T.C.
KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

HÜCRESEL DOLGULU ALÜMİNYUM/PLA HİBRİT ÇARPIŞMA KUTULARININ YARI STATİK YÜKLEME KOŞULLARI ALTINDA EZİLME DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

TARIK EMRE ÖZDEMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DR. ÖĞR. ÜYESİ ERMAN ZURNACI

ARALIK - 2025
KASTAMONU

TEZ ONAYI

TARIK EMRE ÖZDEMİR tarafından hazırlanan "**Hücresel Dolgulu Alüminyum/PLA Hibrit Çarpışma Kutularının Yarı Statik Yükleme Koşulları Altında Ezilme Davranışlarının İncelenmesi** " adlı tez çalışmasının savunma sınavı **23.12.2025** tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman	Dr. Öğr. Üyesi Erman ZURNACI Kastamonu Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi	Prof. Dr. Fuat KARTAL Kastamonu Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi	Dr. Öğr. Üyesi Sabri UZUNER Düzce Üniversitesi	.....

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Enstitü Müdürü Prof. Dr. Selahattin KAYMAKÇI .....

TAAHHÜTNAME

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu; ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını, bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini bildirir ve taahhüt ederim.

TARIK EMRE ÖZDEMİR

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HÜCRESEL DOLGULU ALÜMİNYUM/PLA HİBRİT ÇARPIŞMA KUTULARININ YARI STATİK YÜKLEME KOŞULLARI ALTINDA EZİLME DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

TARIK EMRE ÖZDEMİR

KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
DANIŞMAN: DR. ÖĞR. ÜYESİ ERMAN ZURNACI

Çarpışma kutuları, otomotiv endüstrisinde araç ve yolcu güvenliğini artırmak amacıyla kullanılan en önemli pasif güvenlik elemanlarından birisidir. Bu yapılar, çarpışma anında ortaya çıkan kinetik enerjiyi kontrollü bir şekilde emerek darbeyi sönümlemeyi ve böylece hem yolcuların zarar görmesini hem de aracın yapısal bütünlüğünün bozulmasını engellemeyi hedefler. Bu çalışmada, tez kapsamında geliştirilen PLA dolgulu Al 6063 gövdeye sahip hibrit yapılı çarpışma kutularının yarı statik yük altındaki performansı deneysel ve istatistiksel olarak incelenmiştir. Geliştirilen çarpışma kutusunun hibrit yapısı, silindirik alüminyum dış boru ile bu borunun iç hacmini tamamen dolduran, eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiş tek parça silindirik polimer bir iç dolgudan oluşmaktadır. İç dolgu yapısı, eksen boyunca tanımlanmış ve optimize edilebilir segment yapıları içerecek şekilde tasarlanmıştır. Segment tasarımını optimize etmek amacıyla Taguchi deneysel tasarım tekniğinden yararlanılmıştır. Üretilen numuneler üzerinde gerçekleştirilen basma deneylerinin yararlanılarak sönümlenen enerji miktarı, maksimum ezilme kuvveti ve ortalama ezilme kuvveti olarak belirlenen mekanik performans kriterleri hesaplanmıştır. Tasarım parametreleri ile mekanik performans parametreleri arasındaki ilişki istatistiksel analiz yöntemleri ile değerlendirilmiştir. Ardından S/N oranı analizi ile mekanik performans parametrelerini optimize eden segment tasarımları belirlenmiştir.

Deneysel sonuçlar, önerilen hibrit yapı ile birlikte segment tasarımının kontrollü bir deformasyon sağladığını ve toplam enerji sönümleme kapasitesini artırdığını ortaya çıkarmıştır. Dış metal gövde ile iç polimer dolgu arasında oluşan etkileşimli deformasyon mekanizmasının, katlanma oluşumunu ve ezilme davranışını belirlemede kritik rol oynadığı belirlenmiştir. Tez çalışması, optimize edilebilir hibrit yapıdaki enerji sönümleyici bileşenlerin, farklı darbe senaryolarına uyarlanabilir bir tasarım yaklaşımı sunduğunu ortaya koymakta olup, elde edilen sonuçlar otomotiv, savunma ve makine mühendisliği uygulamaları için önemli bir potansiyel taşımaktadır.

ANAHTAR KELİMELER: Çarpışma kutusu, Hibrit yapı, Enerji sönümleme kapasitesi, Eklemeli imalat, Çarpışma dayanımı, Maksimum ezilme dayanımı, Taguchi optimizasyonu

Aralık 2025, 94 Sayfa

ABSTRACT

MSC THESIS

INVESTIGATION OF THE CRUSHING BEHAVIOR OF CELLULAR-FILLED ALUMINUM/PLA HYBRID CRASH BOXES UNDER QUASI-STATIC LOADING CONDITIONS

TARIK EMRE ÖZDEMİR

KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
SUPERVISOR: ASSIST. PROF. DR. ERMAN ZURNACI

Crash boxes are one of the most important passive safety elements used in the automotive industry to enhance vehicle and passenger safety. These structures aim to absorb the kinetic energy generated during a collision in a controlled manner, thereby absorbing the impact and preventing both passenger injury and damage to the vehicle's structural integrity. In this study, the performance of hybrid crash boxes with a PLA-filled Al 6063 body, developed within the scope of this thesis, was investigated experimentally and statistically under quasi-static loading. The hybrid structure of the developed crash box consists of a cylindrical aluminum outer tube and a single-piece cylindrical polymer inner filling, produced by additive manufacturing, that completely fills the inner volume of this tube. The inner filling structure was designed to include segment structures defined and optimized along the axis. The Taguchi experimental design technique was used to optimize the segment design. Mechanical performance criteria, such as the amount of absorbed energy, maximum crushing force, and average crushing force, were calculated using compression tests performed on the produced samples. The relationship between the design parameters and the mechanical performance parameters was evaluated using statistical analysis methods. Subsequently, segment designs that optimize mechanical performance parameters were determined through S/N ratio analysis.

Experimental results showed that the segment design, combined with the proposed hybrid structure, enables controlled deformation and enhances the total energy absorption capacity. The interactive deformation mechanism between the outer metal housing and the inner polymer filler was determined to play a critical role in determining folding formation and crushing behavior. This thesis demonstrates that energy-absorbing components with an optimized hybrid structure provide a design approach adaptable to various impact scenarios, and the results obtained hold significant potential for applications in automotive, defense, and mechanical engineering.

KEYWORDS: Crash box, Hybrid structure, Energy absorption capacity, Additive manufacturing, Crashworthiness, Maximum crush resistance, Taguchi optimization

December 2025, 94 Pages

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının her aşamasında bilgi birikimi ile başta akademik olmak üzere her anlamda desteklerini esirgemeyen ve bu süreçte harcadığı yoğun mesai ve sabırlarından ötürü değerli danışman hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Erman Zurnacı'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca yüksek lisans tez aşamasında bana maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen değerli aileme, fikir ve tavsiyeleriyle her daim yanımda olan değerli eşime sonsuz teşekkür ve minnetlerimi sunmak isterim.

TARIK EMRE ÖZDEMİR

Kastamonu, 2025

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEZ ONAYI ..... **ii**
TAAHHÜTNAME ..... **iii**
ÖZET ..... **iv**
ABSTRACT ..... **v**
TEŞEKKÜR ..... **vi**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **ix**
TABLOLAR DİZİNİ ..... **xi**
1. GİRİŞ **1**
2. ÇARPIŞMA KUTULARI **3**
2.1 Çarpışma Kutularının Yapısı 4
2.2 Çarpışma Kutularının Geometrisi 5
2.2.1 Kare veya Dikdörtgen Kutu Geometrisi 6
2.2.2 Altıgen Kutu Geometrisi 6
2.2.3 Üçgen Kutu Geometrisi 7
2.2.4 Daire Kutu Geometrisi 8
2.2.5 Beşgen Kutu Geometrisi 8
2.3 Çarpışma Kutularının Türleri 9
2.3.1 Dolgulu Çarpışma Kutuları 9
2.3.2 Çentikli Çarpışma Kutuları 10
2.3.3 Delikli Çarpışma Kutuları 11
2.3.4 Oluklu Çarpışma Kutuları 13
2.4 Çarpışma Kutularında Kullanılan Malzeme Türleri 14
2.4.1 Alüminyum Alaşımları 14
2.4.2 Yüksek Mukavemetli Çelikler 15
2.4.3 Magnezyum Alaşımları 16
2.4.4 Kompozit Malzemeler 16
2.5 Çarpışma Kutularında Malzeme Seçimi Kriterleri 18
2.5.1 Enerji Sönümleme Kapasitesi 18
2.5.2 Düşük Yoğunluk 19
2.5.3 Dayanım ve Sünek Davranış 19
2.5.4 Maliyet ve Üretilebilirlik 20
2.5.5 Korozyon Direnci ve Uzun Ömür 21
2.6 Çarpışma Kutularının Değerlendirilmesinde Kullanılan Mekanik Performans Göstergeleri 22
2.6.1 Sönümlenen Enerji Miktarı 22
2.6.2 Özgül Enerji Emilimi 23
2.6.3 Ortalama Ezilme Kuvveti 24
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI **26**
4. PROBLEM TANIMI VE ÇALIŞMA MOTİVASYONU **34**
5. MATERYAL VE METOD **36**
5.1 Hibrit Çarpışma Kutusu Tasarımı 36
5.2 Düşük Yoğunluklu Eksenel Segment Tasarımı 37
5.3 Deneysel Test Numunelerinin Tasarımı ve Üretimi 39

5.4 Deney Tasarımı 45
5.5 Numunelerin Hazırlanması 48
5.6 Numunelerin Test Süreci 50
5.7 Deney Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi 52
5.7.1 Sönümlenen Enerji Performansının Değerlendirilmesi 54
5.7.2 Maksimum Ezilme Kuvvetinin Değerlendirilmesi 55
5.7.3 Ortalama Ezilme Kuvveti Yorumlanması 56
6. DENEYSEL SONUÇLARININ İSTATİSTİKSEL ANALİZİ 59
6.1 Varyans Analizi 59
6.2 Regresyon Analizi 61
6.3 Sinyal Gürültü Oranlarının Analizi 66
7. DEFORMASYONLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ 71
7.1 Al6063 Boru ve PLA Malzeme Uyumunun Değerlendirilmesi 71
7.2 İki Segmentli Numunelerin Değerlendirilmesi 72
7.3 Üç Segmentli Numunelerin Değerlendirilmesi 75
7.4 Dört Segmentli Numunelerin Değerlendirilmesi 79
8. TARTIŞMA VE SONUÇ 84
KAYNAKLAR 87
ÖZGEÇMİŞ 94

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Çarpışma kutularının bir araç şasisi üzerindeki konumu 3
Şekil 2.2 Katlanmış çarpışma kutusu ve sayısal analiz çalışması 4
Şekil 2.3 Kare geometrik şekle sahip çarpışma kutusu 6
Şekil 2.4 Altıgen geometriye sahip çarpışma kutusu 7
Şekil 2.5 Üçgen çarpışma kutusu 7
Şekil 2.6 Dairesel kutu geometrisine sahip çarpışma kutusu 8
Şekil 2.7 Beşgen çarpışma kutusu 9
Şekil 2.8 Dolgulu çarpışma kutularının üretimi 10
Şekil 2.9 Çentikli çarpışma kutusu örneği 11
Şekil 2.10 Delikli çarpışma kutusu örneği 12
Şekil 2.11 Çarpışma kutularında oluk yerleşimi 13
Şekil 2.12 Magnezyum alaşımının araç üzerinde kullanımı 16
Şekil 2.13 Kompozit malzemelerin bileşimi 17
Şekil 2.14 Çarpışma kutusunda sönümlenen enerji miktarı 22
Şekil 2.15 Kuvvet-yer değiştirme grafiği 25
Şekil 3.1 Plastik kılıflı numune, basma testi sonucunda numune 29
Şekil 3.2 Farklı duvar kalınlığına sahip çarpışma kutularının deformasyonu 30
Şekil 3.3 Al köpük takviyeli EPDM katkılı P6 plastik kılıf kullanılan çarpışma kutusu ve traversi çalışması 31
Şekil 3.4 W kesitli çarpışma kutusu tasarımı 32
Şekil 5.1 Geliştirilen hibrit çarpışma kutusunun yapısı 37
Şekil 5.2 Hibrit çarpışma kutusu iç dolgu yapısının tasarımı 39
Şekil 5.3 Çarpışma kutusu numunesinin boyutları 43
Şekil 5.4 Numune iç dolgu desenleri 44
Şekil 5.6 Numunelerin 3D yazıcı ile imalatı 48
Şekil 5.7 Çarpışma kutusu numuneleri 49
Şekil 5.8 L5 numunesinin ağırlığının ölçümü 50
Şekil 5.9 L1 numunesinin basma testi işlemi 51
Şekil 5.11 Numunelerin kıl testere yardımı ile kesimi, kesilmiş numune 52
Şekil 5.13 Numunelere ait SE değerleri 55
Şekil 5.14 Numunelere ait MEK değerleri 56
Şekil 5.15 Numunelere ait OEK değerleri 57
Şekil 6.1 Sönümlenen enerji değeri için %95 güven aralığı grafiği 64
Şekil 6.2 Maksimum ezilme kuvveti için %95 güven aralığı grafiği 65
Şekil 6.3 Ortalama ezilme kuvveti için %95 güven aralığı grafiği 65
Şekil 6.4 SE için S/N analizi sonucu elde edilen ana etkiler grafiği 67
Şekil 6.5 MEK için S/N analizi sonucu elde edilen ana etkiler grafiği 68
Şekil 6.6 OEK için S/N analizi sonucu elde edilen ana etkiler grafiği 69
Şekil 7.1 L1 numune grubu segment ve burkulma bölgeleri, kuvvet-uzama eğrisi 73
Şekil 7.2 L2 numune grubu segment ve burkulma bölgeleri, kuvvet-uzama eğrisi 74
Şekil 7.3 L3 numune grubu segment ve burkulma bölgeleri, kuvvet-uzama eğrisi 75

Şekil 7.4 L4 numune grubu segment ve burkulma bölgeleri, kuvvet-uzama eğrisi 76
Şekil 7.5 L5 numune grubu segment ve burkulma bölgeleri, kuvvet-uzama eğrisi 77
Şekil 7.6 L6 numune grubu segment ve burkulma bölgeleri, kuvvet-uzama eğrisi 78
Şekil 7.7 L7 numune grubu segment ve burkulma bölgeleri, kuvvet-uzama eğrisi 80
Şekil 7.8 L8 numune grubu segment ve burkulma bölgeleri, kuvvet-uzama eğrisi 81
Şekil 7.9 L9 numune grubu segment ve burkulma bölgeleri, kuvvet-uzama eğrisi 82

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1 Alüminyum alaşım türlerinin özellikleri 15
Tablo 2.2 Kompozit malzeme türlerinin çekme dayanımı ve ÖEE değerleri 17
Tablo 5.1 Al6063-T6 ‘nın mekanik özellikleri 40
Tablo 5.2 Al 6063 Al-Alaşımın kimyasal kompozisyonu 40
Tablo 5.3 PLA’nın mekanik özellikleri 41
Tablo 5.4 Deneysel tasarım parametreleri ve seviyeleri 45
Tablo 5.5 Deney tasarımı 46
Tablo 5.6 3D baskı parametreleri 48
Tablo 5.7 Numunelerin ortalama ağırlıkları 50
Tablo 5.8 Numunelere ait mekanik performans değerleri 52
Tablo 6.1 Sönümlenen enerji değeri için varyans analiz tablosu 59
Tablo 6.2 Maksimum ezilme kuvveti için varyans analiz tablosu 61
Tablo 6.3 Ortalama ezilme kuvveti için varyans analiz tablosu 62
Tablo 6.4 Faktörler için Regresyon analizi sonuçları 62
Tablo 6.5 Regresyon denklemleri 63
Tablo 6.6 Numunelere ait sayısal veriler ve optimizasyon değerleri 70

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar

BDM : Bilgisayar Destekli Mühendislik
CFRP : Karbon Fiber Takviyeli Polimerler
CI : %95 Güven Aralığı
DKO : Düzeltilmiş Kareler Ortalaması
DKT : Düzeltilmiş Kareler Toplamı
DP : Çift Fazlı Çelik
EKV : Ezilme Kuvveti Verimliliği
EYM : Ergiyik Yığma Modelleme
GFRP : Cam Elyaf Takviyeli Polimerler
MEK : Maksimum Ezilme Kuvveti
OEK : Ortalama Ezilme Kuvveti
ÖEE : Özgül Enerji Emilimi
PI : %95 Tahmin Aralığı
PLA : Polilaktik Asit
PU : Poliüretan
SD : Serbestlik Derecesi
SE : Sönümlenen Enerji Miktarı
SKT : Sıralı Kareler Toplamı
T6 : Temper Durumu
TRIP : Dönüşümle Tetiklenen Plastik Şekil Değişimi

Simgeler

Al : Alüminyum
E_t : Sönümlenen Toplam Enerji Miktarı
F : Kuvvet
kg : Kilogram
kj : Kilojul
kN : Kilonewton
Mg : Magnezyum
Mg_2Si : Magnezyum Silisit Bileşiği
mm : Milimetre
MPa : Megapaskal
ms : Milisaniye
N : Gürültü (Noise)
P : Anlamlılık
S : Sinyal (Signal)
Si : Silisyum

1. GİRİŞ

Günümüzde taşıt güvenliğinin artırılması, otomotiv endüstrisinin ve bilimsel araştırma topluluklarının üzerinde yoğunlaştığı en önemli mühendislik problemlerinden biri olarak öne çıkmaktadır. Artan trafik yoğunluğu, yüksek hız limitleri ve yol koşullarındaki çeşitlilik, araçların çarpışma anında yolculara maksimum koruma sağlayacak şekilde tasarlanmasını zorunlu kılmaktadır. Bu açıdan pasif güvenlik sistemlerinin geliştirilmesi ve araç gövdesinin darbe enerjisini kontrollü biçimde sönümlenmesi modern araç tasarımının temel gereksinimleri arasında yer almaktadır. Araçlarda çarpışma anında meydana gelen kinetik enerjinin bir kısmı, belirli bölgelerde oluşturulan kontrollü deformasyon mekanizmaları aracılığıyla sönümlenmektedir. Bu mekanizmalar yolcu kabinini korumak ve çarpışma sonrası yapısal bütünlüğü belirli ölçüde koruyabilmek için özel olarak tasarlanmış enerji emici bileşenlerden oluşur.

Enerji emici bileşenler arasında yer alan çarpışma kutuları, ön tampon ile araç şasisi arasında konumlandırılan ve çarpışma sırasında kontrollü olarak ezilerek enerjiyi plastik deformasyon yoluyla sönümleyen temel yapısal elemanlardır. Çarpışma kutuları, karmaşık araç geometrisinin sadeleştirilmiş bir temsili olarak çarpışma anında meydana gelen temasların, gerilmelerin ve deformasyonların modellenmesinde önemli bir rol oynar. Bu sayede deneysel çarpışma testlerinde ve sonlu elemanlar analizlerine dayalı sanal simülasyonlarda gerçek sistemin dinamik davranışını yüksek doğrulukla temsil edebilmek mümkün olmaktadır. Gerçek zamanlı çarpışma analizlerinde bu yapıların kullanılması hesaplama maliyetini önemli ölçüde düşürmekte ve tasarım parametrelerinin sistematik olarak incelenebilmesine olanak sağlamaktadır.

Çarpışma kutularının tasarımı sadece enerji sönümleme kapasitesini artırmakla kalmayıp aynı zamanda çökme modlarının kararlılığını ve tekrarlanabilirliğini de doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle kutunun geometrik şekli (kare, dairesel, altıgen vb.), malzeme türü (alüminyum alaşımları, çelik, kompozit malzemeler), tetikleyici (trigger) yapıları ve dolgu elemanları gibi parametrelerin doğru şekilde belirlenmesi

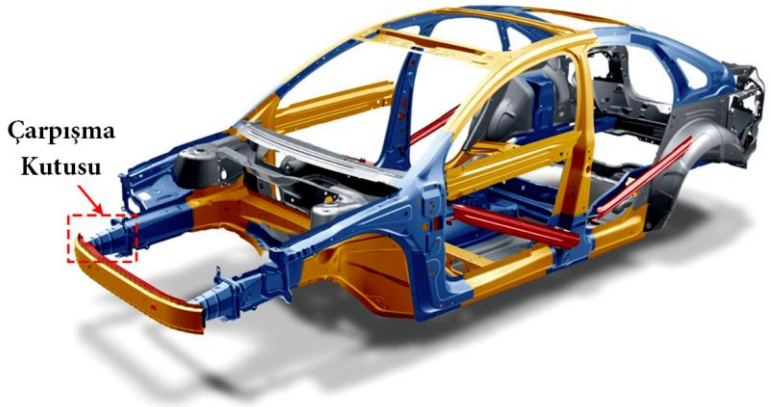
büyük önem taşır. Güncel literatürde özellikle dairesel kesitli çarpışma kutularının simetrik yapıları sayesinde her yönden benzer performans göstermeleri ve kararlı deformasyon modları üretmeleri nedeniyle avantajlı olduğu belirtilmektedir.

Dünya nüfusunun hızlı artışı ve buna bağlı olarak artan araç sayısı otomotiv sektöründe, enerji tüketimi ve çevresel etkiler açısından ciddi sorunlar yaratmaktadır. Artan araç kullanımı, fosil yakıt tüketimini ve karbon emisyonlarını önemli ölçüde yükseltmektedir. Bunun sonucunda çevre kirliliğinin ve iklim değişikliğinin hızlanmasına yol açmaktadır. Bu sebeple otomotiv üreticileri araçların yakıt verimliliğini artırmak ve karbon ayak izini azaltmak amacıyla araç ağırlığını minimize etmeye yönelmişlerdir. Özellikle yüksek mukavemet-ağırlık oranına sahip malzemelerin kullanımı araç yapılarında performans ve çevresel sürdürülebilirlik açısından ön plana çıkmaktadır.

Bu kapsamda, alüminyum ve alüminyum alaşımları sahip oldukları yüksek özgül mukavemet, düşük yoğunluk, korozyon direnci ve geri dönüştürülebilirlik özellikleri sayesinde geleneksel çelik malzemelere alternatif olarak öne çıkmaktadır. Alüminyum, özellikle çarpışma kutularında kullanımıyla dikkat çeken bir malzemedir. Bu malzeme, çarpışma anında oluşan enerjiyi plastik deformasyon yoluyla etkin biçimde sönümleyebilmekte ve aynı zamanda aracın toplam ağırlığını önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu sayede hem enerji sönümleme kapasitesi yüksek hem de yakıt verimliliği artmış, çevresel etkileri azalmış araç yapıları elde edilmektedir. Alüminyumun yüksek şekillendirilebilirliği farklı kesit geometrilerinin (kare, dairesel, altıgen, üçgen vb.) uygulanabilmesine olanak tanırken malzemenin sünek davranışı kontrollü bir ezilme modu oluşturulmasına imkân sağlar. Ayrıca, alüminyumun doğal oksit tabakası sayesinde kazandığı yüksek korozyon direnci çarpışma kutularının uzun süreli kullanımında yapısal bütünlüğü korumasına katkı sağlar.

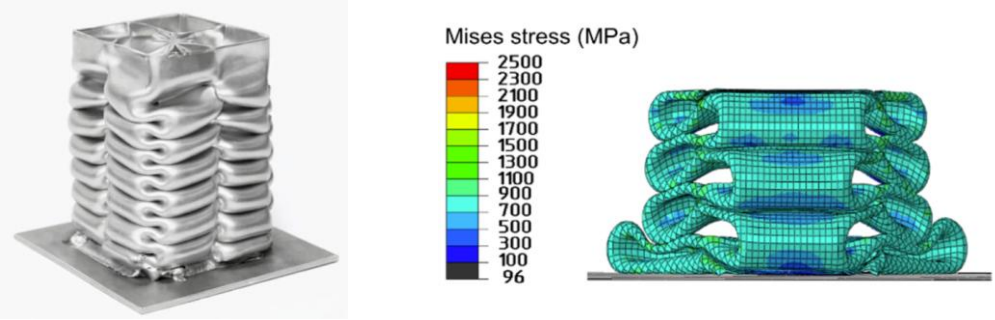
2. ÇARPIŞMA KUTULARI

Çarpışma kutuları taşıtlarda özellikle düşük hızlı çarpışmalarda oluşabilecek darbe kuvvetlerini sönümlemek ve yolcu kabinine iletilen darbe enerjisini azaltmak amacıyla geliştirilen yapısal elemanlardır. Genellikle aracın ön vda bölümlerinde tampon sistemleriyle entegre şekilde konumlandırılırlar. Çarpışma anında kontrollü bir şekilde deformasyona uğrayarak kinetik enerjiyi plastik şekil değiştirme yoluyla sönümler ve böylece yolcuların güvenliğini artırırlar (Jackowski, 2023). Bu yapılar tasarlanırken hafiflik, yüksek enerji sönümleme kapasitesi, maliyet etkinliği ve üretilebilirlik gibi kriterler göz önünde bulundurulmaktadır.



Şekil 2.1 Çarpışma kutularının bir araç şasisi üzerindeki konumu (Saber ve Amer, 2025)

Şekil 2.1'de araç tamponlarında çarpışma kutularının bulunduğu bölgeler görülmektedir. Çarpışma kutuları, katlanır ve değiştirilebilir yapısı sayesinde çarpışma esnasında (Şekil 2.2a) düşük hızda meydana gelen çarpışmalarda aracın ana yapısal elemanlarının zarar görmesini engelleyerek tamir masraflarını azaltır. Yüksek hız çarpışmalarında ise yolcu bölmesini koruma işlevi üstlenirler. Modern taşıtlarda çarpışma kutusu tasarımı bilgisayar destekli mühendislik (BDM) yöntemleriyle optimize edilir ve hem sanal simülasyonlar hem de fiziksel çarpışma testleriyle doğrulanır (Şekil 2.2b). Böylece güvenlik standartlarının sağlanmasının yanı sıra araçların toplam ağırlığının artırılmadan darbe dayanıklılığı iyileştirilebilir.



(a) (b)

Şekil 2.2 a) Katlanmış çarpışma kutusu ve b) sayısal analiz çalışması (Jafarzadeh-Aghdam, 2023; Shaikh, 2018)

2.1 Çarpışma Kutularının Yapısı

Modern mühendislik uygulamalarında özellikle otomotiv ve havacılık sektörlerinde yapısal güvenliğin sağlanması amacıyla darbe enerjisinin etkin biçimde sönümlenmesi büyük önem taşımaktadır. Taşıtlarda meydana gelen çarpışmalar sırasında enerji sönümlemesi yoluyla yolcu güvenliğini artırmak ve ana taşıyıcı yapıların hasar görmesini önlemek amacıyla kullanılan çarpışma kutuları pasif güvenlik sistemlerinin temel bileşenlerinden biri haline gelmiştir. Bu yapısal elemanların performansı büyük ölçüde tasarımsal parametrelere bağlı olup geometri, malzeme türü, duvar kalınlığı, kesit şekli ve tetikleyici mekanizmaların entegrasyonu gibi unsurların optimize edilmesiyle mekanik performans anlamlı düzeyde geliştirilebilmektedir (Wang, 2022).

Çarpışma kutularının yapısı, enerji sönümleme performansını maksimize etmek, ağırlığı minimize etmek ve üretim kolaylığını sağlamak amacıyla dikkatle belirlenmektedir. Çarpışma kutularının geometrik yapısı, çarpışma anında ortaya çıkan kinetik enerjinin verimli şekilde plastik deformasyon yoluyla sönümlenmesi üzerinde etkili faktörlerin başında gelmektedir (Jiga, 2016). Çarpışma kutusu için seçilen geometri, darbe enerjisinin ne düzeyde sönümleneceğini etkiler. Farklı kesit geometrileri, farklı deformasyon modları sergileyerek çökme sırasında oluşan burkulma ve gerilmeyi etkilemektedir (Kertesz ve Kovács, 2024). Dairesel kesitli çarpışma kutuları, eksenel burkulmaya karşı daha dengeli bir deformasyon gösterirken kare veya dikdörtgen kesitli profiller daha kontrolsüz bir şekilde deformasyona uğrar (Ateş vd., 2022). Bu durum deformasyonun belirli bölgelerde yoğunlaşmasını sağlayarak öngörülebilir kırılma davranışlarını mümkün kılmaktadır.

İdeal bir çarpışma kutusu, darbe enerjisini maksimum düzeyde sönümlerken ani ivmelenmeleri engelleyerek yolcu güvenliğini en üst düzeye çıkarmayı hedefler. Düşük bir maksimum ezilme kuvveti (MEK) değeri, çarpışma sırasında ani yük artışlarını önleyerek araç yapısında ve yolcu kabininde meydana gelebilecek zararı azaltır (Bryson, 2024). Bunun yanı sıra yüksek bir enerji katlanma verimi (EKV) ise yapının deformasyon süreci boyunca enerjiyi verimli biçimde sönümlediğini gösterir. Dolayısıyla, düşük MEK ve yüksek EKV kombinasyonu darbe enerjisinin kontrollü bir şekilde dağıtılmasını sağlar ve yapısal bütünlüğü koruyarak ideal bir çarpışma performansı sunar.

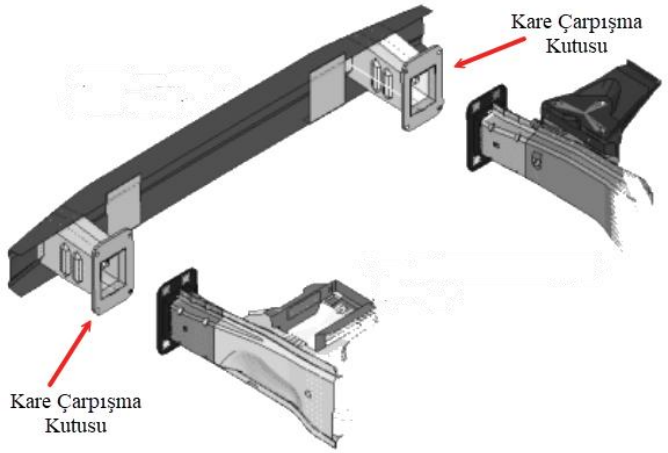
Özgül enerji emilimi (ÖEE), birim kütle başına sönümlenen enerji miktarını ifade eder ve hafiflik ile yüksek performansın bir arada gerektiği uygulamalarda kritik öneme sahiptir (Hwang vd., 2025). Çalışmalar, aynı malzeme ile üretilen farklı geometrik yapıların ÖEE değerlerinin farklılık gösterdiğini ortaya koymuştur (Kösedağ vd., 2023). Bu sebeple maksimum performans için çarpışma geometrisinin seçimi dikkatlice yapılmalıdır. Geometrik şeklin seçiminin bir diğer önemli yönü üretim süreçleriyle ilgilidir. Dairesel ve kare kesitli profiller yaygın üretim tekniklerine uygunken karmaşık geometriler daha yüksek üretim maliyetlerine ve tolerans problemlerine yol açabilir. Bu sebeple geometrik şekil seçimi yalnızca mekanik performans açısından değil üretim ve tasarım kriterleri açısından da optimize edilmelidir. Aşağıda çarpışma kutularında kullanılan geometrik şekiller ve özellikleri verilmiştir.

2.2 Çarpışma Kutularının Geometrisi

Çarpışma kutularının temel amacı çarpma anında oluşan kinetik enerjiyi plastik deformasyon yoluyla sönümlemek ve bu süreçte mümkün olan en düşük maksimum kuvvet seviyesinde enerji emilimini gerçekleştirmektir. Bu performans göstergeleri doğrudan doğruya yapının tasarımsal özelliklerinden etkilenmekte; dolayısıyla çarpışma kutularının geometrik ve yapısal optimizasyonu enerji sönümleme verimliliğinin artırılmasında temel bir araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır. Aşağıda, sağladıkları mekanik avantajlardan dolayı çarpışma kutularında kullanılan farklı kesit geometrileri hakkında bilgiler verilmiştir.

2.2.1 Kare veya Dikdörtgen Kutu Geometrisi

Çarpışma kutularında kare ve dikdörtgen kesitli profiller enerji sönümleme performansları ve kolay üretilebilirliklerinden dolayı sıklıkla tercih edilmektedir. Bu kesit geometrileri (Şekil 2.3) özellikle eksenel yönde uygulanan darbe yükleri altında gösterdikleri kontrollü katlanma ve öngörülebilir deformasyon davranışları ile öne çıkmaktadır. Bu geometriler, aynı kesit alanına sahip dairesel profillere göre genellikle daha yüksek spesifik enerji sönümleme değerleri sunmaktadır (Quanjin, 2020). Özellikle genişliği yüksek olan dikdörtgen profiller darbe yönüne dik düzlemde daha fazla deformasyon alanı sağlayarak enerji yayılımını artırabilir. Ancak uzunluk/genişlik oranı yüksek profillerde burkulma stabilitesi dikkatle değerlendirilmelidir (Altın vd., 2018).

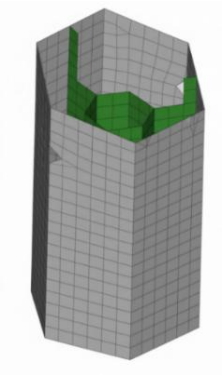


Şekil 2.3 Kare geometrik şekle sahip çarpışma kutusu (Hilmann, 2007)

2.2.2 Altıgen Kutu Geometrisi

Altıgen kesitli profiller çarpışma kutularında kullanılan alternatif geometrik formlar arasında yer almakta olup dairesel, kare ve dikdörtgen profillerin avantajlarını birleştiren kompozit bir yapı sunmaktadır (Şekil 2.4). Kesit formu, darbe yönünde öngörülebilir katlanma modları yüksek enerji sönümleme kapasitesi ve yük taşıma simetrisi gibi avantajlar sağlamaktadır. Altıgen kesitli profiller darbe anında köşe ve kenar bölgelerinde eş zamanlı olarak burkulma ve katlanma davranışı sergilemektedir (Davoudi, 2022). Bu yapı, deformasyonun homojen bir şekilde dağıtılmasına imkân

tanır. Özellikle eksenel yüklemelerde katmanlı ve simetrik kırılma modları gözlemlenmektedir.



Şekil 2.4 Altıgen geometriye sahip çarpışma kutusu (Xiong, 2023)

2.2.3 Üçgen Kutu Geometrisi

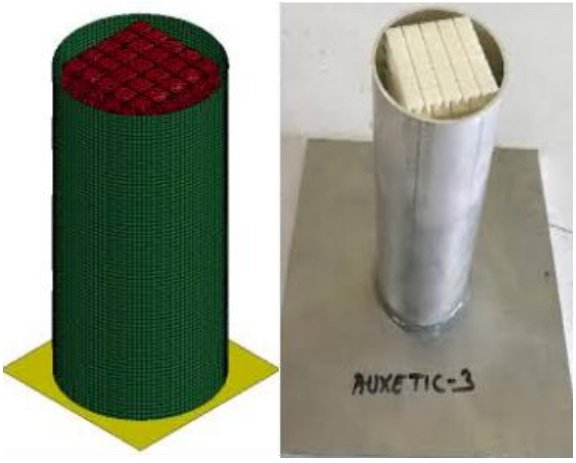
Üçgen kesitli profiller çarpışma kutularında daha az yaygın olsa da spesifik enerji sönümleme ve deformasyon kontrolü açısından potansiyel avantajlar sunmaktadır. Üçgen geometri, yapının darbe anında özellikle güçlü yöneltilmiş deformasyon sağlama kapasitesine sahip olmasına olanak tanır. Bu tip geometriler genellikle sert darbelere ve yüksek hızdaki çarpışmalara karşı dayanıklı olmak için tercih edilebilirler. Üçgen profiller darbe enerjisinin uçlardan merkeze doğru yönlendirilmesi sayesinde yüksek spesifik enerji sönümleme potansiyeline sahiptir (Şekil 2.5). Bununla birlikte üçgenin köşe yapısı ve iç yapısal bütünlüğü dışa doğru erken deformasyon göstererek enerji sönümlemeyi optimize eder (Shang, 2025). Özellikle düşük deformasyon alanı sağlamak ve yükleri belirli noktalarda yoğunlaştırmak için kullanılırlar.



Şekil 2.5 Üçgen çarpışma kutusu (Brown, 2020)

2.2.4 Daire Kutu Geometrisi

Dairesel kesitli profiller, çarpışma kutularında yaygın olarak kullanılan ve çeşitli avantajlar sunan geometrik şekillerdir. Bu kesitlerin en belirgin özelliği simetrik yapısı sayesinde darbe yönü ne olursa olsun daha dengeli deformasyon sağlamalarıdır (Nasution, 2023). Dairesel kesitler özellikle homojen enerji sönümleme ve yüksek darbe dayanımı gereken durumlar için tercih edilmektedir (Şekil 2.6). Dairesel kesitler yüksek enerji sönümleme kapasitesine sahiptir çünkü enerjinin büyük bir kısmı dairesel yapının çevresine yayılmaktadır. Bu profillerde çarpma enerjisinin dairesel yüzeye etki etmesiyle birlikte deformasyon her iki yönde (içeri ve dışarıya doğru) gerçekleşebilir (Abdullah, 2020). Bu geometri, kutunun yük taşıma kapasitesini artırırken darbe anında yapının dengede kalmasını sağlamaktadır. Dairesel profillerin en önemli avantajlarından birisi simetrik yapıları sayesinde her yönden benzer performans göstermeleridir. Özellikle eksenel darbe yüklerine karşı yüksek direnç sağlar ve lokal burkulma gibi olumsuz durumların önüne geçmektedir. Ayrıca bu kesitler gerilme dağılımını eşit bir şekilde yayarak deformasyon sırasında yapının kararlılığını artırır (Marzbanrad, 2009). Dairesel geometrinin bu özellikleri çarpışma kutusunun daha dayanıklı ve uzun ömürlü olmasını sağlamaktadır (Hussain, 2021).



Şekil 2.6 Dairesel kutu geometrisine sahip çarpışma kutusu (Usta, 2020)

2.2.5 Beşgen Kutu Geometrisi

Beşgen kesitli profiller çarpışma kutularında nadir kullanılan ancak belirli tasarım gereksinimlerine göre oldukça etkili olabilen geometrik şekillerdir (Şekil 2.7). Kesitler

özellikle yüksek enerji sönümlemesi ve darbe enerjisinin kontrollü yayılması açısından avantaj sağlar. Beşgen kesitli profiller darbe anında enerji sönümlenmesi sağlamak için optimize edilmiş tasarımlar sunar. Köşe yapısının katkısıyla enerjinin etkili bir şekilde yayılması sağlanır böylece yüksek spesifik enerji sönümlemesi sağlanır (Altın vd., 2018).



Şekil 2.7 Beşgen çarpışma kutusu (Zhao, 2019)

2.3 Çarpışma Kutularının Türleri

Çarpışma kutularının enerji sönümleme kapasitesini arttırmak ve deformasyon kabiliyetini geliştirmek amacıyla farklı yapılar geliştirilmiştir. Hem farklı malzemelerin kullanımı hem de tasarımsal değişikliklerle yeni geliştirilen çarpışma kutusu tasarımlarının mekanik özellikleri literatürde yapılan çalışmalarla değerlendirilmiştir. Bu bölümde farklı çarpışma kutusu yapıları değerlendirilirmiş, söz konusu tasarımların yapısal davranışları, enerji emilimi kapasiteleri ve deformasyon mekanizmaları incelenerek, farklı tasarım stratejilerinin mekanik performansa olan etkileri ortaya konulmuştur. Çalışmalar, tasarımsal değişikliklerin çarpışma kutularının mekanik dayanımı üzerinde etkili olduğunu göstermiştir.

2.3.1 Dolgulu Çarpışma Kutuları

Darbe enerjisinin etkin şekilde sönümlenmesi amacıyla geliştirilen tasarımlardan biri de dolgulu çarpışma kutularıdır. Bu tür yapılar içi farklı türde dolgu malzemeleriyle (köpük, alümina parçacıkları, metal süngerler vb.) desteklenmiş ince cidarlı profillerden oluşmaktadır (Şekil 2.8). Dolgu malzemesi, yapının ezilme sırasında daha fazla enerji sönümlemesini sağlayarak çarpışma performansını artırmaktadır. Aynı

zamanda deformasyon modlarının daha dengeli bir şekilde gelişmesine katkıda bulunmaktadır (Kösedağ vd., 2023).



Şekil 2.8 Dolgulu çarpışma kutularının üretimi (Muchhala, 2023)

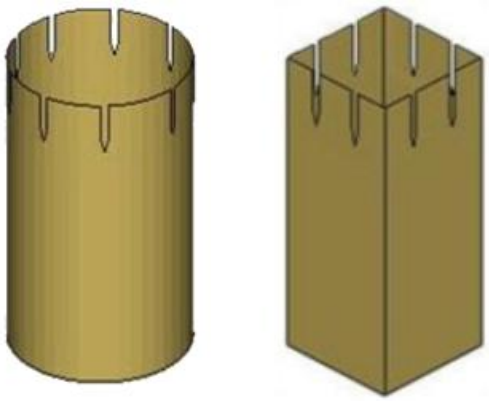
Dolgulu çarpışma kutularında kullanılan dolgu malzemesinin yoğunluğu, hücresel yapısı, yerleşim şekli ve mekanik özellikleri yapının genel performansını doğrudan etkilemektedir (Altın vd., 2018). Örneğin, özellikle düşük yoğunluklu köpük dolgular yapı ağırlığında anlamlı bir artışa neden olmadan enerji emilimini artırabilmektedir (Yeni vd., 2022). Bu özellik, hafiflik ve güvenlik kriterlerinin eş zamanlı karşılanmasına olanak tanımaktadır. Ayrıca dolgu malzemesinin kutu cidarlarıyla etkileşimi sayesinde burkulma veya lokal deformasyon gibi istenmeyen davranışlar da kontrol altına alınabilmektedir.

Yapılan çeşitli deneysel ve sayısal çalışmalar dolgulu çarpışma kutularının spesifik enerji emilimi değerlerinde kayda değer artış sağladığını göstermektedir (Bryson, 2024). Bununla birlikte dolgu malzemesinin tipi ve yerleşim stratejisine bağlı olarak maksimum ezilme kuvveti artış gösterebileceğinden tasarım sürecinde bu parametrelerin optimize edilmesi kritik öneme sahiptir. Bu nedenle dolgulu yapıların mühendislik tasarımında çok kriterli optimizasyon tekniklerinin kullanılması performans, ağırlık ve maliyet arasında denge kurulmasına katkı sağlayacaktır.

2.3.2 Çentikli Çarpışma Kutuları

Çarpışma kutuları çarpışma sırasında meydana gelen kinetik enerjiyi plastik deformasyon yoluyla sönümleyerek yolcu kabininde oluşabilecek ani yüklere karşı koruyucu bir tampon görevi görmektedir (Prabhaharan, 2022). Deformasyon davranışının daha öngörülebilir hale getirilmesi ve istenmeyen burkulma modlarının önlenmesi amacıyla çeşitli tetikleme yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemler arasında

en sık başvurulanlardan biri kutu profil yüzeylerine yapay çentikler eklenmesidir. Çentikler yapının belirli bölgelerinde geometrik zayıflıklar oluşturarak plastik deformasyonun bu noktalarda başlamasını ve ilerlemesini teşvik eder (Nasir Hussain, 2021). Böylece ezilme süreci boyunca katlanma modları düzenli, simetrik ve kontrollü bir biçimde gelişir. Şekil 2.9'da bir çentikli çarpışma kutusu örneği görülmektedir.



Şekil 2.9 Çentikli çarpışma kutusu örneği (Nasir Hussain, 2021)

Çentikli çarpışma kutuları özellikle maksimum darbe kuvvetinin azaltılması ve ortalama ezilme kuvvetinin artırılması yönünde ezilme kuvveti verimliliği değerini iyileştirme potansiyeli sunar. Çentiklerin şekli (V, U, Z, delik tipi vb.), boyutu, yerleşim sıklığı ve yönü gibi parametreler yapının enerji sönümleme kapasitesini ve deformasyon modlarını doğrudan etkileyen kritik tasarım değişkenleridir. Yapısal çentikler sayesinde lokal denge sağlanır, ani çökme veya düzensiz deformasyon modları engellenir (Nasir vd., 2021).Çentikli yapı enerji sönümleme sürecini daha kararlı bir biçimde gerçekleştirilir. Bu nedenle çentik tasarımı yalnızca geometrik bir müdahale değil aynı zamanda mühendislik optimizasyonunun bir parçası olarak ele alınmalıdır.

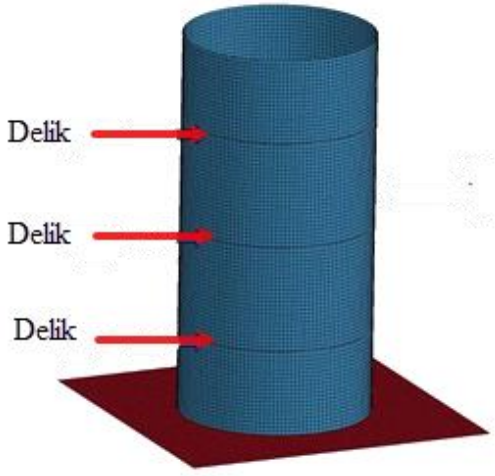
2.3.3 Delikli Çarpışma Kutuları

Optimizasyon stratejilerinden birisi de çarpışma kutularına belirli geometrilerde deliklerin açılmasıdır. Delikler, yapıda bilinçli olarak zayıflık bölgeleri oluşturarak deformasyonun önceden tanımlanmış bölgelerde başlamasını sağlar (Nasution, 2024). Bu uygulama sayesinde deformasyon modlarının daha öngörülebilir hale gelmesi ve yapının daha kararlı bir katlanma davranışı sergilemesi mümkün olmaktadır. Yapıya

delik eklenmesi, aynı zamanda ağırlıkta belirli oranlarda azalma sağlayarak taşıtın genel yakıt verimliliği açısından da avantaj sunmaktadır.

Deliklerin sayısı, çapı, şekli (daire, elips, kare vb.), yerleşimi ve dizilimi; çarpışma kutusunun maksimum darbe kuvveti, ortalama ezilme kuvveti, enerji emilimi ve ezilme kuvveti verimliliği üzerinde doğrudan etkili parametrelerdir. Çarpışma kutusu üzerinde açılan deliklerin yerleşimi Şekil 2.10'da verilmiştir. Yapılan çalışmalarda doğru optimize edilmiş delik tasarımlarının enerji emilimini artırdığı ve yapının burkulmaya karşı daha dayanıklı hale geldiği gözlemlenmiştir (Altın, 2018).

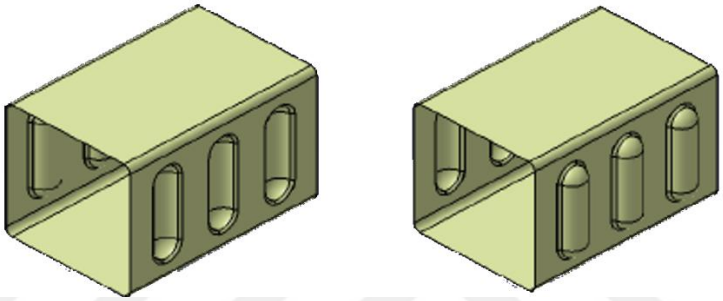
Delikli çarpışma kutuları hafiflik ve yüksek enerji sönümleme performansının aynı anda sağlanabilmesi açısından önemli bir mühendislik çözümüdür. Ayrıca bu tasarım yaklaşımı konvansiyonel metalik malzemelerde, hibrit ve kompozit malzemelerde yaygın olarak uygulanmaktadır. Bu çalışmalar delik parametrelerinin dikkatle optimize edilmesi gerektiğini ve deliklerin sadece yapısal zayıflık noktası olarak değil aynı zamanda deformasyonun yönlendirilmesi amacıyla stratejik bir tasarım unsuru olarak kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.



Şekil 2.10 Delikli çarpışma kutusu örneği (Altın, 2018)

2.3.4 Oluklu Çarpışma Kutuları

Çarpışma kutuları, çarpışma enerjisini yönlendirerek aracın savrulmasını engeller ve kontrollü deformasyon da sağlamaktadır. Kontrollü şekilde çarpışma kutusunun deformasyonunu sağlayan tasarım özelliklerinin en başında “oluk” veya “çentik” tasarımı gelmektedir. Genellikle kutunun duvarlarında boylamasına veya çevresel yönlerde bulunurlar (Şekil 2.11). Çarpışma kutusu tasarımlarında kullanılan oluklar yapısal davranışı yönlendirmek ve çarpışma performansını optimize etmek amacıyla önemli işlevler üstlenir.



Şekil 2.11 Çarpışma kutularında oluk yerleşimi (Durgun, 2014)

Oluklar çarpışma sırasında meydana gelen plastik deformasyonun belirli bir düzen içerisinde gerçekleşmesini sağlar. Düz yüzeyli bir yapı ani ve öngörülemeyen burkulmalarla dengesiz şekilde katlanabilirken oluklu bir yapı enerji sönümleme sürecinde düzenli ve kontrollü katlanma modları gösterir (Sun, 2025). Kontrollü deformasyon, hem yapının bütünlüğünü korumasına yardımcı olur hem de daha tutarlı bir enerji sönümleme profili sunar. Böylece darbe anındaki ani yük artışları minimize edilerek yolcu kabinine iletilen kuvvet azaltılmış olur. Yapı tümüyle çökmeden önce belirli bölgelerde enerjinin sönümlenmesi sağlanır (Durgun, 2014). Oluk tasarımı, çarpışma kutularının "kademeli kırılma" prensibine uygun davranmasını destekler ve enerji sönümleme verimliliğini artırır. Yapılan araştırmalar, oluklu çarpışma kutularının maksimum ezilme kuvvetini sınırlayarak daha düşük fakat daha sabit bir ortalama kuvvetle deformasyonun ilerlemesine olanak tanıdığını göstermektedir (Anand vd., 2024). Aynı zamanda oluklu tasarım, çarpışma sırasında araç yolcularına etki eden ivmelerin daha kontrollü ve daha az şiddetli olmasını sağlar. Burkulma modunun kontrolüyle deformasyon süreci boyunca yapının istikrarı korunur ve yapısal bütünlük kaybı minimuma indirilir (Alkhatib, 2019).

Olukların çarpışma kutularındaki temel işlevlerinden biri de yapının belirli bölgelerinde kasıtlı olarak zayıf alanlar oluşturarak plastik deformasyonu kontrollü şekilde başlatmaktır (Sun, 2025). Zayıf bölgeler darbe anında ilk olarak plastikleşen ve şekil değiştiren noktalar olur. Bu mekanizma sayesinde plastikleşme süreci yapının rastgele bir bölgesinde değil tasarım öngörüleri doğrultusunda belirlenmiş noktalarda başlatılır. Böylece enerji emilim süreci kontrollü bir geçiş ile başlamış olur. Kontrollü plastikleşme yapının deformasyon davranışlarını daha kararlı hale getirir ve öngörülmeyen yapısal başarısızlıkların önüne geçilmesini sağlar.

Çarpışma sırasında en büyük risklerden biri anlık olarak oluşan yüksek kuvvet pikleridir. Pik kuvvetler araç içerisindeki yolculara ani ivmeler uygular ve ciddi yaralanma risklerine neden olabilir (Memane, 2023). Yapının dayanım sınırlarını kısa sürede aşarak ani kırılmalar ve istenmeyen deformasyonlar oluşturabilir. Oluklar kuvvet piklerini azaltma konusunda önemli bir rol oynar. Oluşturdukları önceden belirlenmiş katlanma bölgeleri sayesinde deformasyon daha düşük ve sabit bir kuvvet profili ile ilerler. Bu durum yapının daha uzun süre enerji sönümlemesini sağlar. Yolculara aktarılan ivmenin düşürülmesine katkıda bulunur.

2.4 Çarpışma Kutularında Kullanılan Malzeme Türleri

2.4.1 Alüminyum Alaşımları

Alüminyum, sahip olduğu çeşitli avantajlar sayesinde havacılık, otomotiv ve taşımacılık gibi birçok endüstride yaygın olarak tercih edilen bir malzeme haline gelmiştir (Lu, 2024). En dikkat çekici özelliklerinden biri de çeliğe kıyasla yaklaşık üçte bir yoğunluğa sahip olmasıdır. Bu hafiflik özelliği yakıt verimliliğini artırma ve performansı iyileştirme açısından büyük önem taşımaktadır. Ayrıca alüminyumun atmosferik koşullara maruz kaldığında yüzeyinde doğal olarak oluşan ince oksit tabakası sayesinde korozyona karşı yüksek direnç göstermesi onu denizcilik uygulamaları ve dış yapı bileşenleri gibi zorlu çevresel koşullarda ideal bir seçim haline getirmektedir (Marwa vd, 2025). Alüminyumun bir diğer önemli avantajı ise sürdürülebilirliğidir. Bu malzeme, özelliklerinden hiçbir şey kaybetmeden sınırsız kez

geri dönüştürülebilmekte ve geri dönüşüm süreci birincil üretime kıyasla çok daha az enerji gerektirmektedir (Car, 2014).

Alüminyum alaşımları çarpışma kutularında yaygın olarak kullanılan mühendislik malzemelerindendir. Yaklaşık 2,7 g/cm³ yoğunluğa sahip olmaları sayesinde araçlarda toplam ağırlığın azaltılmasına katkı sağlayarak yakıt verimliliğini artır (Wakhidah, 2024). Alüminyumun sahip olduğu yüksek özgül enerji sönümleme kapasitesi çarpışma esnasında kinetik enerjinin kontrollü şekilde sönümlenmesini sağlayarak yolcu güvenliğini önemli ölçüde artırır. Tablo 2.1'de çarpışma kutularında en çok kullanılan farklı alüminyum alaşım serilerinin özellikleri verilmiştir. Ayrıca iyi şekillendirilebilirlik özellikleri sayesinde ekstrüzyon, döküm ve presleme gibi imalat yöntemleriyle karmaşık geometriler üretmeye olanak tanır. Doğal korozyon direnci alüminyum yapısal elemanların dış etkilere karşı uzun ömürlü olmasını sağlarken geri dönüştürülebilir yapısı çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük avantaj sunar.

Tablo 2.1. Alüminyum alaşım türlerinin özellikleri (Du, 2024)

Alaşım Türü	Özellikleri	Uygulama	Not
Al 6000 Serisi	Orta-yüksek mukavemet, iyi kaynaklanabilirlik	Otomobil şasileri, çarpışma kutuları	Ekstrüzyona uygundur.
Al 7000 Serisi	Çok yüksek mukavemet, daha az şekillendirilebilirlik	Performans odaklı uygulamalar	Isıl işlem görmelidir.
Al 5000 Serisi	Korozyona dayanıklı, iyi şekil alma	Yapısal destek profilleri	Düşük maliyetli seçenek

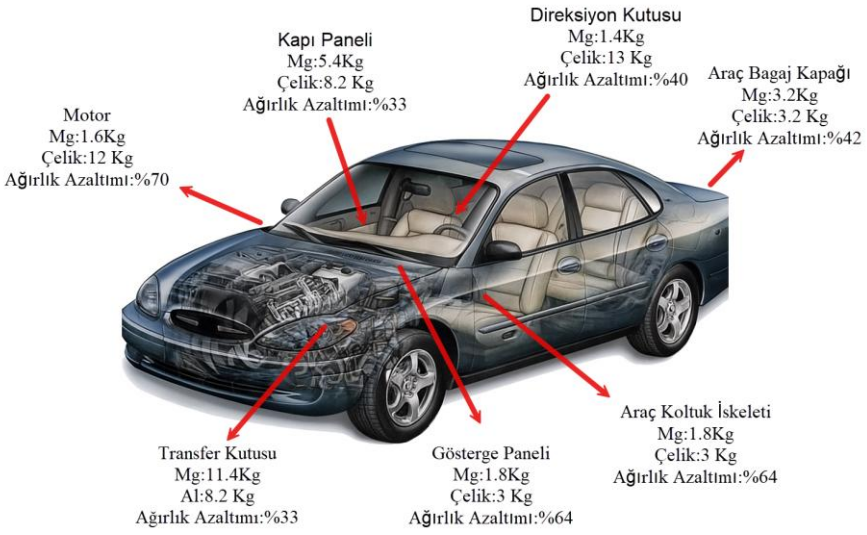
2.4.2 Yüksek Mukavemetli Çelikler

Yüksek mukavemetli çelikler, geleneksel çeliklere kıyasla çok daha yüksek çekme dayanımına sahip olup darbe anında şekil değiştirerek enerjiyi sönümlemeleri sayesinde otomotivde kritik yapısal bölgelerde özellikle de çarpışma kutularında yaygın olarak kullanılır (Özcan, 2018). Yoğunlukları yüksek olup alüminyum ve magnezyum gibi hafif metallerden daha ağır kılmasına rağmen yüksek özgül enerji sönümleme kapasiteleri sayesinde etkili darbe sönümleme performansı sunarlar. Bu çelikler genellikle 590 MPa ila 1400 MPa arasında çekme dayanımına sahiptir (Hu ve Feng, 2021). Ayrıca %10-20 arasında uzama göstererek deformasyon altında

çatlamadan enerji sönümlemektedirler. Bu özellikleri önden ve yandan çarpışma durumlarında yolcu kabinini korumada büyük avantaj sağlar.

2.4.3 Magnezyum Alaşımları

Otomotiv endüstrisinde araçların ağırlığını azaltmak ve yakıt verimliliğini artırmak amacıyla alternatif hafif malzemelere olan ilgi sürekli artmaktadır. Magnezyum alaşımları düşük yoğunlukları ve yeterli mekanik performansları sayesinde bu alanda önemli bir seçenek haline gelmiştir. Özellikle çarpışma kutuları gibi enerji sönümlemenin kritik olduğu yapı elemanlarında magnezyum alaşımları ağırlık tasarrufu ve darbe dayanımı açısından cazip bir alternatif sunmaktadır (Albak, 2021). Magnezyum, 1,74 g/cm³ yoğunluğu ile endüstride kullanılan en hafif yapısal metaldir (Akgün, 2020). Düşük yoğunluk araç ağırlığının önemli ölçüde azaltılmasını sağlayarak yakıt tüketimini ve emisyonları düşürür. Şekil 2.12'de araçlarda kullanılan magnezyum alaşımlarının diğer alaşımlara göre ağırlık azaltım oranları görülmektedir.

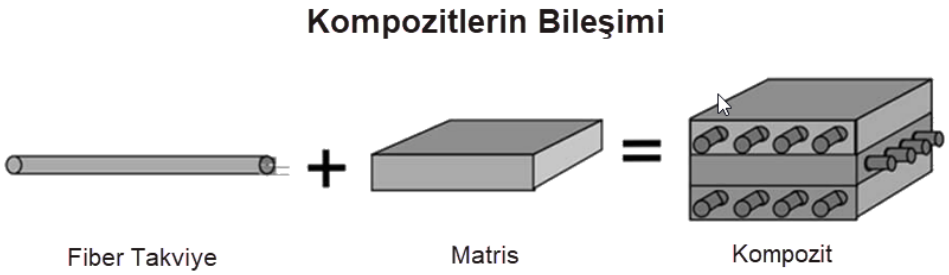


Şekil 2.12 Magnezyum alaşımının araç üzerinde kullanımı [12]

2.4.4 Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler, iki veya daha fazla farklı bileşenin bir araya getirilmesiyle oluşturulan çok fazlı sistemlerdir. Genellikle bir matris (epoksi, polyester, termoplastik) ve bir takviye fazı (karbon, cam, aramid fiber) içerirler. Bu yapı sayesinde yüksek mekanik dayanım düşük yoğunluk ve yönlendirilmiş özellikler elde

edilebilir (Demirci vd., 2018). Şekil 2.13'de kompozit malzemelerin temel yapısı ve birleşim şekli görülmektedir.



Şekil 2.13 Kompozit malzemelerin bileşimi (Direk, 2023)

Günümüzde otomotiv sektöründe hafiflik, güvenlik ve enerji verimliliği arasındaki dengeyi sağlamak malzeme mühendisliğinde önemli bir hedef haline gelmiştir. Bu bağlamda çarpışma kutuları gibi darbe enerjisini sönümleme amacı taşıyan yapısal elemanlarda kompozit malzemeler yüksek özgül mukavemet ve enerji sönümleme kapasitesiyle dikkat çekmektedir. Özellikle karbon fiber takviyeli polimerler (CFRP) ve cam elyaf takviyeli polimerler (GFRP) gibi gelişmiş kompozitler geleneksel metallerin yerine geçmeye aday malzemelerdir. Tablo 2.2'de görüleceği üzere kompozit malzeme türlerinin çekme dayanımı ve özgül enerji emilim oranları verilmiştir.

Tablo 2.2 Kompozit malzeme türlerinin çekme dayanımı ve ÖEE değerleri (Striewe, 2018)

Kompozit Türü	**Yoğunluk (g/cm³)**	**Çekme dayanımı (MPa)**	**Özgül enerji emilimi (kJ/kg)**
CFRP	≈ 1,6	600–1500	60–80
GFRP	≈ 1,9	300–900	30–50
Aramid Fiber (Kevlar)	≈ 1,4	400–1000	40–60

Kompozit malzemeler çarpışma kutularında kullanılmaları durumunda birçok yapısal ve işlevsel avantaj sunmaktadır. Bu avantajların başında yüksek özgül dayanım ve enerji sönümleme kapasitesi gelmektedir. Birim ağırlık başına düşen dayanımları geleneksel metalik malzemelere kıyasla oldukça yüksek olan kompozitler özellikle taşıt hafifletme hedefleriyle uyumlu bir yapı sunar. Karbon fiber takviyeli polimer gibi malzemeler darbe anında lif kırılması ve matris çatlamaları gibi mikromekanik mekanizmalar sayesinde yüksek miktarda enerjiyi sönümleyerek yolcu kabinine iletilen şoku azaltma yeteneğine sahiptir. Kompozitlerin bir diğer önemli avantajı ise

yönlendirilmiş mekanik özelliklere sahip olmalarıdır (Özen vd., 2023). Elyaf yerleşim yönünün tasarım aşamasında belirlenebilir olması, belirli yükleme koşullarına özel mekanik özelliklerin elde edilmesine olanak sağlamaktadır.

2.5 Çarpışma Kutularında Malzeme Seçimi Kriterleri

Çarpışma kutularının tasarımında malzeme seçimi, yapısal dayanım ve enerji emilimi performansını doğrudan etkileyen kritik bir parametredir. Bu malzemeler, yüksek çekme dayanımı ve uygun süneklik özelliklerine sahip olmalıdır. Aynı zamanda kontrollü plastik deformasyon kapasitesi sunmalıdır. Çarpışma kutularında malzeme seçimi araç güvenliğinin yanında, hafiflik ve üretim maliyeti gibi konular açısından kritik bir rol oynar. Bu sebeple, malzeme seçimi yapılırken birçok ölçüt göz önünde bulundurulmalıdır. Malzeme seçimi sürecinde; çevresel koşullar, maliyet, üretim kolaylığı ve birleşik malzeme sistemlerinin davranışı da göz önünde bulundurularak optimize edilmelidir. Böylelikle çarpışma kutularının hem mekanik dayanımı hem de enerji sönümleme performansı en üst seviyeye çıkarılabilir.

2.5.1 Enerji Sönümleme Kapasitesi

Enerji sönümleme kapasitesi mühendislik uygulamalarında özellikle otomotiv, havacılık ve savunma sanayii gibi çarpışma güvenliğinin kritik olduğu alanlarda önemli bir yapısal performans kriteridir (Djamaluddin, 2024). Çarpışma kutularının temel işlevlerinden biri araç çarpışmalarında kinetik enerjiyi mümkün olduğunca güvenli bir şekilde sönümleyerek yolcu kabinine iletilen kuvvetleri azaltmaktır. Enerji sönümleme kapasitesi, bu bileşenlerin performansını belirlemede kritik bir parametredir. Sönümleme kapasitesi yüksek olan bir çarpışma kutusu darbe enerjisini kontrollü bir şekilde yayarak deformasyon bölgelerinde lokalize eder ve yapısal hasarı minimize eder. Enerji sönümleme performansı; malzeme türü, geometrik tasarım, duvar kalınlığı, oluklu yapıların kullanımı ve üretim yöntemi gibi birçok faktöre bağlıdır. Özellikle hafif ve dayanıklı malzemeler kullanılarak ağırlık azaltılabilir ve özgül enerji emilimi artırılabilir.

2.5.2 Düşük Yoğunluk

Hafiflik yalnızca yakıt tüketiminin azaltılması veya menzil artışı gibi çevresel ve ekonomik kazanımlar sağlamaz; aynı zamanda çarpışma kutularının enerji sönümleme verimliliğini artırma potansiyeline de sahiptir. Düşük yoğunluğa sahip malzemeler yapıların toplam kütlesini azaltarak araç üzerinde daha az yük oluşturur ve kaza anında kinetik enerjinin daha etkin kontrol altına alınmasına katkı sağlar. Düşük yoğunluklu malzemelerin kullanımı daha kalın kesitler veya özel geometrik tasarımlarla birleştirildiğinde çarpışma sırasında kontrollü deformasyon bölgeleri oluşturulmasına olanak tanır.

Alüminyum alaşımları, magnezyum, yüksek dayanımlı plastikler ve gelişmiş kompozit malzemeler çarpışma kutularında yaygın olarak değerlendirilen düşük yoğunluklu malzeme gruplarındandır (Albak, 2021) Özellikle alüminyum hem hafifliği hem de iyi enerji sönümleme özellikleri sayesinde otomotiv sektöründe sıklıkla tercih edilmektedir (Tarlochan vd., 2013). Kompozit malzemeler ise yönlendirilmiş mekanik dayanım özellikleri sayesinde belirli darbe yönlerinde yüksek enerji sönümleme kapasitesi sunabilir (Ateş, 2022). Sonuç olarak çarpışma kutularında düşük yoğunluk yani hafiflik parametresi hem enerji verimliliği hem de güvenlik açısından temel bir tasarım hedefidir.

2.5.3 Dayanım ve Sünek Davranış

Malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri çarpışma anındaki deformasyon davranışını doğrudan etkiler. Özellikle dayanım ve sünek davranış çarpışma kutularının başarımını belirleyen temel parametreler arasında yer almaktadır. Dayanım, bir malzemenin dış yüklemelere karşı gösterdiği direnç kapasitesidir (Saber, 2025). Çarpışma durumlarında bu özellik yapının aniden çökmemesi ve belirli bir enerji seviyesine kadar formunu koruyabilmesi açısından kritiktir. Özellikle yüksek dayanımlı çelikler ve alüminyum alaşımları, çarpma anında şekil değiştirmeden önce yüksek miktarda enerji sönümleyebilirler. Sünek davranış ise malzemenin elastik sınırdan çıktıktan sonra kırılmadan önce ne kadar plastik deformasyon yapabileceğini tanımlar. Sünek malzemeler çarpışma anında kırılmadan önce şekil değiştirerek

enerjiyi sönümler ve yapının ani kopma veya parçalanma riskini azaltır (Saber, 2025). Darbe sırasında enerji kontrollü bir şekilde sönümlenir ve yapısal bütünlük mümkün olduğunca korunur. Sünek davranış gösteren malzemeler kırılgan yapılı malzemelere kıyasla çarpışma kutularında daha güvenli bir tercih olarak öne çıkar. Sonuç olarak çarpışma kutularında malzeme seçimi yapılırken dayanım ve sünek davranış parametreleri birlikte değerlendirilmelidir. Uygun bir mühendislik yaklaşımı ile bu iki özelliğin dengeli şekilde sağlandığı malzemeler kullanılarak hem güvenli hem de enerji verimli yapılar tasarlanabilir. Parametrelerin doğru yönetimi, araçların darbe güvenliğini artırırken aynı zamanda çarpışma sonrasında yapısal bütünlüğün korunmasını da mümkün kılar.

2.5.4 Maliyet ve Üretilebilirlik

Maliyet ve üretilebilirlik çarpışma kutularının endüstriyel ölçekte uygulanabilirliğini doğrudan etkileyen iki kritik parametredir. Her ne kadar enerji sönümleme kapasitesi dayanım ve süneklik gibi teknik özellikler ön planda olsa da bir malzemenin pratikte kullanılabilirliğini belirleyen temel faktörlerden biri de toplam maliyet ve seri üretime uygunluk düzeyidir. Maliyet; malzemenin hammadde fiyatı, temin edilebilirliği, işlenme süreci, atık miktarı, geri dönüştürülebilirliği ve nihai ürün üzerindeki etkileriyle birlikte değerlendirilmelidir. Yüksek performanslı bazı malzemeler üstün enerji sönümleme ve dayanım değerlerine sahip olsalar da yüksek üretim maliyetleri nedeniyle otomotiv gibi yüksek hacimli üretim yapan sektörlerde yaygın olarak kullanılamamaktadır. Çarpışma kutularında malzeme seçimi performans ile maliyet arasında optimum bir denge gözetilerek yapılmalıdır (Ateş, 2022).

Üretilebilirlik bir malzemenin üretim sürecine entegrasyon kolaylığını ve üretim hatlarında yaratacağı etkiyi kapsar. Şekillendirme kabiliyeti, kaynaklanabilirlik, kesilebilirlik, otomasyon uyumluluğu ve yüzey işleme gereksinimleri gibi çok sayıda faktöre bağlıdır (Durgun, 2014). Üretim teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte yeni nesil malzemelerin üretilebilirliğine ilişkin sınırlamalar azalmaktadır. Özellikle sıcak şekillendirme, hidroform, yüksek basınçlı döküm ve kompozit gibi yöntemlerle daha karmaşık geometriye sahip yüksek performanslı parçaların daha düşük maliyetlerle üretilebilmesi mümkün hale gelmiştir (Görgünarslan vd., 2015). Gelişmeler yüksek

performanslı ancak daha önce maliyet ve üretim zorlukları nedeniyle tercih edilmeyen malzemelerin de artık alternatifler arasında yer almasını sağlamaktadır.

2.5.5 Korozyon Direnci ve Uzun Ömür

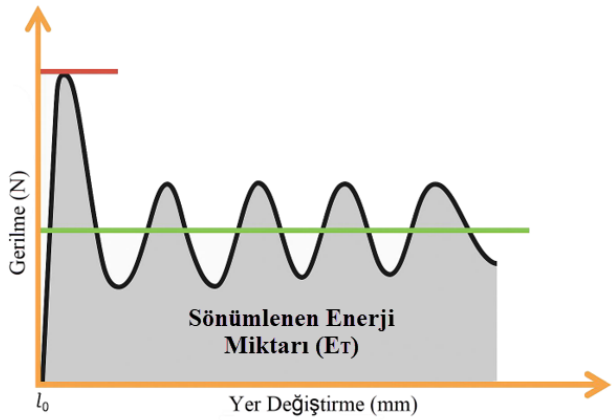
Korozyon direnci ve uzun ömür, çarpışma kutularında kullanılan malzemelerin servis süresince yapısal bütünlüklerini koruyabilmeleri açısından son derece önemli iki parametredir. Araçların çeşitli iklim koşullarına, nemli ortamlara, yol tuzlarına ve kimyasal etkilere maruz kaldığı düşünüldüğünde kullanılan malzemenin korozyona karşı gösterdiği direnç çarpışma güvenliği kadar kritik bir öneme sahiptir. Korozyon metallerin çevresel etkiler sonucu kimyasal veya elektro-kimyasal reaksiyonlarla bozulmasıdır (Arachchige vd., 2025). Zamanla çarpışma kutularının mekanik özelliklerini zayıflatabilir ve darbe anında beklenen enerji sönümleme kapasitesinin kaybına neden olabilir. Uzun ömür yalnızca korozyona karşı dirençle sınırlı değildir; aynı zamanda malzemenin yorulma dayanımı çevresel etkiler altında gösterdiği kararlılık ve bakım gereksinimleri ile de ilişkilidir.

Çarpışma kutularında korozyon direnci ve uzun ömür güvenlik performansının zaman içinde sürdürülebilirliğini belirleyen temel faktörlerdir. Malzeme seçimi yapılırken bu parametrelerin göz önünde bulundurulması yalnızca kısa vadeli performansı değil aynı zamanda yapının ömrü boyunca güvenliğini ve ekonomik verimliliğini de doğrudan etkilemektedir. Bu bağlamda çevresel etkiler karşısında kararlı, düşük bakım gerektiren ve uzun ömürlü malzemelerin tercih edilmesi modern mühendislik tasarımlarının vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir.

2.6 Çarpışma Kutularının Değerlendirilmesinde Kullanılan Mekanik Performans Göstergeleri

2.6.1 Sönümlenen Enerji Miktarı

Çarpışma kutuları özellikle otomotiv endüstrisinde araç güvenliğini artırmak amacıyla tasarlanan ve çarpışma anında enerjiyi emerek yolcu kabinine aktarılan kuvvetleri azaltan yapılardır. Çarpışma sırasında ortaya çıkan enerjinin bir kısmı veya tamamı çarpışma kutusu tarafından plastik deformasyon yoluyla sönümlenir. Bu süreçte enerji; ısı, ses ve yapısal deformasyon gibi farklı formlara dönüşerek aktarılır. Çarpışma kutuları genellikle kontrollü ezilme bölgeleri içerir ve bu bölgeler çarpışma sırasında şekil değiştirerek enerjiyi aktarır (Bryson, 2024). Gelişmiş mühendislik teknikleriyle optimize edilen bu yapılar modern taşıtlarda güvenliğin temel bileşenlerinden biri haline gelmiştir.



Şekil 2.14 Çarpışma kutusunda sönümlenen enerji miktarı (Bryson, 2024)

Şekil 2.14'de görülen grafik, çarpışma kutularının veya enerji sönümleyici yapıların darbe altında gösterdiği tipik kuvvet-yer değiştirme davranışını temsil etmektedir. Grafiğin yatay ekseni yer değiştirmeyi (mm), dikey ekseni ise uygulanan kuvveti (N) göstermektedir. Eğrinin başlangıcında kuvvetin ani bir şekilde artarak ulaştığı ilk tepe noktası, numunenin maksimum yük taşıma kapasitesini ifade eden maksimum ezilme kuvveti olarak tanımlanır. Bu noktadan sonra yapı, yerel burkulma ve katlanma mekanizmalarının etkisiyle periyodik dalgalanmalar gösteren bir deformasyon sürecine girer.

Eğrinin altında kalan gri renkli alan, yapının deformasyon süresince sönümlediği toplam enerjiyi (E_T) ifade eder. Bu alan, malzemenin veya yapının darbe sırasında emdiği enerjinin bir göstergesi olup, çarpışma performansının değerlendirilmesinde temel bir parametredir. Şekilde yeşil çizgi ile gösterilen yatay doğrultu, deformasyon boyunca ortalama yük değerini temsil eden ortalama ezilme kuvvetini göstermektedir. Ortalama ezilme kuvveti, eğri altında kalan toplam alanın toplam yer değiştirmeye bölünmesiyle elde edilir ve yapının çarpışma süresince sergilediği sönümlenen enerji miktarını (SE) yansıtır.

Bu bağlamda, eğri altında kalan toplam alanın büyüklüğü, sistemin enerji sönümleme kapasitesinin bir ölçüsüdür. Bu parametreler birlikte değerlendirildiğinde, çarpışma kutularının darbe güvenliği açısından performansını nicel olarak belirlemek mümkün olmaktadır. Bu hesaplamalar ve analizler araç güvenliği için tasarımların optimize edilmesinde kritik rol oynamaktadır.

$$\mathbf{E_T} = \int_{\mathbf{0}}^{\boldsymbol{\delta max}} \mathbf{F(\delta)d\delta} \tag{2.1}$$

Denklem (2.1)'de sönümlenen enerji denklemi (SE) verilmiştir. Denklemde, F (kN) çarpışma sırasında meydana gelen eksenel yöndeki ezilme kuvvetini, δ (mm) yer değiştirmeyi ifade etmektedir. Sönümlenen toplam enerji, kuvvet-yer değiştirme grafiğindeki eğrinin altında kalan alının integrali olarak tanımlanmaktadır.

2.6.2 Özgül Enerji Emilimi

Literatürde çarpışma kutularının enerji sönümleme performansının değerlendirilmesinde en yaygın kullanılan kriterlerden biri olan özgül enerji emilimi (ÖEE), birim kütle başına düşen enerji miktarını tanımlar ve yapısal verimlilik açısından önemli bir performans göstergesi olarak kabul edilmektedir. Çarpışma enerjisi sönümleyici yapıların kütlesinin azaltılması yakıt/enerji tüketimini de önemli ölçüde etkiler. Daha hafif araçlar, özellikle içten yanmalı motorlu taşıtlarda yakıt ekonomisi, elektrikli araçlarda ise menzil açısından avantaj sağlar (Gürbüz vd., 2016). Ancak ağırlık azaltılırken çarpışma anındaki enerji sönümleme kapasitesinden ödün verilmemesi büyük önem taşır. Gelişmiş çarpışma kutusu tasarımlarında hedeflenen

maksimum ÖEE değerine ulaşırken aynı zamanda minimum ağırlıkla yüksek enerji sönümleme kapasitesi hedeflenmektedir. Bu doğrultuda hem geometrik parametreler hem de malzeme türü ÖEE üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Ayrıca üretim yöntemleri ve yapısal modifikasyonlar deformasyon modlarını ve dolayısıyla enerji sönümleme karakteristiklerini önemli ölçüde etkileyebilmektedir (Kajiwara, 2019) Denklem (2.2)'de özgül enerji emilimi formülü verilmiştir. Burada; E_T sönümlenen toplam enerjiyi (J) ifade ederken, m (kg) çarpışma kutusunun kütlesini ifade etmektedir.

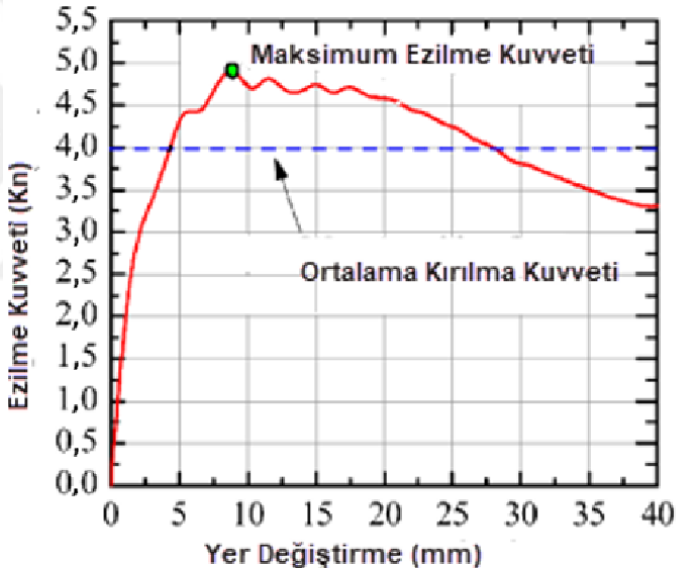
$$\text{ÖEE} = \frac{E_{\text{sönümlenen}}}{m} \tag{2.2}$$

2.6.3 Ortalama Ezilme Kuvveti

Çarpışma kutularının enerji sönümleme performansını değerlendirmede kullanılan önemli parametrelerden biri de ortalama ezilme kuvvetidir. Ortalama ezilme kuvveti (OEK); toplam enerji sönümleme miktarının eksenel yöndeki toplam deformasyon mesafesine oranı olarak tanımlanır (Altın, 2018). OEK, çarpışma sırasında çarpışma kutusunun belirli bir deformasyon uzunluğu boyunca uyguladığı ortalama direnç kuvvetini temsil etmektedir. Bu parametre, enerji emiliminin ne derece stabil ve kontrollü gerçekleştiğini gösteren temel bir göstergedir. Yüksek OEK değerleri yapının enerjiyi daha yüksek kuvvetle sönümlediğini dolayısıyla deformasyonun daha kontrollü ve emniyetli gerçekleştiğini gösterir. Ancak OEK'nin çok yüksek olması da taşıt içerisindeki yolculara iletilecek tepki kuvvetinin artmasına neden olabileceğinden optimal bir seviyede tutulması gerekmektedir. Çarpışma kutusunun geometrik tasarımı, kullanılan malzeme özellikleri ve özellikle çökme modları (katlanma, kırılma, akma vb.) OEK üzerinde doğrudan etkilidir. Literatürde; dairesel, dikdörtgen ve çok hücreli kesit yapılar ile köpük dolgulu veya oluklu yapıların OEK performanslarını artırdığı ifade edilmiştir. Benzer şekilde çelik, alüminyum ve kompozit gibi farklı malzemelerin deformasyon sırasında sergilediği mekanik davranışlar ortalama kuvvet seviyesini belirleyen önemli parametrelerdendir.

$$OEK = \frac{1}{\delta}\int_{U_0}^{Uf} F(u)du \tag{2.3}$$

Denklem (2.3)'te ortalama ezilme kuvveti denklemi verilmiştir. Denklemde $F(u)$ ezilme boyunca uygulanan anlık kuvvetin, yer değiştirmeye (u) bağlı fonksiyonudur. U_0 ezilmenin başladığı yer değiştirme noktasıdır. U_f ezilmenin sona erdiği yer değiştirme noktasıdır. Çoğu çalışmada densifikasyon başlangıcı esas alınır. Deneysel olarak kuvvet–yer değiştirme eğrisinden elde edilir. Şekil 2.15'te enerji sönümleyici bileşenler için genel kuvvet-yer değiştirme grafiği verilmiştir. Grafikte eğrinin altında kalan alan toplam sönümlenen enerji miktarını ifade eder. Bu alan ne kadar genişse yapı o kadar fazla enerjiyi sönümlemiş demektir. Özgül enerji emilimi açısından bakıldığında bu değer, kutunun kütlesine oranla ne kadar enerji sönümlediğini tanımlar. Eğrinin altında kalan alanın büyüklüğü ve yapının düşük kütleyle yüksek enerji sönümleme yeteneği yüksek özgül enerji emilimine işaret eder.



Şekil 2.15 Kuvvet-yer değiştirme grafiği

Ayrıca Şekil 2.15'te ortalama ezilme kuvveti kırmızı eğrinin genel eğilimini temsil eden mavi kesikli çizgiyle gösterilmiştir. Bu kuvvetin maksimum ezilme kuvvetine oranı ezilme kuvveti verimi olarak değerlendirilir. Ortalama ezilme kuvvetinin maksimum kuvvetten çok uzak olmaması, kutunun enerji sönümleme sürecinde ani yük değişimlerinin yaşanmadığını ve deformasyonun kararlı ilerlediğini göstermektedir.

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Çarpışma kutularının amacı, çarpışma anında oluşan kinetik enerjiyi sönümleyerek yolcu güvenliğini sağlamak ve aracın bütünlüğüne zarar gelmesini önlemektir. Otomobillerin ön ya da tamponlarına yerleştirilen çarpışma kutuları, düşük hızlı çarpışmalarda darbe enerjisini sönümleyerek araç içerisinde bulunan yolcunun korunmasını sağlamaktadır. Çarpışma kutuları aynı zamanda şasiye zarar gelmesini önlemektedir. Yarış araçlarında karbon fiber gibi hafif ancak dayanıklı çarpışma kutuları kullanılır. Bu sayede yüksek hızlarda bile darbe enerjisi emilerek sürücünün korunması sağlanmaktadır. Otobüs, kamyon ve vinçlerinin ön kısımlarında sürücü kabini korumak amacıyla da çarpışma kutuları yerleştirilmiştir. Ayrıca bazı modellerde yayaları korumak için de araçlara enerji sönümleyici yapılar entegre edilmektedir. Havacılık ve uzay sektöründe iniş takımlarında çarpışma kutusu benzeri enerji emici elemanlara yer verilmektedir. Uçaklar ya da uzay kapsülleri yere temas ettiğinde darbeyi sönümleyerek ekipman ve insan güvenliği sağlamaktadır.

Yapılan literatür çalışmaları, malzeme seçimi ve geometrik tasarım optimizasyonu ile geliştirilen çarpışma kutularının, çarpışma esnasında oluşan kinetik enerjiyi sönümleyebileceği ve yüksek dayanımın sağlanabileceğini göstermektedir. Çalışmalar ayrıca, kullanılan malzemenin çarpışma kutusunun enerji sönümleme kapasitesini, darbe dayanımını ve ağırlığını doğrudan etkilediğini ortaya koymaktadır. Çelik, alüminyum, kompozit malzemeler, alüminyum köpük, hücresel yapılar, termoplastik ve termoset polimerler gibi malzemeler çarpışma kutularının ana yapısını oluşturmaktadır. Çarpışma kutusunda kullanılan malzemenin et kalınlığı, uzunluğu, oluk sayısı yine enerji sönümleme miktarını etkilemektedir. En uygun sonuçların alınması için bu faktörlerin incelenmesi ve optimize edilmesi gerekmektedir. Çarpışma kutularının optimizasyonu ile ilgili literatürde daha önce yapılmış akademik çalışmalar incelenip kısa bir özet oluşturulmuştur.

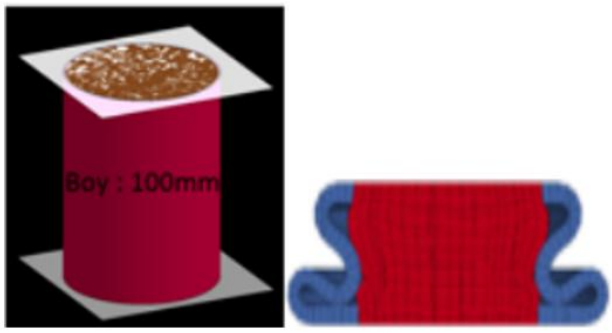
Durgun vd. (2014) yapmış oldukları çalışmada, otomotiv sektöründe çarpışma güvenliği açısından önemli bir eleman olan çarpışma kutularının enerji sönümleme performansını artırmaya yönelik araştırma gerçekleştirmişlerdir. Çalışma literatürdeki

temel prensipleri temel alarak yeni geometrik tetikleyici yaklaşımlar geliştirmekte ve bunların çarpışma performansına etkisini sayısal analizlerle ortaya koymaktadır. Bu amaçla farklı geometrik tetikleyici veya oluk yapılarının tasarlanarak çarpışma davranışının kontrol altına alınabileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca bu yapıların çarpışma performansının malzeme türü, kesit şekli, duvar kalınlığı ve tetikleyici yapılandırması gibi parametrelerden etkilendiğini ifade etmişlerdir. Sönümleme kapasitesinin artırılması için tetikleyici bölgelerin veya çentiklerin uygun konumlandırılmasıyla, ezilmenin düzenli modlarda gerçekleştiğini yaptıkları deneysel çalışmalarla desteklemişlerdir. Çalışmada farklı tetikleyici biçimleri incelenmiş olsa da olukların iç-dış bükeylik farkı ve açısal yerleşiminin enerji sönümleme üzerindeki etkileri yeterince ele alınmamıştır (Durgun, 2014). Eboreime vd. (2017), Al 6063 T6 ve T7 temperli alaşımların malzeme özelliklerinin karakterizasyonunu yapmış ve bu özelliklerin çarpışma tepkisi ile enerji sönümleme üzerindeki etkilerini, çarpışma güvenliği amaçlı tasarlanan yeni bir tübüler yapısal eleman bağlamında detaylı bir şekilde incelemeyi hedeflemiştir. Bu özellikleri üç bölgeye ayırmışlardır: elastik bölge, üniform plastik bölge ve sünek hasar bölgesi. Elastik ve plastik özellikleri belirlemek için tek eksenli kararsızlığa kadar standart çekme testleri uygulamışlardır. Sünek hasarı karakterize etmek amacıyla, düz çentikli numunelerin sonlu eleman ve deneysel modellerinden elde edilen eşdeğer plastik şekil değiştirme verilerine karşılık üç eksenli gerilme verilerini kullanarak azalan üstel bir uyum modeli uygulamışlardır. Ayrıca, yeni çapraz tüp tasarımının ezilme davranışını öngörmek için teorik bir model geliştirmişlerdir. Her iki temper için yeni ekstrüzyon yöntemiyle üretilmiş çapraz şekilli numunelerin ortalama ezilme kuvvetlerini sayısal, deneysel ve teorik olarak karşılaştırmışlardır. Bu çalışmanın sonucunda T7 temperi, T6 temperine kıyasla daha üstün bir sünekliğe sahip olduğunu gözlemlenmiştir. Ancak bu üstünlük standart çekme testi sonuçlarında doğrudan gözlemlenememiştir. T7 temperinin kararsızlık sonrası davranışı bu üstünlüğün kaynağı olarak belirlenmiştir. Gelişmiş süneklik, T6 ve T7 temperleri arasındaki kopma uzaması farkında ve çapraz şekilli tüplerin eksenel ezilmesi sırasında uygulamada gözlemlenmiştir. Bu çalışmada, T6 temperi, önemli miktarda kopma meydana gelmesine rağmen, çapraz şekilli elemanlarda eksenel yük altında T7 temperine göre daha yüksek enerji sönümleme kapasitesi göstermiştir (Eboreime, 2018).

Zhuang vd. (2023) alüminyum köpük dolgulu karbon elyaf takviyeli polimer tüplerin eksenel sıkıştırma mekaniklerini ve enerji sönümleme özelliklerini hem deneysel hem de simülasyon yöntemleriyle incelemeyi hedeflemiştir. Alüminyum köpük numuneler, tekli CFRP tüpler ve köpük dolgulu CFRP tüpler üzerinde yarı-statik sıkıştırma deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Deneysel sonuçlara dayanarak köpük dolgulu CFRP tüplerin sıkıştırma simülasyonlarını yapmışlardır. Ayrıca yapısal parametrelerin tüplerin sıkıştırma mekanikleri ve enerji sönümleme özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışma sonuçlarına göre daha yüksek dolgu yoğunluklarının tüplerin taşıma ve enerji sönümleme kapasitelerini artırdığını ancak CFRP tüplerin boyuna yönlü çatlamaya daha yatkın olmasına neden olduğunu gözlemlemişlerdir. Yapısal parametrelerin etkilerini incelediklerinde daha yüksek dolgu yoğunluğu, daha kalın CFRP tüpler ve daha küçük hücre gözenek boyutlarının köpük dolgulu CFRP tüp yapısının genel taşıma ve enerji sönümleme kapasitesini artırmaya önemli katkı sağladığını tespit etmişlerdir (Zhuang, 2023). Altın vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada, çarpışma kutularının üzerine açılan oyukların çarpışma performansı üzerindeki etkisi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Çalışmada, farklı oyuk genişliklerine sahip çarpışma kutusu tasarımları oluşturulmuş ve oyuk genişlikleri 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm ve 5 mm olarak belirlenmiştir. Çarpışma kutularının üzerine farklı sayıda oyuk açılmış olup, her bir kutunun et kalınlığı 2 mm olarak belirlemişlerdir. Tasarlanan çarpışma kutuları Hypermesh programı ile sonlu elemanlara ayrılmış; Ls-PrePost programı ile malzeme kartları, kontaklar ve sınır şartları gibi analiz parametreleri belirlenmiş ve Ls-Dyna ile dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar çarpışma kutularının üzerindeki oyuk sayısı ve oyuk genişliğinin artmasının maksimum deformasyon kuvvetinde azalmaya yol açtığını göstermiştir. Oyuk sayısının artırılmasının, ezilme kuvveti verimini ve özgül enerji sönümleme kapasitesini her durumda artırdığı gözlemlenmiştir. Öte yandan oyuk genişliğinin küçük olması, çarpışma sırasında çarpışma kutusunun sönümlemiş olduğu toplam enerji miktarının artmasına neden olduğunu ifade etmişlerdir (Altın , 2017).

Yeni vd. (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışmada; çarpışma kutularında alüminyum köpüğün plastik kılıf ve alüminyum kılıf ile kullanımının enerji emilimi üzerindeki etkileri incelenmiştir (Şekil 3.1). Çalışmada, alüminyum köpüğün enerji

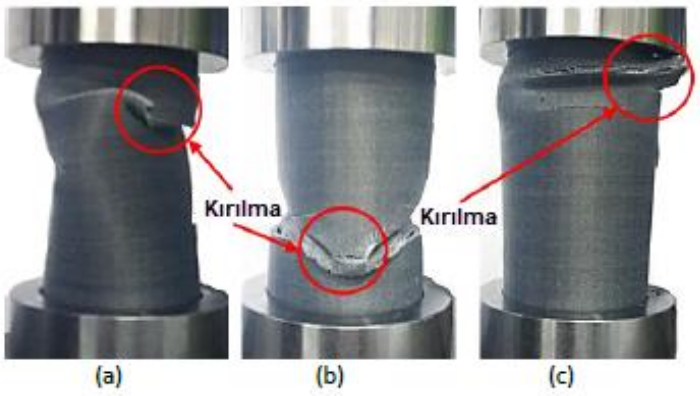
emilimi davranışında kılıf malzemesinin önemli bir rol oynadığı ve alüminyum kılıfın plastik kılıfa kıyasla daha üstün performans gösterdiğini ifade etmişlerdir. Çarpışma kutularında kullanılan alüminyum köpüğün yoğunluğunun azalmasıyla, artan deplasman değerlerine bağlı olarak enerji emiliminin arttığı gözlemlenmiştir. Alüminyum köpük takviyesi kütlede bir artışa yol açsa da enerji emiliminde belirgin bir iyileşme sağladığı gözlemlenmiştir. Plastik kılıf kullanımında et kalınlığının artırılmasının enerji emilimine kayda değer bir katkı sağlamadığı buna karşın alüminyum kılıfın plastik kılıfa göre daha yüksek enerji emilimi sağladığı tespit edilmiştir (Yeni vd., 2022).



Şekil 3.1 a) Plastik kılıflı numune, b) basma testi sonucunda numune (Yeni vd., 2022)

Zimmermann vd. (2023) yaptıkları çalışmada, bileşen odaklı bir yaklaşımı ve ters bir süreç zincirini sunmuş, bunu DP600 çeliğinden üretilmiş bir çarpışma kutusunun performansını incelemek için uygulamışlardır. Çalışmada çarpışma kutusunun enerji sönümleme kapasitesini artırmayı, ilerleyici burkulma davranışını kaybetmeden iyileştirmeyi hedeflemişlerdir. Çarpışma kutusu üzerinde sonlu eleman simülasyonları gerçekleştirmişlerdir. Simülasyonlar, köşe bölgelerinin performansta kritik bir rol oynadığını göstermiş olup performansı artırmak için gerekli malzeme özelliklerini belirlemişlerdir. Bu gereksinimleri karşılamak amacıyla ısıl işlem stratejileri geliştirmiş ve deneysel olarak doğrulamışlardır. Ardından köşelere farklı yerel ısıl işlem süreçleri uygulamış ve deneysel testler yapmışlardır. Deney sonuçları ters süreç zincirinin performansı iyileştirme potansiyelini doğrulamış, optimum malzeme özelliklerinin yüksek enerji sönümleme kapasitesi ve düşük maksimum kuvvet sağladığını göstermiştir (Zimmermann, 2023). Bintara vd. (2021) yaptıkları çalışmada PLA malzemeden FDM tekniği ile üretilen çarpışma kutularında, deformasyon modeli

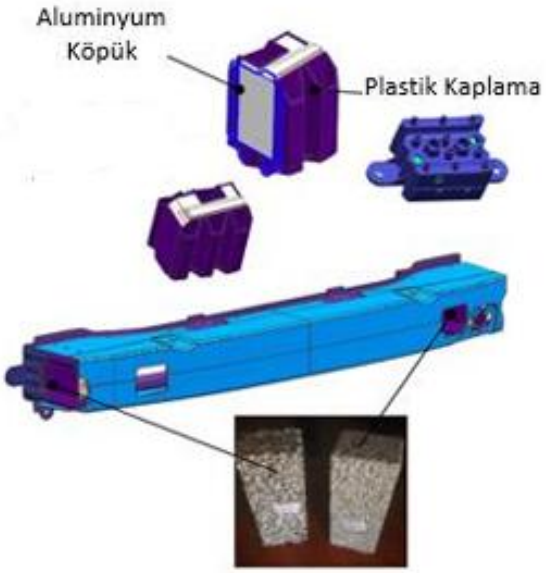
ve enerji emilimi davranışını incelemişlerdir. Çarpışma kutusu numunesini, 3D yazıcı kullanılarak üretmişlerdir. Yarı statik test yöntemiyle evrensel test cihazı kullanılarak numune dakikada 2 mm hızla sıkıştırılmış ve orijinal uzunluğu 120 mm olan numune, 80 mm deformasyona ulaşana kadar test edilmiştir. 1,6 mm, 1,8 mm ve 2 mm olmak üzere üç farklı duvar kalınlığını analiz edilmiştir (Şekil 3.2). Çalışmada, deformasyon modeli ve maksimum enerji emilimi incelenerek en uygun tasarım özellikleri belirlenmiştir. Sonuçlar en yüksek enerji emiliminin 2 mm duvar kalınlığında (357,986 J), en düşük enerji emiliminin ise 1,6 mm duvar kalınlığında (224,012 J) gerçekleştiğini göstermektedir. Üç modelde de lokal burkulma ve kesintili katlanma gözlemlenmiştir. 2 mm duvar kalınlığına sahip çarpışma kutusunda parçalanma da meydana gelmiştir. Bu durum diğer modellerde gözlenmemiştir. Kesintili katlanma depo edilen malzemenin sınır tabakasında oluşan enine çatlaklardan kaynaklanmıştır. Bulgular, duvar kalınlığının enerji emilimi üzerinde doğrudan etkisi olduğunu ve lokal burkulma ile kesintili katlanmanın, çarpışma kutularının mekanik davranışını belirleyen önemli faktörler olduğunu ortaya koymuştur (Bintara vd, 2025).



Şekil 3.2 Farklı duvar kalınlığına sahip çarpışma kutularının deformasyonu: a) 1,6 mm, b) 1,8 mm, c) 2 mm (Bintara vd, 2025)

Çakan vd. (2022) yaptıkları çalışmada, alüminyum köpük malzemesinin yarı-statik basma testleri ile nümerik malzeme modelinin oluşturulmasının faydalı olduğunu göstermişlerdir. Bu yöntem, farklı köpük doluluk oranlarına sahip çarpışma kutularının mekanik performansını analiz etmek için kullanılmıştır (Şekil 3.3). Boş çarpışma kutuları düşük plato kuvveti ile kısa çarpışma sürelerine sahipken köpük takviyesi plato kuvvetini, çarpışma süresini ve enerji emilimini artırmıştır. Deformasyon davranışında en yüksek doluluk oranına sahip kutular alt ve üstten

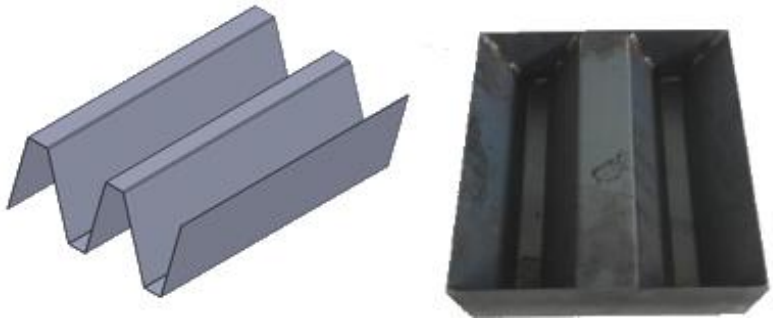
eşzamanlı katlanma moduna sahiptir. Daha az dolu kutularda katlanma üstten başlayıp alttan tamamlanmıştır. Boş kutularda alttan katlanma gözlemlenmiş, üst kısımlarda yanal şişme oluşmuştur. Yer değiştirme kapasitesi doluluk oranı arttıkça azalmış ancak emilen toplam enerji yükselmiştir. Özgül enerji emilimi kütle artışıyla bir miktar azalmıştır. Bu bulgular uygun köpük takviye oranlarının belirlenmesinin çarpışma kutularının mekanik performansını ve enerji emilimini optimize etmek için gerekli olduğunu ortaya koymuş ve malzeme optimizasyonunun tasarımda önemini vurgulamıştır (Çakan vd., 2022).



Şekil 3.3 Al köpük takviyeli EPDM katkılı P6 plastik kılıf kullanılan çarpışma kutusu ve traversi çalışması (Çakan vd, 2022)

Kösedağ vd. (2023) yaptıkları çalışmada, çarpışma kutularının enerji sönümleme kapasitesini, kesit geometrisi ve malzeme türünün etkisi açısından incelemeyi amaçlamışlardır. Bu kapsamda Al6063 alüminyum ve A36 çeliğinden üretilmiş, altıgen, daire, kare ve üçgen kesit geometrilerine sahip çarpışma kutuları tasarlamış ve sonlu elemanlar yöntemi ile analiz etmişlerdir. Mesh boyutunun sonuçlara etkisini en aza indirmek için ön çalışmalar gerçekleştirmiş, tüm modelleri aynı sınır ve yükleme koşulları altında simülasyonlara tabi tutmuşlardır. Simülasyonlarda 270 kg ağırlığındaki bir duvar, çarpışma kutularına 15 m/s hızla çarptırılmıştır. Analizler deformasyon davranışını incelemeyi, kuvvet-zaman eğrilerini oluşturmayı ve emilen enerjiyi hesaplamayı içermiştir. Sonuçlar, çelik malzemeden üretilmiş çarpışma kutularının alüminyum kutulara kıyasla daha fazla enerji emdiğini göstermiştir. Kesit

geometrisi, enerji emilimi üzerinde belirleyici olmuş; en yüksek enerji emilimi altıgen, daire, kare ve üçgen şeklinde sıralanmıştır. Dairesel kutuda köşe eksikliğine rağmen yüksek katlanabilirlik ve katlanma sayısı nedeniyle malzeme direnci sağlanmıştır. Bu çalışma, malzeme türü ve kesit geometrisinin çarpışma kutularının enerji emilimi performansını doğrudan etkilediğini ortaya koymuş ve köşe sayısının enerji emilimini artırıcı etkisi ile dairesel yapının yüksek katlanabilirliğinin tasarımda malzeme ve geometrinin eşzamanlı optimizasyonunun önemini vurgulamıştır (Kösedağ vd., 2023). Yılmazçoban vd. (2019) çalışmalarında, açık kesitli çarpışma kutularını şasi önüne ve ön tamponun hemen arkasına monte ederek geleneksel kullanım alanlarının dışında incelemeyi amaçlamışlardır. W kesitli ve çelikten üretilmiş sac metal çarpışma kutuları (Şekil 3.4), şok emici bir birim olarak tasarlanmış ve 2,88 m yükseklikten düşürme testi ile 1200 kg ağırlığındaki bir aracın sekizde biri ölçeğinde çarpışma simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Deneylerde 150 kg düşme yükü kullanılmış ve et kalınlığı optimizasyonu 2 mm, 1,5 mm, 1 mm ve 0,8 mm kalınlıklardaki örnekler üzerinde yapılmıştır. Sonuçlar, 1 mm kalınlığındaki St37 sac metal W kesitli çarpışma kutusunun ön çarpışmalardaki darbe enerjisini yeterli düzeyde sönümlediğini göstermiştir. Daha kalın kutular sert ve yetersiz deformasyon gösterirken, 0,8 mm kalınlıktakiler mekanik dayanıklılık açısından zayıf bulunmuştur. Tekrarlı deneyler, 1 mm kalınlığındaki örneklerin birçok test sırasında da enerji sönümleme kapasitesini koruduğunu ve yeni çarpışma kutusu tasarımının umut verici sonuçlar sağladığını doğrulamıştır (Yılmazçoban vd., 2019).



Şekil 3.4 W kesitli çarpışma kutusu tasarımı (Yılmazçoban vd., 2019)

Akademik çalışmalar incelendiğinde, çarpışma kutularının darbe performansının, kullanılan malzemenin türü, geometrik tasarım, malzeme yoğunluğu ve oluk sayısı gibi birçok parametreye bağlı olarak değiştiği ortaya konulmuştur. Özellikle malzeme yoğunluğu ile geometrik özelliklerin birlikte değerlendirilmesi, enerji sönümleme

kapasitesini önemli ölçüde artırma potansiyeli taşımaktadır. Literatürde, kontrollü katlanma mekanizmalarının darbe sırasında enerjinin daha kararlı ve verimli şekilde sönümlenmesini sağladığı da gösterilmiştir. Bu doğrultuda, çarpışma kutularının katlanma davranışını yönlendirme ve enerji sönümleme kapasitesini maksimize etmek amacıyla hibrit yapılı yenilikçi çarpışma kutularının geliştirilmesi oldukça önemlidir. Ancak mevcut çalışmaların çoğunda malzeme türü veya geometrik parametreler tekil olarak ele alınmış, bu parametrelerin etkileşimli optimizasyonu alanındaki çalışmalar sınırlı kalmıştır. Ayrıca, hibrit yapıdaki çarpışma kutularının darbe sırasında ortaya çıkan karmaşık deformasyon modları üzerindeki etkisi yeterince aydınlatılamamıştır. Bu durum, çarpışma kutularının enerji sönümleme kapasitesini artırmaya yönelik yenilikçi tasarım yaklaşımlarının gerekliliğini ve geliştirilebilir özelliklerini ortaya koymaktadır. Literatürdeki bu boşluk bu tez çalışmasının odaklandığı problemi ifade etmektedir.

4. PROBLEM TANIMI VE ÇALIŞMA MOTİVASYONU

Bu çalışmanın motivasyon kaynağı mevcut çarpışma kutusu tasarımlarında enerji sönümleme verimliliğini artıracak yeni ve özgün bir çarpışma kutusu tasarımının geliştirilme ihtiyacıdır. Literatürde genellikle homojen yapıların veya standart kesit çarpışma kutularının kullanıldığı görülmektedir. Ancak bu yapıların belirli sınırlar içerisinde bulunduğu, enerji sönümleme kabiliyetleri ve ağırlık/performans oranlarının her zaman optimize edilemediği görülmüştür.

Yapılan literatür incelemeleri, çarpışma kutularında uygulanan hibrit tasarım yaklaşımlarına yönelik çalışmaların oldukça sınırlı olduğunu ve bu yapıların darbe altındaki deformasyon davranışlarının kapsamlı biçimde ele alınmadığını göstermektedir. Mevcut araştırmaların büyük bölümü genel geometrik tasarım parametrelerine veya kullanılan malzeme türlerine odaklanmakta; ancak hibrit yapıların deformasyon mekanizmasına, katlanma modlarına ve enerji sönümleme performansına olan katkıları yeterince derinlemesine incelenmemektedir. Ayrıca literatürde çarpışma kutularının toplam enerji sönümleme kapasiteleri sıklıkla değerlendirildiği hâlde, bu enerjinin kontrollü, kararlı ve eksenel doğrultuda düzenli bir deformasyon süreciyle sönümlenmesi konusu çoğunlukla göz ardı edilmektedir. Bu durum yapıda ani burkulma, lokal göçme veya dengesiz katlanma modlarının ortaya çıkmasına ve buna bağlı olarak enerji sönümleme verimliliğinin azalmasına neden olabilmektedir. Bunun yanı sıra hibrit, kompozit ya da çok katmanlı malzemeler ile imal edilen çarpışma kutularına ilişkin çalışmalar artış göstermesine rağmen, farklı malzeme kombinasyonlarının darbe altındaki mekanik tepkiye ve enerji sönümleme davranışına etkileri hâlen sınırlı düzeyde kalmaktadır.

Bu eksikliklerden hareketle gerçekleştirilen bu çalışmada, farklı hibrit tasarım konfigürasyonlarının çarpışma kutularının enerji sönümleme kapasitesi ve deformasyon modları üzerindeki etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada, içyapıyı oluşturan dolgu yoğunlukları farklılaştırılarak deformasyon sürecinin daha düzenli ve kontrollü bir şekilde ilerlemesi hedeflenmiştir. İç takviye yapıları, literatürde çarpışma kutularında kullanılan oluk geometrisi ile aynı işlevi yerine

getirecek şekilde tasarlanmış ve trihexagonal takviye elemanları biçiminde yapı içerisine yerleştirilmiştir. Bu düzenlemeler, belirli bölgelerde rijitliği artırarak deformasyonun kararlı bir biçimde ilerlemesini sağlamayı amaçlamaktadır. Ayrıca, yükün kademeli olarak farklı bölgelere aktarılmasına olanak tanıyarak düzenli katlanma mekanizmaları oluşturmakta ve lokal burkulmaların önüne geçerek yapının genel stabilitesini güçlendirmektedir. Bunun yanında, alüminyum ve PLA malzemelerinin birlikte kullanımıyla farklı malzeme kombinasyonlarının enerji sönümleme davranışı üzerindeki etkileri de değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım, yalnızca güvenlik performansının artırılmasına katkı sunmakla kalmayıp, aynı zamanda sürdürülebilirlik, hafiflik ve üretim verimliliği açısından da potansiyel avantajlar sağlamayı hedeflemektedir. Böylece, literatürde belirlenen boşlukları gidermeye yönelik olarak, kontrollü deformasyon elde edilmesi ve enerji sönümleme verimliliğinin artırılması hedeflenmiştir.

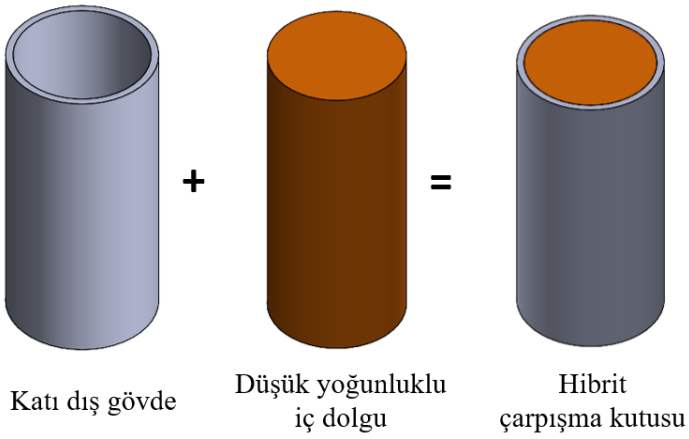
5. MATERYAL VE METOD

Bu tez çalışmasında, çarpışma kutularının mekanik özelliklerini geliştirmek ve daha hafif bir çarpışma kutusu tasarlamak amacıyla optimize edilebilir segment tasarımına sahip hibrit yapıda çarpışma kutusu tasarımı geliştirilmiştir. Tez kapsamında geliştirilen hibrit çarpışma kutusunun mekanik performansını değerlendirmek amacıyla deneysel ve istatistiksel yöntemler birlikte kullanılmıştır. Öncelikle test numunelerinin geometrik tasarımı, numunelerin üretim süreci ve kullanılan malzeme özellikleri ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Daha sonra deneysel çalışmalarda uygulanan yükleme koşulları, test cihazı ve ölçüm yöntemleri detaylandırılmıştır. Farklı yapısal özelliklere sahip numunelerin (segment sayısı, segment kalınlığı ve segment yoğunluğu) deneysel yük koşulları altında nasıl bir davranış sergilediği sistematik biçimde incelenmiştir.

5.1 Hibrit Çarpışma Kutusu Tasarımı

Hibrit tasarım kavramı genellikle farklı mekanik özelliklere sahip bileşenlerin çeşitli kullanım alanlarına uygun gereksinimleri karşılaması amacıyla birleştirilmesini ifade etmektedir (Wakhidah, 2024). Böylelikle düşük ağırlıklı fakat mukavemeti yüksek yapılar elde edilebilmektedir. Bu çalışmada, katı formdaki metalik gövdenin yüksek enerji sönümleme kapasitesi ve düşük yoğunluklu polimer dolgu yapısının düşük ağırlığı avantajının birleştirilmesi amacıyla hibrit bir çarpışma kutusu geliştirilmiştir.

Hibrit çarpışma kutusu tasarımı dairesel kesitli metalik bir profilin içine polimer dolgunun yerleştirilmesi ile elde edilmektedir (Şekil 5.1). Böylelikle katı dış gövde eksenel yüklere karşı yüksek deformasyon direnci ve gelişmiş enerji sönümleme kabiliyeti sağlarken, düşük yoğunluklu polimer içi dolgu yapısı hem yapıyı hafifletmekte hem de kontrollü deformasyon sağlamaktadır. İç dolgu yapısının içerisine, ezilme sırasında katlanma davranışını geliştirmek ve yapının belirli bölgelerinde kasıtlı olarak zayıf alanlar oluşturarak plastik deformasyonu kontrollü şekilde başlat amacıyla optimize edilebilir segmentler eklenmiştir.



Şekil 5.1 Geliştirilen hibrit çarpışma kutusunun yapısı

En iyi mekanik darbe direncini sağlamak amacıyla deneysel tasarım yöntemi kullanılarak iç dolgu tasarımının optimizasyonu yapılmış, deneysel tasarıma uygun olarak üretilen numuneler mekanik testlere tabi tutulmuştur. Ardından deneysel test sonuçları ve tasarım özellikleri arasındaki ilişkiden yararlanarak optimum tasarım özellikleri belirlenmiştir.

5.2 Düşük Yoğunluklu Eksenel Segment Tasarımı

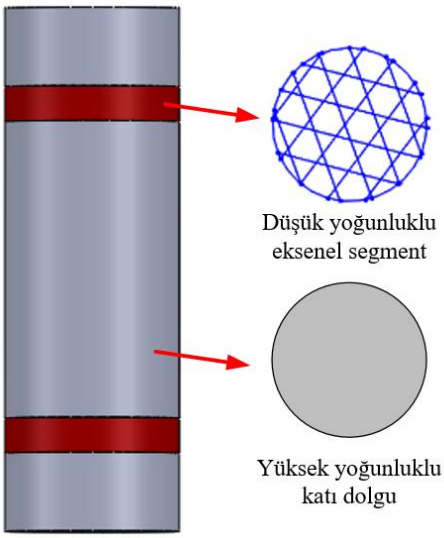
Literatürde çarpışma kutularında enerji emilimini kontrol altına almak, deformasyon kontrolü sağlamak ve yapısal verimliliği artırmak amacıyla kutu üzerinde oluk, çentik veya delik gibi tasarımlar kullanılmaktadır. Bu çalışmada ise çarpışma esnasında kutunun deformasyon davranışını kontrol altına alarak katlanmanın eksen boyunca gerçekleşmesini sağlamak ve aynı zamandan yapıyı hafifletmek amacıyla iç dolgu tasarımında düşük yoğunluklu eksenel segmentler kullanılmıştır.

Çarpışma kutuları üzerinde farklı yoğunluklara sahip segmentlerin oluşturulması, enerji sönümleme ve deformasyon oluşum performansının kademeli olarak kontrol edilmesine imkân tanımaktadır. Bu segmentler, darbe anında deformasyon alanları oluşturarak çarpma enerjisinin daha geniş alana yayılmasını sağlamaktadır. Ayrıca tek bir noktaya aşırı yük binmesini engeller ve malzemenin enerji sönümleme kapasitesini artırır. Ayrıca bir akordeon gibi üst üste katlanarak deformasyon sebebiyle kutunun eğilmesini engeller ve paralel deformasyon bölgeleri oluşturarak çarpma enerjisini

geniş alana yayar. Böylelikle deformasyonun çarpışma kutusu ekseninde ilerlemesi hedeflenmiştir.

Sonuç olarak, farklı yoğunlukta segmentlerin tasarıma dâhil edilmesi, çarpışma kutularında yük taşıma kapasitesi ile enerji sönümleme verimliliği arasında denge kuran kritik bir yaklaşım sunmaktadır. Segmentler yalnızca darbe yüklerinin etkin bir şekilde yönetilmesine olanak tanımakla kalmayıp aynı zamanda malzeme kullanımını optimize ederek yapısal hafifleme sağlamaktadır. Düşük yoğunluklu bu bölgelerinin stratejik olarak konumlandırılması, otomotiv ve havacılık gibi yüksek güvenlik ve hafiflik gerektiren sektörlerde gelecek çalışmalar için önemli bir araştırma ve geliştirme alanı olarak değerlendirilebilir.

Bu çalışmada, mekanik dayanımı iyileştirirken yapının ağırlığını uygun miktarda azaltabilmek amacıyla iç dolgu tasarımı üzerine farklı şekilde yerleştirilen düşük yoğunluklu segmentlerin etkisi incelenmiştir. Segment kalınlığı (8, 12 ve 16 mm), segment yoğunluğu (%30, %50 ve %70) ve segment sayısının (2, 3 ve 4 adet) çarpışma kutusunun enerji sönümleme kapasitesi ve deformasyon davranışı üzerine etkisi değerlendirilmiştir. Farklı parametrelere sahip segment tasarımları farklı deformasyon karakteristikleri göstererek yük aktarımını dengelemekte ve enerji sönümleme kapasitesini optimize etmektedir. Dolayısıyla segment yoğunluğu, kalınlığı ve sayısındaki değişim, çarpışma kutusunun eksenel darbe davranışını doğrudan etkileyerek hem ortalama ezilme kuvveti hem de özgül enerji emilimi üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Hibrit yapılı çarpışma kutusunun iç dolgu yapısı Şekil 5.2’de gösterilmiştir.



Şekil 5.2 Hibrit çarpışma kutusu iç dolgu yapısının tasarımı

5.3 Deneysel Test Numunelerinin Tasarımı ve Üretimi

Bu tez çalışmasında, geliştirilen hibrit çarpışma kutusunun dış gövde malzemesi olarak Al 6063-T6 dairesel tüpler kullanılmıştır. Al 6063-T6 alaşımı hafifliği ve enerji sönümleme kabiliyeti avantajlarından dolayı çarpışma kutularının dış gövde malzemesi olarak tercih edilmiştir. 6063 alüminyum alaşımı, ısıl işlem uygulanarak mükemmel mekanik özelliklere ulaşabilir. Sertleştirme işlemi sonucunda yüksek gerilme mukavemeti, elastiklik ve kırılma tokluğu gösterir. Al 6063 alüminyum alaşımı, Al-Mg-Si (alüminyum-magnezyum-silikon) serisine ait olup, özellikle ekstrüzyon işlemlerinde yaygın olarak kullanılan bir 6000 serisi alaşımdır (Wakhidah vd., 2024) Silikon ve magnezyumun birlikte bulunması, Mg_2Si (magnezyum silisit) çökeltilerinin oluşumunu sağlar ve bu çökeltiler mekanik dayanımın arttırılmasında önemli rol oynar. Düşük alaşım içeriği sayesinde yüksek korozyon direnci ve mükemmel yüzey kalitesi sunar. Ayrıca, termal iletkenlik ve işlenebilirlik açısından da iyi performans göstermektedir. Al6063 alaşımı, yaşlandırma (T5, T6 gibi) ısıl işlemleriyle mukavemeti artırılabilen ve bu sayede yapı, otomotiv ve mimari uygulamalarda sıkça tercih edilen bir malzemedir. Al6063-T6 alaşımının mekanik özellikleri Tablo 5.1'de kimyasal kompozisyonu ise Tablo 5.2'de verilmiştir.

Tablo 5.1 Al6063-T6 ‘nın mekanik özellikleri

Parametre	Değer
Çekme dayanımı	241 Mpa
Akma dayanımı	214 Mpa
Elastisite modülü	68,9 MPa
Poisson oranı	0,33

Tablo 5.2 Al 6063 Al-Alaşımın kimyasal kompozisyonu

Element	Ağırlıkça oran (%)
Magnezyum	0,9
Silikon	0,6
Bakır	0,1
Manganez	0,1
Krom	0,1
Çinko	0,1
Titanyum	0,1
Diğer elementler	0,05

Çarpışma kutularının enerji sönümleme performanslarını geliştirmek ve hafif bir tasarım elde etmek amacıyla iç dolgu malzemesi olarak polilaktik asit (PLA) malzeme tercih edilmiştir. Üretimde kullanılan PLA’nın mekanik özellikleri Tablo 5.3’de verilmiştir. PLA, mısır nişastası ve şeker kamışı gibi yenilenebilir kaynaklardan elde edilen biyobozunur bir termoplastik olup, düşük yoğunluğu sayesinde numunelerin toplam kütlesini artırmadan enerji sönümleme kapasitesine katkı sağlamaktadır (Üner vd., 2012). Malzemenin yüksek rijitlik ve sertlik değerleri ise darbe altında belirli seviyede plastik deformasyon göstererek enerji sönümleme mekanizmasını desteklemektedir. Ancak PLA’nın görece kırılgan yapısı nedeniyle tek başına taşıyıcı bir eleman olarak kullanımı sınırlı olup bu çalışmada alüminyum dış gövde ile hibrit bir yapı içerisinde değerlendirilmiştir. Böylece alüminyum malzemenin sünek deformasyon davranışı ile PLA’nın enerji sönümleme kapasitesi birleştirilerek hem maksimum çökme kuvveti düşürülmüş hem de ezilme kuvveti verimliliği iyileştirilmiş olacaktır. PLA, çevresel sürdürülebilirlik kriterlerini karşılamasının yanı sıra, çarpışma kutularında hafiflik ve darbe dayanımı arasında optimum bir denge kurulmasına olanak sağlamaktadır.

Tablo 5.3 PLA'nın mekanik özellikleri

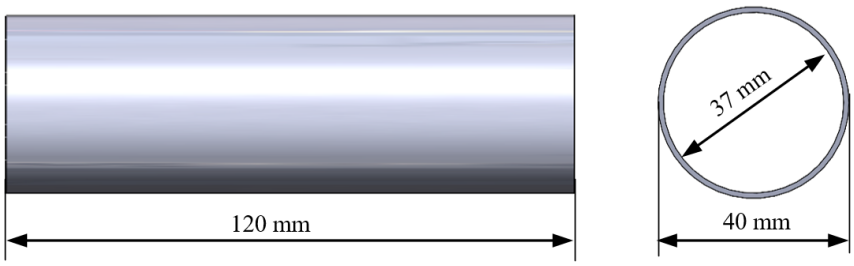
Özellik	Değer
Marka	Robo90 PLA Plus
Renk	Turuncu
Çap	1,75mm +/- 0,05
Yoğunluk (g/cm³)	1,2-1,25
Çekme dayanımı (MPa)	60
Basma dayanımı (MPa)	75
Elastise modülü (GPa)	3,0

PLA dolgulu çarpışma kutularında iç dolgu yoğunluğu, yapının içsel rijitliğini ve enerji sönümleme karakterini belirleyen temel parametrelerden biridir. İç dolgu yoğunluğu arttıkça yapının maksimum ezilme kuvveti, rijitliği ve özgül enerji sönümleme artışı göstermektedir. Buna paralel olarak ağırlık, üretim süresi ve malzeme tüketimi de yükselmektedir. Düşük yoğunluklu (%10–30) dolgular hafiflik ve üretim verimliliği sağlamaktadır. Düşük yük taşıma kapasitesi ve azalmış burkulma direnci nedeniyle erken yapısal başarısızlık riskini artırmaktadır. Orta yoğunluklu dolgular (%30-60) ise mekanik dayanım ile ağırlık arasında optimum dengeyi sağlamaktadır. Kontrollü ve tekrarlanabilir çökme modlarının oluştuğu ve çarpışma sırasında daha verimli enerji sönümlemenin sağlandığı gözlemlenmektedir. Yüksek yoğunluklu dolgular (%60-100) maksimum rijitlik ve enerji sönümleme kapasitesi sunmaktadır. Bu nedenle geliştirilecek çarpışma kutularında optimum yoğunluğun belirlenmesi gerekmektedir.

Numunelerin hazırlanması aşamasında öncelikle deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesinde kullanılacak numunelerin boyutları belirlenmiştir. Çarpışma kutularının enerji sönümleme performansını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen deneylerde numune uzunluğu deformasyon davranışının sağlıklı bir şekilde gözlemlenebilmesi açısından kritik bir tasarım parametresidir. Literatürde genellikle 100 mm ile 200 mm aralığında numune uzunlukları tercih edilmekte olup bu değerler hem çoklu katlanma döngüsünün oluşmasına olanak tanımakta hem de deneysel tekrar edilebilirliği artırmaktadır. Uygun şekilde belirlenmiş bir numune uzunluğu maksimum ezilme kuvveti, ortalama ezilme kuvveti ve enerji sönümleme kapasitesi gibi performans kriterlerinin doğru şekilde hesaplanmasına katkı sağlar. Bu çalışmada numune boyu (L) 120 mm olarak belirlenmiştir.

Çarpışma kutularının tasarımında kullanılan silindirik profillerin çapı (D), numunenin geometrik özelliklerinden biri olarak enerji sönümleme kapasitesi üzerinde belirleyici bir rol oynar. Numune çapı, kesit alanı ve burkulma dayanımı ile doğrudan ilişkilidir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde kullanılan numunelerin çapları 25-100 mm aralığında yer almaktadır. Çalışmamızda dış gövde malzemesi olarak 40 mm çapında alüminyum boru seçilmiştir. Bunun sebebi ezilme davranışı için uygun D/t oranı sağlamasıdır. Bu değer progresif katlanma için uygundur. Bir başka deyişle numunenin düzgün şekilde ezilmesi sağlanırken ani burkulma yaşanması engellenir. Çoğu evrensel test cihazı, 40 mm çaplı numuneleri rahatlıkla sıkıştırabilir. Sonuç olarak verimli enerji sönümleme, kontrollü ezilme ve deneysel pratiklik öncülleri göz önünde bulundurulduğunda 40 mm çap avantaj sağlamaktadır.

Çarpışma kutusu numunelerinde et kalınlığı yapının çarpışma altındaki mekanik tepkisini doğrudan etkileyen temel geometrik parametrelerden bir diğeridir. Et kalınlığı arttıkça numunenin burkulma direnci ve maksimum ezilme kuvveti artmaktadır. Ancak aşırı kalın duvarlar istenilen kontrollü katlanma modlarının oluşumunu engelleyerek yapının kırılgan davranış sergilemesine veya enerji sönümleme verimliliğinin azalmasına yol açabilir. Bu nedenle optimum et kalınlığı seçimi, hem yapının plastik deformasyona girerek darbe enerjisini sönümlemesini sağlamak hem de yapının aşırı rijitleşmesini önlemek açısından kritik öneme sahiptir (Choi ve Hong, 2023). Literatürde 1 mm ile 3 mm arasında değişen et kalınlıkları özellikle alüminyum alaşımlı kutu profiller için yaygın olarak tercih edilmekte ve deneysel olarak farklı kalınlıklarda yapıların çökme modları ve enerji sönümleme performansları detaylı biçimde incelenmektedir. Çalışmamızda dış gövde için 1,5 mm et kalınlığı tercih edilmiştir. Bu kalınlık, çökme sırasında yeterli burkulma direnci sağlayarak yapının ani kırılmadan ziyade kontrollü plastik deformasyon modlarında katlanmasına olanak tanır. Böylece hem maksimum ezilme kuvveti ve ortalama ezilme kuvveti bakımından dengeli bir enerji sönümlemesi gerçekleşir. Ayrıca 1,5 mm kalınlık daha ince duvarlara kıyasla üretim esnasında geometrik kararlılığı artırırken daha kalın profillere göre ise gereksiz ağırlık artışını ve malzeme maliyetini engeller. Deneysel test numunesine ait belirlenen boyutlar Şekil 5.3'te verilmiştir.



Şekil 5.3 Çarpışma kutusu numunesinin boyutları

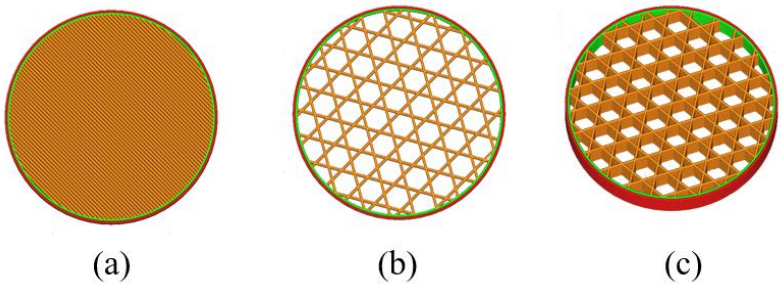
Belirlenen numune uzunluğu aynı zamanda kısa test süreleri ve kolay tekrarlanabilirlik sayesinde istatistiksel güvenilirliği artırırken sayısal modellemelerde de düşük hesaplama maliyetiyle yüksek uyum sağlar. Çarpışma kutularına ait Al 6063 numuneler, 6 metrelik boy borudan 120 mm olacak şekilde bölünmüştür.

Çarpışma kutularında PLA iç dolgu deseninin belirlenmesi, yapının darbe enerjisini nasıl sönümleyeceğini doğrudan etkileyen önemli bir tasarım parametresidir. Dolgu deseninin seçimi sadece mekanik performansı değil aynı zamanda ağırlık, üretim süresi, deformasyon modu ve çökme kararlılığını da etkiler. Farklı iç dolgu desenleri, çarpışma sırasında oluşan gerinim dağılımını ve yük transfer yollarını farklı şekillerde etkileyerek hem ezilme kuvvet profilini hem de çökme davranışını değiştirir. Literatürde yapılan çalışmalar özellikle hücreli yapılar (gyroid, hexagonal, honeycomb, cubic lattice, grid) gibi sürekli ve izotropik desenlerin, gelen yükü daha homojen dağıtarak daha yüksek enerji sönümleme performansı sunduğunu ortaya koymuştur.

Bu çalışmada kullanılan numunelerin iç dolguları 3B yazıcı ile ergiyik yığma modelleme (EYM) tekniği kullanılarak üretilmiştir. Bu üretim tekniği hem düşük maliyetli olup hem de farklı tasarım parametrelerine sahip yapıların aynı anda üretimine olanak tanımaktadır. İç dolgu yapısının tamamen dolu olarak üretilmesi hem çarpışma kutusunun ağırlığını arttırmakta hem de deformasyon davranışını etkilemektedir. Bu sebeple üretim esnasında iç dolgunun genelinde ve segment bölgelerinden farklı doluluk oranları kullanılmıştır. Numune iç dolguları normal şartlarda %100 dolgu doluluk oranına sahipken düşük yoğunluklu segmentlerin yoğunlukları değişmektedir. İç dolgu genelinin %100 dolulukta üretilmiş alanlarının çarpışma sırasında taşıyıcı ve yönlendirici rol üstlenmesi hedeflenmiştir (Şekil 5.4a).

Farklı yoğunluktaki bölgelerin deformasyon yönlendirilmesi ve enerji sönümlemesini artırmak amacıyla düşük yoğunluklu segmentlerde trihexagonal geometrik dolgu deseni seçilmiştir (Şekil 5.4b-c). Trihexagonal hücresel yapıların varlığı, deformasyon modlarının öngörülebilir şekilde gelişmesine, ani burkulmaların önlenmesine ve böylece daha kararlı bir ezilme davranışının elde edilmesine katkı sunmaktadır. Trihexagon dolgu deseni altıgen ve üçgen hücrelerin birleşiminden oluşan karmaşık bir yapıya sahip olup çarpışma kutularında enerji sönümleme performansını optimize etmek için ideal bir iç dolgu çözümü sunmaktadır. Desen yük taşıma kapasitesini artırırken aynı zamanda yapının deformasyon sürecinde kontrollü burkulma ve çatlama bölgeleri oluşturmasına olanak verir**.** Üçgen ve altıgen hücrelerin kombinasyonu sayesinde yapıya çok yönlü rijitlik ve mukavemet kazandırır. Darbe enerjisinin etkili ve homojen şekilde sönümlenmesini sağlar (Choiron, 2020). Ayrıca trihexagon dolgu deseni yüksek yüzey alanı ve bağlantı noktaları ile yapısal stabiliteyi artırmaktadır. Üretim açısından ise bu desenin yapısı 3D yazıcıda iyi basılabilirlik sunar ve malzeme kullanımında da verimli sonuçlar doğurarak hafiflik ile dayanıklılık dengesini sağlamada avantajlıdır (Saber vd., 2025).

Farklı yoğunluklarda üretilen hibrit yapının iç dolgusu, çarpışma kutusunun ağırlık optimizasyonu ve enerji sönümleme verimi açısından avantaj sağlamaktadır. Sonuç olarak, bu yaklaşım, çarpışma kutularının geleneksel homojen yapılı tasarımlarına kıyasla daha yüksek özgül enerji emilimi, düşük maksimum ezilme kuvveti ve iyileştirilmiş deformasyon kararlılığı sunmayı, ileri seviye darbe güvenliği uygulamaları için yenilikçi bir çözüm ortaya koymayı hedeflemektedir.



Şekil 5.4 Numune iç dolgu desenleri a) iç dolgu deseni, b) segment bölgeleri 2 boyutlu iç dolgu deseni, c) segment bölgeleri 3 boyutlu iç dolgu deseni (Trihexagon)

5.4 Deney Tasarımı

Düşük yoğunluklu segmentlerin çarpışma kutularının mekanik davranışı üzerindeki etkisini belirlemek ve segment tasarımını optimize etmek amacıyla deneysel tasarım gerçekleştirilmiştir. Taguchi deney tasarımı, sistem veya ürün performansını etkileyen parametrelerin en uygun kombinasyonunu belirlemek amacıyla kullanılan istatistiksel bir yöntemdir (Xin, 2025). Bu yöntem minimum sayıda deneyle maksimum bilgi elde edilmesini sağlar. Ayrıca varyasyonu azaltarak süreçlerin daha kararlı ve kaliteli sonuçlar vermesine olanak tanır. Böylece deneysel çalışmalarda optimum tasarım parametrelerinin belirlenmesi ve performansın iyileştirilmesi hedeflenir (Nas vd., 2022).

Taguchi deney tasarımı aynı zamanda, bir sürecin veya ürünün performansını etkileyen faktörlerin sistematik olarak incelenmesi amacıyla gerçekleştirilen bir istatistiksel optimizasyon yöntemidir. Analiz süreci, öncelikle deneyde kullanılacak kontrol faktörlerinin ve bu faktörlere ait seviyelerin belirlenmesiyle başlar. Ardından bu faktörlerin kombinasyonlarını temsil eden ortogonal diziler oluşturulur ve deneyler bu düzen doğrultusunda gerçekleştirilir. Elde edilen veriler sinyal-gürültü (S/N) oranı ve varyans analizi (ANOVA) gibi istatistiksel yöntemlerle değerlendirilir. Bu değerlendirme sonucunda sürecin performansını en çok etkileyen faktörler belirlenir ve optimum parametre kombinasyonu tespit edilerek sistemin verimliliği ile kararlılığı artırılır. Bu tez çalışmasında, deneysel tasarım faktörleri olarak segment sayısı, segment kalınlığı ve segment doluluk oranı belirlenmiştir. Faktörlere ait belirlenen alt seviyeler Tablo 5.4'de verilmiştir.

Tablo 5.4 Deneysel tasarım parametreleri ve seviyeleri

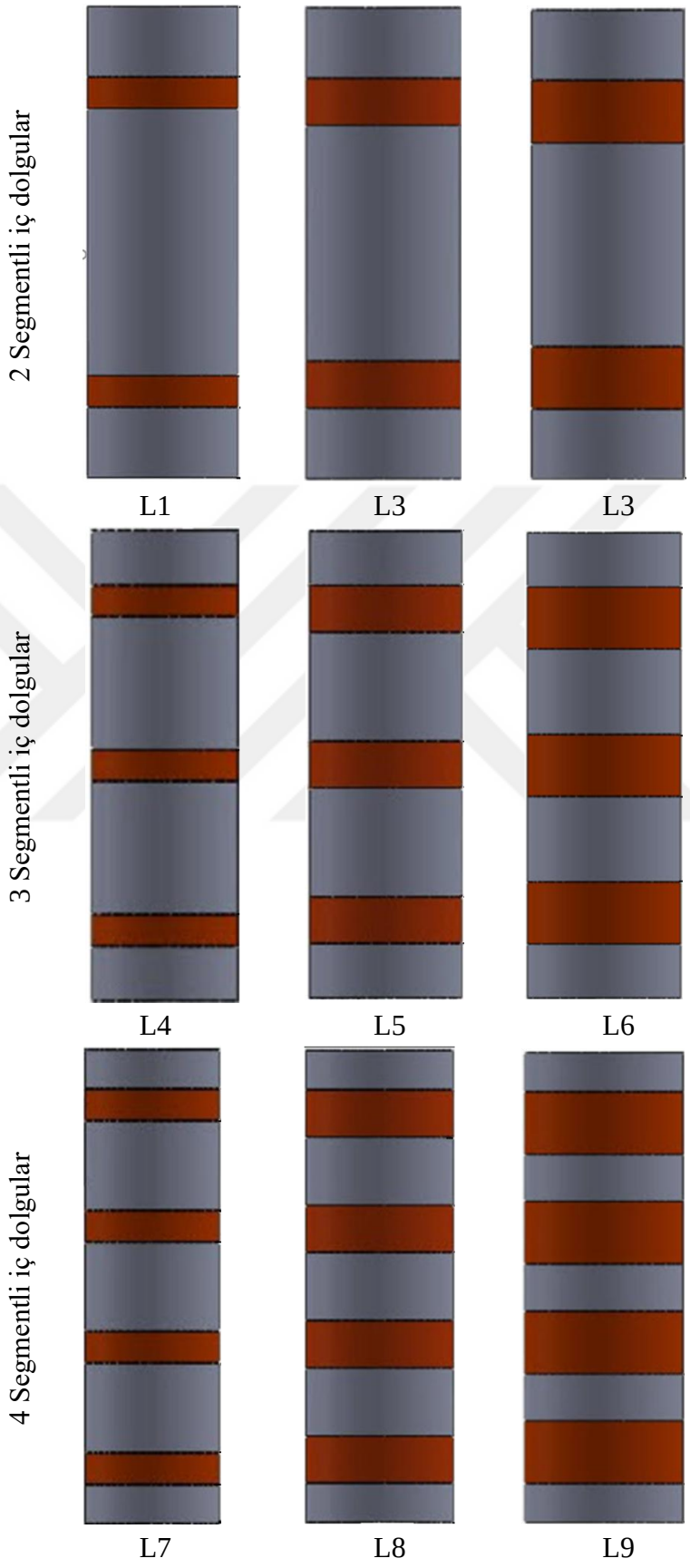
Faktörler	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Segment sayısı	2 adet	3 adet	4 adet
Segment kalınlığı	8 mm	12 mm	16 mm
Segment doluluk oranı	%30	%50	%70

Segment kalınlığı, yapının rijitliğini ve deformasyon modlarını etkilerken, segment sayısı çarpışma sırasında katlanma sırasını ve yük aktarım mekanizmasını belirleyen önemli bir faktör olarak değerlendirilmiştir. Bu değişkenlerin kombinasyonları dikkate alınarak tasarlanan deneyler aracılığıyla çarpışma kutusunun maksimum enerji

emilimi, minimum ağırlık ve yüksek deformasyon kararlılığı sağlayan en uygun geometrik konfigürasyonunun elde edilmesi hedeflenmiştir. Belirlenen faktörler ve seviyeleri kullanılarak Taguchi L9 dizisine göre gerçekleştirilen Taguchi deney tasarımı Tablo 5.5'de verilmiştir. Deneysel tasarıma uygun olarak her bir tasarım Solidworks yazılımı kullanılarak 3D modellenmiştir. Hazırlanan iç dolgu modelleri ve segmentlerin yerleşimi Şekil 5.5'te gösterilmiştir. Segmentlerin yerleşiminde 2 segmentli tasarımlarda üst yüzeyden ve alt yüzeyden 18 mm, 3 segmentli tasarımlarda 14 mm ve 4 segmentli tasarımlarda 10 mm boşluk bırakılarak segmentler yerleştirilmiş, kalan alana segmentler eşit aralıklarla yerleştirilmiştir.

Tablo 5.5 Deney tasarımı

	Segment sayısı	**Segment kalınlığı (mm)**	**Segment yoğunluğu (%)**
L1	2	8	30
L2	2	12	50
L3	2	16	70
L4	3	8	50
L5	3	12	70
L6	3	16	30
L7	4	8	70
L8	4	12	30
L9	4	16	50



Şekil 5.5 Çarpışma kutusu iç dolgu üzerinde segmentlerin konumlandırılması

5.5 Numunelerin Hazırlanması

Deneysel test numunelerinin deney tasarıma uygun olarak modellene iç dolguları Crealitiy Ender 3 V3 markalı 3D yazıcı kullanılarak üretilmiştir (Şekil 5.6). Numunelerin 3D üretim parametreleri Ultimaker Cura yazılım kullanılarak belirlenmiştir. Sabit üretim parametreleri Tablo 5.6'da verilmiştir. Segment iç yapısında meydana gelen deformasyonların belirgin şekilde görülmesi için turuncu renkli filament tercih edilmiştir. Bu sayede numunelerin iç dolgu yoğunlukları ve segment konfigürasyonları görsel olarak rahatlıkla incelenebilmiş ve tasarım doğrulaması daha etkin bir şekilde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.6 Numunelerin 3D yazıcı ile imalatı

Tablo 5.6 3D baskı parametreleri

Parametreler	Değer
Nozul çapı	0,4 mm
Baskı hızı	60 mm/s
Tabla sıcaklığı	60°C
Yazdırma sıcaklığı	210°C
Katman yüksekliği	0,2 mm
Duvar kalınlığı	0,8 mm
Duvar hattı sayısı	2
Üst/alt katman kalınlık	0,8 mm

Üretilen numuneler, çarpışma kutusu tasarımında öngörülen kontrollü deformasyon ve düzenli enerji sönümleme özelliklerini test edebilmek amacıyla Al6063 borunun içerisine özenle yerleştirilmiştir (Şekil 5.7). PLA ile üretilen numunelerin boru içerisine montajında herhangi bir yapıştırıcı veya ek bağlantı elemanı kullanılmamış

olup, bu sayede yapının doğal deformasyon davranışı ve segmentlerin yük aktarımına etkisi müdahale edilmeden gözlemlenebilmiştir. Bu yaklaşım hem deneysel doğruluğu artırmakta hem de segmentlerin kendi geometrik yapıları ve iç dolgu düzenlerinin enerji sönümleme sürecine olan katkısını daha güvenilir bir biçimde incelemeyi mümkün kılmaktadır.



Şekil 5.7 Çarpışma kutusu numuneleri

Çarpışma kutularında ağırlık, yapının çarpışma anındaki mekanik tepkisinin yanı sıra taşıt üzerindeki toplam kütle etkisini minimize etmek amacıyla kritik bir tasarım parametresi olarak değerlendirilmektedir. Hafiflik özellikle yakıt verimliliği ve hızlanma performansı açısından avantaj sağlamaktadır. Ancak aşırı ağırlık azaltımı yapısal dayanım ve enerji sönümleme kapasitesini olumsuz etkileyebilir. Bu sebeple ağırlık seçimi; maksimum ezilme kuvveti, özgül enerji sönümleme ve ezilme kuvveti verimi gibi performans kriterleriyle birlikte değerlendirilmelidir. Numuneler hassas terazi ile ölçülmüş (Şekil 5.8), ortalama ağırlıkları Tablo 5.7'de verilmiştir. Ağırlık parametreleri aynı zamanda numunelerin özgül enerji emiliminin değerlendirilmesinde kullanılmıştır.



Şekil 5.8 L5 numunesinin ağırlığının ölçümü

Tablo 5.7 Numunelerin ortalama ağırlıkları

Numune No	Segment sayısı	Segment kalınlığı (mm)	Segment yoğunluğu (%)	Ağırlık (gr)
L1	2	8	30	170,78
L2	2	12	50	172,71
L3	2	16	70	178,33
L4	3	8	50	173,21
L5	3	12	70	177,75
L6	3	16	30	153,77
L7	4	8	70	183,04
L8	4	12	30	153,38
L9	4	16	50	159,07

5.6 Numunelerin Test Süreci

Deneysel test numunelerinin ezilme davranışlarını belirlemek amacıyla yarı-statik yük koşulları altında basma testleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel testler, Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan 100 kN kapasiteli Shimadzu Autograph AGS-X çekme test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.9). Basma testleri, literatürde belirtilen referanslara uygun olarak 5 mm/dk hızda yapılmış ve numuneler 30 mm yer değiştirene kadar devam edilmiştir. Her numune türünden birer numune tam yoğunlaşma gerçekleşene kadar test edilmiş, ilk 30 mm için değerler kullanılmıştır. Deneyler sonucunda numunelerin çekme dayanımı belirlenmiştir. Deneysel verilerin okuma sıklığı 0,2 ms'dir.



Şekil 5.9 L1 numunesinin basma testi işlemi

Çarpışma kutuları üzerinde gerçekleştirilen basma testleri sonucunda kuvvet, uzama, gerilme ve gerinim değerleri elde edilmiştir. Bu değerler, numunelerin yük altında gösterdiği mekanik tepkileri belirlemek amacıyla kullanılacaktır. Elde edilen kuvvet ve uzama verileri, malzemenin deformasyon sürecini anlamaya yardımcı olurken, gerilme ve gerinim değerleri ise malzemenin dayanım ve şekil değiştirme kapasitesini değerlendirmek için kullanılmıştır. Böylece çarpışma kutularının enerji sönümleme performansı ve yapısal davranışı daha detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Test sonucu numunelerde oluşan deformasyon değişimleri Şekil 5.10'da verilmiştir.



Şekil 5.10 Numunelerin basma testi sonucu elde edilen görüntüleri

Deneysel testin ardından L1-L9 numunelerinden her birinden birer adet alınarak, iç kısımlarındaki burkulma, yön değiştirme ve benzeri deformasyonların incelenebilmesi amacıyla demir testere yardımıyla simetrik olarak kesilmiştir (Şekil 5.11).



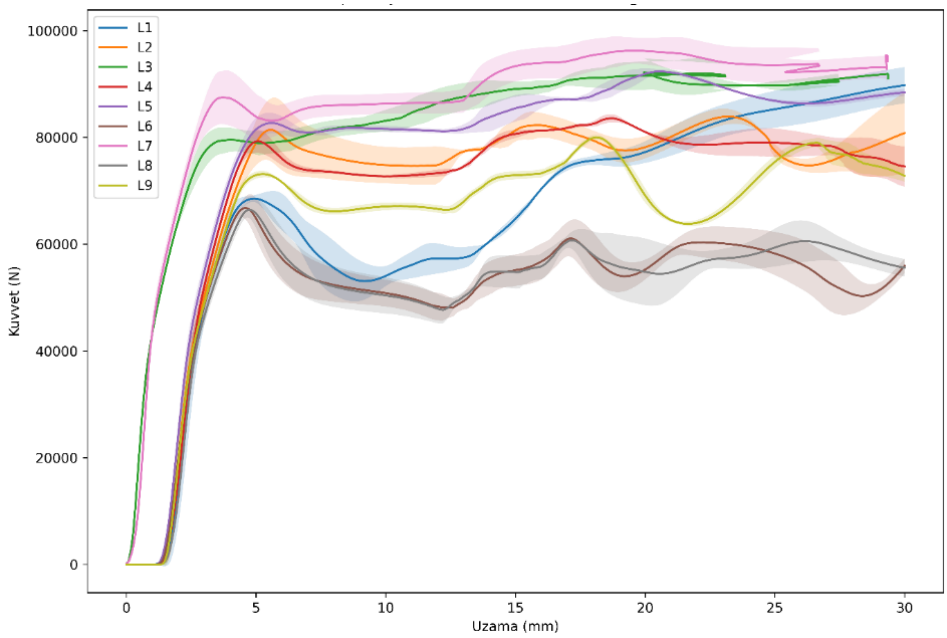
Şekil 5.11 a) Numunelerin kıl testere yardımı ile kesimi, b) kesilmiş numune

5.7 Deney Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Farklı yapıdaki deneysel test numunelerinin tasarım özellikleri ile mekanik dayanım kriterleri arasındaki ilişkinin belirlenmesi amacıyla deney sonuçları kullanılarak numuneler için sönümlenen enerji değeri, maksimum ezilme kuvveti, ortalama ezilme kuvveti değerleri hesaplanmıştır (Tablo 5.8). Bu değerlerin hesaplanmasında daha önce verilen denklemler kullanılmıştır. Değerleri numunelere ait kuvvet-uzama eğrilerinden elde edilmiştir.

Tablo 5.8 Numunelere ait mekanik performans değerleri

Numune no	Segment sayısı	Segment kalınlığı (mm)	Segment yoğunluğu (%)	SE (J)	MEK (kN)	OEK (kN)
L1	2	8	30	1962,47	68,544	68,898
L2	2	12	50	2137,78	81,286	74,996
L3	2	16	70	2442,47	91,679	83,653
L4	3	8	50	2118,10	79,191	74,382
L5	3	12	70	2335,90	92,313	81,700
L6	3	16	30	1537,37	66,566	53,826
L7	4	8	70	2541,13	87,334	87,165
L8	4	12	30	1542,79	66,210	54,288
L9	4	16	50	1949,83	73,162	68,521



Şekil 5.12 Numunelerin kuvvet-uzama eğrileri

Üç tekrarlı basma deneyi sonucunda elde edilen verilerden her bir numune grubuna ait değerlerin ortalaması hesaplanarak numunelerin kuvvet-uzama eğrileri oluşturulmuştur (Şekil 5.12). Grafikte verilen standart sapma aralıkları ise deney tekrarları arasındaki değişkenliği yansıtarak ölçümlerin tutarlılığını nicel biçimde ortaya koymaktadır. Deneyin ilk temas anında oluşan düşük büyüklükteki kuvvetler ile ölçüm kaynaklı belirsizlikler, analiz sonuçlarını etkilememesi amacıyla değerlendirme kapsamı dışında bırakılmıştır. Daha sonra, başlangıç deformasyonunun tanımlanmasında eşik değer olarak $F \geq \%2 \cdot F_{max}$ kriteri uygulanmıştır.

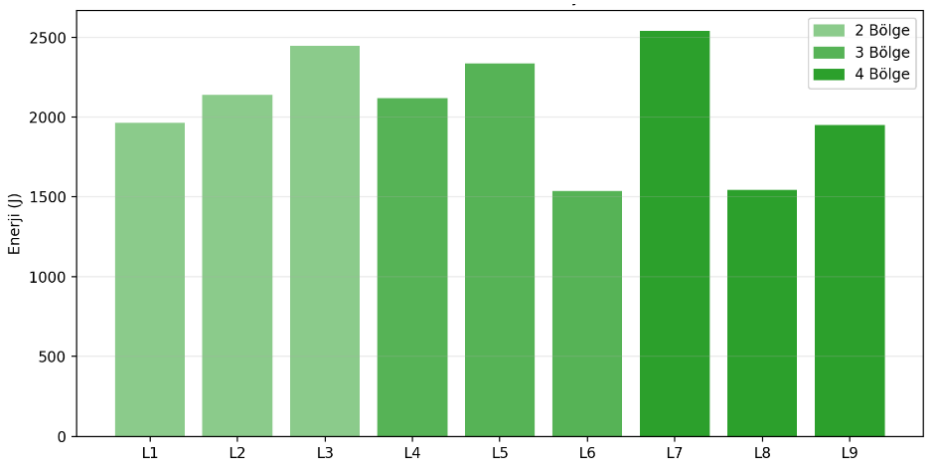
Standart sapma bantlarının genel olarak dar bir aralıkta seyretmesi, deneysel sonuçların yüksek tekrarlanabilirliğe sahip olduğunu ve hesaplanan ortalama eğrilerin ilgili tasarım gruplarını güvenilir biçimde temsil ettiğini göstermektedir. Elde edilen bu eğriler, sönümlenen enerji miktarı, ortalama ezilme kuvveti ve özgül enerji emilimi gibi temel performans göstergelerinin belirlenmesinde ana referans veri seti olarak kullanılmıştır.

Densifikasyon bölgesine yaklaşılırken standart sapma değerlerinde görülen artış, farklı numunelerde yerel kilitlenme ve yapısal temasın farklı uzama seviyelerinde ortaya çıkmasından kaynaklanmaktadır. Mekanik performans kriterlerinin hesaplanmasında tüm numune grupları için yapılan ilk deneylerden yola çıkarak belirlenen 30 mm'lik

deformasyon sınırı kullanılmıştır. L7 ve L13 numunelerinin kuvvet-uzama eğrilerinde gözlenen dalgalanmalar, büyük yer değiştirmelerde ortaya çıkan küçük kuvvet oynamalarından kaynaklanmakta olup, yoğunlaşma sürecinde yerel temas, yapısal kilitlenme ve makine-numune etkileşiminin baskın hale geldiği noktayı temsil etmektedir. Bu davranışın tüm tekrarlarda benzer şekilde görülmesi, söz konusu dalgalanmaların rastlantısal bir deney gürültüsünden değil, sistemin kendi fiziksel karakteristiğinden ileri geldiğini göstermektedir. Ortalama kuvvet-yer değiştirme eğrisinde ortaya çıkan küçük salınımlar ise tekil tekrarlarda bulunmamakta; densifikasyonun başlangıç konumunun tekrarlar arasında milimetrik farklılık göstermesi nedeniyle noktasal ortalama alma işleminden doğan matematiksel bir uyumsuzluk olarak ortaya çıkmaktadır.

5.7.1 Sönümlenen Enerji Performansının Değerlendirilmesi

Sönümlenen enerji, çarpışma kutularının darbe esnasında sönümlediği toplam enerjiyi temsil eder ve yapının enerji sönümleme kapasitesini doğrudan gösteren en temel parametrelerden biridir. Bu değer, kuvvet-yer değiştirme eğrisi altında kalan alan olarak tanımlanır ve kutunun deformasyon sürecinde ne kadar enerjiyi plastik deformasyon yoluyla yutabildiğini ifade eder. Deneysel bulgulara göre sönümlenen enerji değerleri 1537,37 J ile 2541,13 J aralığında değişmektedir (Şekil 5.13). Şekilde tüm numunelere ait sönümlenen enerji değerleri grafiksel olarak verilmiştir.



Şekil 5.13 Numunelere ait SE değerleri

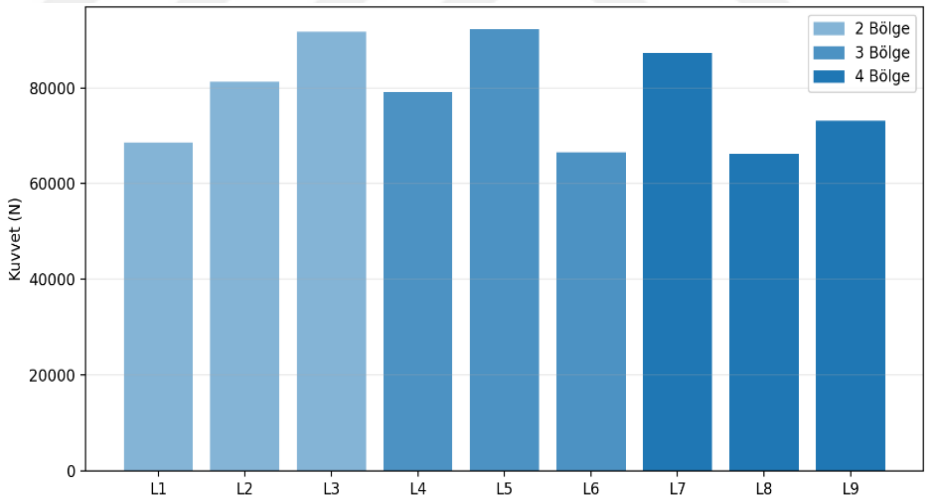
En yüksek enerji sönümleme kapasitesi L7 numunesinde (2541,13 J) elde edilmiştir. L7'nin dört segmentli, 8 mm kalınlıkta ve yüksek yoğunluklu (%70) yapısı, deformasyonun kararlı şekilde ilerlemesini sağlamış ve enerjinin büyük kısmının düzgün bir şekilde sönümlemesine katkı sağlamıştır. Bu numunede oluşan düzenli katlanma modları burkulma yerine kontrollü ezilme davranışı sergilendiğini göstermektedir. Buna karşılık L6 (1537,37 J) numunesinde sönümlenen enerji miktarı daha düşük bulunmuştur. Bu durum, düşük segment yoğunluğunun deformasyon sürecinde yük aktarımını dengesiz hale getirdiğini ve enerji sönümleme verimini azalttığını göstermektedir. Genel olarak, segment yoğunluğu arttıkça çarpışma kutularında deformasyonun düzenli hale geldiği, enerjinin daha etkin sönümlendiği görülmüştür. Sonuç olarak, maksimum enerji sönümleme kapasitesine ulaşmak için segment geometrisinin, kalınlığının ve yoğunluğunun dengeli bir şekilde tasarlanması gerekmektedir.

5.7.2 Maksimum Ezilme Kuvvetinin Değerlendirilmesi

Maksimum ezilme kuvveti çarpışma kutularının darbe yükü altında deformasyon sürecine başladığı andaki en yüksek kuvveti vermektedir. Maksimum ezilme kuvveti değerinin yüksek olması yapının ilk darbe anında enerjiyi yeterince sönümlemeden önce ani bir yük tepkisi vermesi anlamına gelmektedir. Bu durum özellikle otomotiv güvenlik sistemlerinde yolcu güvenliği açısından istenmeyen bir davranıştır. Yüksek MEK darbe enerjisinin önemli bir kısmının çarpışma kutusu tarafından yutulmak yerine doğrudan taşıyıcı gövdeye ve kabin bölgesine aktarılmasına neden olur. Bu

sebepten dolayı etkili bir enerji sönümleyici yapı tasarımında MEK değerinin düşük tutulması ve yapısal dengenin korunması hedeflenmektedir.

Elde edilen deneysel bulgular incelendiğinde maksimum ezilme kuvvetinin 66,210 ile 92,313 kN arasında değiştiği görülmektedir. Bu aralıkta en düşük MEK değeri 66,210 kN ile L8 numunesinde elde edilmiştir (Şekil 5.14). L8 numunesinin düşük MEK göstermesi, bu yapıdaki 4 segmentli ve 12 mm kalınlıktaki yüksek yoğunluklu (%30) oluk geometrisinin deformasyon başlangıcında enerjiyi daha etkin biçimde dağıtarak ani yük artışlarını engellediğini göstermektedir. Bu durum segmentlerin çarpışma sürecinde gerilme birikimini kontrol altına aldığını ve burkulmanın daha yumuşak biçimde başlamasına olanak tanıdığını göstermektedir. Buna karşın en yüksek MEK değeri 92,313 kN ile L5 numunesinde ölçülmüştür. L5 numunesi 3 segmentli ve %70 yoğunluğa sahiptir. Numunenin bu özellikleri deformasyon sürecinde yük aktarımının lokal bölgelerde yoğunlaşmasına neden olarak ani kuvvet piklerinin ortaya çıkmasına yol açmıştır.

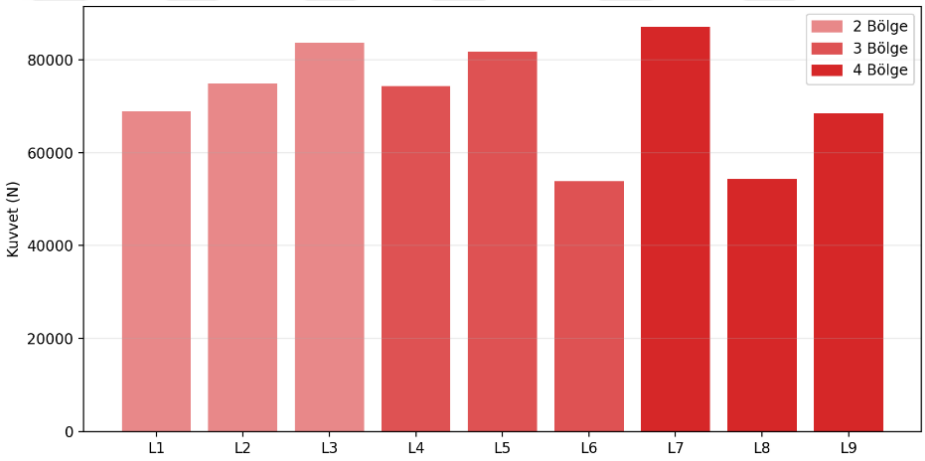


Şekil 5.14 Numunelere ait MEK değerleri

5.7.3 Ortalama Ezilme Kuvveti Yorumlanması

Ortalama ezilme kuvveti, çarpışma kutularının enerji sönümleme sürecinde sergilediği genel mekanik kararlılığı ve deformasyon süresince yük taşıma kapasitesinin sürekliliğini ifade eden en kritik parametrelerden biridir. OEK, kuvvet-yer değiştirme eğrisi altında kalan alanın deformasyon mesafesine oranı olarak tanımlanmakta olup

çarpışma süreci boyunca malzemenin darbeye karşı gösterdiği ortalama direnç seviyesini temsil eder. Bu nedenle yüksek OEK değeri yapının deformasyonun farklı aşamalarında enerjiyi kararlı bir biçimde sönümlediği ve yük aktarımında ani düşüşler yaşanmadığını gösterir. Başka bir ifadeyle OEK'nin yüksek olması çarpışma kutusunun enerji sönümleme sürecinde istikrarlı katlanma modları ve kontrollü deformasyon davranışı sergilediğinin göstergesidir. Deneysel sonuçlar incelendiğinde ortalama ezilme kuvveti değerlerinin 53,826 ile 87,165 kN aralığında değiştiği, bu değerlerin numune geometrisine ve segment özelliklerine göre anlamlı farklılıklar gösterdiği görülmektedir. En yüksek ortalama ezilme kuvveti L7 (87,165 kN) numunesinde elde edilmiştir (Şekil 5.15). L7 numunesinde dört segmentli 8 mm kalınlığında ve düşük yoğunlukta (%70) bir yapı bulunmasına rağmen, deformasyon sırasında simetrik katlanma modları oluşmuş ve bu durum yük taşıma sürekliliğini artırmıştır. Bu numunede gözlenen yüksek OEK değerleri hem geometrik simetrinin hem de uygun segment aralıklarının deformasyon istikrarını desteklediğini göstermektedir.



Şekil 5.15 Numunelere ait OEK değerleri

En düşük ortalama ezilme kuvveti L6 (53,826 kN) numunesinde ölçülmüştür. L6'daki düşük OEK değeri, her ne kadar maksimum kuvvet düşük olsa da deformasyon sürecinin ilerleyen aşamalarında kuvvetin kararlılığını koruyamadığını ortaya koymaktadır. Bu durum yetersiz segment sayısının (3 adet) yük dağılımını sınırladığını ve deformasyon boyunca lokal burkulmaların oluştuğunu göstermektedir.

Elde edilen tüm deneysel veriler birlikte değerlendirildiğinde, çarpışma kutularının enerji sönümleme performansının segment geometrisine doğrudan bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Maksimum ezilme kuvveti, ortalama ezilme kuvveti ve sönümlenen enerji değerleri arasındaki ilişki, segment sayısı, kalınlığı ve yoğunluğunun deformasyon davranışı üzerindeki etkisini açık biçimde ortaya koymuştur. Deney sonuçlarına göre segmentlerin varlığı ve uygun şekilde tasarlanması, çarpışma kutularında deformasyonun düzenli katlanma modlarıyla ilerlemesini sağlamış, ani kuvvet artışlarını azaltarak maksimum ezilme kuvvetini düşürmüştür. Bu durum yapının darbe anında daha yumuşak bir tepki göstermesini ve enerjinin kademeli olarak sönümlenmesini mümkün kılmıştır.

6. DENEYSEL SONUÇLARININ İSTATİSTİKSEL ANALİZİ

Çalışmanın bu bölümünde çarpışma kutuları numuneleri üzerinde gerçekleştirilen deneylere ait sonuçlar farklı istatistiksel test yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Öncelikle tasarım faktörlerinin mekanik performans parametreleri üzerindeki etkisi belirlenmiş ardından faktörler ve mekanik performans parametreleri arasındaki matematiksel ilişki belirlenmiştir. Bu ilişkiden yola çıkarak optimum tasarım parametreleri hesaplanmıştır.

6.1 Varyans Analizi

Varyans analizi (ANOVA), deneysel çalışmalarda birden fazla faktörün veya faktör seviyesinin yanıt değişkeni üzerindeki etkilerinin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını belirlemek amacıyla kullanılan temel bir istatistiksel yöntemdir (Montgomery, 2019). ANOVA yaklaşımı, toplam varyansı faktörlerden kaynaklanan varyans ve hata varyansı olarak ayırarak, parametre etkilerinin güvenilir biçimde yorumlanmasını sağlar. Bu yöntem, özellikle mühendislik ve üretim odaklı çalışmalarda, baskın parametrelerin belirlenmesi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, mekanik performans parametreleri üzerinde etkili tasarım parametrelerini ve etki oranlarını belirlemek amacıyla kullanılmıştır. Sönümlenen enerji değeri için gerçekleştirilen ANOVA analizi sonuçları Tablo 6.1'de verilmiştir.

Tablo 6.1 Sönümlenen enerji değeri için varyans analiz tablosu

Faktörler	SD	SKT	Katkı oranı (%)	DKT	DKO	F değeri	P değeri
Segment sayısı	2	62759	6,12%	62759	31380	16,25	0,058
Segment kalınlığı	2	94749	9,24%	94749	47375	24,54	0,039
Segment yoğunluğu	2	864158	84,26%	864158	432079	223,82	0,004
Hata	2	3861	0,38%	3861	1930		
Toplam	8	1025527	100,00%				

Varyans analizi tablosunda yer alan P (Anlamlılık) değerleri, faktörlerin deney sonuçları üzerindeki istatistiksel anlamlılığını göstermektedir (Gopalsamy vd., 2009).

%95 güven düzeyinde gerçekleştirilen analizlerde, p değeri değeri 0,05'ten küçük olan faktörler istatistiksel olarak anlamlı kabul edilirken, 0,05'ten büyük olan değerler anlamlı değildir ve dolayısıyla bu faktörlerin etkisi deneyler açısından önemsiz sayılmaktadır. Sönümlenen enerji değeri için yapılan analiz incelendiğinde, segment sayısı, segment kalınlığı ve segment yoğunluğu faktörlerinin P değerleri 0,05'in altında olduğundan, bu faktörlerin sönümlenen enerji üzerindeki etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. Öte yandan katkı değerleri, her bir faktörün toplam varyansa yaptığı göreceli katkıyı göstermektedir. Analiz sonuçlarına göre, sönümlenen enerji üzerinde en etkili faktör segment yoğunluğu iken, en düşük katkıyı sağlayan faktör segment sayısıdır. Bu bilgiler, deney tasarımında hangi faktörlerin optimize edilmesinin performans üzerinde daha etkili olacağını göstermektedir (Gopalsamy vd., 2009). Sıralı kareler toplamı, bir faktörün toplam varyans içindeki katkısını sırayla hesaplayan bir ölçüttür. Bu değer söz konusu faktörün deney sonuçları üzerindeki etkisini göstermektedir; değer ne kadar büyükse, faktörün deney çıktısındaki payı ve etkisi de o kadar yüksek demektir. Tablo 6.1'de verilen F değeri bir faktörün oluşturduğu varyansın hata varyansına oranıdır. F değeri ne kadar büyükse, ilgili faktörün deney sonucuna etkisi o kadar güçlüdür (Ünverdi vd., 2019).

Maksimum ezilme kuvveti için gerçekleştirilen ANOVA analizi sonuçları Tablo 6.2'de verilmiştir. Varyans analiz tablosu incelendiğinde verilen sonuçlar her bir bağımsız değişkenin modele yaptığı katkıyı yüzdesel olarak göstermektedir. Segment yoğunluğu faktörü %93,87 ile toplam varyansın en büyük kısmını açıklamakta ve modeldeki en etkili faktör olarak öne çıkmaktadır. Bunu sırasıyla %4,59 ile Segment sayısı ve %1,36 ile segment kalınlığı izlemektedir. Geriye kalan %0,18'lik varyans ise açıklanamayan hata terimine aittir. Bu dağılım, özellikle segment yoğunluğu faktörünün modele olan katkısının dikkate değer olduğunu göstermektedir. Ancak istatistiksel anlamlılık açısından bakıldığında, segment kalınlığı 0,05'ten büyük olduğu için %95 güven düzeyinde anlamsızdır. Bu değer katkı oranının da çok düşük çıkmasına neden olmuştur.

Tablo 6.2 Maksimum ezilme kuvveti için varyans analiz tablosu

Faktörler	SD	SKT	Katkı oranı (%)	DKT	DKO	F değeri	P değeri
Segment sayısı	2	40012486	4,59%	40012486	20006243	25,16	0,038
Segment kalınlığı	2	11829370	1,36%	11829370	5914685	7,44	0,118
Segment yoğunluğu	2	818410747	93,87%	818410747	409205373	514,65	0,002
Hata	2	1590221	0,18%	1590221	795111		
Toplam	8	871842824	100,00%				

Ortalama ezilme kuvveti için gerçekleştirilen ANOVA analizi sonuçları Tablo 6.3'de verilmiştir. Varyans analiz tablosu göre toplam varyansın %83,53'ünü açıklayan segment yoğunluğu, modele en yüksek katkıyı sağlayan faktör olarak öne çıkmaktadır. Diğer yandan segment kalınlığı 9,76% katkı ile ikinci sırada yer alırken segment sayısı yalnızca %6,04'lık katkı ile modelde en düşük etkiye sahip değişken olmuştur. Kalan %0,68'lik varyans ise hata terimi altında yer almakta ve açıklanamamaktadır. Aynı zamanda anlamlılık açısından incelenecek olursa 0,008'lik değeriyle segment yoğunluğu ortalama ezilme kuvveti üzerindeki etkisi en anlamlı parametredir. Segment kalınlığının P değeri 0,05'ten küçük olmamasına rağmen bu değere çok yakın hesaplanmıştır.

Tablo 6.3 Ortalama ezilme kuvveti için varyans analiz tablosu

Faktörler	SD	SKT	Katkı oranı (%)	DKT	DKO	F değeri	P değeri
Segment sayısı	2	68884271	6,04%	68884271	34442136	8,93	0,101
Segment kalınlığı	2	111237387	9,76%	111237387	55618693	14,42	0,065
Segment yoğunluğu	2	952361846	83,53%	952361846	47618092	123,42	0,008
Hata	2	7716221	0,68%	7716221	3858111		
Toplam	8	1140199725	100,00%				

6.2 Regresyon Analizi

Regresyon analizi, bağımlı bir değişken ile bir veya daha fazla bağımsız değişken arasındaki nicel ilişkiyi modellemek ve bu ilişkinin yönünü ile büyüklüğünü belirlemek amacıyla kullanılan istatistiksel bir yöntemdir (Yi, 2015). Bu analizde regresyon katsayıları, her bir bağımsız değişkenin yanıt üzerindeki etkisini

matematiksel olarak ifade ederken; R^2 katsayısı ile modelin açıklayıcılığı belirlenebilir. Regresyon analizi bu çalışmada, deneylerden elde edilen veriler ile faktörler arasındaki matematiksel ilişkiyi belirlemek ve faktörlerin çıktı üzerindeki etkilerini sayısal olarak ifade etmek amacıyla kullanılmıştır (Nandagopal, 2021). Faktörler bağımsız, deney sonucu ise bağımlı değişken olarak ele alınır ve bu veriler doğrusal bir regresyon modeliyle analiz edilir. Elde edilen denklem, faktörlerin sistemin tepkisini hangi yönde ve ne ölçüde etkilediğini gösterir. Böylece deneysel veriler istatistiksel olarak modellenir ve tasarım parametreleriyle performans arasındaki ilişki tahmin edilebilir hale gelir. Tablo 6.4'te faktörler için yapılan regresyon analizi sonucunda elde edilen model özeti tablosu verilmiştir.

Tablo 6.4 Faktörler için Regresyon analizi sonuçları

Faktörler	**Standart hata**	**R^2**	**Düzeltilmiş R^2**
Sönümlenen enerji değeri	87,7630	96,24%	93,99%
Maksimum ezilme kuvveti	1804,26	98,13%	97,01%
Ortalama ezilme kuvveti	2791,16	96,58%	94,53%

Tabloda standart hata değeri modelin tahmin hatasının ortalama büyüklüğünü ifade etmektedir. Başka bir ifade ile deneysel değerler ile model tarafından tahmin edilen değerler arasındaki ortalama sapmayı gösterir (Rao, 2023). Bu değer ne kadar küçükse, modelin tahmin doğruluğu o kadar iyidir. R^2 değeri ise bağımlı değişkendeki toplam değişimin yüzde kaçının regresyon modeli tarafından açıklandığını göstermektedir. Tabloda üç faktör için de R^2 değerleri %95 değerinin üzerindedir. Bu sonuç modelin, verideki varyansın çok büyük bir kısmını açıkladığını ve güçlü bir uyum sağladığını ifade etmektedir. Model özeti sonuçları, hesaplanan regresyon modelinin yüksek açıklayıcılığa ve düşük tahmin hatasına sahip olduğunu, dolayısıyla deneysel verileri başarıyla temsil ettiğini göstermektedir. Regresyon denklemleri, mekanik performans parametreleri ile faktörler arasındaki matematiksel ilişkiyi ifade eden istatistiksel modellerdir. Üç farklı mekanik performans parametresi için elde edilen regresyon denklemleri Tablo 6.5'de verilmiştir.

Tablo 6.5 Regresyon denklemleri

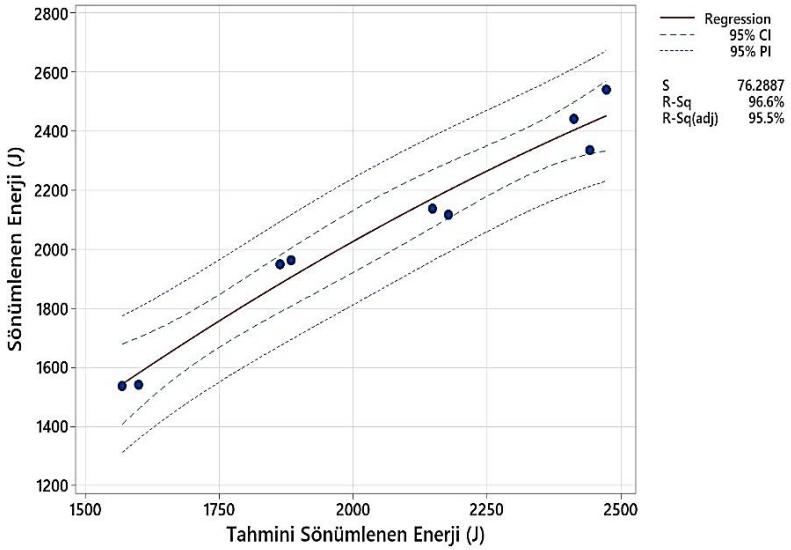
	Regresyon Denklemleri	Denklem No
Sönümlenen enerji değeri	1715 – 84,8 Segment sayısı – 28,83 Segment kalınlığı + 18,97 Segment yoğunluğu	(6.1)
Maksimum ezilme kuvveti	58540 - 2467 Segment sayısı - 153 Segment kalınlığı + 583,4 Segment yoğunluğu	(6.2)
Ortalama ezilme kuvveti	61486 - 2929 Segment sayısı - 1019 Segment kalınlığı + 629,2 Segment yoğunluğu	(6.3)

Segment sayısı, segment kalınlığı ve segment yoğunluğunun sönümlenen enerji, maksimum ezilme kuvveti ve ortalama ezilme kuvveti üzerindeki etkilerini açıkça ortaya koymaktadır. Tüm denklemlerde segment sayısı ve segment kalınlığına ait katsayıların negatif olması, bu parametrelerin artmasıyla söz konusu mekanik yanıtların azaldığını göstermektedir. Buna karşılık, segment yoğunluğu katsayılarının pozitif olması, yoğunluğun artmasıyla hem enerji sönümleme kapasitesinin hem de ezilme kuvvetlerinin arttığını ifade etmektedir.

Sönümlenen enerji denklemi incelendiğinde, segment yoğunluğunun pozitif katsayıya sahip olması bu parametrenin enerji sönümleme kapasitesi üzerinde baskın bir etkiye sahip olduğunu, segment sayısı ve kalınlığının ise enerji sönümleme mekanizmasını sınırlayıcı yönde etkilediğini göstermektedir. Maksimum ve ortalama ezilme kuvveti denklemleri benzer bir eğilim sergilemekte olup, özellikle segment yoğunluğunun yüksek katsayı değerleri, bu parametrenin yapısal rijitliği ve yük taşıma kapasitesini artırdığını ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, regresyon analizinin deneysel bulgularla uyumlu olduğunu ve tasarım parametrelerinin optimize edilmesinde etkin bir tahmin aracı olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

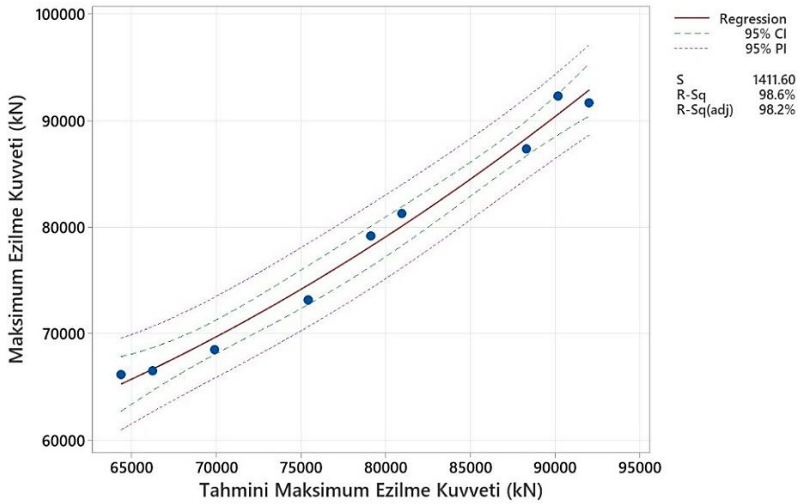
Tezin bu bölümünde %95 güven aralığında hesaplana model uyum grafikleri incelenmiştir. %95 güven aralığı grafiğinin amacı regresyon modellerinden elde edilen tahminlerin güvenilirliğini değerlendirmek ve gerçek değerlerin hangi aralıkta yer alabileceğini görselleştirmektir. Bu grafik, belirli bir faktör seviyesinde tahmin edilen ortalama değerin etrafında istatistiksel olarak %95 olasılıkla bulunması beklenen bir aralık oluşturur. Yani aynı koşullarda deney tekrarlandığında sonuçların %95 ihtimalle bu aralık içinde yer alacağı kabul edilir. Grafik regresyon modeli tarafından hesaplanan tahmini değerlerle birlikte bu değerlere ait alt ve üst sınırları gösterir. Aralıkların dar olması modelin tahmin gücünün yüksek ve verilerin kararlı olduğunu,

geniş olması ise belirsizliğin veya varyasyonun fazla olduğunu ifade eder. Böylece %95 güven aralığı grafiği, faktörlerin etkisini değerlendirirken modelin tahmin doğruluğunu ve istatistiksel güven düzeyini görsel olarak ortaya koyar. Şekil 6.1'de sönümlenen enerji değeri için %95 güven aralığında model uyum grafiği verilmiştir.



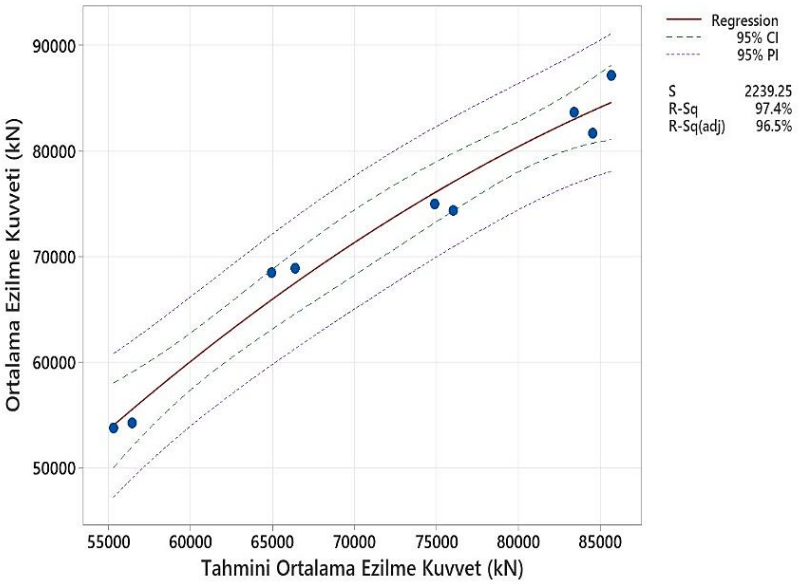
Şekil 6.1 Sönümlenen enerji değeri için %95 güven aralığı grafiği

Grafik incelendiğinde bağımlı değişken olarak "Sönümlenen Enerji Değeri" ile bağımsız değişken olarak regresyon denklemlerinden elde edilen "Tahmini Sönümlenen Enerji Değeri" belirlenmiştir. Grafikte kırmızı ile gösterilen çizgi regresyon eğrisini gösterir. Yeşil renkli kesikli çizgi ise %95 güven aralığındaki deneyleri göstermektedir. İkinci dereceden regresyon modelinde tahmin edilen değerler deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında veri noktalarının eğrisel regresyon hattına yakın bir dağılım gösterdiği ve modelin gözlemsel verilerle uyumlu bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca grafikte yer alan %95 güven aralığı (CI) ve %95 tahmin aralığı (PI) eğrileri modelin güvenilirlik sınırlarını ortaya koymaktadır. Verilerin büyük çoğunluğunun bu aralıklar içinde yer alması, modelin tahmin performansının kabul edilebilir düzeyde olduğunu desteklemektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde Taguchi deney tasarımı ile elde edilen sonuçlar sönümlenen enerji değerinin tahmini sönümlenen enerji değeri değişkenine karşı parabolik bir ilişki gösterdiğini ve ikinci dereceden regresyon modelinin bu ilişkiyi başarılı biçimde temsil ettiğini ortaya koymuştur. Şekil 6.2'da maksimum ezilme kuvveti değeri için %95 aralığında model uyum grafiği verilmiştir.



Şekil 6.2 Maksimum ezilme kuvveti için %95 güven aralığı grafiği

Şekil 6.2'de verilen grafik, regresyon modeli ile deneysel maksimum ezilme kuvveti değerleri arasında çok güçlü bir uyum olduğunu göstermektedir. Veri noktalarının regresyon doğrusu etrafında dar bir bant içinde dağılması ve büyük ölçüde %95 güven ve %95 tahmin aralıkları içerisinde kalması, modelin hem açıklayıcı hem de tahmin edici başarısının yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Şekil 6.3'te ortalama ezilme kuvveti değeri için %95 aralığında model uyum grafiği verilmiştir.



Şekil 6.3 Ortalama ezilme kuvveti için %95 güven aralığı grafiği

Şekil 6.3'de, regresyon doğrusu etrafında veri noktalarının düzenli ve dar bir bant içerisinde toplanması, modelin deneysel sonuçları yüksek doğrulukla temsil ettiğini

göstermektedir. Noktaların büyük kısmının %95 güven aralığı ve %95 tahmin aralığı içinde yer alması, modelin istatistiksel olarak güvenilir olduğunu ortaya koymaktadır.

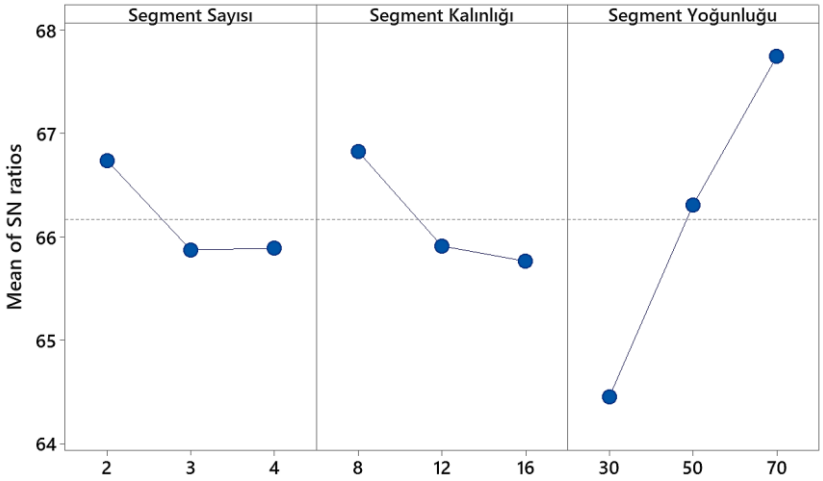
6.3 Sinyal Gürültü Oranlarının Analizi

Sinyal/Gürültü (S/N) oranı analizi, deneysel çalışmalarda kontrol faktörlerinin performans parametreleri üzerindeki etkisini, rastgele hataların (gürültünün) etkisini en aza indirerek değerlendirmek amacıyla kullanılan bir Taguchi yöntemidir (Williams, 2005). S/N oranı, deney sonuçlarının hem ortalama performansını hem de değişkenliğini birlikte dikkate alarak en kararlı ve güvenilir parametre seviyelerinin belirlenmesini sağlar. Bu yaklaşım, özellikle mühendislik uygulamalarında süreç optimizasyonu ve deneysel sonuçların tekrarlanabilirliğinin artırılması açısından yaygın olarak kullanılmaktadır (Montgomery, 2019). Sinyal/Gürültü (S/N) oranı analizinde S (Sinyal), sistemin hedeflenen performansını veya istenen yanıt değerini temsil ederken; N (Gürültü), kontrol edilemeyen çevresel etkiler, ölçüm hataları ve rastgele değişkenlikten kaynaklanan sapmaları ifade eder. S/N oranı, sinyalin gürültüye göre baskınlığını sayısal olarak ortaya koyarak, yüksek performansın düşük değişkenlikle birlikte elde edilmesini amaçlar. Bu analiz yaklaşımı, deneysel tasarım ve süreç optimizasyonu çalışmalarında yaygın olarak kullanılmakta olup, özellikle Taguchi deney tasarımı çerçevesinde en kararlı ve güvenilir parametre kombinasyonlarının belirlenmesinde standart bir yöntem olarak kabul edilmektedir (Montgomery, 2019; Williams, 2005)

S/N oranı analizinde kontrol edilebilir faktörler altında istenen performansın maksimize edilmesi ve aynı zamanda kontrol edilemeyen gürültü etkilerinin minimize edilmesi prensibine dayanarak farklı amaç fonksiyonları kullanılır. Taguchi yaklaşımında amaç fonksiyonu; “en büyük-en iyi”, “en küçük-en iyi” veya “hedef-değer-en iyi” kriterlerinden biri seçilerek belirlenir. Bu seçim optimize edilmek istenen parametre ile hedeflenen amaç değerine göre belirlenir. Böylece en kararlı ve tekrarlanabilir parametre kombinasyonunun belirlenmesi hedeflenir. Bu yaklaşım, süreç optimizasyonu çalışmalarında yaygın olarak kullanılan standart bir yöntemdir (Montgomery, 2017; Taguchi, 1986).

Bu tez çalışmasında mekanik performans parametrelerini optimize edecek faktör seviyelerinin belirlenmesi amacıyla S/N analizi kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar kapsamında, çarpışma kutularının enerji sönümleme performansı, sönümlenen enerji, maksimum ezilme kuvveti ve ortalama ezilme kuvveti gibi temel çıktı parametreleri üzerinden kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Analizde sönümlenen enerji ve ortalama ezilme kuvveti parametreleri için "En yüksek en iyi" amaç fonksiyonu seçilirken maksimum ezilme kuvveti parametresi için "En düşük en iyi" amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Analizler Minitab 16.0 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

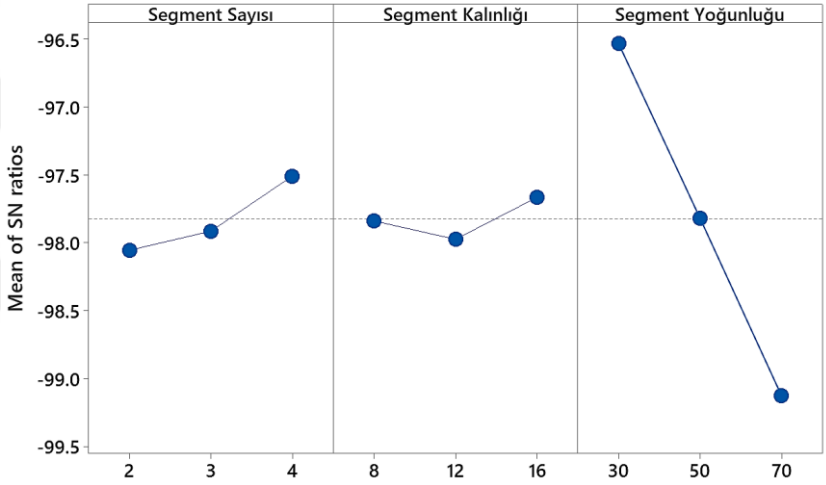
Şekil 6.4'de Taguchi deney tasarımı kapsamında elde edilen sinyal/gürültü (S/N) oranlarının ana etkiler grafiği olup deneyde kullanılan üç farklı kontrol faktörünün (segment sayısı, segment kalınlığı ve segment yoğunluğu) her bir seviyede sistem performansı üzerindeki etkilerini göstermektedir (Aydın, 2023). Yapılan analizlerle birlikte her bir performans çıktısı için optimal kontrol faktörü seviyeleri belirlenmiştir. Bu seviyeler, çarpışma kutularının enerji sönümleme ve dayanım kapasitesini en üst düzeye çıkaracak şekilde önerilmiştir.



Şekil 6.4 SE için S/N analizi sonucu elde edilen ana etkiler grafiği

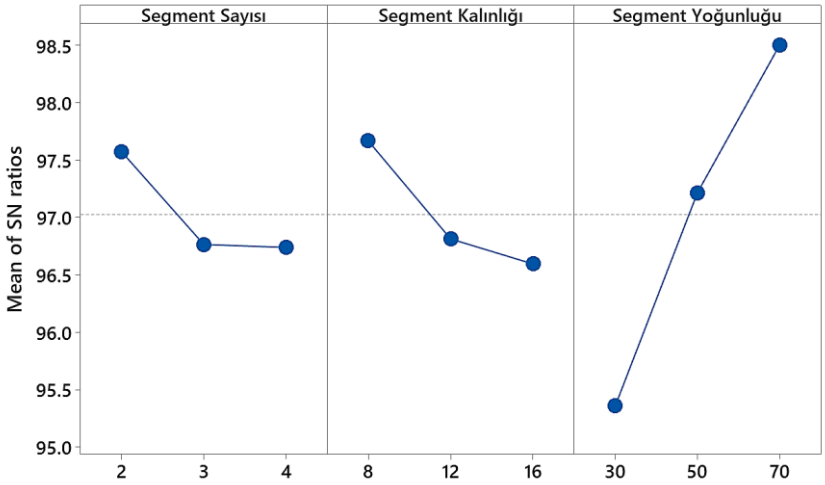
Grafiksel analizler ışığında, Taguchi yöntemi kapsamında belirlenen kontrol faktörlerinin enerji sönümleme performansı üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. Birinci parametre olan segment sayısı açısından incelendiğinde, en yüksek S/N oranının birinci seviyede elde edildiği gözlemlenmiştir (Şekil 6.4). Bu sonuç, düşük segment sayısının enerji sönümleme kapasitesini olumlu yönde

etkilediğini ve daha az segmente sahip yapısal konfigürasyonların çarpışma enerjisini daha etkin şekilde sönümlediğini göstermektedir. İkinci kontrol faktörü olan segment kalınlığı için yapılan analizlerde ise, 8 mm kalınlığa karşılık gelen birinci seviyenin, diğer seviyelere kıyasla en yüksek S/N oranına sahip olduğu belirlenmiş ve bu değer segment kalınlığında optimum seviye olarak tespit edilmiştir. Bu durum, düşük kalınlıktaki segmentlerin hem yapısal dayanımı artırırken hem de enerji sönümleme kapasitesini dengelediğini ortaya koymaktadır. Üçüncü faktör olan segment yoğunluğu incelendiğinde ise, %70 yoğunluğa karşılık gelen üçüncü seviyenin, diğer yoğunluk seviyelerine kıyasla belirgin biçimde daha yüksek bir S/N oranı sunduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 6.5 MEK için S/N analizi sonucu elde edilen ana etkiler grafiği

Maksimum ezilme kuvveti için ortalama S/N oranı grafiği incelendiğinde birinci parametre olan segment sayısı açısından en düşük S/N oranı birinci seviyede elde edilmiştir (Şekil 6.5). İkinci kontrol faktörü olan segment kalınlığı için 12 mm kalınlığa karşılık gelen ikinci seviye, en düşük S/N oranına sahip olup bu parametrede optimum seviye olarak belirlenmiştir. Üçüncü faktör olan segment yoğunluğu incelendiğinde %70 yoğunluk oranına karşılık gelen üçüncü seviyenin diğer seviyelere kıyasla belirgin şekilde daha düşü bir S/N oranı sunduğu görülmektedir. Bu analiz sonuçlarına göre her bir kontrol faktörünün performans üzerindeki etkisi değerlendirilmiş ve her parametre için optimum seviyeler belirlenmiştir.



Şekil 6.6 OEK için S/N analizi sonucu elde edilen ana etkiler grafiği

Ortalama ezilme kuvveti için ortalama ana etkiler grafiği detaylı olarak incelendiğinde birinci kontrol faktörü olan segment sayısı açısından en yüksek S/N oranının birinci seviyede (2 adet segment) elde edildiği gözlemlenmiştir (Şekil 6.6). İkinci parametre olan segment kalınlığı için 8 mm kalınlığa karşılık gelen birinci seviye sistemin en yüksek kararlılık ve performansı sağladığı düzey olarak öne çıkmaktadır. Üçüncü kontrol faktörü olan segment yoğunluğu değerlendirildiğinde ise %70 yoğunluk oranına karşılık gelen üçüncü seviye diğer seviyelere kıyasla daha yüksek bir S/N oranı sunarak optimum performans değerine ulaşmıştır. Bu bulgular doğrultusunda, her bir kontrol faktörünün ortalama ezilme kuvveti üzerindeki etkisi nicel olarak belirlenmiş ve deneysel sistemin performansını maksimize eden seviye kombinasyonları ortaya konulmuştur.

Deney sonuçlarının analizinde Taguchi tabanlı yanıt tablosu oluşturularak her bir faktörün farklı seviyelerdeki ortalama S/N oranları hesaplanmış ve bu sonuçlar kullanılarak her bir tasarım için tahmini mekanik performans kriterleri hesaplanmıştır (Tablo 6.6). Tahmini test sonuçları ile deneysel test sonuçlarının birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar elde edilen modelin tahmin başarısının oldukça yüksek olduğunu göstermektedir.

Tablo 6.6 Numunelere ait sayısal veriler ve optimizasyon değerleri

	Deneysel test sonuçları			**Tahmini test sonuçları**		
	SE (J)	**MEK (kN)**	**OEK (kN)**	**SE (J)**	**MEK (kN)**	**OEK (kN)**
L1	1962,47	68,544	68,898	1942,83	69,014	67,795
L2	2137,78	81,286	74,996	2128,78	81,367	74,937
L3	2442,47	91,679	83,653	2471,11	91,128	84,815
L4	2118,10	79,191	74,382	2146,74	78,641	75,544
L5	2335,90	92,313	81,701	2316,26	92,783	80,597
L6	1537,37	66,566	53,826	1528,37	66,647	53,767
L7	2541,13	87,334	87,165	2532,13	87,415	87,106
L8	1542,79	66,210	54,288	1571,43	65,659	55,451
L9	1949,83	73,162	68,521	1930,19	73,632	67,418

7. DEFORMASYONLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Numune deformasyonlarının değerlendirilmesi, çarpışma kutularının enerji sönümleme mekanizmalarının anlaşılmasında temel bir aşamayı oluşturmaktadır. Bu kapsamda yapılan deneysel incelemeler farklı segment sayısı, et kalınlığı ve malzeme yoğunluğu kombinasyonlarının yapısal davranış üzerindeki etkilerini belirlemeye yöneliktir. Çarpışma yükü altında numunelerin katlanma biçimleri, burkulma eğilimleri, deformasyonun simetrisi ve enerji sönümleme bölgelerinin dağılımı detaylı biçimde analiz edilmiştir. Bu değerlendirme süreci, hem kuvvet-yer değiştirme eğrilerinden elde edilen nicel veriler hem de numunelerin ezilme sonrası geometrik formlarının görsel incelenmesiyle desteklenmiştir. Böylece her bir numunenin yük altındaki stabilitesi, deformasyon modlarının düzenliliği ve enerji sönümleme kapasitesi arasındaki ilişki bütüncül bir yaklaşımla ortaya konulmuştur.

7.1 Al6063 Boru ve PLA Malzeme Uyumunun Değerlendirilmesi

Deneysel çalışmalarda kullanılan numunelerde alüminyum boru ile iç kısımda yer alan PLA dolgu malzemesi arasındaki etkileşim yapının genel enerji sönümleme davranışı üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Alüminyum, yüksek özgül dayanımı ve sünek deformasyon kapasitesi sayesinde yük altındaki enerji emilimini büyük oranda yönlendiren taşıyıcı dış kabuğu oluştururken; PLA malzeme içyapıyı destekleyerek deformasyon sırasında gövde stabilitesinin korunmasına katkı sağlamaktadır. Bu iki farklı malzemenin bir arada kullanılması metalik dış yüzeyin rijitliğini polimer malzemenin elastik desteğiyle birleştirerek hibrit bir deformasyon mekanizması yaratmaktadır. Yükleme sürecinde PLA dolgu, alüminyum tüpün içten çökmesini geciktirici bir etki gösterirken, enerji sönümleme sürecinin daha kontrollü ve düzenli ilerlemesini sağlamaktadır. Böylece deformasyonun lokal burkulma yerine eksen boyunca yayılım göstermesi mümkün olmaktadır. Alüminyumun sünek yapısı ile PLA'nın kademeli deformasyon kabiliyeti arasındaki bu uyum, maksimum yük taşıma kapasitesinin korunmasına ve ortalama kuvvetin dengelenmesine katkıda bulunur. Sonuç olarak alüminyum ve PLA hibrit yapının malzeme uyumu çarpışma enerjisinin daha etkin şekilde sönümlenmesine ve deformasyonun daha kararlı bir biçimde

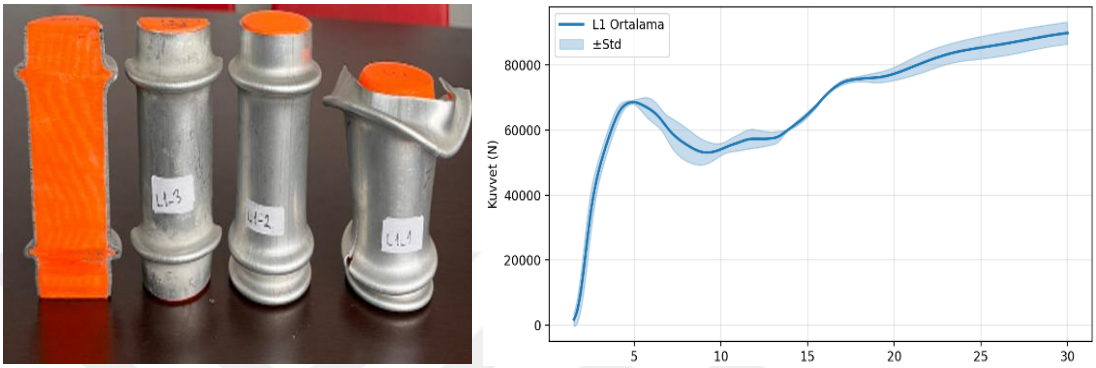
yönlendirilmesine olanak tanıyarak, enerji emici sistemlerde önemli bir tasarım avantajı sağlamaktadır.

7.2 İki Segmentli Numunelerin Değerlendirilmesi

L1–L2-L3 (iki segmentli numuneler) grubunu incelerken, aynı segment sayısına sahip olmalarına rağmen kalınlık ve yoğunluk farklarının deformasyon davranışını belirgin şekilde değiştirdiği görülmüştür. L1 numunesi (8 mm kalınlık, 30 yoğunluk) ince ve düşük yoğunluklu kesit özellikleri nedeniyle yük altında geniş alanlı bir yer değiştirme davranışı sergilemiştir. Bu numunede deformasyon gövde boyunca yayılmış plastik akma şeklinde gerçekleşmiş ve düzenli katlanma hatları yerine daha yaygın ve düzensiz burkulmalar gözlenmiştir. Bu davranış yapının enerjiyi kontrollü bir şekilde değil, genel gövde deformasyonu yoluyla sönümlediğini göstermektedir. Ayrıca L1 numunesinde oluşan katlanma bölgelerinin segmentlerin bulunduğu kısımlarda yoğunlaştığı tespit edilmiştir. Bu durum yapısal geometrinin katlanma bölgelerini yönlendirmede etkili olduğunu ve tasarım aşamasında katlanma modlarının kontrollü biçimde optimize edilebileceğini ortaya koymaktadır. Katlanma bölgelerinde PLA iç dolgu malzemesi ile Al6063 borunun arasında kalan bölgede boşluk son derece azdır. Bu alan malzeme akışının son derece iyi olduğunu göstermektedir. Malzemenin boşlukları doldurması yük altında deformasyona katılan efektif hacmi artırır. Bu durum sönümlenen toplam enerjiyi arttırmaktadır. L1 numunesinin dış yüzey deformasyonu incelendiğinde (Şekil 7.1a), yapının yük altındaki davranışının oldukça dengeli ve kontrollü bir şekilde gerçekleştiği görülmektedir. Katlanma izlerinin belirli aralıklarla ve simetrik biçimde oluşması, deformasyonun eksenel yönde düzenli ilerlediğini ve burkulma modlarının kararlı olduğunu göstermektedir. Bu durum iç kısımdaki PLA dolgu malzemenin dıştaki alüminyum boru ile etkili bir şekilde etkileşime girdiğini, dolayısıyla yük aktarımının homojen bir şekilde sağlandığını ortaya koymaktadır.

L1 numunesine ait kuvvet-uzama grafiği (Şekil 7.1b), başlangıçta hızlı bir kuvvet artışıyla keskin bir zirve oluşturmaktadır. Bu tepe sonrasında kısa süreli bir düşüş meydana gelmiş, ancak yapı tekrar toparlanarak uzama ilerledikçe kuvvette kademeli bir artış göstermiştir. Grafikteki standart sapma aralığı, özellikle ilk tepe ve ara

bölgelerde deneyler arası farklılıkların arttığını göstermektedir. Bu durum, erken çökme davranışı ve yerel stabilite kayıplarının farklı deney noktalarında gerçekleşmesinden kaynaklanmaktadır. Genel eğilim, L1 numunesinin artan deformasyon altında taşıma kapasitesini koruduğunu ve son bölgeye doğru rijitleşme davranışının baskın hale geldiğini göstermektedir.



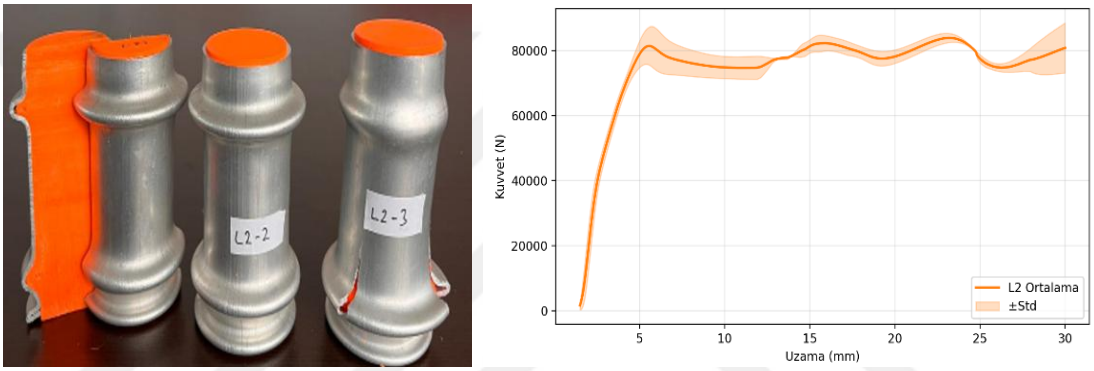
(a) (b)

Şekil 7.1 a) L1 numune grubu segment ve burkulma bölgeleri, b) kuvvet-uzama eğrisi

L2 numunesi (12 mm kalınlık, 50 yoğunluk) orta kalınlıkta ve orta yoğunlukta bir yapıya sahiptir; bu özellikleri sayesinde yük altında L1 numunesine kıyasla daha dengeli ve kontrollü bir deformasyon davranışı sergilemiştir. Bu durum yapının deformasyon sürecinde enerji sönümlemesini yerel katlanmalar üzerinden gerçekleştirdiğini ve böylece toplam enerji sönümleme kapasitesinin arttığını göstermektedir. Ayrıca artan kalınlık ve yoğunluğun etkisiyle maksimum ezilme kuvveti değerinde belirgin bir artış gözlenmiştir. Ancak bu artış deformasyon kararlılığını olumsuz etkilememiş, aksine kuvvet - yer değiştirme eğrisi boyunca ortalama kuvvetin daha dengeli dağılmasını sağlamıştır.

L2 numunesinin dış yüzey deformasyonu incelendiğinde, yapının yük altında L1'e kıyasla daha belirgin lokal burkulma ve katlanma izleri geliştirdiği gözlemlenmiştir. Katlanma bölgeleri daha keskin geçişlere sahip olup, deformasyonun belirli segmentlerde yoğunlaştığı görülmektedir. Bu durum, yük aktarımı sırasında iç dolgu (PLA) ile dış alüminyum boru arasında yer yer farklı deformasyon hızlarının oluştuğunu, dolayısıyla yapının deformasyon sürecinde lokal enerji birikimlerinin meydana geldiğini göstermektedir. (Şekil 7.2a) Numune genel olarak eksenel doğrultuda stabil kalmış olsa da orta bölgedeki gövde kısmında asimetrik bir çökme

eğilimi gözlenmiştir. Kuvvet-uzama eğrisinde (Şekil 7.2b) kuvvet, başlangıçta hızlı bir yükselişle ilk tepe değerine yaklaşmakta ve ardından küçük dalgalanmalarla nispeten kararlı bir plato bölgesine geçmektedir. Bu plato, numunenin kontrollü bir şekilde göçme davranışı sergilediğini ve enerji sönümleme karakteristiğinin düzenli olduğunu göstermektedir. Standart sapma aralığı, özellikle plato bölgesinde değişkenlik göstermektedir; bu durum yerel burkulma, segmentler arası etkileşim ve malzeme stabilitesindeki farklılıkların deney sonuçlarına yansıdığını kanıtlar niteliktedir. Uzama arttıkça kuvvet seviyesinin genel olarak korunduğu görülmekte, bu da L2 numunesinin yük taşıma sürekliliğini sağlamada başarılı olduğunu göstermektedir.



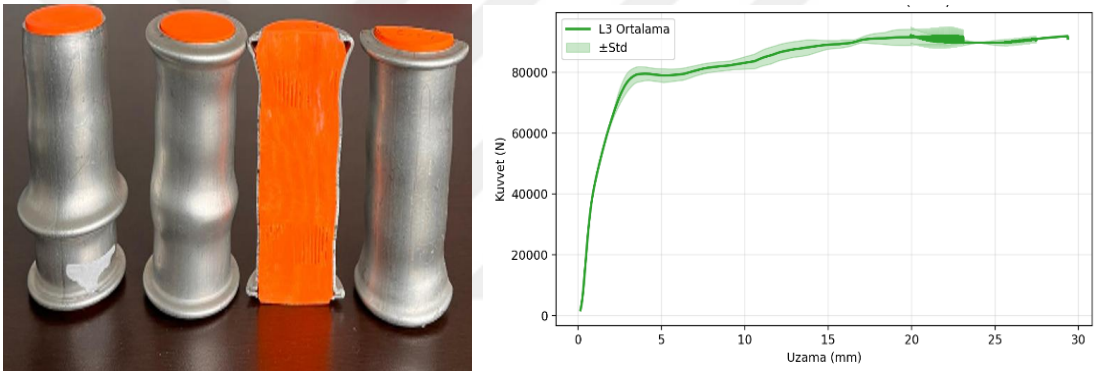
(a) (b)

Şekil 7.2 a) L2 numune grubu segment ve burkulma bölgeleri, b) kuvvet-uzama eğrisi

L3 numunesi (16 mm kalınlık, 70 yoğunluk) en kalın ve en yoğun segment yapısına sahip numune olarak yük altında yüksek rijitlik ve dayanım sergilemiştir. Artan kalınlık ve yoğunluk, malzemenin burkulma direncini artırarak deformasyonun daha lokal bölgelerde yoğunlaşmasına neden olmuştur. Bu numunede ezilme süreci boyunca belirgin, derin ve simetrik katlanma bölgeleri gözlenmiştir. Deformasyonun çoğunlukla segmentlerin kesişim noktalarında gerçekleştiği tespit edilmiştir. Oluşan deformasyonlar yapının enerjiyi yüksek kuvvet düzeylerinde sönümlediğini ancak deformasyonun kontrollü ve kararlı bir biçimde ilerlediğini göstermektedir İç dolgu malzemesiyle alüminyum boru arasında kalan kısım oldukça belirginidir. (Şekil 7.3a). Bu durum yük aktarımını dengesiz hale getirebilmektedir. Ezilme sürecinde yüksek dayanım ve iyi bir kuvvet verimliliği ortaya koyarak çarpışma performansı açısından en rijit ve kararlı yapı davranışını göstermiştir. L3 numunesinin dış yüzey deformasyonu incelendiğinde, diğer numunelere göre daha belirgin ve derinleşmiş lokal katlanma izlerinin ortaya çıktığı gözlenmektedir; özellikle orta bölgedeki

çöküntüler ve yüzeydeki derin oluklar, deformasyonun eksenel boyunca homojen dağılmadığını ve burkulmanın lokalleştiğini göstermektedir.

L3 numunesine ait kuvvet-uzama eğrilerinde (Şekil 7.3b) kuvvet, ilk yükseliş fazından sonra hızlıca tepe noktasına ulaşmış ve ardından oldukça dengeli bir plato bölgesine geçmiştir. Grafikte görülen küçük kuvvet dalgalanmaları, yüksek uzama seviyelerinde yapının kontrollü katlanma davranışına işaret etmektedir. Standart sapma aralığı, diğer numunelere kıyasla daha dar olup deneyler arası tekrar edilebilirliğin yüksek olduğunu göstermektedir. Bu durum L3'ün yapısal stabilite anlamında daha güvenilir bir çökme mekanizması sunduğunu ve enerji sönümleme performansının istikrarlı olduğunu göstermektedir.



(a) (b)

Şekil 7.3 a) L3 numune grubu segment ve burkulma bölgeleri, b) kuvvet-uzama eğrisi

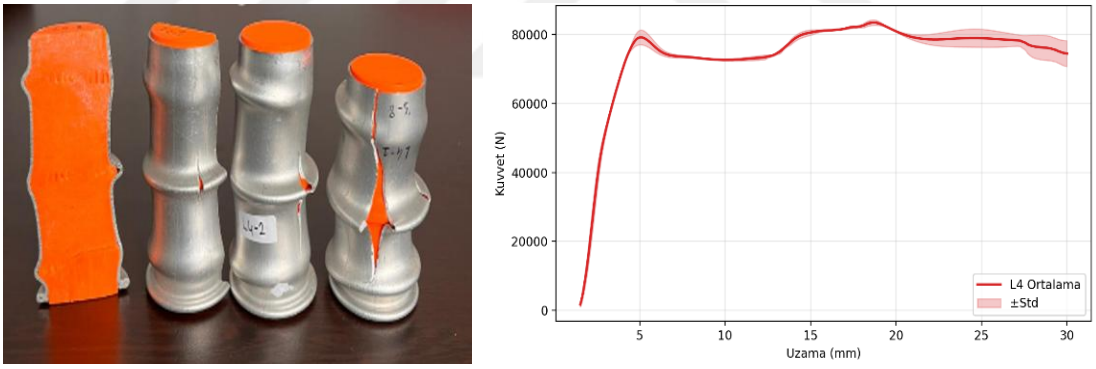
7.3 Üç Segmentli Numunelerin Değerlendirilmesi

L4 numunesi (8 mm kalınlık, 50 yoğunluk), üç segmentli yapısı sayesinde iki segmentli numunelere kıyasla daha düzenli bir deformasyon davranışı sergilemiştir. Segment sayısındaki artış, yapının yük altındaki kararlılığını ve deformasyon sürecindeki yapısal bütünlüğünü belirgin şekilde artırmıştır. Ezilme süreci boyunca katlanma bölgeleri belirgin biçimde segmentler arasında oluşmuş ve deformasyonun belirli eksenler boyunca yönlendirilmesini sağlamıştır.

L4 numunesinin dış yüzey deformasyonu incelendiğinde, yükleme sonrasında meydana gelen katlanma hatlarının oldukça düzenli bir biçimde geliştiği ancak belirli bölgelerde malzeme bütünlüğünün kısmen bozulduğu gözlenmiştir. (Şekil 7.4a).

Özellikle alt segmentlerde oluşan halkasal katlanmaların yoğunlaştığı bölgelerde lokal kırılmaların meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu kırılmalar, alüminyum dış borunun yüksek lokal gerilmelere maruz kalması ve içteki PLA dolgu malzemesinin deformasyon sırasında yeterli desteği sağlayamamasıyla ilişkilendirilebilir. Bununla birlikte kırılma bölgeleri yapının genel stabilitesini tamamen bozmadığı görülmektedir.

L4 numunesine ait kuvvet-uzama eğrileri incelendiğinde (Şekil 7.4b) ilk tepe değerinden sonra kuvvet belirgin biçimde sabitlenmiş ve göçme sürecinde oldukça kararlı bir yük taşıma davranışı sergilenmiştir. Plato bölgesi boyunca kuvvetteki dalgalanmalar düşük seviyede kalmış olup, standart sapma aralığı bu bölgede sınırlı değişkenlik göstermektedir. Bu eğilim, L4 numunesinin plastik deformasyon boyunca gerilme aktarımını düzenli biçimde sürdürdüğünü, yerel katlanmaların ise sistematik şekilde oluştuğunu işaret etmektedir. Genel olarak L4 grafiği, yapısal kontrollü çökme açısından en dengeli performanslardan birini sunmaktadır.



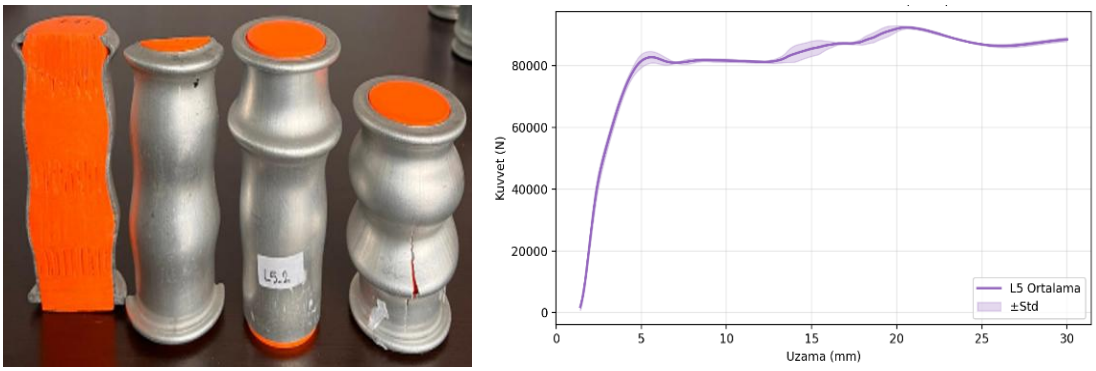
(a) (b)

Şekil 7.4 a) L4 numune grubu segment ve burkulma bölgeleri, b) kuvvet-uzama eğrisi

L5 numunesi (12 mm kalınlık, 70 yoğunluk, 3 segmentli yapı), elde edilen deneysel veriler doğrultusunda en yüksek sönümlenen enerji değerine sahip numune olarak öne çıkmaktadır. Orta kalınlıkta ve yüksek yoğunlukta segment tasarımı, bu numunede deformasyonun hem kontrollü hem de kararlı bir biçimde ilerlemesini sağlamıştır. Ezilme süreci boyunca kuvvet-yer değiştirme eğrisinde düzenli bir dalgalanma gözlenmiş, ani kuvvet artışları veya düşüşleri meydana gelmemiştir. Bu durum, yapının yüksek bir ezilme kuvveti verimliliği sergilediğini ve enerji sönümleme mekanizmasının dengeli bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir. Katlanma

bölgelerinin simetrik olarak segmentler arasında gelişmesi, deformasyon modlarının tasarımla yönlendirilebildiğini ve geometrik optimizasyonun enerji sönümleme performansı üzerindeki etkisini açıkça göstermektedir. (Şekil 7.5a)

L5 numunesinde gözlenen deformasyon çizgileri özellikle orta bölgede derinleşerek katlanma bölgelerinin enerji sönümleme açısından aktif bir şekilde çalıştığını göstermektedir. Ancak deformasyonun alt kısımlarına doğru ilerledikçe alüminyum yüzeyde lokal gerilme birikimi sonucu ince çatlakların ve yüzey kırılmalarının oluştuğu gözlenmiştir. L5 numunesine ait kuvvet-uzama eğrisi incelendiğinde (Şekil 7.5b) numunesi erken aşamada hızlı bir kuvvet artışı kaydederek tepe noktasına ulaşmış, sonrasında ise en geniş kuvvet plato bölgelerinden birini sergilemiştir. Plato boyunca kuvvet seviyesinin korunması, numunenin yüksek enerji sönümleme kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Grafik, uzama boyunca yapının dayanımını uzun süre kaybetmeden sürdürebildiğini ortaya koymaktadır. Standart sapma dağılımının sınırlı olması, deneysel tekrar edilebilirliğin ve yapısal stabilitenin yüksek olduğunu göstermektedir. Bu durum L5 numunesinin çökme davranışı açısından verimli ve istikrarlı bir performans sunduğunu desteklemektedir.



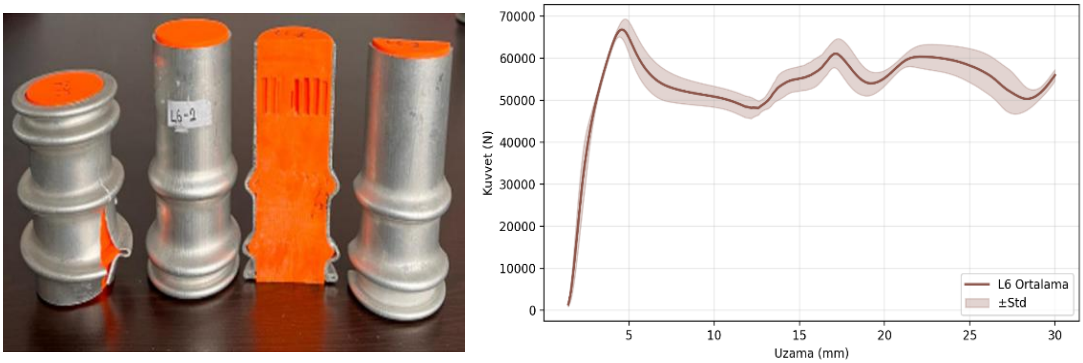
(a) (b)

Şekil 7.5 a) L5 numune grubu segment ve burkulma bölgeleri, b) kuvvet-uzama eğrisi

L6 numunesi (16 mm kalınlık, 30 yoğunluk, 3 Segmentli yapı), yüksek segment kalınlığa rağmen düşük yoğunlukta bir segment yapısına sahip olması nedeniyle yük altındaki deformasyon davranışında belirgin farklılıklar göstermiştir. Düşük yoğunluk nedeniyle yapının burkulma direnci azalmıştır. Bu durum deformasyonun belirli bölgelerde lokalize olmasına ve katlanma modlarının düzensiz ilerlemesine neden olmuştur. L6 numunesinde katlanma bölgelerinin belirli segmentler etrafında

yoğunlaştığı gözlenmiştir. Ancak bu katlanmaların simetri ve düzen açısından diğer numunelere kıyasla daha dengesiz olduğu tespit edilmiştir. Segment bölgelerinde derin izler görülmektedir. L6 numunesinde oluşan derin izler, yükleme süreci boyunca meydana gelen yüksek lokal plastik deformasyon bölgelerini temsil etmektedir L6 numunesi ait kuvvet-uzama eğrisi incelendiğinde (Şekil 7.6a), alttaki üç katlanma boşluğunun tam olarak dolmadığı gözlemlenmiştir.

L6 numunesinin dış yüzey deformasyonu incelendiğinde yapının yük altında oldukça belirgin ve derin katlanma izleri oluşturduğu görülmektedir. Katlanma hatlarının simetriden saparak belirli eksenlerde yoğunlaşması L6 numunesinde deformasyonun kontrollü olmaktan ziyade yerel etkilerle yönlendiğini göstermektedir. Bu durum enerjinin yapının geneline eşit dağılmasını engelleyerek sönümleme verimliliğini düşürmüştür. Ayrıca bazı bölgelerde gözlenen ince yüzey kırılmaları malzemenin yüksek kalınlığına rağmen sünek deformasyon kabiliyetinin sınırlı olduğunu ortaya koymaktadır. L6 numunesinin kuvvet-uzama grafiğinde (Şekil 7.6b) başlangıçta hızlı bir kuvvet artışı görülmektedir. Bu tepe sonrasında kuvvet değeri hafif düşüşler ve dalgalanmalarla ilerleyerek uzama boyunca düzensiz fakat genel olarak korunan bir taşıma eğilimi göstermektedir. Standart sapma aralığının belirgin olması, numunenin farklı deney tekrarlarında yerel burkulma, temas noktaları ve katlanma mekanizmalarının farklı konumlarda devreye girdiğini göstermektedir. Bu durum, L6 numunesinin çökme davranışında belirli bir kontrol sağlasa da stabilitenin diğer numunelere göre daha değişken olduğunu ortaya koymaktadır.



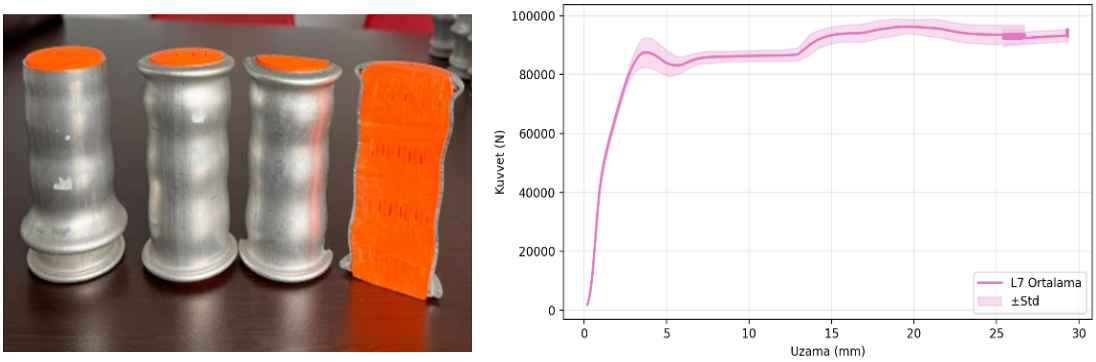
(a) (b)

Şekil 7.6 a) L6 numune grubu segment ve burkulma bölgeleri, b) kuvvet-uzama eğrisi

7.4 Dört Segmentli Numunelerin Değerlendirilmesi

L7 numunesi (8 mm kalınlık, 70 yoğunluk, 4 segmentli yapı), yüksek yoğunluk ve artırılmış segment sayısının etkisiyle yük altındaki davranışında daha dengeli bir deformasyon sergilemiştir. Katlanma biçimleri incelendiğinde, L7 numunesinde deformasyonun belirli segment bölgelerinde lokalize olduğu, ancak katlanma hatlarının tam simetri göstermediği gözlemlenmiştir. Bu durum eksenel yük altında yapı boyunca enerji dağılımının homojen gerçekleşmediğini belirli segmentlerde gerilme birikiminin meydana geldiğini göstermektedir. Ayrıca yüksek segment sayısı sayesinde burkulmanın engellendiği ancak enerji sönümleme sürecinde deformasyonun daha sınırlı bölgelerde yoğunlaştığı anlaşılmaktadır.

L7 numunesinin dış yüzey deformasyonu incelendiğinde, yapının yük altında oldukça düzenli fakat yer yer lokalize olmuş katlanma modları sergilediği görülmektedir. (Şekil 7.7a). Yüzeyde gözlenen deformasyon izlerinin derinliği orta düzeydedir. Bu durum enerjinin yapının geneline dengeli bir biçimde yayıldığını göstermektedir. Ancak bazı katlanma bölgelerinde küçük yüzey çatlakları ve malzeme ayrışmaları gözlenmiştir. L7 numunesinde deformasyonun genel olarak eksenel yönde ilerlemesi, yapının stabilitesinin korunduğunu ve burkulma davranışının büyük ölçüde kontrollü gerçekleştiğini göstermektedir. L7 numunesi (Şekil 7.7b), erken uzama bölgesinde çok hızlı bir kuvvet artışı göstererek yüksek bir tepe değere ulaşmış ve sonrasında nispeten düz, istikrarlı bir plato bölgesine geçmiştir. Plato kuvvet seviyesinin yüksekliği ve sürekliliği, bu numunenin oldukça etkin bir enerji sönümleme performansına sahip olduğunu göstermektedir. Standart sapma bölgesinin dar olması, numunenin deneyler arası tekrarlanabilirliğinin yüksek olduğunu ve çökme mekanizmasının düzenli gerçekleştiğini göstermektedir. L7 grafiği genel hatlarıyla yüksek dayanım, kararlı deformasyon ve kontrol edilebilir katlanma davranışını bir arada sunarak güçlü bir yapısal performans sergilemektedir.



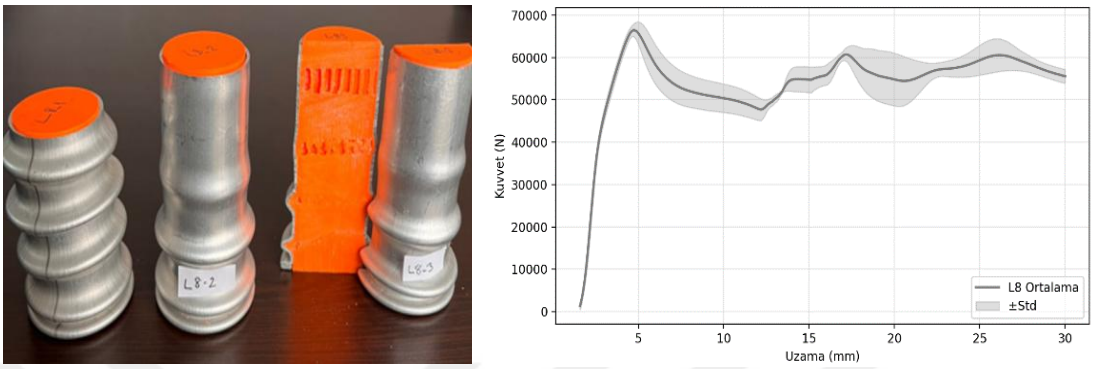
(a) (b)

Şekil 7.7 a) L7 numune grubu segment ve burkulma bölgeleri, b) kuvvet-uzama eğrisi

L8 numunesi (12 mm kalınlık, 30 yoğunluk, 4 segmentli yapı), orta kalınlıkta ve orta yoğunlukta bir malzeme yapısına sahip olmasıyla birlikte, artırılmış segment sayısının etkisiyle yük altındaki deformasyon sürecinde oldukça dengeli bir katlanma davranışı sergilemiştir. Bu durum orta yoğunluk seviyesinin malzemenin sünek davranışını destekleyerek plastik şekil değişiminin daha geniş bir alana yayılmasına ve dolayısıyla enerji sönümleme kapasitesinin artmasına katkı sağladığını ortaya koymaktadır. Ayrıca yapının deformasyon süreci boyunca stabil bir yük taşıma karakteri göstermesi, ortalama ezilme kuvvetinin yüksek seyretmesine ve aynı zamanda ani yük dalgalanmalarının minimum düzeyde kalmasına neden olmuştur.

L8 numunesinin dış yüzey deformasyonu incelendiğinde, yükleme sonrası yapının oldukça simetrik ve düzenli katlanma hatları geliştirdiği görülmektedir. (Şekil 7.8a). Bu durum 12 mm segment kalınlık ve orta düzeydeki dolgu yoğunluğunun oluşturduğu dengeli yapı davranışının bir sonucudur. Katlanma hatları özellikle orta bölge çevresinde belirginleşmiş olup, bu bölgelerde halkasal deformasyonların eşit aralıklarla oluştuğu gözlenmiştir. Bu düzenli katlanma formu, deformasyonun kontrollü ve eksenel yönde ilerlediğini göstermekte, bu sayede yapı genelinde stabil bir enerji sönümleme mekanizması oluşturulmaktadır. L8 numunesine ait kuvvet-uzama eğrileri incelendiğinde (Şekil 7.8b) ilk tepe noktasından sonra kuvvet, belirgin bir dalgalanma eğilimiyle plato bölgesine geçmektedir. Uzama arttıkça ortaya çıkan iniş-çıkışlar, numunenin katlanma mekanizması boyunca yer yer stabilite kayıpları yaşadığını işaret etmektedir. Standart sapma aralığının grafiğin çeşitli bölgelerinde genişlemesi, deneyler arasında davranış farklılıklarının arttığını ve yerel deformasyonların belirgin rol oynadığını göstermektedir. Buna rağmen genel kuvvet

seviyesinin korunması, L8 numunesinin enerji sönümleme kapasitesini sürdürebildiğini ancak yapısal kararlılık anlamında diğer yüksek performanslı numunelere göre daha değişken bir davranış sergilediğini ortaya koymaktadır.



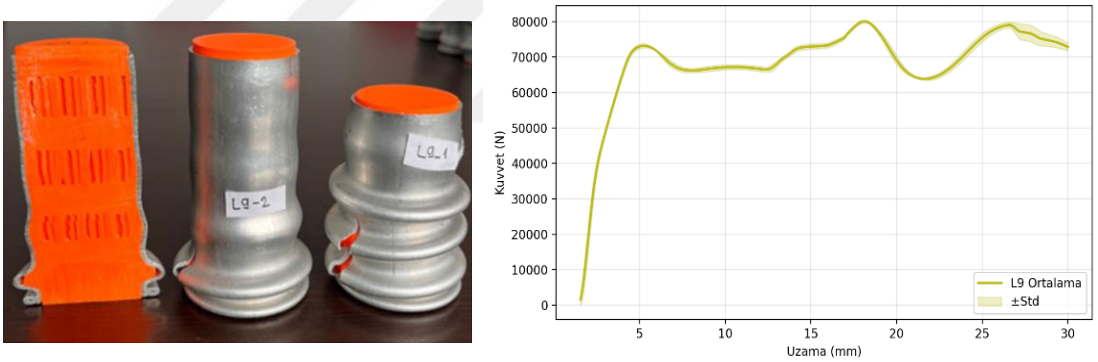
(a) (b)

Şekil 7.8 a) L8 numune grubu segment ve burkulma bölgeleri, b) kuvvet-uzama eğrisi

L9 numunesi (16 mm kalınlık, 50 yoğunluk, 4 segmentli yapı), yüksek et kalınlığı ve orta yoğunluk değerinin birlikte kullanılmasıyla elde edilen dengeli bir yapısal tasarımı temsil etmektedir. Bu numunede segment sayısının fazla olması ve duvar kalınlığının yüksekliği yük altında deformasyonun belirli bölgelerde yoğunlaşmasını engelleyerek yapının genel stabilitesini artırmıştır. Deneysel gözlemler L9 numunesinin eksenel yükleme sırasında oldukça düzenli ve simetrik katlanma modları geliştirdiğini katlanmanın Segment segmentleri etrafında kontrollü bir biçimde ilerlediğini ortaya koymuştur. (Şekil 7.9a). Bu davranış artan kalınlığın getirdiği rijitlik etkisinin deformasyonun yönlendirilmesini kolaylaştırdığını, buna karşılık malzemenin plastik şekil değiştirme kapasitesini koruyarak ani burkulmaları sınırlandırdığını göstermektedir. Ayrıca orta yoğunluk seviyesinin sağladığı optimum malzeme sertliği, deformasyon sürecinin ne tamamen gevrek ne de aşırı sünek karakterde ilerlemesini sağlamıştır. Katlanma bölgelerinde gözlemlenen homojen deformasyon dağılımı yapının eksen boyunca enerji emilimini etkin bir şekilde sürdürebildiğini göstermekte ve segment geometrisinin deformasyonun yönlendirilmesinde belirleyici bir rol üstlendiğini ortaya koymaktadır.

L9 numunesinin dış yüzey deformasyonu incelendiğinde, basma testi sonrasında oldukça düzenli olduğu gözlemlenmiştir. Bu numunede kullanılan 16 mm kalınlık, 50 yoğunluk ve 4 segmentli yapı kombinasyonu yüksek rijitlik ve enerji sönümleme

kapasitesi arasında güçlü bir denge kurmuştur. Katlanma izlerinin özellikle orta ve alt bölgelerde belirginleştiği, bu bölgelerde plastik deformasyonun kontrollü bir biçimde ilerlediği tespit edilmiştir. Bu durum yapının yük altında yüksek basma dayanımı sergilerken aynı zamanda sünek deformasyon kabiliyetini de koruduğunu göstermektedir. Dış yüzeydeki deformasyon hatları eksenel yönde oldukça simetrik bir biçimde dağılmıştır. L9 numunesine ait kuvvet-uzama eğrileri incelendiğinde (Şekil 7.9b) başlangıçta hızlı bir tepe oluşumu görülmekte, ardından kuvvet belirli aralıklarla yükselip düşen dalgalı bir pik davranışına dönüşmektedir. Bu dalgalanmalar, katlanma bölgelerinin aşamalı devreye girdiğini ve gövde boyunca farklı konumlarda yük taşıma mekanizmalarının aktif hale geldiğini göstermektedir. Standart sapma değerlerinin orta seviyede olması, deney tekrarlarının makul düzeyde tutarlı olduğunu ancak lokal göçmelerin davranışı etkileyebildiğini işaret etmektedir. Genel eğilim, L9 numunesinin deformasyon sürecinde dayanımı sürdürebildiği ve yük taşıma kapasitesini büyük oranda koruyabildiği yönündedir.



(a) (b)

Şekil 7.9 a) L9 numune grubu segment ve burkulma bölgeleri, b) kuvvet-uzama eğrisi

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda farklı segment sayısı, kalınlık ve yoğunluk kombinasyonlarına sahip numunelerin deformasyon ve enerji sönümleme davranışları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular geometrik parametrelerin ve malzeme yoğunluğunun çarpışma kutularının enerji sönümleme performansı üzerinde doğrudan belirleyici olduğunu açıkça ortaya koymuştur. Düşük segment sayısına sahip numunelerde deformasyonun daha düzensiz ve lokal karakterde geliştiği, buna bağlı olarak da enerji sönümleme kapasitesinin sınırlı kaldığı gözlenmiştir. Buna karşılık segment sayısının artması, yük altındaki stabiliteyi ve katlanma düzenini önemli ölçüde iyileştirmiştir. Deformasyonun eksen boyunca daha

kontrollü ve simetrik bir biçimde ilerlemesini sağlamıştır. Segment kalınlığının artması, yapısal rijitliği artırarak burkulma eğilimini azaltmıştır ancak belirli durumlarda sünek deformasyonun kısıtlanması nedeniyle enerji sönümleme verimliliğinde azalmaya yol açmıştır. Yoğunluk parametresi ise deformasyon modlarının karakterini belirlemede kritik bir rol oynamıştır. Düşük yoğunluklarda malzeme daha sünek davranarak geniş alanlı plastik şekil değiştirme sergilerken, yüksek yoğunluklarda deformasyon daha lokalize ve rijit bir yapıda gerçekleşmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde optimum enerji sönümleme davranışı orta yoğunluk, orta kalınlık ve artırılmış segment sayısının birlikte kullanıldığı numunelerde elde edilmiştir.

8. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, PLA dolgulu alüminyum gövdeye sahip hibrit yapılı çarpışma kutularının yarı statik yük altındaki performansı deneysel ve istatistiksel olarak incelenmiştir. Segment tasarımını optimize etmek amacıyla Taguchi deneysel tasarım tekniğinden yararlanılmıştır. Geliştirilen hibrit çarpışma kutularına ait deformasyon modları, yapısal göçme mekanizmalarının ve enerji sönümleme davranışının anlaşılması açısından önemli bulgular sunmaktadır. Numunelerin eksenel basma altında sergilediği deformasyon modları, ağırlıklı olarak burkulma ve ilerleyici katlanma şeklinde gerçekleşmiş olup, bu durum çarpışma enerjisinin kontrollü ve kademeli biçimde sönümlendiğini göstermektedir.

Tüm numunelerde alüminyum dış gövde üzerinde oluşan katlanma izlerinin, segment sınırları boyunca yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Bu durum, segmentli iç dolgu yapısının alüminyum borunun yerel stabilitesini artırarak burkulmanın rastgele gelişmesini engellediğini ortaya koymaktadır. Özellikle segment geçiş bölgelerinde meydana gelen kontrollü katlanmalar, deformasyonun belirli bölgelerde yönlendirilmesini sağlamış ve düzensiz göçme riskini azaltmıştır. Bu bulgu, segmentasyonun enerji sönümleme mekanizmasında etkin bir tasarım aracı olduğunu göstermektedir.

Segment sayısının artmasıyla birlikte deformasyonun, alüminyum boru boyunca daha geniş bir alana yayıldığı ve katlanma modlarının daha homojen hale geldiği gözlemlenmiştir. Az segmentli numunelerde katlanmalar belirli bölgelerde yoğunlaşırken, çok segmentli yapılarda deformasyonun ardışık ve dengeli biçimde ilerlediği görülmektedir. Bu durum, lokal rijitlik farklılıklarının segment sayısı ile daha iyi dağıtıldığını ve göçme mekanizmasının stabilize edildiğini göstermektedir.

Segment kalınlığı ve yoğunluğunun etkisi, burkulma şiddeti ve katlanma derinliği üzerinden değerlendirilebilmektedir. Daha kalın ve yoğun segmentlere sahip numunelerde katlanma bölgelerinin daha belirgin, ancak düzenli olduğu; düşük yoğunluklu yapılarda ise burkulmanın daha erken başladığı ve katlanmaların düzensiz bir geometri sergilediği gözlemlenmiştir. Bu durum, iç dolgunun yetersiz olduğu

durumlarda alüminyum borunun yerel stabilitesini kaybederek kontrolsüz deformasyona yöneldiğini ortaya koymaktadır.

Genel olarak deformasyonlar, hibrit çarpışma kutularının ilerleyici ve kontrol edilebilir bir göçme mekanizması sergilediğini doğrulamaktadır. Katlanma izlerinin simetrik gelişmesi, burkulma bölgelerinin öngörülebilir konumlarda oluşması ve iç dolgunun deformasyon sürecine aktif biçimde katılması, bu yapıların çarpışma enerjisini etkin biçimde sönümleyebileceğini göstermektedir. Elde edilen görsel bulgular, segmentli ve PLA dolgulu hibrit tasarım yaklaşımının, çarpışma güvenliği açısından uygun ve mühendislik açısından uygulanabilir bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır.

Bu çalışmada, tasarım parametreleri ile mekanik performans kriterleri arasındaki ilişki incelenmiş; maksimum ezilme kuvveti, sönümlenen enerji ve ortalama ezilme kuvveti parametreleri birlikte değerlendirilerek analiz edilmiştir. Segment sayısının artmasıyla birlikte, çarpışma kutularının hem maksimum hem de ortalama ezilme kuvveti açısından daha yüksek ve kararlı bir davranış sergilediği görülmüştür. Segment kalınlığı parametresi, maksimum ezilme kuvveti ile sönümlenen enerji arasındaki ilişki üzerinde belirleyici bir rol oynamıştır. Kalınlığın artması, yapının eksenel rijitliğini artırarak maksimum ezilme kuvvetinin yükselmesine neden olmuştur.

Segment yoğunluğu değerlendirildiğinde, iç dolgunun deformasyon sürecine aktif biçimde katıldığı açıkça görülmektedir. Yoğunluğun artmasıyla birlikte, alüminyum borunun içten desteklenmesi güçlenmiş; burkulma başlangıcı gecikmiş ve katlanma davranışı daha düzenli hale gelmiştir. Bu durum hem sönümlenen enerji miktarının artmasına hem de ortalama ezilme kuvvetinin daha kararlı bir seyir izlemesine katkı sağlamıştır. Çarpışma kutusunun tasarım özellikleri ile deneysel test sonuçları arasındaki ilişki incelendiğinde ayrıca aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Segment sayısındaki artış, çarpışma kutularının maksimum ezilme kuvvetini artırmış bu durum segmentli iç dolgunun yapısal rijitliği artırdığını göstermiştir.

- Segment sayısının artması, deformasyonun alüminyum boru boyunca daha homojen dağılmasını sağlayarak çarpışma enerjisinin daha etkin biçimde sönümlenmesine olanak tanımıştır.

- Segment sayısı arttıkça ortalama ezilme kuvvetinin daha kararlı bir seyir izlediği belirlenmiştir. Bu durum ani kuvvet dalgalanmalarının sınırlandırıldığını ortaya koymuştur.

- Segment kalınlığındaki artışın, eksenel basma yükü altında maksimum ezilme kuvvetini arttırdığı ve yapının daha dirençli bir deformasyon davranışı sergilemesine neden olduğu tespit edilmiştir.

- Segment kalınlığının artması, enerji sönümleme kapasitesini artırmakla birlikte, deformasyon sürecinin daha sert bir karakter kazanmasına yol açmıştır.

- Segment yoğunluğunun artması, PLA iç dolgunun alüminyum dış gövdeyi daha etkin biçimde desteklemesini sağlamış ve burkulma başlangıcını geciktirmiştir.

- Yüksek segment yoğunluğuna sahip numunelerde, katlanma davranışının daha düzenli ve öngörülebilir olduğu, buna bağlı olarak ortalama ezilme kuvvetinin arttığı belirlenmiştir.

- Maksimum ezilme kuvveti, sönümlenen enerji ve ortalama ezilme kuvveti birlikte değerlendirildiğinde, hibrit çarpışma kutularında optimum mekanik performansın segment sayısı, segment kalınlığı ve segment yoğunluğunun birlikte ve dengeli biçimde tasarlanmasına bağlı olduğu net biçimde ortaya konulmuştur.

KAYNAKLAR

Abdullah, N. A. Z., Sani, M. S. M., Salwani, M. S., & Husain, N. A. (2020). A review on crashworthiness studies of crash box structure. *Thin-Walled Structures*, *153*, 106795. https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106795

Akgün, M., & Özger, G. (2020). Döküm yöntemiyle üretilmiş AZ91 magnezyum alaşımının işlenebilirliğinin yüzey pürüzlülüğü açısından değerlendirilmesi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, *30*(5), 323–328.

Albak. (2021). Alüminyum , Magnezyum ve Çelik Malzemelerle Tasarlanmış Tek Hücreli ve Çok Hücreli Çarpışma Kutularının Çarpışma Performanslarının İncelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, *36*(June), 523–534.

Alkhatib, S. E., Matar, M. S., Tarlochan, F., Laban, O., Mohamed, A. S., & Alqwasmi, N. (2019). Deformation modes and crashworthiness energy absorption of sinusoidally corrugated tubes manufactured by direct metal laser sintering. *Engineering Structures*, *201*, 109838. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109838

Altın, M. (2018). Çarpışma Kutularının Üzerine Açılan Oyukların Çarpışma Performansı Üzerine Etkisinin İncelenmesi. *Journal of Polytechnic*, *0900*(1), 135–139. https://doi.org/10.2339/politeknik.403989

Altın, M., Halis, S., & Serdar Yücesu, H. (2019). Investigation of the Effect of Corrugated Structure on Crashing Performance in Thin-Walled Circular Crash Boxes. *International Journal of Automotive Science and Technology*, *1*(2), 1–7.

Altın, M., & Yücesu, H. S. (2018). Farklı Geometrik Yapılardaki Çarpışma Kutularının İçerisine Yerleştirilen Alüminyum Köpük Malzemenin Enerji Sönümleme Kapasitesi Üzerine Etkisinin İncelenmesi. *Journal of Polytechnic*, *0900*(1), 141–148. https://doi.org/10.2339/politeknik.426642

Anand, S., Alderliesten, R., & Castro, S. G. P. (2024). Crashworthiness in preliminary design: Mean crushing force prediction for closed-section thin-walled metallic structures. *International Journal of Impact Engineering*, *188*, 104946. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2024.104946

Arachchige, L. J., Li, C., & Wang, F. (2025). Mechanistic insights into early stages of iron corrosion under electrochemical conditions. *Computational Materials Science*, *257*, 114004. https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2025.114004

Ateş, F., Bakirci, A., Can Günaydin, A., Ensarioğlu, C., & Çakir, M. C. (2022). Otomobil Çarpışma Kutularında Performans Artırıcı Yaklaşımların İncelenmesi. *BAUN Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, *24*(2), 830–856. https://doi.org/10.25092/baunfbed.

Aydın, E. (2023). Taguchi Optimizasyon Metodunun İmalat Mühendisliği Alanında Kullanımı : Minitab Örneği. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, *28*(3), 1049–1068. https://doi.org/10.17482/uumfd.1314990

Brown, J. J. (2020). A Review of Shape Variations and Test Angles for Crash Box Application. *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, *9*(1), 883–890. https://doi.org/10.30534/ijatcse/2020/126912020

Bryson, E. J. D., Daley, C. G., & Quinton, B. W. T. (2024). Considering frictional effects on the ice crushing force of a ship-ice impact. *Cold Regions Science and Technology*, *241*, 104703. https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2025.104703

Car, E. (2014). Sürdürülebilir Kalkınma ve İkincil Alüminyum. *Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği-Metalurji Mühendisleri Odası Dergisi*, *166*, 29–37.

Choi, S., Hong, S., Park, S., & Jeong, S. (2022). Effects of Diameter-to-thickness Ratio on Impact Energy Absorption Capability of CFRP Cylindrical Crash Box. *International Journal of Automotive Technology*, *23*(6), 1663–1671. https://doi.org/10.1007/s12239-022-0144-5

Choiron, M. A. (2020). Analysis of multi-cell hexagonal crash box design with foam filled under frontal load model. *Journal of Physics: Conference Series*, *1446*(1), 012022. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1446/1/012022

Davoudi, M., & Kim, K. (2022). Energy Absorption Capability of Thin-Walled Structures with Various Cross Sections Under Oblique Crash. *International Journal of Steel Structures*, *22*(6), 1786–1797. https://doi.org/10.1007/s13296-022-00657-4

Demirci, E., & Yıldız, A. R. (2018). An investigation of the crash performance of magnesium, aluminum and advanced high strength steels and different cross-sections for vehicle thin-walled energy absorbers. *Component Oriented Testing Journal*, *60*(7–8), 661–668. https://doi.org/10.3139/120.111201

Direk. (2023). Effect of Tıtanıum Dioxide and Talc on the Tensile Strength of Composite Material. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Teknoloji ve Uygulamalı Bilimler Dergisi*, *5*(2), 41–48. https://doi.org/10.56809/icujtas.1136033

Djamaluddin, F. (2024). Optimization of foam-filled crash-box under axial loading for pure electric vehicle. *Results in Materials*, *21*, 100505. https://doi.org/10.1016/j.rinma.2023.100505

Du, P., Liu, H., Li, X., Chen, Z., & Ying, J. (2024). Stability properties of 6061-T6 aluminum alloy members with double-layer H-type sections under eccentric compression loads. *Engineering Structures*, *305*, 117687. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.117687

Durgun, I. (2014). Investigation of Different Trigger Geometry Effects on Crash. In *7.Uluslararası Ulaşım Teknolojileri Sempozyumu ve Fuarı , Transist 2014 Bildiri Kitabı*.

Eboreime, O., Ali, M., Kraft, F., & Alam, K. (2018). Development of aluminum alloy 6063 T6 and T7 material models and their effects on energy-absorbing characteristics of cross-axial members. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, *53*(4), 266–281. https://doi.org/10.1177/0309324718759412

Gopalsamy, B. M., Mondal, B., & Ghosh, S. (2009). Taguchi method and anova: An approach for process parameters optimization of hard machining while machining hardened steel. *Journal of Scientific and Industrial Research*, *68*(8), 686–695.

Görgülüarslan, R. M., & Güler, M. A. (2015). Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Sıcak Şekillendirme Tekniğinin İncelenmesi. *Mühendis ve Makine Dergisi*, *56*, 41–51.

Gürbüz, Y., & Kulaksız, A. A. (2016). Elektrikli Araçlar ile Klasik İçten Yanmalı Motorlu Araçların Çeşitli Yönlerden Karşılaştırılması. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, *6*(2), 117. https://doi.org/10.17714/gufbed.2016.06.011

Gürsoy Özcan, A., Peşteli, V., & Yöntem, O. (2018). Yüksek Mukavemetli Çelik Sacların Kaynaklanabilirliği ve Direnç Spot Kaynağı Parametrelerinin Taguchi Metoduyla Optimizasyonu. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, *23*(2), 333–350. https://doi.org/10.17482/uumfd.376535

Hilmann, J., Paas, M., Haenschke, A., & Vietor, T. (2007). Automatic concept model generation for optimisation and robust design of passenger cars. *Advances in Engineering Software*, *38*(11–12), 795–801. https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2006.08.031

Hu, X., & Feng, Z. (2021). Advanced High Strength Steel Basics and Applications in the Automotive. In *Manufacturing Science Division Material Science & Technology Division/Oak Rıdge Natıonal Laboratory, Ornl/Tm-20, Oak Ridge*.

Hussain, N. N., Regalla, S. P., Rao, Y. V. D., Dirgantara, T., Gunawan, L., & Jusuf, A. (2021). Drop-weight impact testing for the study of energy absorption in automobile crash boxes made of composite material. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, *235*(1), 114–130. https://doi.org/10.1177/1464420720952813

Hwang, Y.-H., & Han, J.-H. (2025). Crashworthiness of Energy Absorbing Structures Under Combined Shear-Compression Loading: Effects of Materials and Geometries. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, *26*(2), 615–628. https://doi.org/10.1007/s42405-024-00779-5

Jackowski, J., Posuniak, P., Zielonka, K., & Jurecki, R. (2023). Experimental Testing of Energy-Absorbing Structures Used to Enhance the Crashworthiness of the Vehicles. *Energies Journal*, *16*(5), 2183. https://doi.org/10.3390/en16052183

Jafarzadeh-Aghdam, N., Sparrer, Y., Zimmermann, J., Mäde, K. A. G., Sharma, R., Schröder, K.-U., & Münstermann, S. (2023). Potential of Integrated Component

Driven Material Design to Improve Crash Box Performance. *Metals Journal*, *13*(5), 915. https://doi.org/10.3390/met13050915

Jiga, G., Stamin, Ş., Dinu, G., Vlăsceanu, D., & Popovici, D. (2016). Material and shape crash-box influence on the evaluation of the impact energy absorption capacity during a vehicle collision. *Ciência & Tecnologia Dos Materiais*, *28*(1), 67–72. https://doi.org/10.1016/j.ctmat.2016.03.001

Kajiwara, I., Kitabatake, S., Hosoya, N., & Maeda, S. (2019). Design of dielectric elastomer actuators for vibration control at high frequencies. *International Journal of Mechanical Sciences*, 849–857. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.05.019

Kertesz, J., & Kovacs, T. A. (2024). Finite element analysis regarding folding behaviour of different crashbox versions. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, *107*(May), 105375. https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2024.105375

Kösedağ, E., & İşler, D. (2023). Effect of Section Geometry and Material Type on Energy Absorption Capabilities of Crash Boxes. *Karaelmas Science and Engineering Journal*, *13*(1), 42–51. https://doi.org/10.7212/karaelmasfen.1150591

Lu, H., Zhang, X., Wang, Y., Zhang, W., Wu, M., & Ouyang, Y. (2026). Experimental investigation on structural behaviour of the steel-aluminium alloy composite gusset joints. *Structures*, *84*, 110961. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.110961

Marwa A., Abd El-Halim, M. F., & Awd Allah, M. M. (2025). Experimental investigation of material Synergy: Influence of 3D printing parameters on the lateral crash performance of cellular structures stuffed in aluminum tubes. *Composites Part B: Engineering*, *307*, 112902. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2025.112902

Marzbanrad, J., Mehdikhanlo, M., & Pour, A. S. (2009). An energy absorption comparison of square , circular , and elliptic steel and aluminum tubes under impact loading. *Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu*, *33*, 159–166. https://doi.org/10.3906/muh-0904-11

Memane, K., Mashalkar, A., & Kumar, P. (2023). A Review Thin-Wall-Tube Energy-Absorbing Structure : Crash-Box. *Journal of Physics: Conference Series*, 246. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2426/1/012060

Montgomery. (2019). Design and Analysis of Experiments, 10th Edition | Wiley. In *Wiley* (Ninth Edit). Arizona State University.

Muchhala, D., Pandey, A., Raj, R., Sahu, S. K., Srivastava, S. K., & Mondal, D. P. (2023). *Crashworthiness Performance of Foam Filled Composite Tubular Structures*. https://doi.org/10.1007/978-981-99-5289-2_3

Nandagopal, M., Sivakumar, K., & Sengottuvelan, M. (2021). Process parameter

optimization to reduce cold metal defect in ferrous casting using Taguchi technique and regression analysis. *Materials Today: Proceedings*, *45*, 7917–7921. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.748

Nas, E., & Kara, F. (2022). Optimization of EDM Machinability of Hastelloy C22 Super Alloys. *Machines Journal*, *10*(12), 1131. https://doi.org/10.3390/machines10121131

Nasir Hussain, N., Regalla, S. P., & Daseswara Rao, Y. V. (2021). Study on influence of notch triggers on absorption of energy for composite automobile crash box under impact loads. *Materials Today: Proceedings*, *38*, 3220–3231. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.715

Nasution, A. Y., Rejab, M. R. M., Siregar, J. P., & Ma, Q. (2024). Effect of number of triggers and shape of crash box on energy absorption during experimental collision. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, *19*(10), 580–592. https://doi.org/10.59018/052479

Özen, İ., Gedikli, H., & Aslan, M. (2023). Experimental and numerical investigation on energy absorbing characteristics of empty and cellular filled composite crash boxes. *Engineering Structures*, *289*, 116315. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116315

Prabhaharan S. A., Balaji, G., & Annamalai, K. (2022). Numerical simulation of crashworthiness parameters for design optimization of an automotive crash-box. *International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization*, *13*, 3. https://doi.org/10.1051/smdo/2021036

Quanjin, M., Salim, M. S. A., Rejab, M. R. M., Bernhardi, O.-E., & Nasution, A. Y. (2020). Quasi-static crushing response of square hybrid carbon/aramid tube for automotive crash box application. *Materials Today: Proceedings*, *27*, 683–690. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.10.161

Rao, S. (2023). Taguchi and Regression Analysis of Abrasive Wear Behavior of Carbon Epoxy Composite. *Journal of Materials and Engineering*, *1*(2), 68–73. https://doi.org/10.61552/JME.2023.02.003

Saber, A., Amer, A. M., Shehata, A. I., & Elsalam, A. A. (2025). Recent Developments in Additively Manufactured Crash Boxes : Geometric Design Innovations , Material Behavior , and Manufacturing Techniques. *Applied Sciences*, 1–40.

Shaikh, A. S. (2019). Vehicle Crash Box Analysis of Different Shapes Subjected To Impact Loading for Minimum Deflection Using Ansys. *Proc.of the 2nd International Conference on Manufacturing Excellence*, *4*, 669–676.

Shang, Z., Liu, Q., Meng, J., Yang, P., & Yu, X. (2025). Optimization design of top beam energy absorbing member of corrugated hydraulic support with three kinds of sandwich structures based on adaptive response surface method. *Plos One*, *20*(5), e0323280. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0323280

Striewe, J., Reuter, C., Sauerland, K.-H., & Tröster, T. (2018). Manufacturing and

crashworthiness of fabric-reinforced thermoplastic composites. *Thin-Walled Structures*, *123*, 501–508. https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.11.011

Sun, X., Jiang, Z., Zhao, J., & Xing, S. (2025). Evaluation of crush and energy absorption characteristics of corrugated origami tube by additive manufacturing. *Polymer Composites*, *46*(6), 5561–5579. https://doi.org/10.1002/pc.29311

Tarlochan, F., Samer, F., Hamouda, A. M. S., Ramesh, S., & 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*, 7–17. https://doi.org/10.1016/j.tws.2013.04.003

Üner, I., & Koçak, E. D. (2012). Polilaktikasitin Kullanım Alanları ve Nano Lif Üretimdeki Uyuglamaları. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, *11*(22), 79–88.

Ünverdi, M., & Küçük, H. (2019). Performance comparison of plate heat exchangers designed using Taguchi method and Computational Fluid Dynamics. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, *25*(4), 373–386. https://doi.org/10.5505/pajes.2018.35493

Usta, F., & Türkmen, S. H. (2020). Ökzetik dolgulu çarpişma tüplerinin dinamik çarpma yükleri altinda deneysel ve sayisal olarak incelenmesi. *8.Ulusal Havacılık ve Uzay Konferans Bildirisi*, *077*, 1–11.

Wakhidah, D. H., Irawan, S., & Purnowidodo, A. (2024). *Energy Absorption and Deformation Pattern of Circular Hybrid Crashbox Subjected to Frontal Load*. 7222–7229. https://doi.org/10.17973/MMSJ.2024

Wang, G., Zhang, Y., Zheng, Z., Chen, H., & Yu, J. (2022). Crashworthiness design and impact tests of aluminum foam-filled crash boxes. *Thin-Walled Structures*, *180*, 109937. https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109937

Williams, K. W., Bellows, B., Dees, D., Engler, D., Lindner, R., & King, J. J. (2005). *Taguchi's Quality Engineering Handbook*.

Xin, S., Luo, J., Liu, J., Zhou, Y., Wang, K., & Wang, J. (2025). Advanced control of multi-source heat pump systems: Synergizing Taguchi experimental design with entropy weight method for multi-criteria coordination. *Energy and Buildings*, *348*, 116461. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116461

Xiong, F., Wang, Z., Wang, D., Ji, L., Wu, H., & Zou, X. (2023). Multi-objective robust optimization of foam-filled double-hexagonal crash box using Taguchi-grey relational analysis. *Advances in Mechanical Engineering*, *15*(9). https://doi.org/10.1177/16878132231189070

Yeni, H., & Çelik, H. (2022). Alüminyum Köpük Malzemenin Plastik ve Alüminyum Kılıf ile Kullanılmasının Çarpışma Kutularındaki Enerji Emilimine Etkisi. *Uluslararası Bilim,Teknoloji ve Tasarım Dergisi*, *3*(1), 16–27.

Yi, H., Srinivasan, R. S., & Braham, W. W. (2015). An integrated energy–emergy

approach to building form optimization: Use of EnergyPlus, emergy analysis and Taguchi-regression method. *Building and Environment*, *84*, 89–104. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.10.013

Yılmazçoban, İ. K., Adanur, Ö., Bakhtiyar, A., & Ergün, A. (2019). Numerical and experimental approach of various sectioned new concept of the crash-boxes to determine the reliability and crashworthiness of the vehicles during frontal impacts. *Sakarya University Journal of Science*, *23*(1), 76–84. https://doi.org/10.16984/saufenbilder.460078

Yunus Nasution, A., Ruzaimi Mat Rejab, M., Parlaungan Siregar, J., & Ma, Q. (2023). Combination of frustra shapes with cross sections and trigger circles for crash box design to absorb energy. *Materials Today: Proceedings*. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.01.007

Zhao, X., Zhu, G., Zhou, C., & Yu, Q. (2019). Crashworthiness analysis and design of composite tapered tubes under multiple load cases. *Composite Structures*, *222*, 110920. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.110920

Zhuang. (2023). Experimental and Numerical Study on the Energy Absorption of Polyurethane Foam-Filled Metal/Composite Hybrid Structures. *Metals*, 118. https://doi.org/10.3390/met11010118