ÜRÜN TASARIM SÜREÇLERİNDE YENİLİKÇİ YAPILARIN DİNAMİK VE MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Mehmet Mert KOTAMAN

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÜRÜN TASARIM SÜREÇLERİNDE YENİLİKÇİ YAPILARIN DİNAMİK VE MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Mehmet Mert KOTAMAN
0009-0002-9254-5149

Prof. Dr. Ali Rıza YILDIZ
0000-0003-1790-6987
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA– 2025
Her Hakkı Saklıdır.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ÜRÜN TASARIM SÜREÇLERİNDE YENİLİKÇİ YAPILARIN DİNAMİK VE MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Mehmet Mert KOTAMAN

Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ali Rıza YILDIZ

Çarpışma kutuları, taşıtlarda çarpışma anında ortaya çıkan enerjiyi sönümleyerek yolcu kabinine iletilen kuvvetleri azaltmayı amaçlayan, yapının ön kısmında yer alan pasif güvenlik elemanlarıdır. Bu tez çalışmasında, çarpışma kutularında enerji sönümleme kapasitesini artırmak amacıyla kafes (lattice) yapılar ve enerji absorban maddelerle desteklenmiş hibrit sistemlerin mekanik davranışları deneysel olarak araştırılmıştır. AlSi10Mg alaşımı kullanılarak seçici lazer ergitme (SLM) yöntemiyle üretilen kafes yapılar, farklı üretim yönlerinde imal edilmiştir. Numunelerden bazıları poliüretan köpük ile doldurulmuş, bazıları ise PLA kaplama ile desteklenmiştir. Çalışma kapsamında üç faktörlü ve üç seviyeli L9 tipi Taguchi deney tasarımı uygulanarak; enerji absorban madde kullanımı, üretim oryantasyonu ve lattice tipi gibi parametrelerin çarpışma davranışına etkisi incelenmiştir. Numunelere uygulanan basma testleri sonucunda, en büyük çarpışma kuvveti (EÇK), sönümlenen toplam enerji (STE) ve özgül enerji sönümleme kapasitesi (ÖEK) gibi kriterler değerlendirilmiştir. İstatistiksel analizler sonucunda, üretim oryantasyonunun da mekanik performans üzerinde önemli ölçüde etkili olduğu belirlenmiştir. Özellikle yatay üretim yönünde imal edilen numunelerin daha yüksek enerji sönümleme kapasitesine sahip olduğu görülmüş; lattice yapıların tek başına sunduğu enerji sönümleme avantajlarının, uygun dolgu malzemeleriyle birleştirildiğinde daha da artırılabildiği ortaya konmuştur. Bu çalışmanın, darbe dayanımı gerektiren uygulamalarda yapılacak ileri araştırmalara ve tasarım geliştirme çalışmalarına katkı sağlaması amaçlanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli İmalat, Kafes Yapılar, Enerji Sönümleme, Çarpışma Kutuları, Taguchi Deney Tasarımı

2025, ix + 78 sayfa

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION OF THE MECHANICAL AND DYNAMIC BEHAVIOR OF INNOVATIVE STRUCTURES IN PRODUCT DESIGN PROCESS

Mehmet Mert KOTAMAN
Uludag University
Graduate School of Natural and Applied
Sciences Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ali Rıza YILDIZ

Crash boxes are passive safety components located at the front end of vehicles, designed to absorb the impact energy during a collision and reduce the forces transmitted to the passenger cabin. In this thesis study, the mechanical behavior of hybrid systems reinforced with lattice structures and energy-absorbing materials was experimentally investigated with the aim of improving the energy absorption capacity of crash boxes. Lattice structures were manufactured using the AlSi10Mg alloy through the Selective Laser Melting (SLM) method and produced with different build orientations. Some specimens were filled with polyurethane foam, while others were reinforced with PLA coatings. A three-factor, three-level Taguchi L9 experimental design was applied to examine the effects of parameters such as the use of energy-absorbing material, build orientation, and lattice type on crash behavior. Based on compression tests performed on the samples, key performance indicators such as peak crash force (PCF), total absorbed energy (TAE), and specific energy absorption (SEA) were evaluated. Statistical analyses revealed that build orientation significantly influenced mechanical performance. It was observed that specimens manufactured in the horizontal orientation exhibited higher energy absorption capacities. Furthermore, it was demonstrated that the inherent energy absorption advantages of lattice structures can be further enhanced when combined with suitable filler materials. This study aims to contribute to future research and design development efforts in applications requiring impact resistance.

Key words: Additive Manufacturing, Lattice Structures, Energy Absorption, Crash Boxes, Taguchi Experimental Design

2025, ix +78 pages.

TEŞEKKÜR

Tezin oluşumundan tamamlanmasına kadar geçen süreçte, kıymetli bilgi ve yönlendirmeleriyle çalışmayı şekillendiren, her aşamada desteğini esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Ali Rıza Yıldız'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Çalışmanın planlanması, testlerin uygulanması ve üretim süreçlerinin gerçekleştirilmesinde sağladıkları katkılardan dolayı Coşkunöz Holding Ar-Ge Merkezi İleri Analiz ve Test Kısım Müdürü Sayın Ahmet Onaylı'ya ve Coşkunöz Eklemeli İmalat Ekibi (Add.Me)'ne teşekkür ederim. Ayrıca bu süreçte gösterdikleri sabır, anlayış ve destekle her zaman yanımda olan biricik aileme ve nişanlım Beyza'ya teşekkür ederim.

Mehmet Mert KOTAMAN

05/04/2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET i
ABSTRACT ii
TEŞEKKÜR iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ v
ŞEKİLLER DİZİNİ vi
ÇİZELGELER DİZİNİ ix
1.GİRİŞ 1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI 3
2.1. Lattice (Kafes) Yapılar 3
2.2. Çarpışma Kutuları ve Hibrit Tüp Yapılar 4
2.3. Eklemeli İmalat ve SLM Yöntemi 8
2.4. Lattice Yapılar ve Hibrit Tüpler için Literatür Araştırması 10
2.5. Çarpışma Kutuları ve Enerji Sönümleme için Literatür Araştırması 17
2.6. Eklemeli İmalatta Üretim Oryantasyonu için Literatür Araştırması 19
3. MATERYAL ve YÖNTEM 21
3.1. Taguchi Deney Tasarım Yöntemi 21
3.2. Deney Tasarımı 21
3.3. Numunelerin Tasarımı ve Üretimi 24
3.4. Numunelerin Test Edilmesi 38
4. BULGULAR 42
5. TARTIŞMA VE SONUÇ 66
KAYNAKLAR 74
ÖZGEÇMİŞ 78

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
μm	Mikrometre
ηF	Ezilme Kuvveti Verimi

Kısaltmalar	**Açıklama**
BCC	Body-Centered Cubic (Hacim Merkezli Kübik)
BCC-Z	Body-Centered Cubic with vertical struts (Dikey Destekli Hacim Merkezli Kübik)
CAD	Computer-Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
CT	Computed Tomography (Bilgisayarlı Tomografi)
DoE	Design of Experiments (Deney Tasarımı)
EBM	Electron Beam Melting (Elektron Demeti ile Ergitme)
EÇK	En Büyük Çarpışma Kuvveti (Peak Crash Force)
FDM	Fused Deposition Modeling (Eriyik Yığma Modelleme)
kN	Kilonewton
mm	Milimetre
PLA	Polylactic Acid (Polilaktik Asit)
SC-BCC	Simple Cubic – Body-Centered Cubic (Basit Kübik – Hacim Merkezli Kübik)
SLM	Selective Laser Melting (Seçici Lazer Ergitme)
S/N	Signal-to-Noise Ratio (Sinyal-Gürültü Oranı)
STE	Sönümlenen Toplam Enerji (Total Absorbed Energy)
TPMS	Triply Periodic Minimal Surface (Üç Yönlü Periyodik Minimal Yüzey)
ÖEK	Özgül Enerji Sönümleme Kapasitesi (Specific Energy Absorption)

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 2.1.	Hücresel malzemelerin geometrik durumlarına göre sınıflandırılması	3
Şekil 2.2.	Çarpışma kutusu örneği	4
Şekil 2.3.	İdeal bir çarpışma kutusundan beklenen kuvvet-deformasyon grafiği	6
Şekil 2.4.	HMK ve HMK-Z kafes yapıların tüp içerisine yerleştirilmesiyle elde edilen hibrit yapıların şematik görünüşleri	7
Şekil 2.5.	SLM yöntemi	8
Şekil 2.6.	(a) içi boş bir alüminyum tüp ; (b) petek dolgulu bir tüp ; (c) köpük dolgulu bir tüp; (d) köpük ve petek dolgulu bir tüp .	10
Şekil 3.1.	Çarpışma kutusu boyutları (mm)	24
Şekil 3.2.	Body centered cubic (BCC) ve boyutları (lattice tip 1)	25
Şekil 3.3.	Simple cubic body centered cubic (SC – BCC) ve boyutları (lattice tip 2)	25
Şekil 3.4.	Body centered cubic (BCC) (lattice tip 1) çarpışma kutusuna uygulanması	26
Şekil 3.5.	Simple cubic body centered cubic (SC – BCC) (lattice tip 2) çarpışma kutusuna uygulanması	27
Şekil 3.6.	Materialise magics programında numunelerin tablaya yerleştirilmesi	29
Şekil 3.7.	Slm solutıons 500 cihazında numune üretim süreci	29
Şekil 3.8.	Üretilen numunelerin de-powdering sonrası üstten görünümü	30
Şekil 3.9.	Üretilen numunelerin de-powdering sonrası yandan görünümü	30
Şekil 3.10.	Numunelerin kumlama öncesi (üstte) ve sonrası (altta) görüntüsü	31
Şekil 3.11.	Numunelere poliüretan köpük doldurulması için üretilen aparat ve kullanılan dolgu malzemesi	32
Şekil 3.12.	Pla tüpten kaplama malzemesi	32
Şekil 3.13.	Enerji sönümleyici yok, dik üretilmiş ve lattice bulunmayan çarpışma kutusu ağırlığı	33
Şekil 3.14.	Enerji sönümleyici yok, 45 derecede üretilmiş ve lattice tip 1’e sahip çarpışma kutusu ağırlığı	33
Şekil 3.15.	Enerji sönümleyici yok, yatay üretilmiş ve lattice tip 2’ye sahip çarpışma kutusu ağırlığı	34
Şekil 3.16.	İçi köpük dolu, dik üretilmiş ve lattice tip 1’e sahip çarpışma kutusu ağırlığı	34
Şekil 3.17.	İçi köpük dolu, 45 derecede üretilmiş ve lattice tip 2’ye sahip çarpışma kutusu ağırlığı	35
Şekil 3.18.	İçi köpük dolu, yatay üretilmiş ve lattice bulunmayan çarpışma kutusu ağırlığı	35
Şekil 3.19.	Dışı pla kaplı, dik üretilmiş ve lattice tip 2’ye sahip çarpışma kutusu ağırlığı	36
Şekil 3.20.	Dışı pla kaplı, 45 derecede üretilmiş ve lattice bulunmayan çarpışma kutusu ağırlığı	36
Şekil 3.21.	Dışı pla kaplı, yatay üretilmiş ve lattice tip 1’e sahip çarpışma kutusu ağırlığı	37
Şekil 3.22.	Test sırasında kullanılan fikstür tasarımları	38
Şekil 3.23.	Fikstüre sabitlenen çarpışma kutusu	39

Şekil 3.24. Test prosedürü (mts test sistemi arayüzü) 40
Şekil 3.25. Test prosedürü detayları 40
Şekil 3.26. Test prosedüründe veri toplama hızı 40
Şekil 3.27. Test sırasında alınan görüntü örnekleri 41
Şekil 4.1. Enerji sönümleyici yok, dik üretilmiş ve lattice bulunmayan çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiği (numune 1) 42
Şekil 4.2. Enerji sönümleyici yok, dik üretilmiş ve lattice bulunmayan çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiğinin altında kalan alan (numune 1) 42
Şekil 4.3. Enerji sönümleyici yok, dik üretilmiş ve lattice bulunmayan çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiği (numune 2) 43
Şekil 4.4. Enerji sönümleyici yok, dik üretilmiş ve lattice bulunmayan çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiğinin altında kalan alan (numune 2) 43
Şekil 4.5. Enerji sönümleyici yok, 45 derecede üretilmiş ve lattice tip 1'e sahip çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiği (numune 1) 44
Şekil 4.6. Enerji sönümleyici yok, 45 derecede üretilmiş ve lattice tip 1'e sahip çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiğinin altında kalan alan (numune 1) 44
Şekil 4.7. Enerji sönümleyici yok, 45 derecede üretilmiş ve lattice tip 1'e sahip çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiği (numune 2) 45
Şekil 4.8. Enerji sönümleyici yok, 45 derecede üretilmiş ve lattice tip 1'e sahip çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiğinin altında kalan alan (numune 2) 45
Şekil 4.9. Enerji sönümleyici yok, yatay üretilmiş ve lattice tip 2'ye sahip çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiği (numune 1) 46
Şekil 4.10. Enerji sönümleyici yok, yatay üretilmiş ve lattice tip 2'ye sahip çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiğinin altında kalan alan (numune 1) 46
Şekil 4.11. Enerji sönümleyici yok, yatay üretilmiş ve lattice tip 2'ye sahip çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiği (numune 2) 47
Şekil 4.12. Enerji sönümleyici yok, yatay üretilmiş ve lattice tip 2'ye sahip çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiğinin altında kalan alan (numune 2) 47
Şekil 4.13. İçi köpük dolu, dik üretilmiş ve lattice tip 1'e sahip çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiği (numune 1) 48
Şekil 4.14. İçi köpük dolu, dik üretilmiş ve lattice tip 1'e sahip çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiğinin altında kalan alan (numune 1) 48
Şekil 4.15. İçi köpük dolu, dik üretilmiş ve lattice tip 1'e sahip çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiğinin altında kalan alan (numune 2) 49
Şekil 4.16. İçi köpük dolu, dik üretilmiş ve lattice tip 1'e sahip çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiği (numune 2) 49
Şekil 4.17. içi köpük dolu, 45 derecede üretilmiş ve lattice tip 2'ye sahip çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiği (numune 1) 50
Şekil 4.18. İçi köpük dolu, 45 derecede üretilmiş ve lattice tip 2'ye sahip çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiğinin altında kalan alan (numune 1) 50
Şekil 4.19. İçi köpük dolu, 45 derecede üretilmiş ve lattice tip 2'ye sahip çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiği (numune 2) 51
Şekil 4.20. İçi köpük dolu, 45 derecede üretilmiş ve lattice tip 2'ye sahip çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiğinin altında kalan alan (numune 2) 51

Şekil 4.21. İçi köpük dolu, yatay üretilmiş ve lattice bulunmayan çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiği (numune 1) 52
Şekil 4.22. İçi köpük dolu, yatay üretilmiş ve lattice bulunmayan çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiğinin altında kalan alan (numune 1) 52
Şekil 4.23. İçi köpük dolu, yatay üretilmiş ve lattice bulunmayan çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiği (numune 2) 53
Şekil 4.24. İçi köpük dolu, yatay üretilmiş ve lattice bulunmayan çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiğinin altında kalan alan (numune 2) 53
Şekil 4.25. Dışı pla kaplı, dik üretilmiş ve lattice tip 2'ye sahip çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiği (numune 1) 54
Şekil 4.26. Dışı pla kaplı, dik üretilmiş ve lattice tip 2'ye sahip çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiğinin altında kalan alan (numune 1) 54
Şekil 4.27. Dışı pla kaplı, dik üretilmiş ve lattice tip 2'ye sahip çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiği (numune 2) 55
Şekil 4.28. Dışı pla kaplı, dik üretilmiş ve lattice tip 2'ye sahip çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiğinin altında kalan alan (numune 2) 55
Şekil 4.29. Dışı pla kaplı, 45 derecede üretilmiş ve lattice bulunmayan çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiği (numune 1) 56
Şekil 4.30. Dışı pla kaplı, 45 derecede üretilmiş ve lattice bulunmayan çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiğinin altında kalan alan (numune 1) 56
Şekil 4.31. Dışı pla kaplı, 45 derecede üretilmiş ve lattice bulunmayan çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiği (numune 2) 57
Şekil 4.32. Dışı pla kaplı, 45 derecede üretilmiş ve lattice bulunmayan çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiği (numune 2) 57
Şekil 4.33. Dışı pla kaplı, yatay üretilmiş ve lattice tip 1'e sahip çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiği (numune 1) 58
Şekil 4.34. Dışı pla kaplı, yatay üretilmiş ve lattice tip 1'e sahip çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiğinin altında kalan alan (numune 1) 58
Şekil 4.35. Dışı pla kaplı, yatay üretilmiş ve lattice tip 1'e sahip çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiği (numune 2) 59
Şekil 4.36. Dışı pla kaplı, yatay üretilmiş ve lattice tip 1'e sahip çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiğinin altında kalan alan (numune 2) 59
Şekil 4.37. Sönümlenen toplam enerjiye göre faktörlerin ortalama etki grafiğinde gösterilmesi 63
Şekil 4.38. Sönümlenen toplam enerjiye göre faktörlerin sinyal-gürültü oranı grafiğinde gösterilmesi 63
Şekil 4.39. Özgül enerji sönümleme kapasitesine göre faktörlerin ortalama etki grafiğinde gösterilmesi 64
Şekil 4.40. Özgül enerji sönümleme kapasitesine göre faktörlerin sinyal-gürültü oranı grafiğinde gösterilmesi 64
Şekil 4.41. Ezilme kuvveti verimine göre faktörlerin ortalama etki grafiğinde gösterilmesi 65
Şekil 4.42. Ezilme kuvveti verimine göre faktörlerin sinyal-gürültü oranı grafiğinde gösterilmesi 65
Şekil 5.1. Toplam sönümlenen enerjiye faktörlerin etkisi (anova etki oranları) 67
Şekil 5.2. Özgül enerji sönümleme kapasitesine faktörlerin etkisi (anova etki oranları) 67
Şekil 5.3. Ezilme kuvveti verimine faktörlerin etkisi (anova etki oranları) 68

ÇİZELGELER DİZİNİ

		Sayfa
Çizelge 2.1.	Eklemeli imalat teknolojilerinin karşılaştırılması	9
Çizelge 3.1.	Deney tasarımı için belirlenen faktörler ve seviyeleri	22
Çizelge 3.2.	Taguchi L9 ortogonal deney matrisi	22
Çizelge 3.3	Deney tasarım tablosu	23
Çizelge 3.4	AlSi10Mg için malzeme özellikleri	28
Çizelge 3.5	AlSi10Mg için sertlik ve yüzey pürüzlülük değerleri	28
Çizelge 3.6.	Numunelerin ağırlıklarının gösterilmesi	37
Çizelge 4.1.	Maksimum çarpışma kuvvetleri	60
Çizelge 4.2.	Ezilme kuvveti verimi	61
Çizelge 4.3.	Sönümlenen enerji miktarları	62
Çizelge 5.1.	Toplam sönümlenen enerji için s/n faktör seviye tablosu	68
Çizelge 5.2.	Toplam sönümlenen enerji için optimum numunenin ve sönümlenen enerjinin tahmini	69
Çizelge 5.3.	Özgül enerji sönümleme kapasitesi için s/n faktör seviye tablosu	69
Çizelge 5.4.	Özgül enerji sönümleme kapasitesi için optimum numunenin ve özgül enerji sönümleme kapasitesinin tahmini	70
Çizelge 5.5.	Ezilme kuvveti verimi için s/n faktör seviye tablosu	71
Çizelge 5.6.	Ezilme kuvveti verimi için optimum numunenin ve verimin tahmini	72

1.GİRİŞ

Günümüzde mühendislik yapılarında hafiflik, yüksek dayanım ve enerji soğurma özelliklerinin aynı anda sağlanma ihtiyacı, özellikle darbe ve çarpışma etkilerine maruz kalan sistemlerde öncelikli bir tasarım hedefi hâline gelmiştir.
Motorlu taşıtlara olan talebin artmasıyla birlikte, karayolu trafiğinde karşılaşılan kazaların sayısında da ciddi bir yükseliş bulunmaktadır. Bu kazaların önemli bir kısmı önden çarpmalar şeklinde meydana gelmekte ve darbe kuvvetleri doğrudan aracın ön bölgesinde ortaya çıkmaktadır. Bu tür çarpışmalarda, aracın ön tampon kısmında konumlandırılmış olan çarpışma kutuları devreye girerek yapının kontrollü biçimde deformasyonunu sağlar. Bu sayede çarpışma sırasında ortaya çıkan kinetik enerjinin büyük bir bölümü emilerek, yolcu kabinine iletilen kuvvetlerin azaltılması hedeflenir. Ancak bu enerjinin yeterince sönümlenememesi hâlinde, çarpışma etkileri doğrudan iç yapıya aktarılabilir ve bu durum hem yolcular açısından ciddi yaralanmalara hem de araçta ağır yapısal hasarlara yol açabilir. (Altın & Yücesu, 2019)

Bu sebeple, yenilikçi iç yapısal tasarımlar ve ileri üretim teknolojileri, geleneksel malzemelerin sınırlarını aşan yeni nesil çözümlerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Kafes (lattice) yapılar, sağladıkları geometrik esneklik, malzeme tasarrufu ve özgül mekanik performans gibi avantajlarıyla günümüzde geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Gelişen eklemeli imalat teknolojileriyle birlikte karmaşık kafes geometrileri de üretilebilir hâle gelmiştir.

Kafes yapılar, yük taşıma performanslarının yanı sıra, çarpışma ve darbe yükleri altındaki gösterdikleri performans açısından da önemli avantajlar sunmaktadır. Bu yapılarda hücre tipi, gözeneklilik oranı, üretim yönü ve yapı ölçeği gibi parametreler, enerji soğurma kapasitesi üzerinde doğrudan etkilidir. Son yıllarda yapılan çalışmalarda, kafes yapıların içinin enerji absorban dolgu malzemeleri ile desteklenmesi, deformasyon kontrolünü artıran önemli bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Özellikle poliüretan köpük gibi hafif ve sönümleme kabiliyeti yüksek malzemelerin kullanımı, yapıların çökme sonrası taşıyıcılığını artırmakta ve kontrollü deformasyon bölgeleri oluşturarak güvenli bir enerji yayılımı sağlamaktadır.

Literatürde bu tür dolgu malzemeleriyle zenginleştirilmiş kafes yapıların geleneksel sandviç ya da petek yapılara göre daha yüksek özgül enerji soğurma kapasitesi sunduğu birçok çalışmada gösterilmiştir.

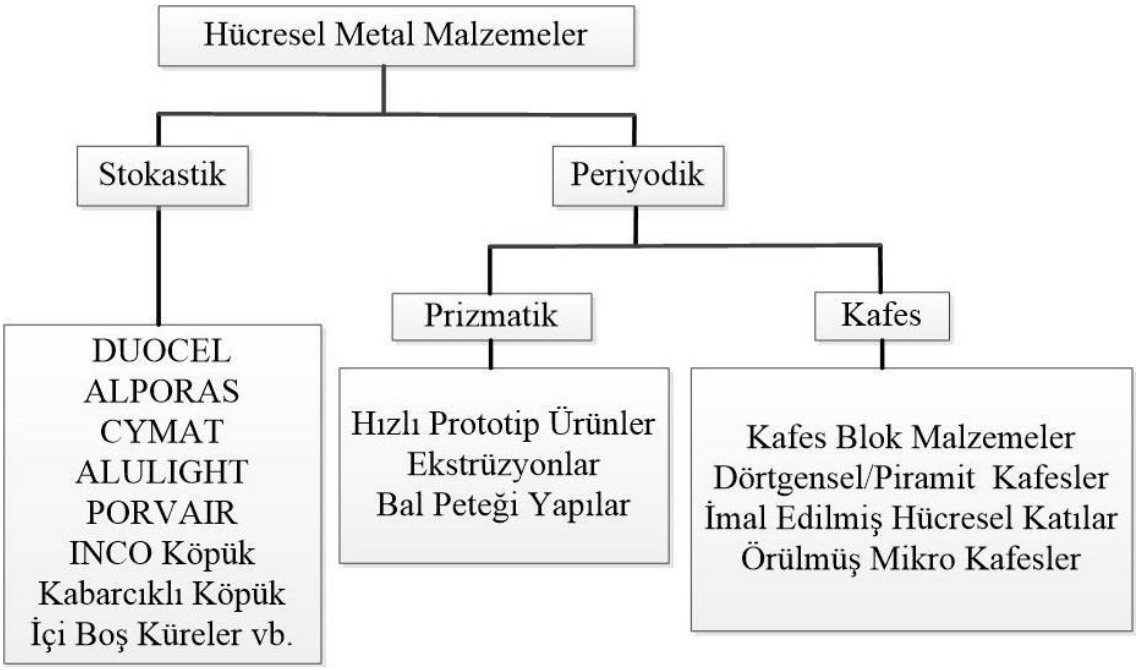
Bu doğrultuda hazırlanan tez çalışmasında, seçici lazer ergitme (SLM) yöntemi kullanılarak üretilen kafes yapılardan bazılarının içi poliüretan köpükle doldurulmuş , bazı numunelerin dışıda pla malzeme ile kaplanmıştır. Numuneler farklı üretim yönlerinde üretilerek, üretim yönünün mekanik performansa etkisi incelenmiştir. Deneysel çalışmalar kapsamında numunelere basma testi uygulanmış; elde edilen yük-deformasyon verileri üzerinden ; en büyük çarpışma kuvveti (EÇK), sönümlenen toplam enerji (STE) ve özgül enerji sönümleme kapasitesi (ÖEK) gibi parametreleri değerlendirilmiştir. Ayrıca deneysel tasarım sürecinde Taguchi yöntemi kullanılmış ve istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, üretim parametrelerinin yapısal davranış üzerindeki etkisini ortaya koymakta ve enerji absorban maddelerle birlikte kullanılan kafes yapıların enerji soğurma uygulamalarında ne derece işlevsel olduğunu göstermektedir.

Bu çalışma, 3B baskı teknolojisiyle üretilmiş ve enerji sönümleme özelliği dolgu malzeme ile artırılmış kafes yapıların, mekanik davranışlarının anlaşılması ve üretim yönü gibi üretime özgü parametrelerin bu davranış üzerindeki etkilerinin açığa çıkarılması amaçlanmaktadır. Elde edilen sonuçların, hem akademik literatüre katkı sağlaması hem de darbe dayanımı gerektiren mühendislik uygulamalarında daha verimli ve güvenli yapısal tasarımlar geliştirilmesine rehberlik etmesi beklenmektedir

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Lattice (Kafes) Yapılar

Hücresel yapılar, genel olarak stokastik ve periyodik olmak üzere iki temel sınıfa ayrılmakta olup; bu yapılar, birim hücre içerisinde katı malzeme ile boşlukların farklı dizilimleriyle tanımlanır (Gibson vd., 2010). Stokastik yapılar, köpüklerde olduğu gibi düzensiz ve rastgele hücre yerleşimine sahipken; periyodik yapılar, kafes yapılar (lattice) olarak da adlandırılır ve birbirine bağlanmış çubuk veya plaka elemanlarından oluşan düzenli birim hücrelerden meydana gelir (Nazir vd., 2019). Bu düzenli geometrik yapı sayesinde kafes sistemler, mekanik açıdan daha öngörülebilir ve üstün performans sergileyen yapılardır (Görgülüarslan, 2021).

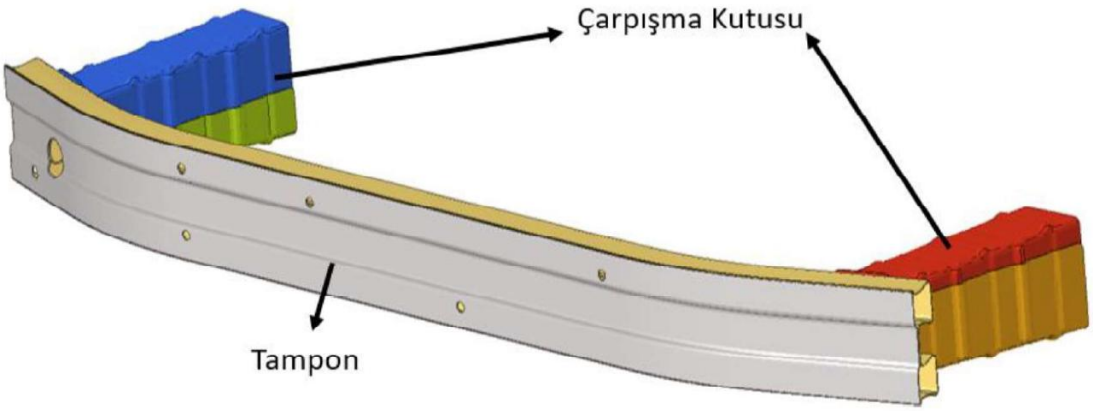


Şekil 2.1. Hücresel malzemelerin geometrik durumlarına göre sınıflandırılması (Wadley, 2002)(Çetin,2020)

2.2. Çarpışma Kutuları ve Hibrit Tüp Yapılar

Çarpışma kutusu, çarpışma anında enerjiyi kontrollü bir şekilde sönümleyerek yapının geri kalanını ve yolcuları korumayı amaçlayan enerji emici yapısal bir elemandır.

Araç güvenlik sistemlerinin en önemli bileşenlerinden biri olan çarpışma kutuları, pasif güvenlik elemanları arasında yer alır. Kaza anında oluşan kinetik enerjiyi sönümleyerek, aracın yapısal bütünlüğünü korumayı ve sürücü ile yolcuların zarar görmesini engellemeyi amaçlar. Genellikle tamponun hemen arkasına yerleştirilen bu yapısal elemanlar, çarpışma etkilerini emerek şasiye iletilen kuvvetleri azaltır ve böylece yolcu güvenliğini artırır. (Onaylı, 2021)



Şekil 2.2. Çarpışma kutusu örneği (Onaylı, 2021)

Çarpışma kutularının performansını değerlendirmek amacıyla, çarpışma sürecinde oluşan kuvvetler ve sönümlenen enerjiye dayalı çeşitli ölçütler kullanılmaktadır. Bu bağlamda, literatürde en yaygın olarak kullanılan performans kriterleri; en büyük çarpışma kuvveti (EÇK), sönümlenen toplam enerji (STE) ve özgül enerji sönümleme kapasitesi (ÖEK) olarak öne çıkmaktadır (Albak, 2020).

En büyük çarpışma kuvveti (EÇK), çarpışmanın ilk anlarında ortaya çıkan ve sistem üzerindeki en yüksek kuvvet değerini temsil eden bir parametre olup, kazanın şiddetini ve yolcu güvenliği üzerindeki potansiyel etkilerini belirlemede kritik bir ölçüttür (Qiu vd., 2015; Albak vd., 2022).

Çarpışma kutularının enerji sönümleme performansını değerlendirmek amacıyla, kuvvet-yer değiştirme eğrisinin altındaki alan temel alınarak toplam sönümlenen enerji (STE) hesaplanmaktadır. Bu büyüklük, çarpışma süresince sistemin absorbe ettiği toplam enerjiyi ifade eder ve matematiksel olarak şu şekilde tanımlanır:

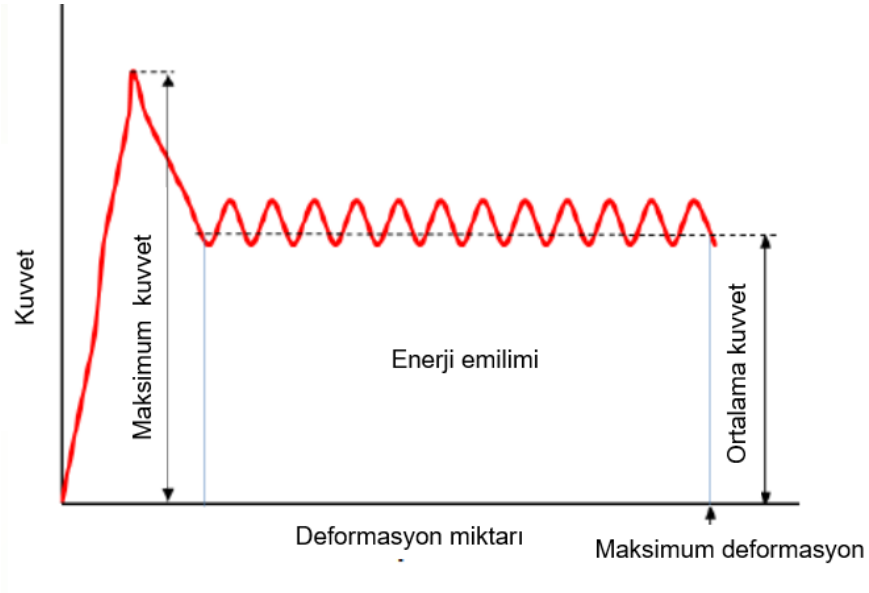
$$\text{STE} = \int_0^d F(x)\,dx \qquad (2.1)$$

Burada F(x), çarpışma kuvvetini; d ise çarpışma boyunca oluşan yer değiştirmeyi temsil etmektedir.

Enerji performansının kütleye oranla değerlendirilmesi amacıyla kullanılan bir diğer ölçüt ise özgül enerji sönümleme kapasitesi (ÖEK)'dir. Bu değer, çarpışma kutusunun birim ağırlık başına sönümlediği enerji miktarını göstermektedir ve şu formülle ifade edilir:

$$\text{ÖEK} = \text{STE} / m \qquad (2.2)$$

Burada m, ilgili çarpışma kutusunun kütlesini belirtmektedir. Bu tür metrikler, çarpışma yapılarının performans karşılaştırmalarında oldukça işlevseldir ve özellikle hafif yapıların darbe dayanımını değerlendirmede yaygın şekilde kullanılmaktadır (Albak vd., 2022).



Şekil 2.3. İdeal bir çarpışma kutusundan beklenen kuvvet-deformasyon grafiği (Chathbai, 2007 ; Çelik,2020).

İdeal bir çarpışma kutusunda, enerji emilimi ve ezilme kuvveti verimi gibi temel performans göstergelerinin yüksek olması beklenmektedir. Çarpışma kutusunun yüksek enerji sönümlemesi sağlamasının yanı sıra, çarpışma bölgesinde oluşan kuvvetlerin birbirine yakın ve düzenli olması önemlidir. Kuvvetlerin bu şekilde dengeli dağılması, araç içerisindeki yolcuların çarpışma anında maruz kaldığı darbelerin etkisini azaltır. Bu nedenle, çarpışma anındaki maksimum kuvvet ile ortalama kuvvet arasındaki farkın mümkün olduğunca düşük olması istenmektedir. (Çelik,2020).

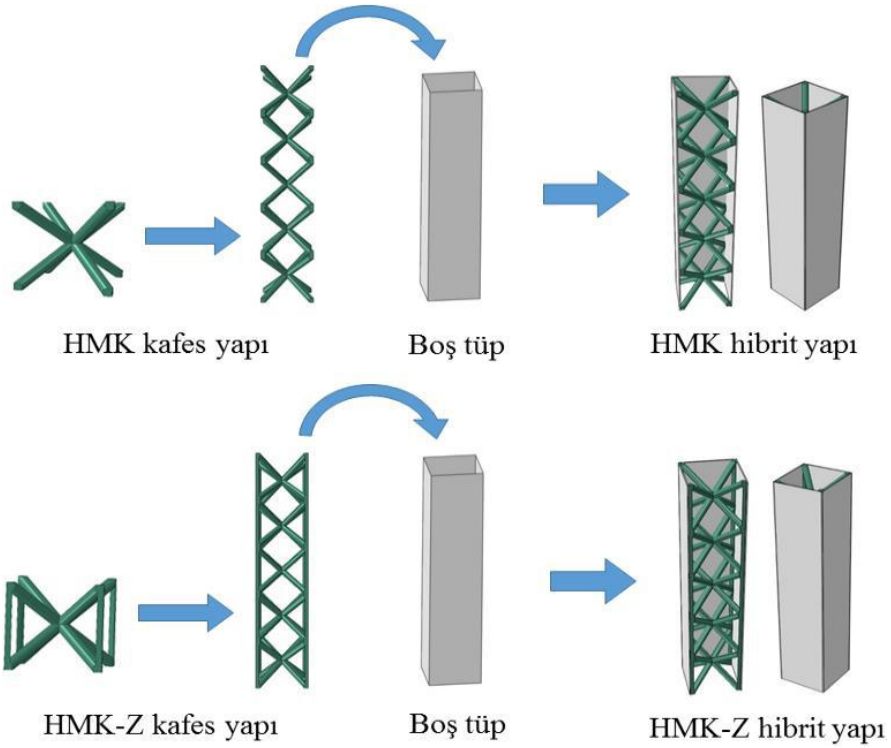
$$\eta_F = F_{ort} / F_{max} \qquad (2.3)$$

Ezilme kuvveti verimi (η_F), çarpışma bölgesinde oluşan ortalama kuvvetin (Fort) maksimum kuvvete (Fmax) oranı olarak tanımlanır.

Çarpışma kutularındaki çarpışma performansının yüksek olabilmesi için ezilme kuvveti veriminin de yüksek olması beklenmektedir. (Altın vd., 2017).

Çarpışma kutularının enerji sönümleme performansını artırmak için en yaygın ve temel yaklaşım, yapının geometrisinde değişiklik yapmaktır. Bu yöntem, kullanılan malzemenin enerji sönümleme potansiyelini daha etkin bir şekilde ortaya çıkarma amacını taşır. Ancak geometrik optimizasyonun yeterli olmadığı durumlarda, sistemin darbe dayanımını iyileştirmek amacıyla dolgu malzemeleri ve daha uygun özelliklere sahip alternatif yapısal malzemeler devreye girmektedir (Ateş vd., 2022).

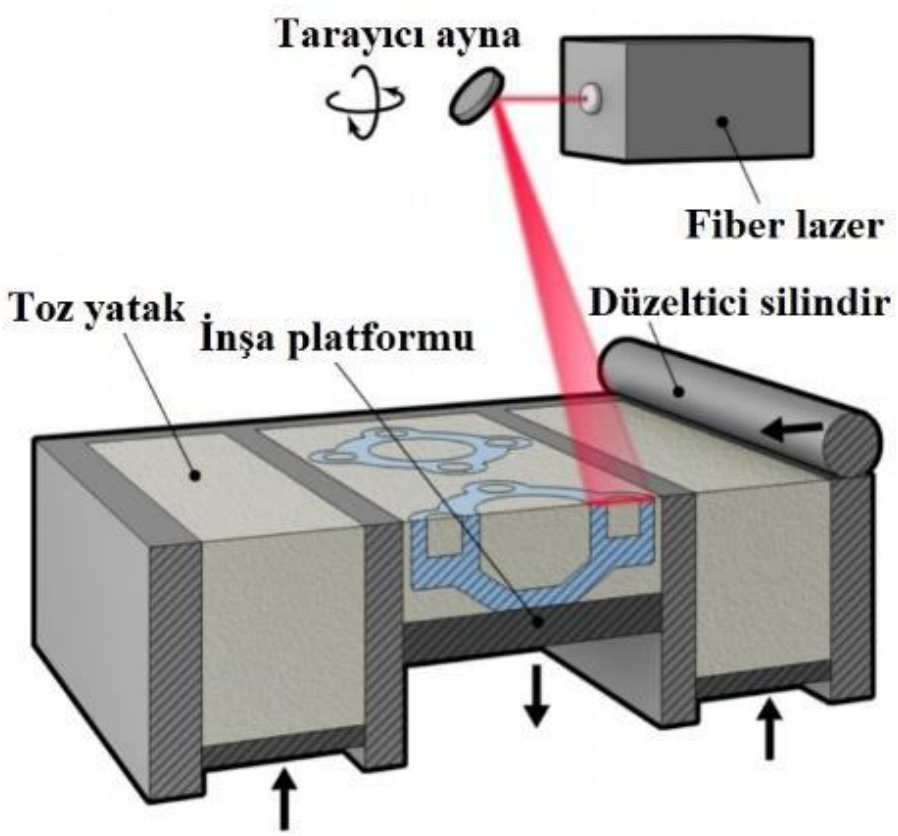
Dolgu yapıların yanı sıra, lattice (kafes) yapılar da çarpışma kutularında enerji sönümleyici birer alternatif olarak değerlendirilmektedir. Yüksek özgül enerji emilimi ve optimize edilebilir mekanik özellikleri sayesinde, lattice yapılar darbe altında etkili performans sunmakta ve bu yönüyle geleneksel yapısal tasarımlara kıyasla önemli avantajlar sağlamaktadır. Katmanlı üretim teknolojileri, bu tür karmaşık geometrilerin üretimini mümkün kılarak, çarpışma anındaki enerji sönüm oranlarının kontrol edilebilir ve iyileştirilebilir hale gelmesine olanak tanımaktadır.



Şekil 2.4. HMK ve HMK-Z kafes yapıların tüp içerisine yerleştirilmesiyle elde edilen hibrit yapıların şematik görünüşleri (Çetin,2020)

2.3. Eklemeli İmalat ve SLM Yöntemi

Eklemeli imalat, metal, plastik, kompozit ve organik malzemeler gibi çeşitli malzeme türlerinin, üç boyutlu dijital modeller temel alınarak ardışık katmanlar hâlinde üst üste biriktirilmesi esasına dayanan modern ve pratik bir üretim yöntemidir. (Sürmen,2019)
Bir çok eklemeli imalat yöntemi bulunmaktadır. Bunlar çizelge 2.1'de gösterilmiştir.Bu çalışmada selective laser melting(SLM) yöntemi ile üretim gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.5. SLMyöntemi (Özer,2020; Manufacturing Guide, n.d.)

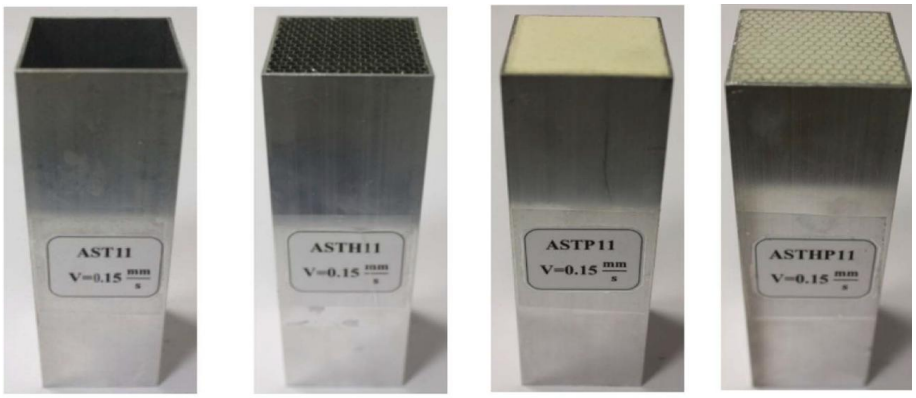
Çizelge 2.1. Eklemeli imalat teknolojilerinin karşılaştırılması (Sürmen,2019)

	TİP	KATEGORİ	YÖNTEM	TEKNOLOJİ	MALZEME	GÜÇ KAYNAĞI	ÖZELLİKLER
EKLEMELİ İMALAT	SIVI	Eriyik	Malzeme Ekstrüzyonu	FDM	Termoplastik	Termal Enerji	Düşük maliyeti; Düşük çözünürlük; Düşük baskı hızı Çoklu malzeme ile baskı; Yüksek dayanım;
		Polimerize edilebilir	Fotopolimerizasyon	SL (SLA)	Fotopolimer, Seramik	UV Işını	Yüksek baskı hızı; Yüksek çözünürlük; Yüksek detay; Yüksek malzeme maliyeti
				DLP		Projeksiyon	Yüksek baskı hızı;
			Malzeme Püskürtme	PJ	Fotopolimer, Wax	UV Işını	Çoklu malzeme ile baskı; Yüksek doğruluk ve detay
	KATI	Yapışık objeler	Sac Laminasyon	LOM	Kağıt, Plastik film, Metalik sac, Seramik bant	Lazer Işını	Düşük malzeme maliyeti Büyük malzeme basabilme; Dikey yönde zayıf dayanım
	TOZ	Eritme	Toz Yataklı Eritme	SLS	Poliamid, Polimer	Yüksek-Güçlü Lazer Işını	Yüksek doğruluk ve detay Tam dolu parça üretimi; Yüksek dayanım; Destek yapılan gerekmez
				DMSL	Metal tozu, Seramik tozu		
				SLM			
				EBM		Elektron Işını	
			Direk Enerji Depolama	LENS	Erimiş metal tozu	Lazer Işını	Hasarlı parçaları tamir edebilme; Son işlem gerekir
				EBAM			
		Yapıştırma	Yapıştırıcı Püskürtme	BJ	Seramik tozu, Metal tozu, Kum	Termal Enerji	Renkli obje baskısı; Destek yapılması gerekmez; Yüksek baskı hızı; Düşük dayanım; Yüksek gözeneklilik

SLM (Selective Laser Melting), metal tozlarının yüksek güçlü bir lazer ışınıyla katman katman eritilip birleştirilmesi prensibine dayanan, toz yataklı bir eklemeli imalat yöntemidir. Toz yatağına yayılan ince bir metal tabaka lazer ışınıyla eritilir, ardından yapı platformu aşağıya indirilerek yeni bir toz katmanı serilir ve işlem tekrarlanır. Böylece, üç boyutlu bir yapı katmanlar hâlinde oluşturulur. Yöntem sırasında kullanılan lazer parametreleri (güç, tarama hızı, hat aralığı, tabaka kalınlığı) üretim kalitesini doğrudan etkiler. Bu parametrelerin uygun kombinasyonu ile tam yoğunlukta ve işlevsel parçalar üretilebilir. (Yap vd., 2015; Chua,2014)

2.4. Lattice Yapılar ve Hibrit Tüpler için Literatür Araştırması

Hussein ve arkadaşları (2017), poliüretan köpük ve alüminyum bal peteği ile doldurulmuş kare kesitli alüminyum tüplerin darbe altındaki çökme davranışını ve enerji soğurma performansını deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada, dört farklı yapı tipi (boş tüp, sadece petek dolgu, sadece poliüretan köpük dolgu ve hem köpük hem de petek dolgu) 0.15 mm/s, 1.5 mm/s ve 15 mm/s hızlarında basma testine tabi tutulmuştur. Yapılan çalışmada eksenel yükleme altında yapıların deformasyon modları, maksimum çarpışma kuvveti ve özgül enerji absorpsiyonu (SEA) gibi parametreler değerlendirilmiştir. Ayrıca, dolgu malzemesi türü ve yoğunluğunun yapı performansı üzerindeki etkileri sistematik olarak karşılaştırılmıştır. Bu çalışma, köpük dolgu katkılı yapıların enerji sönümleme açısından etkinliğini ortaya koyarak hibrit sistem tasarımlarına yol göstermektedir.



(a) (b) (c) (d)

Şekil 2.6. (a) içi boş bir alüminyum tüp ; (b) petek dolgulu bir tüp ; (c) köpük dolgulu bir tüp ; (d) köpük ve petek dolgulu bir tüp . (Hussein vd., 2017).

Çarpışmaya en elverişli kombinasyonun hibrit olarak köpük ve petek yapılı tüplerin birlikte kullanıldığı yapılar olduğu tespit edilmiştir. Hibrit yapının kullanılmasıyla, maksimum kuvvet, sönümlenen toplam enerji ve özgül enerji sönümleme kapasitesi sırasıyla %349, %334 ve %109'a kadar çıkmıştır. Sonuçlar, yüksek darbe dayanımı istenen uygulamalar için kombine dolgu malzemelerinin etkili olduğunu ortaya koymaktadır.

Ashby (2006), köpük ve lattice yapıların mekanik özelliklerini teorik ve deneysel temellere dayanarak kapsamlı biçimde incelemiştir. Makalede, hücresel yapıların rijitlik, dayanım ve enerji sönümleme davranışları; malzeme tipi, hücre yapısı ve yükleme yönüne göre değerlendirilmiştir. Çalışma, özellikle düşük yoğunluklu yapılarda, özgül enerji absorpsiyonunun klasik katı yapılara göre daha avantajlı olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, plastik deformasyon, elastik çökme ve kırılma mekanizmaları gibi davranış modları açıklanmış ve bu yapıların darbe yüklemeleri altındaki potansiyeli vurgulanmıştır. Bu temel çalışma, lattice yapıların performansını anlamak ve karşılaştırmak için önemli bir referans niteliğindedir.

Al-Saedi ve arkadaşları (2018), seçici lazer ergitme (SLM) yöntemiyle Al-12Si alaşımından üretilen F2BCC tipi işlevsel derecelendirilmiş (functionally graded) ve üniform kafes yapıların mekanik özelliklerini ve enerji sönümleme kapasitelerini deneysel ve sayısal yöntemlerle incelemişlerdir. Çalışmada, lattice çapları farklılaştırılarak altı tabakalı, sürekli yoğunluk değişimi sağlayan lattice yapılar CAD ortamında tasarlanmış ve SLM ile üretilmiştir. Yapıların deformasyon davranışı, elastik modül, plato gerilmesi, yoğunlaşma başlangıç gerinimi gibi parametreler basma testleri ve sonlu eleman analizleri ile değerlendirilmiştir. Yapı içindeki yoğunluk değişiminin, deformasyon davranışını kademeli hale getirerek kontrollü enerji yayılımı sağladığı görülmüştür

Gümrük ve Mines (2013), seçici lazer ergitme (SLM) yöntemiyle 316L paslanmaz çelikten üretilmiş mikro kafes yapıların eksenel basma altındaki mekanik davranışını deneysel, teorik ve sayısal olarak incelemişlerdir. Beş farklı hücre boyutuna sahip

yapıların deneysel basma testleri sonucunda, hücre boyutu küçüldükçe başlangıç anındaki rijitliğin belirgin şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, geliştirilen test düzeneği ile mikro ölçekli taşıyıcı çubukların gerilme-gerinim eğrileri elde edilmiş ve mikroyapılarda elastik modülün hacim malzemeye göre %30 daha düşük olduğu belirlenmiştir. Kafes yapının başlangıç rijitliği ve çökme dayanımı, strut bağlantı bölgeleri ve kesit şekline bağlı olarak anlamlı ölçüde değişiklik gösterdiği görülmüştür.
Çetin ve Baykasoğlu (2019), ince cidarlı kare kesitli alüminyum tüplerin içerisine yerleştirilen BCC ve BCC-Z tipinde periyodik kafes yapıların çarpışma davranışı üzerindeki etkilerini sayısal olarak incelemiştir. Oluşturulan bu hibrit yapılar çubuk çapı, hücre sayısı ve tüp et kalınlığı gibi farklı parametreler açısından değerlendirilmiştir. Ayrıca özgül enerji emilim kapasitesi gibi çarpışma dayanımı kriterleri ile de analiz edilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan doğrulanmış simülasyonlar sonucunda, uygun lattice ve tüp konfigürasyonlarının enerji absorpsiyonunu belirgin şekilde artırdığı gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde hibrit yapıların enerji absorpsiyon kapasitelerinin, yapıyı oluşturan bileşenlerin toplamından daha yüksek olduğu saptanmıştır. Elde edilen bulgular, lattice dolgu malzemesi ile desteklenen ince cidarlı tüplerin çarpışma uygulamalarında etkin adaylar olduğunu ortaya koymaktadır.

Zhao ve arkadaşları (2020), Ti-6Al-4V alaşımıyla üretilen işlevsel derecelendirilmiş (FGS) sac tipi kafes yapıların mekanik ve enerji sönümleme davranışlarını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. TPMS tabanlı “primitive” ve “gyroid” yüzeylerine sahip FGS(functionally graded sheet) yapılar, eş hacim oranına sahip üniform yapılarla (US) karşılaştırılmıştır. Basma testleri ve Johnson–Cook modelleriyle yapılan sonlu eleman analizleri sonucunda, FGS yapıların katmanlı çökme davranışı sergileyerek ani dayanım kaybını önlediği ve uniform yapılara kıyasla yaklaşık %60 daha fazla enerji absorbe ettiği görülmüştür. Gyroid geometrisinin, daha düzgün malzeme dağılımı sayesinde her iki yapı tipinde de üstün performans sunduğu belirlenmiştir. Ayrıca, FGS yapıların enerji absorpsiyonunun gerinimle birlikte doğrusal değil, artan bir fonksiyon olarak yükseldiği ifade edilmiştir. Çalışma, FGS yapıların koruyucu ve enerji sönümleyici uygulamalarda geleneksel yapılara göre önemli avantajlar sağladığını göstermektedir.

Sun ve arkadaşları (2016), ince cidarlı üçgen kesitli tüp yapılarında, hiyerarşik kafes

tasarımlarının eksenel düzlemde basma davranışına ve enerji sönümleme performansına etkilerini deneysel ve teorik olarak incelemiştir. Çalışmada, tek hücreli (ST), çok hücreli (MLT) ve hiyerarşik kafes yapılı (HLT) üç farklı yapı tipi tasarlanmış ve üretilerek basma testlerine tabi tutulmuştur. HLT yapılar, ST ve MLT yapılarına kıyasla 3 ila 5 kat daha yüksek ortalama ezilme kuvveti (MCF) ve özgül enerji absorpsiyonu (SEA) göstermiştir. Elde edilen bulgulara göre, hücre sayısı ve mikro-geometriye bağlı olarak HLT yapılarının deformasyon modlarının optimize edilebileceğini ve enerji absorpsiyon kapasitesinin artırılabileceğini ortaya koymuştur.

Leary ve arkadaşları (2016), seçici lazer ergitme (SLM) yöntemiyle AlSi12Mg alaşımın ile üretilen farklı kafes yapı topolojilerinin üretilebilirlik limitlerini ve mekanik performanslarını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmada, strut çapı ve eğim açısı baz alınarak üretim değerlendirilmiş, çeşitli eğimlerde yatay çubukların üretilemediği görülmüştür. Üretilmiş yapıların mikro CT analizleriyle geometrik sapmaları ve yüzey pürüzlülükleri incelenmiştir. Çalışmada AlSi12Mg alaşımıyla SLM yöntemi kullanılarak üretilen kafes yapıların hem üretim sınırlamaları hem de mekanik karakteristikleri açısından mühendislik uygulamalarına yönelik değerli bulgular ortaya koymaktadır.

Maskery ve arkadaşları (2015), seçici lazer ergitme (SLM) yöntemiyle Ti-6Al-4V alaşımından üretilen BCC(Body-Centered-Cubic) tipi lattice yapılar üzerinde hücre boyutunun mekanik özellikler üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Sabit rölatif yoğunlukta farklı birim hücre boyutlarıyla üretilen numunelere daha sonrasında çekme testleri uygulanmıştır. Elde edilen bulgulara göre, hücre boyutu arttıkça hem elastik modülün hem de çekme dayanımının anlamlı biçimde azaldığını gösterilmiştir. Buradaki çekme dayanımının düşme sebei daha önceki çalışmalarda öne sürüldüğü gibi strut porozitesine değil, doğrudan geometrik ölçek etkisine bağlanmıştır

Maskery ve arkadaşları (2018), gyroid, diamond ve primitive kafes yapıların mekanik davranışlarını, polimer katkılı üretim yöntemiyle üreterek deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Elde edilen yapılar, %30 hacim oranında üretilmiş ve hem basma testlerine hem de sonlu eleman analizlerine tabi tutulmuştur. Çalışma incelendiğinde,

hücre geometrisinin deformasyon mekanizmasını belirleyici bir etken olduğu vurgulanmıştır. Gyroid ve diamond kafeslerin eğilme baskın, primitive yapının ise gerilme baskın şekilde davrandığı gözlemlenmiştir. Primitive yapı, diğerlerine kıyasla yaklaşık iki kat daha yüksek elastik modül göstermiş, ancak düşük deformasyon dayanımı ve ani çökme sergilemiştir. Bu çalışma, TPMS temelli hücre geometrisinin, enerji soğurma ve rijitlik performansı açısından optimize edilebilirliğinin olduğunu ortaya koymaktadır.

Smith ve arkadaşları (2013), seçici lazer ergitme (SLM) yöntemiyle üretilen BCC ve BCC-Z tipi lattice yapıların eksenel basma altındaki mekanik davranışlarını deneysel ve sonlu eleman yöntemi kullanarak incelemişlerdir. Çalışmada özellikle BCC-Z yapılarında dikey taşıyıcı çubukların varlığı, mukavemetini önemli ölçüde artırmıştır ve bu durum hem deneysel hem de sayısal olarak doğrulanmıştır. Farklı hücre oranları ve geometriler için yapılan karşılaştırmalar göstermiştir ki hücre boyut oranı azaldıkça yapının mekanik performansının iyileşmektedir.. Çalışma, SLM yöntemiyle üretilen metalik kafes yapılar için geçerli modelleme stratejileri sunmakta ve tasarımların mekanik açıdan optimize edilmesine katkı sağlamaktadır.

Rashed ve arkadaşları (2016), metalik mikrokafes yapıların üretim metotları, mekanik özellikleri, modelleme stratejileri ve potansiyel uygulamaları üzerine kapsamlı bir derleme sunmuşlardır. Mikrokafeslerin özelliklerini optimize geometrilerle birleştirerek yüksek rijitlik, ve enerji sönümleme kapasitesi sağladığı vurgulanmıştır. Çalışmada, döküm, deformasyonla şekillendirme, , SLM ve EBM gibi farklı üretim tekniklerinin avantajları ve sınırlılıkları karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır. Mikrokafeslerin çoğunlukla eğilme baskın deformasyon sergilediği; çökme modlarının, gözeneklilik tipi, hücre geometrisi ve üretim yöntemine göre değiştiği belirtilmiştir

Ozdemir ve arkadaşları (2016), EBM yöntemiyle Ti6Al4V alaşımından üretilen cubic, diamond ve re-entrant cube lattice yapıların yarı-statik ve dinamik ezilme davranışlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Dinamik yüklemelerde cubic ve diamond kafes yapılar, hem darbe kuvvetini azaltma hem de yük süresini uzatma açısından re-entrant yapılara kıyasla daha başarılı bulunmuştur. Özellikle yüksek hızda, cubic ve diamond yapılar tepe

gerilmeyi %65'e kadar azaltırken, yükleme süresini yaklaşık %350 oranında uzatmıştır. Çalışma, lattice yapıların hem deformasyon mekanizması hem de enerji sönümleme performansı üzerinde belirleyici bir faktör olduğunu göstermiştir.

Zhang ve arkadaşları (2024), biyomimetik hiyerarşik hibrit çok hücreli tüplerin (BHHMT) eksenel yük altındaki çarpışma dayanımını deneysel,teorik yöntemlerle incelemişlerdir. Çalışmada, 3. derece BHHMT yapısının özgül enerji absorpsiyonu (SEA) değeri, tekil kare kesitli tüpe kıyasla %49.10 oranında artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Aynı yapı, başlangıç tepe kuvvetini %18.37 ve taşıma kapasitesi dalgalanmasını %77.21 oranında azaltarak hem darbe güvenliği hem de yük kararlılığı açısından daha yüksek performans sergilemiştir. Sonuçlar, biyomimetik ve hiyerarşik tasarım ilkelerinin birleştirilmesiyle yüksek performanslı darbe emici sistemlerin elde edilebileceğini göstermektedir.

Crupi ve arkadaşları (2017), doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS) yöntemiyle üretilmiş Ti6Al4V (Ti64) esaslı BCC(Body-Centered-Cubic) kafes yapıların eksenel basma altındaki mekanik davranışını incelemiştir. Yapılar, farklı üretim parametreleri ve geometri kombinasyonlarıyla üretilmiştir. Strut çapı, birim hücre boyutu ve strut boy/en oranının etkileri detaylı olarak değerlendirilmiştir. CT ve SEM analizleriyle morfolojik kusurlar ve üretim kaynaklı düzensizlikler gözlemlenmiştir ve bu veriler mekanik özelliklerle ilişkilendirilmiştir. Deneysel veriler, Gibson-Ashby modeliyle uyumlu şekilde yorumlanmış ve belirli strut geometrilerinde %60 ila %80 arası dayanım artışı gözlemlenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, üretim parametrelerinin ve yüzey işlemlerinin yapının enerji soğurma ve taşıma kapasitesi üzerindeki etkisinin kritik olduğu belirtilmiştir.

Josupeit ve arkadaşları (2016), polimer bazlı kafes yapıların lazer sinterleme yöntemiyle üretilebilirliklerini ve mekanik özelliklerini incelemiştir.. Farklı hücre tipleri, çubuk kalınlıkları ve hücre boyutlarıyla üretimler yapılmıştır. Özellikle f2cc hücresinin özgül rijitlik açısından öne çıktığı görülmüştür. Çalışma sonucu incelendiğinde, üretim yöneliminin ve katı hacim oranının mekanik performans üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermektedir.

Gümrük (2012), seçici lazer ergitme (SLM) yöntemiyle üretilmiş olan 316L paslanmaz çelik kafes yapıların mekanik davranışlarını deneysel, teorik ve sayısal yaklaşımlarla incelemiştir. Statik ve dinamik basma testleri uygulayarak mikro tellerin ve kafes blokların şekil değiştirme tepkileri, çökme mekanizmaları ve hız bağımlı davranışları incelenmiştir. Sonuçlara göre, yapısal performans için izafi yoğunluk ve hücre topolojisinin belirleyici rol oynadığını ortaya koyulmuştur. Teorik analizlerde, başlangıç elastisite modülü ve çökme gerilmesine ilişkin ampirik ifadeler türetilmiş; özellikle mikro tellerin kesişim bölgelerinin dikkate alınmasının hesaplama doğruluğunu artırdığı gösterilmiştir. Sonlu elemanlar modelleri kullanılarak yapısal kusurlar, sınır tabaka etkileri ve dalga yayılımı gibi kritik parametrelerin etkileri parametrik çalışmalar ile değerlendirilmiştir. Sayısal simülasyonlar, darbe hızı arttıkça mikro atalet etkilerinin belirginleştiğini ayrıca da deformasyon davranışını doğrudan etkilendiğini göstermiştir. Çalışma, hücresel yapıların yüksek hızlı yüklemeler altındaki mekanik karakteristiklerinin anlaşılmasına önemli katkı sağlamaktadır.

Hou ve arkadaşları (2023), 3B baskı ile üretilmiş kafes çekirdekli alüminyum çarpışma kutularındaki çarpışma dayanımını artırmak amacıyla özgül enerji soğurma kapasitesi (SEA) ve kütle optimizasyonu üzerine çok amaçlı bir tasarım optimizasyonu için çalışma gerçekleştirmiştir. PA6/CF kompozit filamanlarla üretilen dört farklı kafes tipi (hexagonal, kagome, re-entrant ve üçgen) incelenmiştir. Özellikle kagome yapısının en yüksek SEA değerini sunduğu belirlenmiştir. Deneysel basma testleri ile LS-DYNA ve ABAQUS/Explicit yazılımlarında gerçekleştirilen nümerik simülasyonlar karşılaştırılmış ve yüksek uyum sağlanmıştır. NSGA-II algoritması ile optimize edilen çarpışma kutusu, %16 daha hafifken %17 daha yüksek enerji soğurma kabiliyetine ulaşmıştır. Sonuçlar, karbon fiber takviyeli termoplastik kafes yapılarla entegre edilen çarpışma kutularının, geleneksel metalik yapılara kıyasla daha yüksek performans ve üretilebilirlik sunduğunu göstermektedir.

Kucewicz ve arkadaşları (2019), FDM yöntemiyle üretilmiş spiral ve honeycomb kafes yapılarda quasi- statik ve dinamik testler gerçekleştirmişlerdir. Test koşulları 1–10 mm/s

(quasi-statik) ve 1520–2400 mm/s (dinamik) hızlar altında basma yönünde olmuştur. Spiral yapıların yüksek hızlardaki deformasyonlarda daha kararlı ve verimli enerji soğurma performansı sunduğu belirlenmiştir. LS-DYNA ile yapılan sayısal analizler, deneysel verilerle yüksek uyum göstermiştir.

2.5. Çarpışma Kutuları ve Enerji Sönümleme için Literatür Araştırması

Yıldız ve Demirci (2015), taşıt çarpışma güvenliğini artırmaya yönelik olarak farklı geometrilere sahip enerji yutucuların performansını sayısal ve deneysel yöntemlerle incelemiştir. Mevcut bir enerji yutucu modelini referans alarak, daha yüksek özgül enerji emilimi (SEA), daha düşük maksimum çökme kuvveti ve daha düşük kütle değerlerine sahip yeni modeller tasarlanmıştır. Ls-Dyna yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen sonlu eleman analizlerinde SPC 440 çeliği tanımlanmıştır. Gerçekleştirilen çarpışma simülasyonlarında, alternatif bir modelin özgül enerji emiliminin %3 oranında arttığı, maksimum kuvvetin ise %0,94 oranında azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca modelindaha hafif olması sayesinde ağırlık ve maliyet avantajı sağlandığı rapor edilmiştir. Çalışma, geometri temelli tasarım değişikliklerinin çarpışma performansı üzerindeki etkilerini ortaya koymakta ve enerji yutucu sistemlerin verimli tasarımı için yönlendirici nitelik taşımaktadır.

Altın ve Yücesu (2019), farklı geometrik kesite sahip çarpışma kutularının içerisine yerleştirilen alüminyum köpük dolgunun enerji sönümleme performansına etkisini sonlu elemanlar yöntemi kullanarak incelemişlerdir. Daire, kare, beşgen ve altıgen kesitli çarpışma kutuları içi boş ve alüminyum köpük dolgulu olarak modellenerek analiz edilmiştir. Analizlerde 500 kg kütleye sahip bir bloğun 17,7 m/s hızla kutulara çarptırılmasıyla elde edilen deformasyon kuvveti, sönümlenen enerji ve özgül enerji absorpsiyonu gibi parametreler değerlendirilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, alüminyum köpük dolgu sayesinde enerji sönümleme kapasitesinin yaklaşık 4 katına çıktığı gözlemlenmiştir. Beşgen kesitli çarpışma kutusu, ezilme kuvveti verimi bakımından en yüksek performansı göstermiştir. Ancak alüminyum köpük dolgu, toplam kütleyi artırarak özgül enerji absorpsiyonunda bazı kesitlerde düşüşe neden olmuştur. Çalışma, alüminyum köpük dolguların darbe performansını iyileştirmek için etkili bir çözüm

sunduğunu ortaya koymaktadır.

Gao ve arkadaşları (2016), alüminyum köpük dolgulu çift eliptik tüplerin (F-DET) çökme davranışını sayısal yöntemlerle incelemiş ve yapısal parametrelerin çarpışma dayanımı üzerindeki etkilerini değerlendirmişlerdir. LS-DYNA yazılımı ile gerçekleştirilen analizlerde, F-DET tüplerin farklı kesit tiplerindeki (dairesel, eliptik) dolu ve boş tüp konfigürasyonlarına kıyasla daha yüksek özgül enerji soğurma kapasitesi (SEA) ve daha düşük maksimum çarpma kuvveti (PCF) sergilediği belirlenmiştir. Yapının geometrik oranı (f), duvar kalınlığı (t) ve köpük yoğunluğu (ρf) gibi parametreler dikkate alınarak çok amaçlı bir optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, F-DET tüplerin çoklu darbe yönlerine karşı yüksek enerji sönümleme performansı sunduğunu ortaya koymuştur. Bu yönüyle, F-DET yapıların çok yönlü darbe güvenliği uygulamalarında potansiyel enerji sönümleyici sistemler olarak kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Usta ve arkadaşları (2018), tetikleme (triggering) yapısı bulunan ve bulunmayan çarpışma tüplerinin, auxetic (negatif poisson oranına sahip) kafes dolgularla birlikte dinamik darbe altındaki basma davranışını incelemiştir. Alüminyum alaşımdan üretilmiş tüpler ve ABSplus plastikten 3B yazıcı ile elde edilen re-entrant honeycomb tipi auxetic dolgu yapıları, LS-DYNA yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Farklı tetikleme geometrileri (dairesel ve çizgisel) ile oluşturulan tüpler, tetiklemesiz tüplerle karşılaştırılmış; tetikleme içeren tüplerin istenildiği gibi maksimum çarpma kuvvetini (PCF) düşürdüğü ve çarpışma kuvveti verimliliğini de (CFE) arttırdığı belirlenmiştir. Ancak, auxetic dolgu kütleyi arttırmıştır. Bu nedenle özgül enerji sönümleme (SEA) kapasitesinde düşüş olduğu gözleölenmiştir.LT (çizgisel tetikleme) içeren auxetic dolgulu tüplerin, CFE(çarpışma kuvveti verimliliği) açısından en iyi performansı sunduğu ifade edilmiştir. Çalışma, auxetic kafeslerin geleneksel köpük veya petek yapılara alternatif olabileceğini göstermektedir.

Li ve arkadaşları (2015), farklı duvar kalınlığı dağılımlarına ve köpük dolgu durumlarına sahip dört tüp yapısının eksenel ve eğik darbe yükleri altındaki çökme davranışını incelemişlerdir. Kademeli kalınlığa ve köpük dolguya sahip tüplerin, özgül enerji

soğurma kapasitesi (SEA) açısından en yüksek performansı sunduğu görülmüştür. Sayısal analizler LS-DYNA programıyla gerçekleştirilmiş ve deneysel verilerle yüksek tutarlılık sağlanmıştır. Bu yapıların eğik çarpma altında burkulmaya karşı daha dayanıklı olduğu da gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, yapı geometrisinin ve dolgu malzemesinin çarpışma dayanımını önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir.

Albak (2021), çok hücreli çevresel oluklu ince cidarlı kare kesitli tüplerin farklı iç köşe alt bölümlendirme (sub-section) tipleriyle çarpışma dayanımını, çeşitli yükleme açıları altında deneysel doğrulamalı sayısal yöntemleri kullanarak incelemiştir.Sonuçlar incelendiğinde, hücre sayısındaki artışın ve alt bölüm eklemenin toplam enerji soğurma (EA) kapasitesini %52'ye varan oranlarda artırdığını göstermiştir. 0°, 10°, 20° ve 30° gibi farklı çarpma açıları altında yapılan değerlendirmelerde, çok hücreli yapıların eğik çarpmalarda da dengeli katlanma modları koruduğu ve yüksek performans sergilediği gözlemlenmiştir. Albak ve arkadaşları (2022), içi farklı kesit geometrileriyle (kare, altıgen, sekizgen, dairesel) takviye edilmiş silindirik ve çok hücreli çarpışma kutularındaki çarpışma dayanımını sayısal analizler yoluyla incelemiştir. Sabit hızda basma analizleri Radioss yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Enerji soğurma kapasitesi (EA), özgül enerji sönümleme kapasitesi (ÖEK) ve en büyük çarpışma kuvveti (EÇK) gibi performans ölçütleri kullanılarak geometriler kıyaslanmış, en iyi performansın dairesel iç kesite sahip M4 modelinde elde edildiği görülmüştür. M4 modeline yönelik olarak çok amaçlı parçacık sürü optimizasyonu (MMOPSO) yöntemiyle bir metamodel geliştirilmiş ve tasarım parametreleri üzerinden optimizasyon çalışması yürütülmüştür. Optimizasyon sonucunda ÖEK değeri %21'e kadar artırılırken, EÇK değeri düşük tutulmuştur. Çalışma, silindirik çok hücreli çarpışma kutularının geometrik optimizasyonu ile çarpışma güvenliğinin artırılabileceğini göstermektedir.

2.6. Eklemeli İmalatta Üretim Oryantasyonu için Literatür Araştırması

Şen (2020), elektron demeti ile ergitme (EBM) yöntemi ile üretilen Ti6Al4V numunelerin, üretim oryantasyonlarına bağlı olarak değişen mekanik özelliklerini incelemiştir. Çalışmada, farklı üretim oryantasyonlarında (yatay, dikey, 30° ve 60°) numuneler üretilmiştir. Bu numuneler üzerinde çekme, sertlik, çentik darbe ve mikroyapı analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlarda, üretim yönünün özellikle çekme

dayanımı ve çentik darbe enerjisi üzerinde belirleyici etkileri olduğu gözlemlenmiştir. Yatay oryantasyonda üretilen numunelerin, geleneksel yöntemlerle üretilmiş parçalardaki mukavemet değerlerine ulaşabildiği belirtilmiştir. Bu bulgular, eklemeli imalat yöntemiyle parça üretiminde oryantasyonun mekanik performans açısından dikkate alınması gereken bir parametre olduğunu göstermektedir.

Simonelli ve arkadaşları (2014), seçici lazer ergitme (SLM) yöntemiyle üretilmiş Ti6Al4V numunelerde, üretim yönünün mekanik özellikler ve kırılma mekanizmaları üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Üç farklı üretim yönünde (dikey, yatay ve kenar) üretilen numuneler hem "as-built" hem de gerilim giderme işlemine tabi tutulmuş hâlleriyle incelenmiştir. Çekme testleri sonucunda, üretim yönünün süneklik üzerinde belirgin etkiler oluşturduğu ve kenar yönlü örneklerin en yüksek uzama değerine sahip olduğu belirlenmiştir.. Çalışma, üretim yönünün ve post-proses uygulamalarının SLM ile üretilen Ti alaşımlarının mekanik davranışında belirleyici rol oynadığını göstermektedir.

Read ve arkadaşları (2015), seçici lazer ergitme (SLM) yöntemiyle üretilmiş AlSi10Mg alaşımının gözeneklilik ve mekanik özelliklerine etki eden işlem parametrelerini istatistiksel deney tasarımı (DoE) yaklaşımıyla incelemiştir. Lazer gücü, tarama hızı, gibi parametrelerin gözenek oluşumu üzerindeki etkileri analiz edilmiş ve minimum porozite için optimum işlem parametreleri belirlenmiştir. Numuneler yatay ve dikey üretim yönlerinde üretilmiş ve çekme testleri uygulanmıştır. Sonuç olarak yatay oryantasyonlu numunelerin yaklaşık %10 daha yüksek dayanım sunduğu; ancak oryantasyonun genel mekanik performans üzerinde sınırlı etkili olduğu gözlemlenmiştir. SLM yöntemiyle üretilen AlSi10Mg alaşımının, döküm yöntemiyle üretilen benzer kompozisyonlu alaşımlara kıyasla daha yüksek çekme dayanımı, ancak daha düşük süneklik gösterdiği belirlenmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çalışmada, lattice yapılar, eklemeli imalattaki üretim oryantasyonu ve enerji absorban madde kullanımı gibi parametrelerinin mekanik performans üzerindeki etkilerinin incelenmesinde Taguchi deney tasarım yöntemi tercih edilmiştir.

3.1. Taguchi Deney Tasarım Yöntemi

Taguchi deneysel tasarım yaklaşımı, sınırlı sayıda deneyle maksimum bilgi elde edilmesini sağlarken, kontrol edilemeyen değişkenlerin etkisini minimize etmede önemli avantajlar sunmaktadır.

Bu bağlamda, Taguchi'nin önerdiği ortogonal diziler kullanılarak deneyler sistematik biçimde planlanmış, en uygun parametre kombinasyonlarının belirlenmesi hedeflenmiştir.

Yöntemin temel adımları; (Chen vd., 1996; Meral vd., 2011).

(1) Faktör ve etkileşimlerin belirlenmesi,

(2) Her bir faktör için seviyelerin seçilmesi,

(3) Uygun ortogonal deney matrisi (örneğin L9)'nin belirlenmesi,

(4) Faktör ve etkileşimlerin bu matrisin sütunlarına yerleştirilmesi,

(5) Deneylerin yürütülmesi,

(6) Sinyal/Gürültü (S/N) oranı analizi ile optimum seviyelerin belirlenmesi ve

(7) Sonuçların geçerliliğini kontrol etmek amacıyla doğrulama deneylerinin gerçekleştirilmesidir.

3.2. Deney Tasarımı

Yapılan literatür çalışmaları neticesinde çarpışma kutusunda enerji emilimini etkileyecek ve deney tasarımına dahil edilecek faktörlere karar verilmiştir. Bunlar;

(1) Enerji sönümleyici madde kullanılması

(2) Üretim oryantasyonu

(3) Lattice yapı kullanılarak hibrit tüplerin oluşturulması

Faktörlerin belirlenmesi itibariyle her faktör için seviyeler belirlenmiştir.

Her faktör için 3 seviye bulunmaktadır. Enerji sönümleyici (absorban) madde için

seviyeler; absorban madde kullanılmama durumu, tüp içerisinin poliüretan köpük ile doldurulması ve son seviye de tüpün dışarısına pla malzeme kullanılarak bir kaplama yapılmasıdır.

Üretim oryantasyonu için seviyeler numunelerin yatay, dikey ve 45 derecede üretilmesidir.

Lattice yapı için seviyeler ise kullanılmama durumu veya (BCC-Lattice Tip 1) ve (SC – BCC- Lattice Tip 2)'nin kullanılmasıdır.

Çizelge 3.1. Deney tasarımı için belirlenen faktörler ve seviyeleri

	FAKTÖRLER		
	Enerji Sönümleyici Madde	**Üretim Oryantasyonu**	**Lattice Tip**
Seviye 1	Yok	Dik	Yok
Seviye 2	İçi Köpük Dolu	45 Derece	Lattice Tip 1 (BCC)
Seviye 3	Dışı PLA Kaplı	Yatay	Lattice Tip 2(SC – BCC)

Deney tasarımı için uygun ortogonal deney matrisi L9 olmuştur. (3 Faktör ve 3 seviye bulunduğu için)

Çizelge 3.2. Taguchi L9 ortogonal deney matrisi

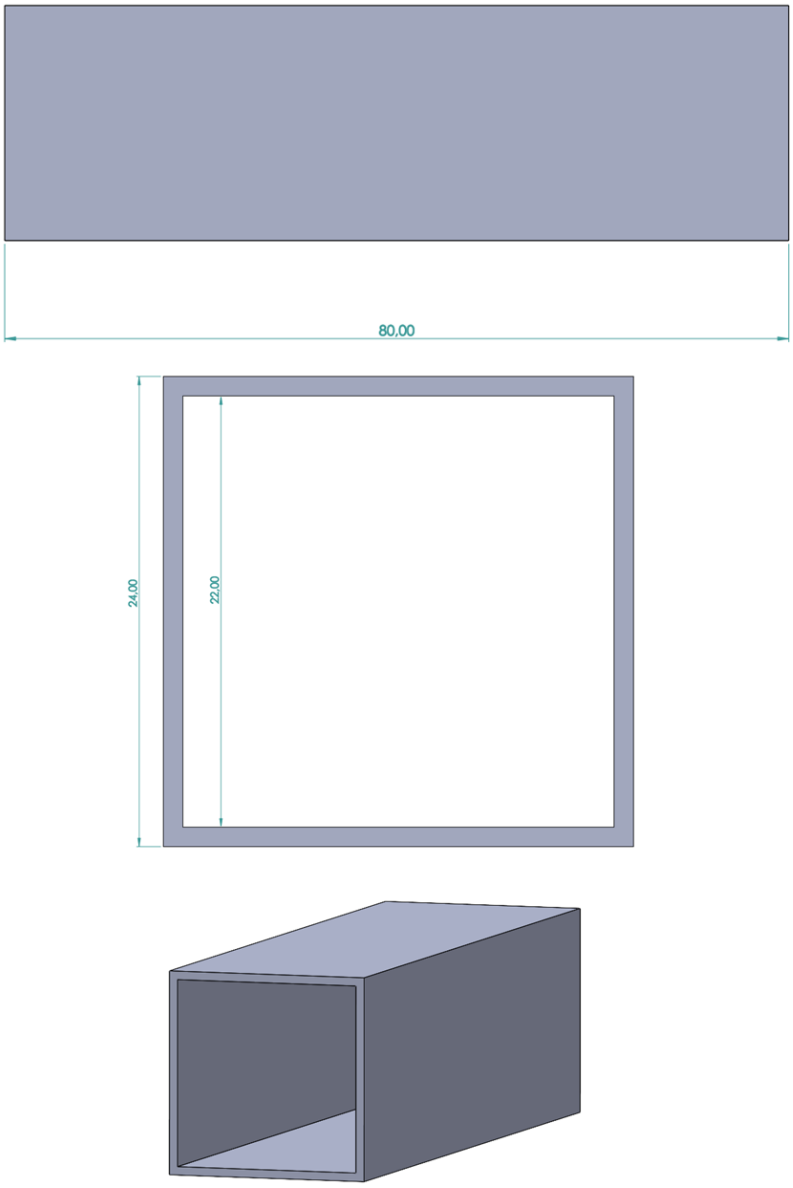
L9	Faktör 1	Faktör 2	Faktör 3	Faktör 4
Deney 1	1	1	1	1
Deney 2	1	2	2	2
Deney 3	1	3	3	3
Deney 4	2	1	2	3
Deney 5	2	2	3	1
Deney 6	2	3	1	2
Deney 7	3	1	3	2
Deney 8	3	2	1	3
Deney 9	3	3	2	1

Çizelge 3.3 Deney tasarım tablosu

		Enerji Sönümleyici	**Üretim Oryantasyonu**	**Lattice Tip**
DENEY 1	***Numune 1***	Yok	Dik	Yok
	Numune 2	Yok	Dik	Yok
DENEY 2	***Numune 1***	Yok	45	Lattice Tip 1
	Numune 2	Yok	45	Lattice Tip 1
DENEY 3	***Numune 1***	Yok	Yatay	Lattice Tip 2
	Numune 2	Yok	Yatay	Lattice Tip 2
DENEY 4	***Numune 1***	İçi Köpük Dolu	Dik	Lattice Tip 1
	Numune 2	İçi Köpük Dolu	Dik	Lattice Tip 1
DENEY 5	***Numune 1***	İçi Köpük Dolu	45	Lattice Tip 2
	Numune 2	İçi Köpük Dolu	45	Lattice Tip 2
DENEY 6	***Numune 1***	İçi Köpük Dolu	Yatay	Yok
	Numune 2	İçi Köpük Dolu	Yatay	Yok
DENEY 7	***Numune 1***	Dışı PLA Kaplı	Dik	Lattice Tip 2
	Numune 2	Dışı PLA Kaplı	Dik	Lattice Tip 2
DENEY 8	***Numune 1***	Dışı PLA Kaplı	45	Yok
	Numune 2	Dışı PLA Kaplı	45	Yok
DENEY 9	***Numune 1***	Dışı PLA Kaplı	Yatay	Lattice Tip 1
	Numune 2	Dışı PLA Kaplı	Yatay	Lattice Tip 1

Testin doğruluğunun arttırılması için her deney 2 kez tekrarlanmıştır. Bu sebeple numune sayısı 18 olmuştur

3.3. Numunelerin Tasarımı ve Üretimi



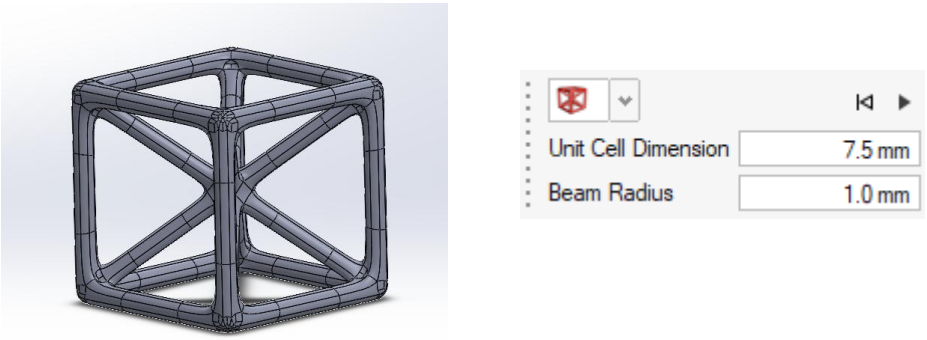
Şekil 3.1. Çarpışma kutusu boyutları (mm)

Öncelikle çarpışma kutusu numune boyutlarına karar verilmiştir. Şekil 3.1'de de gösterildiği gibi numune boyutları 24mmx24mmx80mm olmuştur. Parçanın et kalınlığı 1 mm'dir.

Bazı numuneler içi boş olarak değil lattice yapılar dahil edilerek tasarlanmıştır. Lattice yapılarda beam radius 1mm olarak oluşturulmuştur ve unit cell dimension 7.5 mm'dir. (Şekil 3.2 ve Şekil 3.3)

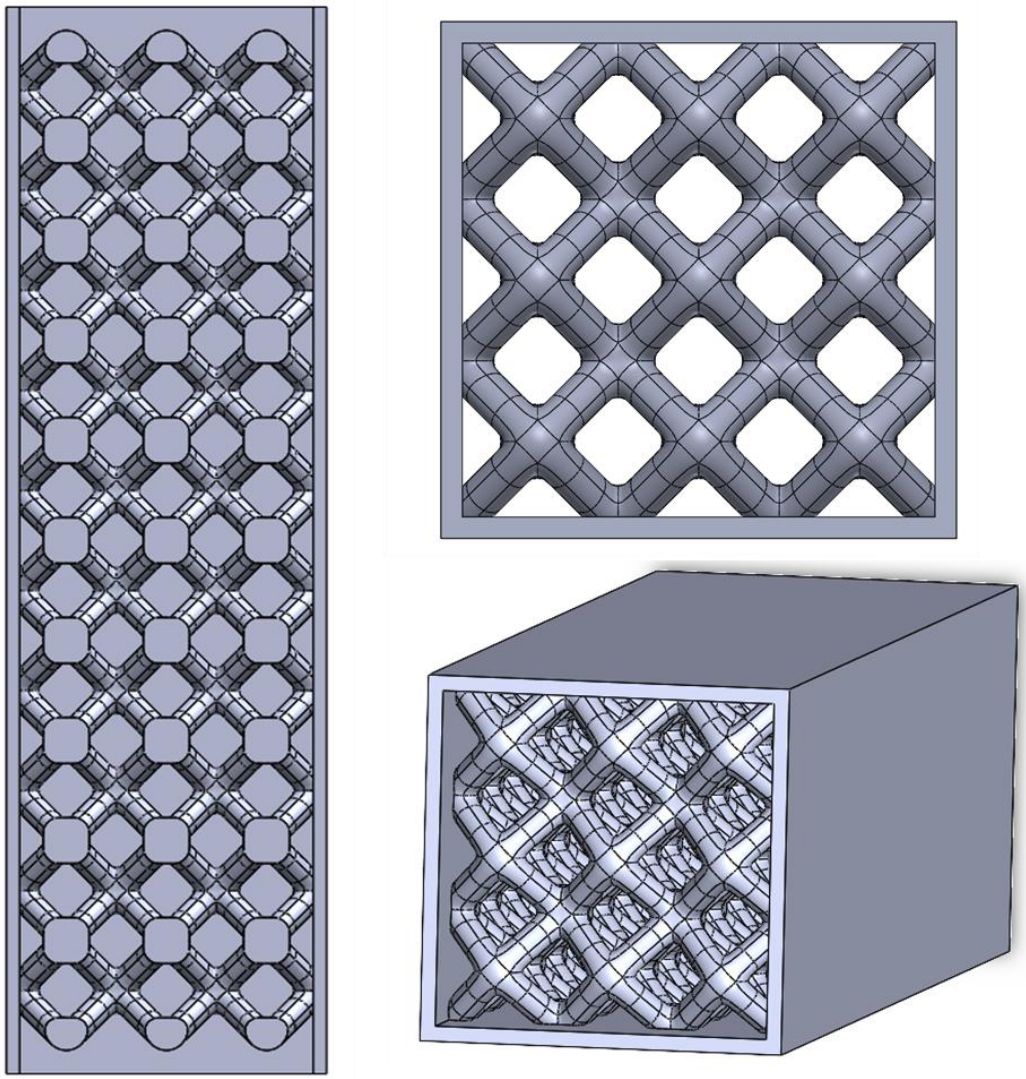
Numunelerin tasarımında Altair Inspire 2022.2.1 kullanılmıştır.

Şekil 3.2. Body centered cubic (BCC) ve boyutları (lattice tip 1)

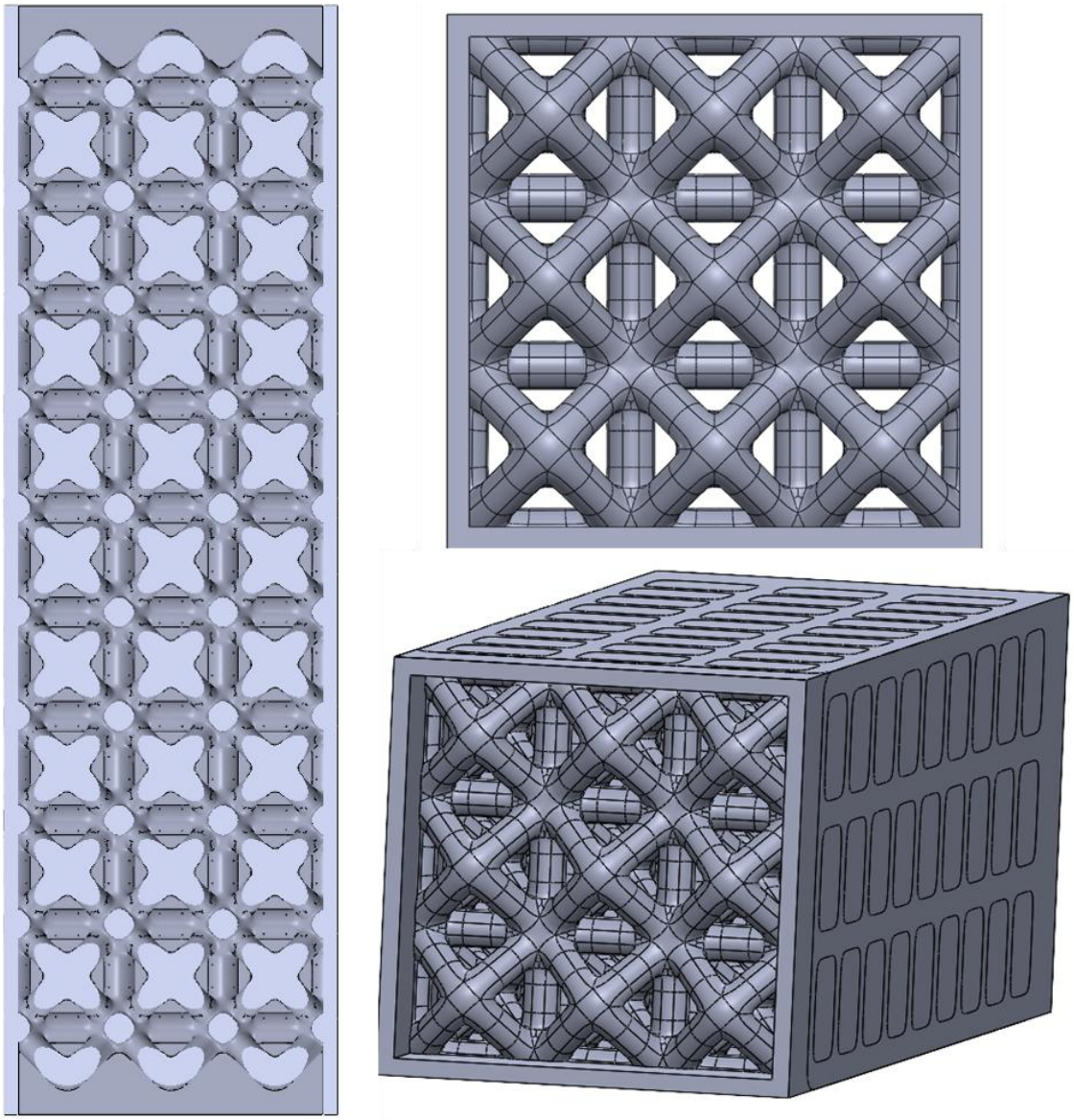


Şekil 3.3. Simple cubic body centered cubic (SC – BCC) ve boyutları (lattice tip 2)

Tez sırasında Body Centered Cubic (BCC) Lattice 1 olarak adlandırılmış olup, Simple Cubic Body Centered Cubic (SC – BCC) ise Lattice 2 olarak adlandırılmıştır.



Şekil 3.4. Body centered cubic (BCC) (lattice tip 1) çarpışma kutusuna uygulanması



Şekil 3.5. Simple cubic body centered cubic (SC – BCC) (lattice tip 2) çarpışma kutusuna uygulanması

Tasarımların tamamlanmasıyla beraber numunelerin üretim aşamasına geçilmiştir. Numunelerin belirlenen üretim oryantasyonlarına göre tablaya yerleştirilmesinde materialise magics 2801 kullanılmıştır.

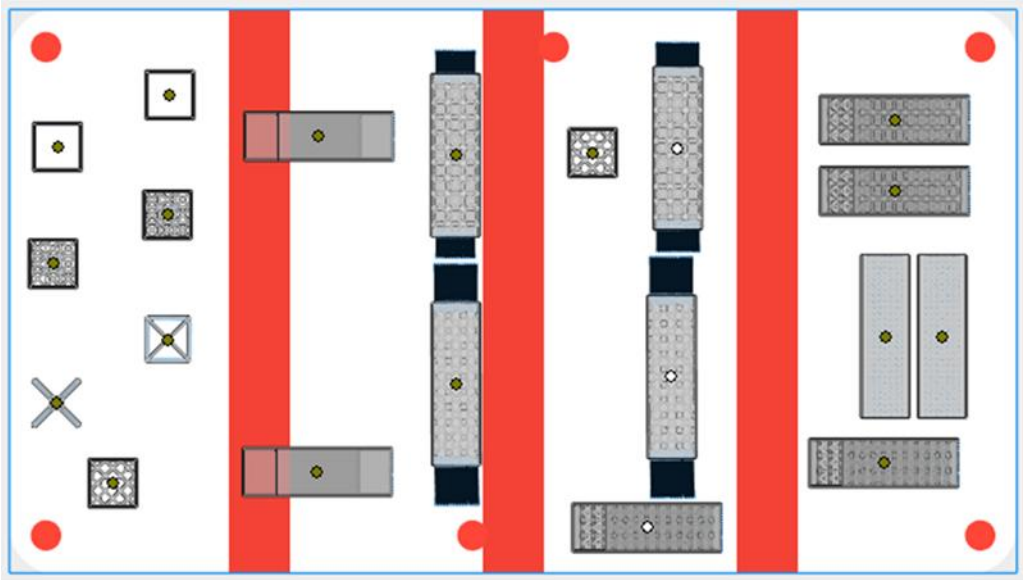
Malzeme AlSi10Mg seçilmiş ve katman kalınlığı 60 µm olarak belirlenmiştir. Numuneler Slm Solutions 500 HL Quad marka ve modele sahip cihazda üretilmiştir. Çizelge 3.4 ve Çizelge 3.5 ’de kullanılan malzeme ve parametreler sonucundaki mekanik özellikler için datasheete yer verilmiştir.

Çizelge 3.4. AlSi10Mg için malzeme özellikleri (datasheet) (Nikon SLM Solutions, 2024).

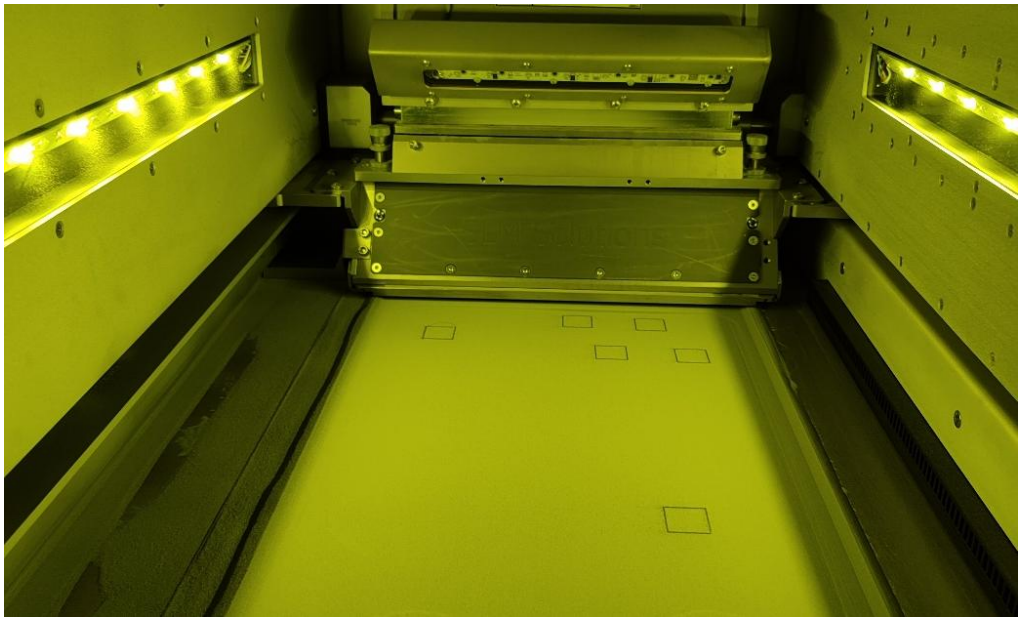
Isıl İşlem Durumu	Baskı Yönü	Çekme Dayanımı Rm (MPa)		Akma Dayanımı Rp0.2 (MPa)		Kopma Uzaması A (%)	
		Ortalama	Min	Ortalama	Min	Ortalama	Min
Isıl işlem görmemiş	Yatay	430	405	275	250	6	3
Isıl işlem görmemiş	Düşey	425	385	255	245	4	1
Isıl işlem uygulanmış (SR1)	Yatay	275	260	145	130	14	11
Isıl işlem uygulanmış (SR1)	Düşey	280	265	150	135	10	5

Çizelge 3.5. AlSi10Mg için sertlik ve yüzey pürüzlülük değerleri (Nikon SLM Solutions, 2024).

Ölçüm Özelliği	Birim	Ortalama Değer (M)	Min / Max Değer
Vickers Sertlik	HV5	120	114 (Min)
Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)	µm	20	23 (Max)
Yüzey Pürüzlülüğü (Rz)	µm	118	139 (Max)

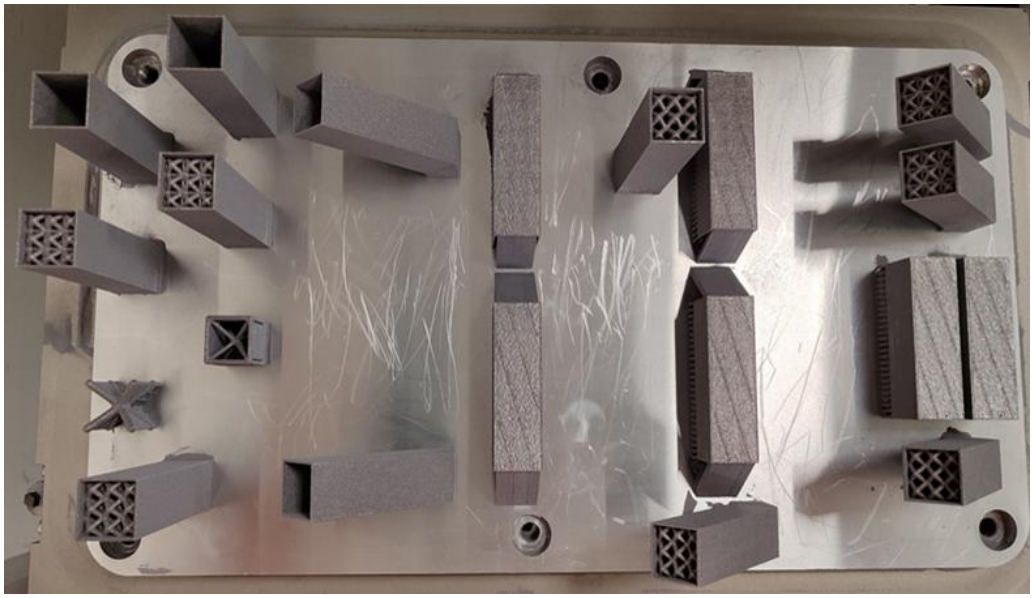


Şekil 3.6. Materialise magics programında numunelerin tablaya yerleştirilmesi

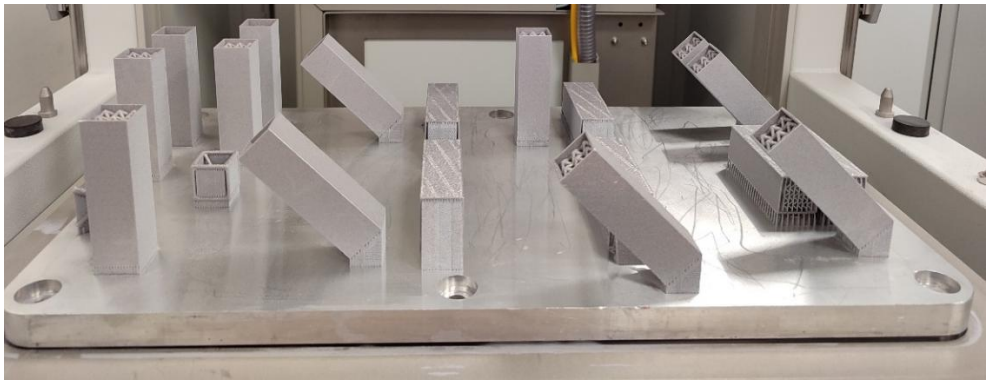


Şekil 3.7. Slm solutıons 500 cihazında numune üretim süreci

Numune üretim süreci tamamlandıktan sonra numuneler cihazdan çıkarılmış ve üzerindeki tozlar temizlenmiştir.

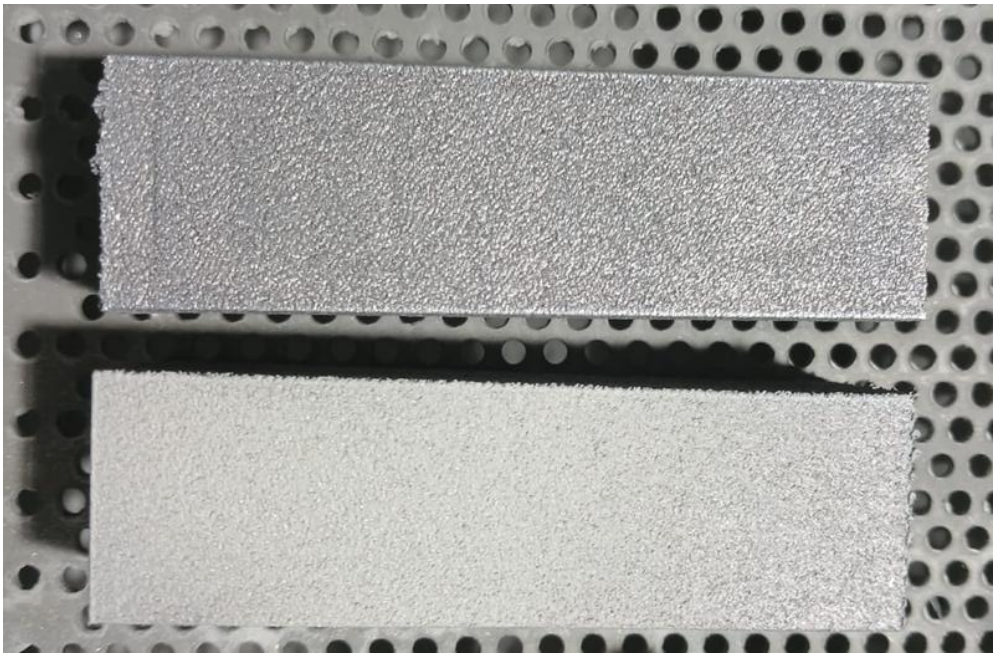


Şekil 3.8. Üretilen numunelerin de-powdering sonrası üstten görünümü



Şekil 3.9. Üretilen numunelerin de-powdering sonrası yandan görünümü

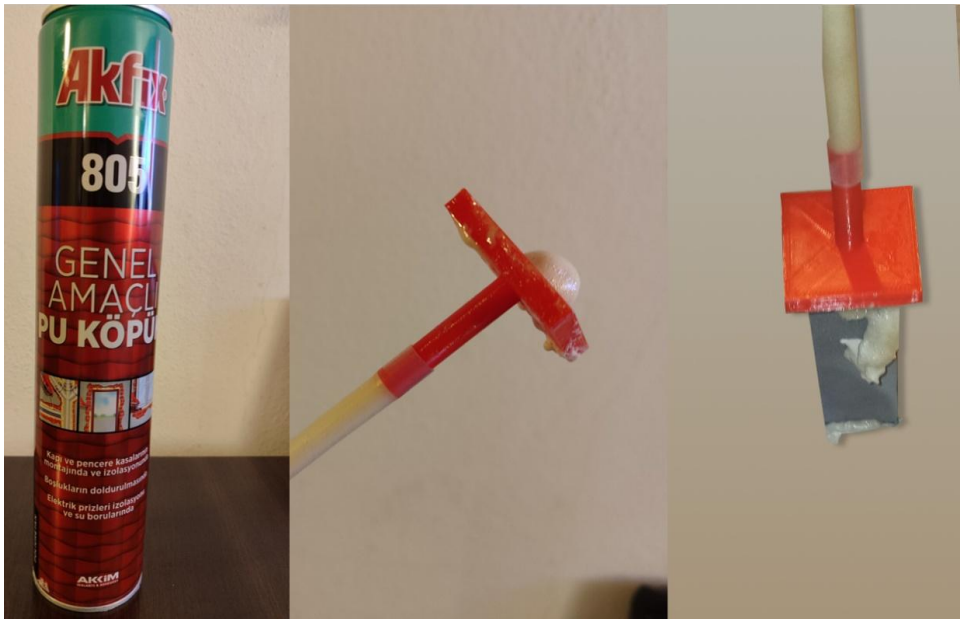
Daha sonra numuneler tabladan özel bir çekiç yardımıyla sökülmüştür. Yüzey temizliğinin sağlanması amacıyla numuneler kumlanmıştır.



Şekil 3.10. Numunelerin kumlama öncesi (üstte) ve sonrası (altta) görüntüsü

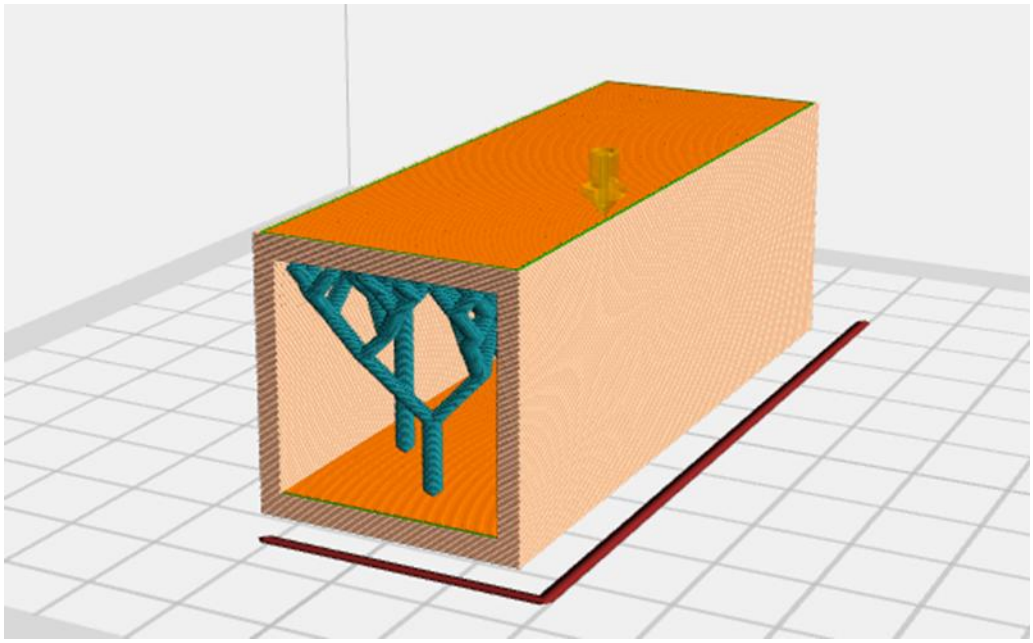
Numunelerin üretimi tamamlandıktan sonra, enerji sönümleme kapasitesini artırmak amacıyla enerji absorban malzeme uygulamasına yönelik ardıl işlemler gerçekleştirilmiştir.

Dolgu yapılacak olan numunelerin içerisine homojen bir yapıda poliüretan köpük doldurulması için Pla malzeme kullanılarak bir aparat tasarımı yapılmıştır. Tasarım için Solidworks 2020 kullanılmıştır. Yapılan tasarım ve kullanılan poliüretan köpüğe Şekil 3.11'de yer verilmiştir.

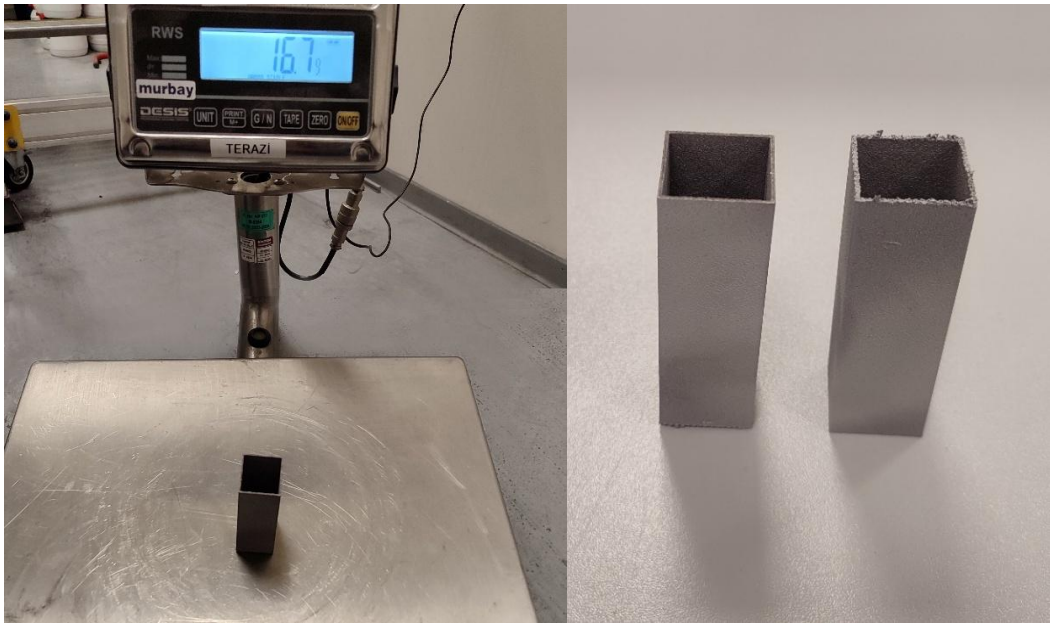


Şekil 3.11. Numunelere poliüretan köpük doldurulması için üretilen aparat ve kullanılan dolgu malzemesi

Dış yüzeyine pla kaplama yapılacak numuneler için, dış boyutları 29×29×80 mm ve et kalınlığı 2,5 mm olan boş tüpler tasarlanmıştır. Numuneler, FDM yöntemiyle katmanların basma yönüne paralel olacak şekilde özellikle yatay olarak üretilmiştir; böylece yapısal mukavemetin artırılması hedeflenmiştir. Üretim sırasında ağaç tipi destek yapıları kullanılmış ve numuneler %100 doluluk oranıyla imal edilmiştir.

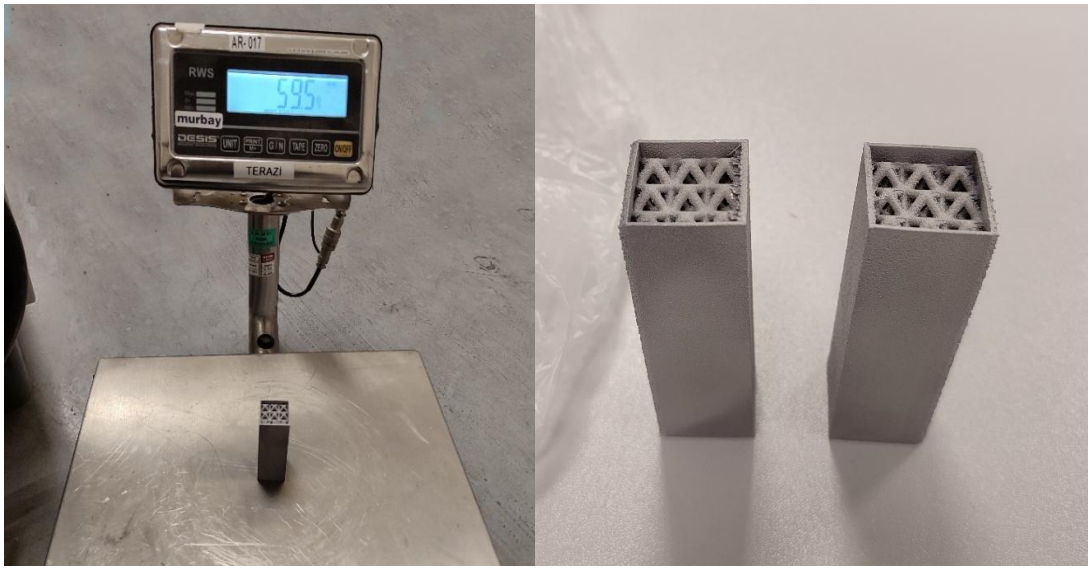


Şekil 3.12. Pla tüpten kaplama malzemesi



Şekil 3.13. Enerji sönümleyici yok, dik üretilmiş ve lattice bulunmayan çarpışma kutusu ağırlığı

Şekil 3.14. Enerji sönümleyici yok, 45 derecede üretilmiş ve lattice tip 1'e sahip çarpışma kutusu ağırlığı

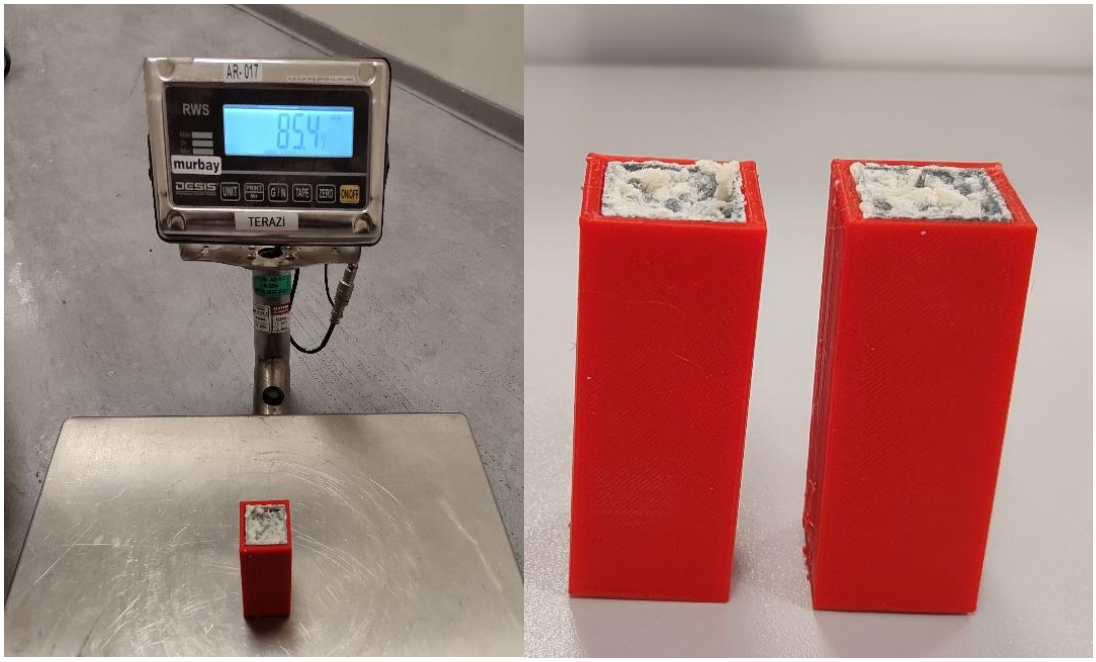


Şekil 3.15. Enerji sönümleyici yok, yatay üretilmiş ve lattice tip 2'ye sahip çarpışma kutusu ağırlığı

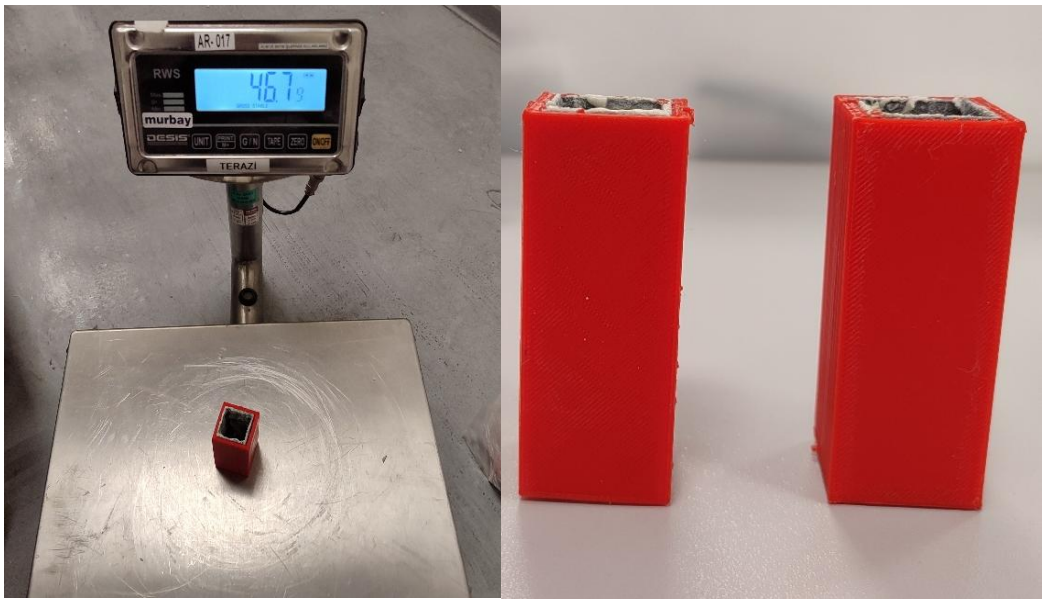
Şekil 3.16. İçi köpük dolu, dik üretilmiş ve lattice tip 1'e sahip çarpışma kutusu ağırlığı

Şekil 3.17. İçi köpük dolu, 45 derecede üretilmiş ve lattice tip 2'ye sahip çarpışma kutusu ağırlığı

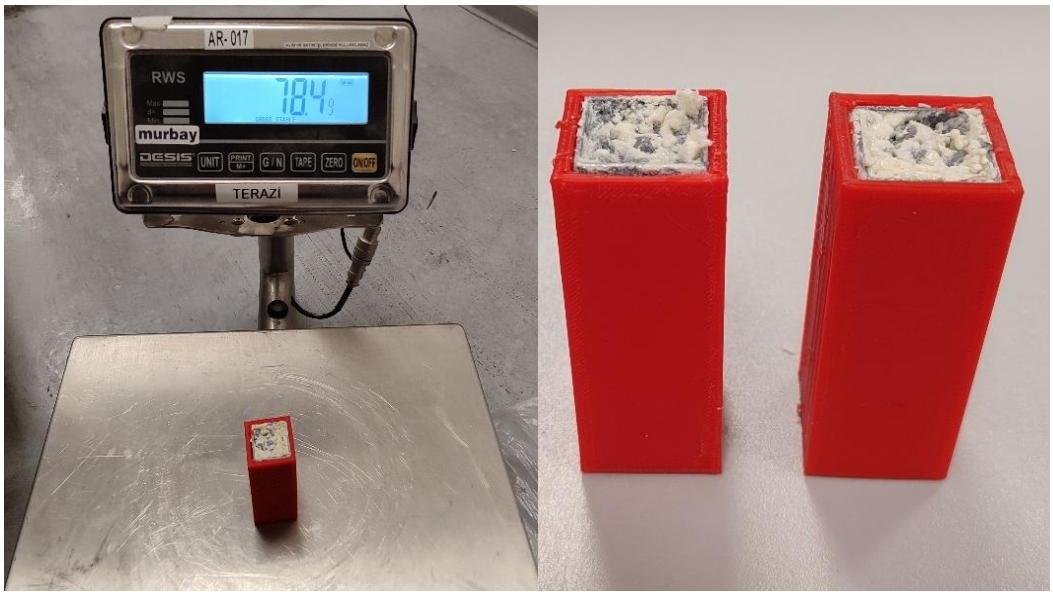
Şekil 3.18. İçi köpük dolu, yatay üretilmiş ve lattice bulunmayan çarpışma kutusu ağırlığı



Şekil 3.19. Dışı pla kaplı, dik üretilmiş ve lattice tip 2'ye sahip çarpışma kutusu ağırlığı



Şekil 3.20. Dışı pla kaplı, 45 derecede üretilmiş ve lattice bulunmayan çarpışma kutusu ağırlığı



Şekil 3.21. Dışı pla kaplı, yatay üretilmiş ve lattice tip 1'e sahip çarpışma kutusu ağırlığı

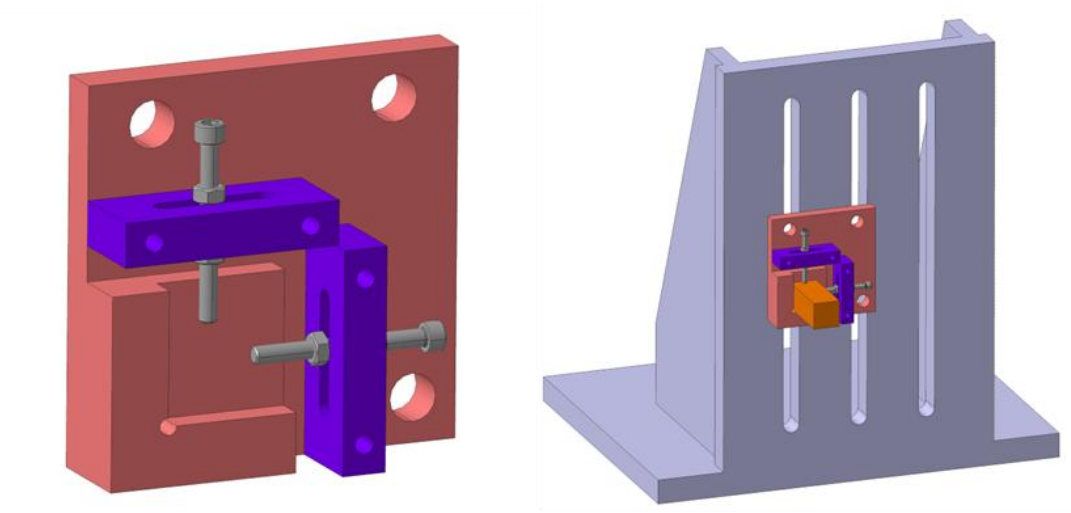
Çizelge 3.6. Numunelerin ağırlıklarının gösterilmesi

		FAKTÖRLER			SONUÇLAR		
Deney Sayısı	Numuneler	Enerji Sönümleyici	Üretim Oryantasyonu	Lattice Tip	Köpük Ağırlık (gram)	Toplam Ağırlık (gram)	Ortalama Ağırlık (gram)
Deney 1	Numune 1	Yok	Dik	Yok	---	16.90	16.80
	Numune 2	Yok	Dik	Yok	---	16.70	
Deney 2	Numune 1	Yok	45 Derece	Lattice Tip 1	---	46.80	46.75
	Numune 2	Yok	45 Derece	Lattice Tip 1	---	46.70	
Deney 3	Numune 1	Yok	Yatay	Lattice Tip 2	---	58.40	58.45
	Numune 2	Yok	Yatay	Lattice Tip 2	---	58.50	
Deney 4	Numune 1	İçi Köpük Dolu	Dik	Lattice Tip 1	9.20	56.30	55.70
	Numune 2	İçi Köpük Dolu	Dik	Lattice Tip 1	8.90	55.10	
Deney 5	Numune 1	İçi Köpük Dolu	45 Derece	Lattice Tip 2	4.70	64.00	64.05
	Numune 2	İçi Köpük Dolu	45 Derece	Lattice Tip 2	5.20	64.10	
Deney 6	Numune 1	İçi Köpük Dolu	Yatay	Yok	14.40	31.10	31.00
	Numune 2	İçi Köpük Dolu	Yatay	Yok	14.10	30.90	
Deney 7	Numune 1	Dışı PLA Kaplı	Dik	Lattice Tip 2	---	86.00	85.70
	Numune 2	Dışı PLA Kaplı	Dik	Lattice Tip 2	---	85.40	
Deney 8	Numune 1	Dışı PLA Kaplı	45 Derece	Yok	---	46.70	46.70
	Numune 2	Dışı PLA Kaplı	45 Derece	Yok	---	46.70	
Deney 9	Numune 1	Dışı PLA Kaplı	Yatay	Lattice Tip 1	---	78.20	78.30
	Numune 2	Dışı PLA Kaplı	Yatay	Lattice Tip 1	---	78.40	

3.4. Numunelerin Test Edilmesi

Bu çalışmada, ramp sinyal kullanılarak yükleme yapılmıştır ve dinamik yük altında yapıların enerji sönümleme davranışı incelenmiştir. Test sırasında sonuçların doğruluğunun artması için test boyunca numunenin sabitlenmesi önemlidir. Bu sebeple özel bir test fikstürü tasarlanmış ve imal edilmiştir.

Test cihazı MTS marka hidrolik servo test cihazıdır. Şekil 3.22'de yer alan görsellerde, fikstürün üç boyutlu CAD modelleri ile MTS hidrolik servo test cihazına entegrasyonu detaylı biçimde sunulmuştur.



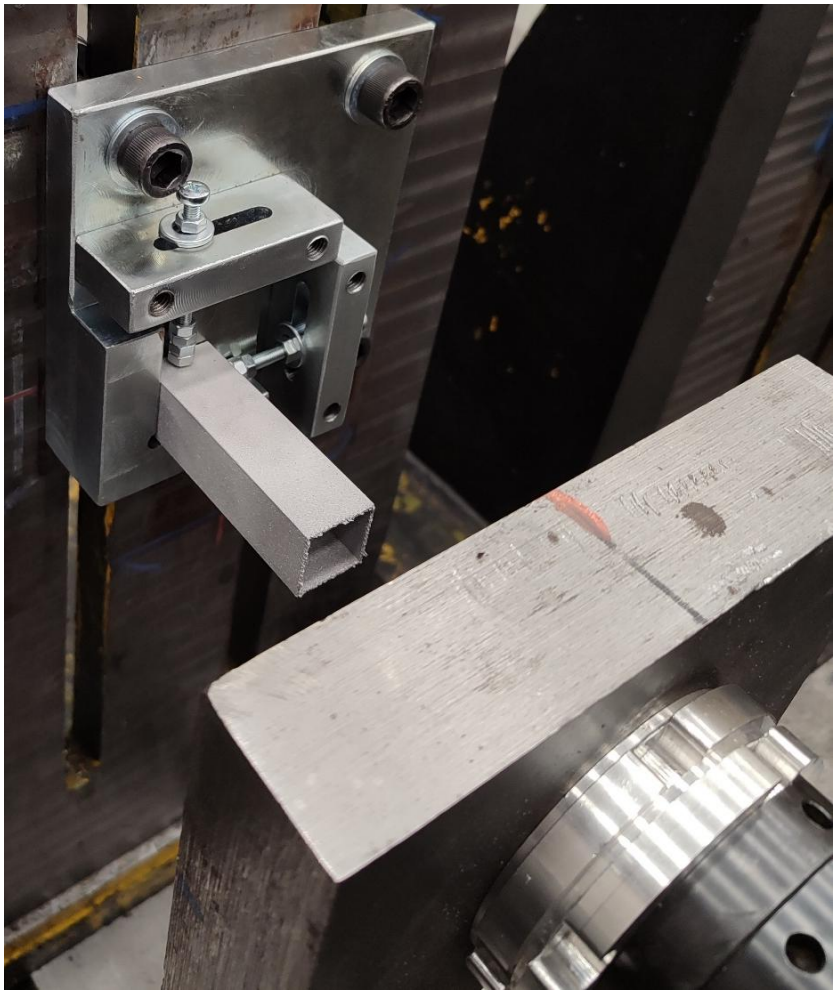
Şekil 3.22. Test sırasında kullanılan fikstür tasarımları

Bu çalışmada, farklı dış kaplamalara sahip ve dış boyutları değişkenlik gösteren numunelerin güvenli ve sabit şekilde test edilebilmesi amacıyla ayarlanabilir bir fikstür sistemi tasarlanmıştır. Fikstür, MTS hidrolik servo test cihazına montajlanabilir şekilde yapılandırılmış olup, yüksek rijitlik ve tekrarlanabilirlik sağlaması amacıyla çelik malzemeden imal edilmiştir. Numunelerin dış yüzeylerinde pla gibi polimer bazlı kaplamalar bulunduğundan, standart bir sıkıştırma düzeneği yerine, değişen dış ölçülere uyum sağlayabilecek ayarlanabilir bir fikstür kafası geliştirilmiştir. Bu kafada, farklı numune boyutlarına hassas şekilde uyum sağlamak amacıyla M5 cıvatalar ile pozisyonu

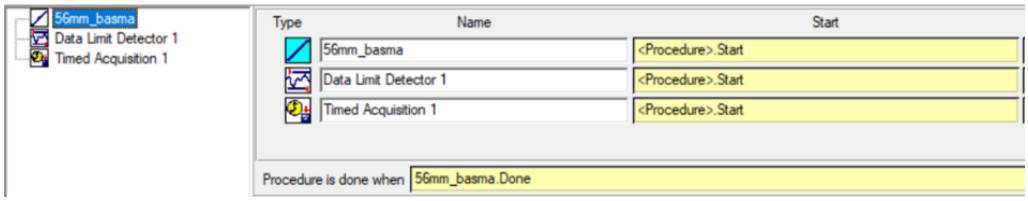
ayarlanabilen sıkıştırma çeneleri kullanılmıştır. Bu modüler yapı sayesinde, farklı ölçü ve formdaki numuneler tek bir sistem üzerinde test edilebilmiş ve deneysel doğruluk artırılmıştır.

Şekil 3.23 ’de test numunesinin fikstüre yerleştirilmiş ve sıkı şekilde sabitlenmiş hali görülmektedir.

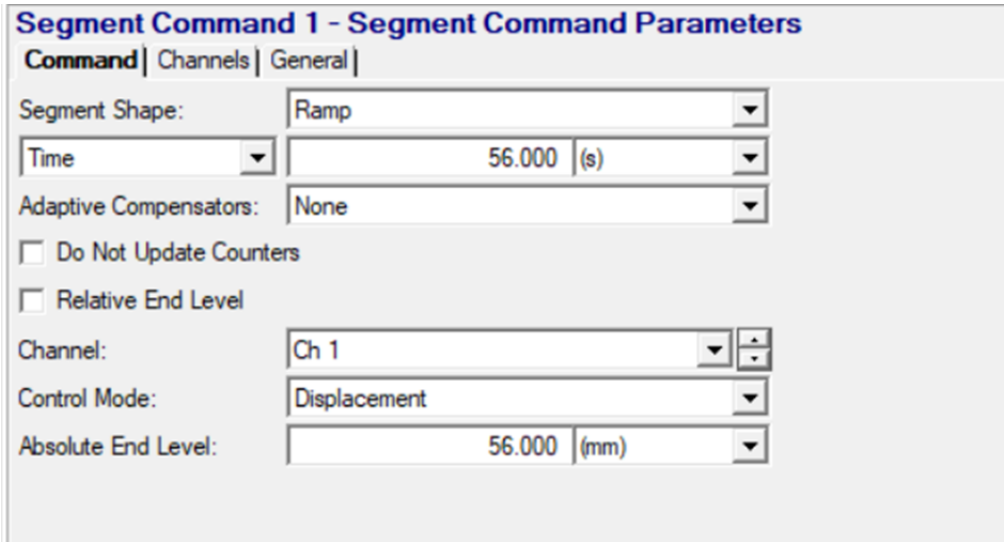
Deneysel çalışmalarda, 80 mm olan uzunluğa sahip olan numunelere, toplam uzunluğun %70’ine karşılık gelen 56 mm’lik yer değiştirme (zorlanmış deplasman), 1 mm/s sabit hızla uygulanmıştır. Bu sebeple her bir numunenin test edilmesi 56 saniye sürmüştür.



Şekil 3.23. Fikstüre sabitlenen çarpışma kutusu



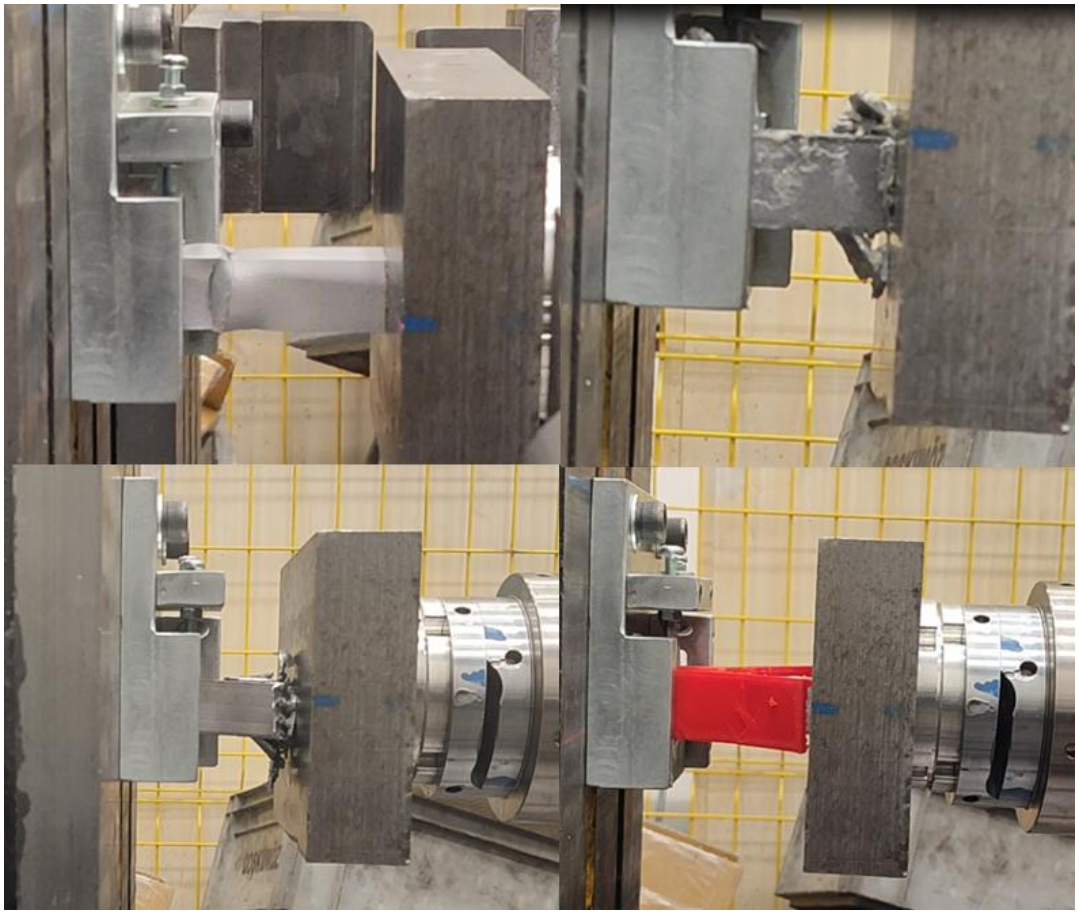
Şekil 3.24. Test prosedürü (mts test sistemi arayüzü)



Şekil 3.25. Test prosedürü detayları

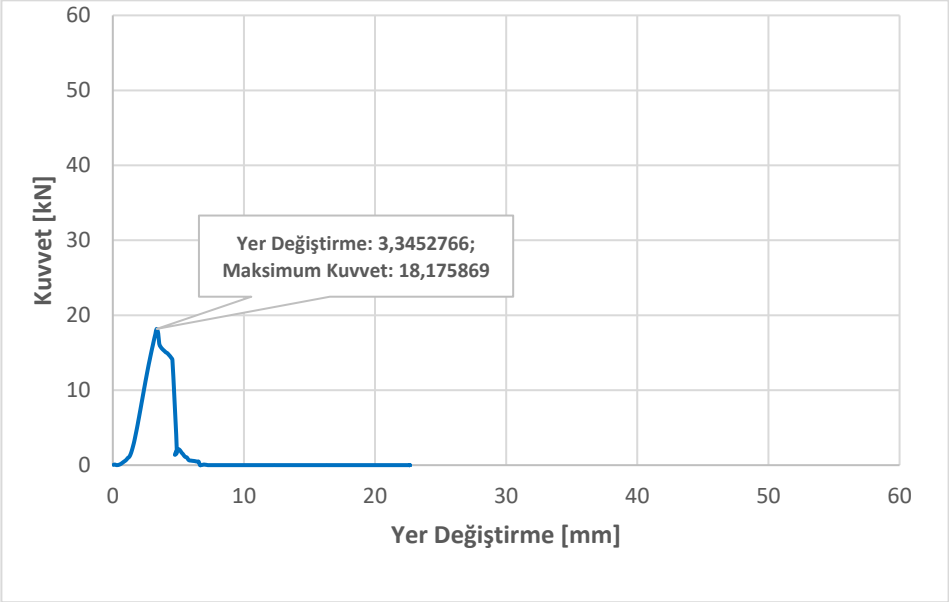
Şekil 3.26. Test prosedüründe veri toplama hızı

Test boyunca yer değiştirme kontrollü yükleme gerçekleştirilmiş ve yaklaşık 0.1 saniyede bir veri kaydı sağlanmıştır.



Şekil 3.27. Test sırasında alınan görüntü örnekleri

4. BULGULAR



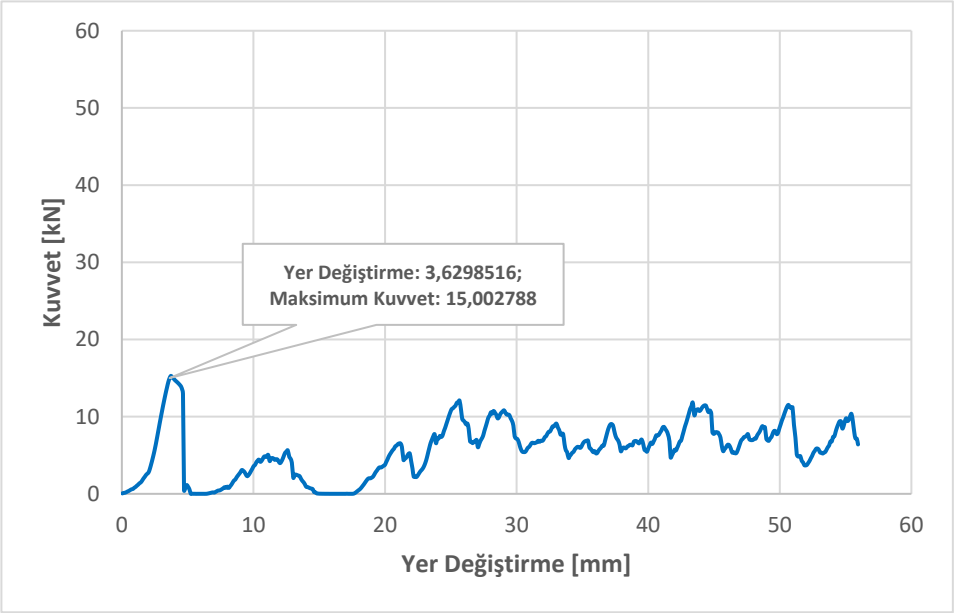
Şekil 4.1. Enerji sönümleyici yok, dik üretilmiş ve lattice bulunmayan çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiği (numune 1)

```
Curve Name : Block 1 - Column 2
Num Pts.   : 69
Length     : 40.046
Signed Area: 42.9804
Abs. Area  : 42.980
```

Şekil 4.2. Enerji sönümleyici yok, dik üretilmiş ve lattice bulunmayan çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiğinin altında kalan alan (numune 1)

Tüm numunelere 56 mm'lik bir zorlanmış deplasman uygulanmış, ancak bazı numuneler bu değere ulaşmadan kırılmıştır. Kırılma noktası, kuvvet-yer değiştirme grafiğinde kuvvetin sıfırlandığı nokta olarak kabul edilmiştir. Kırılan numuneler için enerji sönüm hesaplamaları, bu noktaya kadar yapılmıştır.

Şekil 4.1'deki eğride en büyük çarpışma kuvvetinin 18.17 kN olduğu görülmektedir. Şekil 4.1'deki eğrinin altında kalan alan Hypergraph 2019 kullanılarak hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamaya göre sönümlenen toplam enerji 42.98 joule olmuştur. (Şekil 4.2) Ağırlığı 16.9 gram olarak ölçülen numunenin özgül enerji sönümleme kapasitesi 2.54 joule/gram olmuştur.

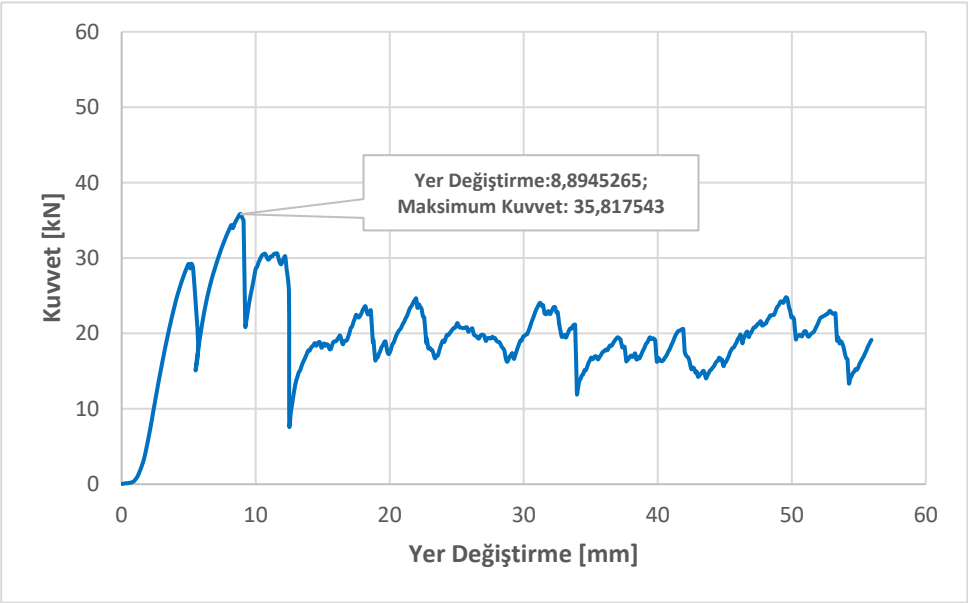


Şekil 4.3. Enerji sönümleyici yok, dik üretilmiş ve lattice bulunmayan çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiği (numune 2)

```
Curve Name : Block 1 - Column 2
Num Pts.   : 60
Length     : 33.818
Signed Area: 31.8244
Abs. Area  : 31.824
```

Şekil 4.4. Enerji sönümleyici yok, dik üretilmiş ve lattice bulunmayan çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiğinin altında kalan alan (numune 2)

Şekil 4.3'deki eğride en büyük çarpışma kuvvetinin 15 kN olduğu görülmektedir. Şekil 4.3'deki eğrinin altında kalan alan Hypergraph 2019 kullanılarak hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamaya göre sönümlenen toplam enerji 31.82 joule olmuştur. (Şekil 4.4) Ağırlığı 16.7 gram olarak ölçülen numunenin özgül enerji sönümleme kapasitesi 1.90 joule/gram olmuştur.

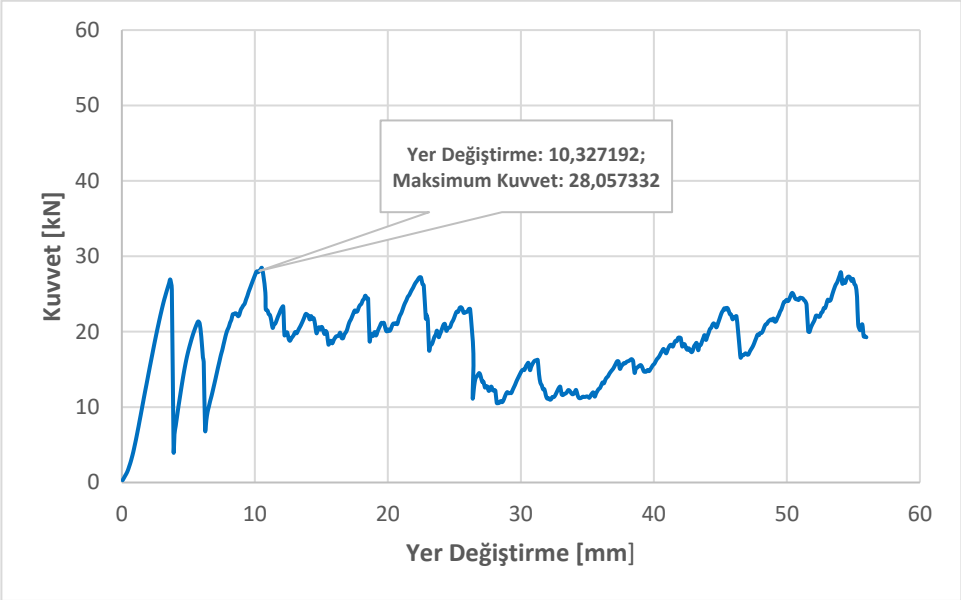


Şekil 4.5. Enerji sönümleyici yok, 45 derecede üretilmiş ve lattice tip 1'e sahip çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiği (numune 1)

```
Curve Name : Block 1 - Column 2
Num Pts.   : 562
Length     : 307.197
Signed Area: 1105.6806
Abs. Area  : 1105.681
```

Şekil 4.6. Enerji sönümleyici yok, 45 derecede üretilmiş ve lattice tip 1'e sahip çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiğinin altında kalan alan (numune 1)

Şekil 4.5'deki eğride en büyük çarpışma kuvvetinin 35.81 kN olduğu görülmektedir. Şekil 4.5'deki eğrinin altında kalan alan Hypergraph 2019 kullanılarak hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamaya göre sönümlenen toplam enerji 1105.68 joule olmuştur. (Şekil 4.6) Ağırlığı 46.8 gram olarak ölçülen numunenin özgül enerji sönümleme kapasitesi 23.62 joule/gram olmuştur.

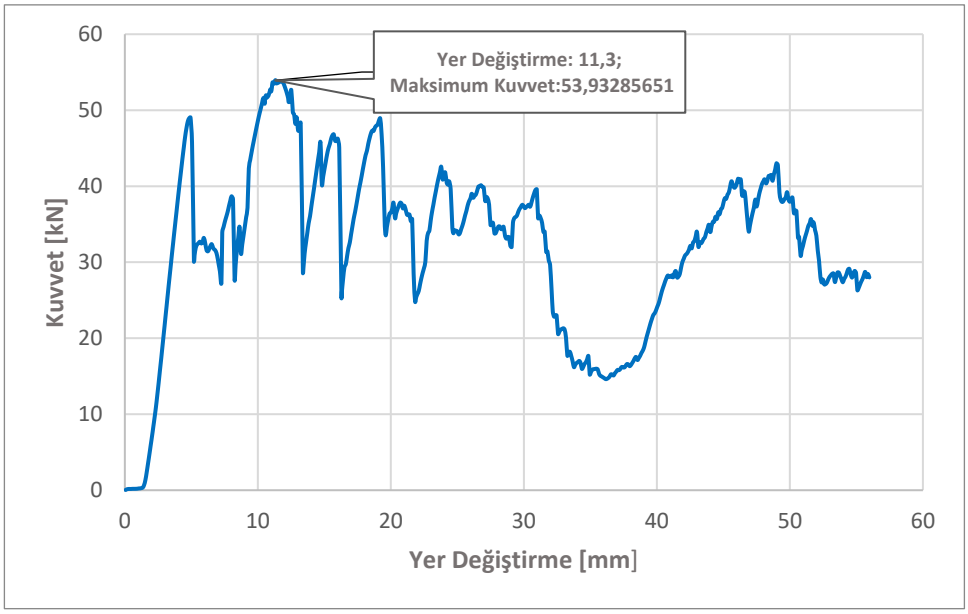


Şekil 4.7. Enerji sönümleyici yok, 45 derecede üretilmiş ve lattice tip 1'e sahip çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiği (numune 2)

```
Curve Name : Block 1 - Column 2
Num Pts.   : 562
Length     : 311.228
Signed Area: 1038.5426
Abs. Area  : 1038.543
```

Şekil 4.8. Enerji sönümleyici yok, 45 derecede üretilmiş ve lattice tip 1'e sahip çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiğinin altında kalan alan (numune 2)

Şekil 4.7'deki eğride en büyük çarpışma kuvvetinin 28.05 kN olduğu görülmektedir. Şekil 4.7'deki eğrinin altında kalan alan Hypergraph 2019 kullanılarak hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamaya göre sönümlenen toplam enerji 1038.54 joule olmuştur. (Şekil 4.8) Ağırlığı 46.7 gram olarak ölçülen numunenin özgül enerji sönümleme kapasitesi 22.23 joule/gram olmuştur.

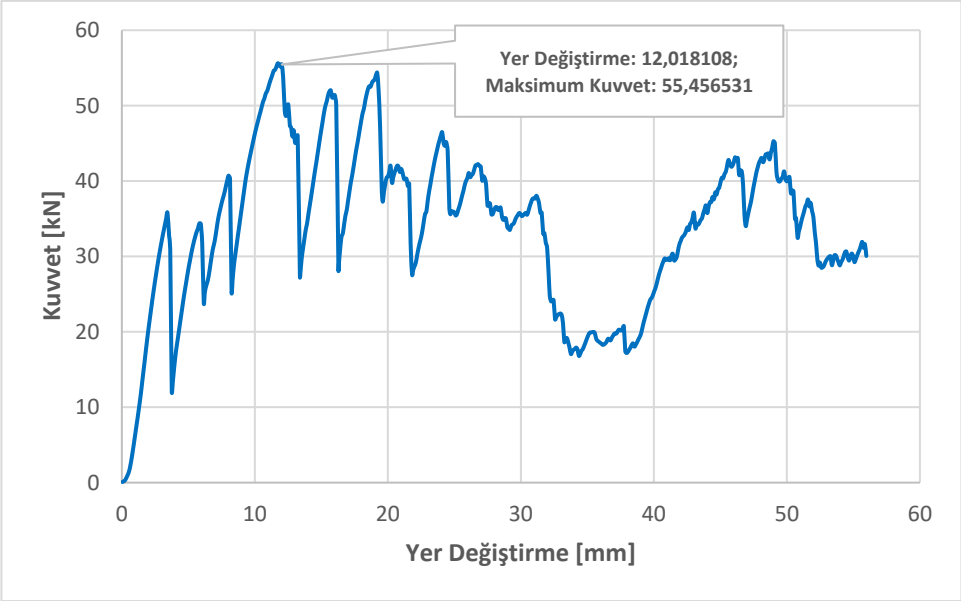


Şekil 4.9. Enerji sönümleyici yok, yatay üretilmiş ve lattice tip 2'ye sahip çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiği (numune 1)

```
Curve Name : Block 1 - Column 2
Num Pts.   : 562
Length     : 498.309
Signed Area: 1812.5402
Abs. Area  : 1812.540
```

Şekil 4.10. Enerji sönümleyici yok, yatay üretilmiş ve lattice tip 2'ye sahip çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiğinin altında kalan alan (numune 1)

Şekil 4.9'daki eğride en büyük çarpışma kuvvetinin 53.93 kN olduğu görülmektedir. Şekil 4.9'daki eğrinin altında kalan alan Hypergraph 2019 kullanılarak hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamaya göre sönümlenen toplam enerji 1812.54 joule olmuştur. (Şekil 4.10) Ağırlığı 58.4 gram olarak ölçülen numunenin özgül enerji sönümleme kapasitesi 31.03 joule/gram olmuştur.

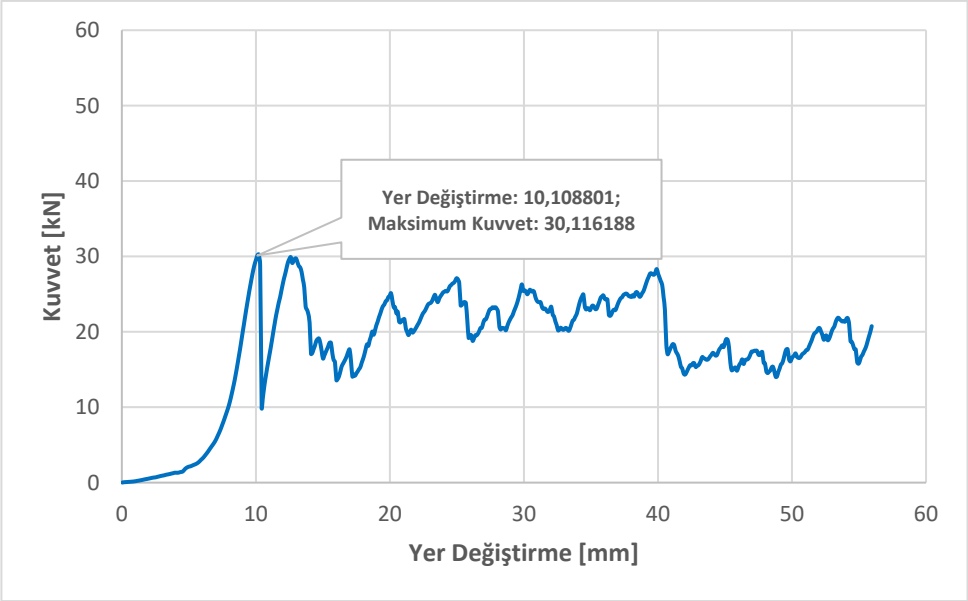


Şekil 4.11. Enerji sönümleyici yok, yatay üretilmiş ve lattice tip 2'ye sahip çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiği (numune 2)

```
Curve Name : Block 1 - Column 2
Num Pts.   : 562
Length     : 527.898
Signed Area: 1894.3064
Abs. Area  : 1894.306
```

Şekil 4.12. Enerji sönümleyici yok, yatay üretilmiş ve lattice tip 2'ye sahip çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiğinin altında kalan alan (numune 2)

Şekil 4.11'deki eğride en büyük çarpışma kuvvetinin 55.45 kN olduğu görülmektedir. Şekil 4.11'deki eğrinin altında kalan alan Hypergraph 2019 kullanılarak hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamaya göre sönümlenen toplam enerji 1894.30 joule olmuştur. (Şekil 4.12) Ağırlığı 58.5 gram olarak ölçülen numunenin özgül enerji sönümleme kapasitesi 32.38 joule/gram olmuştur.

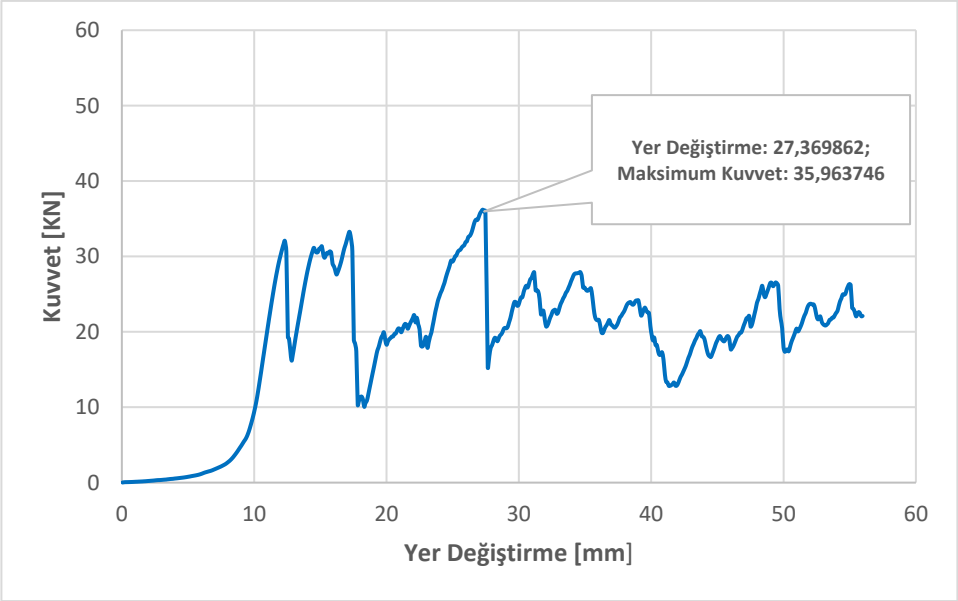


Şekil 4.13. İçi köpük dolu, dik üretilmiş ve lattice tip 1'e sahip çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiği (numune 1)

```
Curve Name : Block 1 - Column 2
Num Pts.   : 562
Length     : 272.846
Signed Area: 1009.2541
Abs. Area  : 1009.254
```

Şekil 4.14. İçi köpük dolu, dik üretilmiş ve lattice tip 1'e sahip çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiğinin altında kalan alan(numune 1)

Şekil 4.13'deki eğride en büyük çarpışma kuvvetinin 30.11 kN olduğu görülmektedir. Şekil 4.13'deki eğrinin altında kalan alan Hypergraph 2019 kullanılarak hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamaya göre sönümlenen toplam enerji 1009.25 joule olmuştur.(Şekil 4.14) Ağırlığı 56.3 gram olarak ölçülen numunenin özgül enerji sönümleme kapasitesi 17.93 joule/gram olmuştur.

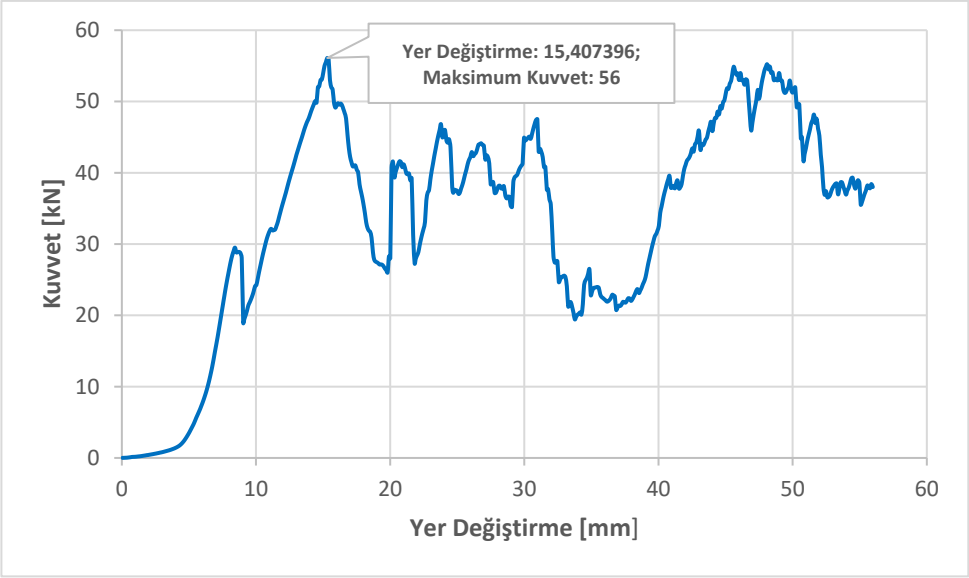


Şekil 4.15. İçi köpük dolu, dik üretilmiş ve lattice tip 1'e sahip çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiğinin altında kalan alan (numune 2)

```
Curve Name : Block 1 - Column 2
Num Pts.   : 562
Length     : 308.284
Signed Area: 1050.4503
Abs. Area  : 1050.450
```

Şekil 4.16. İçi köpük dolu, dik üretilmiş ve lattice tip 1'e sahip çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiği (numune 2)

Şekil 4.15'deki eğride en büyük çarpışma kuvvetinin 35.95 kN olduğu görülmektedir. Şekil 4.15'deki eğrinin altında kalan alan Hypergraph 2019 kullanılarak hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamaya göre sönümlenen toplam enerji 1050.45 joule olmuştur. (Şekil 4.16) Ağırlığı 55.1 gram olarak ölçülen numunenin özgül enerji sönümleme kapasitesi 19.06 joule/gram olmuştur.

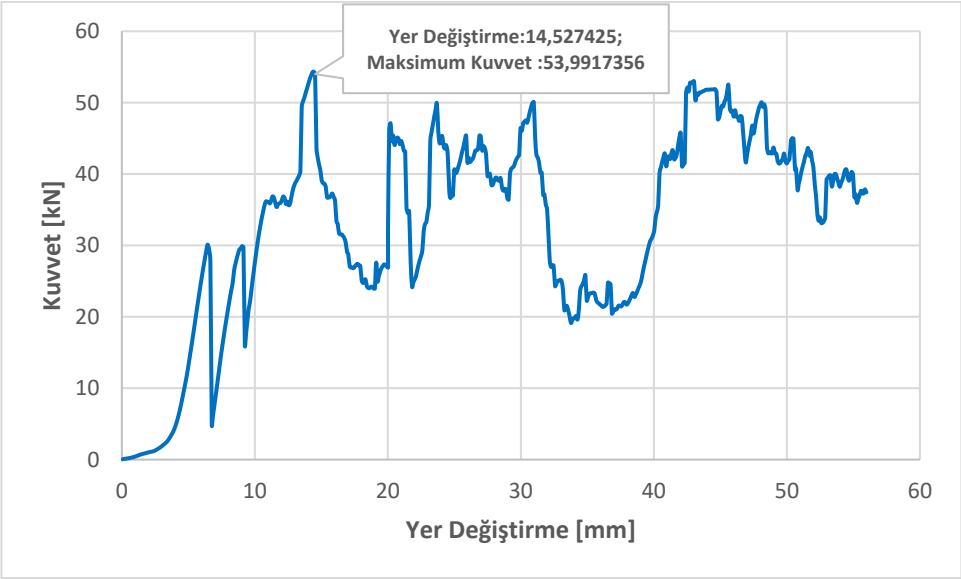


Şekil 4.17. içi köpük dolu, 45 derecede üretilmiş ve lattice tip 2'ye sahip çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiği (numune 1)

```
Curve Name  : Block 1 - Column 2
Num Pts.    : 562
Length      : 417.571
Signed Area: 1878.1768
Abs. Area   : 1878.177
```

Şekil 4.18. İçi köpük dolu, 45 derecede üretilmiş ve lattice tip 2'ye sahip çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiğinin altında kalan alan (numune 1)

Şekil 4.17'deki eğride en büyük çarpışma kuvvetinin 56 kN olduğu görülmektedir. Şekil 4.17'deki eğrinin altında kalan alan Hypergraph 2019 kullanılarak hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamaya göre sönümlenen toplam enerji 1878.17 joule olmuştur.(Şekil 4.18) Ağırlığı 64 gram olarak ölçülen numunenin özgül enerji sönümleme kapasitesi 29.34 joule/gram olmuştur.

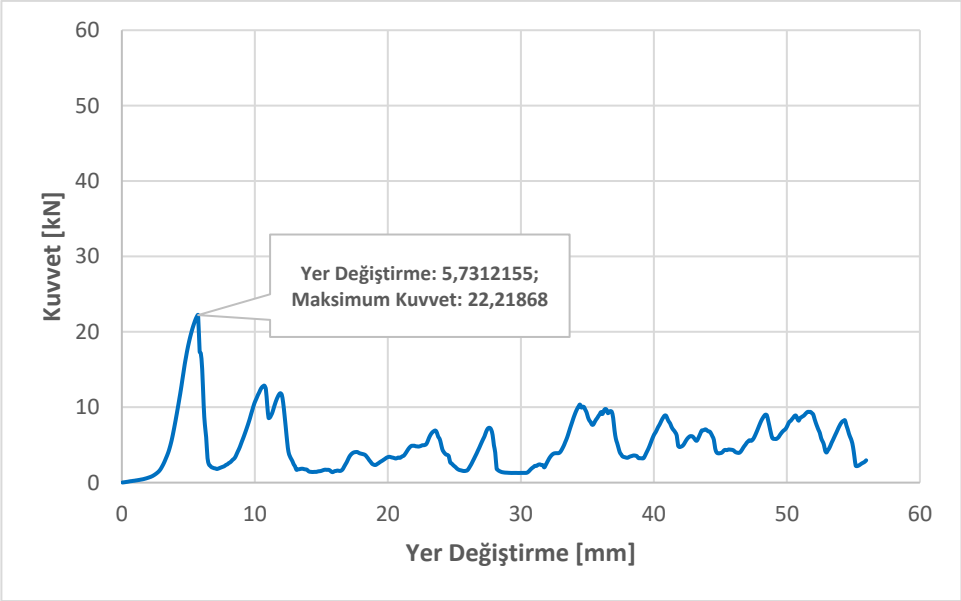


Şekil 4.19. İçi köpük dolu, 45 derecede üretilmiş ve lattice tip 2'ye sahip çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiği (numune 2)

```
Curve Name : Block 1 - Column 2
Num Pts.   : 563
Length     : 546.933
Signed Area: 1842.5885
Abs. Area  : 1842.589
```

Şekil 4.20. İçi köpük dolu, 45 derecede üretilmiş ve lattice tip 2'ye sahip çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiğinin altında kalan alan (numune 2)

Şekil 4.19'daki eğride en büyük çarpışma kuvvetinin 53.99 kN olduğu görülmektedir. Şekil 4.19'daki eğrinin altında kalan alan Hypergraph 2019 kullanılarak hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamaya göre sönümlenen toplam enerji 1842.58 joule olmuştur. (Şekil 4.20) Ağırlığı 64.1 gram olarak ölçülen numunenin özgül enerji sönümleme kapasitesi 28.74 joule/gram olmuştur.

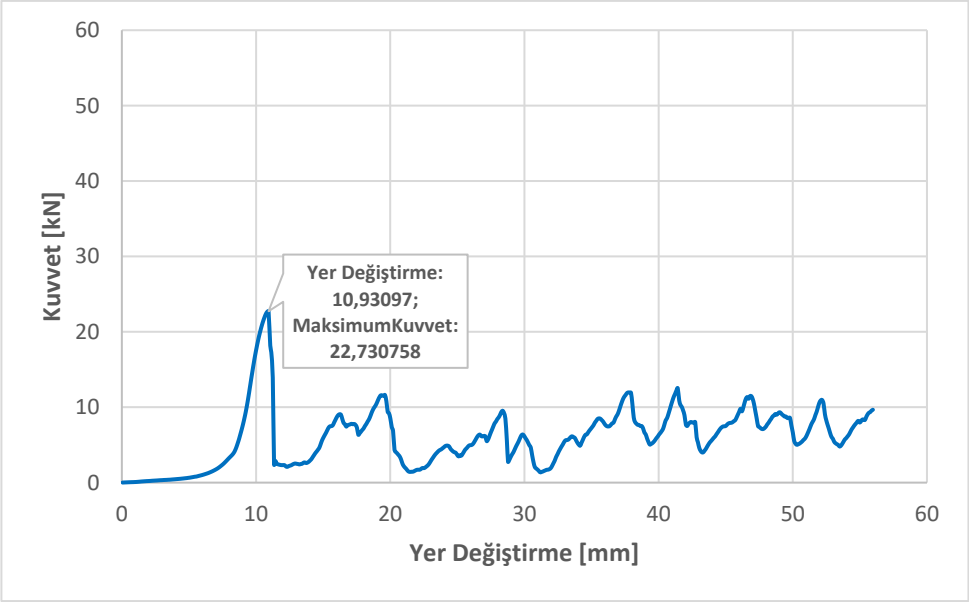


Şekil 4.21. İçi köpük dolu, yatay üretilmiş ve lattice bulunmayan çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiği (numune 1)

```
Curve Name : Block 1 - Column 2
Num Pts.   : 562
Length     : 189.882
Signed Area: 292.7203
Abs. Area  : 292.720
```

Şekil 4.22. İçi köpük dolu, yatay üretilmiş ve lattice bulunmayan çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiğinin altında kalan alan (numune 1)

Şekil 4.21'deki eğride en büyük çarpışma kuvvetinin 22.21 kN olduğu görülmektedir. Şekil 4.21'deki eğrinin altında kalan alan Hypergraph 2019 kullanılarak hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamaya göre sönümlenen toplam enerji 292.72 joule olmuştur.(Şekil 4.22) Ağırlığı 31.1 gram olarak ölçülen numunenin özgül enerji sönümleme kapasitesi 9.41 joule/gram olmuştur.

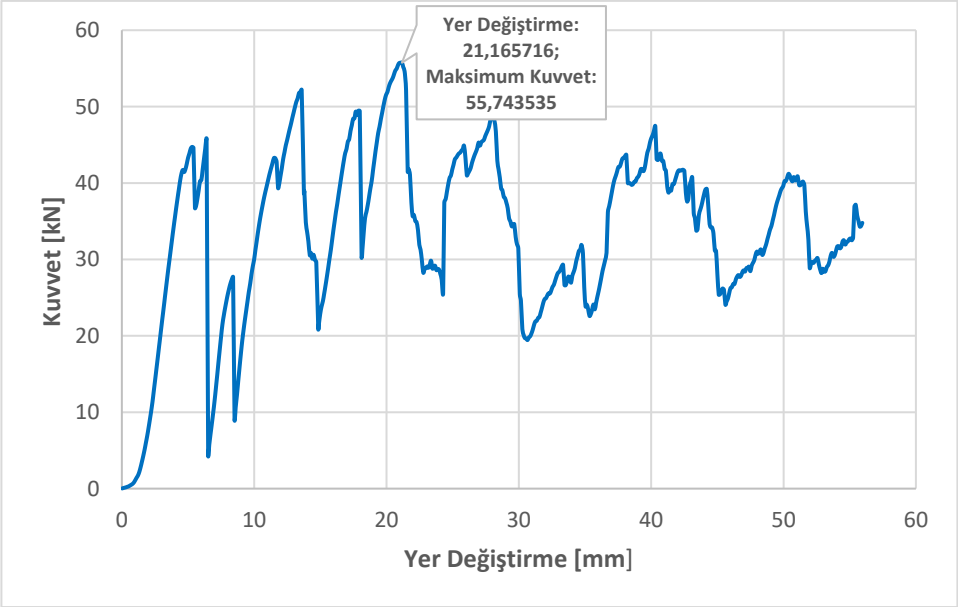


Şekil 4.23. İçi köpük dolu, yatay üretilmiş ve lattice bulunmayan çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiği (numune 2)

```
Curve Name : Block 1 - Column 2
Num Pts.   : 562
Length     : 194.757
Signed Area: 334.7260
Abs. Area  : 334.726
```

Şekil 4.24. İçi köpük dolu, yatay üretilmiş ve lattice bulunmayan çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiğinin altında kalan alan (numune 2)

Şekil 4.23'deki eğride en büyük çarpışma kuvvetinin 22.73 kN olduğu görülmektedir. Şekil 4.23'deki eğrinin altında kalan alan Hypergraph 2019 kullanılarak hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamaya göre sönümlenen toplam enerji 334.72joule olmuştur.(Şekil 4.24) Ağırlığı 30.9 gram olarak ölçülen numunenin özgül enerji sönümleme kapasitesi 10.83 joule/gram olmuştur.

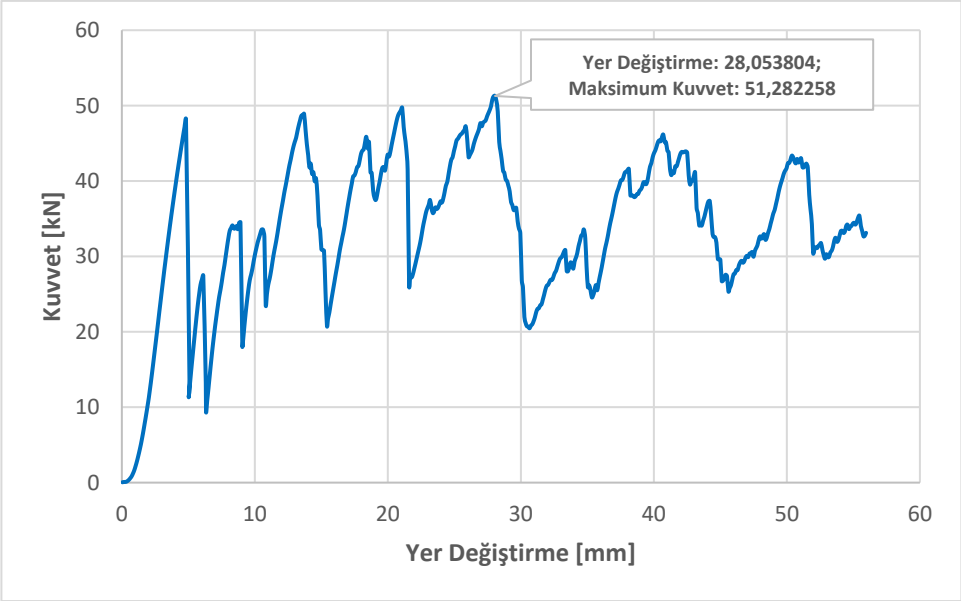


Şekil 4.25. Dışı pla kaplı, dik üretilmiş ve lattice tip 2'ye sahip çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiği (numune 1)

```
Curve Name : Block 1 - Column 2
Num Pts.   : 562
Length     : 580.331
Signed Area: 1878.7409
Abs. Area  : 1878.741
```

Şekil 4.26. Dışı pla kaplı, dik üretilmiş ve lattice tip 2'ye sahip çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiğinin altında kalan alan (numune 1)

Şekil 4.25'deki eğride en büyük çarpışma kuvvetinin 55.74 kN olduğu görülmektedir. Şekil 4.25'deki eğrinin altında kalan alan Hypergraph 2019 kullanılarak hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamaya göre sönümlenen toplam enerji 1878.74 joule olmuştur.(Şekil 4.26) Ağırlığı 86 gram olarak ölçülen numunenin özgül enerji sönümleme kapasitesi 10.83 joule/gram olmuştur.

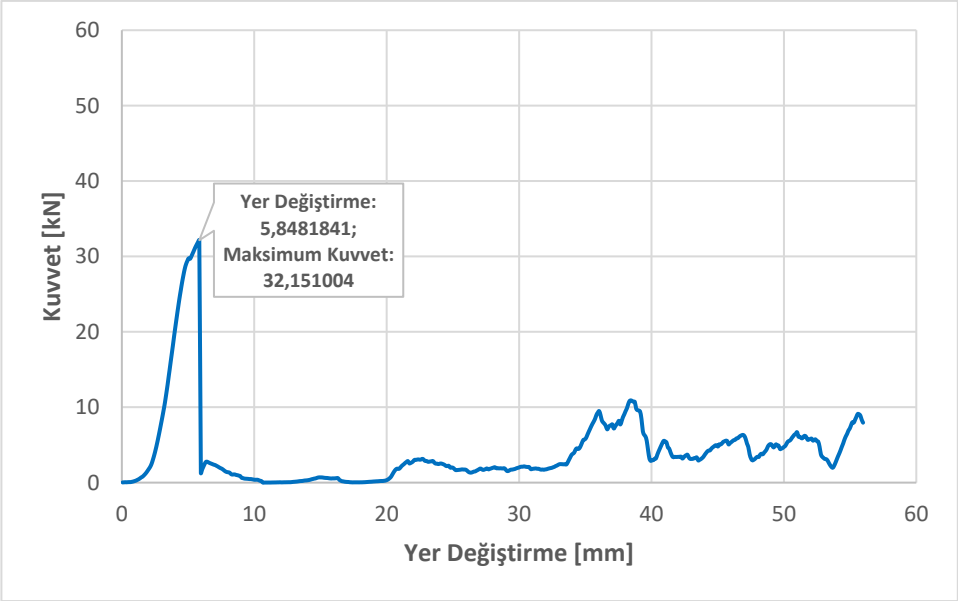


Şekil 4.27. Dışı pla kaplı, dik üretilmiş ve lattice tip 2'ye sahip çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiği (numune 2)

```
Curve Name  : Block 1 - Column 2
Num Pts.    : 562
Length      : 550.425
Signed Area: 1887.0248
Abs. Area   : 1887.025
```

Şekil 4.28. Dışı pla kaplı, dik üretilmiş ve lattice tip 2'ye sahip çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiğinin altında kalan alan (numune 2)

Şekil 4.27'deki eğride en büyük çarpışma kuvvetinin 51.28 kN olduğu görülmektedir. Şekil 4.27'deki eğrinin altında kalan alan Hypergraph 2019 kullanılarak hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamaya göre sönümlenen toplam enerji 1887.02 joule olmuştur.(Şekil 4.28) Ağırlığı 85.4 gram olarak ölçülen numunenin özgül enerji sönümleme kapasitesi 22.09 joule/gram olmuştur.

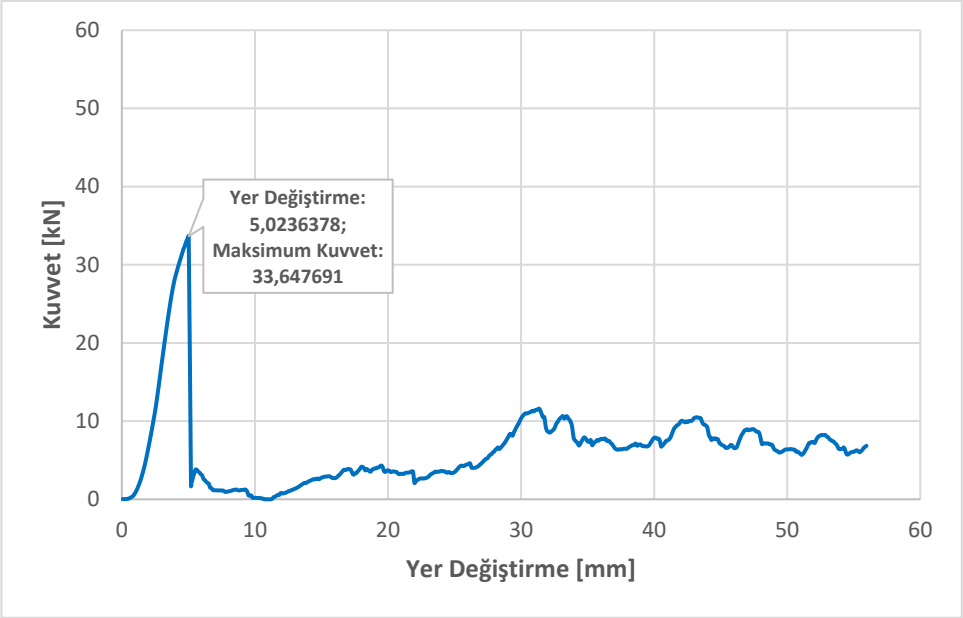


Şekil 4.29. Dışı pla kaplı, 45 derecede üretilmiş ve lattice bulunmayan çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiği (numune 1)

```
Curve Name : Block 1 - Column 2
Num Pts.   : 116
Length     : 72.472
Signed Area: 78.8245
Abs. Area  : 78.825
```

Şekil 4.30. Dışı pla kaplı, 45 derecede üretilmiş ve lattice bulunmayan çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiğinin altında kalan alan (numune 1)

Şekil 4.29'daki eğride en büyük çarpışma kuvvetinin 32.15 kN olduğu görülmektedir. Şekil 4.29'deki eğrinin altında kalan alan Hypergraph 2019 kullanılarak hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamaya göre sönümlenen toplam 78.82 joule olmuştur.(Şekil 4.30) Ağırlığı 46.7 gram olarak ölçülen numunenin özgül enerji sönümleme kapasitesi 1.68 joule/gram olmuştur.

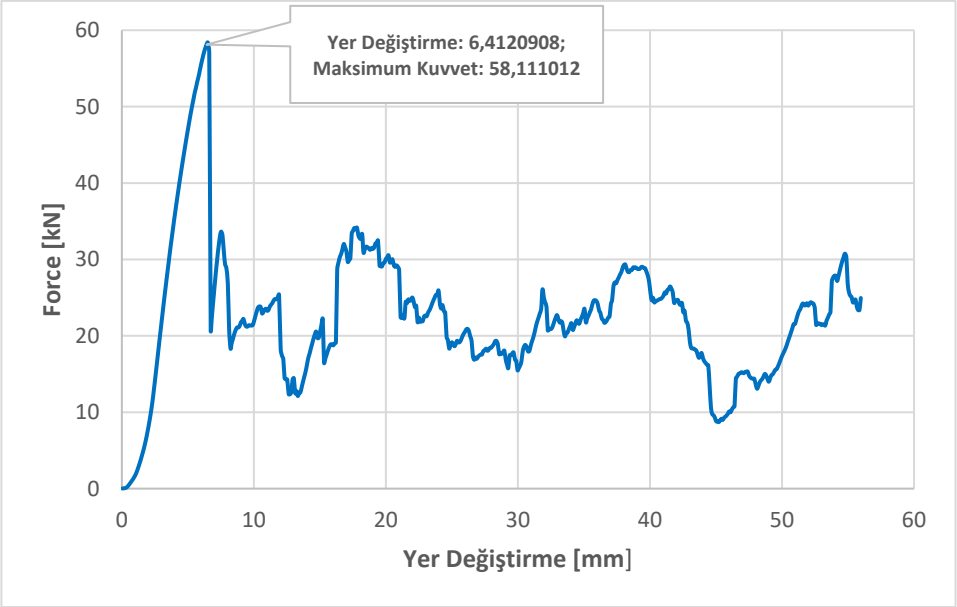


Şekil 4.31. Dışı pla kaplı, 45 derecede üretilmiş ve lattice bulunmayan çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiği (numune 2)

```
Curve Name : Block 1 - Column 2
Num Pts.   : 111
Length     : 76.894
Signed Area: 80.9740
Abs. Area  : 80.974
```

Şekil 4.32. Dışı pla kaplı, 45 derecede üretilmiş ve lattice bulunmayan çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiği (numune 2)

Şekil 4.31'deki eğride en büyük çarpışma kuvvetinin 33.64 kN olduğu görülmektedir. Şekil 4.31'deki eğrinin altında kalan alan Hypergraph 2019 kullanılarak hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamaya göre sönümlenen toplam 80.97 joule olmuştur. (Şekil 4.32) Ağırlığı 46.7 gram olarak ölçülen numunenin özgül enerji sönümleme kapasitesi 1.73 joule/gram olmuştur.

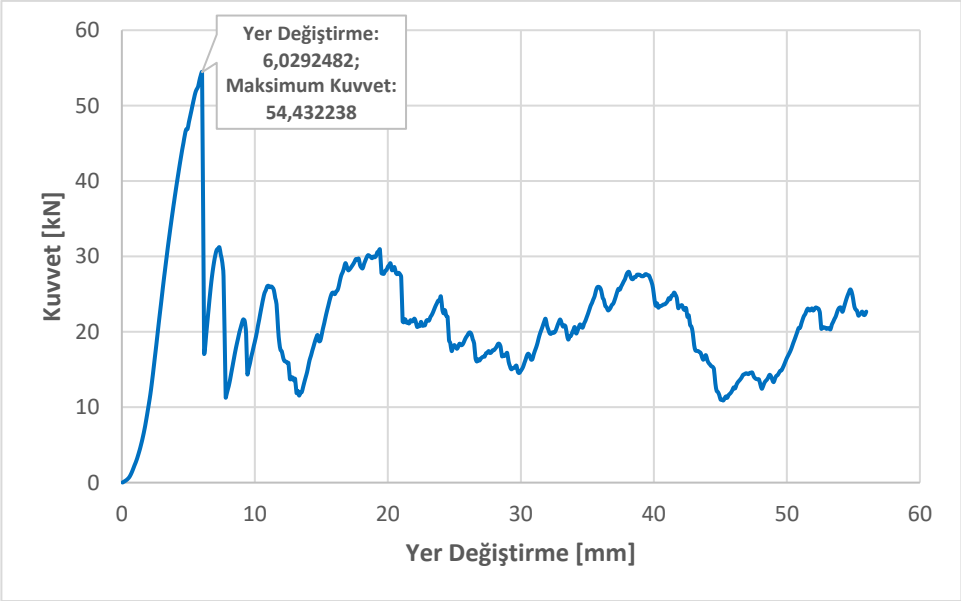


Şekil 4.33. Dışı pla kaplı, yatay üretilmiş ve lattice tip 1'e sahip çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiği (numune 1)

```
Curve Name : Block 1 - Column 2
Num Pts.   : 562
Length     : 392.987
Signed Area: 1258.3567
Abs. Area  : 1258.357
```

Şekil 4.34. Dışı pla kaplı, yatay üretilmiş ve lattice tip 1'e sahip çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiğinin altında kalan alan (numune 1)

Şekil 4.33'deki eğride en büyük çarpışma kuvvetinin 58.11 kN olduğu görülmektedir. Şekil 4.33'deki eğrinin altında kalan alan Hypergraph 2019 kullanılarak hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamaya göre sönümlenen toplam 1258.35 joule olmuştur. (Şekil 4.34) Ağırlığı 78.2 gram olarak ölçülen numunenin özgül enerji sönümleme kapasitesi 16.09 joule/gram olmuştur.



Şekil 4.35. Dışı pla kaplı, yatay üretilmiş ve lattice tip 1'e sahip çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiği (numune 2)

```
Curve Name : Block 1 - Column 2
Num Pts.   : 562
Length     : 352.553
Signed Area: 1193.2698
Abs. Area  : 1193.270
```

Şekil 4.36. Dışı pla kaplı, yatay üretilmiş ve lattice tip 1'e sahip çarpışma kutusu kuvvet yer değiştirme grafiğinin altında kalan alan (numune 2)

Şekil 4.35'deki eğride en büyük çarpışma kuvvetinin 54.43 kN olduğu görülmektedir. Şekil 4.35'deki eğrinin altında kalan alan Hypergraph 2019 kullanılarak hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamaya göre sönümlenen toplam 1193.26 joule olmuştur. (Şekil 4.36) Ağırlığı 78.24 gram olarak ölçülen numunenin özgül enerji sönümleme kapasitesi 15.25 joule/gram olmuştur.

Çizelge 4.1. Maksimum çarpışma kuvvetleri

		FAKTÖRLER			SONUÇLAR	
Deney Sayısı	Numuneler	Enerji Sönümleyici	Üretim Oryantasyonu	Lattice Tip	Max. Kuvvet (kN)	Max. Kuvvet Ortalaması (kN)
Deney 1	Numune 1	Yok	Dik	Yok	18.17	16.59
	Numune 2	Yok	Dik	Yok	15.00	
Deney 2	Numune 1	Yok	45 Derece	Lattice Tip 1	35.81	31.93
	Numune 2	Yok	45 Derece	Lattice Tip 1	28.05	
Deney 3	Numune 1	Yok	Yatay	Lattice Tip 2	53.93	54.69
	Numune 2	Yok	Yatay	Lattice Tip 2	55.45	
Deney 4	Numune 1	İçi Köpük Dolu	Dik	Lattice Tip 1	30.11	33.04
	Numune 2	İçi Köpük Dolu	Dik	Lattice Tip 1	35.96	
Deney 5	Numune 1	İçi Köpük Dolu	45 Derece	Lattice Tip 2	56.00	54.99
	Numune 2	İçi Köpük Dolu	45 Derece	Lattice Tip 2	53.99	
Deney 6	Numune 1	İçi Köpük Dolu	Yatay	Yok	22.21	22.47
	Numune 2	İçi Köpük Dolu	Yatay	Yok	22.73	
Deney 7	Numune 1	Dışı PLA Kaplı	Dik	Lattice Tip 2	55.74	53.51
	Numune 2	Dışı PLA Kaplı	Dik	Lattice Tip 2	51.28	
Deney 8	Numune 1	Dışı PLA Kaplı	45 Derece	Yok	32.15	32.89
	Numune 2	Dışı PLA Kaplı	45 Derece	Yok	33.64	
Deney 9	Numune 1	Dışı PLA Kaplı	Yatay	Lattice Tip 1	58.11	56.27
	Numune 2	Dışı PLA Kaplı	Yatay	Lattice Tip 1	54.43	

Çizelge 4.2. Ezilme kuvveti verimi

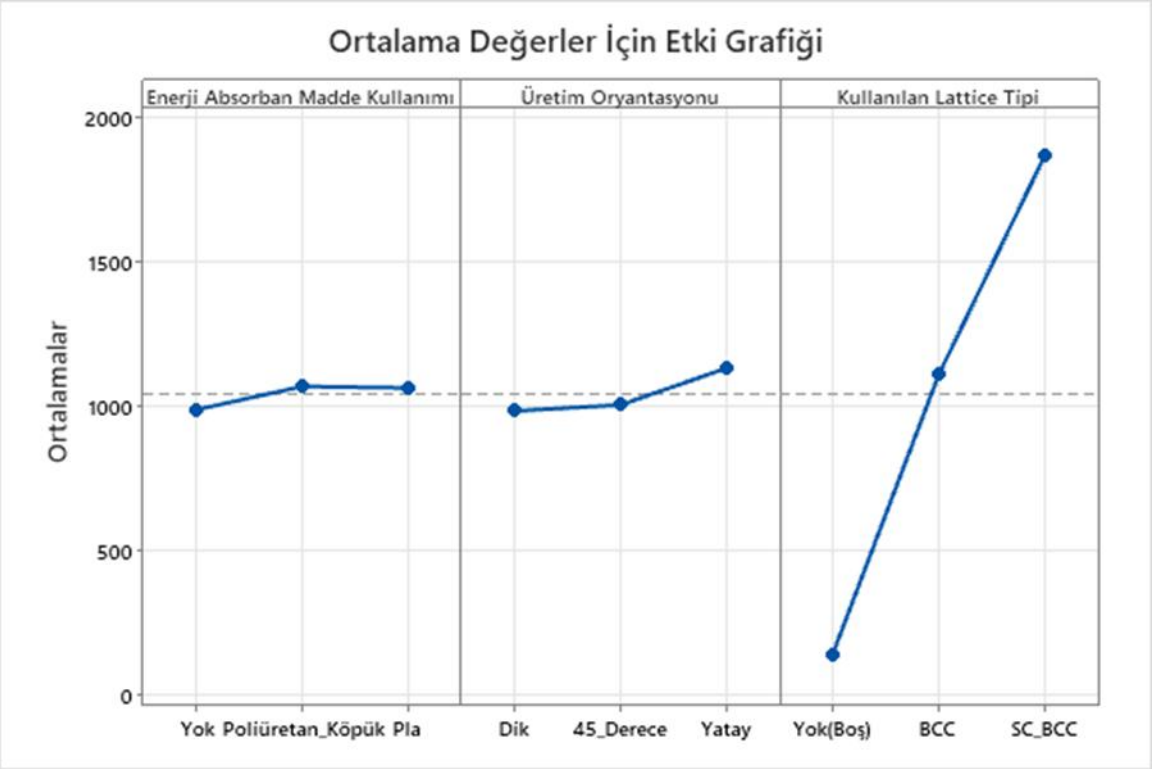
		FAKTÖRLER			SONUÇLAR		
Deney	Numuneler	Enerji Sönümleyici	Üretim Oryantasyonu	Lattice Tip	Max. Kuvvet Ortalaması (kN)	İki Numuneye Ait Ortalama Ezilme Kuvvetlerinin Ortalaması	Ezilme Kuvveti Verimi (%)
Deney 1	Numune 1	Yok	Dik	Yok	16.59	7.04	42
	Numune 2	Yok	Dik	Yok			
Deney 2	Numune 1	Yok	45 Derece	Lattice Tip 1	31.93	19.11	59
	Numune 2	Yok	45 Derece	Lattice Tip 1			
Deney 3	Numune 1	Yok	Yatay	Lattice Tip 2	54.69	33.03	60
	Numune 2	Yok	Yatay	Lattice Tip 2			
Deney 4	Numune 1	İçi Köpük Dolu	Dik	Lattice Tip 1	33.04	18.39	55
	Numune 2	İçi Köpük Dolu	Dik	Lattice Tip 1			
Deney 5	Numune 1	İçi Köpük Dolu	45 Derece	Lattice Tip 2	54.99	33.21	60
	Numune 2	İçi Köpük Dolu	45 Derece	Lattice Tip 2			
Deney 6	Numune 1	İçi Köpük Dolu	Yatay	Yok	22.47	5.59	24
	Numune 2	İçi Köpük Dolu	Yatay	Yok			
Deney 7	Numune 1	Dışı PLA Kaplı	Dik	Lattice Tip 2	53.51	33.57	62
	Numune 2	Dışı PLA Kaplı	Dik	Lattice Tip 2			
Deney 8	Numune 1	Dışı PLA Kaplı	45 Derece	Yok	32.89	7.65	23
	Numune 2	Dışı PLA Kaplı	45 Derece	Yok			
Deney 9	Numune 1	Dışı PLA Kaplı	Yatay	Lattice Tip 1	56.27	21.86	38
	Numune 2	Dışı PLA Kaplı	Yatay	Lattice Tip 1			

Her bir deney için, aynı özelliklere sahip iki adet numune üretilmiştir. Her numune için elde edilen kuvvet-deplasman verilerinden ortalama kuvvet değeri ayrı ayrı hesaplanmıştır. Daha sonra, bu iki numuneye ait ortalama kuvvetlerin aritmetik ortalaması alınarak, ilgili deney için "Ortalama Kuvvetin Ortalaması" belirlenmiştir. Bu yöntemle, deneysel sonuçların güvenilirliği artırılmış ve varyasyonların etkisi minimize edilmiştir.

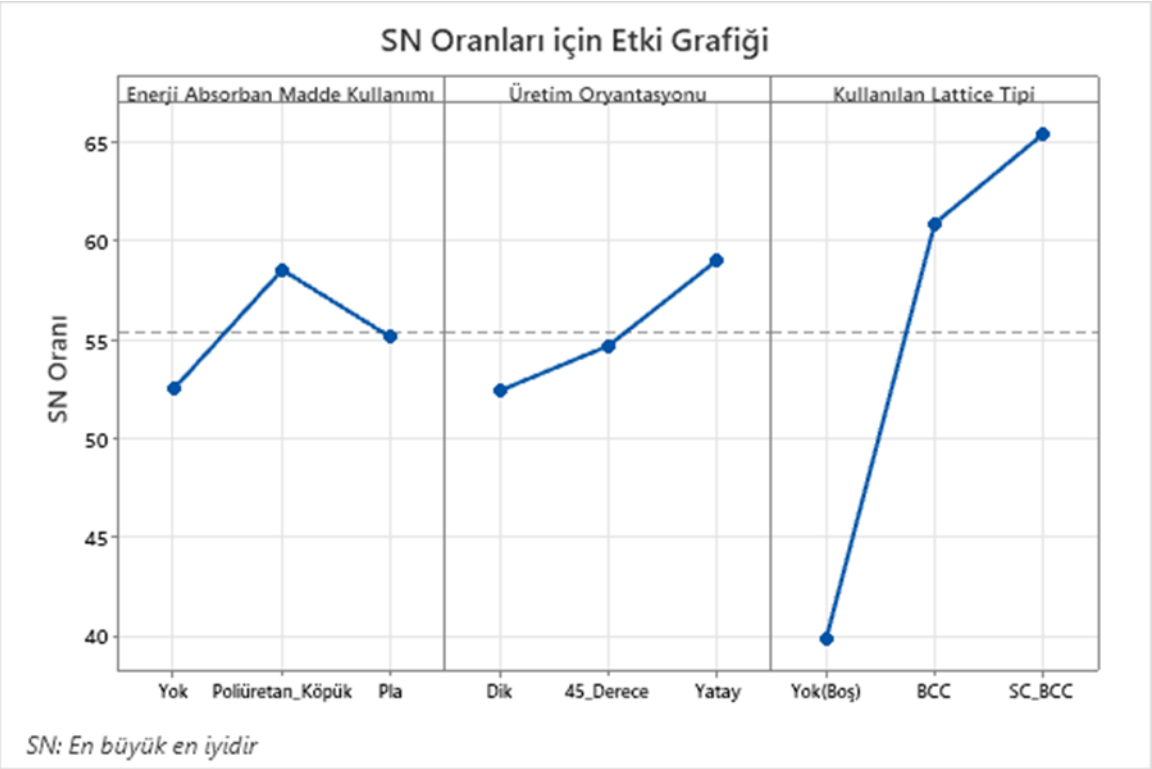
Çizelge 4.3. Sönümlenen enerji miktarları

		FAKTÖRLER			SONUÇLAR		
Deney Sayısı	Numuneler	Enerji Sönümleyici	Üretim Oryantasyonu	Lattice Tip	Sönümlenen Toplam Enerji (Joule)	Ortalama Sönümlenen Toplam Enerji (Joule)	Özgül Enerji Sönümleme Kapasitesi (joule/gram)
Deney 1	Numune 1	Yok	Dik	Yok	42.98	37.4	2.23
	Numune 2	Yok	Dik	Yok	31.82		
Deney 2	Numune 1	Yok	45 Derece	Lattice Tip 1	1105.68	1072.11	22.94
	Numune 2	Yok	45 Derece	Lattice Tip 1	1038.54		
Deney 3	Numune 1	Yok	Yatay	Lattice Tip 2	1812.54	1853.42	31.71
	Numune 2	Yok	Yatay	Lattice Tip 2	1894.3		
Deney 4	Numune 1	İçi Köpük Dolu	Dik	Lattice Tip 1	1009.25	1029.85	18.49
	Numune 2	İçi Köpük Dolu	Dik	Lattice Tip 1	1050.45		
Deney 5	Numune 1	İçi Köpük Dolu	45 Derece	Lattice Tip 2	1878.17	1860.38	29.05
	Numune 2	İçi Köpük Dolu	45 Derece	Lattice Tip 2	1842.58		
Deney 6	Numune 1	İçi Köpük Dolu	Yatay	Yok	292.72	313.72	10.12
	Numune 2	İçi Köpük Dolu	Yatay	Yok	334.72		
Deney 7	Numune 1	Dışı PLA Kaplı	Dik	Lattice Tip 2	1878.74	1882.88	21.98
	Numune 2	Dışı PLA Kaplı	Dik	Lattice Tip 2	1887.02		
Deney 8	Numune 1	Dışı PLA Kaplı	45 Derece	Yok	78.82	79.90	1.71
	Numune 2	Dışı PLA Kaplı	45 Derece	Yok	80.97		
Deney 9	Numune 1	Dışı PLA Kaplı	Yatay	Lattice Tip 1	1258.35	1225.81	15.66
	Numune 2	Dışı PLA Kaplı	Yatay	Lattice Tip 1	1193.27		

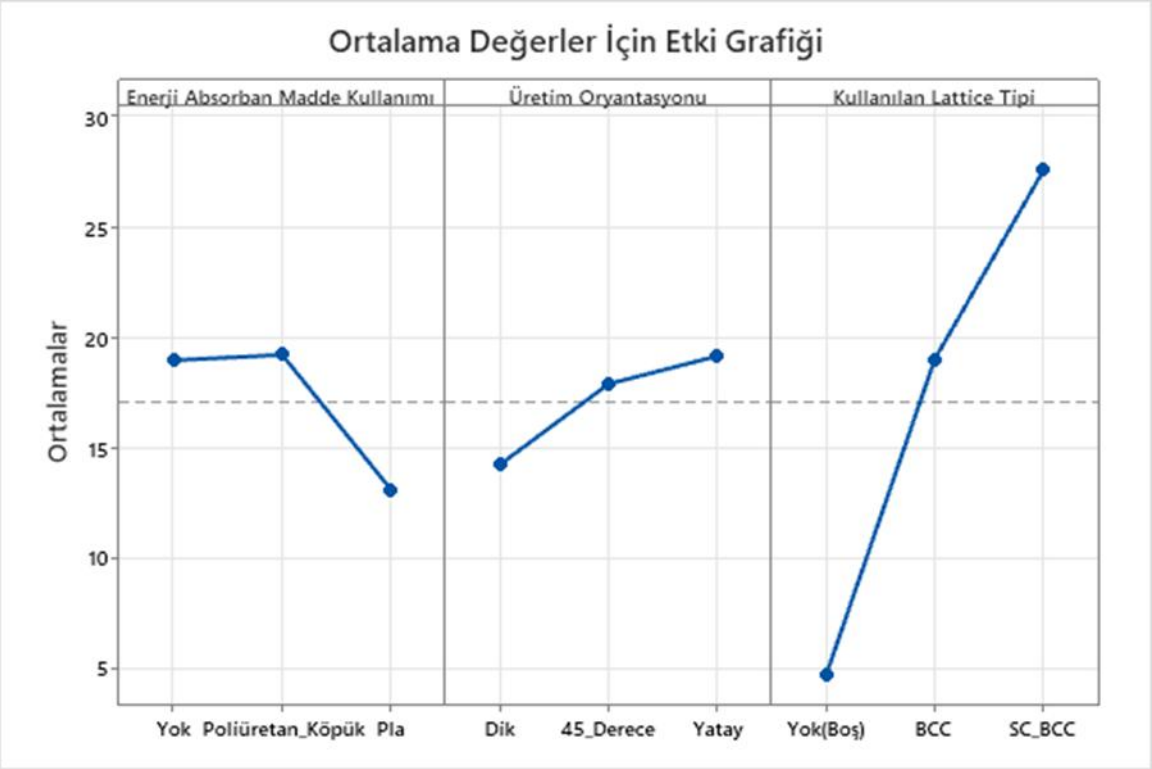
Bu çalışmada, sönümlenen toplam enerjinin daha güvenilir ve hatasız bir şekilde değerlendirilmesi amacıyla her deney için iki adet olmak üzere toplam 18 numune hazırlanmış ve 9 farklı deney koşulunda test edilmiştir. Her deney kombinasyonunda elde edilen iki ayrı numunenin sönümlenen toplam enerji değerleri aritmetik ortalamaları alınarak temsil edilmiştir. Böylece ölçüm ve üretimden kaynaklanabilecek varyasyonların etkisi minimize edilmiştir. Elde edilen veriler, Minitab Statistical Software 22 programı aracılığıyla Taguchi yöntemi kapsamında analiz edilmiştir. Sönümlenen toplam enerji (STE) ve özgül enerji sönümleme kapasitesi (ÖEK) ve ezilme kuvveti verimi değerleri ayrı ayrı değerlendirilmiş olup, her üç parametrede de "en büyük en iyidir" (larger-is-better) hedef fonksiyonu esas alınmıştır.



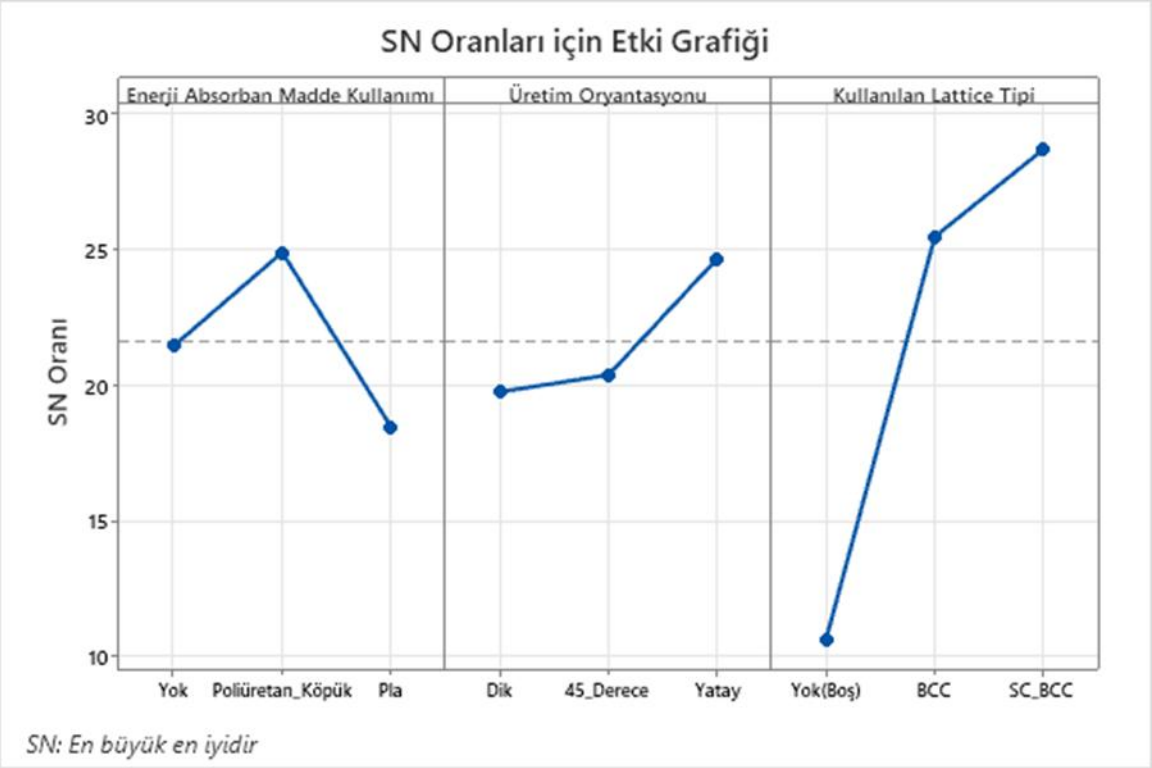
Şekil 4.37. Sönümlenen toplam enerjiye göre faktörlerin ortalama etki grafiğinde gösterilmesi



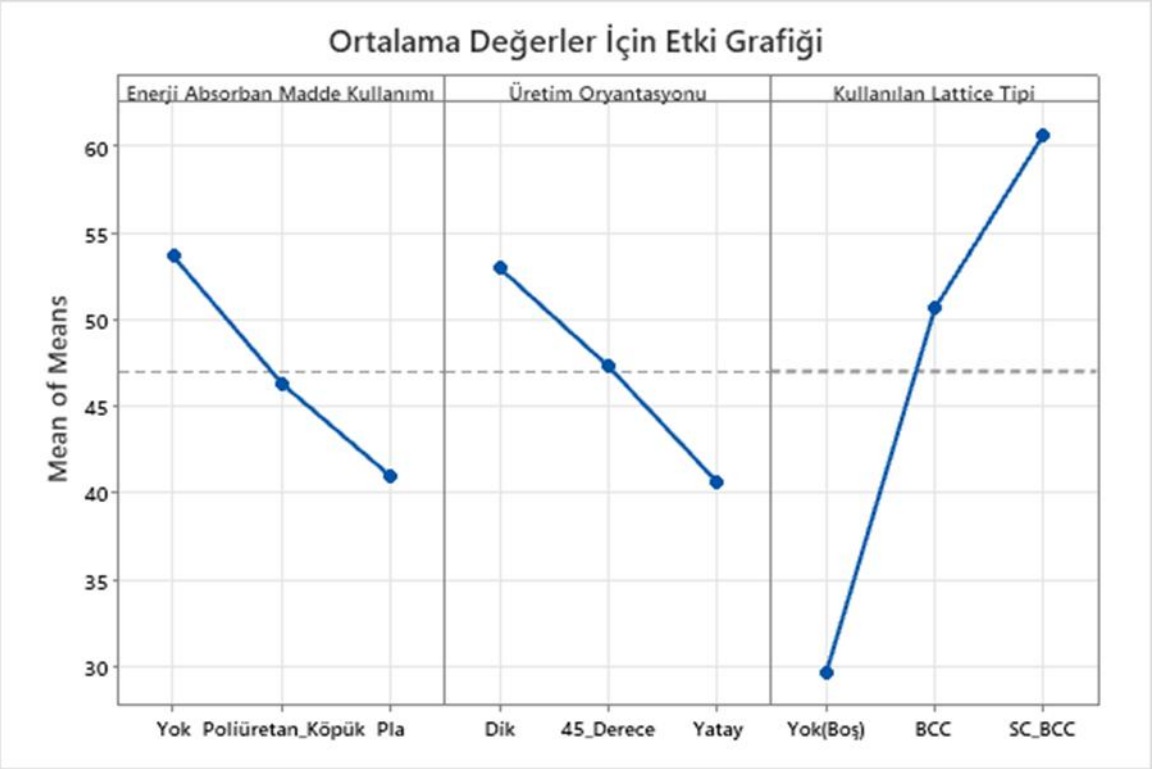
Şekil 4.38. Sönümlenen toplam enerjiye göre faktörlerin sinyal-gürültü oranı grafiğinde gösterilmesi



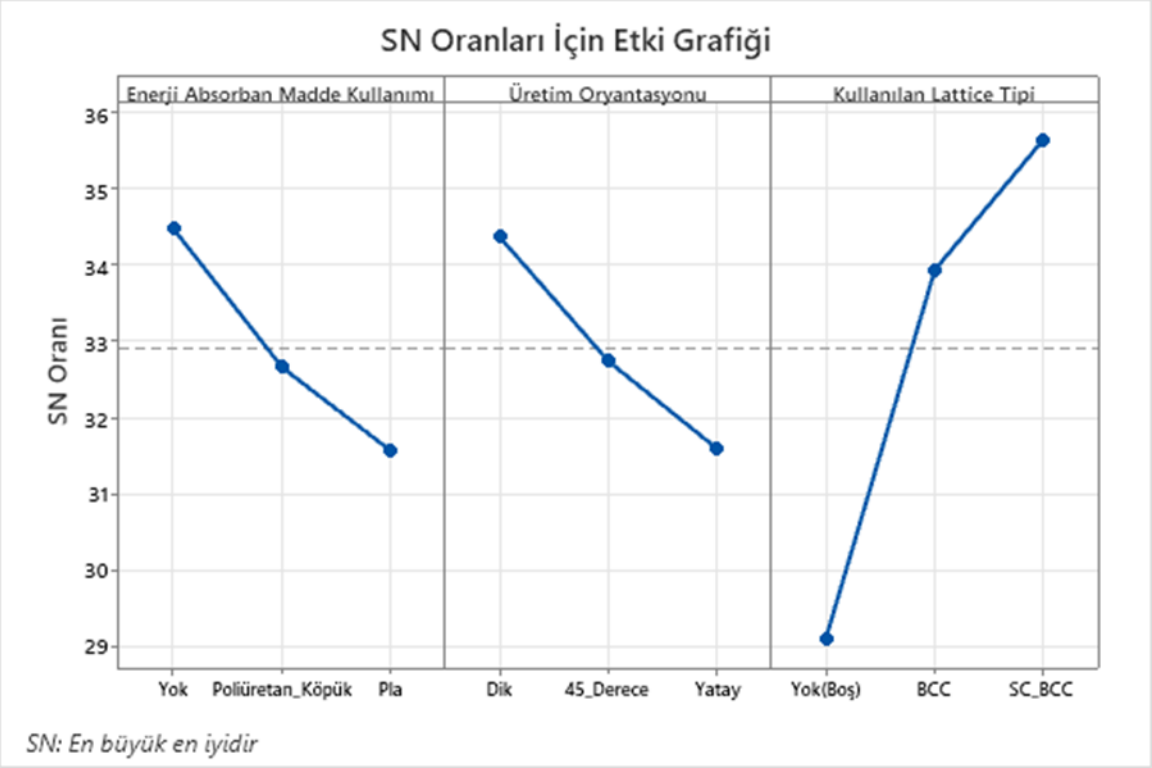
Şekil 4.39. Özgül enerji sönümleme kapasitesine göre faktörlerin ortalama etki grafiğinde gösterilmesi



Şekil 4.40. Özgül enerji sönümleme kapasitesine göre faktörlerin sinyal-gürültü oranı grafiğinde gösterilmesi



Şekil 4.41. Ezilme kuvveti verimine göre faktörlerin ortalama etki grafiğinde gösterilmesi



Şekil 4.42. Ezilme kuvveti verimine göre faktörlerin sinyal-gürültü oranı grafiğinde gösterilmesi

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

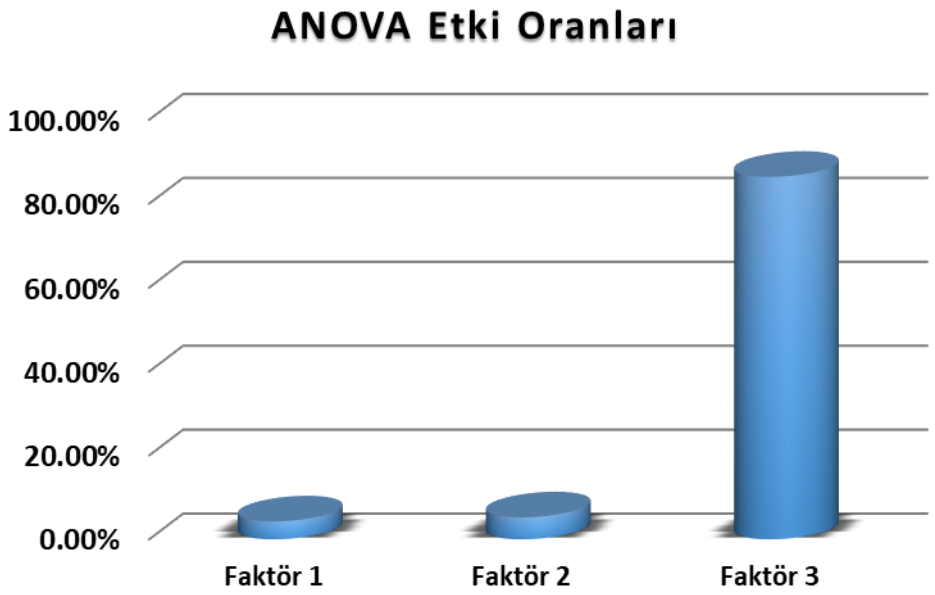
Bu çalışmada, seçici lazer ergitme (SLM) yöntemi ile üretilmiş lattice yapıların üretim yönüne göre mekanik davranışları ve enerji sönümleme kapasiteleri, çarpışma kutusu uygulamaları çerçevesinde deneysel olarak incelenmiştir. Ayrıca, dışı PLA kaplanmış ve içi poliüretan köpük ile doldurulmuş hibrit numunelerin darbe yükleri altındaki performansları değerlendirilmiştir. Tüm deneyler, Taguchi deney tasarımı yaklaşımıyla planlanmış ve L9 ortogonal dizin kullanılarak minimum deney sayısı ile maksimum bilgi elde edilmiştir.

Test sonuçları, lattice yapıların geometrik özelliklerinin ve üretim yönlerinin çarpışma davranışı üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermiştir. Özellikle XY (yatay) üretim yönünde üretilen numuneler, hem sönümlenen toplam enerji (STE) hem de özgül enerji sönümleme kapasitesi (ÖEK) bakımından en iyi performansı göstermiştir.

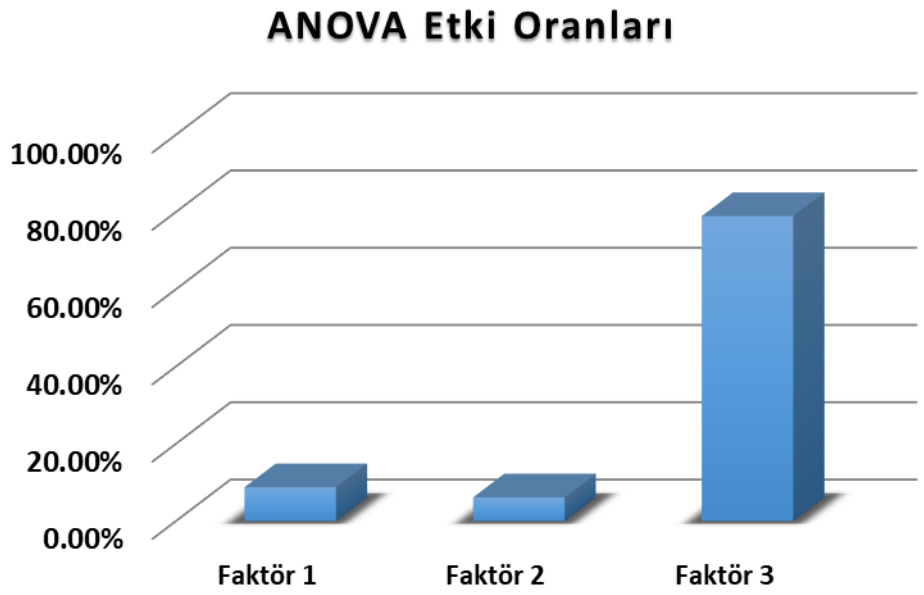
İçi poliüretan köpük ile doldurulan lattice yapılar, darbe esnasında yapının çökmesini geciktirerek deformasyon enerjisinin daha geniş bir zamana yayılmasını sağlamıştır. Bu durum, ani kuvvet tepkilerinin yumuşatılması ve yolcu güvenliğinin artırılması açısından son derece önemlidir.

L9 ortogonal dizin ile planlanan deneylerde üç faktör (üretim yönü, lattice tipi ve enerji absorban kullanımı) üç seviyede incelenmiştir. Taguchi analizleri sonucunda, lattice yapılar en yüksek etki katsayısına sahip faktör olarak belirlenmiştir. Faktör ağırlıklarına ilişkin ANOVA değerlendirmesi Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'de sunulmuştur.

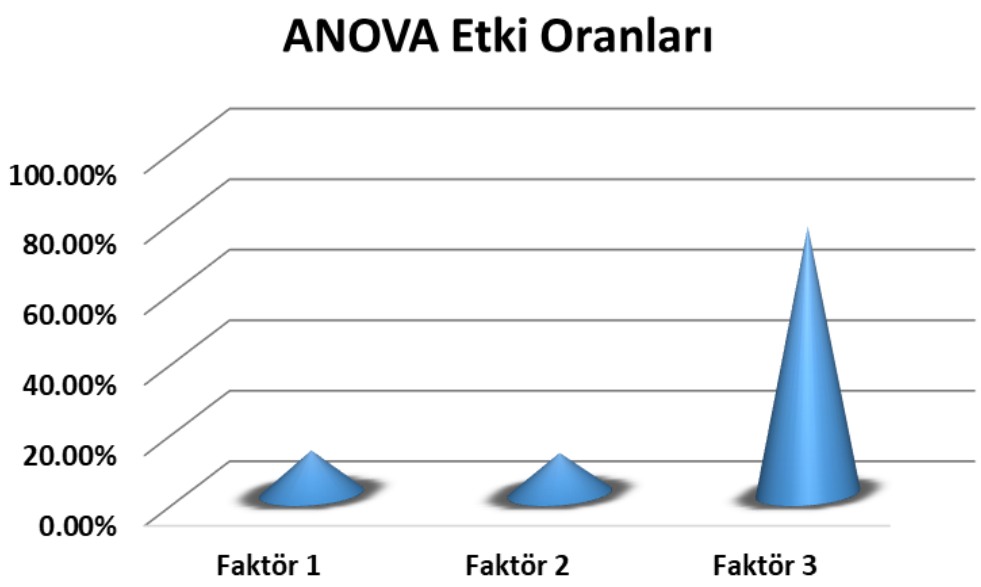
Burada faktör 1 enerji absorban madde kullanımı , faktör 2 üretim oryantasyonu ve faktör 3 de lattice tiplerinin etkisidir.



Şekil 5.1. Toplam sönümlenen enerjiye faktörlerin etkisi (anova etki oranları)



Şekil 5.2. Özgül enerji sönümleme kapasitesine faktörlerin etkisi (anova etki oranları)



Şekil 5.3. Ezilme kuvveti verimine faktörlerin etkisi (anova etki oranları)

Çizelge 5.1. Toplam sönümlenen enerji için s/n faktör seviye tablosu

Seviyeler	Enerji Absorban Kullanımı	Üretim Oryantasyonu	Lattice Tipleri
Seviye 1	52.47	52.40	39.81
Seviye 2	58.52	54.68	60.87
Seviye 3	55.10	59.01	65.41
Fark	6.05	6.61	25.61
Etki sırası	3	2	1

Toplam sönümlenen enerji üzerinde en belirleyici faktörün lattice tipi olduğu görülmüştür. Bunu takiben üretim oryantasyonunun etkili olduğu, enerji absorban malzeme (poliüretan köpük) kullanımının ise en az etkili faktör olarak görülsede üretim yönüyle benzer seviyede etki gösterdiği tespit edilmiştir.

Faktörlerin etkisi incelendikten sonra her faktör için ideal seviyeyin ne olduğuna bakalım. Enerji absorban maddede seviye 2 yani poliüretan köpük kullanımı üretim oryantasyonunda yatay olması ve lattice tip 2 olmasıdır.

Faktörlerin sönümlenen toplam enerji üzerindeki etkileri analiz edildikten sonra, her bir faktör için optimum seviye belirlenmiştir. Enerji absorban madde açısından en uygun seviye, poliüretan köpük kullanılan Seviye 2 olarak belirlenmiştir. Üretim oryantasyonu açısından en yüksek performans, yatay üretim yönü olan Seviye 1'de elde edilmiştir. Lattice tipi bakımından ise en uygun geometri Seviye 2 olarak tanımlanan yapı olmuştur. Bu kombinasyon, toplam sönümlenen enerjinin maksimize edilmesine olanak sağlamaktadır.

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda, maksimum toplam sönümlenen enerji değeri 1882.88 joule olarak ölçülmüş ve bu değer, dikey üretim yönüne sahip, lattice tipi 2 olan ve dış yüzeyi pla ile kaplanmış numunede elde edilmiştir. Diğer kombinasyonlara ilişkin optimum enerji sönümleme performansını öngörmek amacıyla Taguchi tahmin yöntemi kullanılmış ve bu kapsamda en uygun parametre setine sahip numune Çizelge 5.2.' te sunulmuştur.

Çizelge 5.2. Toplam sönümlenen enerji için optimum numunenin ve sönümlenen enerjinin tahmini

Optimum	Enerji Absorban Kullanımı	Üretim Oryantasyonu	Lattice Tipi
	İçi Köpük Dolu	Yatay	Lattice Tip 2(SC – BCC)
Tahmini değer	1985.53		

Çizelge 5.3. Özgül enerji sönümleme kapasitesi için s/n faktör seviye tablosu

Seviyeler	**Enerji Absorban Kullanımı**	**Üretim Oryantasyonu**	**Lattice Tipleri**
Seviye 1	21.39	19.71	10.57
Seviye 2	24.90	20.37	25.48
Seviye 3	18.46	24.67	28.70
Fark	6.44	4.96	18.13
Etki sırası	2	3	1

Özgül enerji sönümleme kapasitesi (ÖEK) üzerinde en belirleyici parametrenin lattice tipi olduğu belirlenmiştir. ÖEK değerlerinde numune ağırlığının doğrudan etkili bir faktör olması nedeniyle, enerji absorban malzeme (poliüretan köpük) kullanımı bu inceleme üzerinde daha yüksek bir etki göstermiş ve ikinci en etkili faktör konumuna yükselmiştir. Üretim oryantasyonu ise ÖEK üzerinde en düşük etkiye sahip parametre olarak belirlenmiştir.

Faktörlerin özgül enerji sönümleme kapasitesi üzerindeki etkileri analiz edildikten sonra, her bir faktör için optimum seviye belirlenmiştir. Enerji absorban madde açısından en uygun seviye, poliüretan köpük kullanılan Seviye 2 olarak belirlenmiştir. Üretim oryantasyonu açısından en yüksek performans, yatay üretim yönü olan Seviye 1'de elde edilmiştir. Lattice tipi bakımından ise en uygun geometri Seviye 2 olarak tanımlanan yapı olmuştur. Bu kombinasyon, özgül enerji sönümleme kapasitesinin maksimize edilmesine olanak sağlamaktadır.

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda, maksimum özgül enerji sönümleme kapasitesi 31,7 joule/gram olarak ölçülmüş ve bu değer, yatay üretim yönüne sahip, lattice tipi 2 olan ve enerji absorban malzeme içermeyen numunede elde edilmiştir. Diğer parametre kombinasyonlarına ilişkin en uygun özgül enerji performansını öngörebilmek amacıyla Taguchi tahmin yöntemi uygulanmış, bu doğrultuda en uygun parametre setine sahip numune çizelge 5.4.'de sunulmuştur.

Çizelge 5.4. Özgül enerji sönümleme kapasitesi için optimum numunenin ve özgül enerji sönümleme kapasitesinin tahmini

Optimum	Enerji Absorban Kullanımı	Üretim Oryantasyonu	Lattice Tipi
	İçi Köpük Dolu	Yatay	Lattice Tip 2(SC – BCC)
Tahmini değer	31.76		

Kafes yapısı içermeyen referans yapı (Deney 1), ortalama 37.4 J enerji sönümlerken, Lattice Tip 1 kullanılan yapı (Deney 2) ortalama 1072.11 J, Lattice Tip 2 kullanılan yapı (Deney 3) ise ortalama 1853.42 J enerji sönümlemiştir. Bu sonuçlar, Lattice Tip 1 ve Tip 2 yapılarının enerji sönümleme kapasitelerini sırasıyla yaklaşık %2767 ve %4860 oranında artırdığını göstermektedir. Benzer şekilde, özgül enerji sönümleme kapasiteleri

açısından da Lattice Tip 1, referans yapıya göre yaklaşık %933.33, Lattice Tip 2 ise %1329.73 oranında daha yüksek performans sergilemiştir. Bu hesaplamalar, üretim oryantasyonunun etkisi ihmal edilerek yapılmıştır.

Taguchi yöntemi, tek amaçlı bir optimizasyon yaklaşımı sunduğundan, maksimum çarpışma kuvvetinin minimize edilmesine yönelik doğrudan bir optimizasyon sonucu elde edilememiştir. Maksimum kuvvetin düşük olması amacıyla bu yaklaşım, genellikle boş tüplerin kullanımını önermektedir. Diğer yandan, ezilme kuvveti verimi, yatay yönde kuvvetin ne kadar dengeli dağıldığının bir göstergesidir ve yüksek olması istenen bir performans kriteridir. Bu nedenle, çalışmada kuvvet verimi de detaylı olarak değerlendirilmiştir.

Çizelge 5.5. Ezilme kuvveti verimi için s/n faktör seviye tablosu

Seviyeler	**Enerji Absorban Kullanımı**	**Üretim Oryantasyonu**	**Lattice Tipleri**
Seviye 1	34.48	34.37	29.1
Seviye 2	32.65	32.73	33.94
Seviye 3	31.55	31.58	35.65
Fark	2.92	2.78	6.55
Etki sırası	2	3	1

Ezilme kuvveti verimi üzerinde en etkili parametrenin lattice tipi olduğu belirlenmiştir. Bu parametreyi sırasıyla enerji absorban malzeme kullanımı ve üretim oryantasyonu takip etmektedir. Elde edilen bu sıralama, hücre geometrisinin darbe anında yapının yük taşıma karakteristiği üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir.

Faktörlerin ezilme kuvveti verimi için etkileri analiz edildikten sonra, her bir parametre için optimum seviyeler belirlenmiştir. Enerji absorban madde açısından en uygun seviye, absorban madde olmayan seviye 1 olarak tespit edilmiştir. Üretim oryantasyonu bakımından en yüksek verim, dik üretim yönü olan Seviye 1'de elde edilmiştir. Lattice tipi açısından ise Seviye 2 olarak tanımlanan hücre geometrisi en uygun yapı olarak belirlenmiştir. Bu parametre kombinasyonu, test edilen yapılar arasında en yüksek ezilme

kuvveti verimini göstererek , dengeli bir kuvvet eğrisi sunmaktadır.

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda, maksimum ezilme kuvveti verimi %62 olarak hesaplanmış ve bu değer, dik üretim yönünde üretilmiş, lattice tipi 2 olan ve dış yüzeyi PLA ile kaplanmış numunede elde edilmiştir. Diğer parametre kombinasyonlarına ilişkin en yüksek ezilme kuvveti verimini öngörebilmek amacıyla Taguchi tahmin yöntemi uygulanmış, bu kapsamda en uygun parametre setine sahip yapı konfigürasyonu çizelge 5.6.'da gösterilmiştir.

Çizelge 5.6. Ezilme kuvveti verimi için optimum numunenin ve verimin tahmini

Optimum	Enerji Absorban Kullanımı	Üretim Oryantasyonu	Lattice Tipleri
	Yok	Dik	Lattice Tip 2(SC – BCC)
Tahmini değer	73.33		

Bu tez kapsamında, seçici lazer ergitme (SLM) yöntemiyle üretilmiş lattice yapıların çarpışma kutusu uygulamaları özelinde dinamik ve mekanik davranışları, üretim oryantasyonu, lattice hücre tipi ve enerji absorban malzeme kullanımı parametreleri çerçevesinde deneysel olarak değerlendirilmiştir. Dışı PLA ile kaplanmış ve içi poliüretan köpük ile doldurulmuş hibrit yapıların, geleneksel ince cidarlı yapılarla karşılaştırıldığında daha kontrollü deformasyon ve yüksek enerji sönümleme potansiyeli sunduğu gözlemlenmiştir.

Deneysel çalışmalar sonucunda, toplam sönümlenen enerji açısından en belirleyici faktörün lattice tipi olduğu belirlenmiş, bunu üretim oryantasyonu ve enerji absorban malzeme kullanımı takip etmiştir. Özgül enerji sönümleme kapasitesinde ise, numune ağırlığının etkisiyle poliüretan köpük kullanımı daha belirgin hale gelmiş ve bu parametre ikinci sıraya yükselmiştir. Ezilme kuvveti değeri açısından ise, en yüksek değer dik üretim yönünde üretilmiş, lattice tipi 2(SC-BCC) olan ve PLA kaplı numunede elde edilmiştir.

Sonuç olarak, bu tez çalışması; lattice yapıların ve hibrit sistemlerin çarpışma kutularında kullanımına dair deneysel düzeyde önemli veriler sunmuş, üretim sürecinden tasarıma kadar farklı parametrelerin performansa etkisini kapsamlı biçimde ortaya koymuş ve hem akademik hem de uygulamaya dönük anlamlı katkılar sağlamıştır. Elde edilen bulgular,

ileride farklı lattice hücre topolojileri, farklı dolgu malzemeleri (örneğin farklı yoğunlukta köpükler, kompozit dolgular) ve farklı üretim teknolojileri (örneğin EBM, DED vb.) kullanılarak yapılacak çalışmalara öncülük edebilir. Ayrıca bu çalışma, darbe ve çarpışma davranışlarının sayısal modelleme ile desteklendiği, çok kriterli optimizasyon yöntemlerinin uygulandığı ve biyo-esinli yapıların enerji sönümleme sistemlerine entegre edildiği ileri düzey araştırmalara da zemin hazırlayabilir.

KAYNAKLAR

Albak, E. İ. (2020). Effects of sections added to multi-cell square tubes on crash performance. Materials Testing, 62(5), 471–480. https://doi.org/10.3139/120.111506

Albak, E. İ. (2021). *Crashworthiness design for multi-cell circumferentially corrugated thin-walled tubes*. *Thin-Walled Structures, 164,* 107886. https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107886

Albak, E. İ., Solmaz, E., & Öztürk, F. (2022). Çoklu arama stratejileri kullanan çok amaçlı parçacık sürü optimizasyonu yöntemi ile dairesel çok hücreli çarpışma kutusunun optimizasyonu. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 27*(1), 119–134. https://doi.org/10.17482/uumfd.977327

Al-Saedi, D. S. J., Masood, S. H., Faizan-Ur-Rab, M., Alomarah, A., & Ponnusamy, P. (2018). Mechanical properties and energy absorption capability of functionally graded F2BCC lattice fabricated by SLM. *Materials and Design, 144,* 32–44. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.01.059

Altın, M., Halis, S., & Yücesu, H. S. (2017). Investigation of the effect of corrugated structure on crashing performance in thin-walled circular tubes. *International Journal of Automotive Science and Technology, 1*(2), 1–7.

Altın, M., & Yücesu, H. S. (2019). Farklı geometrik yapılardaki çarpışma kutularının içerisine yerleştirilen alüminyum köpük malzemenin enerji sönümleme kapasitesi üzerine etkisinin incelenmesi. *Politeknik Dergisi, 22*(1), 141–148. https://doi.org/10.2339/politeknik.426642

Ashby, M. F. (2006). The properties of foams and lattices. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 364*(1838), 15–30. https://doi.org/10.1098/rsta.2005.1678

Ateş, F., Bakırcı, A., Günaydın, A. C., Ensarioğlu, C., & Çakır, M. C. (2022). Otomobil çarpışma kutularında performans artırıcı yaklaşımların incelenmesi. *BAUN Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 24*(2), 830–856. https://doi.org/10.25092/baunfbed.1025311

Chathbai, A. (2007). *Parametric study of energy absorption characteristics of a rectangular aluminum tube wrapped with E-glass/epoxy* [Yüksek lisans tezi, Wichita State University].

Chen, Y. H., Tam, S. C., Chen, W. L., & Zhengy, H. Y. (1996). Application of Taguchi method in the optimization of laser micro-engraving of photomasks. *International Journal of Materials & Product Technology, 11*, 333–344.

Chua, C. K., & Leong, K. F. (2014). *3D printing and additive manufacturing: Principles and applications* (4th ed.). World Scientific.

Crupi, V., Kara, E., Epasto, G., Guglielmino, E., & Aykul, H. (2017). Static behavior of lattice structures produced via direct metal laser sintering technology. *Materials and Design, 135*, 246–256. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.09.003

Çelik, M. E. (2020). *Karbon kompozit çarpışma kutularında metal takviyesinin çarpışma performansına etkisinin deneysel olarak incelenmesi* [Yüksek lisans tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi].

Çetin, E., & Baykasoğlu, C. (2019). Energy absorption of thin-walled tubes enhanced by lattice structures. *International Journal of Mechanical Sciences, 157–158,* 471–484. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.04.049

Çetin, E. (2020). Kafes yapı dolgulu ince cidarlı tüplerin çarpışma davranışlarının sayısal olarak incelenmesi [Doktora tezi, Hitit Üniversitesi].

Gao, Q., Wang, L., Wang, Y., Guo, F., & Zhang, Z. (2016). Optimization of foam-filled double ellipse tubes under multiple loading cases. *Advances in Engineering Software, 99*, 27–35. https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2016.05.001

Gibson, L. J., Ashby, M. F., & Harley, B. A. (2010). *Cellular materials in nature and medicine*. Cambridge University Press.

Görgülüarslan, R. M., & Güngör, O. U. (2021). Eklemeli imalat ile üretilen latis yapılardaki geometrik değişimlerin konuma bağlı istatistiksel modellenmesi. *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi, 19*(1), 41–48.

Gümrük, R. (2012). *Seçici lazer ergitme yöntemi ile üretilen mikro kafes yapıların mekanik davranışlarının incelenmesi* [Doktora tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi].

Gümrük, R., & Mines, R. A. W. (2013). Compressive behaviour of stainless steel micro-lattice structures. *International Journal of Mechanical Sciences, 68*, 125–139. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2013.01.006

Hou, W., He, P., Yang, Y., & Sang, L. (2023). Crashworthiness optimization of crash box with 3D-printed lattice structures. *International Journal of Mechanical Sciences, 247*, 108198. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2023.108198

Hussein, R. D., Ruan, D., Lu, G., Guillow, S., & Yoon, J. W. (2017). Crushing response of square aluminium tubes filled with polyurethane foam and aluminium honeycomb. *Thin-Walled Structures, 110*, 140–154. https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.10.023

Josupeit, S., Delfs, P., Menge, D., & Schmid, H.-J. (2016). Manufacturability and mechanical characterization of laser sintered lattice structures. *Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings*, 2077–2091.

Kucewicz, M., Baranowski, P., Stankiewicz, M., Konarzewski, M., Płatek, P., & Małachowski, J. (2019). Modelling and testing of 3D printed cellular structures under quasi-static and dynamic conditions. *Thin-Walled Structures, 145*, 106385. https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106385

Leary, M., Mazur, M., Elambasseril, J., McMillan, M., Chirent, T., Sun, Y., Qian, M., Easton, M., & Brandt, M. (2016). Selective laser melting (SLM) of AlSi12Mg lattice structures. *Materials and Design, 98*, 344–357. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.02.127

Li, G., Zhang, Z., Sun, G., Huang, X., & Li, Q. (2015). Comparison of functionally-graded structures under multiple loading angles. *Thin-Walled Structures, 94*, 334–347. https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.04.030

Maskery, I., Aremu, A. O., Simonelli, M., Tuck, C., Wildman, R. D., Ashcroft, I. A., & Hague, R. J. M. (2015). *Mechanical properties of Ti-6Al-4V selectively laser melted parts with body-centred-cubic lattices of varying cell size*. *Experimental Mechanics, 55*(7), 1261–1272. https://doi.org/10.1007/s11340-015-0021-5

Maskery, I., Sturm, L., Aremu, A. O., Panesar, A., Williams, C. B., Tuck, C. J., Wildman, R. D., Ashcroft, I. A., & Hague, R. J. M. (2018). Insights into the mechanical properties of several triply periodic minimal surface lattice structures made by polymer additive manufacturing. *Polymer, 152*, 62–71. https://doi.org/10.1016/j.polymer.2017.11.049

Manufacturing Guide. (n.d.). *Selective laser melting and milling (SLMM)*. https://www.manufacturingguide.com/en/selective-laser-melting-and-milling-slmm *(Erişim tarihi: 26 Mart 2025)*

Meral, G., Sarıkaya, M., & Dilipak, H. (2011). Delme işlemlerinde kesme parametrelerinin Taguchi yöntemiyle optimizasyonu. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 27*(4), 332–338.

Nazir, A., Abate, K. M., Kumar, A., & Jeng, J. Y. (2019). A state-of-the-art review on types, design, optimization, and additive manufacturing of cellular structures. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 104*(9–12), 3489–3510. https://doi.org/10.1007/s00170-019-04085-3

Nikon SLM Solutions. (2024). *AlSi10Mg – Material data sheet* (MDS_AlSi10Mg_2024-06.1_EN). https://nikon-slm-solutions.com/materials/aluminium/

Onaylı, A. (2021). *Lazerle sertleştirme yöntemi kullanılarak bir otomotiv parçasının dayanım özelliklerinin iyileştirilmesi* [Yüksek lisans tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi].

Ozdemir, Z., Hernandez-Nava, E., Tyas, A., Warren, J. A., Fay, S. D., Goodall, R., Todd, I., & Askes, H. (2016). Energy absorption in lattice structures in dynamics: Experiments. *International Journal of Impact Engineering, 89*, 49–61. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2015.10.007

Özer, G. (2020). Eklemeli üretim teknolojileri üzerine bir derleme. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9*(1), 606–621. https://doi.org/10.28948/ngumuh.626011

Qiu, N., Gao, Y., Fang, J., Feng, Z., Sun, G., & Li, Q. (2015). Crashworthiness analysis and design of multi-cell hexagonal columns under multiple loading cases. *Finite Elements in Analysis and Design, 104*, 89–101. https://doi.org/10.1016/j.finel.2015.06.004

Rashed, M. G., Ashraf, M., Mines, R. A. W., & Hazell, P. J. (2016). Metallic microlattice materials: A current state of the art on manufacturing, mechanical properties and applications. *Materials and Design, 95*, 518–533. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.01.146

Read, N., Wang, W., Essa, K., & Attallah, M. M. (2015). Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: Process optimisation and mechanical properties development. *Materials and Design, 65*, 417–424. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.09.044

Simonelli, M., Tse, Y. Y., & Tuck, C. (2014). Effect of the build orientation on the mechanical properties and fracture modes of SLM Ti-6Al-4V. *Materials Science and Engineering: A, 616*, 1–11. https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.07.086

Smith, M., Guan, Z., & Cantwell, W. J. (2013). Finite element modelling of the compressive response of lattice structures manufactured using the selective laser melting technique. *International Journal of Mechanical Sciences, 67*, 28–41. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2012.12.004

Sun, F., Lai, C., & Fan, H. (2016). In-plane compression behavior and energy absorption of hierarchical triangular lattice structures. *Materials & Design, 100*, 280–290. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.023

Sürmen, H. K. (2019). Eklemeli imalat (3B baskı): Teknolojiler ve uygulamalar. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 24*(2), 373–390. https://doi.org/10.17482/uumfd.519147

Şen, B. (2020). *Elektron demeti ile ergitme işleminde üretim oryantasyonunun mekanik özelliklere etkisinin araştırılması* (Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü). Gazi Üniversitesi Tez Merkezi.

Usta, F., Ertaş, O. F., Ataalp, A., Türkmen, H. S., Kazancı, Z., & Scarpa, F. (2019). Impact behavior of triggered and non-triggered crash tubes with auxetic lattices. *Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design, 2*(2), 119–127. https://doi.org/10.1007/s41939-018-00040-z

Wadley, H. N. G. (2002). Cellular metals manufacturing. Advanced Engineering Materials, 4(10), 726–733.

Yap, C. Y., Chua, C. K., Dong, Z. L., Liu, Z. H., Zhang, D. Q., Loh, L. E., & Sing, S. L. (2015). Review of selective laser melting: Materials and applications. *Applied Physics Reviews, 2*(4), 041101. https://doi.org/10.1063/1.4935926

Yıldız, A. R., & Demirci, E. (2015). Yüksek performanslı enerji yutucular ile taşıt çarpışma güvenliğinin geliştirilmesi. *Mühendis ve Makina, 56*(663), 40–45.

Zhang, Z., Guo, C., Wang, L., & Hu, D. (2024). Crashworthiness of bio-inspired hierarchical hybrid multi-cell tubes under axial crushing. *Engineering Failure Analysis, 166*, 108886. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108886

Zhao, M., Zhang, D. Z., Liu, F., Li, Z., Ma, Z., & Ren, Z. (2020). Mechanical and energy absorption characteristics of additively manufactured functionally graded sheet lattice structures with minimal surfaces. *International Journal of Mechanical Sciences, 167*, 105262. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105262

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı	: Mehmet Mert KOTAMAN
Doğum Yeri ve Tarihi	: Bursa – 11.05.1998
Yabancı Dil	: İngilizce
Eğitim Durumu	
Lise	: Mudanya Sami Evkuran Anadolu Lisesi (2012-2015) Özel Mavi Deniz Anadolu Lisesi (2015-2016)
Lisans	: Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği (2018-2022) Uludağ Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği (Çift anadal programı)(2019-2024)
Yüksek Lisans	: Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği (2022-2025)
Çalıştığı Kurum(lar)	:Bosch Fren Sistemleri Bakım Mühendisi (2022-2023) Coşkunöz Kalıp Makina Arge İleri Analiz ve Test Mühendisi (2023-2024) Eklemeli İmalat ve Analiz Mühendisi (2024 – Devam Ediyor)
İletişim (e-posta)	: mertkotaman@gmail.com

Akademik çalışmalar :

Kotaman, M. M., & Yıldız, A. R. (2025, Mart 8–9). *Ürün tasarım süreçlerinde yenilikçi yapıların dinamik ve mekanik davranışının incelenmesi*. 6. Uluslararası Mühendislik ve Fen Bilimleri Kongresi Bildiri Kitabı (ss. 305–310). ISBN: 978-625-6471-55-9