik ve dinamik yük altındaki konik dikdörtgen tüplerin eğimli yüzey sayısına ve koniklik açısına nazaran köpük malzemenin yoğunluğundan daha fazla etkilendiği sonucuna ulaşılabilir. Ayrıca et kalınlığının artmasıyla, konik tüplerin sönümlendiği enerji miktarı ve çarpışma kuvvetinin verimliliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Sonuçlar, içi köpük ile dolu konik tüplerin davranışlarında et kalınlığının yarı-koniklik açısından daha önemli olduğunu da içerir. Ghamarian ve Tahaye Abadi (2011), içi boş ve köpükle doldurulmuş ucu kapalı ince cidarlı silindirik tüplerin enerji sönümleme kapasitesini yarı-statik yük uygulayarak incelemişlerdir.

Enerji sönümleyicilerde yüksek enerji sönümlerinin yanı sıra çarpışma kuvvetlerinin de mümkün olduğunca düşük olmasını sağlamak gerekmektedir. Enerji sönümleyicilerin çentikli yada kıvrımlı geometrilerde üretilmesi çarpma kuvvetinin düşmesini sağlamaktadır (Hosseini-pour ve Daneshi, 2003; Elgalai ve ark., 2004; Güler ve ark., 2010; Song ve ark., 2012). Enerji sönümleyicilerin üzerinde kıvrımlı bölgelerin olması, katlanmayı bu bölgelerden başlatacak ve bu bölgeyi deforme etmek için gerekli olan kuvvet daha düşük olacaktır. Aynı şekilde çentikli olan enerji sönümleyicilerde homojen bir şekilde enerji sönümü sağlanacağından dolayı çarpışma kuvvetlerinin düşürülebilmesi sağlanır. Bu kapsamda, Hosseini-pour ve Daneshi (2003), ince cidarlı çelik tüplerin çarpışma davranışlarını deneysel olarak inceleyebilmek için tüpler üzerinde dairesel oluklar açmışlardır. İç ve dış yüzeylerde açılan bu oluklar burkulma deformasyon şekillerinin yerini belirleyecektir. Yarı-statik aksenel uygulanan yük altında farklı aralıklarla açılmış oluklara sahip numunelerde enerji sönümleme kabiliyeti ve kuvvet-yer değiştirme eğrileri incelenmiştir. Olukların farklı aralıklarla açılmasıyla sönümlenen enerji miktarının

ve kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin değiştiği sonucuna varılmıştır. Farklı kıvrım açılarına sahip enerji sönümleyicilerin çarpışma davranışları Elgalai ve ark. (2004) tarafından incelenmiştir. Enerji sönümleyicilerin kıvrım açısının artmasıyla ortalama çarpışma kuvveti, özgül enerji sönümü ve enerji sönümünün arttığı gözlemlenmiştir. Maksimum arpışma kuvvetinin azaldığı ve bunun azalmasından dolayı çarpışma kuvvetinin veriminin arttığı da sonuçlar arasında yer almaktadır. Güler ve ark. (2010), düz ve çentikli dış yüzeye sahip konik ince cidarlı enerji sönümleyicilerin çarpışma davranışları üzerinde çalışmışlardır. Sonlu elemanlar yöntemi kullanarak kare, altıgen ve sekizgen kesitteki dış yüzeyi kıvrımlı ince cidarlı enerji sönümleyicilerin çarpışma anındaki başlangıç çarpışma kuvvetini en aza indirmek amacıyla Song ve ark. (2012) alışmalarını yapmışlardır.

Enerji sönümleyici ince cidarlı yapılar arasında silindirik olanlar kolay bir şekilde üretildiğinden ve daha iyi enerji sönümleme kabiliyetine sahip olmasından dolayı dikkatleri daha çok çekmektedir (Guillow ve ark., 2001; Al Galib ve Limam, 2004; Gupta ve Venkatesh, 2006; Zarei ve Kroger, 2006; Salehghaffari ve ark., 2010; Marzbanrad ve Ebrahimi, 2011). Guillow ve ark. (2001), ince cidarlı alüminyum silindirik tüplerin çap/kalınlık oranlarını dikkate alarak çarpışma davranışlarını ve deformasyon şekillerini incelemişlerdir. Al Galib ve Limam (2004), yarı-statik ve dinamik eksenel yükleme altında alüminyum silindirik tüplerin deneysel ve sayısal olarak çarpışma davranışlarını incelemişlerdir. Gupta ve Venkatesh (2006), yarı-statik ve darbe yüklemeleri altındaki silindirik tüplerin çarpışma davranışlarına çap/kalınlık oranlarının etkilerini incelemişlerdir. Sonuçlar, darbe yüklemesi sonucunda ortaya çıkan başlangıç çarpışma kuvvetinin ilgili statik yüklemesi etkisindeki değerinden yaklaşık % 14.33-40.25 daha yüksek olduğunu göstermiştir. Ayrıca, darbe testinden elde edilen enerji sönümleme kapasitesi statik değerlerle karşılaştırıldığında yaklaşık olarak % 1.56-12.3 kadar bir artış olduğunu göstermişlerdir. Zarei ve Kröger (2006), dinamik yükleme altında alüminyum silindirik tüplerin çarpışma davranışlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Ayrıca sonlu elemanlar yöntemi kullanarak buldukları nümerik sonuçları deneysel sonuçlarla doğrulamışlardır. Salehghaffari ve ark. (2010), silindirik metal tüplerin çarpışma dayanımlarını artırmak amacıyla çalışmalarında iki yeni tasarım geliştirmişler ve bu tasarımları deneysel olarak test etmişlerdir. Geliştirdikleri bu

tasarımların silindirik metal tüplerin çarpışma dayanımlarını artırdıklarını göstermişlerdir. Başka bir çalışmada iki farklı alüminyum alaşımından elde edilmiş ince cidarlı enerji sönümleyici yapıların aksenal yükleme etkisindeki çarpışma davranışları Marzbanrad ve Ebrahimi (2011) tarafından incelenmiştir.

Günlük yaşantıda çarpışmalar meydana geldiğinde sadece aksenal olarak değil eğik olarakta yüklemeler meydana gelmektedir. Literatürde eğik darbe yüklemesi altındaki enerji sönümleyicilerin çarpışma davranışları geniş kapsamlı olarak incelenmiştir (Nagel ve Thambiratnam, 2006; Qi ve ark., 2012; Song ve Guo, 2013).

Nagel ve Thambiratnam (2006), sonlu elemanlar yöntemi kullanarak hem aksenal hem de eğik statik ve dinamik yüklemelere maruz bırakılan, düz ve konik dikdörtgen kesitli tüplerin enerji sönümleme kabiliyetlerini karşılaştırmışlardır. Burada yarı-koniklik açısı, et kalınlığı ve eğimli yüzey sayısı temel değişkenler olarak ele alınmıştır. Dört yüzeyi de eğimli 5° , 7.5° , 10° ve 14° yarı-koniklik açılara sahip enerji sönümleyiciler incelenmiş ve 7.5° yarı-koniklik açısına sahip enerji sönümleyicilerin daha fazla enerji sönümleme kabiliyetine sahip olduğu sonucu çıkarılmıştır. Başka bir eğik darbe yüklemesi çalışmasında, Qi ve ark. (2012), eğik darbe yüklemesi altında düz ve tepe açısına sahip ince cidarlı kare kesitli tüplerin enerji sönümlemeleri üzerinde çalışmışlardır. Burada içi boş düz, çok hücreli düz, içi boş tepe açılı ve çok hücreli tepe açılı olmak üzere dört model üzerinde tüplerin özgül enerji sönümü ve maksimum çarpışma kuvveti parametreleri sonlu elemanlar yöntemi kullanarak karşılaştırmışlardır. Song ve Guo (2013), aynı ağırlıkta olan gözenekli ve çok hücreli kare tüplerin aksenal ve eğik darbe yüklemesi altında çarpışma performanslarını karşılaştırarak incelemiştir. Çalışma sonucunda çok hücreli tüplerin gözenekli tüplere göre daha yüksek ortalama çarpışma kuvvetine ulaştığı fakat daha düşük maksimum başlangıç çarpışma kuvvetine sahip olduğu gözlenmiştir.

Literatürde eşdeğer kalınlıklı ince cidarlı enerji sönümleyici yapıların çarpışma dayanımlarının kapsamlı bir şekilde çalışılmasına rağmen (Alghamdi, 2001; Guillove ark., 2001), değişken duvar kalınlığına sahip ince cidarlı enerji sönümleyicilerin çarpışma dayanımları ile ilgili çalışmalar kısıtlıdır. Diğer bir yandan çeşitli kalınlıklara sahip metal tabakaların kullanımı tasarım esnekliğini

artırıp malzemenin daha etkili şekilde kullanılmasını sağlar (Yang ve ark., 2007; Chai, 2008; Meyer ve ark., 2008; Pan ve ark., 2010; Hariharan ve ark., 2012; Xu ve ark., 2013; Sun ve ark., 2014). Uygulamalarda genellikle kaynaklı özel yapım ve haddelenmiş özel yapım olan iki çeşit özel yapım ile üretilen ürünler kullanılır (Zhang ve ark., 2006; Chu ve ark., 2011; Jandaghi Shahi ve Marzbanrad, 2012; Gedikli, 2013; Xu ve ark., 2014). Kaynaklı özel yapım yapılar lazer veya sürtünme kaynağı ile kaynaklanmış metal tabakalarından oluşur. Kesintili kalınlıkların olduğu bölgelerde gerilme yığılmaları meydana gelmesi kaynaklı özel yapım yapıların ana dezavantajıdır. Diğer bir yandan haddelenmiş özel yapım yapıları soğuk haddeleme ile üretilir ve kesintisiz kalınlık varyasyonlarına sahiptir. Genel olarak, kaynaklı özel yapım yapılar ile karşılaştırıldığında haddelenmiş özel yapım yapıların avantajları şu şekilde sıralanabilir; daha kısa üretim sürecine sahip olmak, üretim maliyetinin kalınlık geçişleri sayısından bağımsız olması, kaynaklı özel yapımlar için kaynak dikiş pozisyonunun her zaman gözlenmesi gerekiyorken haddelenmiş özel yapımların saç kalınlığının değiştiği yerlerin geniş bir aralıkta seçilebilmesi, lineer saç kalınlığı geçişlerinden dolayı haddelenmiş özel yapımların kalınlık geçiş yerlerinde maksimum gerilme değerlerinin oluşmaması, yüzeylerinde dikiş yeri bulunmadığından yüzeylerin negatif etkilenmemesi ve lineer saç kalınlığından dolayı takımlarda abrasif aşınmanın düşük olmasıdır (Meyer ve ark., 2008). Bu nedenle kaynaklı özel yapım yapıların dezavantajını içermezler (Sun ve ark., 2014). Bu noktada hem ağırlığı mümkün olduğu kadar düşük seviyede tutmakta hemde ince cidarlı enerji sönmüleyicilerin çarpışma dayanımlarını mümkün olduğu kadar arttırmakta bu parametre önemli bir rol oynayabilir. Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kalınlık, yapılar üzerinde değişken bir dayanım elde edilmesine olanak sağlar. Böylece deformasyon şekillerini ve çarpışma dayanım parametreleri daha iyi bir şekilde kontrol edilebilir. Değişken kalınlıklı ince cidarlı tüplerin çarpışma davranışları ile ilgili literatürdeki çalışmalardan bazıları takip eden satırlarda kısaca özetlenmiştir.

Chai (2008), aksenal yük altında çeşitli boyutlara sahip çok katmanlı tüpleri deneysel olarak araştırmıştır. Yapılan çalışmada numuneler iç yüzeylerinden ve dış yüzeylerinden sabit duvarlarla kısıtlanıp yanal genleşmeler yok edilmiştir. Zhang ve ark. (2006), değişik kalınlıktaki kaynaklı özel yapım tüplerin aksenal yüklemeye

altındaki çarpışma davranışlarını incelemiştir. Sonuç olarak, uygun kalınlık oranındaki kaynakla özel üretilmiş tüplerin çarpışma dayanımlarının geleneksel olarak üretilen sabit kalınlıklı tüplerden daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Başka bir çalışmada Jandaghi Shahi ve Marzbanrad (2012), eksenel yükleme altındaki alüminyum tüplerin çarpışma davranışlarını incelemiştir. Bölgesel duvar kalınlığının değişiminin tüplerin çarpışma dayanımına etkisinin incelemiştir ve özel yapım olarak üretilen tüplerin eşdeğer kalınlıktaki tüplere kıyasla daha düşük başlangıç çarpışma kuvveti ve daha yüksek enerji sönümleme kapasitesine sahip olduğunu göstermiştir. Bir başka çalışmada ise Xu ve ark. (2014), yapı ağırlığını düşürmek ve çarpışma dayanım kriterlerini iyileştirmek amacıyla kaynaklı özel yapım yapıların optimizasyonu üzerinde çalışmışlardır. Öncelikle sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan analizler fiziksel testlerle doğrulanmış, bunlar sonucunda da çok bileşenli kaynaklı özel yapım yapılarının mükemmel bir avantaj sağladığı ve yapıların çarpışma dayanımlarını artırdığını gözlemlemiştir. Sun ve ark. (2014), sonlu elemanlar yöntemini kullanarak fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kalınlıklı ince cidarlı enerji sönümleyicilerin çarpışma davranışlarını araştırmışlardır. Çalışmalarında, enerji sönümleyici olarak çelikten yapılmış kare ve düz ince cidarlı yapılar kullanmışlardır. Sonuç olarak, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kalınlıklı olan ince cidarlı yapıların eşdeğer kalınlıklı yapılardan daha yüksek çarpışma dayanımlarına sahip olduklarını görmüşlerdir.

Yukarıda belirtildiği gibi literatürde ince cidarlı yapıların çarpışma davranışları hakkında birçok çalışma var olmasına rağmen, farklı duvar kalınlığına sahip ince cidarlı enerji sönümleyicilerin çarpışma dayanımları hakkındaki çalışmalar oldukça kısıtlıdır. Örneğin Sun ve ark. (2014)'nin çalışmasında sabit boy/çap oranına sahip kare kesitli çelik tüplerin çarpışma davranışları incelenmiştir. Fakat tüplerin boy/çap oranının ve kesit alanının geometrileri çarpışma davranışlarını büyük bir ölçüde etkilemektedir. Bundan dolayı bu tezin amacı farklı boy/çap oranlarına sahip ve silindirik fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kalınlıklı ince cidarlı tüplerin eksenel ve eğik darbe yüklemesi altındaki çarpışma davranışlarını incelenmesidir. İnce cidarlı tüplerin çarpışma davranışlarını incelemek için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Sonlu elemanlar modeli, analizlere geçmeden önce literatürdeki sayısal ve deneysel çalışmalar ile doğrulanmıştır. Maksimum çarpışma kuvveti,

Çarpışma kuvveti verimliliği ve özgül enerji sönümü gibi çarpışma parametreleri göz önünde bulundurularak fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kalınlıklı tüpler aynı ağırlıkta eşdeğer kalınlıklı tüpler ile karşılaştırılmıştır. Yapılan analizler sonucuna göre fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kalınlıktaki tüplerin daha üstün çarpışma özelliklerine sahip olduğu görülmüştür.

2. İNCE CİDARLI YAPILARIN ENERJİ SÖNÜM ÖZELLİKLERİNİ BELİRLEMEK İÇİN GELİŞTİRİLEN TEORİK MODELLER

Birçok araştırmacı rijit plastik teori ile ince cidarlı silindirik tüplerin ortalama çarpışma kuvvetini ve sönmülediği enerji miktarını tahmin etmek için teorik modeller geliştirmişlerdir. İnce cidarlı silindirik tüplerin aksel çarpışması hakkındaki ilk çalışmaları Alexander (1960) ve Pugsley-Macaulay (1960) 1960'lı yıllarda öne sürmüşlerdir. Pugsley ve Macaulay (1960) çalışmalarında silindirik şekildeki ince cidarlı tüplerin aksel simetrik olmayan şekildeki deformasyonlarının enerji sönmülemesi üzerinde çalışmışlardır. Yapılan bu çalışma büyük bir ölçüde deneysel olup, aksel simetrik olmayan deformasyonda ileri sürülen ilk çalışmadır. Önerdikleri ifade aşağıdaki gibidir:

$$\frac{F_{ort}}{2\sigma_0\pi Rt} = 9.097 \left(\frac{t}{R}\right) \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_0}\right) \quad (2.1)$$

Alexander (1960) çalışmasında ise aksel simetrik şekillerde (akordiyona benzer) deforme olmuş silindirik tüplerin aksel yükleme altında sönmülediği enerjiyi tahmin edebilmek için teorik modeller geliştirmiştir.

Alexander (1960)'ın akordiyona benzer şekildeki deformasyona ait ortalama çarpışma kuvveti (F_{ort}) aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$F_{ort} = 2(\pi t)^{\frac{3}{2}} R^{\frac{1}{2}} \sigma_0 / \sqrt[4]{3} \quad (2.2)$$

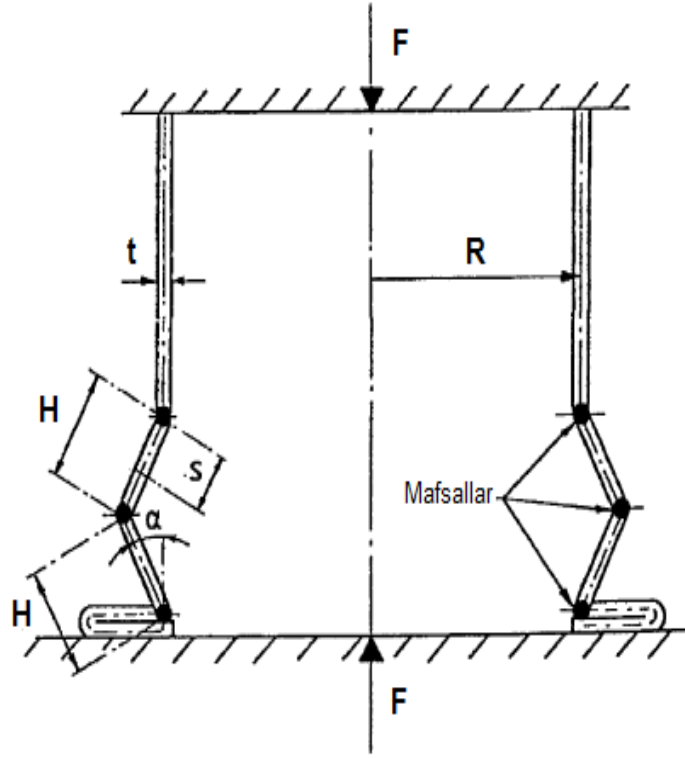
Burada t et kalınlığı, R silindirik tüpün yarıçapı ve σ_0 ortalama akma dayanımıdır. Ortalama akma dayanımı aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$\sigma_0 = \left(\frac{\sigma_{0,2} + \sigma_u}{2}\right) \quad (2.3)$$

Burada $\sigma_{0,2}$ % 0,2 akma dayanımı ve σ_u malzemenin çekme dayanımıdır. Ayrıca, plastik yarı dalga boyu, H (bakınız Şekil 2.1'de bahsedilen) aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$H = C\sqrt{Dt} \quad (2.4)$$

Burada D silindirik tüpün çapı, C malzeme sabitidir.



Şekil 2.1. Alexander (1960) tarafından kabul edilen aksel simetrik çökme mekanizması

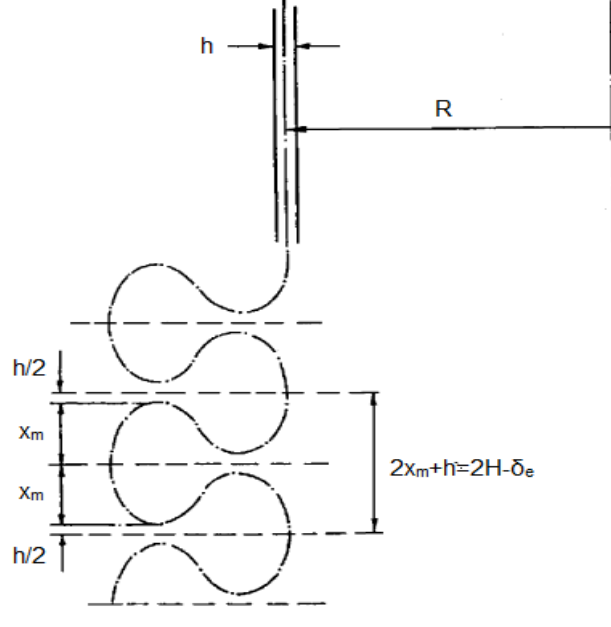
Alexander (1960)'ın çalışmasından bu yana ince cidarlı yapıların çarpışma davranışlarını anlayabilmek için birçok deneysel ve sayısal çalışmalar yürütülmüştür.

1978 yılında Magee ve Thornton (1978), silindirik metal tüplerin aksel çarpışma davranışlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Yaptıkları testler sonucunda ince cidarlı tüplerin çarpışma dayanımlarını belirlemeye yarayan bir dizi ampirik denklem geliştirmişlerdir.

1983 yılında Andrews ve ark. (1983) tarafından yapılan bir çalışmada statik yüklem altındaki silindirik tüplerin deformasyon şekilleri sınıflandırılmıştır. Bu çalışmada, tüplerin aksel yükler altındaki deformasyon şekillerinin çap/kalınlık (D/t) ve uzunluk/çap (L/D) oranlarına büyük ölçüde bağlı olduğu bulunmuştur.

Abramowicz ve Jones (1984, 1986), dairesel ve kare şeklindeki çelik tüpler üzerine hem statik hem de dinamik yüklemeler uygulayarak çeşitli deneysel veriler elde etmişlerdir. Bu çalışmalarda Alexander (1960)'ın modeli üzerinde değişiklikler

yapmışlardır. Abramowicz ve Jones (1984,1986) tarafından kabul edilen model Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Şekilde bahsedilen δ_e etkili çarpışma uzaklığıdır.



Şekil 2.2. Abramowicz ve Jones (1984,1986) tarafından kullanılan aksel simetrik deformasyon şekli

Abramowicz ve Jones (1984,1986)’in çalışmalarının sonucuna göre;

$$\frac{F_{ort}}{M_0} = 22,366 \sqrt{\frac{2R}{t}} + 11,766 \quad (2.5)$$

ve

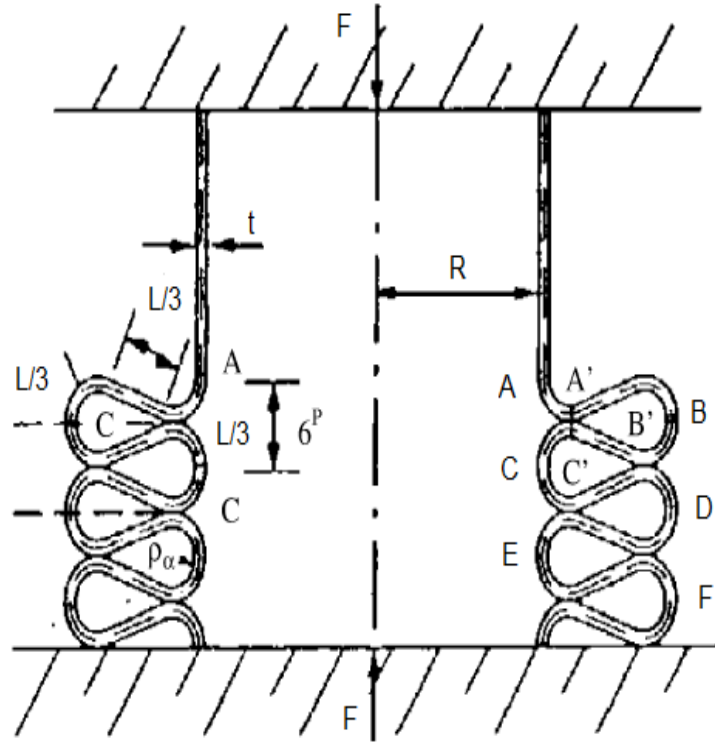
$$\frac{F_{ort}}{M_0} = 25,23 \sqrt{\frac{2R}{t}} + 15,09 \quad (2.6)$$

Denklemlerini elde etmişlerdir.

Burada $M_0 = \left(\frac{1}{4}\right) \sigma_0 t^2$ tüpün plastik momentini ifade etmektedir.

Bir diğer çalışmada Gupta ve Gupta (1993) tarafından statik basma kuvvetlerine maruz bırakılan alüminyum ve çelikten yapılmış ince cidarlı tüplerin çarpışma davranışları incelenmiştir. Sonuçta, çap/et kalınlığı (D/t) ve Vickers sertliği cinsinden ortalama çarpışma kuvveti için deneylerle kanıtlanmış denklemler geliştirmişlerdir.

Grzebieta (1990a,1990b,1996), hem aksenal simetrik hem de simetrik olmayan deformasyon şekillerini analiz etmek için şerit yöntemini kullanmıştır. Grzebieta (1990a,1990b,1996) tarafından geliştirilen deformasyon modeli Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



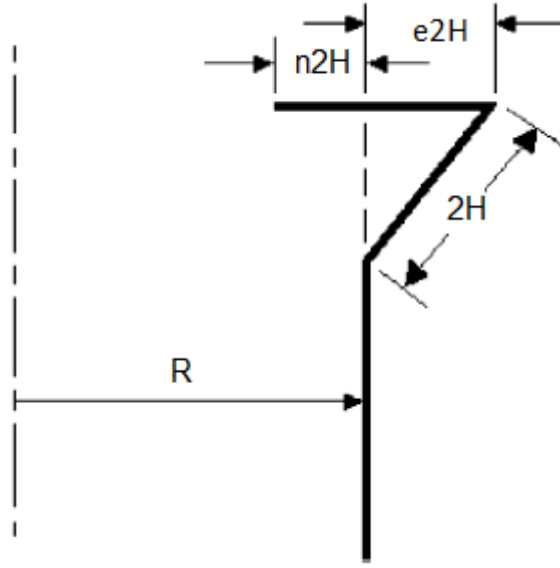
Şekil 2.3. Eksenal simetrik deformasyon şekli için Grzebieta (1990a) tarafından varsayılan çökme mekanizması

Wierzbicki ve ark. (1992), içe ve dışa doğru olan silindirik aksenal simetrik deformasyon modeli Şekil 2.4'te gösterilmiştir. Geliştirdikleri Şekil 2.4'te görülen geometriye göre dışa doğru kıvrım uzunluğunun toplam kıvrım uzunluğuna oranı olan e eksantriklik faktörüdür. Wierzbicki ve ark. (1992) Alexander (1960)'ın sorununu yeniden ele alarak aşağıdaki formülasyonları elde etmişlerdir:

$$\frac{F_{ort}}{M_0} = 35,22 \sqrt{\frac{2R}{t}} \quad (2.7)$$

ve

$$\frac{F_{ort}}{M_0} = 31,74 \sqrt{\frac{2R}{t}} \quad (2.8)$$



Şekil 2.4. Wierzbicki (1992) ve Singace ve ark. (1995,1996) tarafından kabul edilen eksenel simetrik model

Singace ve ark. (1995,1996), Wierzbicki (1992)'nin geliştirdiği model üzerinde çalışmışlardır. Deneysel sonuçlarda elde edilen bilgilere göre, silindirik metal tüpler için eksantriklik faktörünün yaklaşık olarak 0,65 değerinde sabitlendiğini ortaya koymuşlardır. Ortalama çarpışma kuvveti için ise aşağıdaki ifadeyi elde etmişlerdir:

$$\frac{F_{ort}}{M_0} \cong \frac{2}{\sqrt{3}} \left(22,27 \left(\frac{D}{t} \right)^{1/2} + 5,632 \right) \quad (2.9)$$

Singace (1999) yaptığı başka bir çalışmada ise elmas şeklindeki deformasyon için ortalama çarpışma kuvvetini,

$$\frac{F_{ort}}{M_0} \cong -\frac{2\pi}{3^{3/2}} N + \frac{4\pi^2}{N} \tan \left(\frac{\pi}{2N} \right) \frac{D}{t} \quad (2.10)$$

Şeklinde elde etmişlerdir. Burada N çevresel katlanma sayısıdır.

Guillow ve ark. (2001), hem eksenel simetrik hem de simetrik olmayan şekillerdeki deformasyonlar için ortalama çarpışma kuvvetini deneysel sonuçlarla karşılaştırarak aşağıdaki ifadeyi elde etmişlerdir:

$$\frac{F_{ort}}{M_0} = 72,3 \left(\frac{2R}{t} \right)^{0,32} \quad (2.11)$$

3. ÇARPIŞMA DAYANIM PARAMETRELERİ

Genel olarak, enerji sönümleyici yapılardan beklenen darbe yüklemesi altında çarpışma enerjisini etkili bir şekilde sönümleyebilmeleridir. Bu kapsamda; ince cidarlı yapıların enerji sönümleme kabiliyetinin belirlenmesinde genel olarak toplam sönümlenen enerji (TSE), maksimum çarpışma kuvveti (F_{mak}), ortalama çarpışma kuvveti (F_{ort}), özgül enerji sönümü (ÖES) ve çarpışma kuvveti verimi (ÇKV) parametreleri dikkate alınır. Bu parametreler aşağıdaki satırlarda detaylı olarak anlatılmıştır.

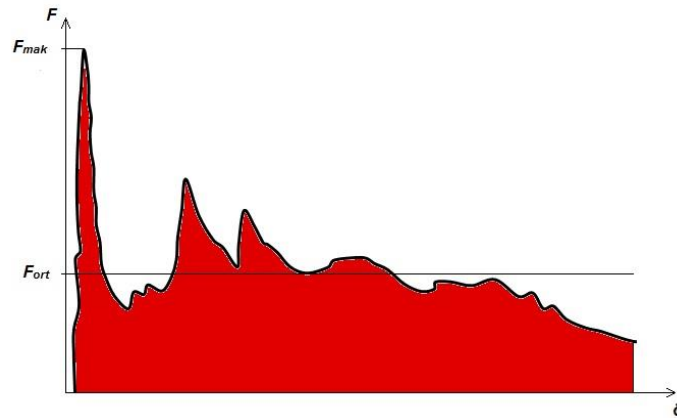
3.1. Toplam Sönümlenen Enerji

İnce cidarlı yapılar tarafından sönümlenen toplam enerji, çarpışma kuvvetinin yaptığı iş şeklinde tanımlanabilir. Sönümlenen toplam enerji aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilir:

$$TSE = \int_0^{\delta} F(\delta) d\delta \quad (3.1)$$

Burada $F(\delta)$ anlık çarpışma kuvvetini, yer değiştirmenin bir fonksiyonu olarak verilmiştir.

İnce cidarlı yapılara ait tipik bir kuvvet- yer değiştirme eğrisi Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Örnek olarak Şekil 3.1’de gösterilen kuvvet- yer değiştirme eğrisi altında kalan alan sönümlenen toplam enerjiyi vermektedir.



Şekil 3.1. Tipik kuvvet – yer değiştirme grafiği

3.2. Maksimum Çarpışma Kuvveti

Maksimum çarpışma kuvveti, F_{mak} (kN) çarpışma sırasında meydana gelen maksimum çarpışma kuvveti değeridir (Şekil 3.1). Bu değer için yolcu güvenliği için düşük seviyelerde olması istenir.

3.3. Ortalama Çarpışma Kuvveti

Ortalama çarpışma kuvveti, F_{ort} (kN) toplam sönmölenen enerji (TSE) miktarının toplam yer değiştirmeye (δ_t) oranıdır.

$$F_{ort} = \frac{TSE}{\delta_t} \quad (3.2)$$

Yolcuların güvenliğinin maksimum düzeyde sağlanabilmesi için hem maksimum çarpışma kuvvetinin hem de ortalama çarpışma kuvvetinin uygun bir sınırın altında tutulması gerekmektedir (Hou ve ark., 2007; Marzbanrad ve ark., 2009; Jandaghi Shahi ve Marzbanrad, 2012).

3.4. Çarpışma Kuvveti Verimi

Çarpışma kuvveti verimi (ÇKV) ortalama çarpışma kuvvetinin maksimum çarpışma kuvvetine oranı olarak tanımlanır.

$$\text{ÇKV} = \frac{F_{ort}}{F_{mak}} \quad (3.3)$$

Ortalama çarpışma kuvvetinin sönmölenen enerji miktarı ile doğrudan ilişkisi olduğu görölmektedir. Bu halde, çarpışma kuvveti veriminin hem çarpışma kuvvetinin hem de sönmölenen enerji miktarının birlikte değerlendirmesine olanak sağlayan bir verim ifadesi olduğu sonucu çıkarılmaktadır. Çarpışma kuvveti veriminin yüksek olması, çarpışma enerjisinin verimli bir şekilde sönmölendiği anlamına gelir (Göler ve ark., 2010; Sun ve ark., 2014).

3.5. Özgöl Enerji Sönmöümü

Özgöl enerji sönmöümü (ÖES), enerji sönmöleyicinin birim kütesinin sönmölediği enerji miktarı olarak tanımlanabilir. Enerji sönmöleyicisinin sönmölediği toplam enerjinin, enerji sönmöleyicisinin kütesine bölünmesiyle elde edilir.

$$\text{ÖES} = \frac{TSE}{m} \quad (3.4)$$

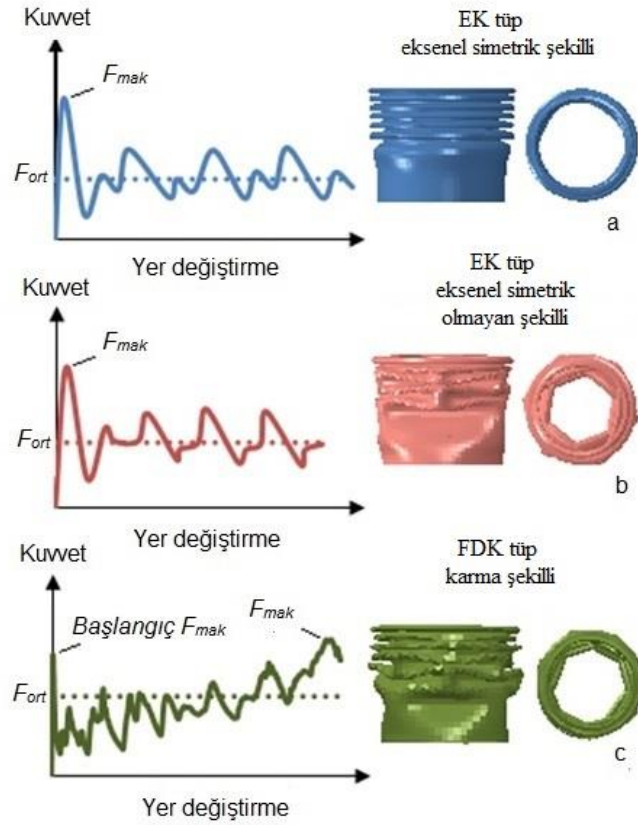
Burada m enerji sönümleyicisinin kütlesidir. Bu değerin yüksek olması malzemenin yüksek bir enerji sönümleme kabiliyetine sahip olduğu anlamına gelir.

3.6. Deformasyon Mod Şekilleri

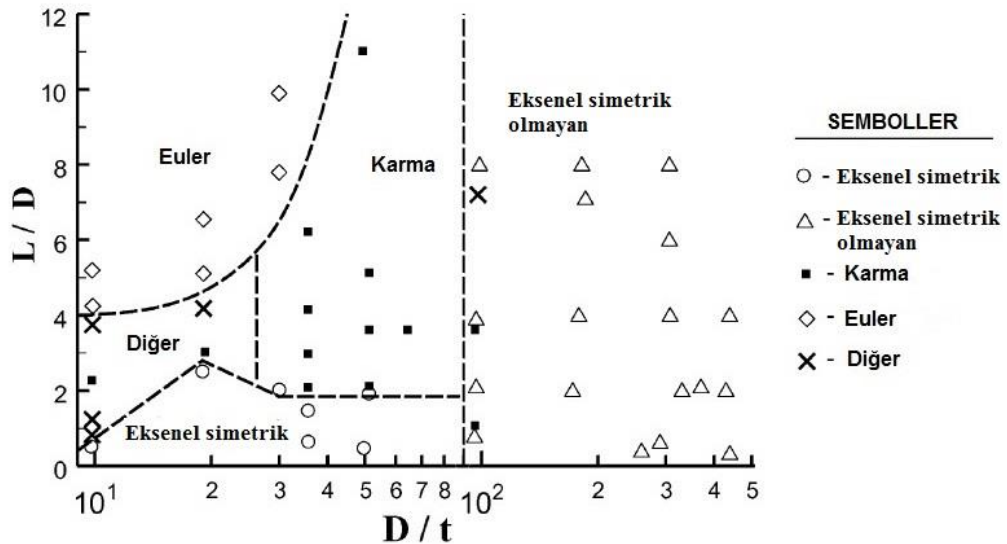
İnce cidarlı silindirik yapıların deformasyon şekilleri kuvvet – yer değiştirme grafiklerini doğrudan etkileyen bir çarpışma parametresidir. İnce cidarlı silindirik yapılar aksenal yüklemeye maruz kaldıklarında, genellikle yapısal kararsızlıklarından dolayı deformasyona uğrarlar. Bu deformasyon sırasında aksenal simetrik, aksenal simetrik olmayan ve karma şekilli gibi farklı deformasyonlar ortaya çıkar. FDK ve EK tüplerin kuvvet – yer değiştirme grafikleriyle birlikte tipik deformasyon şekilleri Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Aksenal simetrik olmayan deformasyona uğrayan ince cidarlı tüpler aksenal simetrik deformasyona uğrayan ince cidarlı tüplerden daha düşük ÇKV ve ÖES değerlerine sahiptirler (Andrews ve ark., 1983; Hou ve ark., 2007; Marzbanrad ve ark., 2009; Jandaghi Shahi ve Marzbanrad, 2012). İnce cidarlı silindirik yapıların uzunlukları eğer kritik bir değerden daha büyükse aksenal yüklemeye altında genel bir burkulmaya (Euler burkulma modu) uğrayarak deforme olabilirler.

Şekil 3.2’den de görüldüğü gibi FDK ve EK tüplerin kuvvet- yer değiştirme eğrileri farklı özelliklere sahiptir. EK tüplerin tüp boyunca kalınlıkları sabit olduğundan dolayı sabit bir kuvvet- yer değiştirme eğrisine sahiptirler. Diğer taraftan FDK tüpler uzunluk boyunca sabit bir kalınlık dağılımına sahip olmadıklarından ve deformasyonla birlikte dayanımları artmaktadır.

Guillow ve ark. (2001)’nin yaptıkları bir çalışmada, 6060-T5 alüminyum tüplerin ezilme davranışlarını incelemiştir. Şekil 3.3’te görüldüğü gibi deformasyon şekillerini sınıflandırmışlardır. Çizelge farklı deformasyon şekilleri için alanlara bölünmüştür.



Şekil 3.2. FDK ve EK tüplerin tipik deformasyon şekilleri ve ilgili kuvvet-yer değiştirme eğrileri

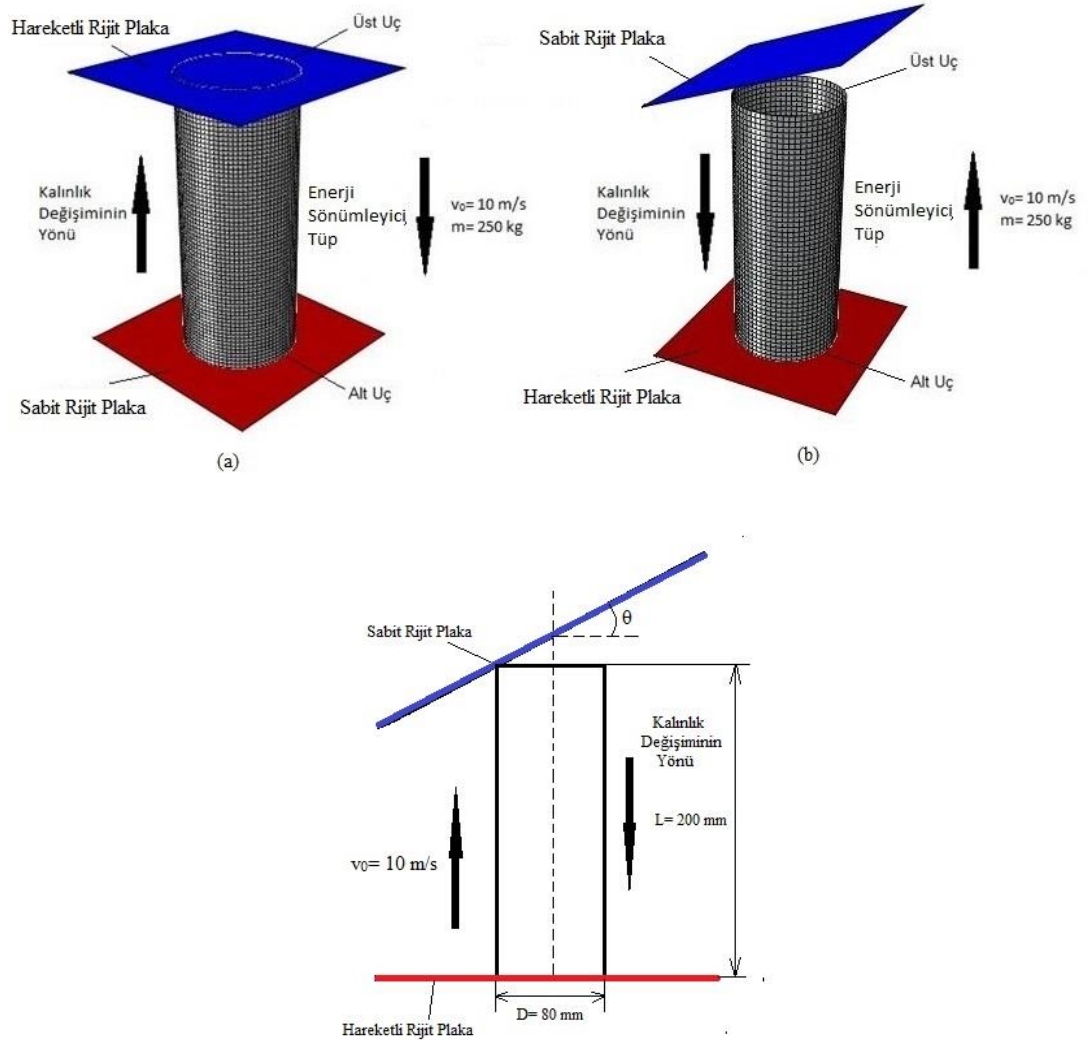


Şekil 3.3. Silindirik 6060-T5 alüminyum tüpler için farklı deformasyon şekillerinin çizelgesi (Guillow ve ark.,2001)

4. FONKSİYONEL OLARAK DERECELENDİRİLMİŞ TÜPLERİN EKSENEL VE EĞİK YÜKLER ALTINDAKİ DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

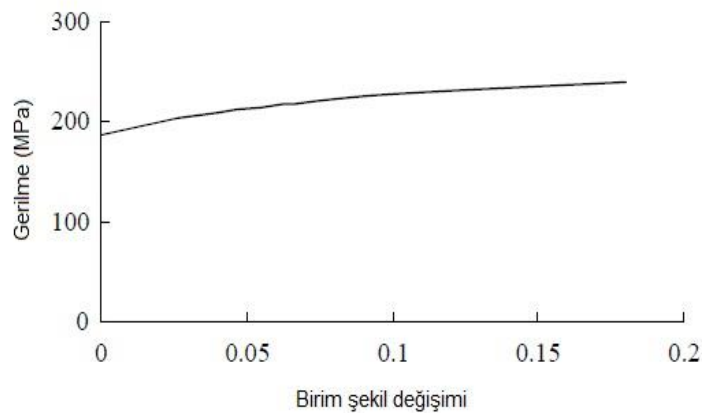
4.1. Sonlu Elemanlar Modeli

Bu tez çalışmasındaki sonlu elemanlar çarpışma simülasyonları Abaqus/Explicit 6.13 ticari yazılım sonlu elemanlar ile yapılmıştır. İlk hızı 10 m/s, kütlesi 250 kg olan hareketli rijit bir plaka , bir ucundan sabit rijit plakaya sabitlenen ince cidarlı tüplere çarpmaktadır. Sonlu elemanlar modeli şematik olarak Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Sonlu elemanlar modellerinin bileşenleri (a) eksenel yükleme, (b) eğik yükleme, (c) eğik yükleme açısı

Hareketli rijit plakaların sadece aksel yönde hareket edebilmesi için ilgili sınır koşulu modellere uygulanmıştır. Rijit plakalar ve tüp arasındaki temas yüzey-yüzey etkileşimi (surface to surface), tüp duvarlarının kendi üzerine teması ise kendi-kendine etkileşim (self contact) olarak tanımlanmıştır. Tüm temas yüzeyleri için sürtünme katsıyısı olan μ , 0,25 olarak kabul edilmiştir. Gerçekte test edilecek numunelerin başlangıç geometrilerinde belli kusurlar mevcuttur. Bu kusurların ölçülmesi pratikte oldukça zordur. Bu nedenle çarpışma analizinden önce numuneler üzerindeki bu kusurların etkisini dikkate almak için önce numunelere burkulma analizi uygulanmıştır. Sonlu elemanlar yönteminde başlangıç geometrisi kusurları dikkate alınmazsa sadece aksel simetrik deformasyon şekilleri gözlenir. Çünkü, aksel darbe yüklemesi altında hem yükleme koşulları hemde tüpün geometrisi aksel simetriktr. Fakat birçok sayısal ve deneysel çalışma, yalnızca bazı tüp boyutları için aksel simetrik deformasyon şekillerinin meydana gelebileceğini göstermektedir. Al Galib ve Limam (2004), başlangıç kusurlarının alüminyum tüplerin çarpışma davranışları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Sonuçta başlangıç kusurlarının da dikkate alınmasıyla daha doğru simülasyonlar sonlu elemanlar analiz sonuçlarına ulaşılabileceğini göstermişlerdir. Bu kusurların etkisi deneme yanılma yöntemiyle, literatürdeki sayısal ve deneysel sonuçlarla karşılaştırarak karar verilmiştir. Sonuç olarak, ilk bulunan şeklin büyüklüğü eşdeğer duvar kalınlığının %2'si olarak ayarlanmış ve Abaqus programındaki “imperfection” seçeneği kullanılarak modellere dahil edilmiştir.



Şekil 4.2. Al 6063 T5 alüminyum alaşımı için birim şekil değişimi-gerilme eğrisi (Karagiozova ve ark., 2005)

Al 6063 T5 alüminyum alaşımlı ince cidarlı silindirik tüpler analizlerde kullanılmıştır. Al 6063 T5 alüminyum alaşımı için gerçek gerilme- gerinim eğrisi Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Kullanılan alüminyum malzemenin Poisson oranı (ν), Young modülü (E) ve yoğunluk (ρ) sırasıyla, 0,33, 68,2 GPa ve 2700 kg/m³’tür. Şekil değiştirme hızının etkisi (strain rate) Abaqus analiz programına “Rate dependent” seçeneğinden $d= 128800 \text{ s}^{-1}$ $p= 4$ katsayılarını içeren Cowper-Symonds (Eşitlik 4.1) aşırı gerilme üs kuralı ile dahil edilmiştir. Şekil değiştirme hızı parametrelerinin değerleri daha önce yapılan çalışmalardan alınmıştır (Karagiozova ve ark., 2005; Shakeri ve ark., 2007; Karagiozova ve Alves, 2008).

$$\dot{\epsilon}^{pl} = d(R - 1)^p \quad \bar{\sigma} \geq \sigma^0 \quad (4.1)$$

Burada $\dot{\epsilon}^{pl}$ elastik olmayan şekil değiştirme hızı, R dinamik gerilmenin ($\bar{\sigma}$) statik gerilmeye (σ^0) olan oranıdır.

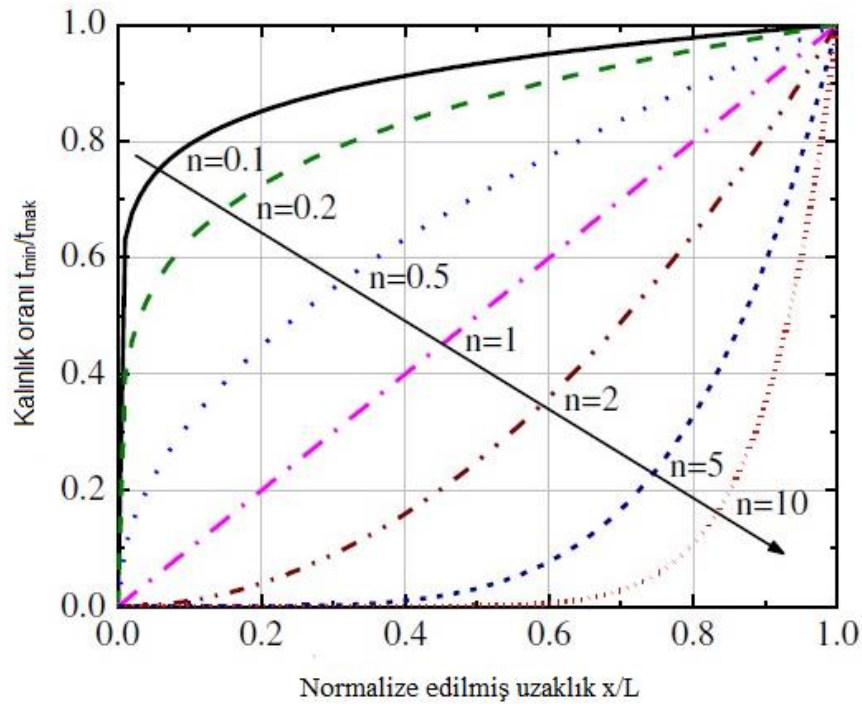
Tüplerin ilk boyu (L) 200 mm olarak seçilmiştir. Tüplerin çarpışma davranışları üzerinde L/D oranının etkisinin incelenmesi için farklı tüp çapları dikkate alınmıştır. Tüplerde eksenel yöndeki kalınlık değişimini ifade etmek için aşağıda verilen kalınlık fonksiyonu kullanılmıştır.

$$t(x) = t_{min} + (t_{mak} - t_{min}) \left(\frac{x}{L}\right)^n \quad (4.2)$$

Burada $t(x)$ kalınlık değişim fonksiyonu, x tüpün alt uç noktasından üst uç noktasına olan uzaklığı, t_{min} en düşük tüp kalınlığı (alt ucun kalınlığı), t_{mak} en büyük tüp kalınlığı (üst ucun kalınlığı), L tüpün uzunluğu ve n 0,1 ile 10 arasında değişiklik gösteren üsteldir. Çeşitli n değerleri için farklı kalınlık değişim fonksiyonları Şekil 4.3’de gösterilmiştir. Kalınlık değişim fonksiyonlarının, n değerinin 1’ den daha küçük değerleri için artan tarzda ve dışbükey yapıda; n değerinin 1 ‘den daha büyük değerleri için içbükey yapıda olduğu Şekil 4.3’de açıkça görülmektedir.

Böylece azalan üst değerleri ile tüpün toplam kütlelerinin arttığı sonucu çıkarılabilir. Bahsedilen kalınlık değişim fonksiyonlarının kullanılması, tüp eksenini boyunca değişken dayanım elde edilmesine olanak sağlar. Şekil 4.3’de gösterilen kalınlık değişim fonksiyonları sonlu elemanlar modeline Abaqus programındaki “nodal thickness” seçeneği kullanılarak dahil edilmiştir. En uygun çözüm ağı boyutunu

bulmak için, değişik çözüm ağı boyutları numuneler üzerine uygulanmıştır. Tüplerin değişik kalınlık fonksiyonları için farklı çözüm ağı boyutlarında F_{\max} , F_{ort} ve TSE değerleri hesaplanmıştır. Yakınsaklık testinden sonra, 3 mm x 3 mm çözüm ağı boyutu sonlu elemanlar modellerinde kullanılmıştır.



Şekil 4.3. Artan üst (n) değerleri için çeşitli kalınlık değişimleri

4.2. Sonlu Elemanlar Modelinin Doğrulanması

Yapılan çalışmadaki sonlu elemanlar modelinin doğruluğundan emin olmak için, sonlu elemanlar modeli farklı eksenel dinamik yüklemeler altında mevcut deneysel ve sayısal çalışmalarla doğrulanmıştır. Bu amaçla, sönümlenen enerji miktarı, ortalama çarpışma kuvveti ve deformasyon şekilleri Zarei ve Kröger (2006), ile karşılaştırılmıştır. Modelin doğrulanması Zarei ve Kröger (2006)' in çalışmasında kullanılan aynı geometri, sınır şartları ve darbe hızları kullanılarak yapılmıştır. Analizlerde kullanılan numunenin boyu 180 mm ve çapı 40 mm' dir. Kullanılan 6060 alüminyum alaşımının $\sigma_{0.2} = 231$ MPa ve $\sigma_u = 254$ MPa özelliklerine sahiptir. Çarpışma için kullanılacak olan rijit plakanın ağırlığı 104,5 kg'dır. Analizlerde çeşitli çarpışma hızları dikkate alınmıştır. Seçilen hız değerleri Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Rijit plakanın değişik hız parametreleri

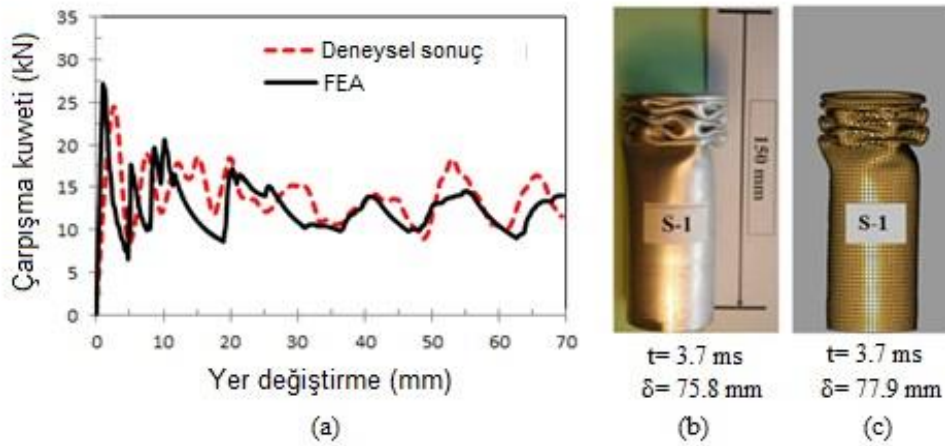
	S1	S2	S3	S4
t (mm)	1	1	2	2
v_{mak} (m/s)	4,3	5,2	5,9	6,6

Mevcut çalışma ile deneysel ve sayısal çalışmaların (Zarei ve Kröger, 2006) sonlu elemanlar modellerinin sonuçlarının karşılaştırılması Çizelge 4.2’de verilmiştir. Çizelge 4.2’den görüldüğü gibi, elde edilen sonuçlar deneysel ve sayısal sonuçlarla oldukça çok uyumluluk göstermektedir.

Çizelge 4.2. Sonlu elemanlar modellerinin sonuçlarının önceden belirlenmiş sonuçlarla karşılaştırılması

	Deneysel Sonuçlar (Zarei ve Kröger, 2006)		Sayısal Sonuçlar (Zarei ve Kröger,2006)		Mevcut Çalışma		Hata Oranı (Deneysel Sonuçlar)		Hata Oranı (Sayısal Sonuçlar)	
	E (J)	F_{ort} (kN)	E (J)	F_{ort} (kN)	E (J)	F_{ort} (kN)	Δ (%)	ΔF_{ort} (%)	Δ (%)	ΔF_{ort} (%)
S1	998	13,03	952	12	959,8	12,27	3,82	5,83	0,81	2,25
S2	1541	13,6	1391	12,3	1405,9	12,38	8,76	8,97	1,07	0,65
S3	1858	46,4	1809	44,5	1820	43,39	2,04	6,48	0,6	2,49
S4	2326	45,6	2266	45	2273	44,65	2,27	2,08	0,3	0,77

S1 numunesinin çarpışma kuvveti-yer değiştirme eğrisi ve deformasyon şekli Zarei ve Kröger (2006)’in aynı numune için elde ettiği deneysel sonuçlar Şekil 4.4’te karşılaştırılmıştır. Çarpışma kuvveti-yer değiştirme eğrisinden görüldüğü gibi mevcut çalışmanın ortalama çarpışma kuvveti deneysel çalışmaya göre çok az daha düşüktür. Ayrıca eğriye göre maksimum çarpışma kuvvetinin % 5 oranında fazla olduğu görülmektedir. Bu değişime malzemedeki başlangıç kusurları sebep olabilir. Ayrıca sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sonuçlar Marzbanrad ve Ebrahimi (2011)’nin yapmış olduğu aynı doğrulama çalışmasıyla paralellik göstermektedir. Ek olarak, deformasyon şekillerine bakıldığında, aynı zaman diliminde elde edilen deformasyonun, Zarei ve Kröger (2006)’in deneysel çalışma sonucu ile uyumluluk gösterdiği görülmüştür.



Şekil 4.4. S1 modelinin sonlu elemanlar ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması (a) çarpışma kuvveti- yer değiştirme eğrisi, (b) deneysel çarpışma numunesi ve (c) sonlu eleman numunesi

Birçok araştırmacı rijit plastik teorisini kullanarak statik ve dinamik yükler altındaki ince cidarlı silindirik tüplerin F_{ort} değerini tahmin edebilmek için teorik modeller geliştirmişlerdir (Alexander, 1960; Abramowicz ve Jones, 1984; Jones, 1989; Alghamdi, 2001; Guillow ve ark., 2001;). Düşük hızdaki (15 m/s'den düşük) darbeler için, atalet etkileri ihmal edilebilir, ayrıca silindirik tüplerin statik ve dinamik yükler altındaki deformasyon şekilleri benzerdir (Alghamdi, 2001; Al Galib ve Limam, 2004; Simhachalam ve ark., 2014). Fakat şekil değiştirme hızı etkileri genel olarak statik ve dinamik yüklemelere maruz kalan silindirik tüplerin F_{ort} değerleri arasında değişikliklere neden olabilir. Simhachalam ve ark. (2014) 10 m/s çarpışma hızı için $d=1288000$ ve $p=4$ değerlerine sahip olan AA6061 alüminyum tüplerin dinamik faktörünü (ortalama dinamik kuvvetin ortalama statik kuvvete oranı) 1,12 olarak belirlemişlerdir. Başka bir çalışmada, Galib ve Limam (2004) 7,2-8,97 m/s aralığındaki çarpışma hızlarında A6060-T5 alüminyum tüpler için dinamik ortalama çarpışma kuvvetinin statik ortalama çarpışma kuvvetinden 8-11 % daha büyük olarak bulmuşlardır. Bu çalışmada, düşük çarpışma hızında (10 m/s) şekil değiştirme hızı etkisi (strain-rate) dikkate alındığında ve alınmadığında elde edilen F_{ort} değerleri karşılaştırılmıştır. Tüplerin boyu ve çapı sırasıyla 200 mm ve 80 mm olarak seçilmiştir. Guillow ve ark. (2001) 6060-T5 alüminyum alaşımından tüplerin F_{ort} değerleri için aşağıdaki ampirik eşitliği elde etmişlerdir.

$$\frac{F_{ort}}{M_0} = 72,3 \left(\frac{D}{t}\right)^{0,32} \quad (4.3)$$

Burada t duvar kalınlığı, D silindirik tüpün çapı ve $M_0 = \sigma_0(t^2/4)$ tüpün plastik momentidir. Guillove ve ark. (2001)'nin bulmuş olduğu bu eşitlik hem aksenal simetrik hem de aksenal simetrik olmayan deformasyon şekilleri için uygulanabilir. Çizelge 4.2'de eşdeğer kalınlıklı tüplerin sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan analizleri sonucunda elde edilen F_{ort} değerlerinin karşılaştırılması gösterilmiştir. Her bir n değeri için eşdeğer kalınlıklı tüplerin kalınlık aralığı ($\Delta t = t_{mak} - t_{min}$) 1,2 seçilmiştir. Çarpışma hızı 10 m/s ve $d=128800$, $p=4$ değerleri için Al6063-T5 tüplerin dinamik faktörü 1,12-1,15 aralığında olduğu Çizelge 4.3'den görülmektedir. Bu sonuçlar literatürle uyumludur (Al Galib ve Limam, 2004; Simhachalam ve ark., 2014). Ayrıca, şekil değiştirme hızının etkisi dikkate alınmadığında elde edilen dinamik ortalama çarpışma kuvvetleri, ilgili statik yükleme halindeki modellerle benzer sonuçlar göstermektedir. Sonuç olarak, geliştirilen sonlu elemanlar modelinin dinamik aksenal darbe yükleri altındaki silindirik tüplerin mekanik davranışını yeterli doğrulukta benzetebileceği görülmüştür.

Çizelge 4.3. Eşdeğer kalınlıklı tüplerin F_{ort} sonuçlarının karşılaştırılması

n	F_{ort} (şekil değiştirme hızı etkisinde), kN	F_{ort} (şekil değiştirme hızı etkisinde olmayan), kN	F_{ort} (eşitlik 5.1'e göre), kN
0,5	42,63959	36,93575	35,36007
0,9	39,87815	32,13932	30,08905
1	34,93575	30,32192	29,13677
3	25,41774	20,8889	20,71592
5	24,51979	18,14527	18,17255
7	20,51178	17,74199	16,95283
9	19,67808	18,89034	16,23825

5. SAYISAL SONUÇLAR

5.1. Eksenel Yükleme İçin Sayısal Sonuçlar

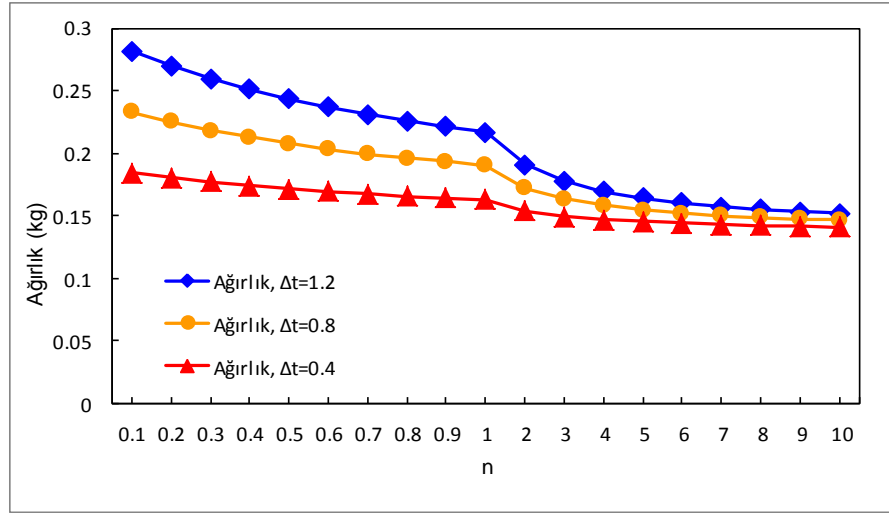
İlk olarak, FDK tüpler için elde edilen çarpışma simülasyon sonuçları ile aynı ağırlıktaki EK tüplerin çarpışma sonuçları eksenel ve eğik yükleme altında karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmada aynı boyda, farklı çaplara sahip enerji sönmüleyiciler seçilmiştir. Çarpışma üsteli n $0,1 \leq n \leq 10$ aralığında seçilmiştir. Tüplerin çarpışma davranışları üzerinde kalınlık değişiminin etkisini gözlemlemek için farklı kalınlık aralıkları ($\Delta t = t_{\max} - t_{\min}$) dikkate alınmıştır. Tüpün en alt kesitinin kalınlığı 1 mm 'de sabitlenip, en üst kesitinin kalınlığı 1,4, 1,8 ve 2,2 mm olarak belirlenmiştir. Ayrıca eğik yüklemede yükleme açısı olarak 10° , 20° ve 30° olmak üzere üç farklı yükleme açısı kullanılmıştır. Eğik yükleme sadece $\Delta t = 1,2$ ve çapı 80 mm olan ince cidarlı yapılara uygulanmıştır. EK tüpler FDK tüpler ile aynı hacimde ve aynı ağırlıktadır. EK modellerin eşdeğer kalınlık, hacim ve kalınlık parametreleri FDK modellerin başlangıçtaki kinetik enerjileri kullanılarak elde edilmiştir. EK modellerin ağırlıkları Eşitlik (5.1) ile hesaplanır;

$$m_{EK} = \frac{2E_K^{FDK}}{v_0^2} - m \quad (5.1)$$

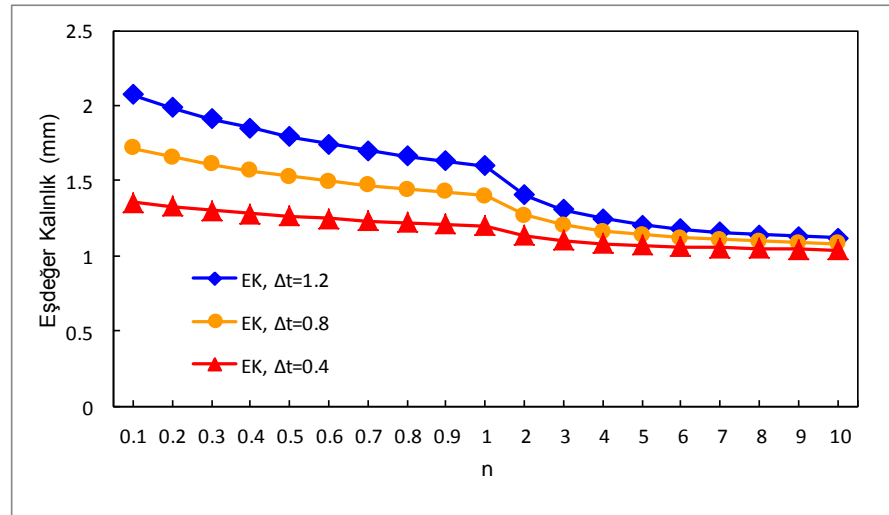
Burada v_0 ilk hız (10 m/s) , m kütle (250 kg) ve E_K^{FDK} ise FDK tüpün ilk kinetik enerjisidir. Daha sonra EK tüplerin eşdeğer kalınlığı Eşitlik (5.2)'den elde edilmiştir.

$$t_{EK} = \frac{m_{EK}}{\pi D L \rho} \quad (5.2)$$

Burada L tüpün uzunluğu, D tüpün çapı ve ρ ise alüminyum alaşımının yoğunluğudur.



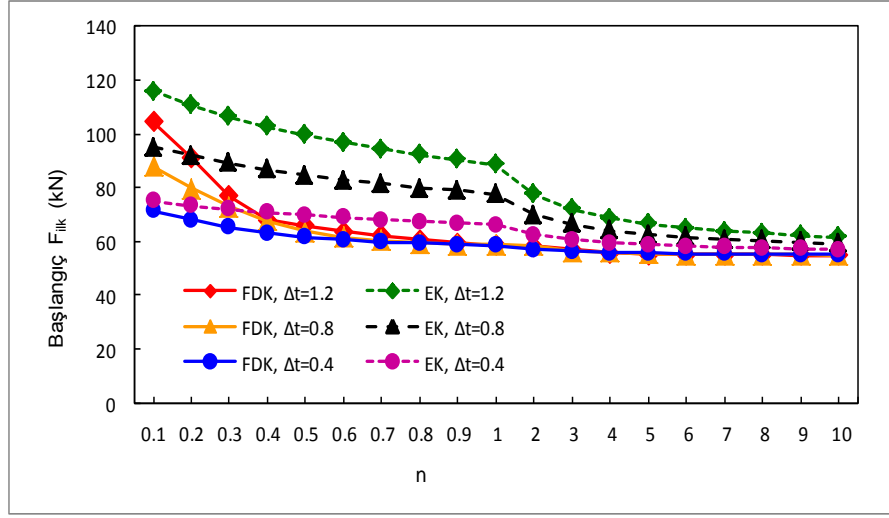
(a)



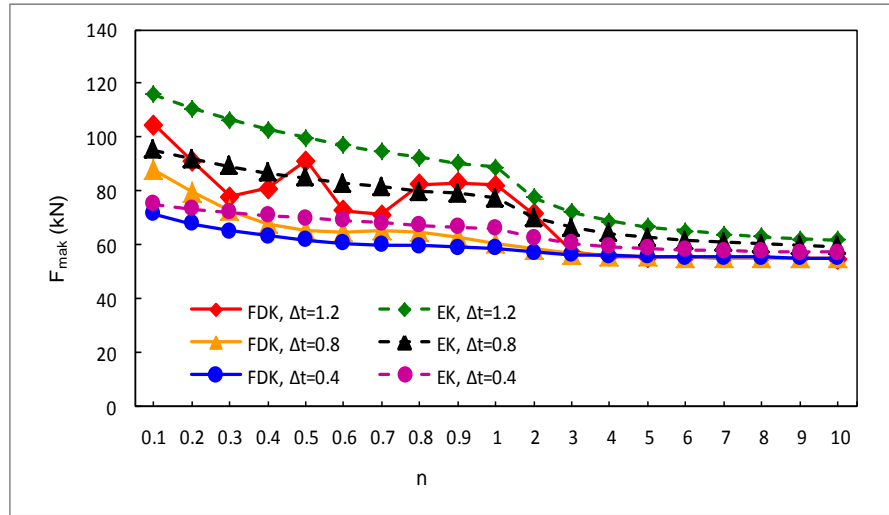
(b)

Şekil 5.1. Eşdeğer kalınlıklı tüplerin farklı n ve kalınlık değişimleri için (a) ağırlık değerleri ve (b) eşdeğer kalınlık değerleri

EK enerji sönmüleyicilerin farklı n ve farklı kalınlık değişimleri için elde edilen ağırlık ve eşdeğer kalınlıkları Şekil 5.1’de gösterilmiştir. Şekil 5.1’den görülebileceği gibi n değerleri arttıkça ince cidarlı tüplerin hem ağırlıkları hem de eşdeğer kalınlıkları azalmaktadır. Ayrıca EK tüplerin ağırlık ve eşdeğer kalınlık değerleri $0,1 \leq n \leq 1$ aralığında daha hızlı bir değişim gösterirken, $1 \leq n \leq 10$ aralığında daha yavaş bir değişim göstermektedir.



(a)



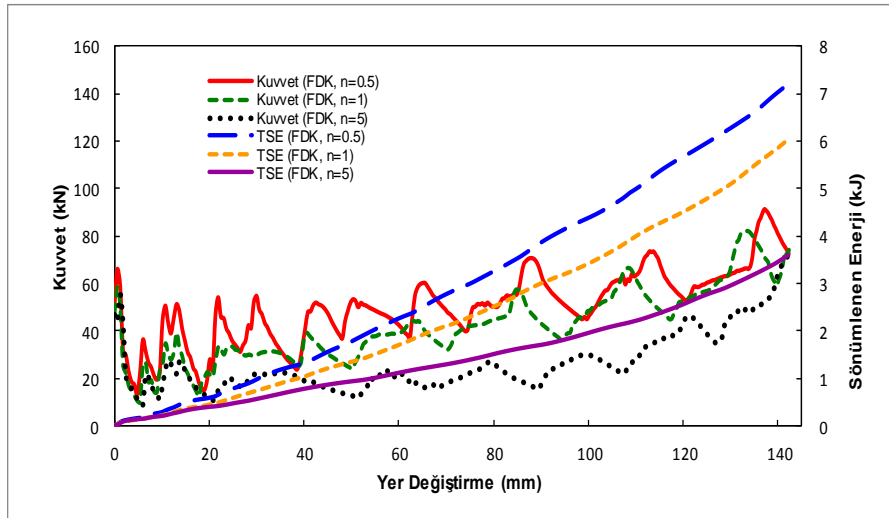
(b)

Şekil 5.2. Eşdeğer ve fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kalınlıklı tüplerin farklı n ve kalınlık değişimleri için tüplerin başlangıç ve maksimum çarpışma kuvveti değerleri

Şekil 5.2’de ise FDK ve EK tüplerin farklı n değerleri için çarpışma benzetimleri sonrası elde edilen başlangıç F_{ilk} ve F_{mak} değerleri gösterilmiştir. Şekil 5.2’den görülebileceği gibi, EK tüplere ait başlangıç F_{ilk} değerleri ile F_{mak} değerleri aynıdır ve artan n değerlerine göre kuvvet değerleri azalmaktadır. FDK tüpler için bazı n değerlerinde F_{mak} değerleri farklılık göstermektedir. FDK tüpler tüp boyunca artan kalınlıklara sahiptir ve deformasyonla dayanımları artmaktadır. Bu durum çarpışma aralığının başlangıcında daha fazla yerdeğiştirme daha az F_{ilk} değerine neden

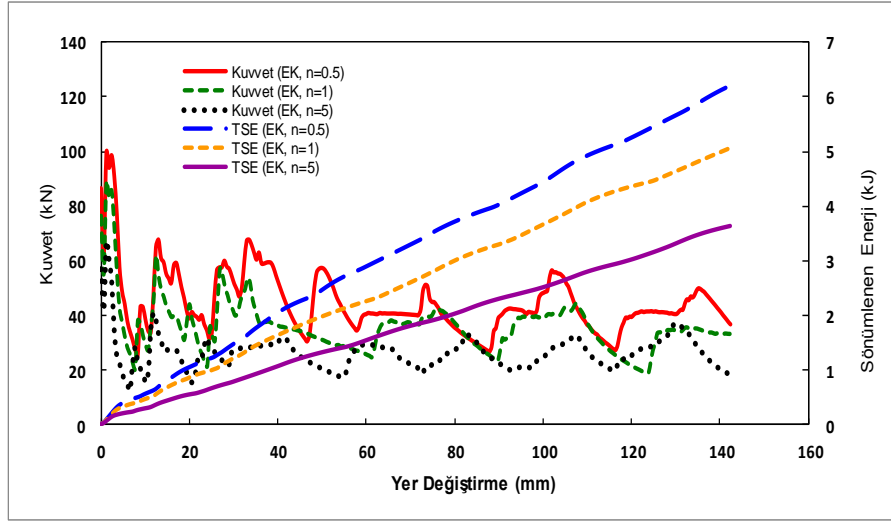
olurken, çarpışma aralığının sonunda daha az yerdeğiştirme ve daha fazla F_{mak} değerlerine neden olur.

Şekil 5.2.'den görüldüğü gibi, EK tüplerle karşılaştırıldığında, FDK tüplerin kullanımı başlangıç maksimum çarpışma kuvveti değerlerini önemli ölçüde azaltmaktadır. Ayrıca, tüm modeller için çarpışma aralığının sonunda FDK tüplerin F_{mak} değerleri EK tüplere göre daha düşüktür. $0,1 \leq n \leq 10$ aralığı için daha geniş kalınlık aralığındaki FDK tüplerin, F_{mak} değerlerini azaltmada daha verimli oldukları Şekil 5.2b'den anlaşılmaktadır. Kalınlık aralığı 1,2 ve n değeri 0,5 olan FDK tüplerin son F_{mak} değerleri ilgili EK tüplerinkinden yaklaşık %30 daha düşükken, kalınlık aralığı 1,2 ve n değeri 0,7 olan FDK tüplerin başlangıç F_{ilk} değerleri ilgili EK tüplerden yaklaşık %35 daha düşüktür. Ayrıca $0,1 \leq n \leq 0,9$ aralığı için FDK tüpler EK tüplere göre F_{ilk} değerini daha etkili bir şekilde azaltmaktadır. Örnek olarak, n değeri 0,1'den 0,9'a artarken, kalınlık aralığı 1,2 için FDK ve EK tüplerin başlangıç F_{ilk} değerleri sırasıyla %44 ve %22 olarak azalır. Genel olarak, aynı ağırlıktaki FDK ve EK tüpler maksimum çarpışma kuvveti cinsinde kıyaslandığında FDK tüpler daha üstün çarpışma dayanımı özellikleri göstermektedir.



(a)

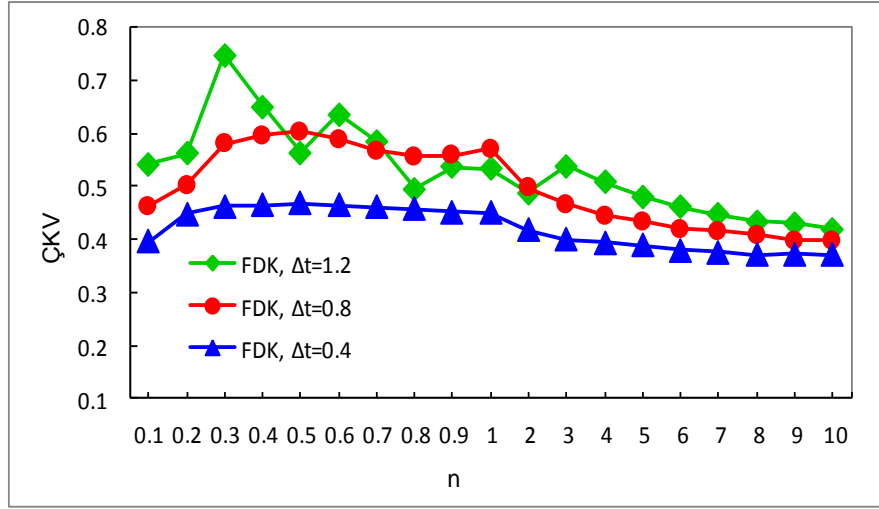
Şekil 5.3. (a) Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş ve (b) eşdeğer kalınlıklı tüplerin kuvvet- yer değiştirme ve sönümlenen enerji- yer değiştirme eğrileri



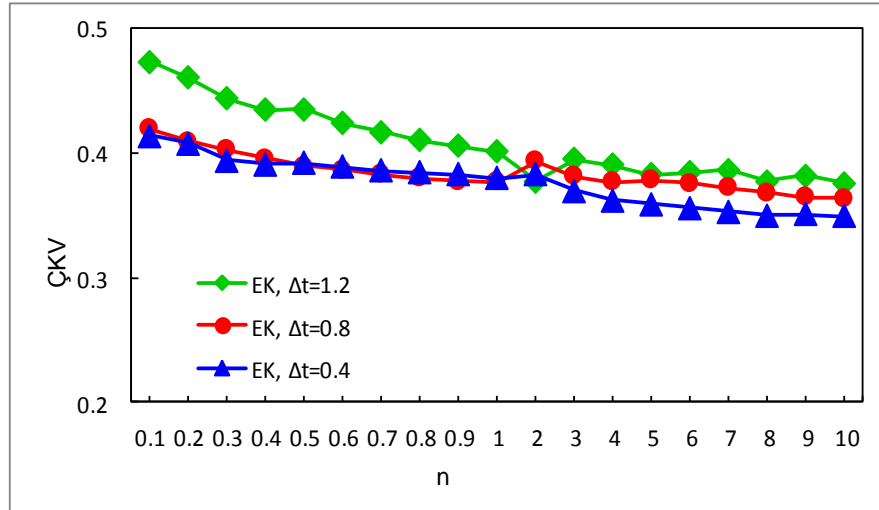
(b)

Şekil 5.3. (Devam) (a) Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş ve (b) eşdeğer kalınlıklı tüplerin kuvvet- yer değiştirme ve sönümlenen enerji- yer değiştirme eğrileri

Şekil 5.3.'te seçilmiş FDK ve EK tüplerin kuvvet- yer değiştirme ve sönümlenen enerji- yer değiştirme eğrileri gösterilmiştir. EK tüplerin artan yer değiştirme değerlerinde sönümledikleri enerji miktarı neredeyse doğrusal bir eğri şeklinde olduğu görülürken, FDK tüplerin artan yer değiştirme değerlerinde sönümledikleri enerji miktarı doğrusal olmayan bir artan eğri şeklinde olduğu görülmektedir. Grafikteki bu doğrusal olmayan artış FDK tüplerin ilgili EK tüplerden daha fazla enerji sönümlediğini göstermektedir. Ayrıca n ' in 0,5, 1 ve 5 değeri için FDK tüplerin sönümledikleri enerjiler EK tüplerin sönümledikleri enerjilere göre sırasıyla %18, %23 ve %4 daha fazladır. Ek olarak, FDK tüpler uzunluk boyunca EK tüpler gibi eşdeğer bir kalınlığa sahip olmadıklarından dolayı deformasyonla birlikte dayanımları artmaktadır. Bu nedenle Şekil 5.3b'ten de görüldüğü gibi FDK tüplerin kuvvet- yer değiştirme eğrisindeki tepe kuvvet değerleri devamlı olarak artmaktadır.

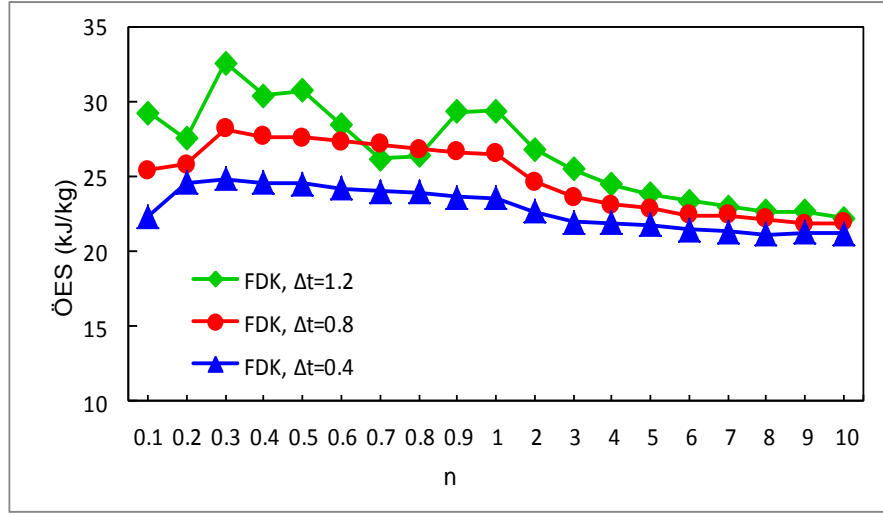


(a)

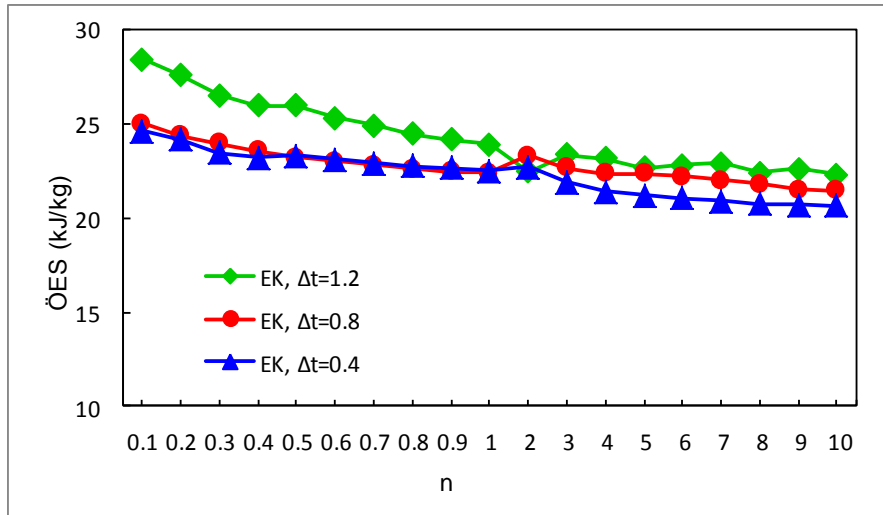


(b)

Şekil 5.4. (a) Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş tüplerin çarpışma kuvvet verimliliği ve (b) eşdeğer kalınlıklı tüplerin çarpışma kuvvet verimliliği değerleri



(c)



(d)

Şekil 5.5. (a) Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş tüplerin özgül enerji sönümü değerleri ve (b) eşdeğer kalınlıklı tüplerin özgül enerji sönümü değerleri

Şekil 5.4 ve Şekil 5.5 farklı n değerleri ve kalınlık aralıkları için FDK ve ilgili EK tüplerin ÇKV ve ÖES değerlerini göstermektedir. Şekillere göre ÇKV ve ÖES değerleri cinsinden bir kıyaslama yapıldığında FDK tüpler ilgili EK tüplere göre daha yüksek çarpışma performansı sergilemektedirler. Özellikle $0,1 \leq n \leq 2$ aralığında FDK tüpler en düşük maksimum çarpışma kuvveti ve en büyük enerji sönümlene kabiliyetine sahip olduklarından dolayı bu aralıkta FDK tüplerin ÇKV değerleri EK tüplere göre daha yüksektir. Kalınlık aralığı 1,2 ve n 0,3 için FDK

tüplerin ÇKV ve ÖES değerleri aynı özellikteki EK tüplerden sırasıyla %64 ve %18 daha fazladır. Ayrıca artan n değerlerine göre FDK ve EK enerji sönmleyiciler için hem ÇKV hem de ÖES değerlerinde azalma görülmektedir. Diğer taraftan çarpışma enerjisini sönmleyici elemanın kütesinin az olması enerji sönmleyicilerin tasarımında önemli bir parametredir. Kalınlık aralığı 1,2' de n değeri 2 olan FDK ve n değeri 0,5 olan EK tüplerin ÖES değerleri aynı olmasına rağmen, FDK tüpün ağırlığı EK tüpün ağırlığından %22 kadar daha düşüktür. Aynı şekilde n değeri 0,7 olan FDK tüpler ve n değeri 0,2 olan EK tüpler için, FDK tüplerin kullanımı kütlede %14 kadar avantaj sağlamaktadır. Sonuç olarak hem ÇKV hem de ÖES grafiklerine bakıldığında FDK tüpler aynı ağırlıktaki ve hacimdeki EK tüplere göre daha üstün çarpışma dayanım özellikleri göstermektedirler.

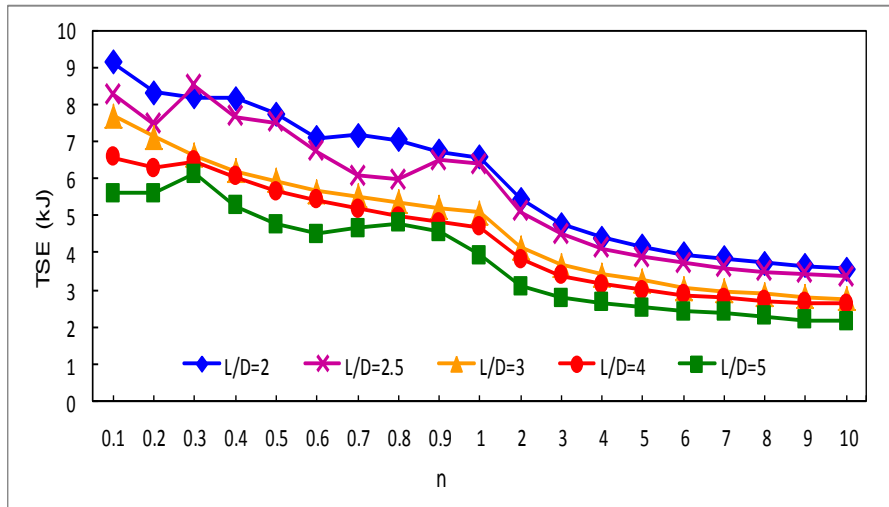
Tüp boyunun tüp çapına (L/D) ve tüp çapının tüp cidar kalınlığına (D/t) oranları göz önünde bulundurulduğunda Guillow ve ark. (2001)'nin şekil sınıflandırma tablosuna göre 6060-T5 alüminyum alaşımından yapılmış dairesel EK tüplerin karma deformasyon şekillerine sahip oldukları görülmektedir. Şekil 5.6'de 15 ve 18 ms zaman diliminde seçilmiş bazı n değerlerindeki FDK ve EK tüplerin deformasyon şekilleri gösterilmiştir. FDK tüpler 15 ms'de EK tüplerle karşılaştırıldığında tüp eksenine boyunca değişkenlik gösteren dayanımlarından dolayı daha fazla yer değiştirme değerlerine sahiplerdir. Şekil 5.6'ten görüldüğü gibi FDK tüplerin deformasyon şekilleri tüm n değerleri için EK tüplerin deformasyon şekillerinden daha kararlıdır.



Şekil 5.6. Seçilmiş bazı fonksiyonel olarak derecelendirilmiş ve eşdeğer kalınlıklı tüplerin farklı n değerlerindeki deformasyon şekilleri

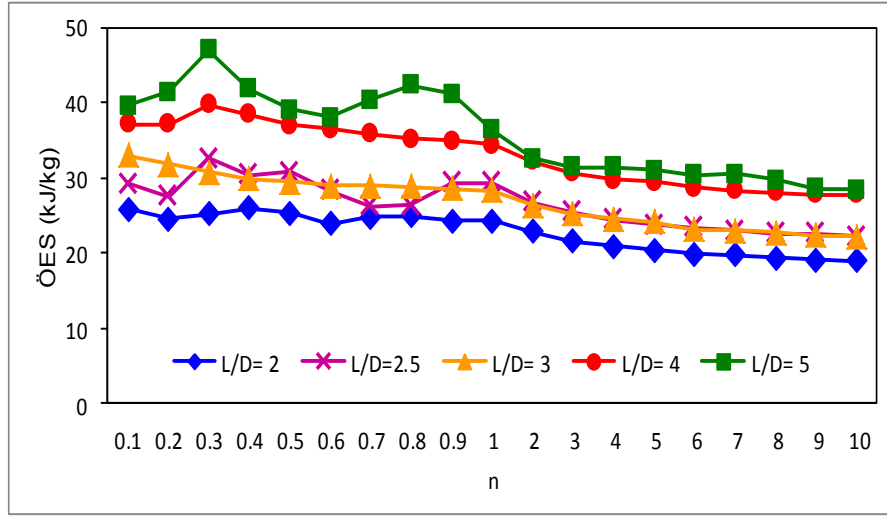
EK tüplere benzer olarak, n değeri 0,3 olan FDK enerji sönümleyicisi hariç diğer tüm FDK enerji sönümleyici tüpler karma deformasyon şekline sahiptir. n değeri 0,3 olan FDK tüplerin aksel simetrik deformasyon şekline sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca, $0,1 \leq n \leq 1$ aralığında FDK tüpler EK tüplerden daha fazla aksel simetrik dilimlere sahiptir. Buradan FDK tüplerin EK tüplerden toplamda daha fazla enerji sönümleme yeteneğine sahip olduğu sonucuna varılabilir.

FDK tüplerin çarpışma performansları üzerinde çeşitli uzunluk / çap (L/D) oranlarının etkisi ayrıca araştırılmıştır. Enerji sönümleyici tüplerin ilk boyları 200 mm olarak seçilmiştir. Aynı zamanda analizlerde kalınlık değişimi 1,2 mm olarak alınmıştır. Tüplerin alt uç kesit kalınlığı 1mm üst uç kesit kalınlığı 2,2 mm' ye sabitlenmiştir. Yapılan analizler sonucunda FDK tüplerin karma deformasyon şekillerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. FDK tüplerin değişik L/D oranının çarpışma parametreleri üzerindeki etkileri Şekil 5.7-12'de gösterilmiştir.



Şekil 5.7. Farklı n ve boy/çap değerlerinde fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kalınlıklı tüplerin sönümledikleri toplam enerji değerleri

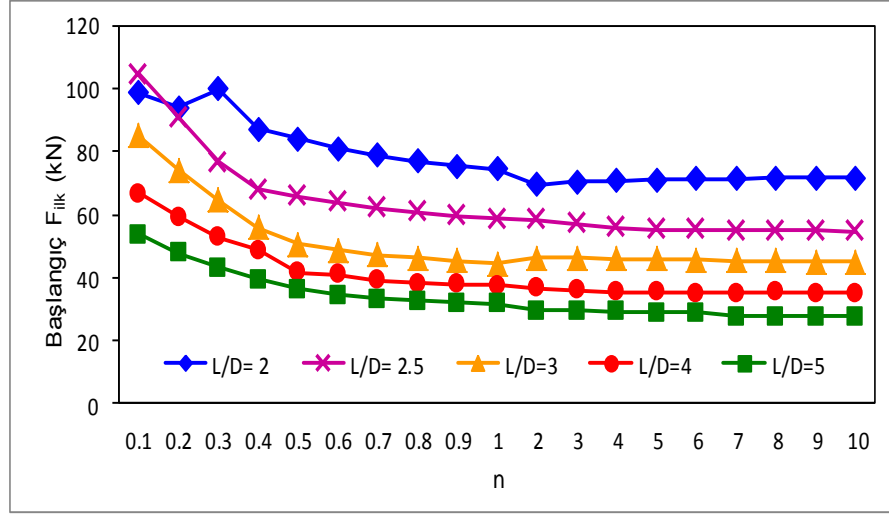
Şekil 5.7'de farklı n ve L/D değerlerinde FDK tüplerin TSE değerleri gösterilmiştir. Şekil 5.7'de görülebileceği gibi, tüplerin L/D oranı ve sahip oldukları n değerleri azaldıkça sönümledikleri enerji miktarları artmaktadır. Tüplerin toplam sönümlenen enerji- n grafiğine bakıldığında farklı L/D oranlarındaki değişimleri yaklaşık olarak aynıdır. FDK tüpler n değerinin $0,1 \leq n \leq 2$ olduğu aralıkta sönümlenen enerjiyi artırma açısından daha etkilidirler.



Şekil 5.8. Farklı n ve boy/çap değerlerinde fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kalınlıklı tüplerin özgül enerji sönümü değerleri

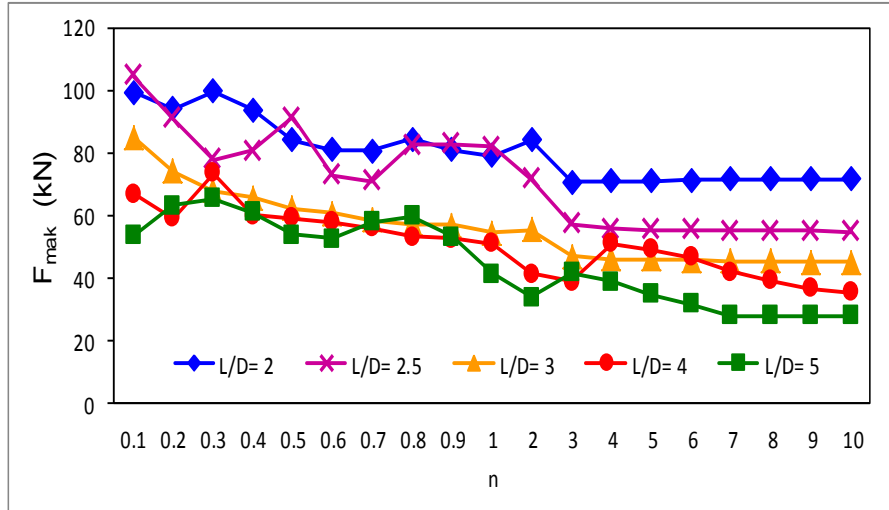
Farklı n ve L/D değerlerinde FDK tüplerin ÖES değerleri Şekil 5.8' den görülmektedir. ÖES – n grafiği incelendiğinde, FDK tüplerin ÖES değerlerinin azalan n değerleri ve artan L/D oranına göre arttığı görülmektedir. FDK tüpler özellikle n değerinin $0,1 \leq n \leq 1$ olduğu aralıkta özgül enerji sönümünü artırma açısından daha etkilidirler. Grafiklerdeki eğriler eşdeğer kalınlıklı tüpler için Marzbanrad ve Ebrahimi (2011)'nin daha önce yaptığı çalışma sonuçları ile uyumluluk göstermektedir. Marzbanrad ve Ebrahimi (2011)'nin çalışmasında tüplerin sönümledikleri enerji miktarı değerleri L/D oranı ve D/t oranı azaldıkça artmaktadır. Ayrıca özgül enerji sönümü miktarı L/D oranının artmasıyla azalmaktadır.

Şekil 5.9'da farklı n ve L/D değerlerinde FDK tüplerin başlangıç F_{ilk} değerleri gösterilmiştir. Şekil 5.9' da başlangıç F_{ilk} değerinin L/D oranının ve n değerinin artmasıyla azaldığı görülmektedir. FDK tüplerin başlangıç F_{ilk} değerlerinin n değerinin özellikle $0,1 \leq n \leq 1$ olduğu aralıkta azaldığı, n değerinin 1' den büyük değerleri için ise az miktarda değiştiği görülmektedir. Ayrıca L/D oranının en küçük değeri için başlangıç F_{ilk} değeri en büyük değerleri almaktadır.

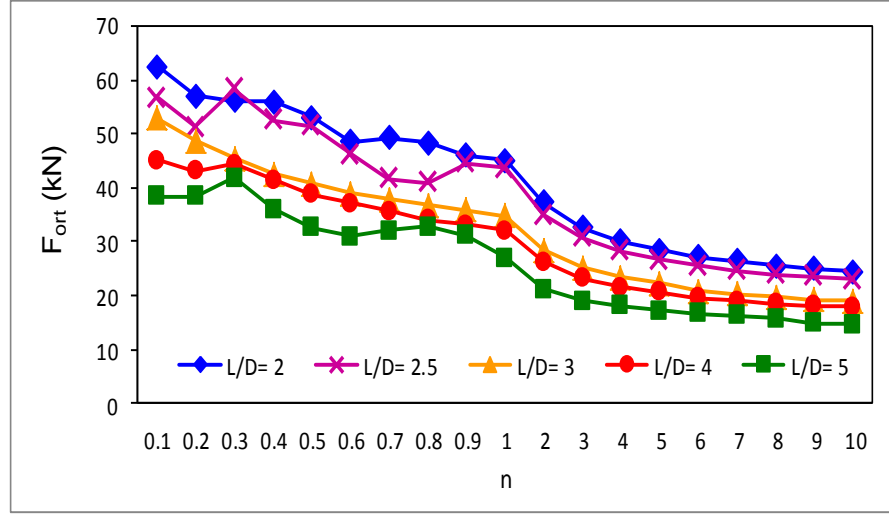


Şekil 5.9. Farklı n ve boy/çap değerlerinde fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kalınlıklı tüplerin başlangıç çarpışma kuvveti değerleri

Diğer taraftan Şekil 5.10'da farklı n ve L/D değerlerinde FDK tüplerin F_{mak} değerleri gösterilmiştir. FDK tüplerin F_{mak} değerleri n değerinin $0,1 \leq n \leq 2$ olduğu aralıkta çeşitlilik göstermektedir. Genel olarak L/D oranının en küçük değeri için F_{mak} en büyük değerleri almaktadır.

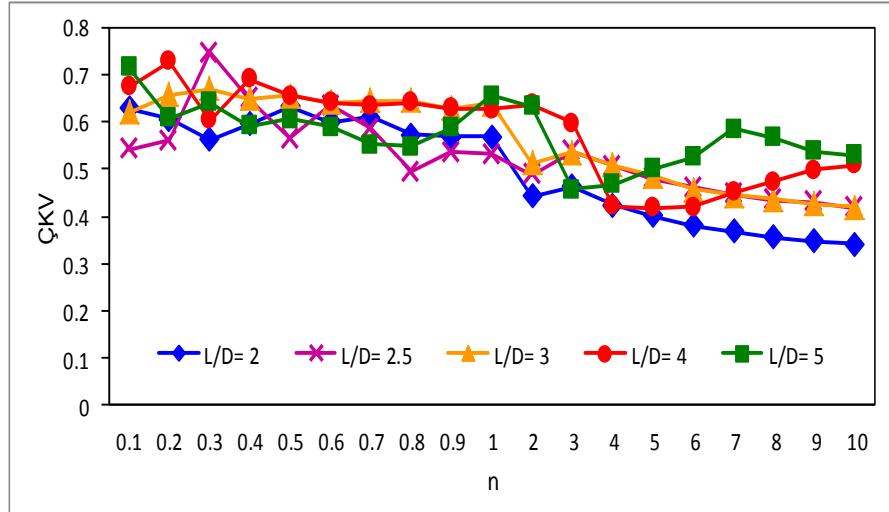


Şekil 5.10. Farklı n ve boy/çap değerlerinde fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kalınlıklı tüplerin maksimum çarpışma kuvveti değerleri



Şekil 5.11. Farklı n ve boy/çap değerlerinde fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kalınlıklı tüplerin ortalama çarpışma kuvveti değerleri

Şekil 5.11’de farklı n ve L/D değerlerinde FDK tüplerin başlangıç F_{ort} değerleri gösterilmiştir. Ortalama çarpışma kuvveti (F_{ort}) Eşitlik 3.2’den görüldüğü gibi sabit yer değiştirme değerinde TSE değeri ile doğru orantılı olduğundan toplam sönmölen enerji değerinin eğrileri ile aynı şekilde değişmektedir.. FDK tüplerin ortalama çarpışma kuvveti L/D oranı ve n değeri azaldıkça artmaktadır.



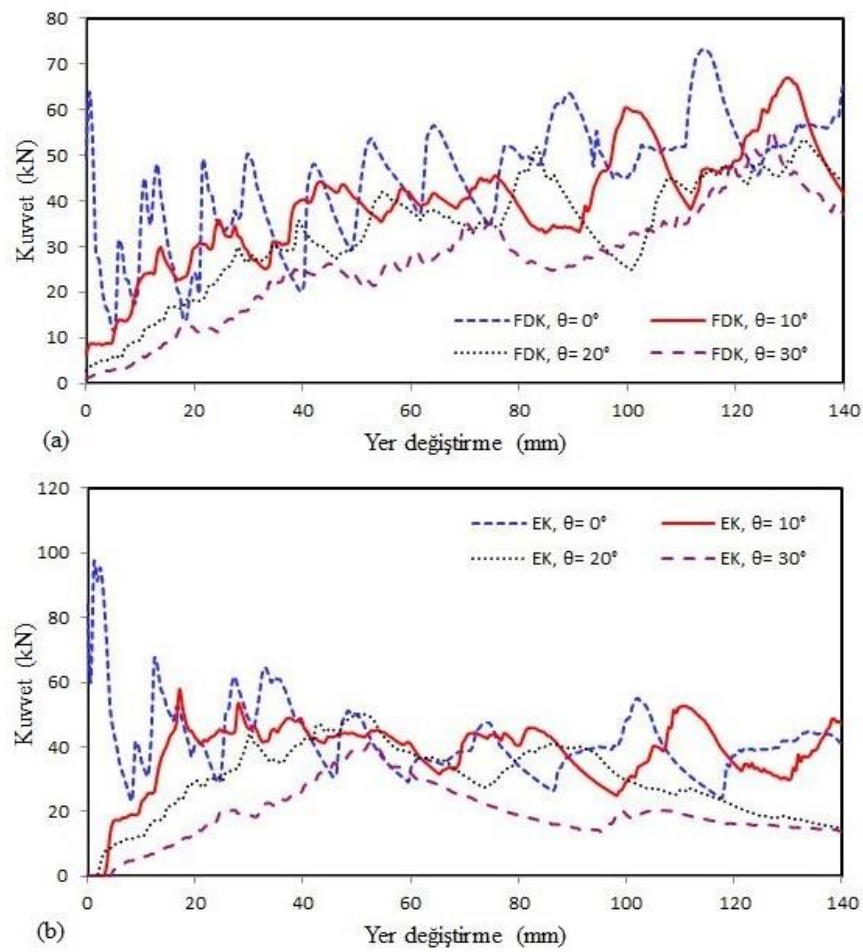
Şekil 5.12. Farklı n ve boy/çap değerlerinde fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kalınlıklı tüplerin çarpışma kuvveti verimliliği değerleri

Farklı n ve L/D değerlerinde FDK tüplerin ÇKV değerleri Şekil 5.12’den görülmektedir. Şekil 5.12’ ye göre FDK tüpler n değerinin $0,1 \leq n \leq 2$ olduğu aralıkta en küçük maksimum çarpışma kuvveti ve en büyük ortalama çarpışma

kuvvetine sahip olduklarından dolayı, aynı n aralığında ÇKV değerinin artırmada daha çok etkiye sahiptirler.

5.2. Eğik Yükleme İçin Sayısal Sonuçlar

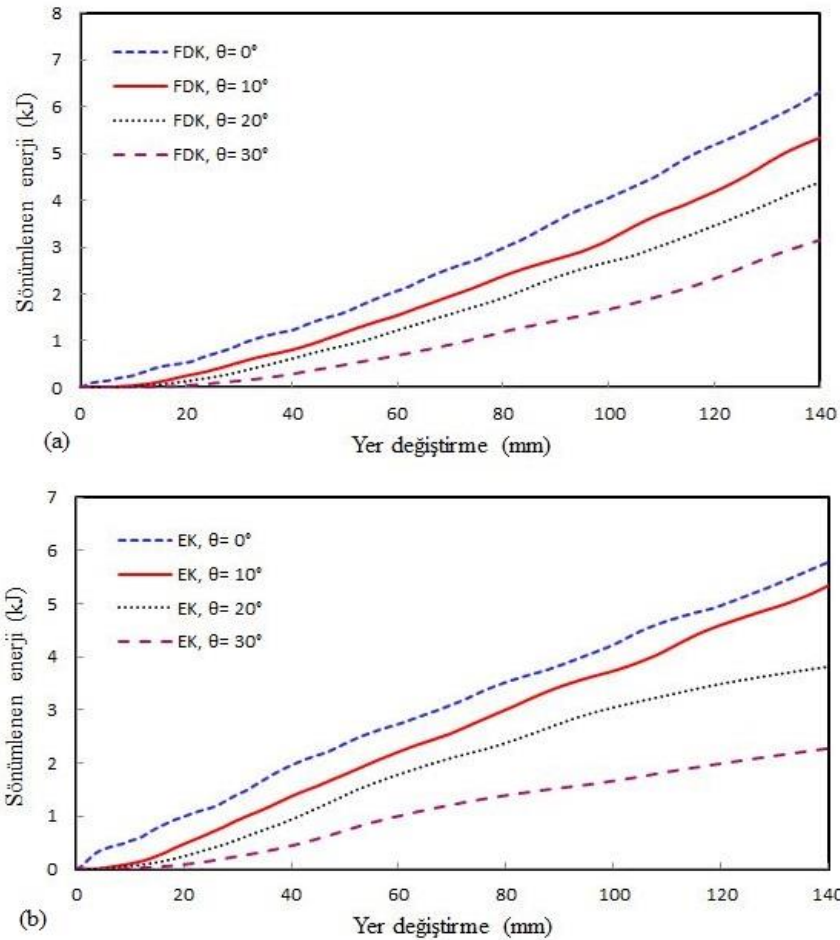
Şekil 5.13'te n değeri 0,6 olan farklı yükleme açılarında sahip FDK ve EK tüplerin eğik yükleme altında kuvvet- yer değiştirme eğrileri verilmiştir. Şekil 5.13'ten görülebileceği gibi hem FDK hem de EK tüplerin yükleme açıları arttıkça kuvvet değerleri azalmaktadır.



Şekil 5.13. (a) FDK ve (b) EK tüplerin eğik yüklemeler altında kuvvet- yer değiştirme eğrileri

Farklı yükleme açılarında, FDK tüpler uzunluk boyunca değişken kalınlığa sahip olduklarından dolayı dayanımları değişkenlik göstermektedir. Bu sebeple FDK tüplerin tepe kuvvetleri sürekli olarak artmaktadır. Diğer bir yandan, 20° ve daha

küçük yükleme açılarında EK tüplerin kuvvet değerleri dalgalanma gösterirken 30° yükleme açısına sahip EK tüpler maksimum kuvvet değerine ulaştıktan sonra sürekli olarak azalma göstermektedir.



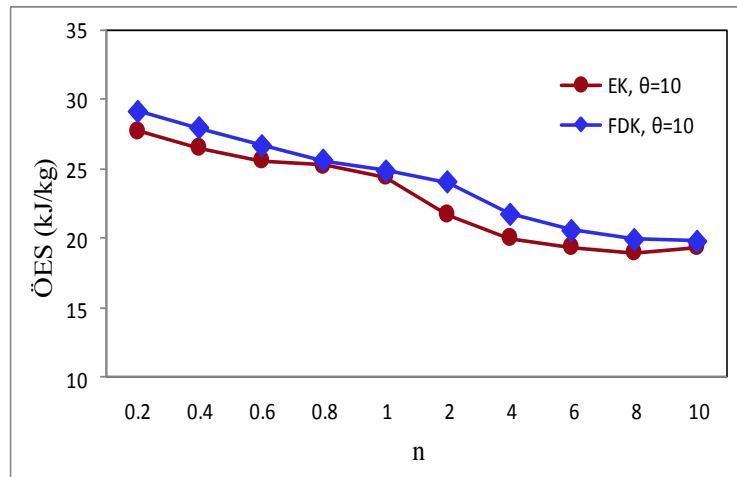
Şekil 5.14. (a) FDK ve (b) EK tüplerin eğik yüklemeler altında sönümlenen enerji- yer değiştirme eğrileri

Şekil 5.14'te n değeri 0,6 olan FDK ve EK tüplerin eğik yüklemeler altında sönümlenen enerji- yer değiştirme eğrileri verilmiştir. EK tüplerin sönümledikleri enerji miktarı neredeyse doğrusal bir eğri şeklinde olduğu görülmüşken, FDK tüplerin sönümledikleri enerji miktarı doğrusal olmayan artan bir eğri şeklinde görülmektedir. Grafiklerdeki bu değişim, EK tüplerin sönümledikleri enerji miktarı değerlerinin FDK tüplerin sönümledikleri enerji miktarı değerlerinden daha düşük olduğunu göstermektedir. FDK tüplerin sönümledikleri enerji miktarı EK tüplerin

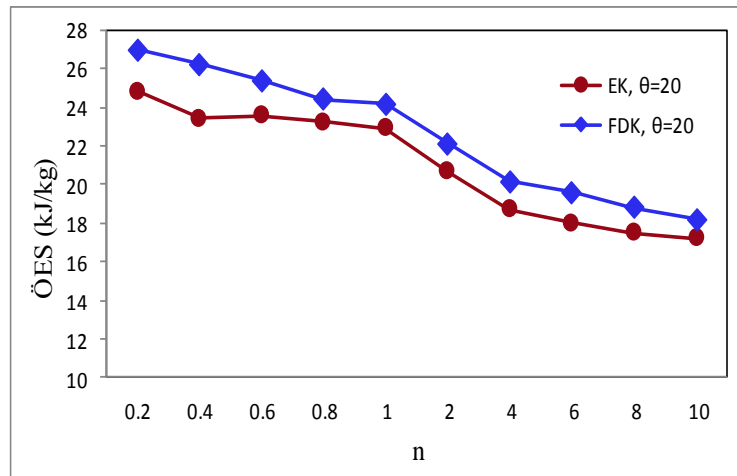
sönümledikleri enerji miktarına göre farklı yükleme açılarında % 2,6 - % 13,2 daha fazla olduğu görülmektedir.

Şekil 5.15'te farklı yükleme açlarına sahip FDK ve EK tüplerin değişen n değerleri için özgül enerji sönümlenme değerleri gösterilmiştir. Şekil 5.15'ten görülebileceği gibi, yükleme açısı arttıkça FDK ve EK tüplerin ÖES değerleri azalmaktadır. Diğer taraftan yükleme açısı 10° ve 20° için n değerleri arttıkça genel olarak FDK ve EK tüplerin ÖES değerleri azalmaktadır. Yükleme açısının 30° olduğu durumda $0,2 \leq n \leq 2$ aralığında n değerleri arttıkça FDK tüpler EK tüplerden daha yüksek özgül enerji sönüm değerlerine sahipken, $2 \leq n \leq 10$ aralığında n değerleri arttıkça FDK tüpler EK tüplerden daha az enerji sönüm değerlerine sahiptirler. Genel olarak FDK tüplerin daha yüksek ÖES değerlerine sahip oldukları görülmüştür. 10° , 20° ve 30° lik yükleme açıları için FDK tüplerin özgül enerji sönümlenme değerleri sırasıyla maksimum %12, 12,5 ve % 33 ve minimum %0,7, %1,6 ve %16 EK tüplerin özgül enerji sönümlenme değerlerinden daha yüksek olduğu görülmektedir.

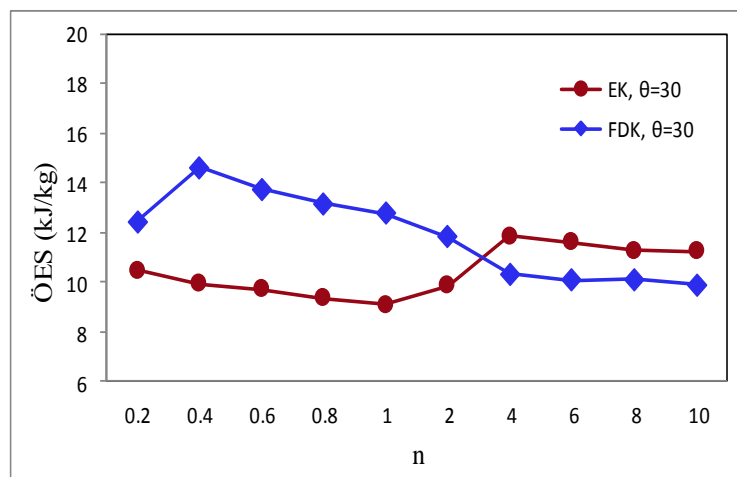
Şekil 5.16'da farklı yükleme açlarına sahip FDK ve EK tüplerin değişen n değerlerindeki ortalama çarpışma kuvveti değerleri gösterilmiştir. Şekil 5.16'dan görülebileceği gibi, yükleme açısı arttıkça FDK ve EK tüplerin F_{ort} değerleri azalmaktadır. Ayrıca yükleme açısı 10° ve 20° için n değerleri arttıkça FDK ve EK tüplerin F_{ort} değerleri azalmaktadır. Yükleme açısının 30° olduğu durumda $0,2 \leq n \leq 2$ aralığında n değerleri arttıkça FDK tüpler EK tüplerden daha yüksek ortalama çarpışma kuvveti değerlerine sahipken, $2 \leq n \leq 10$ aralığında n değerleri arttıkça FDK tüpler EK tüplerden daha az ortalama çarpışma kuvvet değerlerine sahiptirler. 10° , 20° ve 30° lik yükleme açıları için FDK tüplerin ortalama çarpışma kuvveti değerleri sırasıyla maksimum %4,4, 10,5 ve % 33,3 ve minimum %0,2, %6,25 ve %13,3 EK tüplerin ortalama çarpışma kuvvet değerlerinden daha yüksek olduğu görülmektedir.



(a)

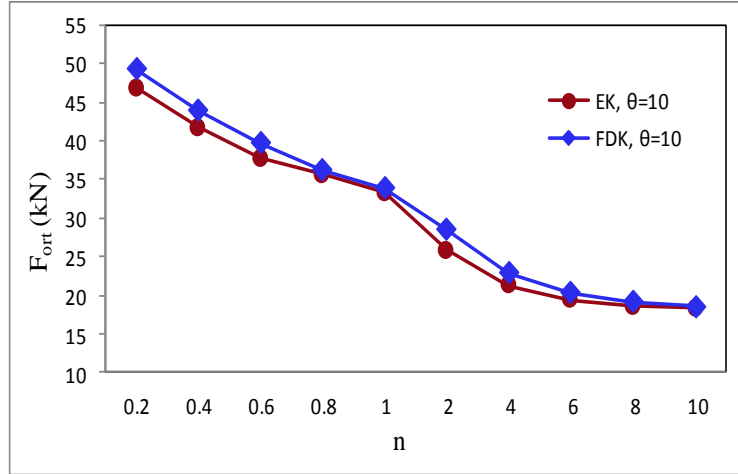


(b)

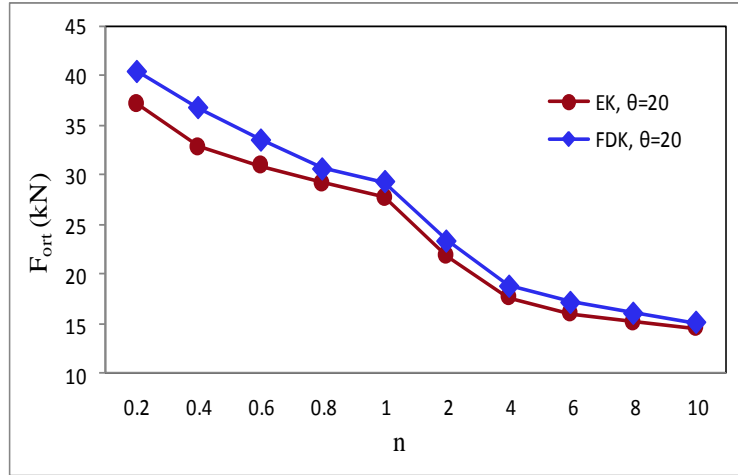


(c)

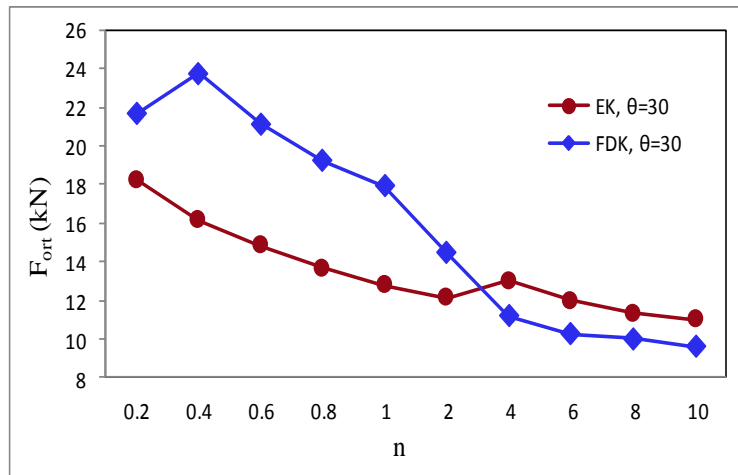
Şekil 5.15. Yükleme açıları (a) $\theta=10^\circ$, (b) $\theta=20^\circ$ ve (c) $\theta=30^\circ$ için değişen n değerlerinde özgül enerji sönümü değerleri



(a)

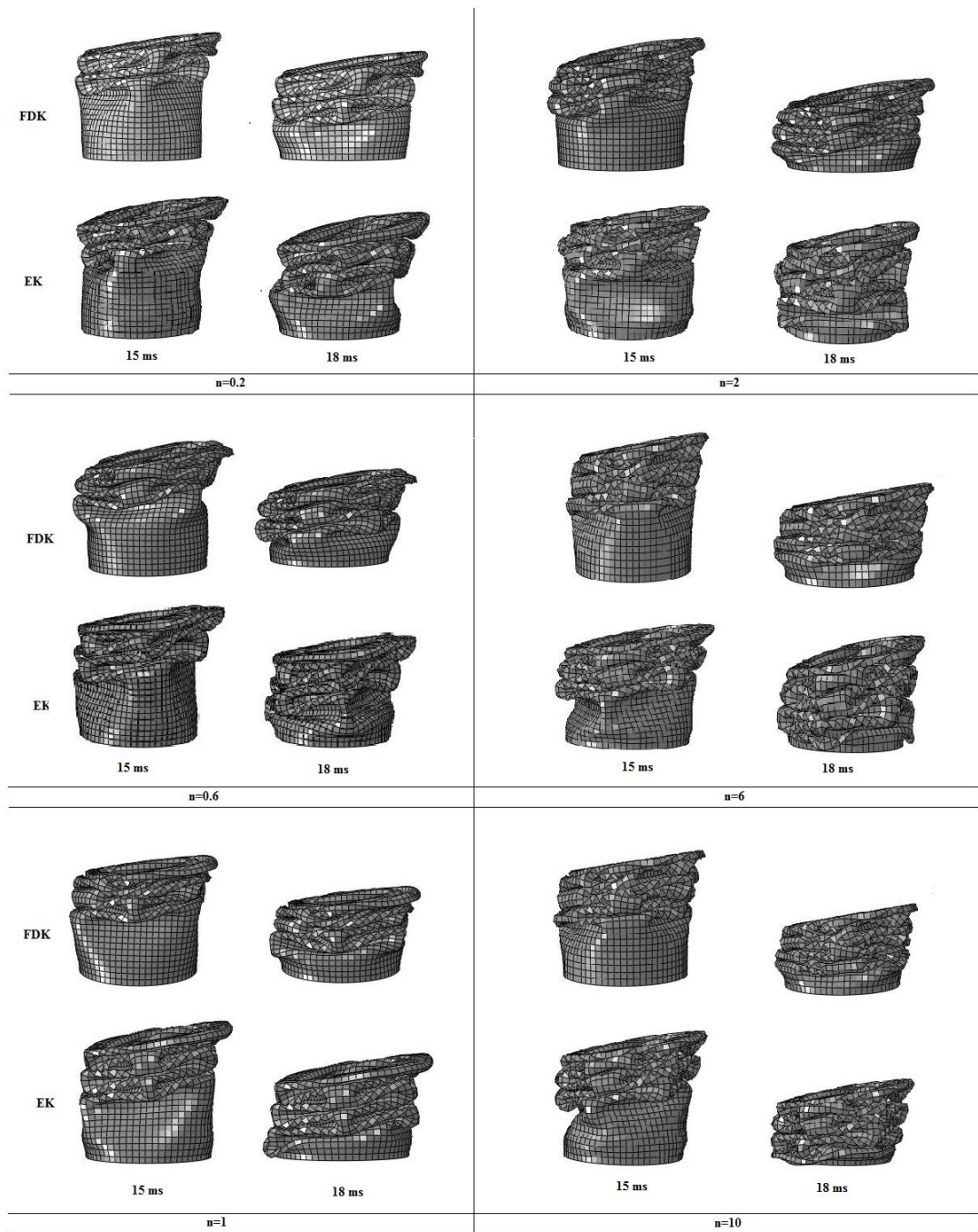


(b)

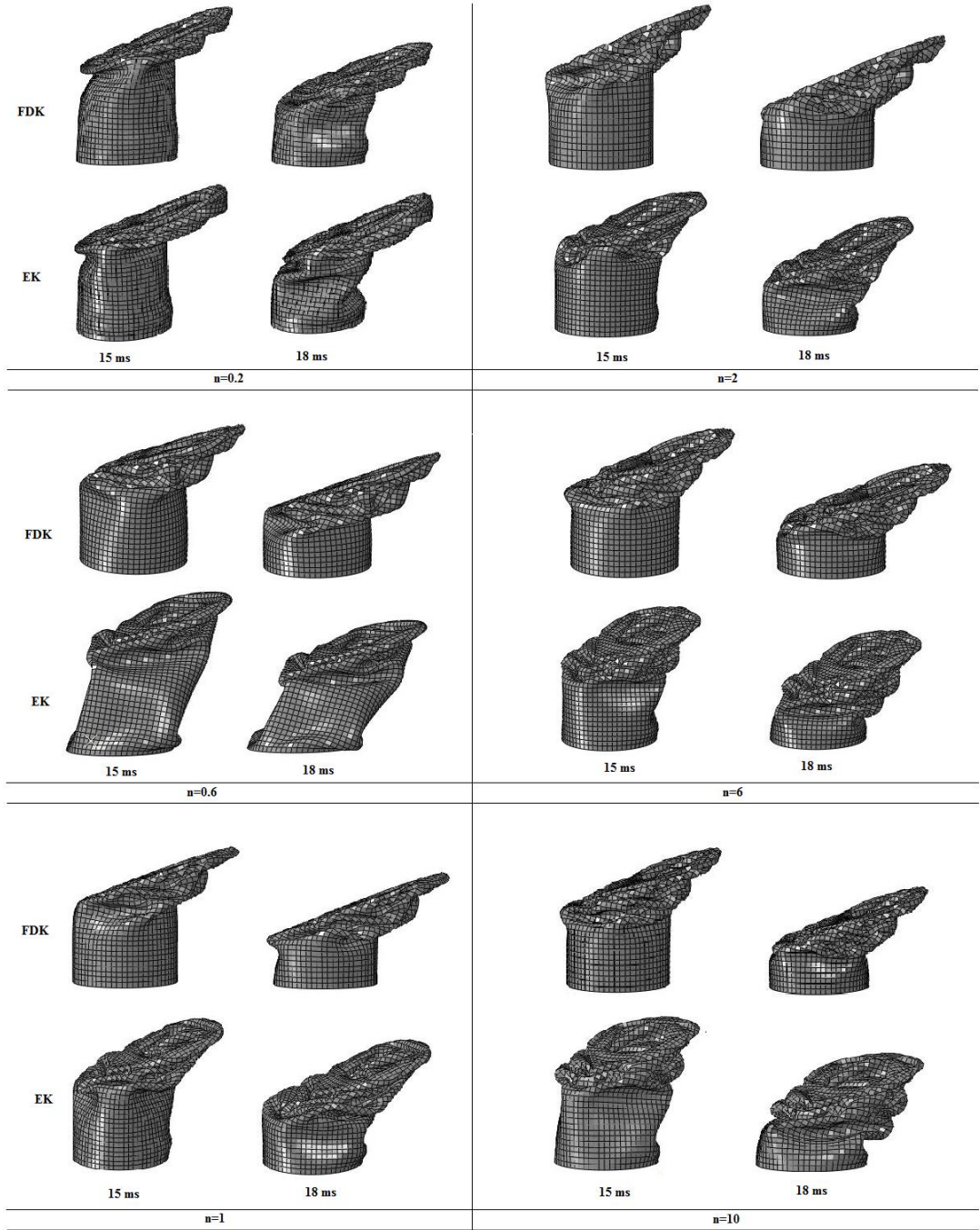


(c)

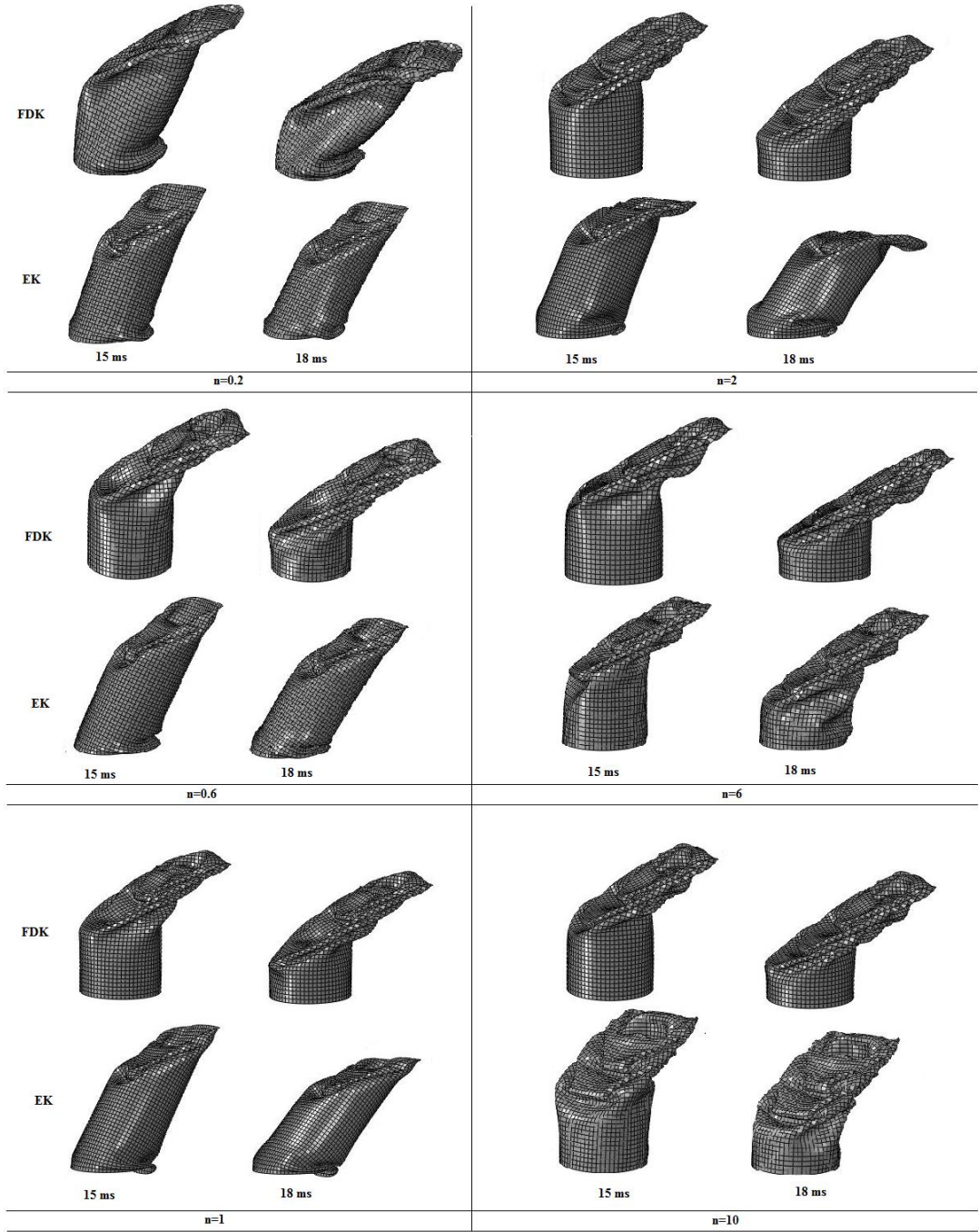
Şekil 5.16. Yükleme açıları (a) $\theta=10^\circ$, (b) $\theta=20^\circ$ ve (c) $\theta=30^\circ$ için değişen n değerlerinde ortalama çarpışma kuvveti değerleri



Şekil 5.17. Yükleme açısı 10° olan seçilmiş bazı fonksiyonel olarak derecelendirilmiş ve eşdeğer kalınlıklı tüplerin farklı n değerlerindeki deformasyon şekilleri



Şekil 5.18. Yükleme açısı 20° olan seçilmiş bazı fonksiyonel olarak derecelendirilmiş ve eşdeğer kalınlıklı tüplerin farklı n değerlerindeki deformasyon şekilleri



Şekil 5.19. Yükleme açısı 30° olan seçilmiş bazı fonksiyonel olarak derecelendirilmiş ve eşdeğer kalınlıklı tüplerin farklı n değerlerindeki deformasyon şekilleri

Şekil 5.17-19.'deki grafiklerde yükleme açıları 10° , 20° ve 30° olan 15 ve 18 ms zaman diliminde seçilmiş bazı n değerlerindeki FDK ve EK tüplerin deformasyon şekilleri gösterilmiştir. Şekillerden de görüldüğü gibi 10° yükleme açısına sahip ince cidarlı tüpler diğer yükleme açlarına sahip tüplere göre aynı çarpışma süresi içerisinde daha fazla katlanarak daha fazla enerji sönmlemektedirler. Şekillerden de görülmektedir ki, yükleme açısı arttığında ince cidarlı tüplerin çarpışma enerji sönm performansları azalmaktadır. Şekil 5.17-19'da görülebileceği gibi FDK tüpler EK tüplere göre daha kararlı bir deformasyon davranışı sergiledikleri ve bu nedenle daha fazla çarpışma enerjisi sönmleyebildikleri görülmektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada eksenel ve eğik darbe yüklemeleri altında fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kalınlıklı ve eşdeğer kalınlıklı ince cidarlı silindirik tüplerin çarpışma performansları incelenmiştir. Bu amaçla, kalınlık değişim fonksiyonu kullanılarak tüplerin eksenel yönünde tüplerde farklı kalınlık modelleri oluşturulmuştur ve tüpler sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak sabit bir duvara çarpıtılmıştır. Tasarım değişkenleri olarak farklı L/D oranları ve n değerleri seçilmiştir. İnce cidarlı enerji sönümleyicilerin çarpışma performanslarını değerlendirmek için tüplerin sönümledikleri enerji miktarları, maksimum çarpışma kuvvetleri, ortalama çarpışma kuvvetleri, özgül enerji sönümü miktarları, çarpışma kuvveti verimleri ve deformasyon şekilleri parametreleri göz önünde bulundurulmuştur. Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kalınlıklı tüplerin verimliliğini gösterebilmek için bu tüplerin çarpışma performansları aynı ağırlıktaki eşdeğer kalınlıklı tüplerin çarpışma performansları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, eksenel darbe yüklemesi altında enerji sönümlemek için FDK tüplerin kullanılmasının avantajlı olduğunu göstermiştir. Bu çalışmadan çıkarılabilecek temel sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Enerji sönümleme kabiliyeti maksimum çarpışma kuvveti ile ters, et kalınlığı ile doğru orantılıdır.
- FDK tüpler aynı hacim ve ağırlıkta olan EK tüpler ile karşılaştırıldığında genel olarak daha üstün çarpışma performansı sergilemektedirler. FDK tüpler tüp boyunca çeşitli dayanımına sahiptir ve bu yüzden EK tüplerle karşılaştırıldığında çarpışma parametrelerini daha etkili bir şekilde kontrol edebilirler. Ayrıca FDK tüpler daha verimli bir şekilde malzeme kullanım olanağı sağlarlar.
- FDK tüplerin numuneleri genelde karma deformasyon şekillerine sahiptirler. Fakat EK tüplerle kıyaslandığında daha fazla eksenel simetrik dilimlere sahiptirler. Bu nedenle, FDK tüpler EK tüplere kıyasla daha iyi enerji sönümleme kapasitesine sahiptirler.
- Daha geniş kalınlık aralığında olan FDK tüpler çarpışma performans parametrelerini daha verimli hale getirmede EK tüplerden daha etkilidirler.

- Simulasyon sonuçları fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kalınlıklı tüplerin çarpışma davranışlarını önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Uygun kalınlık ve n değeri seçildiğinde tüplerin maksimum çarpışma kuvvetleri önemli ölçüde azalmakta, özgül enerji sönümü miktarı ve çarpışma kuvveti verimi değerleri artmaktadır.
- Eğik yükleme sonuçlarına bakıldığında yükleme açısı arttıkça hem FDK hem EK tüplerin çarpışma performansları azalmaktadır.
- Eğik yükleme altında FDK tüpler EK tüplere göre genel olarak daha üstün çarpışma davranışlarına sahiptirler.
- 10° eğik yükleme açısına sahip FDK tüpler diğer eğik yükleme açılarında sahip FDK tüplerle kıyaslandığında aynı çarpışma süresi içinde daha fazla katlandığından daha fazla enerji sönümleyebilmektedirler.
- FDK tüplerin çarpışma performanslarını L/D oranları da etkilemektedir. L/D oranları için çarpışma parametreleri aynı ölçüde değişim göstermektedir. Özellikle $0,1 \leq n \leq 1$ aralığında n değerine sahip olan FDK tüplerin çarpışma performanslarını artırmaktadır.

İleriki çalışmalarda bu tez çalışmasından farklı olarak fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kalınlıklı tüpler iki yada daha fazla bölümlere ayrılarak çarpışma davranışları incelenebilir. Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kalınlıklı ince cidarlı tüplerin içerisine alüminyum ya da farklı malzemeden yapılmış köpükler doldurularak çarpışma performansları incelenebilir. Ek olarak aynı parametreler farklı malzemeler için de kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- Abramowicz, W., Jones, N., 1984. Dynamic axial crushing of circular tubes. *International Journal of Impact Engineering*, 2, 263-281.
- Abramowicz, W., Jones, N., 1986. Dynamic progressive buckling of circular and square tubes. *International Journal of Impact Engineering*, 4, 243-269.
- Abramowicz, W., 2003. Thin-walled structures as impact energy absorbers. *Thin-Walled Structures*, 41, 91-107.
- Alexander, J.M., 1960. An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading. *Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, 13, 10-15.
- Al Galib, D., Limam, A., 2004. Experimental and numerical investigation of static and dynamic axial crushing of circular aluminum tubes. *Thin-Walled Structures*, 42, 1103-1137.
- Alavi Nia, A., Parsapour, M., 2014. Comparative analysis of energy absorption capacity of simple and multi-cell thin-walled tubes with triangular, square, hexagonal and octagonal sections. *Thin-Walled Structures*, 74, 155-165.
- Alavinia, A., Hamedani, J.H., 2010. Comparative analysis of energy absorption and deformations of thin walled tubes with various section geometries. *Thin-Walled Structures*, 48(12), 946-954.
- Alghamdi, A.A.A., 2001. Collapsible impact energy absorbers: an overview. *Thin-Walled Structures*, 39, 189-213.
- Andrews, R.F., England, G.L., Ghani, E., 1983. Classification of the axial collapse of cylindrical tubes under quasi-static loading. *International Journal of Mechanical Science*, 25, 687-696.
- Arnold, B., Altenhof, W., 2004. Experimental observations on the crush characteristics of AA6061 T4 and T6 structural square tubes with and without circular discontinuities. *International Journal of Crashworthiness*, 9(1), 73-87.
- Baykasoğlu, C., Sünbuloğlu, E., Bozdağ, S.E., Aruk, F., Toprak, T. and Mugan, A., 2011. Railroad passenger car collision analysis and modifications for improved crashworthiness. *International Journal of Crashworthiness*, 16(3), 319-329.
- Chai, H., 2008. Lateral confinement as a means for enhancing load bearing and energy absorption in axially compressed tubes. *Thin-Walled Structures*, 46(1), 54-64.

- Chu, G., Liu, G., Yuan, S., Liu, W., 2011. Characteristics of thickness distribution of tailor welded tube hydroforming. *Journal of Central South University of Technology*, 18, 1813–1818.
- Elgalai, A.M., Mahdi, E., Hamouda, A.M.S., Sahari, B.S., 2004. Crushing Response of Composite Corrugated Tubes to Quasi-static Axial Loading. *Composite Structures*, 66, 665-671.
- Fan, Z., Lu, G., Liu, K., 2013. Quasi-static axial compression of thin-walled tubes with different cross-sectional shapes. *Engineering Structures*, 55, 80-89.
- Gedikli, H., 2013. Numerical investigation of axial crushing behavior of a tailor welded tube. *Materials and Design*, 44, 587-595.
- Ghamarian, A., Tahaye Abadi, M., 2011. Axial crushing analysis of end-capped circular tubes. *Thin-Walled Structures*, 49, 743-752.
- Ghamarian, A., Zarei, H., 2012. Crasworthiness investigation of conical and cylindrical end-capped tubes under quasi-static crash loading. *International Journal of Crashworthiness*, 17, 19-28.
- Grzebieta R.H., 1990. On the equilibrium approach for predicting the crush response of thin-walled mild steel tubes. *Doktora Tezi*. Department of Civil Engineering, Monash University.
- Grzebieta, R.H., 1990. An alternative method for determining the behaviour of round stock tubes subjected to axial crush loads. *Thin-Walled Structures*, 9, 66–89.
- Grzebieta, R.H., 1996. Research into failure mechanisms of some thin-walled round tubes. In: Gupta NK, editor. *Plasticity and Impact Mechanics—Proceedings of IMPLAST96*. New Delhi: New Age International Publishers, 309–324.
- Guillow, S.R., Lu, G., Grzebieta, R.H., 2001. Quasi-static axial compression of thin-walled circular aluminum tubes. *International Journal of Mechanical Sciences*, 43, 2103-2123.
- Gupta, N.K., Gupta, S.K., 1993. Effect of annealing, size and cut outs on axial collapse behaviour of circular tubes. *International Journal of Mechanical Sciences*, 35, 597–613.
- Gupta, N.K., Easwara Prasad, G.L., Gupta, S.K., 1997. Plastic collapse of metallic conical frusta of large semi-apical angles. *International Journal of Crashworthiness*, 2, 349-366.

- Gupta, N., Venkatesh. K., 2006. A study of the influence of diameter and wall thickness of cylindrical tubes on their axial collapse. *Thin-Walled Structures*, 44(3), 290-300.
- Güler, M.A., Cerit, M.E., Bayram, B., Gerçeker, B., Karakaya, E., 2010. The effect of geometrical parameters on the energy absorption characteristics of thin-walled structures under axial impact loading. *International Journal of Crashworthiness*, 15, 377-390.
- Hanssen, A.G., Langseth, M., Hopperstad, O.S., 1999. Static and dynamic crushing of circular aluminium extrusions with aluminium foam filler. *International Journal of Impact Engineering*, 24(2000), 475-507.
- Hariharan, K., Kalaivani, K., Balachandran, G., 2012. Foil optimization in tailor welded blank of an automotive floor component. *Materials and Manufacturing Process*, 27, 936-942.
- Hong, W., Jin, F., Zhou, J., Xia, Z., Xu, Y., Yang, L., Zheng, Q., 2013. Quasi-static axial compression of triangular steel tubes. *Thin-Walled Structures*, 62, 10-17.
- Hosseini-pour, S. J., Daneshi, G.H., 2003. Energy absorption and mean crushing load of thin-walled grooved tubes under axial compression. *Thin-Walled Structures*, 41(1), 31-46.
- Hou, S., Li, Q., Long, S., Yang, X., Li, W., 2007. Design optimization of regular hexagonal thin-walled columns with crashworthiness criteria. *Finite Elements in Analysis and Design*, 43(6-7), 555-65.
- Hou, S., Li, Q., Long, S., Yang, X., Li W., 2008. Multiobjective Optimization of Multicell Sections for the Crashworthiness Design. *International Journal of Impact Engineering*, 35, 1355-1367.
- Hou, S., Han, X., Sun, G., Long, S., Li, W., Yang, X., Li, Q., 2011. Multiobjective optimization for tapered circular tubes. *Thin-Walled Structures*, 49, 855-863.
- Hsu, S.S., Jones, N., 2004. Quasi-static and dynamic axial crushing of thin-walled circular stainless steel, mild steel and aluminum alloy tubes. *International Journal of Crashworthiness*, 9(2), 195-217.
- Jandaghi Shahi, V., Marzbanrad, J., 2012. Analytical and experimental studies on quasi-static axial crush behavior of thin-walled tailor-made aluminum tubes. *Thin-Walled Structures*, 60, 24-37.
- Jones, N., 1989. *Structural impact*. Cambridge: Cambridge University Press.

- Karagiozova, D., Nurick, G.N., Chung Kim Yuen, S., 2005. Energy absorption of aluminium alloy circular and square tubes under an axial explosive load. *Thin-Walled Structures*, 43, 956-982.
- Karagiozova, D., Alves, M., 2008. Dynamic Elastic-Plastic Buckling of Structural Elements: A Review. *Applied Mechanics Reviews*, 61, 040803-1.
- Langseth, A.G., Hopperstad, O.S., Hanssen, A.G., 1998. Crash behavior of thin-walled aluminum members. *Thin-Walled Structures*, 32, 127-150.
- Langseth, M., Hopperstad, O.S., 1996. Static and Dynamic Axial Crushing of Square Thin-walled Aluminum Extrusions. *Journal of Impact Engineering*, 18, 949-968.
- Langseth, M., Hopperstad, O.S., Berstad, T., 1999. Crashworthiness of aluminium extrusions: validation of numerical simulation, effect of mass ratio and impact velocity. *International Journal of Impact Engineering*, 22, 829-854.
- Lee, S., Hahn, C., Rhee, M., Oh, J., 1999. Effect of Triggering on the Energy Absorption Capacity of Axially Compressed Aluminum Tubes. *Material Design*, 20, 31-40.
- Magee, C.L., Thornton, P.H., 1978. Design considerations in energy absorption by structural collapse. SAE Paper, 780434.
- Mamalis, A.G., Manolakos, D.E., Ioannidis, M.B., Kostazos, P.K., Hassiotis, G., 2001. Finite element simulation of the axial collapse of thin-wall square frusta. *International Journal of Crashworthiness*, 6(2), 155-164.
- Mamalis, A.G., Manolakos, D. E., Ioannidis, M. B., Chronopoulos, D. G., Kostazos, P. K., 2009. On the crashworthiness of composite rectangular thin-walled tubes internally reinforced with aluminium or polymeric foams: Experimental and numerical simulation. *Composite Structures*, 89, 416-423.
- Marsolek, J., Reimerdes, H.G., 2004. Energy absorption of metallic cylindrical shells with induced non-axisymmetric folding patterns. *International Journal of Impact Engineering*, 30, 1209-1223.
- Marzbanrad, J., Ebrahimi, M.R., 2011. Multi-objective optimization of aluminum hollow tubes for vehicle crash energy absorption using a genetic algorithm and neural networks. *Thin-Walled Structures*, 49, 1605-1615.
- Marzbanrad, J., Mehdikhanlo, M., Saeedi pour, A., 2009. An energy absorption comparison of square, circular, and elliptic steel and aluminum tubes under impact loading. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Science*, 33, 159-166.

- Meran, A., Baykasoglu, C., Mugan, A., Toprak, T., 2014. Development of crash energy management design for a railway passenger car. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit (in press, online available), DOI: 10.1177/0954409714533321.
- Meyer, A., Wietbrock, B., Hirt, G., 2008. Increasing of the drawing depth using tailor rolled blanks—Numerical and experimental analysis. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 48, 522–531.
- Mirfendereski, L., Salimi, M., Ziaei-Rad, S., 2008. Parametric Study and Numerical Analysis of Empty and Foam-filled Thin-walled Tubes Under Static and Dynamic Loadings. *International Journal of Mechanical Sciences*, 50, 1042-1057.
- Nagel, G.M., Thambiratnam, D.P., 2006. Dynamic simulation and energy absorption of tapered thin-walled tubes under oblique impact loading. *International Journal of Impact Engineering*, 32, 1595-1620.
- Pan, F., Zhu, P., Zhang, Y., 2010. Metamodel-based lightweight design of B-pillar with TWB structure via support vector regression . *Computers and Structures*, 88, 36–44.
- Pugsley, A.G., Macaulay, M., 1960. The large scale crumpling of thin cylindrical columns. *Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, 13,1-9.
- Qi, C., Yang, S., Dong, F., 2012. Crushing analysis and multiobjective crashworthiness optimization of tapered square tubes under oblique impact loading. *Thin-Walled Structures*, 59, 103-119.
- Reid, S.R., Reddy, T.Y., 1986. Static and dynamic crushing of tapered sheet metal tubes of rectangular cross-section. *International Journal of Mechanical Sciences*, 28, 23-37.
- Salehghaffari, S., Tajdari, M., Panahi, M., Mokhtarnezhad, F., 2010. Attempts to improve energy absorption characteristics of circular metal tubes subjected to axial loading. *Thin-Walled Structures*, 48, 379-390.
- Shakeri, M., Mirzaeifar, R., Salehghaffari, S., 2007. New insights into the collapsing of cylindrical thin-walled tubes under axial impact load. *Proceeding of International Mechanical Engineering, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 221, 1–17.
- Simhachalam, B., Srinivas, K., Rao, L., 2014. Energy absorption characteristics of aluminium alloy AA7XXX and AA6061 tubes subjected to static and dynamic axial load. *International Journal of Crashworthiness*, 19(2), 139-152.

- Singace, A.A., Elsobky, H., Reddy, T.Y., 1995. On the eccentricity factor in the progressive crushing of tubes. *International Journal of Solids and Structures*, 32, 3589–3602.
- Singace, A.A., Elsobky, H., 1996. Further experimental investigation on the eccentricity factor in the progressive crushing of tubes. *International Journal of Solids and Structures*, 33, 3517–3538.
- Singace, A. A., 1999. Axial crushing analysis of the tubes deforming in the multi-lobe mode. *International Journal of Mechanical Science*, 41, 868-890.
- Song, J., Chen, Y., Lu, G. X., 2012. Axial crushing of thin-walled structures with origami patterns. *Thin-Walled Structures*, 54, 65-71.
- Song, J., Guo, F., 2013. A comparative study on the windowed and multi-cell square tubes under axial and oblique loading. *Thin-Walled Structures*, 66, 9-14.
- Song, J., Zhou, Y., Guo, F., 2013. A relationship between progressive collapse and initial buckling for tubular structures under axial loading. *International Journal of Mechanical Sciences*, 75, 200-211.
- Sun, G., Xu, F., Li, G., Li, Q., 2014. Crashing analysis and multiobjective optimization for thin-walled structures with functionally graded thickness. *International Journal of Impact Engineering*, 64, 62-74.
- Wierzbicki, T., Bhat, S.U., Abramowicz, W., Brodtkin, D., 1992. Alexander revisited—a two folding element model of progressive crushing of tubes. *International Journal of Solids and Structures*, 29, 3269–3288.
- Xu, F., Sun, G., Li, G., Li, Q., 2013. Crashworthiness design of multi-components tailor-welded blank (TWB) structures. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 48, 653-657.
- Xu, F., Sun, G., Li, G., Li, Q., 2014. Experimental study on crashworthiness of tailor-welded blank (TWB) thin-walled high-strength steel (HSS) tubular structures. *Thin-Walled Structures*, 74, 12-27.
- Yang, R.J., Fu, Y., Li, G., 2007. Application of tailor rolled blank in vehicle front end for frontal impact SAE Technical Papers, 01-0675.
- Zarei, H.R., Kroger, M., 2006. Multiobjective crashworthiness optimization of circular aluminum tubes. *Thin-Walled Structures*, 44, 301-308.
- Zhang, L., Feng G., Fa-rong D., 2006. Experimental and numerical investigation of axial crushing of dissimilar thickness tailor-welded tube. *Journal of Plasticity Engineering*, 13(4), 7–11.

Zhang, X., Zhang, H., 2012. Experimental and numerical investigation on crush resistance of polygonal and angle elements. *Thin-Walled Structures*, 57, 25-36.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : TUNAY ÇETİN, Merve
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 04.07.1989 - Tire
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (507) 536 65 22
 e-mail : mertunaycetin@hitit.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Trakya Üniversitesi / Makine Müh. Bölümü	2012
Lise	Tire Kutsan Anadolu Lisesi	2007

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2013-	Hitit Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2012-2013	ISD LTD. ŞTİ. (4 ay)	Makine Mühendisi
2011-2011	Karan Isı (4 ay)	Makine Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Baykasoglu, C., Tunay Çetin, M., 2015 Energy absorption of circular aluminum tubes with functionally graded thickness under axial impact loading. International Journal of Crashworthiness, 20(1), 95-106.

Baykasoglu, C., Tunay Çetin M., Yalcin O., 2014. Crashworthiness investigation of metallic thin-walled tubes under axial impact loading. The First International Symposium on Industrial Design Engineering, (ISIDE14), May 8-9, Karabük, Türkiye, 71-75.

Çetin, E. , Kurşun, A. , Aksoy, Ş., Tunay Çetin, M., 2014. Elastic Stress Analysis of Annular Bi-Material Discs with Variable Thickness under Mechanical and Thermomechanical Loads. World Academy of Science, Engineering and Technology, International Science Index 86, International Journal of

Mechanical, Industrial Science and Engineering, 8(2), 49 - 53.

Kurşun, A. , Tunay Çetin, M., Çetin, E. , Aykul, H., 2014. Elastic Stress Analysis of Composite Cantilever Beam Loaded Uniformly. World Academy of Science, Engineering and Technology, International Science Index 86, International Journal of Mechanical, Industrial Science and Engineering, 8(2), 38 - 40.