ELEKTİRİKLİ ARAÇLARA YÖNELİK YENİ NESİL GÜVENLİK KOMPONENTLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Mustafa CEYHAN

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTİRİKLİ ARAÇLARA YÖNELİK YENİ NESİL GÜVENLİK KOMPONENTLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Mustafa CEYHAN
502225034
0000-0001-5215-0383

Doç. Dr. Betül Sultan YILDIZ
(Danışman)
0000-0002-7493-2068

YÜKSEK LİSANS
TAŞIT TASARIM ANABİLİM DALI

BURSA – 2024
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans

ELEKTİRİKLİ ARAÇLARA YÖNELİK YENİ NESİL GÜVENLİK KOMPONENTLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Mustafa CEYHAN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Taşıt Tasarım Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Betül Sultan YILDIZ

Karayolu taşımacılığı 20. yüzyılın en çok kullanılan ulaşım ve taşıma şeklidir. Günümüzde artan ulaşım ve taşımacılık ihtiyacı trafikte araç sayısının büyük ölçülerde artmasına sebep olmuştur. Bu doğrultuda otomotiv üreticileri taşıtların daha güvenli hale gelmesi, çevreye olan zararlarının azalması ve konforlarının daha üst seviyelere çıkması adına yeni tasarım ve üretim yöntemleri geliştirmek için çalışmalarına devam etmektedir.

Yapılan bu tez çalışmasında taşıt güvenlik sistemleri kapsamında incelenen enerji sönümleyiciler üzerine çalışılmıştır. Yenilikçi enerji sönümleyici tasarımları olan çok hücreli enerji sönümleyiciler kesit alanının enerji sönümleme performansına etkileri açısından incelenmiştir.

Tez çalışması kapsamında daire, kare, altıgen ve sekizgen dış kesitli olmak üzere dört grup enerji sönümleyici farklı iç ve dış duvar varyasyonları ile tasarlanmıştır. Ardından tasarlanan enerji sönümleyiciler nümerik olarak analiz edilmiştir. Yapılan nümerik analizlerin sonuçları literatürde yer alan bir yayında bulunan test sonuçları ile doğrulanmıştır.

Çalışma sonucunda daire, kare, altıgen ve sekizgen kesitlerin enerji sönümleme parametrelerine etkileri konusunda bulgulara yer verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çarpışma dayanıklılığı, Çok hücreli tüpler, Karmaşık oransal değerlendirme, Çok amaçlı optimizasyon, İnce cidarlı yapılar, Enerji sönümleme
2024, x + 70 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

DEVELOPMENT OF NEXT GENERATION SAFETY COMPONENTS FOR ELECTRIC VEHICLES

Mustafa CEYHAN

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Vehicle Design

Supervisor: Assoc.Prof.Dr. Betul Sultan YILDIZ

Road transport is the most used mode of transportation and logistics of the 20th century. Today, the increasing need for transportation and logistics has led to a large increase in the number of vehicles in traffic. In this direction, automotive manufacturers continue to work to develop new design and production methods in order to make vehicles safer, reduce their damage to the environment and increase their comfort.

In this thesis study, energy absorbers examined within the scope of vehicle safety systems were studied. Multi-cell energy absorbers, which are innovative energy absorber designs, are investigated in terms of the effects of cross-sectional area on energy dissipation performance.

Within the scope of the thesis, four groups of energy absorbers with circular, square, hexagonal and octagonal outer sections were designed with different interior and exterior wall variations. Then the designed energy absorbers were analyzed numerically. The results of the numerical analyzes were confirmed by the test results in a publication in the literature.

As a result of the study, findings on the effects of circle, square, hexagonal and octagonal sections on energy dissipation parameters are given.

Key words: Crashworthiness, Multi-cell tube, Complex proportinal assessment, Multiobjective optimization, Thin walled structures, Energy absorption,
2024, x + 70 pages.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam kapsamında bilgi ve tecrübesi ile her zaman yol gösterici ve yardımcı olan tez danışmanım Doç. Dr. Betül S. YILDIZ'a, manevi olarak beni her zaman destekleyen değerli ailem ve arkadaşlarıma teşekkürü borç bilirim.

Mustafa CEYHAN
28/06/2024

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET……ii
ABSTRACT……iii
ÖNSÖZ ve/veya TEŞEKKÜR iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ vii
ŞEKİLLER DİZİNİ..... viii
ÇİZELGELER DİZİNİ x
1.GİRİŞ……..viii
1.1. Aktif Güvenlik Sistemleri 2
1.1.1. Kitlenme önleyici sistem (ABS) 2
1.1.2. Elektronik denge programı (ESC)..... 2
1.1.3. Uyarlanabilir seyir kontrol sistemi (ACC)..... 2
1.1.4. Lastik basınç kontrolü sistemi (TPMS) 3
1.1.5. Şerit takip sistemi (LDW) 3
1.1.6. Gece görüş sistemi (NVS)..... 3
1.1.7. Kör nokta algılayıcı (BSD) 3
1.1.8. Sürücü izleme sistemi (DM) 3
1.2. Pasif Güvenlik Sistemleri..... 4
1.2.1. Hava yastıkları 4
1.2.2. Emniyet kemeri 4
1.2.3. Yolcu algılama sistemi..... 5
1.2.4. Boyun koruma sistemi 5
1.2.5. Çocuk güvenlik sistemleri..... 5
1.2.6. Yaya güvenlik sistemleri..... 5
1.2.7. Enerji sönümleyici sistemler..... 6
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI 6
2.1. Kuramsal Temeller..... 6
2.1.1. Sönümlenen enerji miktarı 8
2.1.2. Özgül enerji emilimi 8
2.1.3. Ortalama ezilme kuvveti 9
2.1.4. Maksimum ezilme kuvveti..... 9
2.1.5. Ezilme kuvveti verimliliği 10
3. MATERYAL ve YÖNTEM..... 28
3.1. Çalışmada Kullanılan Enerji Sönümleyici Modelleri 28
3.1.1. Dış duvarı daire kesit geometrili modeller..... 28
3.1.2. Dış duvarı kare kesit geometrili modeller..... 30
3.1.3. Dış duvarı altıgen kesit geometrili modeller..... 34
3.1.4. Dış duvarı sekizgen kesit geometrili modeller..... 37
3.2. Analiz Modelinin Hazırlanması 40
3.2.1. Ağ yapısının oluşturulması 40
3.2.2. Kabuk eleman özelliklerinin tanımlanması..... 40
3.2.3. Analiz modeli malzeme tanımlaması..... 42
3.2.4. Rijit duvar ve analiz sınır şartlarının tanımlanması 44
3.3. Analiz Doğrulama Çalışması 49
4. BULGULAR..... 52

4.1. Dış Duvarı Daire Kesitli Modellerin Analiz Sonuçları 52
4.2. Dış Duvarı Kare Kesitli Modellerin Analiz Sonuçları 54
4.3. Dış Duvarı Altıgen Kesitli Modellerin Analiz Sonuçları 57
4.4. Dış Duvarı Sekizgen Kesitli Modellerin Analiz Sonuçları 59
4.5. Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması 62
5. SONUÇ 63
KAYNAKLAR 65
ÖZGEÇMİŞ 70

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar	Açıklama
ABS	Kitlenme önleyici sistem
ESC	Elektronik denge programı
ACC	Uyarlanabilir seyir kontrol sistemi
TPMS	Lastik basınç kontrolü sistemi
LDW	Şerit takip sistemi
NVS	Gece görüş sistemi
BSD	Kör nokta algılayıcı
DM	Sürücü izleme sistemi
AEB	Otomatik acil durum frenleme sistemi
SEM	Sönümlenen enerji miktarı
ÖEE	Özgül enerji emilimi
OEK	Ortalama ezilme kuvveti
MEK	Maksimum ezilme kuvveti
EKV	Ezilme kuvveti verimliliği

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1.	Araç üzerinde enerji sönümleyicilerin konumları……..	7
Şekil 2.2.	Örnek bir kuvvet-deplasman grafiği üzerinde enerji sönümleyici performans parametrelerinin gösterimi (Tarlochan, Samer, Hamouda, Ramesh ve Khalid, 2013)……	10
Şekil 2.3.	Köpük dolgu yoğunluğunun MEK üzerindeki etkileri (Ahmad ve Thambiratnam, 2009)……	11
Şekil 2.4.	Parça kalınlığı, iç açı ve duvar kalınlığının maksimum çarpışma kuvveti üzerindeki etkileri gösterilmiştir (Meran,2016)…….....	12
Şekil 2.5.	Yüzey deformasyonlu ve yüzey deformasyonsuz model (Taghipoor ve diğerleri, 2020)…….	13
Şekil 2.6.	İç duvarı olan ve olmayan altıgen tüplerin maksimum çarpışma kuvveti eğrileri (Xu ve diğerleri, 2018)……	14
Şekil 2.7.	Tetikleme mekanizmalarının kuvvet-deplasman grafiği üzerindeki etkileri (El-Hage ve diğerleri, 2005).....	15
Şekil 2.8.	Delik çapının enerji absorbe parametresine etkileri (Arnold ve Altenhof, 2004).....	17
Şekil 2.9.	Köşe sayısının kırılma mukavemetine etkileri (Yamashita ve diğerleri, 2003)....…….....	18
Şekil 2.10.	Origami desene sahip enerji sönümleyici model örnekleri (Yang ve diğerleri, 2018)	19
Şekil 2.11.	İç duvar uzunluğunun çarpışma kuvvetine etkisi.....	20
Şekil 2.12.	Çok sıralı ve çok hücreli enerji sönümleyici modelleri (Li ve diğerleri, 2021) ……..	21
Şekil 2.13.	Tasarlanan enerji sönümleyici modelleri ve tasarım parametreleri (Li ve diğerleri, 2021)…….	23
Şekil 2.14.	Tek hücreli kare enerji sönümleyici modeli ve optimize edilmiş çok hücreli enerji sönümleyici modeli ezilme kuvveti-deplasman grafiği karşılaştırması (Kim, 2002)...	24
Şekil 2.15.	Köpük dolgulu çok hücreli enerji sönümleyici konfigürasyonları (Sun ve diğerleri, 2018)……...	24
Şekil 2.16.	Köpük yoğunluğunun ortalama ezilme kuvveti üzerindeki etkisi (Sun ve diğerleri, 2018)…….	25
Şekil 2.17.	Elips kesitli enerji sönümleyici modelinin deneysel ve sonlu elemanlar analizlerindeki ezilme şekilleri (Gao ve diğerleri, 2016)…….....	26
Şekil 2.18.	C4 tüplerinin farklı açılı yüklemeler altında ezilme davranışları (Albak, 2021)……	25
Şekil 3.1.	C1 modeli kesit görüntüsü ……..	28
Şekil 3.2.	C2 modeli kesit görüntüsü ……..	28
Şekil 3.3.	C3 modeli kesit görüntüsü ……..	29
Şekil 3.4.	C4 modeli kesit görüntüsü ……..	29
Şekil 3.5.	C5 modeli kesit görüntüsü ……..	30

Şekil 3.6.	C6 modeli kesit görüntüsü ……..	30
Şekil 3.7.	S1 modeli kesit görüntüsü ……..	31
Şekil 3.8.	S2 modeli kesit görüntüsü ……..	31
Şekil 3.9.	S3 modeli kesit görüntüsü ……..	32
Şekil 3.10.	S4 modeli kesit görüntüsü ……..	32
Şekil 3.11.	S5 modeli kesit görüntüsü ……..	33
Şekil 3.12.	S6 modeli kesit görüntüsü ……..	33
Şekil 3.13.	H1 modeli kesit görüntüsü ……..	34
Şekil 3.14.	H2 modeli kesit görüntüsü ……..	34
Şekil 3.15.	H3 modeli kesit görüntüsü ……..	35
Şekil 3.16.	H4 modeli kesit görüntüsü ……..	35
Şekil 3.17.	H5 modeli kesit görüntüsü ……..	36
Şekil 3.18.	H6 modeli kesit görüntüsü ……..	36
Şekil 3.19.	O1 modeli kesit görüntüsü ……..	37
Şekil 3.20.	O2 modeli kesit görüntüsü ……..	37
Şekil 3.21.	O3 modeli kesit görüntüsü ……..	38
Şekil 3.22.	O4 modeli kesit görüntüsü ……..	38
Şekil 3.23.	O5 modeli kesit görüntüsü ……..	39
Şekil 3.24.	O6 modeli kesit görüntüsü ……..	39
Şekil 3.25.	H4 modeli ağ yapısı…….	40
Şekil 3.26.	Radioss eleman özellikleri sekmesi…….	41
Şekil 3.27.	Al 6063-T5 Gerilme-Gerinim grafiği (Wu ve diğerleri, 2016)……	43
Şekil 3.28.	Radioss yazılımı malzeme sekmesi…….	42
Şekil 3.29.	Enerji sönümleyici modellerin hareketleri kısıtlanan noktaları……...	44
Şekil 3.30.	Rijit duvar ve enerji yutucu modeller……..	45
Şekil 3.31.	Radioss Rigid Wall sekmesi……	46
Şekil 3.32.	Radioss Interfaces sekmesi……..	47
Şekil 3.33.	Doğrulama çalışması Çarpışma Kuvveti - Deplasman Grafiği……..	49
Şekil 3.34.	Burkulma şekillerinin test ve analiz sonuçlarının karşılaştırması (Wu ve diğerleri, 2016)……	50
Şekil 4.1.	Dış duvarı daire kesitli enerji sönümleyicilerin Çarpışma Kuvveti -Deplasman grafiği…….	53
Şekil 4.2.	C6 modelinin burkulma şekilleri……	54
Şekil 4.3.	Dış duvarı kare kesitli enerji sönümleyiciler Kuvvet-Deplasman grafiği ……...	55
Şekil 4.4.	S6 modelinin burkulma şekilleri……..	54
Şekil 4.5.	Dış duvarı altıgen kesitli enerji sönümleyiciler Kuvvet-Deplasman grafiği……...	56
Şekil 4.6.	H6 modelinin burkulma şekilleri…….	57
Şekil 4.7.	Dış duvarı sekizgen kesitli enerji sönümleyicilerin Kuvvet-Deplasman grafiği……...	58
Şekil 4.8.	O6 modelinin burkulma şekilleri…….	60
Şekil 4.9.	C6-S6-H6-O6 grafikleri Kuvvet-Deplasman grafiği……	61

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge	3.1.	Al6063-T5 malzeme özellikleri (Wu ve diğerleri, 2016)	42
Çizelge	3.2.	Doğrulama çalışması ve fiziksel test karşılaştırması……	48
Çizelge	4.1.	Dış duvarı daire kesitli modellerin enerji sönümleme performansı parametreleri……	52
Çizelge	4.2.	Dış duvarı kare kesitli modellerin enerji sönümleme performansı parametreleri……	54
Çizelge	4.3.	Dış duvarı altıgen kesitli modellerin enerji sönümleme performansı parametreleri……	57
Çizelge	4.4	Dış duvarı sekizgen kesitli modellerin enerji sönümleme performansı parametreleri……	59
Çizelge	4.5	C6-S6-H6-O6 modellerinin enerji sönümleme performansı parametreleri……	61

1. GİRİŞ

Karayolu taşımacılığı 20. yüzyılın en çok kullanılan ulaşım ve taşıma şeklidir. Günümüzde artan ulaşım ve taşımacılık ihtiyacı trafikte araç sayısının büyük ölçülerde artmasına sebep olmuştur. Bu doğrultuda otomotiv üreticileri taşıtların daha güvenli hale gelmesi, çevreye olan zararlarının azalması ve konforlarının daha üst seviyelere çıkması adına yeni tasarım ve üretim yöntemleri geliştirmek için çalışmalarına devam etmektedir.(Demirci ve Yıldız, 2015)

Artan taşıt sayısı trafikte meydana gelen kazalarında yüksek sayılara ulaşmasına sebep olmuştur. Türkiye İstatistik Kurumu (TUİK) ve Emniyet Genel Müdürlüğü (EGM) verilerine göre 2019 yılında Türkiye'de 1 168 144 adet trafik kazası meydana gelmiş olup bu kazalar 5 473 kişinin ölmesine ve 283 234 kişinin yaralanmasına sebep olmuştur (TÜİK, 2014). Trafik kazalarında meydana gelen sağlık problemlerini ve maddi kayıpları en aza indirmek adına taşıt güvenlik sistemleri taşıt tasarımındaki en önemli parametre haline gelmiştir.

Taşıt güvenliğinin gerekli standartları taşıması adına Birleşmiş Milletler Avrupa Birliği Komisyonu (ECE, Economic Commission for Europe) tarafından belirlenen standartlar günümüzde otomotiv üreticileri tarafından kullanılmaktadır. Bu standartları karşılayabilmek ve güvenli araçlar üretebilmek adına otomotiv üreticileri ve akademisyenler yoğun bir şekilde çalışmalarına devam etmektedirler. Hala devam eden bu çalışmalar neticesinde günümüzde kullanılan birçok güvenlik sistemi geliştirilmiştir.

Trafik kazası sayılarını mümkün olan en az seviyeye indirmek, kazanın kaçınılmaz olduğu anlarda ise sağlık problemlerini ve maddi hasarları minimumda tutmak üzere geliştirilen taşıt güvenlik sistemleri temel olarak aktif güvenlik sistemleri ve pasif güvenlik sistemleri başlıklarında toplanılabilir.

1.1. Aktif Güvenlik Sistemleri

Aktif güvenlik sistemleri kazanın oluşabileceği durumlarda kazanın meydana gelmemesi için araçlara entegre edilen güvenlik sistemleridir. Aktif güvenlik sistemlerine kitlenme önleyici sistem, elektronik denge programı, uyarlanabilir seyir kontrol sistemi, lastik basınç kontrolü sistemi, şerit takip sistemi, gece görüş sistemi, kör nokta algılayıcı, sürücü izleme sistemi, acil durum frenleme sistemi gibi sistemler örnek olarak verilebilir.

1.1.1. Kitlenme önleyici sistem (ABS)

ABS (Anti-lock Braking System), bir motorlu araçtaki tekerleklerin, fren yaparken sürücü girdilerine dayalı olarak yol yüzeyi ile çekiş temasını sürdürmesini sağlar. Bu, tekerleklerin kilitlenmesini (dönüşü durdurma) ve kontrolsüz kaymayı önler. Bu otomatik sistem, eşik frenleme ve tempolu frenleme prensipleri üzerinde çalışır. (Tota, Galvagno, Velardocchia ve Vigliani, 2018)

1.1.2. Elektronik denge programı (ESC)

ESC (Electronic Stability Control) aracın savrulduğunu tespit ettiği durumlarda savrulmayı azaltarak aracın dengesini iyileştirmeye yönelik çalışan bir sistemdir. Bu sistem aracın ani direksiyon hareketleri sonucunda savrulma tehlikesi yaşadığında sürücünün araç kontrolünü kaybetmemesini sağlayarak kazanın oluşumunu önlemeyi hedefler. (Rudin-Brown, Jenkins, Whitehead ve Burns, 2009)

1.1.3. Uyarlanabilir seyir kontrol sistemi (ACC)

ACC (Adaptive Cruise Control) yerleşik sensörlerden gelen bilgiler yardımı ile öndeki araçla güvenli bir mesafeyi korumak adına otomatik olarak yavaşlayan ve hızlanan akıllı bir hız sabitleyici biçimidir. (Moon, Moon ve Yi, 2009)

1.1.4. Lastik basınç kontrolü sistemi (TPMS)

TPMS (Tyre-Pressure Monitoring System) çeşitli araç tiplerinde pnömatik lastiklerin içindeki hava basıncını izlemek için tasarlanmış elektronik bir sistemdir. TPMS, bir gösterge, 2 piktogram ekranı veya basit bir düşük basınç uyarı ışığı aracılığıyla aracın sürücüsüne gerçek zamanlı lastik basıncı bilgilerini bildirir. (Velupillai ve Guvenc, 2008)

1.1.5. Şerit takip sistemi (LDW)

LDW (Lane Departure Warning), otoyollarda ve ana yollarda araç şeridinden çıkmaya başladığında sürücüyü uyarmak için tasarlanmış bir mekanizmadır. Bu sistemler, sürücü hatası, dikkat dağınıklığı ve uyuşukluk gibi çarpışma nedenlerini ele alarak kazaları en aza indirecek şekilde tasarlanmıştır. (Claudio Rosito Jung ve Kelber, 2004)

1.1.6. Gece görüş sistemi (NVS)

NVS (Night Vision System), kazaları önlemek için termo grafik kameralar, kızılötesi ışıklar, baş üstü ekranlar ve diğer teknolojileri kullanarak sürücünün algısını farların sınırlı erişiminin ötesine taşımayı amaçlayan bir sistemdir. (Ahire, 2014)

1.1.7. Kör nokta algılayıcı (BSD)

BSD (Blind Spot Detection), kör noktalar aracın dışında sürücünün göremediği alanlardır. Bunlara pencere direkleri, koltuk başlıkları, arka koltuktaki yolcular ve diğer nesneler neden olabilir. BSD sistemi, sürücü tarafında ve arkasında bulunan diğer araçları algılayan araç tabanlı bir sensör cihazıdır. (Sotelo ve Barriga, 2008)

1.1.8. Sürücü izleme sistemi (DM)

DM (Driver Monitoring), sürücünün dikkatini izlemek için kızılötesi sensörler kullanır. Spesifik olarak bir sürücü izleme sistemi, kızılötesi ışık yayan diyot detektörleri aracılığıyla göz takibi yapabilen direksiyon kolonuna yerleştirilmiş kapalı devre kamerası

içerir. Sürücü öndeki yola dikkat etmiyorsa ve çarpışma kaçınılmazsa, sistem sürücü için yanıp sönen ışıklar ve uyarı sesleri verir. (Dong, Hu, Uchimura ve Murayama, 2011)

1.1.9. Otomatik acil durum frenleme sistemi (AEB)

AEB (Automatic Emergency Braking) aracı yavaşlatır ve kaçınılmaz bir durumda çarpışma şiddetini potansiyel olarak azaltır. Sürücünün frenlemesi, bir çarpışmayı önlemek için yeterli değilse, otonom acil frenleme, hızı ve çarpışmanın etkisini azaltmak için maksimum fren basıncı uygular. (Coelingh, Eidehall ve Bengtsson, 2010)

1.2. Pasif Güvenlik Sistemleri

Pasif güvenlik sistemleri kazanın kaçınılmaz olduğu durumlarda kazanın insan sağlığına olan olumsuz etkilerini ve maddi kayıpları azaltmak amacı ile araçlara entegre edilen sistemlerdir. Pasif güvenlik sistemlerine hava yastıkları, emniyet kemerleri, yolcu algılama sistemi, boyun koruma sistemi, çocuk güvenlik sistemi, yaya güvenlik sistemi, enerji sönümleyiciler gibi sistemler örnek olarak verilebilir.

1.2.1. Hava yastıkları

Otomotiv hava yastıkları, bir çarpışma sırasında hızla şişecek şekilde tasarlanmış esnek kumaş çanta veya bir yastıktan oluşur. İşlevi, bir çarpışma sırasında direksiyon simidi veya cam gibi içerideki nesnelere çarptıklarında yolcuları yastıklamaktır. Modern araçlar, çarpışma sırasında maksimum koruma sağlayan yolcu oturma pozisyonlarının farklı yan ve ön konumlarında çoklu hava yastığı modüllerinden oluşur. (Lim, Park, Yun, Jeong ve Park, 2015)

1.2.2. Emniyet kemeri

Emniyet kemerleri, çarpışma, sarsılma veya ani frenleme nedeniyle oluşabilecek zararlı hareketlere karşı yolcuyu emniyete almak için bir aracın yolcu koltuğuna takılan güvenlik kemerleridir. (Shi ve Xu, 2018)

1.2.3. Yolcu algılama sistemi

Yolcu koltuğunda kimin oturduğunu algılayan bir sensör sistemidir. Yolcu algılama sistemleri, koltukta bir yetişkin mi yoksa bir çocuk mu olduğunu belirlemek için gelişmiş teknoloji kullandıklarından çoğu durumda hava yastıkları için açma/kapama anahtarına olan ihtiyacı ortadan kaldırır. Sensör grubu yolcu koltuğunun alt minderine monte edilmiştir ve yolcunun sınıflandırmasına göre yolcu hava yastığını bastırmak veya etkinleştirmek için kullanılır. (Rosique, Navarro, Fernández ve Padilla, 2019)

1.2.4. Boyun koruma sistemi

WHIPS donanımlı bir koltukta, arkalığın tamamı arkadan çarpma durumunda ön yolcunun boynunu korumak üzere tasarlanmıştır. WHIPS, belirli tipteki arkadan çarpmalar durumunda önceden belirlenmiş bir geriye doğru hareket oranına sahip olan, sırt dayanağını koltuk altına bağlayan özel olarak tasarlanmış bir menteşe yuvası kullanır. Koltuk arkalığında ayrıca, çarpma anında minderin hafifçe geriye doğru hareket etmesini sağlayan ve böylece gövdeyi koltuk içinde tutan bir dizi yay bulunur. (Jakobsson, Lundell, Norin ve Isaksson-Hellman, 2000)

1.2.5. Çocuk güvenlik sistemleri

Çocuk güvenlik sistemleri, çocukları çarpışmalar sırasında yaralanma veya ölümden koruyan özel olarak tasarlanmış koltuklardır. Genel olarak, bu koltuklar son kullanıcı gereksinimlerine göre kurulur. (Elliott, Kallan, Durbin ve Winston, 2006)

1.2.6. Yaya güvenlik sistemleri

Bu sistem, durumu algılayarak araçların yayalarla çarpışmasını engeller ve karar vermede yol gösterir. Gelişmiş araçların çoğunda bu sistem, yayalarla çarpışmayı önlemek için araç hızını otomatik olarak düşürür. (Brouwer, Kloeden ve Stiller, 2016)

1.2.7. Enerji sönümleyici sistemler

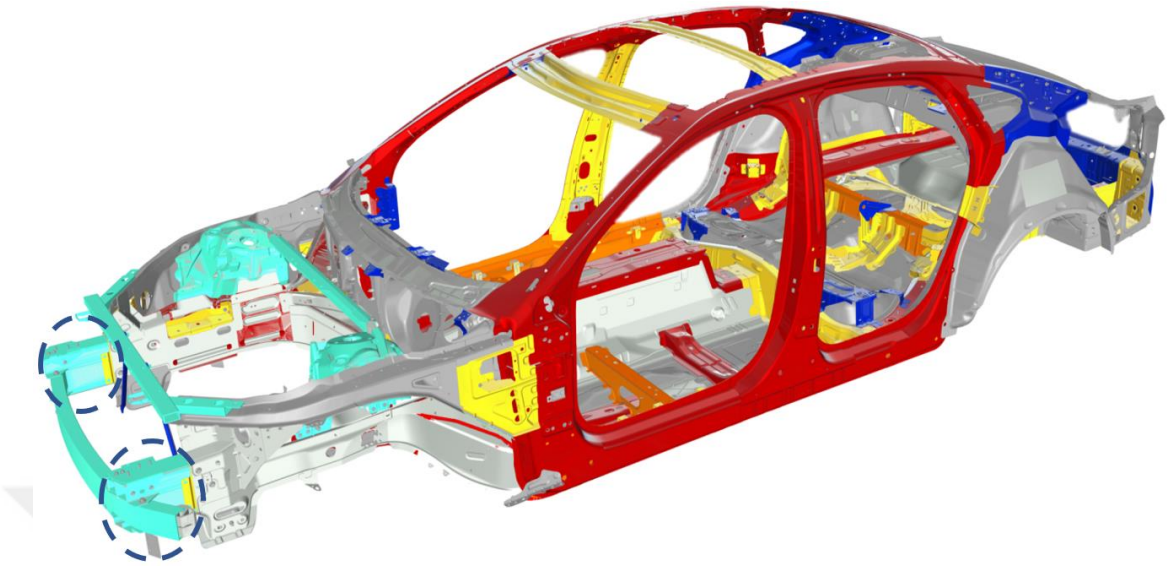
Enerji sönümleyici sistemler aracın ön bölgesinde tampon arkasına konumlandırılmış olup özellikle önden çarpışma sonucunda meydana gelen kazalarda ortaya çıkan çarpışma enerjisini sönümlemek, enerjinin sönümlenemeyen kısmını ise taşıt yük yollarına aktararak yolcu kabinine gelen çarpışma enerjisini minimum miktarda tutmaya çalışan sistemlerdir. Bu sistem yolcu kabinine gelen çarpışma enerjisini azaltarak taşıt ve yolcu güvenliğini arttırmayı hedefler. (Demirci ve Yıldız, 2015; Mohsenizadeh, Alipour, Shokri Rad, Farokhi Nejad ve Ahmad, 2015)

Bu çalışma kapsamında yeni nesil çok hücreli çarpışma kutularında kesit geometrisinin enerji sönümleme parametresi üzerindeki etkileri incelenecektir. Tasarımı yapılan farklı geometrilerdeki enerji sönümleyicilerin nümerik analizler yardımı ile enerji sönümleme kapasiteleri ve özgül enerji sönümleme değerleri hesaplanacak ve oluşturulan modeller arasında karşılaştırma yapılarak ağırlık ve enerji sönümleme özellikleri bakımından optimum enerji sönümleyici modelin elde edilmesi hedeflenmiştir. Daire, dikdörtgen, altıgen ve sekizgen kesitli toplam 47 adet enerji sönümleyici tasarlanmış olup bu modellerin sonlu elemanlar modeli oluşturulduktan sonra nümerik analiz programında önden çarpışma koşulu için test edilmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Kuramsal Temeller

Çarpışma sonrasında ortaya çıkan enerjinin kontrollü bir şekilde sönümlenmesi, eğer tamamı sönümlenemiyorsa sönümleme sonrası kalan enerjinin kontrollü bir şekilde taşıt tasarımcısının istediği yük yollarına dağılımının kontrol edilebilmesi kazadan sonra yolcuların güvende kalabilmesi için büyük önem arz eder. Aracın ön kısmında bulunan enerji sönümleyiciler kaza anında ortaya çıkan enerjiyi kalıcı olarak şekil değiştirerek (hasar görerek) sönümler bu sayede kazanın mümkün olan en az hasar ile sonuçlanmasını amaçlarlar.



Şekil 2.1 Araç üzerinde enerji sönümleyicilerin konumları

Kaza anında sönümlenen enerji miktarı kazanın gerçekleşme hızı, gerçekleşme açısı, enerji yutucunun geometrisi ve malzemesi ile yakından alakalıdır.

Bu çalışma kapsamında incelenecek parça enerji sönümleyicilerdir. Enerji sönümleyici parçalar tasarlanırken tasarımın en kritik parametreleri olan maksimum ezilme kuvveti ve ortalama ezilme kuvveti değerleri özellikle irdelenecektir. Bir enerji sönümleyiciden beklenen maksimum ezilme kuvveti değerinin ortalama ezilme kuvveti değerine mümkün olduğunca yakın olmasıdır. Bu sayede gerekli sönümleme gerçekleşirken aynı zamanda yolcu kabinine iletilen anlık yüksek enerjilerinde önüne geçilmiş olunacaktır. Tüm bunları sağlamak için en önemli husus enerji sönümleyici parçanın geometrisi ve malzemesidir.

Çalışma kapsamında daire, kare, altıgen ve sekizgen kesitli olmak üzere çok hücreli enerji sönümleyici tasarımları yapılmış ve bu enerji sönümleyiciler önden çarpışma koşulunda sonlu elemanlar analizlerine tabi tutulmuştur. Çıktılar ilerleyen bölümlerde detayları ile açıklanacak olan enerji sönümleyici performans parametreleri bazında incelenmiş ve kesit geometrilerinin enerji sönümleyiciler üzerindeki etkileri incelenerek optimum enerji sönümleyici kesit tasarımına karar verilmiştir.

Literatürde enerji sönümleyicilerin performanslarını incelerken bazı kavramlardan bahsedilmiştir. Enerji sönümleyici tasarımları yapılırken, test ve analiz sonuçları değerlendirilirken bu kavramlardan yararlanarak kıyas ve seçim yapmak mümkündür. Bu kavramlar arasında literatürde en yaygın olarak kullanılanlar sönümlenen enerji miktarı (SEM), özgül enerji emilimi (ÖEE), ortalama ezilme kuvveti (OEK), maksimum ezilme kuvveti (MEK), çarpışma kuvveti verimliliği (ÇKV) ve enerji sönümleyici verimlilik faktörüdür (ESVF). Bu kavramlar aşağıda açıklanacaktır.

2.1.1. Sönümlenen enerji miktarı

Çarpışma sırasında enerji sönümleyicinin sönümlediği toplam enerji (E_t), çarpışma kuvvetinin yaptığı iş olarak tanımlanır. Denklem (2.1) ile hesaplanır. (Albak, 2020)

$$E_T = \int_0^d F(x) \cdot dx \tag{2.1}$$

Bu denklemde F (kN) eksenel yöndeki çarpışma kuvvetini, d (mm) çarpışma sırasında enerji sönümleyicide meydana gelen eksenel deplasmanı temsil eder.

2.1.2. Özgül enerji emilimi

Bir enerji sönümleyicinin özgül enerji emilimi sönümlenen enerji miktarının enerji sönümleyicinin deforme olmamış kütlesine oranı olarak ifade edilebilir. Birim kütle başına sönümlenen enerji miktarıdır. Denklem (2.2) kullanılarak hesaplanır. (Tancogne-Dejean, Spierings ve Mohr, 2016)

$$E_M = \frac{E_T}{m} \tag{2.2}$$

Bu denklemde E_M özgül enerji emilimi, E_T sönümlenen toplam enerji miktarını, m ise darbe sönümleyicinin kütlesini ifade eder.

Günümüzdeki araçlarda ağırlık en önemli tasarım parametreleri arasında yerini almıştır. Özellikle elektrikli araçlarda ağırlığın aracın menzili ile doğrudan alakalı olduğunu göz önünde bulundurursak hafif parçalar tasarlayabilmek otomotiv üreticilerinin başlıca amacı olmuştur. Bu sebepten ötürü özgül enerji emilimi enerji sönümleyici tasarımında incelememiz gereken bir parametredir.

2.1.3. Ortalama ezilme kuvveti

Ortalama ezilme kuvveti (OEK), denklem (2.1)'de tanımlanmış olan sönümlenen toplan enerjinin darbe sönümleyicinin enerji sönümleme esnasında eksenel yöndeki şekil değiştirme miktarına oranı olarak tanımlanabilir. Denklem (2.3) kullanılarak hesaplanır. (Song, Chen ve Lu, 2012)

$$OEK = \frac{E_T}{d} \tag{2.3}$$

Bu denklemde E_T sönümlenen toplam enerji miktarını, d (mm) çarpışma sırasında enerji sönümleyicide meydana gelen eksenel deplasmanı temsil eder.

2.1.4. Maksimum ezilme kuvveti

Maksimum ezilme kuvveti (MEK) çarpışmanın meydana geldiği anda darbe sönümleyici üzerinde gelen eksenel yükler sebebi ile oluşan en yüksek değerdeki kuvvete verilen isimdir. Denklem (2.4) ile hesaplanır. (Li, Ma, Xu ve Yao, 2019)

$$MEK = max[F(x)] \tag{2.4}$$

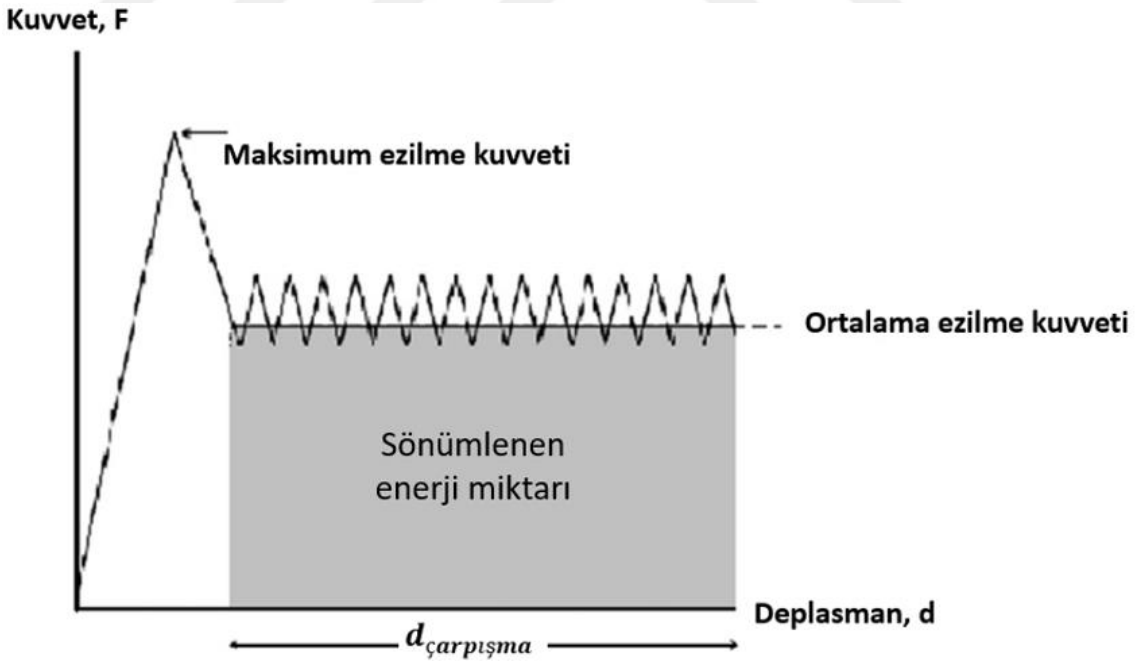
Maksimum ezilme kuvveti darbe sönümleyicinin işlevini göremeden üzerindeki eksenel kuvveti doğrudan taşıtın diğer aksamlarına iletmesine sebebiyet verebileceğinden ötürü otomotiv tasarımcılarının düşük değerlerde tutulmasını istedikleri bir değerdir.

2.1.5. Ezilme kuvveti verimliliği

Ezilme kuvveti verimliliği (EKV) denklem (2.3) ile tanımlanmış olan ortalama ezilme kuvvetinin denklem (2.4) ile tanımlanmış olan maksimum ezilme kuvvetine oranıdır. Denklem (2.5) ile hesaplanır.

$$EKV = \frac{OEK}{MEK} \tag{2.5}$$

Bir enerji sönümleyici tasarımında ezilme kuvveti verimliliği değerinin yüksek olması her koşulda sönümlenen enerji miktarının fazla olacağının göstergesi değildir. Enerji sönümleyicilerden istenilen özellik yüksek bir ortalama ezilme kuvvetine sahip olmasının yanında maksimum ezilme kuvveti değerinin düşük olmasıdır. (Zhang, Wen ve Zhang, 2014)

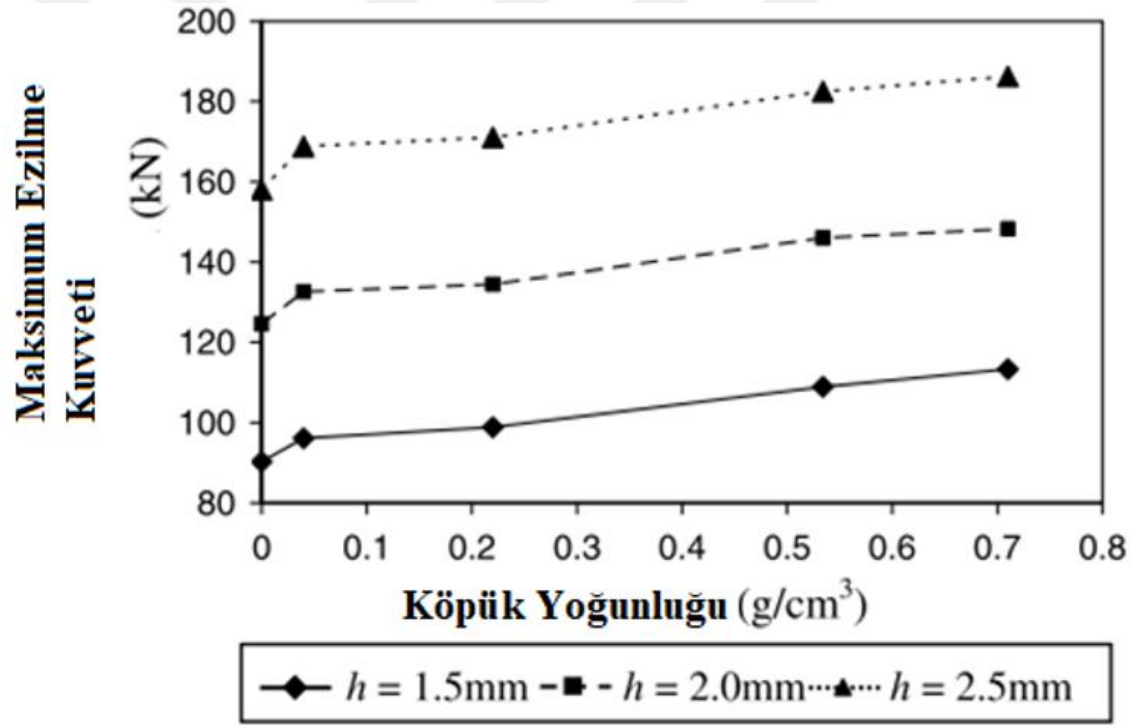


Şekil 2.2: Örnek bir kuvvet-deplasman grafiği üzerinde enerji sönümleyici performans parametrelerinin gösterimi (Tarlochan, Samer, Hamouda, Ramesh ve Khalid, 2013)

Şekil 2.2'de örnek bir kuvvet-deplasman grafiği üzerinde maksimum ezilme kuvveti, ortalama ezilme kuvveti ve sönümlenen enerji miktarı değerleri gösterilmiştir.

2.2 Kaynak Araştırması

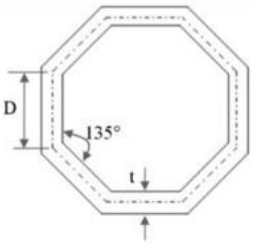
Ahmad ve Thambiratnam (2009), köpük dolgulu konik tüplerin darbe yükü altında enerji absorbe kabiliyetini incelemiş, geometri ve yükleme açılarının bu tür yapıların davranışı üzerindeki etkilerini değerlendirmişlerdir. Çalışma sonucunda köpük dolgu maddesinin kırma işlemini stabilize ettiği bu sebeple enerji sönümleme kapasitesinde gelişmeye sebep olduğunu gözlemlemişlerdir.



Şekil 2.3: Köpük dolgu yoğunluğunun MEK üzerindeki etkileri (Ahmad ve Thambiratnam, 2009)

Mahdi Abedi, Niknejad, Hossein Liaghat ve Zamani Nejad (2012), katlama yükünü tahmin etmek üzere analitik formüller geliştirmek için boş ve poliüretan köpük dolu borular üzerinde ezilme deneyleri gerçekleştirdi. Çalışma kapsamında kare ve dikdörtgen

kesitli boş ve poliüretan köpük dolgulu modellerin maksimum ezilme kuvvetini tahmin etmek adına model duvarları ve poliüretan köpük arasındaki etkileşimleri incelemişlerdir. Meran (2016), farklı geometrik kesitlere sahip ince cidarlı tüplerin çarpmaya dayanıklılığını incelemiş ve kesit geometrisinin çarpışmaya dayanıklılık parametreleri üzerindeki etkilerini gözlemlemiştir. Şekil 2.4'te parça kalınlığı, iç açı ve duvar kalınlığının maksimum çarpışma kuvveti üzerindeki etkileri gösterilmiştir.



Ø	t (mm)	D (mm)	F_m (kN)	F_{max} (kN)	δ (mm)
0.050	1.559	50.37	71.0	328.61	91.5
0.075	1.922	40.86	95.0	328.22	73.8
0.100	2.235	35.15	115.0	327.97	62.5
0.125	2.515	31.22	131.6	329.76	52.6
0.150	2.775	28.31	148.4	323.22	46.7
0.175	3.019	26.02	170.1	328.61	41.8
0.200	3.251	24.16	185.9	328.22	36.9
0.225	3.474	22.61	200.4	327.97	33.2
0.250	3.689	21.29	216.4	329.76	31.4

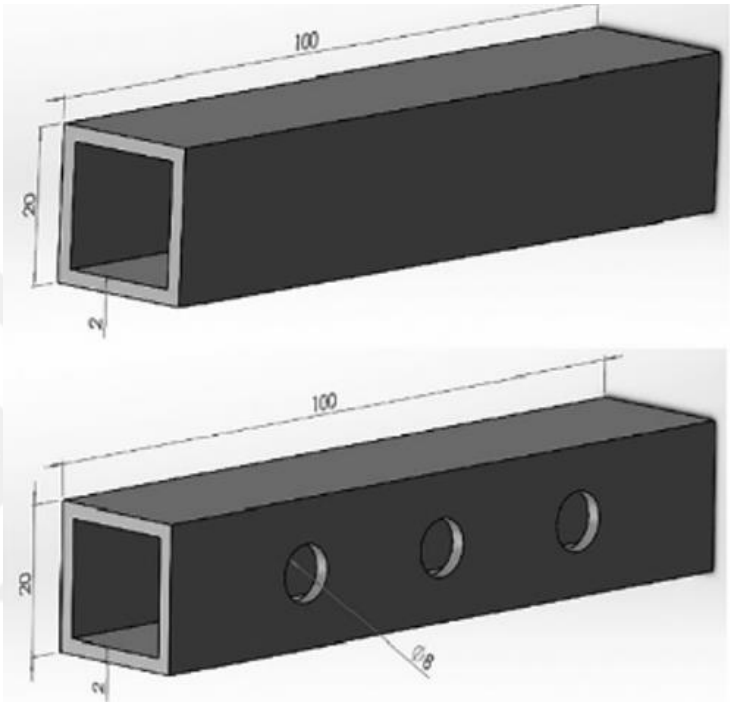
Şekil 2.4: Parça kalınlığı, iç açı ve duvar kalınlığının maksimum çarpışma kuvveti üzerindeki etkileri gösterilmiştir (Meran, 2016)

Eyvazian ve ark. (2020), dikey oluklu kare kesitli tüpün eksenel yükleme altındaki davranışını incelemiş ve dikey dalgaların yüksekliğinin tüpün maksimum sıkıştırma yükünü güçlü bir şekilde etkilediğini belirtmiştir.

Taghipoor ve ark. (2020), düşük hızlı yükleme durumunda farklı enerji emicilerin çarpışmaya dayanıklılık özelliklerini karşılaştırmıştır. Daha sonra modellerin ağırlıklarını azaltmak ve maksimum ezilme kuvvetini azaltmak için model yüzeylerinde deformasyonlar oluşturarak deneylerine devam etmişlerdir. Farklı konfigürasyonlar arasında, alüminyum köpük dolgulu kare tüpün daha iyi çarpma dayanımı performansı gösterdiğini gözlemlemiştir.

Son zamanlarda, çok hücreli tüpler, olağanüstü enerji soğurma kabiliyetine sahip yeni yapılar dizisi olarak araştırmacıların artan ilgisini çekmiştir ve çarpmaya dayanıklılık performansları birçok araştırmacı için çalışma konusu olmuştur.

Alavi Nia ve Parsapour (2014) ve Vimal Kannan ve Rajkumar (2020), farklı kesitlere sahip çok hücreli tüplerin enerji absorbe kabiliyetini incelediler ve çok hücreli altıgen kesitli ve sekizgen kesitli tüplerin çok hücreli kare kesitli tüplere karşın daha iyi çarpma dayanım performansına sahip olduğuna dikkat çektiler.

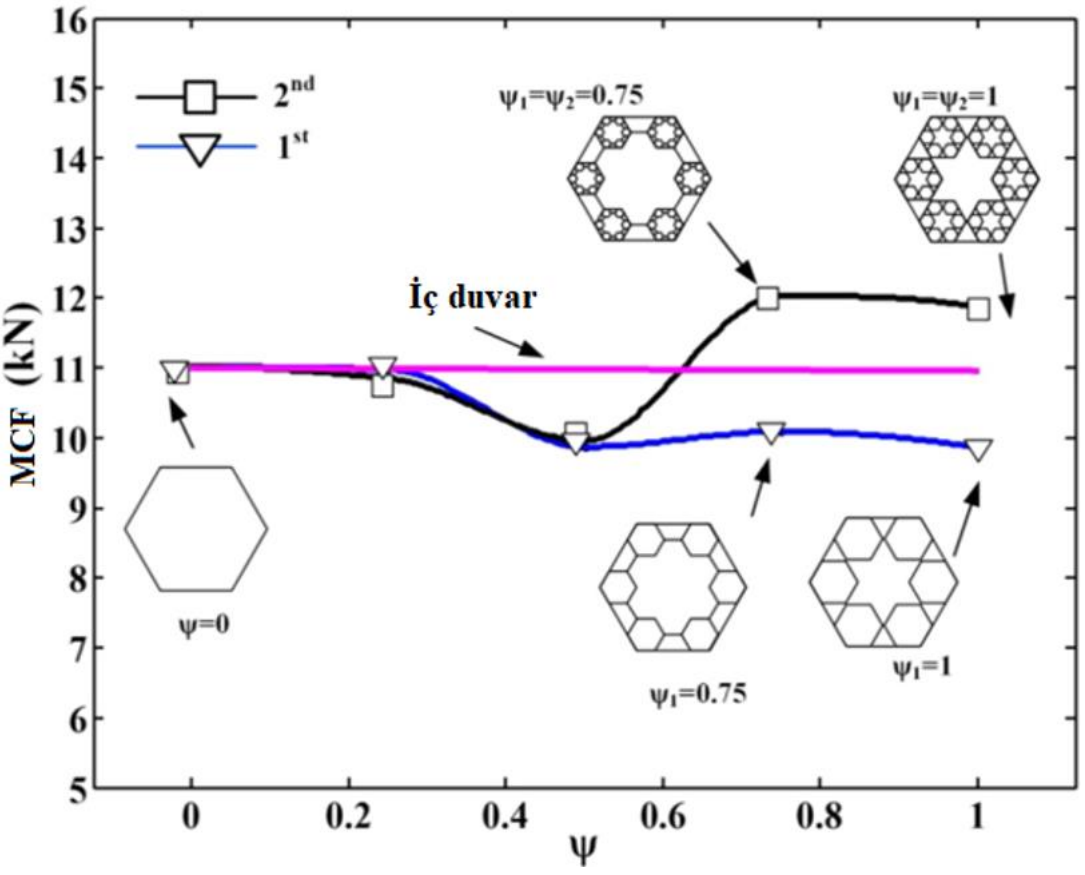


Şekil 2.5: Yüzey deformasyonlu ve yüzey deformasyonsuz model (Taghipoor ve diğerleri, 2020)

Xu ve ark. (2018) hiyerarşik altıgen tüpler üzerinde çarpışmaya dayanıklılık analizi gerçekleştirdi ve enerji sönümleme parametrelerini etkileyen ana faktörleri araştırdı. Şekil 2.6'da iç duvarı olan ve olmayan altıgen tüplerin maksimum çarpışma kuvveti eğrileri gösterilmiştir.

Yapılan çalışmalarda genel olarak, çok hücreli bir tüpün SEA değerinin daha fazla olmasından dolayı tek hücreli muadiline göre daha iyi çarpışma dayanıklılığı performansına sahip olduğu bildirilmiştir. (Chen ve Wierzbicki, 2001) Bununla birlikte, çok hücreli tüplerin yüksek özgül enerji emilimi değeri, normal olarak, tek hücreli muadilinden çok daha büyük olan çok yüksek bir ortalama ezilme kuvveti ile ilişkilidir.

Şekil 2.7'de çok hücreli ve tek hücreli çarpışma kutularının maksimum çarpışma kuvveti eğrileri gösterilmiştir.

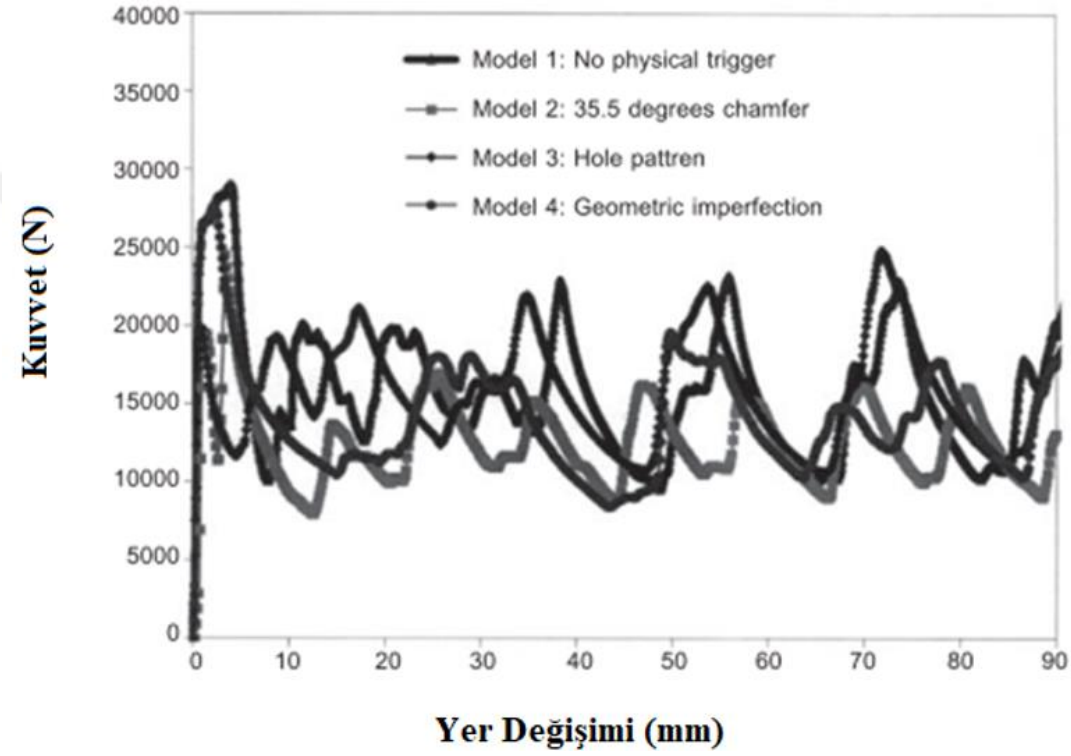


Şekil 2.6: İç duvarı olan ve olmayan altıgen tüplerin maksimum çarpışma kuvveti eğrileri (Xu ve diğerleri, 2018)

Bir enerji soğurucunun maksimum ezilme kuvvetini azaltmak için, ezme başlatıcılar normal olarak tüp duvarlarına uygulanır. Maksimum ezilme kuvvetini azaltmaya ek olarak, başlatıcılar, katlama işleminin kontrol edilmesinde ve istenmeyen genel burkulma deformasyon modunun engellenmesinde önemli bir rol oynar. Ezilme başlatıcılar, boğumlar, oluklar veya delikler dahil olmak üzere farklı formatlarda gelir.

El-Hage, Mallick ve Zamani (2005) yarı statik eksenel ezilmeye tabi tutulan kare alüminyum boruların yük-yer değiştirme özellikleri ve katlanma modeli üzerindeki

tetikleme mekanizmasının etkileri üzerine çalıştılar. Tetikleme mekanizması olarak pah kırma, üçgen desenli delikler açma, modelde geometrik kusurlar oluşturma ve bunların kombinasyonlarını tercih ettiler. Çalışma tetikleme mekanizmasının maksimum ezilme kuvvetini önemli ölçüde kontrol edebildiğini fakat ortalama ezilme kuvveti üzerinde büyük etkilere sebep olmadığını göstermiştir.



Şekil 2.7: Tetikleme mekanizmalarının kuvvet-deplasman grafiği üzerindeki etkileri (El-Hage ve diğerleri, 2005)

Hosseinipour ve Daneshi (2003), yivli tüplerin çarpışmaya dayanıklılık performansını değerlendirmiş ve bu tür tüplerin, oluksuz karşılık gelen geleneksel tüplere göre daha küçük maksimum ezilme kuvveti ve daha iyi çökme davranışına sahip olduğunu göstermiştir.

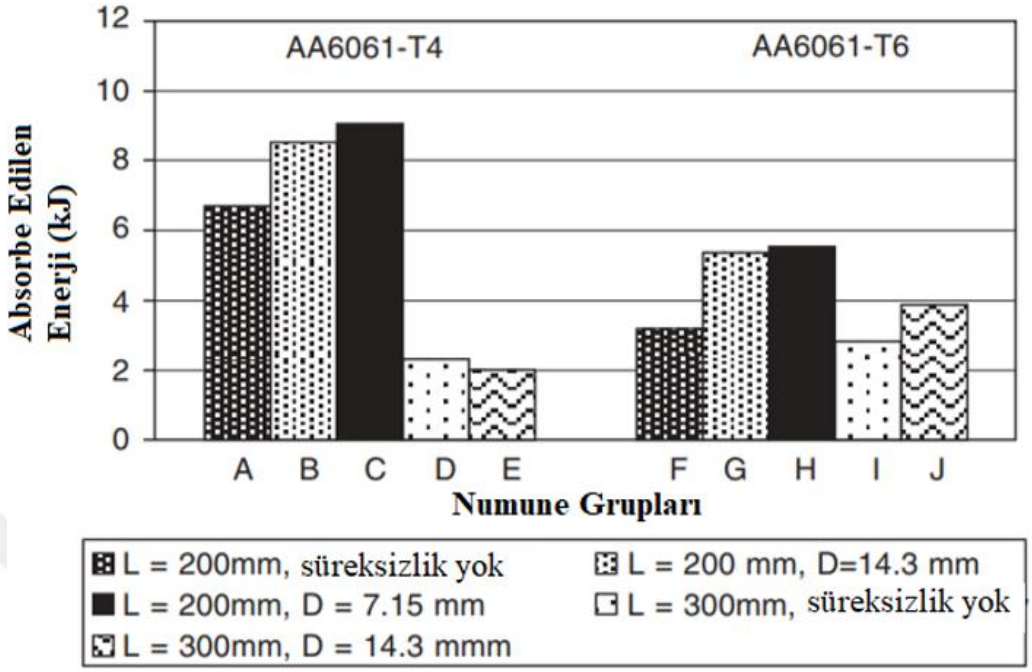
Eyvazian ve ark., dalgalanmaların SEA ve PCL dahil olmak üzere çökme davranışı ve çarpışmaya dayanıklılık indeksleri üzerindeki etkilerini incelemiştir.

(A Eyvazian, Akbarzadeh ve Shakeri, 2015; Arameh Eyvazian ve diğerleri, 2020; Arameh Eyvazian, K. Habibi, Hamouda ve Hedayati, 2014; Arameh Eyvazian, Tran ve Hamouda, 2018)

Alkhatib, Tarlochan, Hashem ve Sassi (2018), oluklu konik boruların çarpmaya dayanıklılık davranışı üzerindeki ondülasyonların etkisini incelemiştir. Daha uzun dalga boyuna sahip olukların ezme sırasında daha küçük maksimum ezilme kuvveti değerleri verdiğini bulmuşlardır.

Arnold ve Altenhof (2004) dairesel süreksizliklere sahip tüplerin çarpışma dayanıklılığını incelemişler ve delik çapındaki artışın maksimum ezilme kuvvetinde azalmaya yol açabileceğini göstermişlerdir. Bununla birlikte, 32 mm'den büyük çaplı çok büyük deliklerin eksenel kırma sırasında boru duvarlarında çatlaklara neden olabileceğini fark etmişlerdir. Şekil 2.8'de delik çapının enerji sönümleme parametresine etkileri gösterilmiştir.

Bodlani, Yuen ve Nurick (2009, 2014), eksenel yükleme altında dairesel delikli tüplerin çarpmaya dayanıklılığı konusunda da benzer bir araştırma yaptı. Çalışmaları enerji sönümleyicilerin yan duvarlarına delikler açmanın maksimum ezilme kuvvetini azaltabileceğini kanıtladı. Bununla birlikte, deliklerin sayısı ikiden fazla olduğunda maksimum ezilme kuvveti makul ölçüde azalmadı.

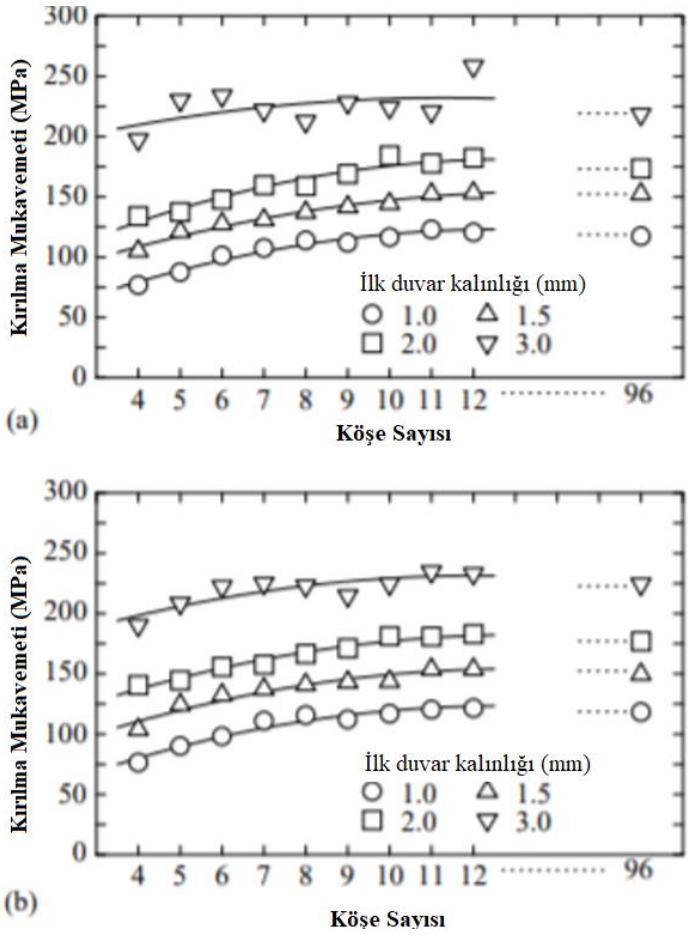


Şekil 2.8: Delik çapının enerji absorbe parametresine etkileri (Arnold ve Altenhof, 2004)

Marzbanrad, Abdollahpoor ve Mashadi (2009), duvarlarında dikdörtgen delikler bulunan dairesel bir borunun çarpmaya dayanıklılık performansını inceledi. Ayrıca, deliklerin çarpma sırasında maksimum ezilme kuvvetinde bir azalmaya neden olduğunu da bildirdiler. Şekil 4'te köşe sayısının kırılma mukavemetine etkileri gösterilmiştir.

Yamashita, Gotoh ve Sawairi (2003), farklı poligonal enine kesitlere sahip içi boş silindirik tüpleri inceledi. Köşe sayısı arttıkça kırılma mukavemetinin arttığı, ancak 11 köşenin ötesine neredeyse maksimize ettiği gösterilmiştir. Ayrıca, altı köşeye kadar enine kesit şeklinde düzenlenmiş çökme modeli oluşmamıştır.

Yukarıdaki çalışmalar, enine kesit konfigürasyonunun çökmeye dayanıklılık performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir.

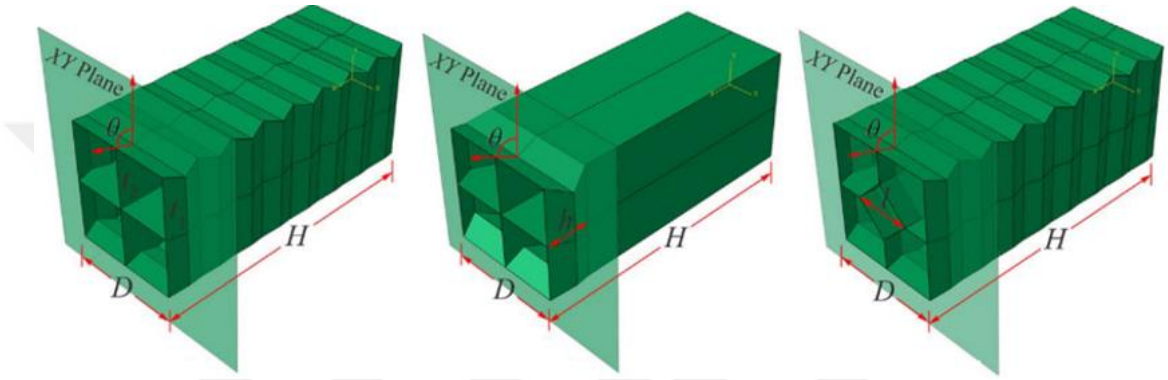


Şekil 2.9: Köşe sayısının kırılma mukavemetine etkileri (Yamashita ve diğerleri, 2003)

Genel olarak, bir yapının enerji sönümleme performansı, geometrik parametreleri ve malzeme özellikleri dahil olmak üzere farklı faktörlerden etkilenir. En uygun enerji sönümleme konfigürasyonunu bulmak üzere çeşitli yapı türleri için deney tasarımı, meta modelleme ve optimizasyon araçları yaygın olarak kullanılmıştır. Bir dizi optimal çözüm olan pareto verimliliği, normalde optimizasyon işleminin uygulanması sonucunda elde edilir.

Hou, Li, Long, Yang ve Li (2007, 2008) ve Hou, Zhang, Yang, Yin ve Li (2014), çok hücreli tüplerin çok amaçlı enerji sönümleme optimizasyon problemini çözmek için yukarıda belirtilen araçları kullandılar.

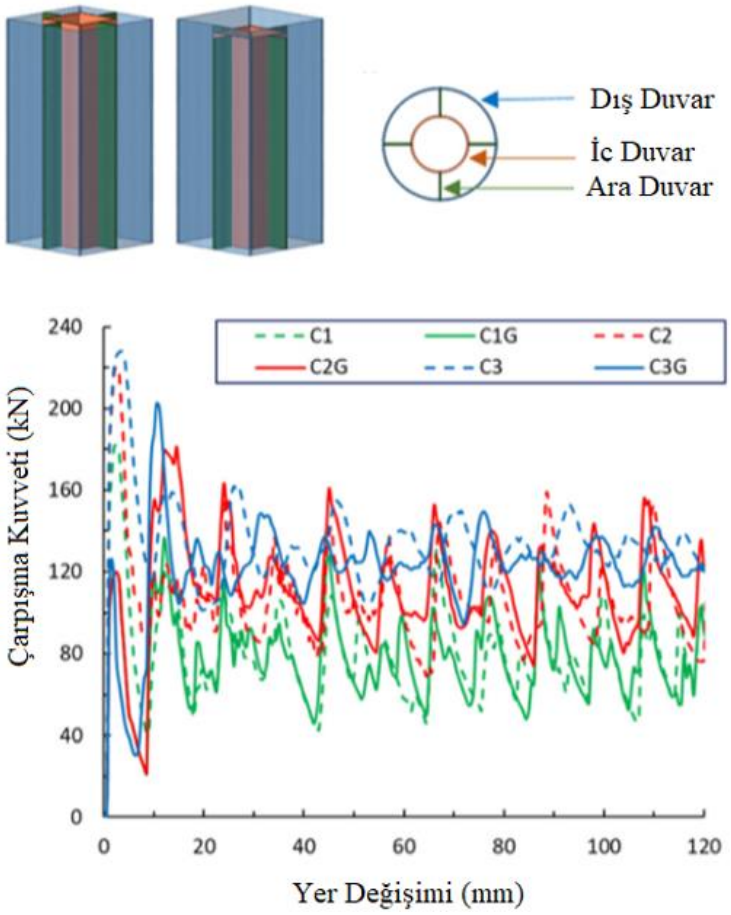
Yang, Xu, Zhou ve Xie (2018), çok hücreli tüplerin katlanmış desenlerle tasarım optimizasyonunu gerçekleştirmiş ve tasarım parametrelerinin çarpışmaya dayanıklılık davranışı üzerindeki etkisini değerlendirmiştir. Çalışma kapsamında maksimum ezilme kuvvetinin azaltılması ve ortalama ezilme kuvvetinin arttırılabilmesi adına origami desenlerine sahip üç adet model önerilmiştir. Sonuç olarak beş hücreli origami tüplerin amaç değerleri karşıladığı gözlemlenmiştir.



Şekil 2.10: Origami desene sahip enerji sönümleyici model örnekleri (Yang ve diğerleri, 2018)

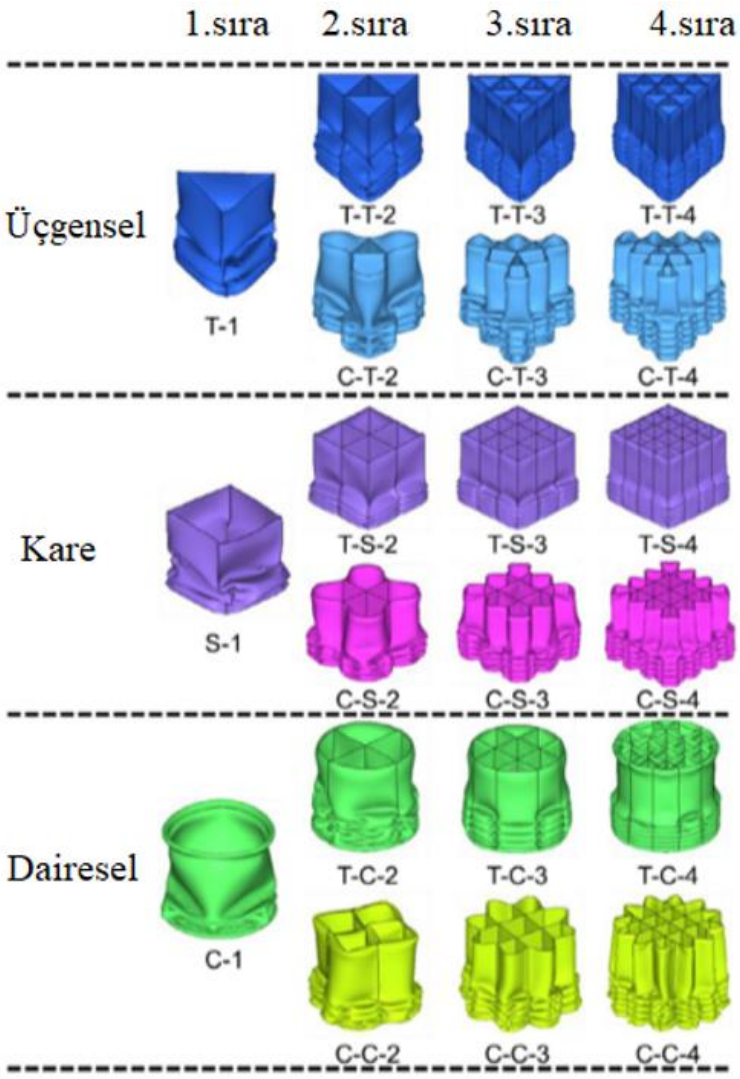
Bigdeli ve Nouri (2019), çok hücreli tüplerin optimizasyonunu gerçekleştirmek için DoE ve çoklu objektif parçacık sürüsü optimizasyonu (MOPSO) algorizmasını birleştirdi ve çarpışmaya dayanıklılık performansını iyileştirmek için yeni kesit önerdi.

Albak (2020), yirmi dört farklı model üzerinde çalışma yapmış, tasarladığı yuvarlak, kare ve altıgen kesitli çok hücreli tüplerde iç duvar ve bağlantı duvarlarının uzunluğunu dış duvar uzunluğundan kısa olacak şekilde modellemiştir. Çalışma sonucunda iç duvar ve bağlantı duvarları daha kısa olan çarpışma kutularının normal çarpışma kutularına göre PCL değerlerinde %30 üzerinde bir azalma olduğunu gözlemlemiştir. Çalışmanın son adımı olarak ise NSGA II optimizasyon yöntemi ile iç duvar ve bağlantı duvarlarının uzunluklarını optimize etmiştir. Şekil 2.11'de iç duvar uzunluğunun etkileri gösterilmiştir.



Şekil 2.11: İç duvar uzunluğunun çarpışma kuvvetine etkisi (Albak, 2020)

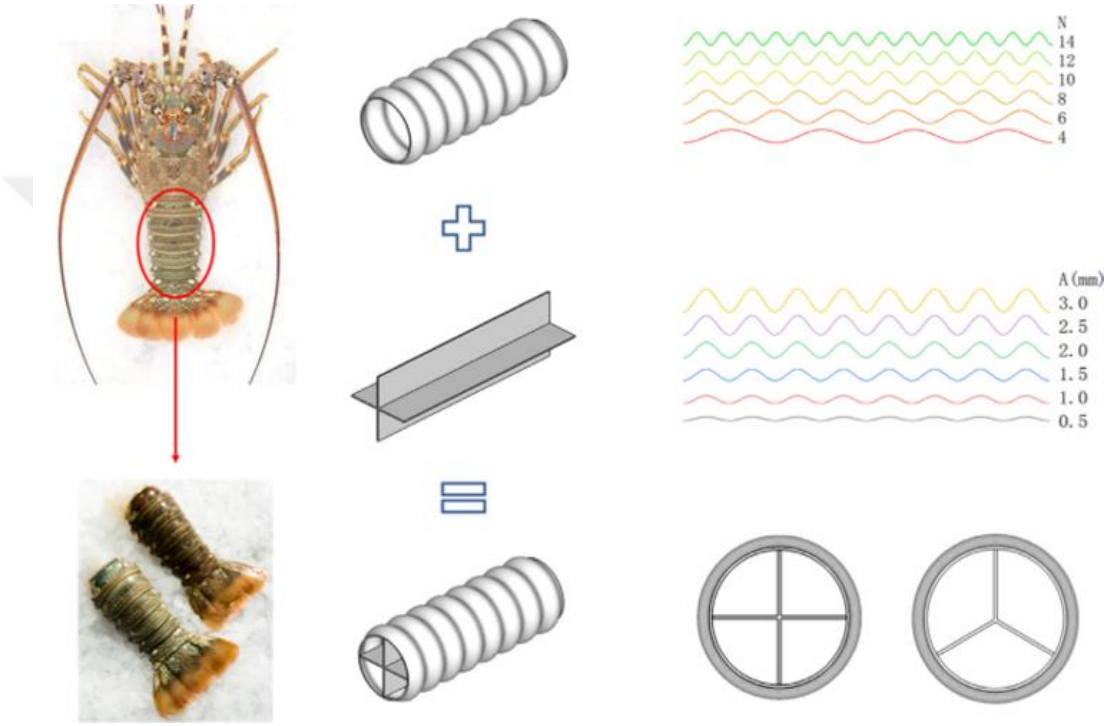
Li, Ma, Yao ve Xu (2021) çok oluklu ve çok hücreli konfigürasyonları birleştiren yeni bir tasarım yöntemi önermişler ve bu yöntem ile üçgen, dairesel ve kare oluklu çok hücreli darbe sönümleyiciler tasarlamışlardır. Çalışma sonuçlarına istinaden üç sıralı ve üç hücreli modelin en iyi model olduğunu tespit etmişlerdir. En iyi model üzerinde yapılan çok amaçlı optimizasyon çalışması sonucunda özgül enerji emilimi değerinin %2,39 ve ezilme kuvveti veriminin %7,69 arttığını belirtmişlerdir. Çalışma çok oluklu ve çok hücreli enerji sönümleyici tasarımlarının enerji sönümleme parametreleri üzerinde pozitif etki yarattığını ve otomotiv sektöründe kullanılabilir olduğunu doğrular.



Şekil 2.12: Çok sıralı ve çok hücreli enerji sönümleyici modelleri (Li ve diğerleri, 2021)

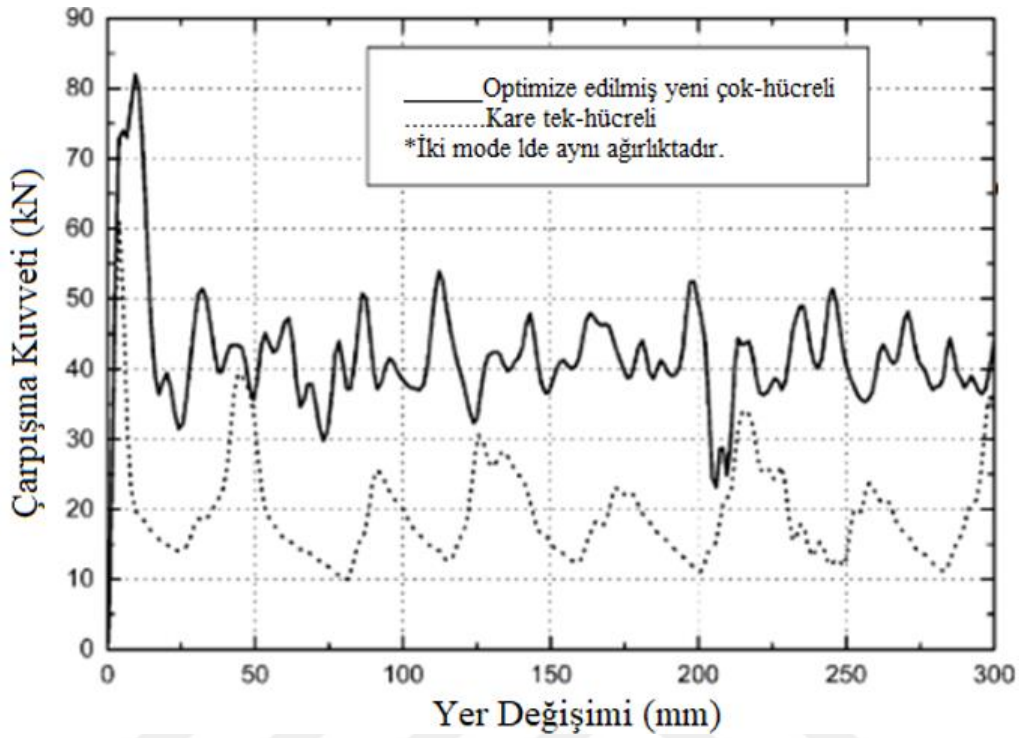
Ma, Li ve Xie (2020), doğadan esinlenerek modellenen çok hücreli oluklu yapıda bir enerji sönümleyici modeli önermektedir. Önerilen model iki parçadan oluşur, ilk parça iç kısımda bulunan bir iskelet yapıdır, ikinci parça ise iskelet yapının içine yerleştirildiği oluklu bir tüptür. Oluklu tüpün yapısı iki yapısı kosinüs dalga tepelerinin sayısı ve genliğine dayanan bir kosinüs denklemi ile ifade edilir. İç iskelet yapısı ise X ve Y eksen kesitli olmak üzere iki tipten oluşur. Yapılan çalışmalar çok hücreli oluklu enerji sönümleyicilerin ezilme modlarının kararsız, elmas, halka ve karışık olacak şekilde dört

sınıfta incelenebileceği göstermiştir. Kosinüs dalga tepelerinin sayısı ve genliği bu modların farklılık göstermesindeki temel parametredir. Yapılan analizler çok hücreli oluklu yapıdaki enerji sönümleyicilerin düz borulara göre enerji sönümleme kapasitelerinde artış olduğu ve maksimum ezilme kuvveti değerinde azalış olduğunu göstermiştir.



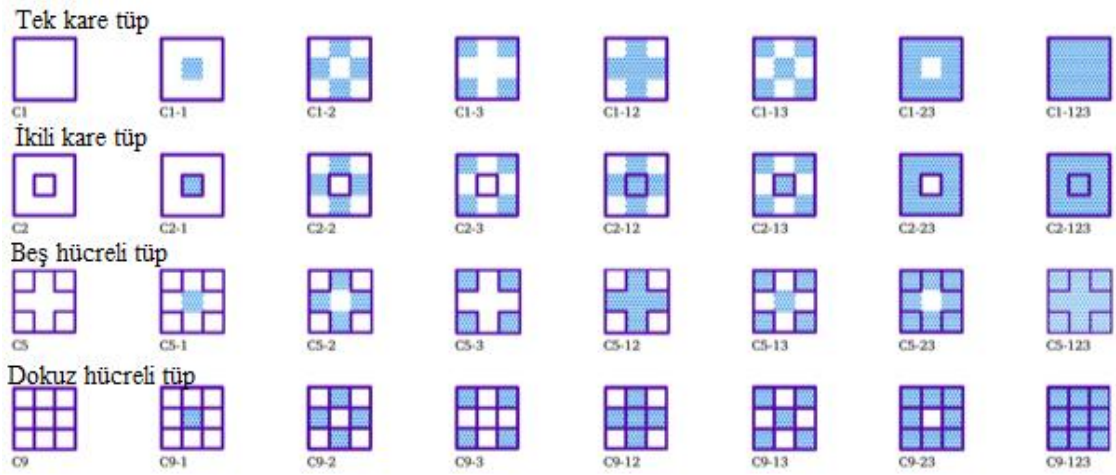
Şekil 2.13: Tasarlanan enerji sönümleyici modelleri ve tasarım parametreleri (Li ve diğerleri, 2021)

Kim (2002) her bir köşesinde kare kesitler ve tetikleyici mekanizmalar bulunan çok hücreli enerji sönümleyiciler modelledi. Sönümlenen enerji miktarı ve özgül enerji emilimi açısından bu modellerin düz dikdörtgen enerji sönümleyicilere göre çok daha iyi olduğunu gözlemledi. Özgül enerji emilimini maksimize etmek için optimizasyon çalışmaları yapmış ve bu süreçte aşamalı katlanma sorununu da ele almıştır. Sonuç olarak çok hücreli enerji sönümleyicilerin geleneksel tek hücreli enerji sönümleyicilere nazaran daha avantajlı olduğunu göstermiştir.

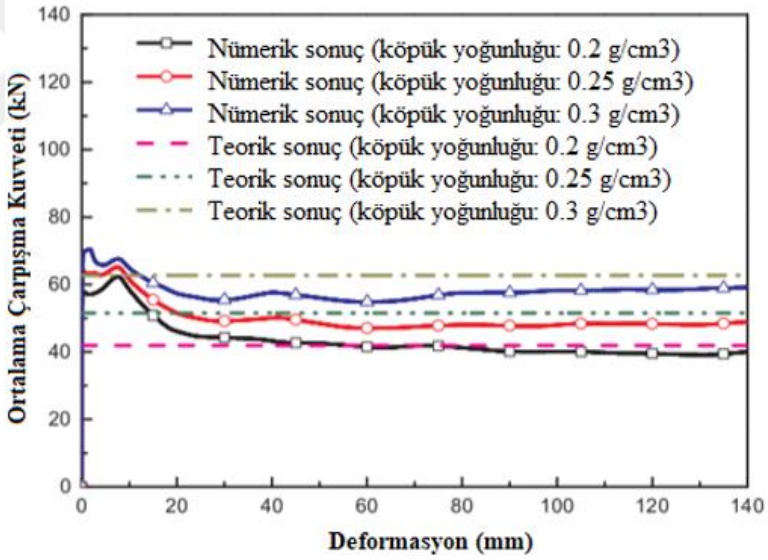


Şekil 2.14: Tek hücreli kare enerji sönümleyici modeli ve optimize edilmiş çok hücreli enerji sönümleyici modeli ezilme kuvveti-deplasman grafiği karşılaştırması (Kim, 2002)

Sun, Liu, Huang, Zhen ve Li (2018), çok hücreli enerji sönümleyicileri boş ve köpük dolgulu olarak eksenel konfigürasyonlarının enerji sönümleme parametreleri üzerindeki etkilerini incelemeyi ve duvar kalınlığı ve köpük yoğunluğunu optimize etmeyi amaçlar. Çalışma sonucunda beş hücreli, köşelerdeki dört hücrenin köpük dolgulu olduğu modelin diğer topolojik konfigürasyonlar ile karşılaştırıldığında en iyi değerlere sahip olduğunu göstermiştir. Son olarak beş hücreli, köşelerdeki dört hücresi köpük dolgulu model üzerinde özgül enerji emilimini maksimize etmek amacı ile duvar kalınlığı ve köpük yoğunluğu parametreleri değişken tutularak optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Optimizasyon çalışması sonucu tasarlanan yeni modelin özgül enerji emilimi değeri optimizasyon öncesi tasarlanan modelden %6.15 daha yüksektir.



Şekil 2.15: Köpük dolgulu çok hücreli enerji sönümleyici konfigürasyonları (Sun ve diğerleri, 2018)



Şekil 2.16: Köpük yoğunluğunun ortalama ezilme kuvveti üzerindeki etkisi (Sun ve diğerleri, 2018)

Gao, Wang, Wang ve Wang (2016), enerji sönümleyici olarak köpük dolgulu elips kesit alanına sahip bir model önermiş ve bu modelin farklı yükleme açıları altında farklı kesitlere sahip içi boş ve köpük dolgulu diğer enerji sönümleyiciler ile karşılaştırmışlardır. Yapılan analiz sonuçları köpük dolgulu elips tüpün farklı yükleme

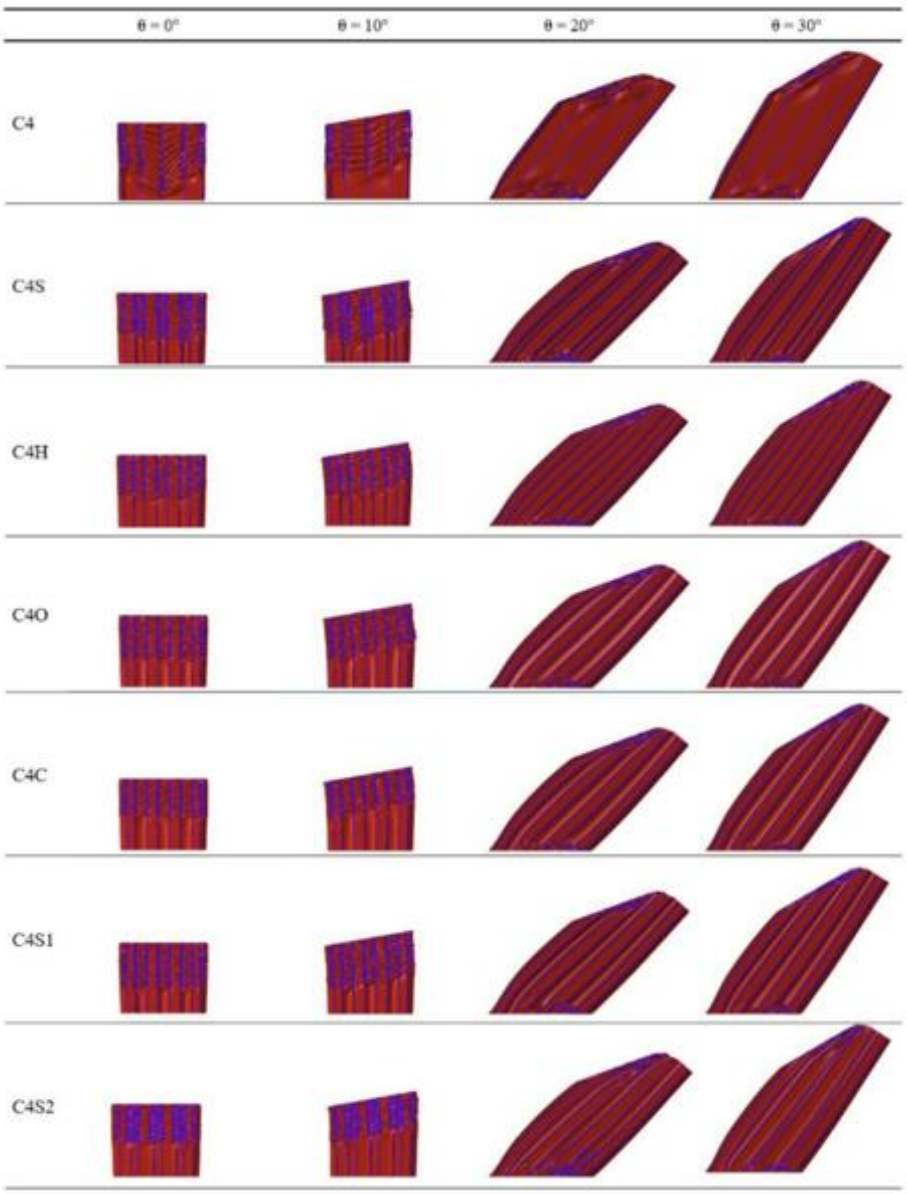
açıları altında en iyi sonuçlara sahip olduğunu göstermiştir. Çalışmanın devamında radyal oran, duvar kalınlığı ve köpük yoğunluğu değerlerini analiz etmek adına deneysel tasarım yöntemini kullanmışlardır. Son olarak NSGA-II yöntemi ile farklı yükleme açıları altında özgül enerji sönümleme değerini en yüksek seviyeye çıkarmak ve maksimum ezilme kuvvetini en aza indirmek adına optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Optimizasyon çalışmalarından sonra optimize edilmiş köpük dolgulu elips kesitli enerji sönümleyicinin optimizasyondan önceki modele göre özgül enerji emilimi değerinin %35 arttığı, maksimum ezilme kuvveti değerinin ise %20 azaldığı görülmüştür.



Şekil 2.17: Elips kesitli enerji sönümleyici modelinin deneysel ve sonlu elemanlar analizlerindeki ezilme şekilleri (Gao ve diğerleri, 2016)

Albak (2021), çok hücreli, çok köşeli ve köşe bağlantılı enerji sönümleyiciler üzerinde çalışmıştır. Çalışmasında bu üç konfigürasyonu içeren yirmi bir farklı enerji sönümleyicinin eksenel ve açılı yükler altında enerji sönüm parametrelerini incelemiş ve en iyi sonuca ulaşabilmek adına optimizasyon çalışmaları yapmıştır. Çalışma sonuçları enerji sönümleyicilerin hücre sayılarının arttırılmasının, açılı yükler altında genel olarak enerji sönümü üzerinde olumlu etkileri olduğunu göstermiştir. Aynı zamanda enerji sönümleyicilerin iç duçar köşelerine eklenen alt bölmelerin de enerji sönümleme

kapasitesi üzerinde olumlu etkileri vardır. En iyi enerji sönümleme performansına sahip modeli elde etmek adına farklı optimizasyon teknikleri ve seçim algoritmalarını kullanmıştır. En iyi enerji sönümleyen modelin C40 olduğuna karar verilmiş ve C40 modelinin optimum boyutlarını elde edebilmek için radyal temel fonksiyon ve dört çok amaçlı optimizasyon yöntemleri kullanılmıştır. Optimizasyon sonuçları incelendiğinde optimum yapının optimizasyon yöntemlerine göre farklılık göstermediği, sonuçların birbirine çok yakın olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 2.18: C4 tüplerinin farklı açılı yüklemeler altında ezilme davranışları (Albak, 2021)

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çalışma dahilinde sonlu elemanlar metodu kullanılarak çarpışma analizleri gerçekleştirilmiş ve bu analizlerin sonuçları incelenerek kesit geometrisinin enerji sönümleyicilerin verimlilik parametreleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Çalışma yapılırken farklı enerji sönümleyici tasarımları Siemens NX tasarım programı kullanılarak yapılmıştır. Devamında tasarlanan modellerin ağ yapılarını oluşturma ve sınır şartlarını tanımlama çalışmaları Hypermesh yazılımı ile yapılmıştır. Oluşturulan analiz modelleri Radioss yazılımı ile çözdürülmüş ve sonuçların incelenmesi için Hyperview yazılımı kullanılmıştır.

3.1. Çalışmada Kullanılan Enerji Sönümleyici Modelleri

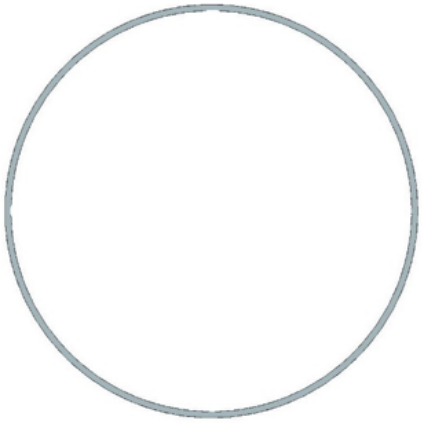
Çalışma kapsamında 24 farklı kesit geometrisine sahip enerji sönümleyici model oluşturulmuş ve oluşturulan bu modeller üzerinde çarpışma analizleri gerçekleştirilmiştir.

Oluşturulan modeller daire kesit geometrisine sahip, kare kesit geometrisine sahip, altıgen kesit geometrisine sahip ve sekizgen kesit geometrisine sahip modeller olarak dört kategoride incelenmiştir.

3.1.1. Dış duvarı daire kesit geometrili modeller

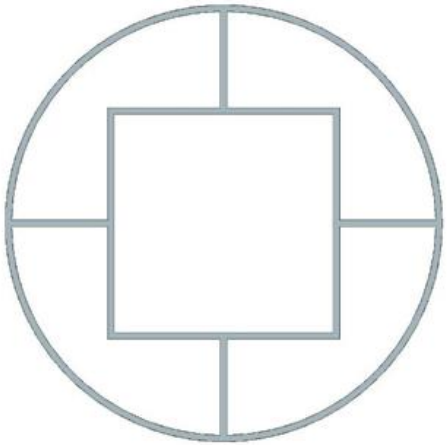
Çalışma kapsamında altı farklı dış duvarı daire kesit geometrili model ile çalışılmıştır.

C1 modeli 100mm çapında iç duvar ve bağlantı duvarlarına sahip olmayan dairesel kesitli bir modeldir. Model et kalınlığı 1.5mm'dir. Model kütlesi 0.25kg'dır. Kesit görüntüsü şekil 3.1'de gösterilmiştir.



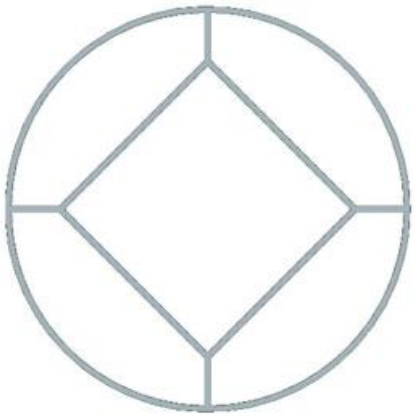
Şekil 3.1: C1 modeli kesit görüntüsü

C2 modeli 100mm çapında daire kesitli dış duvara ve 53mm kenar uzunluğunda kare kesitli iç duvara sahip bir modeldir. Dış duvar ve iç duvar bağlantıları kare kesitli iç duvarın kenar orta noktalarından uzanan bağlantı duvarları ile sağlanmıştır. Model et kalınlığı 1.5mm'dir. Model kütlesi 0.49kg'dır. Kesit görüntüsü şekil 3.2'de gösterilmiştir.



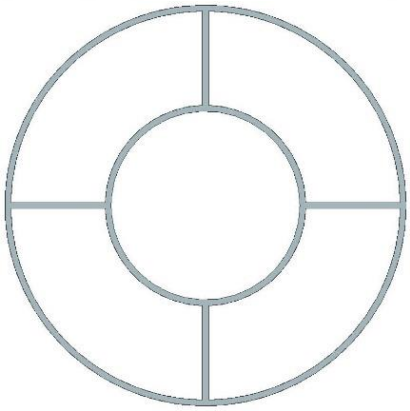
Şekil 3.2: C2 modeli kesit görüntüsü

C3 modeli 100mm çapında daire kesitli dış duvara ve 50mm kenar uzunluğunda kare kesitli iç duvara sahip bir modeldir. Dış duvar ve iç duvar bağlantıları kare kesitli iç duvarın köşe noktalarından uzanan bağlantı duvarları ile sağlanmıştır. Model et kalınlığı 1.5mm'dir. Model kütlesi 0.46kg'dır. Kesit görüntüsü şekil 3.3'te gösterilmiştir.



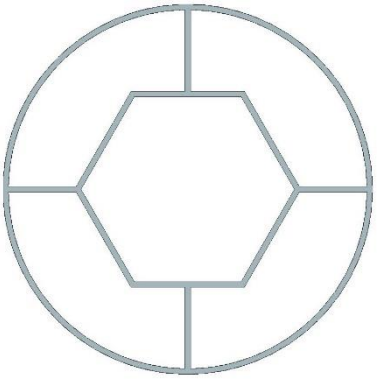
Şekil 3.3: C3 modeli kesit görüntüsü

C4 modeli 100mm çapında daire kesitli dış duvara ve 50mm çapında daire kesitli iç duvara sahip bir modeldir. Dış duvar ve iç duvar arasında bağlantı duvarlarına sahiptir. Model kütlesi 0.55kg'dır. Model et kalınlığı 1.5mm'dir. Kesit görüntüsü şekil 3.4'te gösterilmiştir.



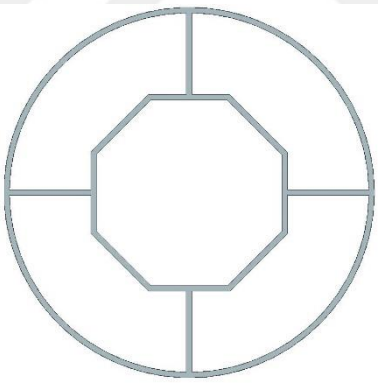
Şekil 3.4: C4 modeli kesit görüntüsü

C5 modeli 100mm çapında daire kesitli dış duvara ve 30mm kenar uzunluğuna sahip altıgen kesitli iç duvara sahip bir modeldir. Dış duvar ve iç duvar arasında bağlantı duvarlarına sahiptir. Model kütlesi 0.46kg'dır. Model et kalınlığı 1.5mm'dir. Kesit görüntüsü şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5: C5 modeli kesit görüntüsü

C6 modeli 100mm çapında daire kesitli dış duvara ve 22mm kenar uzunluğuna sahip sekizgen kesitli iç duvara sahip bir modeldir. Dış duvar ve iç duvar arasında sekizgen kesitli iç duvarın orta noktalarından uzanan bağlantı duvarlarına sahiptir. Model kütlesi 0.47kg'dır. Model et kalınlığı 1.5mm'dir. Kesit görüntüsü şekil 3.6'da gösterilmiştir.

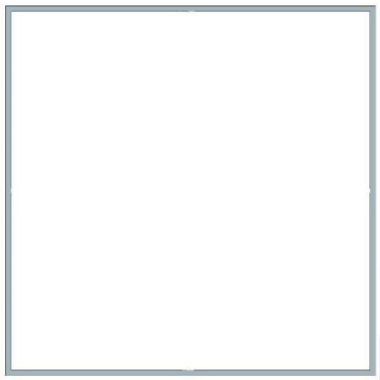


Şekil 3.6: C6 modeli kesit görüntüsü

3.1.2. Dış duvarı kare kesit geometrili modeller

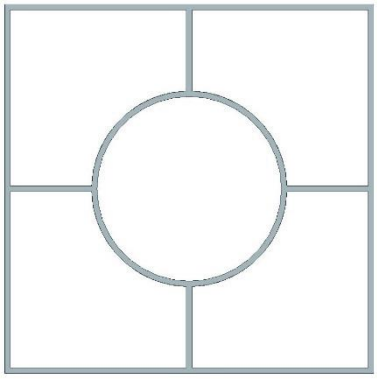
Çalışma kapsamında altı farklı dış duvarı kare kesit geometrili model ile çalışılmıştır.

S1 modeli 100mm kenar uzunluğuna sahip iç duvar ve bağlantı duvarlarına sahip olmayan kare kesitli bir modeldir. Model et kalınlığı 1.5mm'dir. Model kütlesi 0.39kg'dır. Kesit görüntüsü şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7: S1 modeli kesit görüntüsü

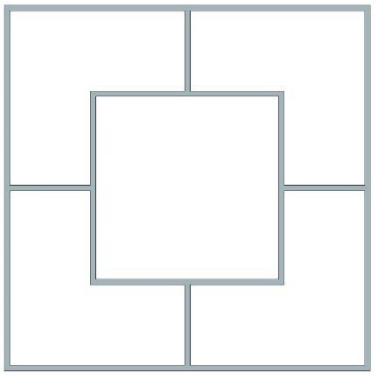
S2 modeli 100mm kenar uzunluğuna sahip kare kesitli dış duvara ve 53mm çapında daire kesitli iç duvara sahip bir modeldir. Dış duvar ve iç duvar bağlantıları bağlantı duvarları ile sağlanmıştır. Model et kalınlığı 1.5mm'dir. Model kütlesi 0.53kg'dır. Kesit görüntüsü şekil 3.8'de gösterilmiştir.



Şekil 3.8: S2 modeli kesit görüntüsü

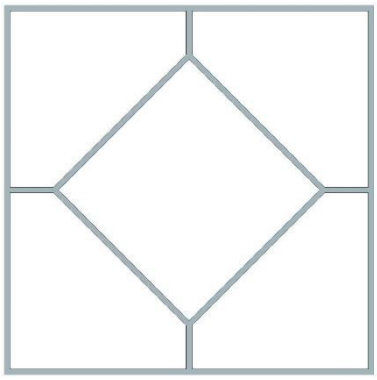
S3 modeli 100mm kenar uzunluğuna sahip kare kesitli dış duvara ve 53mm kenar uzunluğuna sahip kare kesitli iç duvarı olan bir modeldir. Dış duvar ve iç duvar

bağlantıları iç duvar kenarlarının orta noktalarından uzanan bağlantı duvarları ile sağlanmıştır. Model et kalınlığı 1.5mm'dir. Model kütlesi 0.56kg'dır. Kesit görüntüsü şekil 3.9'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9: S3 modeli kesit görüntüsü

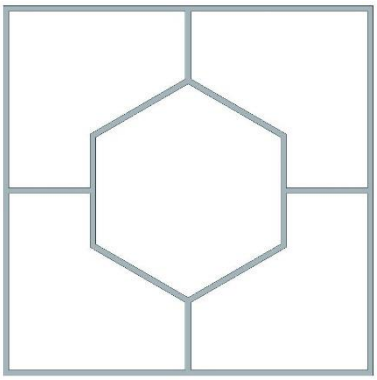
S4 modeli 100mm kenar uzunluğuna sahip kare kesitli dış duvara ve 50mm kenar uzunluğuna sahip kare kesitli iç duvarı olan bir modeldir. Dış duvar ve iç duvar bağlantıları iç duvar köşe noktalarından uzanan bağlantı duvarları ile sağlanmıştır. Model et kalınlığı 1.5mm'dir. Model kütlesi 0.56kg'dır. Kesit görüntüsü şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10: S4 modeli kesit görüntüsü

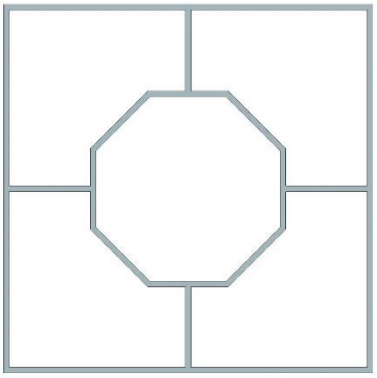
S5 modeli 100mm kenar uzunluğuna sahip kare kesitli dış duvara ve 30mm kenar uzunluğuna sahip altıgen kesitli iç duvarı olan bir modeldir. Dış duvar ve iç duvar

bağlantıları bağlantı duvarları ile sağlanmıştır. Model et kalınlığı 1.5mm'dir. Model kütlesi 0.53kg'dır. Kesit görüntüsü şekil 3.11'de gösterilmiştir.



Şekil 3.11: S5 modeli kesit görünümü

S6 modeli 100mm kenar uzunluğuna sahip kare kesitli dış duvara ve 23mm kenar uzunluğuna sahip sekizgen kesitli iç duvarı olan bir modeldir. Dış duvar ve iç duvar bağlantıları iç duvar kenarlarının orta noktalarından uzanan bağlantı duvarları ile sağlanmıştır. Model et kalınlığı 1.5mm'dir. Model kütlesi 0.52kg'dır. Kesit görüntüsü şekil 3.9'da gösterilmiştir.

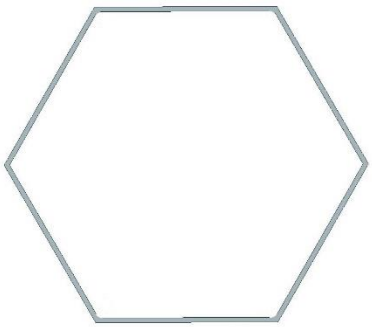


Şekil 3.12: S6 modeli kesit görüntüsü

3.1.3. Dış duvarı altıgen kesit geometrili modeller

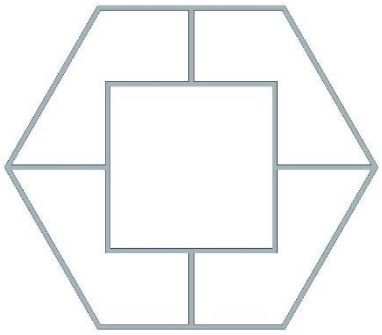
Çalışma kapsamında altı farklı dış duvarı altıgen kesit geometrili model ile çalışılmıştır.

H1 modeli 58mm kenar uzunluğuna sahip iç duvar ve bağlantı duvarlarına sahip olmayan altıgen kesitli bir modeldir. Model et kalınlığı 1.5mm'dir. Model kütlesi 0.28kg'dır. Kesit görüntüsü şekil 3.13'te gösterilmiştir.



Şekil 3.13: H1 modeli kesit görüntüsü

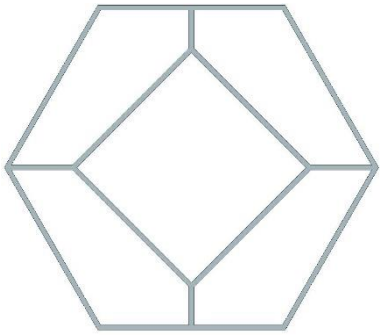
H2 modeli 58mm kenar uzunluğuna sahip altıgen kesitli dış duvara ve 53mm kenar uzunluğuna sahip kare kesitli iç duvara sahip bir modeldir. Dış duvar ve iç duvar bağlantıları iç duvar kenarlarının orta noktalarından uzanan bağlantı duvarları ile sağlanmıştır. Model et kalınlığı 1.5mm'dir. Model kütlesi 0.53kg'dır. Kesit görüntüsü şekil 3.14'te gösterilmiştir.



Şekil 3.14: H2 modeli kesit görüntüsü

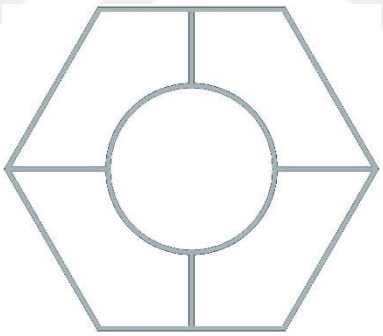
H3 modeli 58mm kenar uzunluğuna sahip altıgen kesitli dış duvara ve 50mm kenar uzunluğuna sahip kare kesitli iç duvara sahip bir modeldir. Dış duvar ve iç duvar bağlantıları iç duvar köşe noktalarından uzanan bağlantı duvarları ile sağlanmıştır. Model

et kalınlığı 1.5mm'dir. Model kütlesi 0.49kg'dır. Kesit görüntüsü şekil 3.15'te gösterilmiştir.



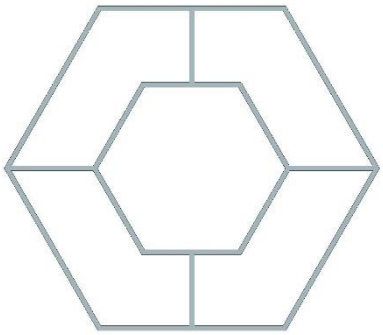
Şekil 3.15: H3 modeli kesit görüntüsü

H4 modeli 58mm kenar uzunluğuna sahip altıgen kesitli dış duvara ve 53mm çapında daire kesitli iç duvara sahip bir modeldir. Dış duvar ve iç duvar bağlantıları bağlantı duvarları ile sağlanmıştır. Model et kalınlığı 1.5mm'dir. Model kütlesi 0.52kg'dır. Kesit görüntüsü şekil 3.16'da gösterilmiştir.



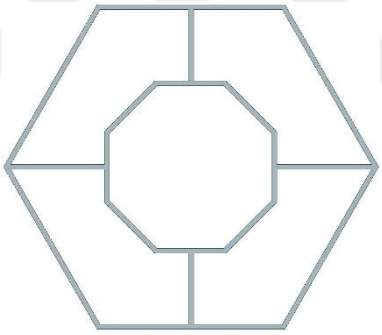
Şekil 3.16: H4 modeli kesit görüntüsü

H5 modeli 58mm kenar uzunluğuna sahip altıgen kesitli dış duvara ve 30mm kenar uzunluğuna sahip altıgen kesitli iç duvarı olan bir modeldir. Dış duvar ve iç duvar bağlantıları bağlantı duvarları ile sağlanmıştır. Model et kalınlığı 1.5mm'dir. Model kütlesi 0.50kg'dır. Kesit görüntüsü şekil 3.17'de gösterilmiştir.



Şekil 3.17: H5 modeli kesit görüntüsü

H6 modeli 58mm kenar uzunluğuna sahip altıgen kesitli dış duvara ve 23mm kenar uzunluğuna sahip sekizgen kesitli iç duvarı olan bir modeldir. Dış duvar ve iç duvar bağlantıları iç duvar kenarlarının orta noktalarından uzanan bağlantı duvarları ile sağlanmıştır. Model et kalınlığı 1.5mm'dir. Model kütlesi 0.50kg'dır. Kesit görüntüsü şekil 3.18'de gösterilmiştir.

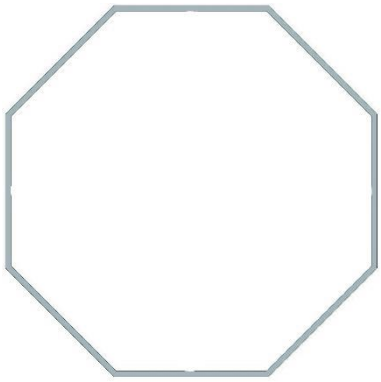


Şekil 3.18: H6 modeli kesit görüntüsü

3.1.4. Dış duvarı sekizgen kesit geometrili modeller

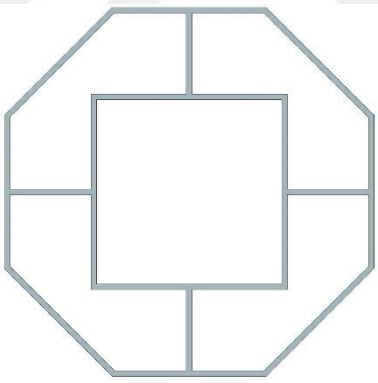
Çalışma kapsamında altı farklı dış duvarı sekizgen kesit geometrili model ile çalışılmıştır.

O1 modeli 42mm kenar uzunluğuna sahip iç duvar ve bağlantı duvarlarına sahip olmayan sekizgen kesitli bir modeldir. Model et kalınlığı 1.5mm'dir. Model kütlesi 0.26kg'dır. Kesit görüntüsü şekil 3.19'da gösterilmiştir.



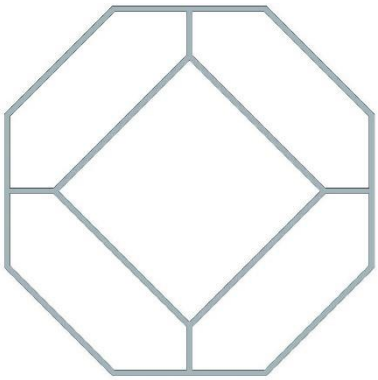
Şekil 3.19: O1 modeli kesit görüntüsü

O2 modeli 42mm kenar uzunluğuna sahip sekizgen kesitli dış duvara ve 53mm kenar uzunluğuna sahip kare kesitli iç duvara sahip bir modeldir. Dış duvar ve iç duvar bağlantıları iç duvar kenarlarının orta noktalarından uzanan bağlantı duvarları ile sağlanmıştır. Model et kalınlığı 1.5mm'dir. Model kütlesi 0.51kg'dır. Kesit görüntüsü şekil 3.20'de gösterilmiştir.



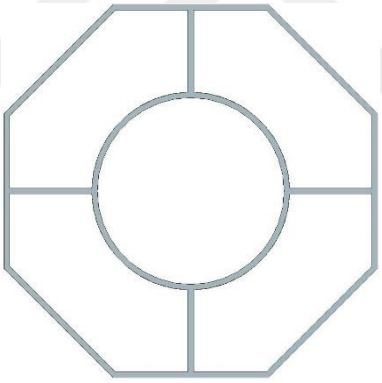
Şekil 3.20: O2 modeli kesit görüntüsü

O3 modeli 42mm kenar uzunluğuna sahip sekizgen kesitli dış duvara ve 50mm kenar uzunluğuna sahip kare kesitli iç duvara sahip bir modeldir. Dış duvar ve iç duvar bağlantıları iç duvar köşe noktalarından uzanan bağlantı duvarları ile sağlanmıştır. Model et kalınlığı 1.5mm'dir. Model kütlesi 0.47kg'dır. Kesit görüntüsü şekil 3.21'de gösterilmiştir.



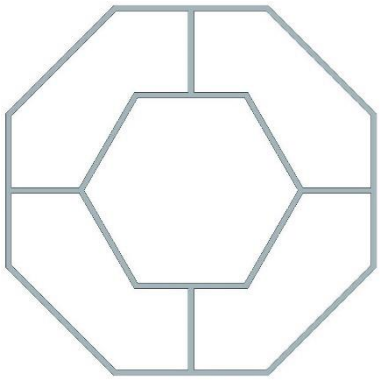
Şekil 3.21: O3 modeli kesit görüntüsü

O4 modeli 42mm kenar uzunluğuna sahip sekizgen kesitli dış duvara ve 53mm çapında daire kesitli iç duvara sahip bir modeldir. Dış duvar ve iç duvar bağlantıları bağlantı duvarları ile sağlanmıştır. Model et kalınlığı 1.5mm'dir. Model kütlesi 0.47kg'dır. Kesit görüntüsü şekil 3.22'de gösterilmiştir.



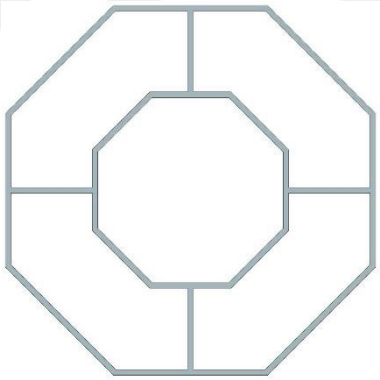
Şekil 3.22: O4 modeli kesit görüntüsü

O5 modeli 42mm kenar uzunluğuna sahip sekizgen kesitli dış duvara ve 30mm kenar uzunluğuna sahip altıgen kesitli iç duvarı olan bir modeldir. Dış duvar ve iç duvar bağlantıları bağlantı duvarları ile sağlanmıştır. Model et kalınlığı 1.5mm'dir. Model kütlesi 0.49kg'dır. Kesit görüntüsü şekil 3.23'te gösterilmiştir.



Şekil 3.23: O5 modeli kesit görüntüsü

O6 modeli 42mm kenar uzunluğuna sahip sekizgen kesitli dış duvara ve 23mm kenar uzunluğuna sahip sekizgen kesitli iç duvarı olan bir modeldir. Dış duvar ve iç duvar bağlantıları iç duvar kenarlarının orta noktalarından uzanan bağlantı duvarları ile sağlanmıştır. Model et kalınlığı 1.5mm'dir. Model kütlesi 0.49kg'dır. Kesit görüntüsü şekil 3.24'te gösterilmiştir.



Şekil 3.24: O6 modeli kesit görüntüsü

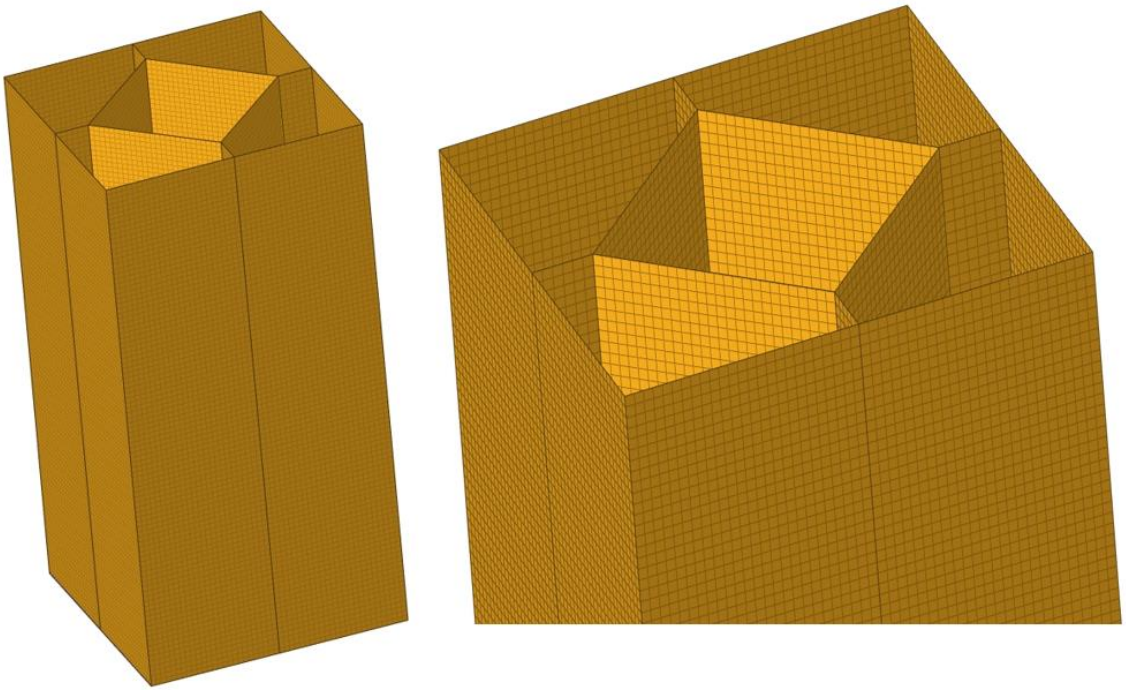
3.2. Analiz Modelinin Hazırlanması

Siemens NX yazılımında tasarımları yapılan enerji sönümleyici modeller Hypermesh yazılımının Radioss arayüzüne aktarılmış ve bu yazılım ile analiz modelleri oluşturulmuştur.

3.2.1. Ağ yapısının oluşturulması

Çalışma kapsamında tasarlanan enerji sönümleyici modeller ince cidarlı tüpler oldukları için taraşımlar yüzey olarak modellenmiştir. Bu sebeple ağ yapısı oluşturulurken dört düğüm noktalı kabuk elemanlar tercih edilmiştir.

Ağ yapısı oluşturulurken kullanılan eleman boyutu 2mm x 2mm olarak seçilmiştir. Bu eleman boyutunun seçilme sebebi analiz sürelerinin daha küçük boyutlu eleman seçimlerine kıyasla daha kısa sürmesi ve yapılan doğrulama çalışmasında test sonuçlarına en yakın sonucu veren eleman boyutu olmasıdır. Örnek ağ yapısı H4 modeli üzerinden şekil 3.25'te gösterilmiştir.

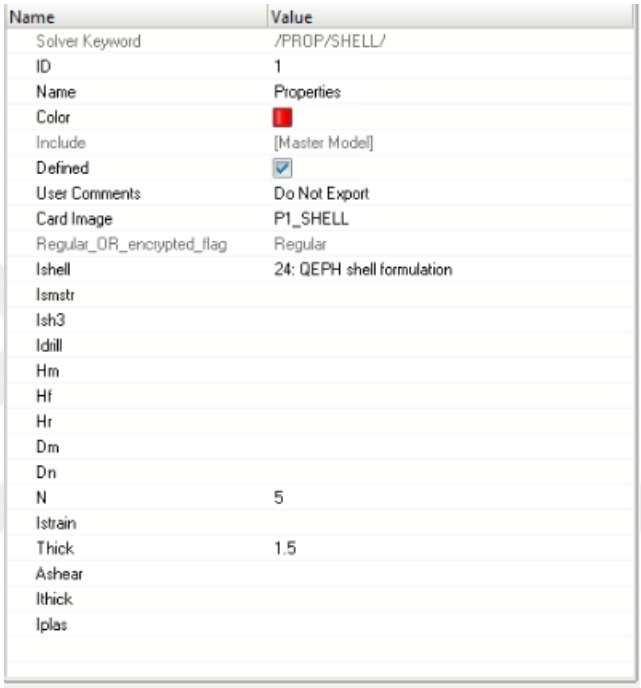


Şekil 3.25: H4 modeli ağ yapısı

3.2.2. Kabuk eleman özelliklerinin tanımlanması

Kabuk elemanların eleman özellikleri Radioss yazılımında bulunan Properties sekmesinden tanımlanmıştır. Eleman özelliği Card Image sekmesinden P1_Shell

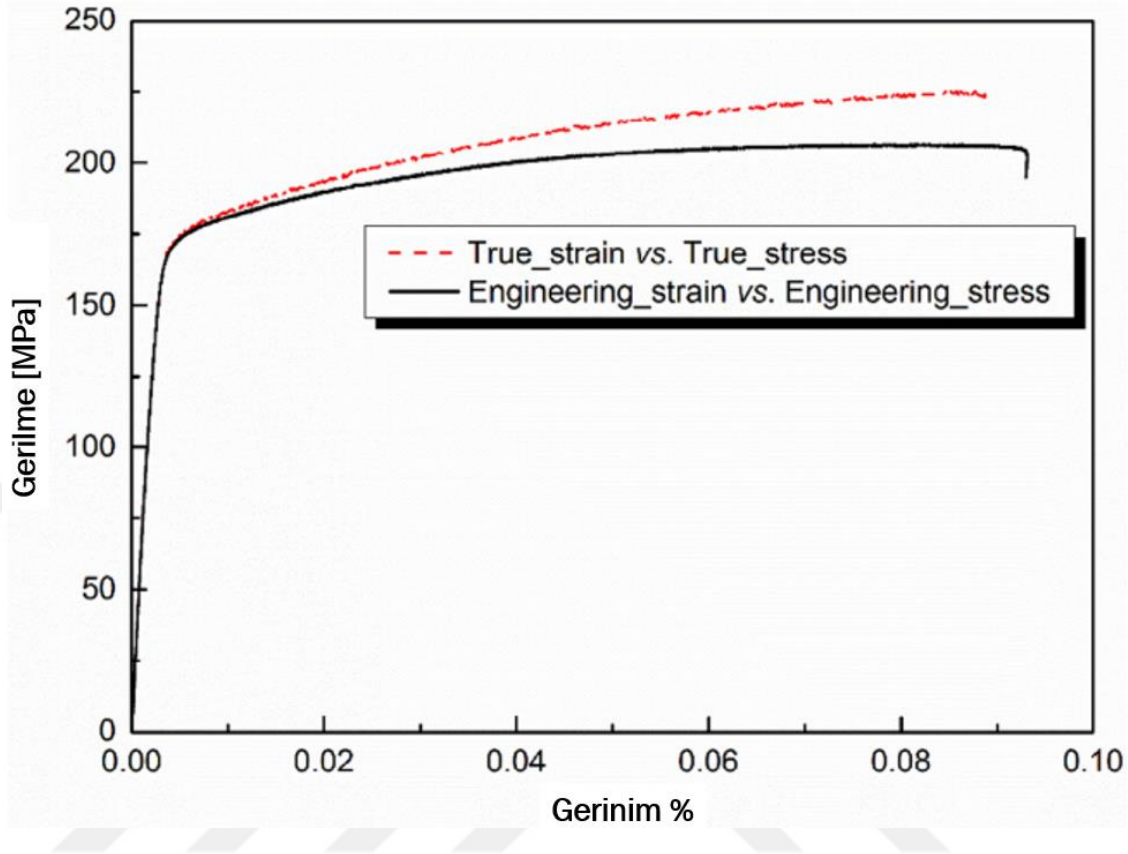
seçilerek elemanların kabuk eleman olduğu girilmiştir. Çalışmada kabuk eleman özellikleri Radioss yazılımının 24:QEPH Shell formulation olarak belirtilmiş ve hesaplama formülasyonunda kullanılacak integrasyon sayısı (N) sekmesi 5 olarak girilmiştir. (Altair Hyperworks, 2016) Şekil 3.26'da yazılımda kullanılan özellikler sekmesi gösterilmiştir.



Şekil 3.26: Radioss eleman özellikleri sekmesi

3.2.3. Analiz modeli malzeme tanımlaması

Yapılan çalışmada enerji sönümleyici malzemesi olarak Al 6063-T5 kullanılmıştır. Malzeme özelliklerini tanımlamak için literatürde Wu (2016) ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmadan yararlanılmıştır. Wu ve arkadaşları yaptıkları çalışmada Al 6063-T5 numunesini MTS 322 malzeme test cihazında ASTM E8M-04 standartına göre test etmiş ve malzemenin gerilme-gerinim eğrisine ulaşmışlardır. Elde edilen gerilme-gerinim grafiği Şekil 3.27'de, malzemenin yoğunluk, elastisile modülü, poisson oranı, akma gerilmesi ve kopma gerilmesi değerleri Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.



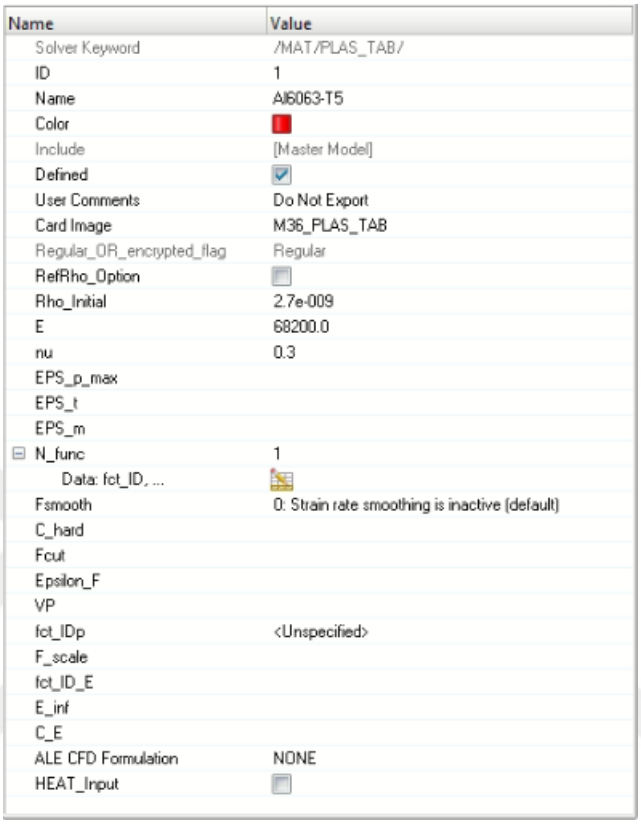
Şekil 3.27: Al 6063-T5 Gerilme-Gerinim grafiği (Wu ve diğerleri, 2016)

Çizelge 3.1: Al6063-T5 malzeme özellikleri (Wu ve diğerleri, 2016)

Malzeme	**Yoğunluk [g/cm^3]**	**Elastisile Modulü E [GPa]**	**Pisson Oranı**	**Akma Gerilmesi [MPa]**	**Kopma Gerilmesi [MPa]**
AA6063-T5	2.70	68.2	0.3	180	206

Malzeme özelliklerinin Radioss yazılımına aktarılması yazılımda bulunan Materials sekmesi ile yapılmıştır. Analiz yapılırken malzeme kartı M36_Plas_Tab olarak seçilmiştir. M36_Plas_Tab kartı elastik-plastik malzemelerin analizlerini gerçekleştirmek için kullanılan malzeme kartıdır. (Altair Hyperworks, 2016) Malzemenin plastik bölgedeki davranışları Gerilme-Gerinim grafiğindeki Gerçek Gerilme-Gerinim

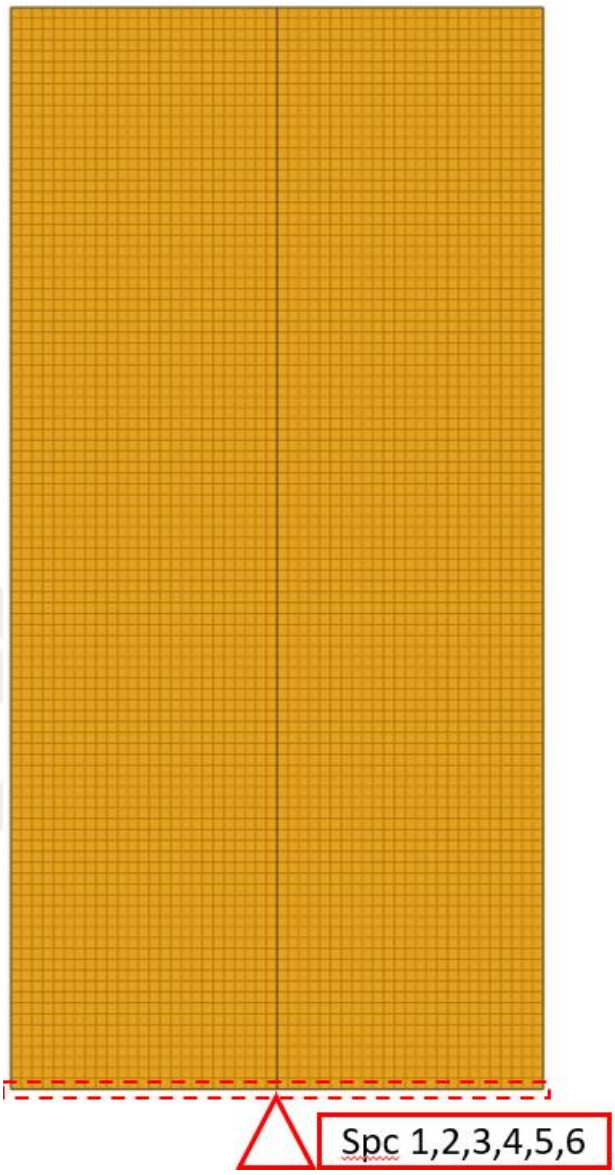
değerlerin yazılıma aktarılması ile tanımlanmıştır. (bkz. Şekil: 3.27) Şekil 3.28'de yazılım üzerindeki malzeme sekmesi gösterilmiştir.



Şekil 3.28: Radioss yazılımı malzeme sekmesi

3.2.4. Rijit duvar ve analiz sınır şartlarının tanımlanması

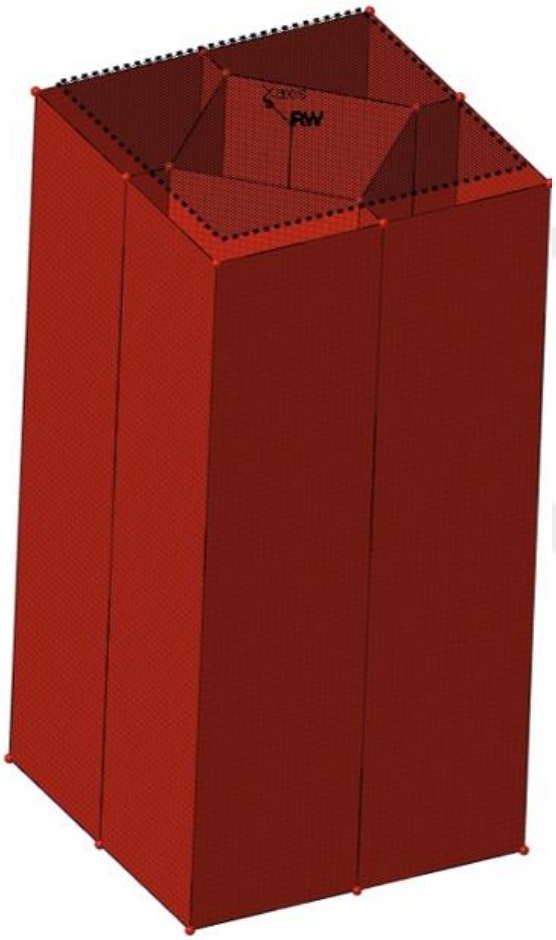
Çalışma kapsamında yapılan analizlerde enerji sönümleyiciler bir uçlarından sabitlenerek diğer uçlarından rijit duvar ile eksenel yönde çarpıştırılmıştır. Bunun için enerji yutucunun en alt sırasındaki elemanlar seçilerek altı serbestlik derecesinde hareketleri kısıtlanmıştır. Altı serbestlik derecesinde hareketleri kısıtlanmış elemanlar Şekil 3.29'da gösterilmiştir.



Şekil 3.29: Enerji sönümleyici modellerin hareketleri kısıtlanan noktaları

Sabitlenen enerji sönümleyiciler diğer uçtan eksenel yönde, 263 kg kütleye sahip ve deforme olmayan düzlemsel bir rijit duvar ile 10 m/s hızla çarpıştırılmıştır. Rijit duvar tanımlaması için Radioss yazılımındaki Rigid Walls sekmesi kullanılmıştır. Tanımlanan rijit duvar çarpışma sırasında şekil değiştirmeyip çarpışma sırasında oluşan tüm enerjinin enerji sönümleyici tarafından sönümlenmesini sağlar. Analiz modelinde rijit duvar ve

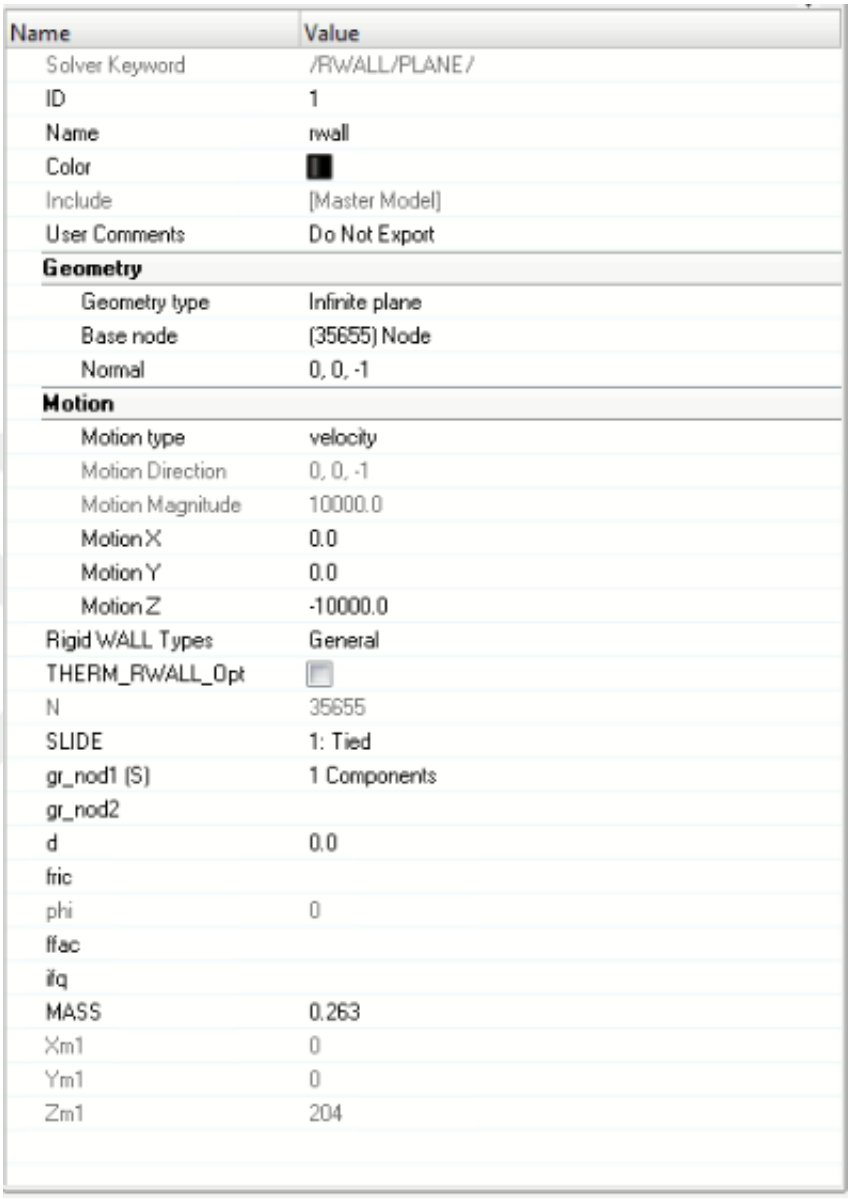
enerji sönümleyici arasındaki temas Radioss yazılımının Rigid Walls sekmesinde bulunan gr_node1 sekmesi ile tanımlanmıştır. Tanımlanan temas Şekil 3.30'da gösterilmiştir. Görselde bulunan kırmızı renkli model enerji sönümleyici, siyah renkli model ise rijit duvardır.



Şekil 3.30: Rijit duvar ve enerji yutucu modeller

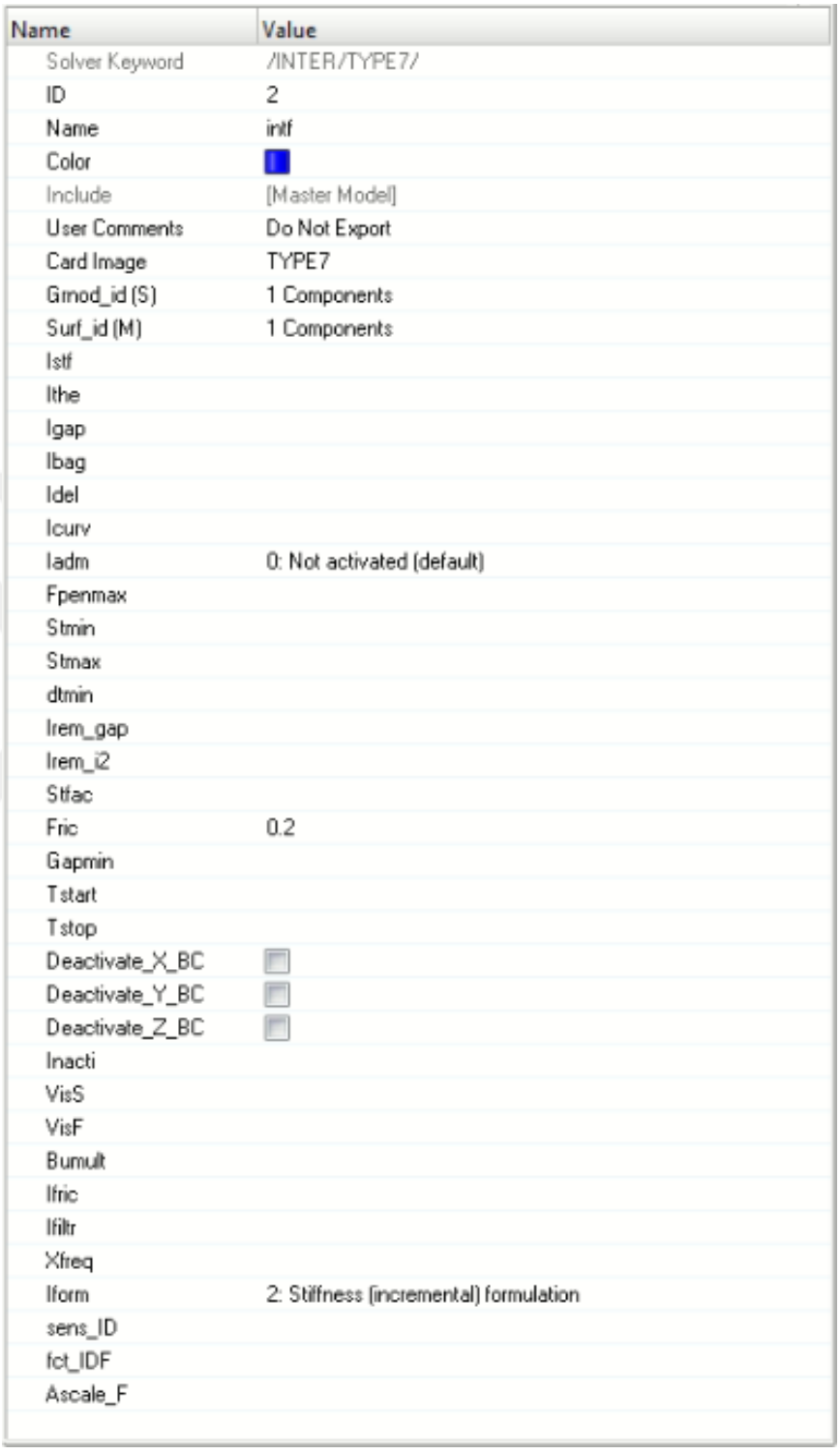
Şekil 3.31'de Rigid Wall sekmesinin görüntüsü paylaşılmıştır.

Enerji sönümleyicinin kendi içerisindeki temas tanımlaması için Radioss yazılımında bulunan Interfaces sekmesi kullanılmıştır. Bu sekmede temas tanımlaması için Radioss yazılımının Type 7 isimli kart imajı seçilmiştir. Interfaces sekmesi Şekil 3.32'de gösterilmiştir.



Name	Value
Solver Keyword	/RWALL/PLANE/
ID	1
Name	rwall
Color	
Include	[Master Model]
User Comments	Do Not Export
Geometry	
Geometry type	Infinite plane
Base node	(35655) Node
Normal	0, 0, -1
Motion	
Motion type	velocity
Motion Direction	0, 0, -1
Motion Magnitude	10000.0
Motion X	0.0
Motion Y	0.0
Motion Z	-10000.0
Rigid WALL Types	General
THERM_RWALL_Opt	
N	35655
SLIDE	1: Tied
gr_nod1 (S)	1 Components
gr_nod2	
d	0.0
fric	
phi	0
ffac	
ifq	
MASS	0.263
Xm1	0
Ym1	0
Zm1	204

Şekil 3.31: Radioss Rigid Wall sekmesi



Şekil 3.32: Radioss Interfaces sekmesi

3.3. Analiz Doğrulama Çalışması

Analizlerin doğruluğunun ispatlanması için literatürde Wu ve ark. (2016) tarafından yapılan çalışmadan yararlanılmıştır. Wu ve ark. (2016) yaptıkları çalışmada tasarladıkları enerji sönümleyicilerin sayısal olarak analizlerini yapmış, daha sonra yaptıkları analiz sonuçları ile karşılaştırarak yapılan analiz çalışmalarını doğrulamışlardır. Bu çalışmada yapılan test çalışması baz alınarak yapılan test fiziksel test analiz yazılımında modellenmiş ve çözdürülmüştür. Literatürde yapılan test çalışması ve tez çalışması kapsamında yapılan analiz karşılaştırdığında sonuçların birbirine yakın olduğu gözlemlenmiştir.

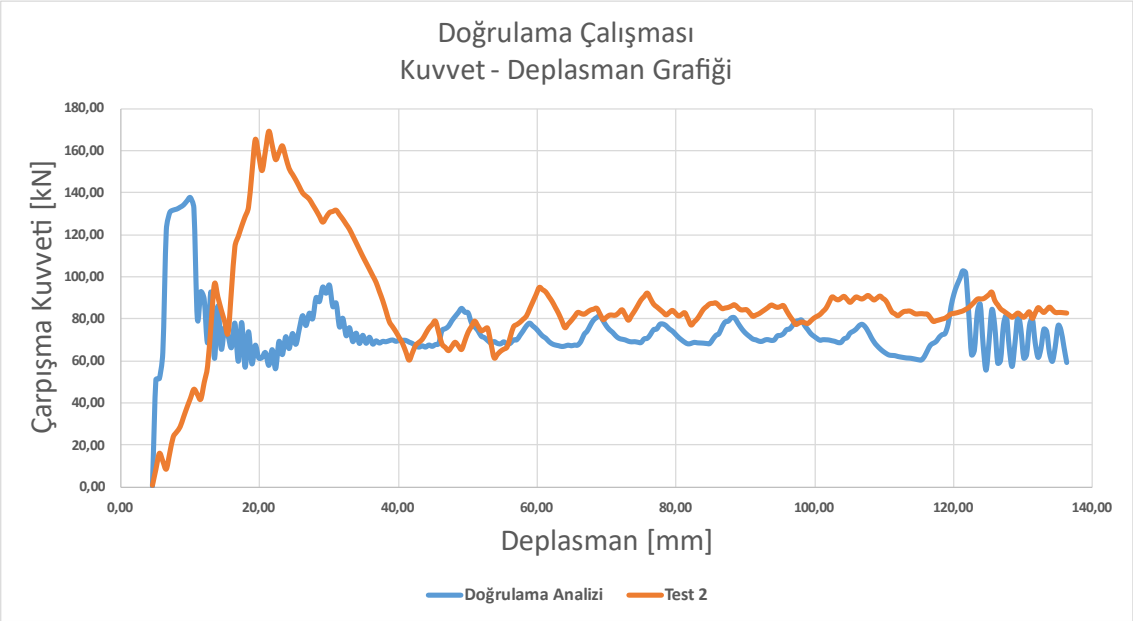
Wu ve ark. (2016) tasarladıkları C5 tüpü ile yaptıkları 2. fiziksel test çalışmasında sönümlenen enerji miktarını 9.55 kJ olarak tespit etmişlerdir. Tez çalışması kapsamında yapılan doğrulama çalışmasında elde edilen sönümlenen enerji miktarı ise 9.75 kJ değerindedir.

Yapılan doğrulama çalışmasının fiziksel test ile enerji sönümleme parametreleri değerleri üzerinden karşılaştırması Çizelge 3.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2: Doğrulama çalışması ve fiziksel test karşılaştırması

	OEK [kN]	**MEK [kN]**	**EKV**	**ÖEE [kJ/kg]**	**SEM [kJ]**
C5 Tüpü Test 2	79.64	181.99	0.44	22.98	9.55
Doğrulama Analizi	81.25	137.52	0.59	25	9.75
Hata Oranı [%]	-2.02	24.41	-34.97	-8.79	-2.09

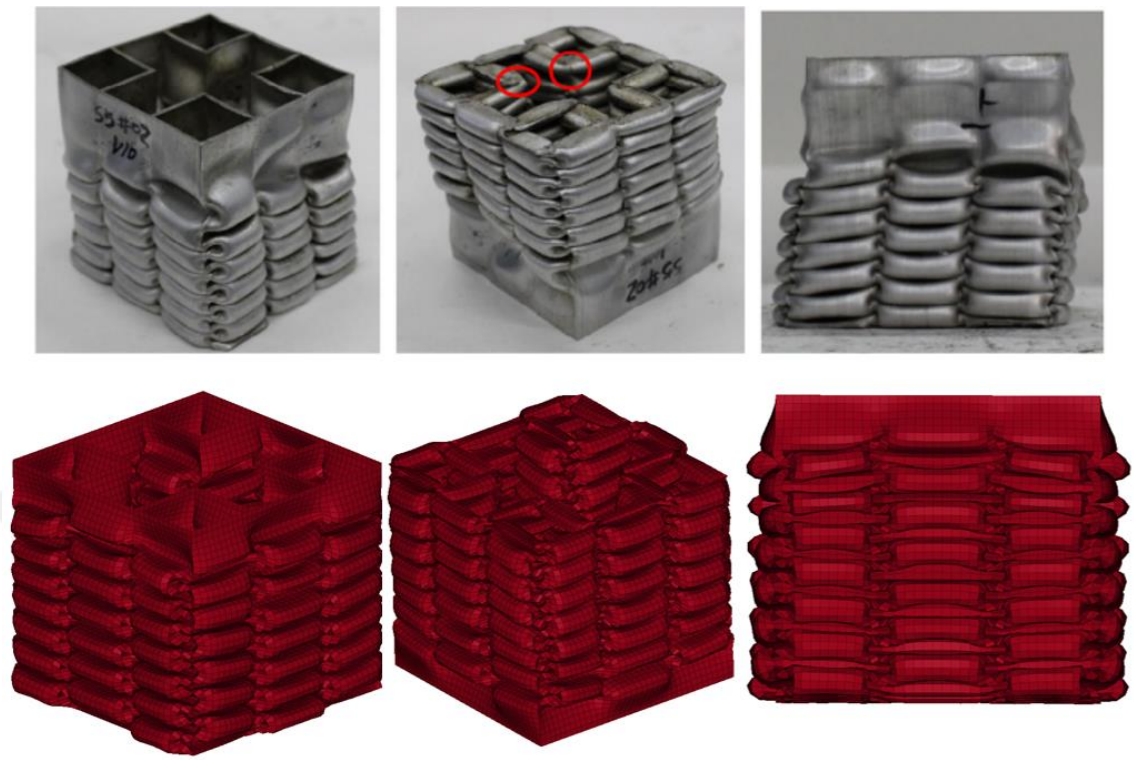
Yapılan doğrulama çalışmasının Çarpışma Kuvveti – Deplasman grafiği Şekil 3.33'te gösterilmiştir. Şekil 3.33'te görüldüğü gibi analiz sonuçlarının ve test sonuçlarının genel olarak birbirine paralel davranışı analizin tutarlı olduğunun göstergelerindendir.



Şekil 3.33: Doğrulama çalışması Çarpışma Kuvveti - Deplasman Grafiği

Şekil 3.33 ve Çizelge 3.2 de görüldüğü üzere analiz ve fiziksel test sonuçları arasında MEK parametresinde farklılıklar görülmektedir. Bu farklılığın sebebi analiz modelinde burkulmanın başlangıç noktasını kontrol altında tutmak için modellediğimiz başlatıcılardır. Başlatıcılar analiz modelinde enerji sönümleyicinin alt bölgesindeki bir sıra elemanın 0.2mm içeri ötelenmesi ile oluşturulmuştur.

Şekil 3.34'te analiz sonuçlarındaki enerji yutucunun burkulma şekli ve literatür çalışmasında yapılan test sonucundaki burkulma şekilleri gösterilmiştir. Analiz sonuçları ve test sonuçlarındaki burkulma şekilleri birbirini doğrular niteliktedir.



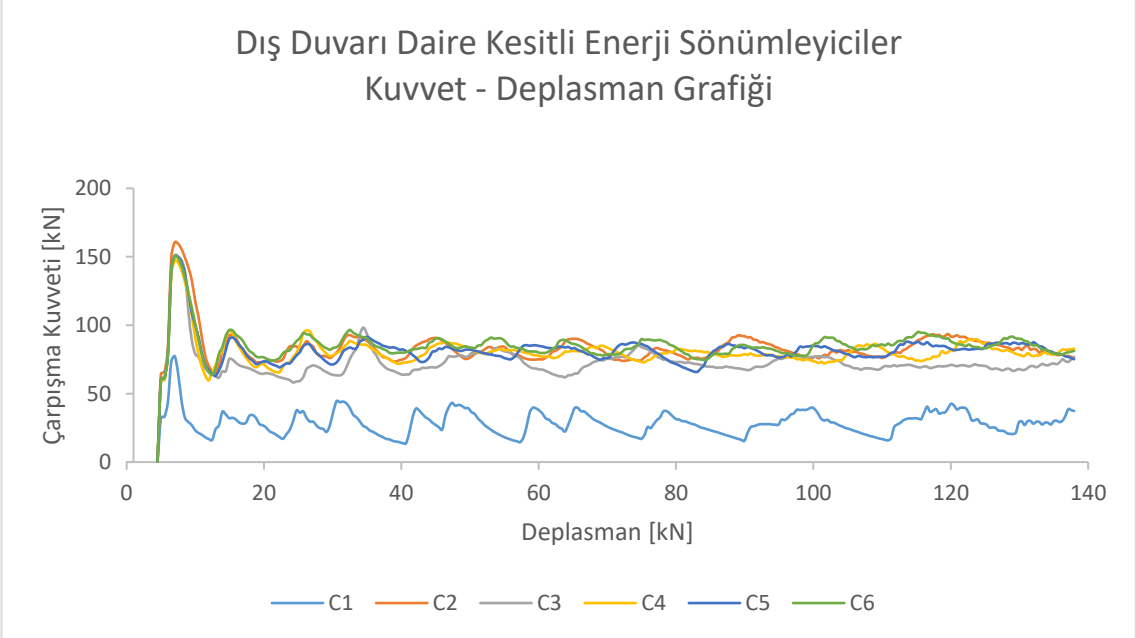
Şekil 3.34: Burkulma şekillerinin test ve analiz sonuçlarının karşılaştırması (Wu ve diğerleri, 2016)

4. BULGULAR

Çalışmanın devamında yapılan analiz sonuçlarına yer verilecektir. Dört farklı grup halinde yapılan analizler ilk önce kendi aralarında değerlendirilerek her grubun kendi içerisinde en iyi modeli belirlenecek, daha sonra grupların en iyi sonuç veren modelleri birbirleri ile kıyaslanacaklardır.

4.1. Dış Duvarı Daire Kesitli Modellerin Analiz Sonuçları

Dış duvarı daire kesitli modellerin analiz sonuçları Şekil 4.1'deki grafikte gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde iç duvara ve bağlantı duvarlarına sahip bütün çok hücreli enerji sönümleyici modellerin tek hücreli modelden daha üstün performans verildiği görülmüştür. C2 modelinin maksimum ezilme kuvveti değeri diğer modellere göre daha yüksektir, bu durum enerji sönümleyiciler için istenmeyen bir durumdur.



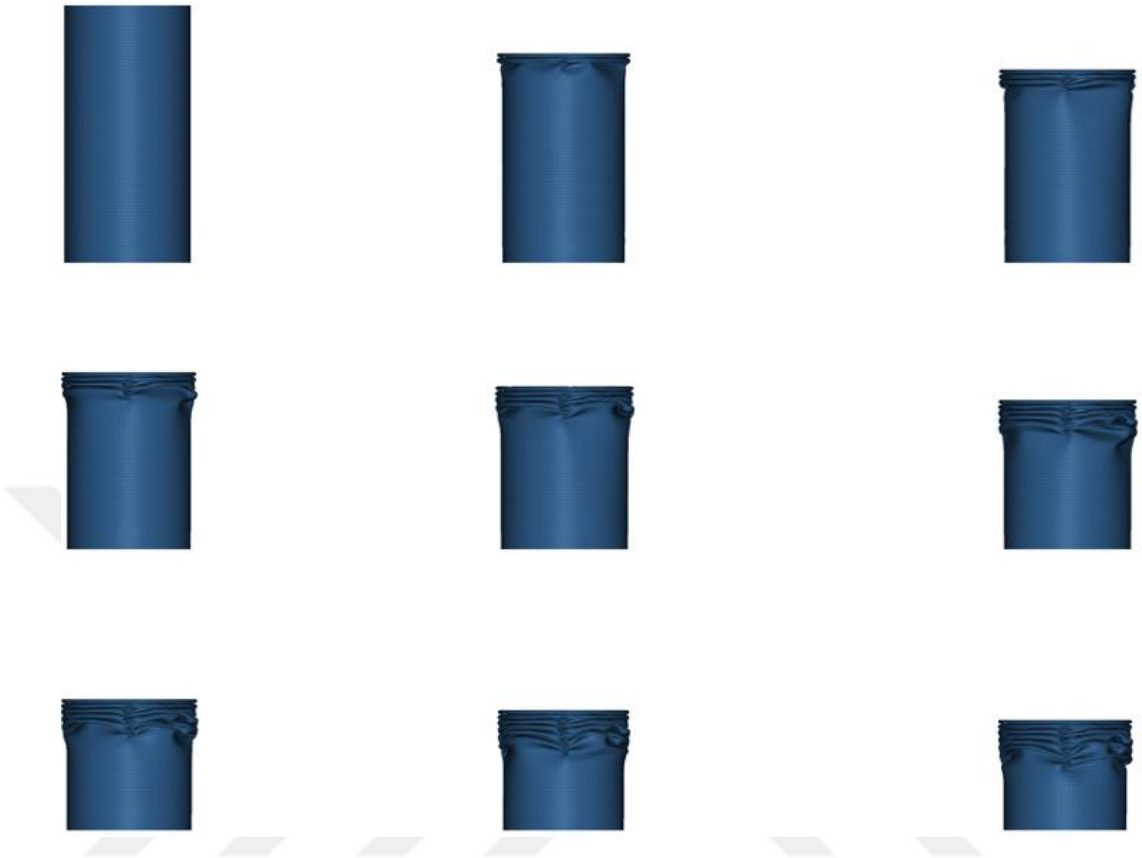
Şekil 4.1: Dış duvarı daire kesitli enerji sönümleyicilerin Çarpışma Kuvveti -Deplasman grafiği

Çizelge 4.1'de dış duvarı daire kesitli modellerin enerji sönümleme performansı parametreleri gösterilmiştir. Bu çizelgeden yola çıkarak tasarlanan en iyi enerji sönümleyici modele karar verilecektir.

Çizelge 4.1: Dış duvarı daire kesitli modellerin enerji sönümleme performansı parametreleri

	OEK [kN]	**MEK [kN]**	**EKV**	**ÖEE [kJ/kg]**	**SEM [kJ]**	**Kütle [kg]**
C1	28.44	77.40	0.37	15.36	3.84	0.25
C2	69.19	160.60	0.43	19.06	9.34	0.49
C3	70.33	150.04	0.47	18.35	8.44	0.46
C4	75.92	147.33	0.52	16.56	9.11	0.55
C5	76.75	150.87	0.51	20.02	9.21	0.46
C6	79.08	150.47	0.53	20.19	9.49	0.47

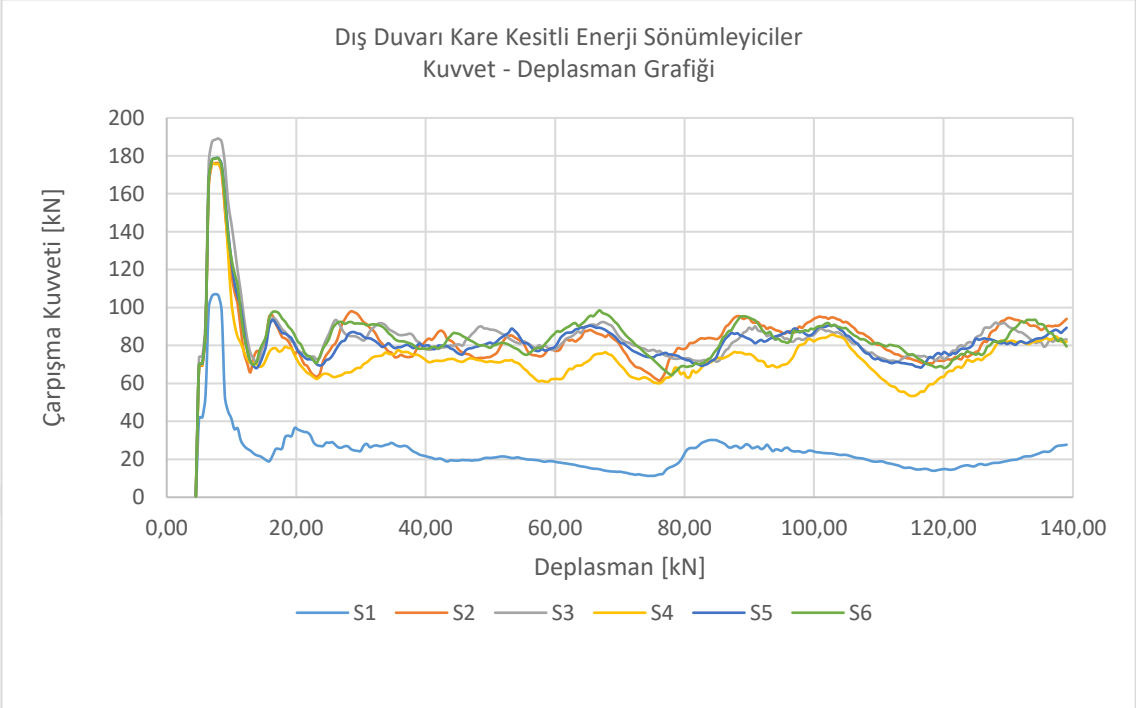
Çizelge 4.1'deki performans parametreleri incelendiğinde sönümlenen enerji miktarı en yüksek olan modelin C6 modeli olduğu görülmüştür. Aynı zamanda bu modelin özgül enerji emilimi ve ezilme kuvveti verimliliği değerlerinin de diğer modellerden yüksek seviyede olması C6 modelinin dış duvarı daire kesitli modeller arasında en iyi model olduğunu gösterir. C6 modelinin burkulma şekilleri Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2: C6 modelinin burkulma şekilleri

4.2. Dış Duvarı Kare Kesitli Modellerin Analiz Sonuçları

Dış duvarı kare kesitli modellerin analiz sonuçları Şekil 4.3'teki grafikte gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde iç duvara ve bağlantı duvarlarına sahip bütün çok hücreli enerji sönümleyici modellerin tek hücreli modelden daha üstün performans verildiği görülmüştür. S3 modelinin maksimum ezilme kuvveti değeri diğer modellere göre daha yüksektir, bu durum enerji sönümleyiciler için istenmeyen bir durumdur.



Şekil 4.3: Dış duvarı kare kesitli enerji sönümleyiciler Kuvvet-Deplasman grafiği

Çizelge 4.1'de dış duvarı kare kesitli modellerin enerji sönümleme performansı parametreleri gösterilmiştir. Bu çizelgeden yola çıkarak tasarlanan en iyi enerji sönümleyici modele karar verilecektir.

Çizelge 4.2: Dış duvarı kare kesitli modellerin enerji sönümleme performansı parametreleri

	OEK [kN]	**MEK [kN]**	**EKV**	**ÖEE [kJ/kg]**	**SEM [kJ]**	**Kütle [kg]**
S1	23.63	107.09	0.22	8.18	3.19	0.39
S2	78.17	176.13	0.44	17.70	9.38	0.53
S3	78.75	189.07	0.42	16.88	9.45	0.56
S4	70.92	176.00	0.40	16.37	8.51	0.52
S5	78.83	178.74	0.44	17.85	9.46	0.53
S6	78.75	178.64	0.44	18.17	9.45	0.52

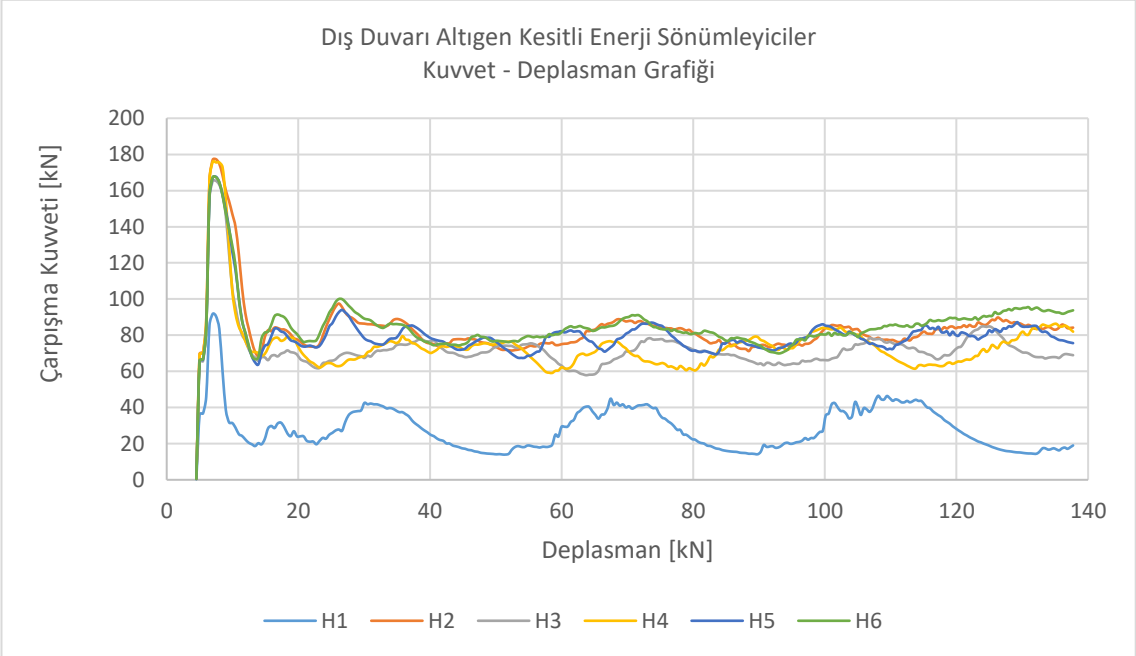
Çizelge 4.1’deki performans parametreleri incelendiğinde sönümlenen enerji miktarı en yüksek olan modelin S5 modeli olduğu görülmüştür. Fakat ezilme kuvveti verimlilikleri eşit olmasına karşın S6 modelinin özgül enerji emilimi değerinin S5 modelinden daha fazla olması taşıt ağırlığının taşıt tasarımının en önemli parametrelerinden birisi olduğu düşünüldüğünde S6 modelinin daha verimli bir model olduğunu söylememize sebep olur. S6 modelinin burkulma şekilleri Şekil 4.4’te gösterilmiştir.



Şekil 4.4: S6 modelinin burkulma şekilleri

4.3. Dış Duvarı Altıgen Kesitli Modellerin Analiz Sonuçları

Dış duvarı altıgen kesitli modellerin analiz sonuçları Şekil 4.5'teki grafikte gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde iç duvara ve bağlantı duvarlarına sahip bütün çok hücreli enerji sönümleyici modellerin tek hücreli modelden daha üstün performans verildiği görülmüştür. H2 modelinin maksimum ezilme kuvveti değeri diğer modellere göre daha yüksektir, bu durum enerji sönümleyiciler için istenmeyen bir durumdur. Aynı şekilde H4 modelinin maksimum ezilme kuvveti değerinin fazlalığı grafikte dikkat çeken hususlardan biridir. Bu iki modelin maksimum ezilme kuvvetlerinin yüksek seviyelerde olmasına karşın ortalama ezilme kuvvetlerinin diğer modellere göre ortalama değerlerde olması bu modellerin verimsizliğinin göstergesidir.



Şekil 4.5: Dış duvarı altıgen kesitli enerji sönümleyiciler Kuvvet-Deplasman grafiği

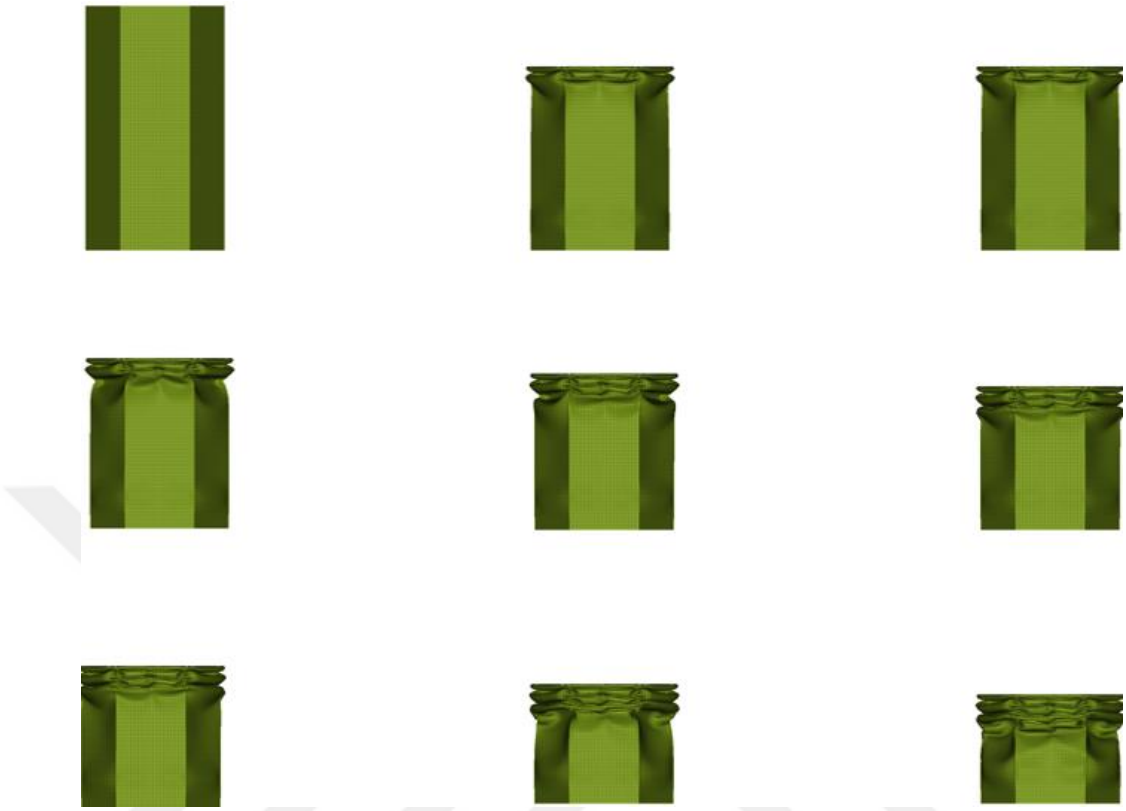
Çizelge 4.3'te dış duvarı altıgen kesitli modellerin enerji sönümleme performansı parametreleri gösterilmiştir. Bu çizelgeden yola çıkarak tasarlanan en iyi enerji sönümleyici modele karar verilecektir.

Çizelge 4.3'teki performans parametreleri incelendiğinde sönümlenen enerji miktarı en yüksek olan modelin H6 modeli olduğu görülmüştür. H5 modeli de ezilme kuvveti verimliliği ve özgül enerji emilimi değerleri incelendiğinde öne çıkan modellerden birisidir.

Çizelge 4.3: Dış duvarı altıgen kesitli modellerin enerji sönümleme performansı parametreleri

	OEK [kN]	**MEK [kN]**	**EKV**	**ÖEE [kJ/kg]**	**SEM [kJ]**	**Kütle [kg]**
H1	28.00	91.84	0.30	13.50	3.78	0.28
H2	69.04	177.33	0.39	17.58	9.32	0.53
H3	70.42	165.34	0.43	17.24	8.45	0.49
H4	71.58	176.00	0.41	17.62	8.59	0.52
H5	75.75	167.63	0.45	18.18	9.09	0.50
H6	79.00	167.49	0.47	18.96	9.48	0.50

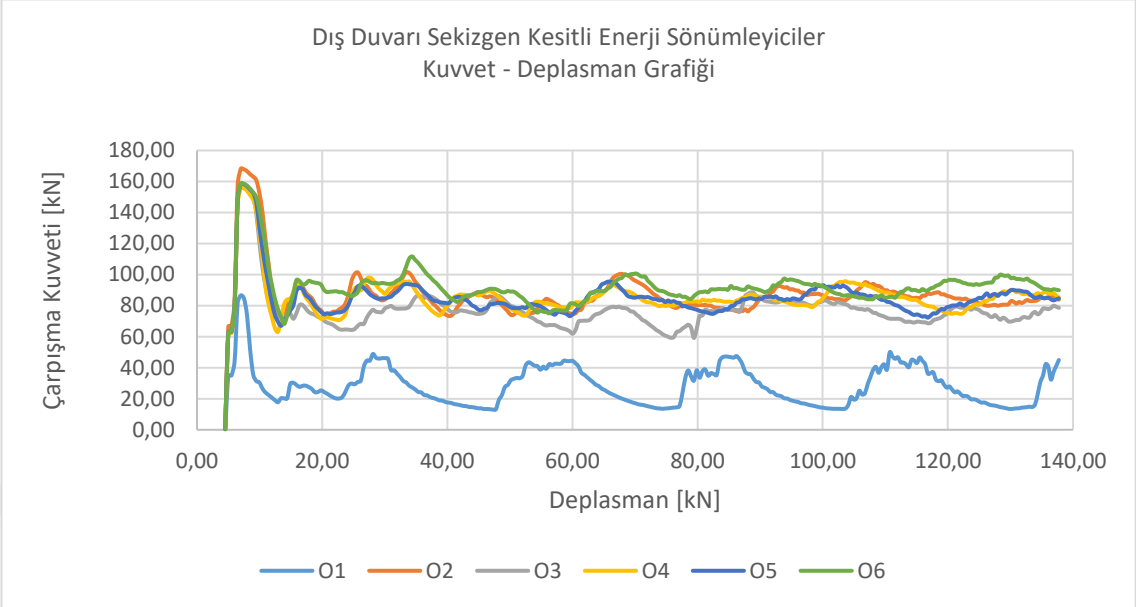
H2 modelinin sönümlenen enerji miktarı değerinin çok yüksek olmasına karşın ağır olması ezilme kuvveti verimi azlığı bu modelin performansının yüksek olmadığını gösterir. H6 modelinin burkulma şekilleri Şekil 4.6'de gösterilmiştir.



Şekil 4.6: H6 modelinin burkulma şekilleri

4.4. Dış Duvarı Sekizgen Kesitli Modellerin Analiz Sonuçları

Dış duvarı sekizgen kesitli modellerin analiz sonuçları Şekil 4.7'deki grafikte gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde iç duvara ve bağlantı duvarlarına sahip bütün çok hücreli enerji sönümleyici modellerin tek hücreli modelden daha üstün performans verildiği görülmüştür. H2 modelinin maksimum ezilme kuvveti değeri diğer modellere göre daha yüksektir, bu durum enerji sönümleyiciler için istenmeyen bir durumdur. Aynı şekilde H4 modelinin maksimum ezilme kuvveti değerinin fazlalığı grafikte dikkat çeken hususlardan biridir. Bu iki modelin maksimum ezilme kuvvetlerinin yüksek seviyelerde olmasına karşın ortalama ezilme kuvvetlerinin diğer modellere göre ortalama değerlerde olması bu modellerin verimsizliğinin göstergesidir.



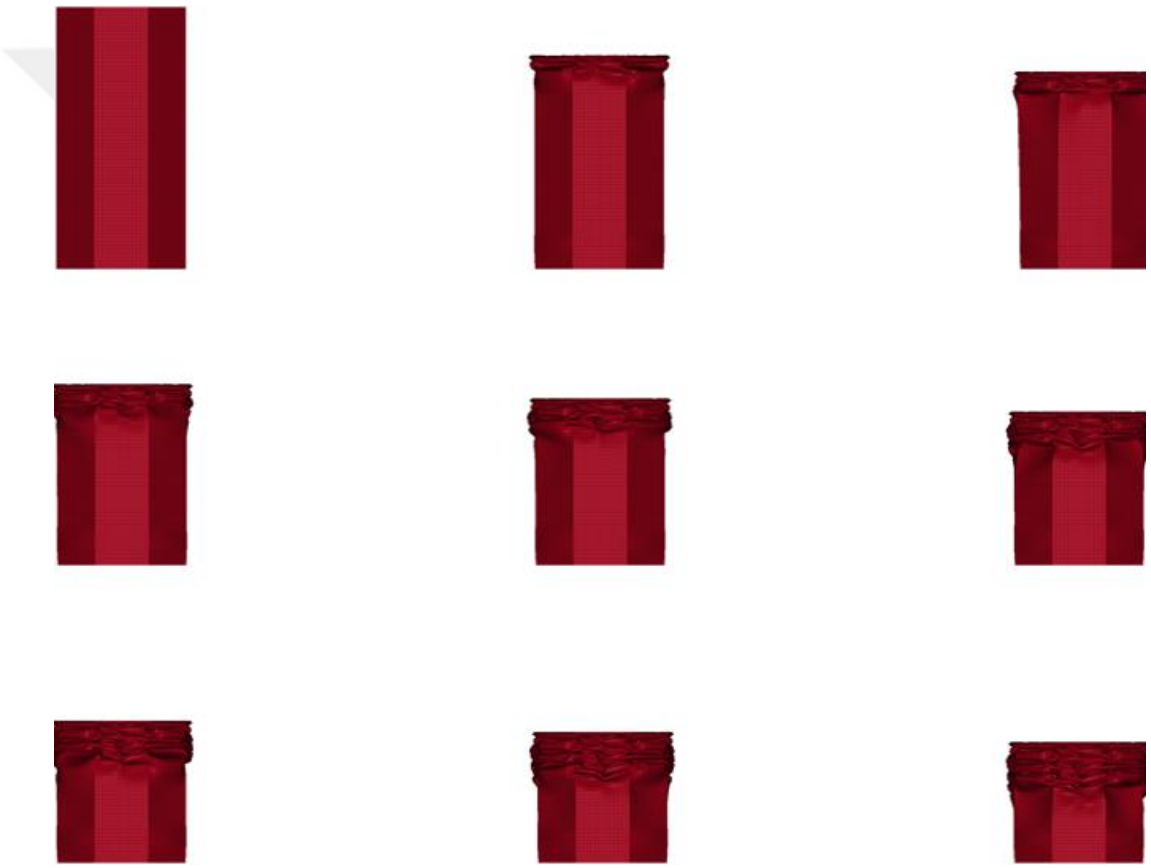
Şekil 4.7: Dış duvarı sekizgen kesitli enerji sönümleyicilerin Kuvvet-Deplasman grafiği

Çizelge 4.4'te dış duvarı sekizgen kesitli modellerin enerji sönümleme performansı parametreleri gösterilmiştir. Bu çizelgeden yola çıkarak tasarlanan en iyi enerji sönümleyici modele karar verilecektir.

Çizelge 4.4: Dış duvarı sekizgen kesitli modellerin enerji sönümleme performansı parametreleri

	OEK [kN]	**MEK [kN]**	**EKV**	**ÖEE [kJ/kg]**	**SEM [kJ]**	**Kütle [kg]**
O1	28.00	86.66	0.32	14.54	3.78	0.26
O2	80.00	168.19	0.48	18.82	9.60	0.51
O3	73.42	157.11	0.47	18.74	8.81	0.47
O4	79.17	156.23	0.51	20.21	9.50	0.47
O5	78.75	158.32	0.50	19.29	9.45	0.49
O6	83.17	158.32	0.53	20.37	9.98	0.49

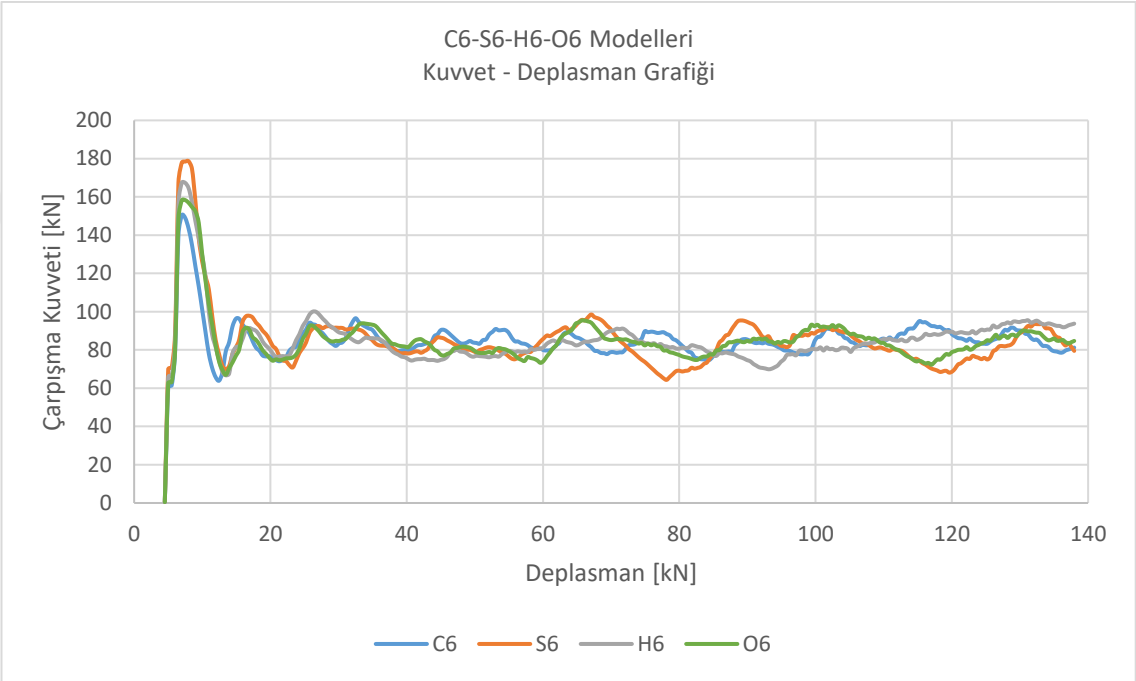
Çizelge 4.4'teki performans parametreleri incelendiğinde sönümlenen enerji miktarı en yüksek olan modelin O6 modeli olduğu görülmüştür. O2 modelinin sönümlenen enerji miktarı da diğer modellere göre oldukça yüksek seviyededir. Fakat O2 modelinin maksimum ezilme kuvveti çok yüksek seviyede olduğu için ezilme kuvveti verimliliği O6 modelinden düşüktür. Aynı zamanda O2 modelinin kütlesinin diğer modellerden fazla olması bu model için büyük bir dezavantajdır. Çizelge O6 modelinin en verimli model olduğu söylenebilir. O6 modelinin burkulma şekilleri Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.8: O6 modelinin burkulma şekilleri

4.5. Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Analiz sonuçları karşılaştırılırken bütün grupların en iyi modelleri alınmış ve birbirleri ile kıyaslanmışlardır. Şekil 4.9'da gösterilen grafik incelendiğinde S6 ve H6 modellerinin maksimum ezilme kuvveti değerleri diğer modellere kıyasla yüksek seviyelerdedir.



Şekil 4.9: C6-S6-H6-O6 grafikleri Kuvvet-Deplasman grafiği

Çizelge 4.5'te modellerin enerji sönümleme performansı parametreleri gösterilmiştir. Bu çizelgeden yola çıkarak tasarlanan en iyi enerji sönümleyici modele karar verilecektir.

Çizelge 4.5: C6-S6-H6-O6 modellerinin enerji sönümleme performansı parametreleri

	OEK [kN]	**MEK [kN]**	**EKV**	**ÖEE [kJ/kg]**	**SEM [kJ]**	**Kütle [kg]**
C6	79.08	150.47	0.53	20.19	9.49	0.47
S6	78.75	178.64	0.44	18.17	9.45	0.52
H6	79.00	167.49	0.47	18.96	9.48	0.50

O6	83.17	158.32	0.53	20.37	9.98	0.49

Çizelge 4.5'teki performans parametreleri incelendiğinde sönümlenen enerji miktarı en yüksek olan modelin O6 modeli olduğu görülmüştür. Diğer modellerin sönümlenen enerji miktarları da oldukça yüksek seviyededir. Fakat ezilme kuvvetlerinin yüksek seviyede olması nedeni ile ezilme kuvveti verimlilikleri O6 modelinden düşüktür. Aynı zamanda S6 modelinin kütlesinin diğer modellerden fazla olması bu model için büyük bir dezavantajdır. Çizelge O6 modelinin en verimli model olduğu söylenebilir. Bu modelin burkulma davranışları Şekil 4.8'de gösterilmiştir.

5. SONUÇ

Yapılan çalışmada çok hücreli enerji sönümleyiciler incelenmiştir. Çok hücreli enerji sönümleyicilerin dış ve iç duvarları daire, kare, altıgen ve sekizgen kesitler olmak üzere incelenmiş olup bu kesitlerin iç ve dış duvar olarak varyasyonları kullanılmıştır.

Yapılan çalışma sonuçlarına göre en etkin modelin O6 modeli olduğu görülmüştür. O6 modeli 42mm kenar uzunluğuna sahip sekizgen kesitli dış duvarı ve 23mm kenar uzunluğuna sahip sekizgen kesitli iç duvarı olan bir modeldir. Dış duvar ve iç duvar bağlantıları iç duvar kenarlarının orta noktalarından uzanan bağlantı duvarları ile sağlanmıştır. Model et kalınlığı 1.5mm'dir. Model kütlesi 0.49kg'dır.

Çalışma genelinde çalışılan dört grubun tamamında iç duvarı sekizgen kesitli olan modeller en iyi modeller olarak seçilmiştir. Buradan yola çıkarak iç duvarı sekizgen geometriye sahip enerji sönümleyicilerin daire, kare ve altıgen iç duvarı olan enerji sönümleyicilerden daha verimli olduğu sonucuna varılabilir.

Çalışma genelinde kesit geometrisi fark etmeksizin çok hücreli enerji sönümleyici modellerin klasik tek hücreli enerji sönümleyici modellere göre daha verimli oldukları görülmüştür.

Çalışma sonucunda devam çalışma olarak karar verilen en iyi model üzerinde şekil optimizasyonu yaparak maksimum ezilme kuvveti değerinin azaltılması ve sönümlenen enerji miktarı değerlerinin artırılması hedeflenebilir.

İkinci bir devam çalışma olarak çok hücreli enerji sönümleyicilerde bölgesel olarak köpük dolgu uygulanması ve bu köpük dolgunun yoğunluk optimizasyonları yapılarak maksimum ezilme kuvveti düşük olan ve sönümlenen enerji miktarı yüksek olan modeller elde edilmesi hedeflenebilir.

KAYNAKLAR

Ahire, A. S. (2014). Night Vision System in BMW. *International Review of Applied Engineering Research*, *4*(1), 1–10. http://www.ripublication.com/iraer.htm adresinden erişildi.

Ahmad, Z. ve Thambiratnam, D. P. (2009). Dynamic computer simulation and energy absorption of foam-filled conical tubes under axial impact loading. *Computers and Structures*, *87*(3–4), 186–197. doi:10.1016/j.compstruc.2008.10.003

Alavi Nia, A. ve 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. doi:10.1016/j.tws.2013.10.005

Albak, E. İ. (2020). Multi-objective crashworthiness optimization of thin-walled multi-cell tubes with different wall lengths. *International Journal of Crashworthiness*, *8265*. doi:10.1080/13588265.2020.1724015

Albak, E. İ. (2021). Crashworthiness design for multi-cell circumferentially corrugated thin-walled tubes with sub-sections under multiple loading conditions. *Thin-Walled Structures*, *164*(April), 107886. doi:10.1016/j.tws.2021.107886

Alkhatib, S. E., Tarlochan, F., Hashem, A. ve Sassi, S. (2018). Collapse behavior of thin-walled corrugated tapered tubes under oblique impact. *Thin-Walled Structures*, *122*(September 2017), 510–528. doi:10.1016/j.tws.2017.10.044

Altair Hyperworks. (2016). *Radioss crash ebook*. *Altair Hyperworks*.

Arnold, B. ve 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. doi:10.1533/ijcr.2004.0273

Bigdeli, A. ve Nouri, M. D. (2019). A crushing analysis and multi-objective optimization of thin-walled five-cell structures. *Thin-Walled Structures*, *137*(July 2018), 1–18. doi:10.1016/j.tws.2018.12.033

Bodlani, S. B., Yuen, S. C. K. ve Nurick, G. N. (2009). The Energy Absorption Characteristics of Square Mild Steel Tubes With Multiple Induced Circular Hole Discontinuities — Part I : Experiments. *Journal of Applied Mechanics*, *76*(1), 1–11. doi:doi.org/10.1115/1.3114967

Bodlani, S. B., Yuen, S. C. K. ve Nurick, G. N. (2014). The Energy Absorption Characteristics of Square Mild Steel Tubes With Multiple Induced Circular Hole Discontinuities — Part II : *Journal of Applied Mechanics*, *76*(July 2009), 1–10. doi:10.1115/1.3114967

Brouwer, N., Kloeden, H. ve Stiller, C. (2016). Comparison and evaluation of pedestrian motion models for vehicle safety systems. *2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)* içinde (ss. 2207–2212). IEEE. doi:10.1109/ITSC.2016.7795912

Chen, W. ve Wierzbicki, T. (2001). Relative merits of single-cell, multi-cell and foam-filled thin-walled structures in energy absorption. *Thin-Walled Structures*, *39*(4), 287–306. doi:10.1016/S0263-8231(01)00006-4

Claudio Rosito Jung ve Kelber, C. R. (2004). A lane departure warning system based on a linear-parabolic lane model. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2004*, 891–895. doi:10.1109/IVS.2004.1336503

Coelingh, E., Eidehall, A. ve Bengtsson, M. (2010). Collision Warning with Full Auto Brake and Pedestrian Detection - a practical example of Automatic Emergency Braking. *13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems* içinde (ss. 155–160). IEEE. doi:10.1109/ITSC.2010.5625077

Demirci, E. ve Yıldız, A. (2015). Yüksek Performanslı Enerji Yutucular ile Taşıt Çarpışma Güvenliğinin Geliştirilmesi. *Mühendis ve Makina*, *56*(663), 40–45.

Dong, Y., Hu, Z., Uchimura, K. ve Murayama, N. (2011). Driver inattention monitoring system for intelligent vehicles: A review. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, *12*(2), 596–614. doi:10.1109/TITS.2010.2092770

El-Hage, H., Mallick, P. K. ve Zamani, N. (2005). A numerical study on the quasi-static axial crush characteristics of square aluminum tubes with chamfering and other triggering mechanisms. *International Journal of Crashworthiness*, *10*(2), 183–196. doi:10.1533/ijcr.2005.0337

Elliott, M. R., Kallan, M. J., Durbin, D. R. ve Winston, F. K. (2006). Effectiveness of Child Safety Seats vs Seat Belts in Reducing Risk for Death in Children in Passenger Vehicle Crashes. *Archives of Pediatrics & Adolescent Medicine*, *160*(6), 617. doi:10.1001/archpedi.160.6.617

Eyvazian, A, Akbarzadeh, I. ve Shakeri, M. (2015). Experimental study of corrugated tubes under lateral loading. *Materials: Design and Applications*, *226*, 109–118. doi:10.1177/1464420712437307

Eyvazian, Arameh, Eltai, E., Musharavati, F., Taghipoor, H., Sebaey, T. A. ve Talebizadehsardari, P. (2020). Experimental and numerical investigations on axial crushing of square cross-sections tube with vertical wave. *Steel and Composite Structures*, *36*(2), 119–141. doi:10.12989/scs.2020.36.2.119

Eyvazian, Arameh, K. Habibi, M., Hamouda, A. M. ve Hedayati, R. (2014). Axial crushing behavior and energy absorption efficiency of corrugated tubes. *Materials and Design*, *54*, 1028–1038. doi:10.1016/j.matdes.2013.09.031

Eyvazian, Arameh, Tran, T. N. ve Hamouda, A. M. (2018). Experimental and theoretical studies on axially crushed corrugated metal tubes. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, *101*(November 2017), 86–94. doi:10.1016/j.ijnonlinmec.2018.02.009

Gao, Q., Wang, L., Wang, Y. ve Wang, C. (2016). Thin-Walled Structures Crushing analysis and multiobjective crashworthiness optimization of foam- fi lled ellipse tubes under oblique impact loading. *Thin Walled Structures*, *100*, 105–112. doi:10.1016/j.tws.2015.11.020

Hosseinipour, S. J. ve Daneshi, G. H. (2003). Energy absorbtion and mean crushing load of thin-walled grooved tubes under axial compression. *Thin-Walled Structures*, *41*(1), 31–46. doi:10.1016/S0263-8231(02)00099-X

Hou, S., Li, Q., Long, S., Yang, X. ve Li, W. (2007). Design optimization of regular hexagonal thin-walled columns with crashworthiness criteria. *Finite Elements in Analysis and Design*, *43*(6–7), 555–565. doi:10.1016/j.finel.2006.12.008

Hou, S., Li, Q., Long, S., Yang, X. ve Li, W. (2008). Multiobjective optimization of multi-cell sections for the crashworthiness design. *International Journal of Impact Engineering*, *35*(11), 1355–1367. doi:10.1016/j.ijimpeng.2007.09.003

Hou, S., Zhang, Z., Yang, X., Yin, H. ve Li, Q. (2014). Crashworthiness optimization of new thin-walled cellular configurations. *Engineering Computations (Swansea, Wales)*, *31*(5), 879–897. doi:10.1108/EC-11-2012-0300

Jakobsson, L., Lundell, B., Norin, H. ve Isaksson-Hellman, I. (2000). WHIPS – Volvo's whiplash protection study. *Accident Analysis & Prevention*, *32*(2), 307–319. doi:10.1016/S0001-4575(99)00107-4

Kim, H. S. (2002). New extruded multi-cell aluminum profile for maximum crash energy absorption and weight efficiency. *Thin-Walled Structures*, *40*(4), 311–327. doi:10.1016/S0263-8231(01)00069-6

Li, Z., Ma, W., Xu, P. ve Yao, S. (2019). Crushing behavior of circumferentially corrugated square tube with different cross inner ribs. *Thin-Walled Structures*, *144*(July), 106370. doi:10.1016/j.tws.2019.106370

Li, Z., Ma, W., Yao, S. ve Xu, P. (2021). Crashworthiness performance of corrugation-reinforced multicell tubular structures. *International Journal of Mechanical Sciences*, *190*(July 2020), 106038. doi:10.1016/j.ijmecsci.2020.106038

Lim, J.-H., Park, J.-S., Yun, Y.-W., Jeong, S.-B. ve Park, G.-J. (2015). Design of an airbag system of a mid-sized automobile for pedestrian protection. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, *229*(5), 656–669. doi:10.1177/0954407014551186

Ma, W., Li, Z. ve Xie, S. (2020). Crashworthiness analysis of thin-walled bio-inspired multi-cell corrugated tubes under quasi-static axial loading. *Engineering Structures*, *204*(September 2019), 110069. doi:10.1016/j.engstruct.2019.110069

Mahdi Abedi, M., Niknejad, A., Hossein Liaghat, G. ve Zamani Nejad, M. (2012). Theoretical and experimental study on empty and foam-filled columns with square and rectangular cross section under axial compression. *International Journal of Mechanical Sciences*, *65*(1), 134–146. doi:10.1016/j.ijmecsci.2012.09.011

Marzbanrad, J., Abdollahpoor, A. ve Mashadi, B. (2009). Effects of the triggering of circular aluminum tubes on crashworthiness. *International Journal of Crashworthiness*, *14*(6), 591–599. doi:10.1080/13588260902896458

Meran, A. P. (2016). Solidity effect on crashworthiness characteristics of thin-walled tubes having various cross-sectional shapes. *International Journal of Crashworthiness*, *21*(2), 135–147. doi:10.1080/13588265.2015.1127584

Mohsenizadeh, S., Alipour, R., Shokri Rad, M., Farokhi Nejad, A. ve Ahmad, Z. (2015). Crashworthiness assessment of auxetic foam-filled tube under quasi-static axial loading. *Materials & Design*, *88*, 258–268. doi:10.1016/j.matdes.2015.08.152

Moon, S., Moon, I. ve Yi, K. (2009). Design, tuning, and evaluation of a full-range adaptive cruise control system with collision avoidance. *Control Engineering Practice*, *17*(4), 442–455. doi:10.1016/j.conengprac.2008.09.006

Rosique, F., Navarro, P. J., Fernández, C. ve Padilla, A. (2019). A Systematic Review of Perception System and Simulators for Autonomous Vehicles Research. *Sensors*, *19*(3), 648. doi:10.3390/s19030648

Rudin-Brown, C. M., Jenkins, R. W., Whitehead, T. ve Burns, P. C. (2009). Could esc (electronic stability control) change the way we drive? *Traffic Injury Prevention*, *10*(4), 340–347. doi:10.1080/15389580903043446

Shi, P. ve Xu, Z. (2018). Analysis of Seat Belt Anchorage Strength for Vehicles. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *301*(1). doi:10.1088/1757-899X/301/1/012127

Song, J., Chen, Y. ve Lu, G. (2012). Axial crushing of thin-walled structures with origami patterns. *Thin-Walled Structures*, *54*, 65–71. doi:10.1016/j.tws.2012.02.007

Sotelo, M. Á. ve Barriga, J. (2008). Blind spot detection using vision for automotive applications. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, *9*(10), 1369–1372. doi:10.1631/jzus.A0820111

Sun, G., Liu, T., Huang, X., Zhen, G. ve Li, Q. (2018). Topological configuration analysis and design for foam filled multi-cell tubes. *Engineering Structures*, *155*(October 2017), 235–250. doi:10.1016/j.engstruct.2017.10.063

Taghipoor, H., Eyvazian, A., Ghiaskar, A., Praveen Kumar, A., Hamouda, A. M. ve Gobbi, M. (2020). Experimental investigation of the thin-walled energy absorbers with different sections including surface imperfections under low-speed impact test. *Materials Today: Proceedings*, *27*(2), 1498–1504. doi:10.1016/j.matpr.2020.03.006

Tancogne-Dejean, T., Spierings, A. B. ve Mohr, D. (2016). Additively-manufactured metallic micro-lattice materials for high specific energy absorption under static and dynamic loading. *Acta Materialia*, *116*, 14–28. doi:10.1016/j.actamat.2016.05.054

Tarlochan, F., Samer, F., Hamouda, A. M. S., Ramesh, S. ve Khalid, K. (2013). Design of thin wall structures for energy absorption applications: Enhancement of crashworthiness due to axial and oblique impact forces. *Thin-Walled Structures*, *71*(October 2013), 7–17. doi:10.1016/j.tws.2013.04.003

Tota, A., Galvagno, E., Velardocchia, M. ve Vigliani, A. (2018). Passenger car active braking system: Model and experimental validation (Part I). *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, *232*(4), 585–594. doi:10.1177/0954406216686388

TÜİK. (2014). Karayolu Trafik Kaza İstatistikleri. *Haber Bülteni, TÜİK*. http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=18760 adresinden erişildi.

Velupillai, S. ve Guvenc, L. (2008). Tire Pressure Monitoring [Applications of Control]. *IEEE Control Systems Magazine*, *27*(99), x4–x4. doi:10.1109/mcs.2007.4339283

Vimal Kannan, I. ve Rajkumar, R. (2020). Crashworthiness and comparative analysis of polygonal single and bi-tubular structures under axial loading – experiments and FE modelling. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, (2014), 81–94. doi:10.15632/jtam-pl/128901

Wu, S., Zheng, G., Sun, G., Liu, Q., Li, G. ve Li, Q. (2016). On design of multi-cell thin-wall structures for crashworthiness. *International Journal of Impact Engineering*, *88*(February), 102–117. doi:10.1016/j.ijimpeng.2015.09.003

Xu, X., Zhang, Y., Wang, J., Jiang, F. ve Wang, C. H. (2018). Crashworthiness design of novel hierarchical hexagonal columns. *Composite Structures*, *194*(March), 36–48. doi:10.1016/j.compstruct.2018.03.099

Yamashita, M., Gotoh, M. ve Sawairi, Y. (2003). Axial crush of hollow cylindrical

structures with various polygonal cross-sections: Numerical simulation and experiment. *Journal of Materials Processing Technology*, *140*(1-3 SPEC.), 59–64. doi:10.1016/S0924-0136(03)00821-5

Yang, K., Xu, S., Zhou, S. ve Xie, Y. M. (2018). Multi-objective optimization of multi-cell tubes with origami patterns for energy absorption. *Thin-Walled Structures*, *123*(November 2017), 100–113. doi:10.1016/j.tws.2017.11.005

Zhang, X., Wen, Z. ve Zhang, H. (2014). Axial crushing and optimal design of square tubes with graded thickness. *Thin-Walled Structures*, *84*, 263–274. doi:10.1016/j.tws.2014.07.004