
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

YÜKSEK HIZLI DARBE ETKİSİNDEKİ KAFES YAPILARIN MEKANİK DAVRANIŞININ DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Atakan ERATA

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EKİM 2024

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Atakan ERATA

24/10/2024

YÜKSEK HIZLI DARBE ETKİSİNDEKİ KAFES YAPILARIN MEKANİK DAVRANIŞININ DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Atakan ERATA

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ekim 2024

ÖZET

Metal kafes yapılar, yüksek özgül mukavemeti ve özelleştirilebilir mekanik karakteristikleri gibi üstün mekanik özellikleri ile dikkat çekerler. Havacılık, otomotiv ve biyomedikal sektörlerinde enerji absorpsiyon elemanları olarak kullanımının yaygınlaşacağı öngörülmektedir. Kafes yapılar, şok dalgalarının yayılımını istenilen gereksinimlere göre özelleştirme ve darbe enerjisini yüksek seviyede absorbe edebilme açısından ideal bir yapı sunar. Bu çalışma farklı kafes yapılarının enerji absorbe edebilme yeteneklerini araştırmayı amaçlamaktadır. Çalışma kapsamında sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak yüksek hızda çarpışma analizleri gerçekleştirilmiştir. Kafes yapılarının enerji absorbe edebilme yeteneklerini etkileyen parametreler araştırılmıştır. Bu çalışma içerisinde, her farklı kafes tipi için homojen ve kademeli kafes yapısı tasarlanmıştır. Kafes yapıları Ntopology programında tasarlanmıştır. Dört kafes tipi, Ntopology kütüphanesindeki birim hücre yapıları (BCC, Fluorite, Kelvin ve Truncated Octahedron) kullanılarak tasarlanmıştır. Son tip kafes yapısı ise bu çalışmaya özgün olarak Solidworks ve Ntopology programları kullanılarak özel olarak tasarlanmıştır. Analiz sonuçlarının doğru bir şekilde değerlendirilmesi için tüm kafes yapıları aynı bağıl yoğunluk ve dış boyutlara sahip olarak tasarlanmıştır. Tüm tasarımlar için aynı sınır koşulları altında Ansys'te explicit analizler gerçekleştirilmiştir. Malzeme olarak AlSi10Mg seçilmiş ve malzemenin yüksek hızdaki çarpışmalarında deformasyon hızına duyarlılığını hesaba katmak için Johnson-Cook malzeme modeli kullanılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda, yüksek hızlı çarpışmaya uğrayan kafes yapılarının enerji absorbe edebilme yetenekleri ve çarpışma sonucunda oluşan kuvvet değerleri incelenmiştir. Aynı bağıl yoğunluk ve dış boyutlara sahip farklı tür kafes yapılarının yüksek hızlı çarpışmalarda farklı tepkiler ve farklı enerji absorpsiyon sonuçları verdikleri gözlemlenmiştir.

Bilim Kodu	:	91421
Anahtar Kelimeler	:	Kafes yapıları, enerji absorpsiyon, çarpışma analizi, AlSi10Mg, eklemeli imalat
Sayfa Adedi	:	79
Danışman	:	Prof. Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF MECHANICAL BEHAVIOR OF LATTICE STRUCTURES UNDER HIGH SPEED IMPACT

(M. Sc. Thesis)

Atakan ERATA

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

October 2024

ABSTRACT

Metal lattice structures are notable for their superior mechanical properties, such as high functionality, specific strength, and customizable mechanical characteristics. Their use as energy absorbers is significant in the aerospace, automotive, and biomedical sectors. Lattice structures offer an ideal framework for customizing the propagation of shock waves and absorption of impact energy. This study aims to investigate the impact of different lattice structures on their energy absorption capabilities by conducting high-impact analyses using finite element software. Within this study, high-impact velocity was applied to lattice structures to examine their energy absorption capabilities. Additionally, parameters influencing the energy absorption capabilities of lattice structures were investigated. Within this study's scope, uniform and graded lattice structures were designed for each lattice type. The lattice structures were designed using the Ntopology software. Four lattice types were designed using existing unit cell structures (BCC, Fluorite, Kelvin Cell, and Truncated Octahedron) from the Ntopology library while a special lattice structure was designed using Solidworks and Ntopology. Explicit analyses were conducted in Ansys under the same boundary conditions for all designs. AlSi10Mg was selected as the material, and the Johnson-Cook material model was used to account for the material's sensitivity to deformation rate during high-speed collisions. As a result of this study, the energy absorption capabilities and the force values resulting from the collisions of lattice structures subjected to high-speed impacts were examined. It was observed that different types of lattice structures with the same relative density and external dimensions exhibited different responses and energy absorption results during high-impact loads.

Science Code	:	91421
Key Words	:	Lattice structures, energy absorption, impact analysis, AlSi10Mg, additive manufacturing
Page Number	:	79
Supervisor	:	Prof. Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK

TEŞEKKÜR

Tez süreci boyunca sunduğu değerli desteklerinden, anlayışından ve rehberliğinden dolayı danışman hocam Prof. Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK'e, yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. Muharrem PUL ve Dr. Duran KAYA hocalarıma ve manevi olarak her zaman destekçim olan aileme teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT..... v

TEŞEKKÜR..... vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ..... ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ..... xii

SİMGELER VE KISALTMALAR..... xv

1. GİRİŞ..... 1

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI..... 5

2.1. Kafes Yapıların Tanımı..... 5

2.2. Kafes Yapıların Uygulama Alanları..... 8

2.3. Kafes Yapılar Üzerine Gerçekleştirilen Çalışmaların İncelenmesi..... 10

2.4. Split Hopkinson Basınç Çubuğu Testi..... 17

2.5. İnfiltrasyon ve Basınçsız İnfltrasyon Yöntemi..... 20

3. MALZEME VE YÖNTEM..... 23

3.1. AlSi10Mg Malzeme Özellikleri..... 23

3.2. Johnson-Cook Malzeme Modeli..... 25

3.3. Ntopology..... 27

3.4. Özel Kafes Yapı Tasarımı..... 34

3.5. Ansys Programında Çarpışma Analizinin Kurulumu..... 40

3.6. Kafes Yapılarının Üretimi..... 43

3.7. Zamak İnfiltrasyon İşlemi ve Basma Testleri..... 44

3.8. Deneysel Çarpışma Testi..... 47

Sayfa

4. TARTIŞMA VE BULGULAR…..... 49

4.1. Homojen Kafes Yapılarının Kuvvet – Deformasyon Grafikleri..... 49

4.2. Kafes Yapılarının Hız – Zaman Grafikleri..... 52

4.3. Enerji Absorpsiyon Değerleri ve ilk Çarpışma Kuvveti ilişkisi..... 57

4.4. Homojen Kafes Yapılarının Karşılaştırılması…..... 61

4.4.1. BCC kafes yapısına göre karşılaştırma..... 61

4.4.2. Homojen BCC ve özel kafes yapılarının kesit alanları ve enerji absorpsiyon değerlerinin karşılaştırılması..... 61

4.4.3. Homojen kafes yapılarının kesit alanları değerleri ile enerji absorpsiyon ve çarpışma kuvveti değerlerinin karşılaştırılması..... 63

4.4.4. Homojen kafes yapılarının gerilme değerlerinin karşılaştırılması..... 65

4.5. Deneysel Testler ile Bilgisayar Analizlerinin Karşılaştırılması..... 66

5. SONUÇ VE ÖNERİLER..... 71

KAYNAKLAR..... 75

ÖZGEÇMİŞ..... 78

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1 AlSi10Mg Johnson-Cook malzeme parametreleri……... 26

Çizelge 3.2. Kafes yapılarının yükseklik boyunca 0,5 mm adımlardaki kesit alanları (mm2)..... 38

Çizelge 3.3. İnfiltrasyon sonucu kafes yapılarının basma testi sonuçları…….…..... 46

Çizelge 4.1. Kafes yapılarının ilk çarpışma kuvveti – enerji absorpsiyon değerleri….. 57

Çizelge 4.2. Deneysel test sonucu elde edilen değerler……..……..... 66

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Kafes yapılarının sınıflandırılması (a) rastgele kafes yapıları, (b) periyodik kafes yapıları, (c) konformal kafes yapıları..... 6

Şekil 2.2. Literatürdeki bazı kiriş elemanlı kafes yapıları..... 7

Şekil 2.3. SLM yöntemi ile üretim tablasına göre farklı açılara sahip kiriş üretimi..... 8

Şekil 2.4. Kafes yapılarının kullanım alanları (a) helikopter parçası, (b) filtre parçası, (c) göğüs kafesi desteği parçası..... 9

Şekil 2.5. (a) Oktet hücre yapısının ve deformasyon modunun şematik diyagramı; (b) BCC hücre yapısının ve onun deformasyon modunun şematik diyagramı; (c) Octet ve BCC yapılarının gerilme-gerinim eğrilerinin karşılaştırılması..... 10

Şekil 2.6. Farklı mesh boyutları için gerilme-gerinim grafiği (0,6- 0,8- 1,2- 1,6 mm).. 11

Şekil 2.7. (a–c) BCC kafes yapıları (d–f) TPMS tabanlı BCC kafes yapıları..... 11

Şekil 2.8. Hibrit kafes yapı tasarımı..... 14

Şekil 2.9. Düşme testi sonucu oluşan kafes yapı görüntüsü..... 15

Şekil 2.10. FDM ile üretilmiş kafes yapılar (a) Kübik (b) Petek yapı (c) BCC (d) PG80..... 16

Şekil 2.11. PDMS/PLA infiltrasyon işlemi..... 17

Şekil 2.12. Split-Hopkinson basınç çubuğu testi..... 19

Şekil 3.1. Ntopology programı ile tasarlanan bazı parçalar..... 29

Şekil 3.2. Ntopology kutu (box) oluşturma..... 30

Şekil 3.3. Ntopology kutu (box) oluşturmak için değer girme işlemi..... 30

Şekil 3.4. Ntopology birim hücre oluşturma..... 31

Şekil 3.5. Ntopology kafes yapı oluşturma..... 32

Şekil 3.6. Soldan sağa sırayla homojen BCC, Fluorite, Truncated Octahedron, Kelvin kafes yapıları..... 32

Şekil 3.7. Ntopology kademeli kafes yapı oluşturma..... 34

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.8. Soldan sağa sırayla kademeli BCC, Fluorite, Truncated Octahedron, Kelvin kafes yapıları..... 34

Şekil 3.9. Kafes yapısı düğüm bölgeleri..... 36

Şekil 3.10. Özel birim hücre kiriş tasarımı..... 37

Şekil 3.11. Özel birim hücre tasarımı..... 37

Şekil 3.12. Solidworks programında tasarlanan özel kafes yapısı..... 38

Şekil 3.13. Ntopology programında düzenlenen özel kafes yapısının son hali..... 38

Şekil 3.14. Ansys AlSi10Mg malzeme değerlerinin girişi..... 40

Şekil 3.15. Parça üzerine malzeme atama işlemi..... 41

Şekil 3.16. Parça temas yüzeylerinin belirlenmesi..... 42

Şekil 3.17. Mesh yapısı oluşturma işlemi..... 42

Şekil 3.18. Analiz kurulumu son işlemleri..... 43

Şekil 3.19. Çalışma kapsamında AlSi10Mg malzemeden üretilen kafes yapıları..... 44

Şekil 3.20. İnfiltrasyon işlemi ilk aşama..... 45

Şekil 3.21. İnfiltrasyon işlemi sonucu oluşan ikinci aşama..... 45

Şekil 3.22. Kademeli özel ve kademeli Truncated Octahedron kafes yapılarının infiltrasyon sonucu..... 46

Şekil 3.23. Zamak infiltrasyon işlemi yapılmış kafes yapısına basma testinin gerçekleştirilmesi..... 46

Şekil 4.1. BCC – Kademeli BCC yapılarının kuvvet-deformasyon grafiği..... 49

Şekil 4.2. Fluroite – Kademeli Fluorite yapılarının kuvvet-deformasyon grafiği..... 49

Şekil 4.3. Kelvin – Kademeli Kelvin yapılarının kuvvet-deformasyon grafiği..... 50

Şekil 4.4. Truncated Octahedron – Kademeli Truncated Octahedron yapılarının kuvvet-deformasyon grafiği..... 50

Şekil 4.5. Özel Kafes – Kademeli Özel Kafes yapılarının kuvvet-deformasyon grafiği..... 51

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.6. BCC yapısının hız – zaman grafiği..... 52

Şekil 4.7. Kademeli BCC yapısının hız – zaman grafiği..... 52

Şekil 4.8. Fluorite yapısının hız – zaman grafiği..... 53

Şekil 4.9. Kademeli Fluorite yapısının hız – zaman grafiği..... 53

Şekil 4.10. Kelvin yapısının hız – zaman grafiği..... 54

Şekil 4.11. Kademeli Kelvin yapısının hız – zaman grafiği..... 54

Şekil 4.12. Truncated Octahedron yapısının hız – zaman grafiği..... 55

Şekil 4.13. Kademeli Truncated Octahedron yapısının hız – zaman grafiği..... 55

Şekil 4.14. Özel kafes yapısı..... 56

Şekil 4.15. Kademeli özel kafes yapısı..... 56

Şekil 4.16. Kademeli yapıya geçildiği durumda enerji ve kuvvet değişimi..... 58

Şekil 4.17. BCC yapısına göre homojen kafes yapılarının kuvvet – enerji değişimi..... 60

Şekil 4.18. BCC yapısına göre diğer yapıların kuvvet – deformasyon yüzdesi..... 61

Şekil 4.19. BCC ve özel kafes yapısının kesit alanlarının karşılaştırılması..... 62

Şekil 4.20. Özel kafes yapısının çarpışma esnasında oluşan görüntüsü..... 63

Şekil 4.21. BCC – Fluorite yapılarının kesit alan grafiği..... 64

Şekil 4.22. Kafes yapılarının gerilme dağılımı (a) Fluorite, (b) Kelvin, (c) Truncated Octahedron, (d) Özel Kafes, (e) BCC..... 65

Şekil 4.23. Homojen kafes yapılarının deneysel test sonuçları..... 67

Şekil 4.24. Kademeli kafes yapılarının deneysel test sonuçları..... 68

Şekil 4.25. Deneysel test sonucu bazı kafes yapılarının son durumu..... 69

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	**Açıklamalar**
Al	Aluminyum
T_m	Ergime sıcaklığı
C	Gerinim hız sabiti
Mg	Magnezyum
A	Malzemenin akma gerilmesi
Mpa	Megapaskal
T	Mevcut sıcaklık
B	Pekleşme modülü
n	Pekleşme üssü
ϵ_p	Plastik gerinim
$\dot{\epsilon}$	Plastik gerinim hızı
$\dot{\epsilon}$	Referans gerinim hızı
T_0	Referans sıcaklık
M	Sıcaklık sabiti
Si	Silisyum
%	Yüzde

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
BCC	Body centered cubic
CAD	Computer aided design
EBM	Electron beam melting
FDM	Fused deposition modeling
SLM	Selective Laser Melting
TPMS	Triply periodic minimal surfaces

1. GİRİŞ

Kafes yapılar, günümüzde çeşitli mühendislik alanlarında, özellikle enerji absorpsiyonu açısından önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Bu yapıların, özellikle yüksek hızda çarpışma durumlarında enerji absorpsiyonu ve yapısal bütünlük sağlama potansiyeli, otomotiv, havacılık ve savunma sanayii gibi sektörlerde büyük ilgi görmektedir. Kafes yapıların enerji absorpsiyon kapasiteleri, hücresel dizilimler, malzeme özellikleri, darbe hızları ve geometrik parametreler gibi birçok faktörden etkilenir. Bu çalışmada, farklı kafes yapılarının enerji absorpsiyonu özellikleri üzerine yapılan araştırmalar ele alınacak ve bu yapıların birbirleri ile karşılaştırmaları yapılacaktır [1–3].

Kafes yapılar, karmaşık iç yapılarının üretiminde esneklik sağladığı için genellikle eklemeli imalat (additive manufacturing) yöntemleri ile üretilmektedir. Özellikle seçici lazer ergitme (Selective Laser Melting, SLM) ve elektron ışını ile ergitme (Electron Beam Melting, EBM) teknikleri bu alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemler metal tozlarının ardışık katmanlar halinde ergitilerek yapıların oluşturulmasını sağlar [1,4].

Katmanlı üretim, CAD verileri kullanarak karmaşık geometrilerin üretimini mümkün kılan bir teknolojidir. Eklemeli imalatın avantajları arasında tasarım özgürlüğü, hızlı prototipleme, düşük atık üretimi ve özelleştirilmiş üretim süreçleri bulunmaktadır [5]. Katmanlı üretimin en büyük avantajlarından biri, geleneksel üretim yöntemlerinde zor veya maliyetli olan parça üretimlerinin bu yöntemle daha verimli ve ekonomik bir şekilde yapılabilmesidir. Ayrıca bu sayede tasarımcılar ve mühendisler daha hafif, dayanıklı ve daha karmaşık parçalar tasarlayabilirler. Bu yöntem aynı zamanda prototip üretim süreçlerini hızlandırır ve kişiye özel üretim imkanları sunmaktadır [6].

Geometrik olarak kafes yapı türleri araştırıldığında genel olarak kiriş elemanlı ve yüzey elemanlı (TPMS- Triply Periodic Minimal Surface) olarak iki tür kafes yapısı olduğu görülmüştür. Kiriş elemanlı kafes yapılar, düğüm noktalarında birbirine bağlanan ince düz elemanlardan (struts) oluşur. Bu yapılar, genellikle eksenel yükler altında yüksek dayanıklılık ve sertlik sağlarlar. Kiriş elemanlı yapılar, bükülme (bending-dominated) ve gerilme (stretch-dominated) modlarına göre çalışır [7,8]. TPMS yapıları, sürekli eğri yüzeylerden oluşur ve kendine ait bir yüzey alanını minimumda tutar. Bu yapılar, homojen

kalınlık dağılımına ve sürekli eğri yüzeylere sahiptir [9]. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde TPMS yapıların enerji absorpsiyon kabiliyetinin kiriş elemanlı kafes yapılarına göre daha avantajlı olduğu görülmektedir [10–12]. TPMS yapılarının sürekli ve eklemsiz yüzeyleri sayesinde gerilme konsantrasyonlarını azaltarak yük altında daha homojen dağılım sağlarlar. Yüksek densifikasyon (densification) gerinimleri, TPMS yapılarının düşük yoğunluk aralıklarında bile üstün enerji absorpsiyonu sunmasını mümkün kılar. Ayrıca bu yapılar yüksek plateau gerilmesi ve stabil çökme mekanizmaları sergileyerek yük altında daha etkin enerji absorpsiyonu gerçekleştirirler. Kiriş elemanlı kafes yapılarının ise düğüm noktalarında gerilme yoğunluğu oluşabilmektedir [10,12].

Yukarıdaki çalışmalardaki sonuçlara göre kiriş elemanlı kafes yapılarındaki gerilme yoğunluğu oluşumundan kaynaklı olarak enerji absorpsiyon kabiliyetleri TPMS yapılarına göre daha az değer göstermektedir. Bu çalışma kapsamında kiriş elemanlı kafes yapılarında oluşan gerilme yoğunlukları azaltılarak daha yüksek enerji absorpsiyon ve mekanik kuvvetlere sahip kafes yapısı geliştirmeye çalışılmıştır. Ayrıca literatürdeki kiriş elemanlı kafes yapıları ve bu çalışma için geliştirilen kafes yapı üzerine çarpışma analizleri yapılarak bu yapıların birbirleri ile çarpışma kuvveti ve enerji absorpsiyon açısından karşılaştırmaları yapılmıştır.

Araştırmanın amacı

Bu çalışmanın amacı, eklemeli imalat yöntemiyle üretilen AlSi10Mg malzemesinden üretilen farklı kafes yapılarının yüksek hızlı çarpışmalar sırasında enerji absorpsiyonu ve tepki kuvvetlerini analiz etmektir. Bu araştırma, bu yapılar arasındaki enerji absorpsiyon ve çarpışma kuvvetlerini incelemek ve bu kafes yapılarını birbirlerine göre avantaj-dezavantajlarını karşılaştırmaktır. Ayrıca bu çalışma kapsamında yüksek enerji absorpsiyon ve yüksek rijitliğe sahip kafes yapısı geliştirilmeye çalışılacaktır.

Araştırmanın önemi

Kafes yapılar, enerji absorpsiyonu açısından son yıllarda ilgi görmekte ve mühendislik alanlarında geniş uygulama potansiyeline sahip yapılardır. Özellikle gözenekli ve çok hücreli yapılar olarak bilinen bu yapılar, yüksek enerji absorpsiyon kapasitesi ve hafiflik gibi üstün özellikleri sayesinde mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Örneğin, otomotiv mühendisliğinde çarpışma kutusu, motor kaputu ve gövde yapısı olarak; havacılık mühendisliğinde ise chiral truss-core kanat profili ve titreşim absorbe eden yapı olarak kullanılırlar ayrıca biyomedikal mühendislik alanlarında yenilikçi çözümler sunmaktadırlar. Birim kütle başına yüksek enerji absorpsiyon kapasitesine sahip olmaları, bu yapıların enerji absorpsiyon özellikleri üzerine yapılan araştırmaların artmasına neden olmuştur. Kafes yapılar çarpışma anlarında oluşturduğu enerji dağılımı ve enerji emilimi açısından büyük bir öneme sahiptir. Birim kütle başına yüksek enerji absorpsiyon kapasitelerine sahip olmalarından dolayı da birçok sektörde ilgi odağı olmuştur [13,14].

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Kafes Yapıların Tanımı

Kafes yapılar, birim hücrelerden oluşmaktadır. Hücre kelimesinin kökeni, kapalı alan anlamına gelen Latince cella'dan gelir. Şu an ki dilimizde hücresel katı olarak isimlendirdiğimiz bu yapılar, kirişler (strut) ya da yüzeylerin birleşiminden oluşmaktadır. İnsanlar yüzyıllardır bu doğal hücresel malzemeleri kullanmaktadır. Örneğin, Mısır piramitlerinde 5000 yıllık ahşap eserler bulunmuş ve Roma döneminde şarap şişeleri için mantar tıpalar kullanılmıştır. Günümüzde ise insan yapımı hücresel katılar, hafif yapısal bileşenler için kullanılan petek benzeri malzemeler ve polimer köpükler gibi örneklerle daha yaygın hale gelmiştir [15].

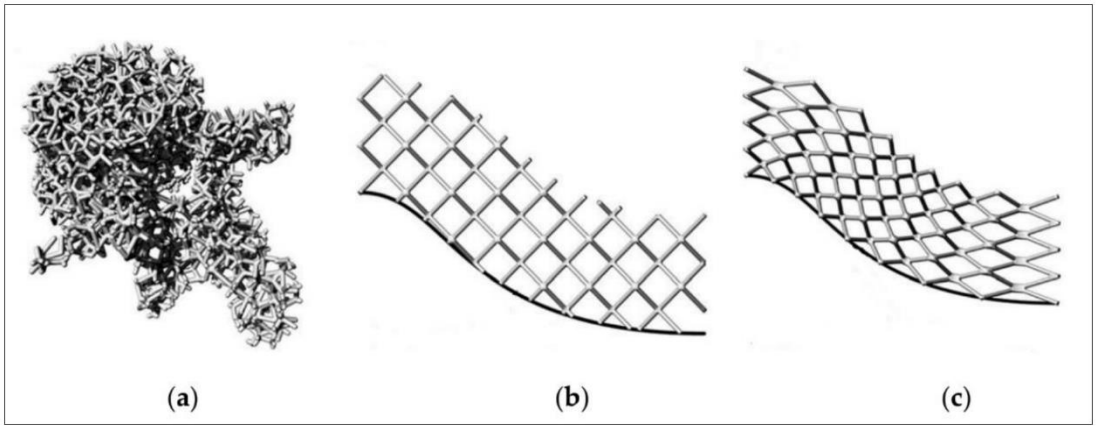
Kafes yapılar, genellikle birim hücrelerinin düzenlenme biçimine göre farklı kategorilere ayrılır. Bu sınıflandırma, rastgele kafes yapıları, periyodik kafes yapıları ve konformal kafes yapıları olarak üç ana kategoriye ayrılabilir [16].

Rastgele kafes yapıları veya düzensiz kafes yapıları: Bu kategori, birim hücrelerinin rastgele bir şekilde tasarım alanına dağıldığı ve farklı topolojik yapılar ve boyutlara sahip olduğu yapıları ifade eder. Bu tür yapılar belirli bir düzen veya tekrarlanan desen içermezler [16].

Periyodik kafes yapıları: Periyodik kafes yapıları, belirli bir şekle, topolojiye ve boyuta sahip birim hücrelerinin üç boyutlu uzayda periyodik olarak tekrarlanan düzenlemeler ile oluşturulan yapıları ifade eder. Bu yapılar düzenli ve tekrarlanabilir bir yapıya sahiptir [16].

Konformal kafes yapıları: Bu yapılar, her birim hücresinin aynı topolojiye sahip olduğu ancak boyutlarının farklı olduğu yapıları ifade eder. Yani, her hücre aynı şekle sahip olsa da boyutları değişkenlik gösterebilir [16].

Şekil 2.1'de yukarıda açıklanmış olan kafes yapı türlerinin görselleri verilmiştir.



Şekil 2.1. Kafes yapılarının sınıflandırılması (a) rastgele kafes yapıları, (b) periyodik kafes yapıları, (c) konformal kafes yapıları

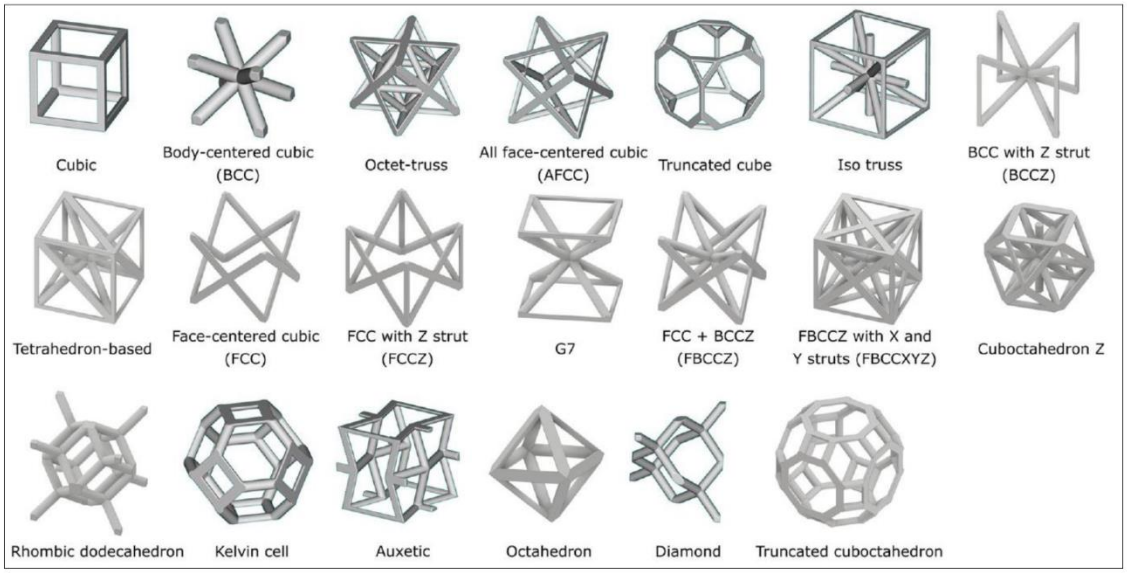
Kafes yapılar birim hücre düzenlenme biçimine göre sınıflandırılabileceği gibi geometrik ve yapısal konfigürasyonlarına göre de sınıflandırılabilir.

Kafes yapılar, 2D ve 3D yapılar olarak iki ana kategoriye ayrılır. 2D kafes yapılar, honeycomb yapıları, auxetic yapılar ve hiyerarşik 2D kafes yapılar olarak üç ana başlık altında toplanabilir. Honeycomb yapıları, hücre şekillerine göre hexagonal ve non-hexagonal olarak alt sınıflara ayrılır. Non-hexagonal honeycomb yapılar ise üçgen, dikdörtgen, elmas, kagome gibi farklı şekillerde olabilir [17,18].

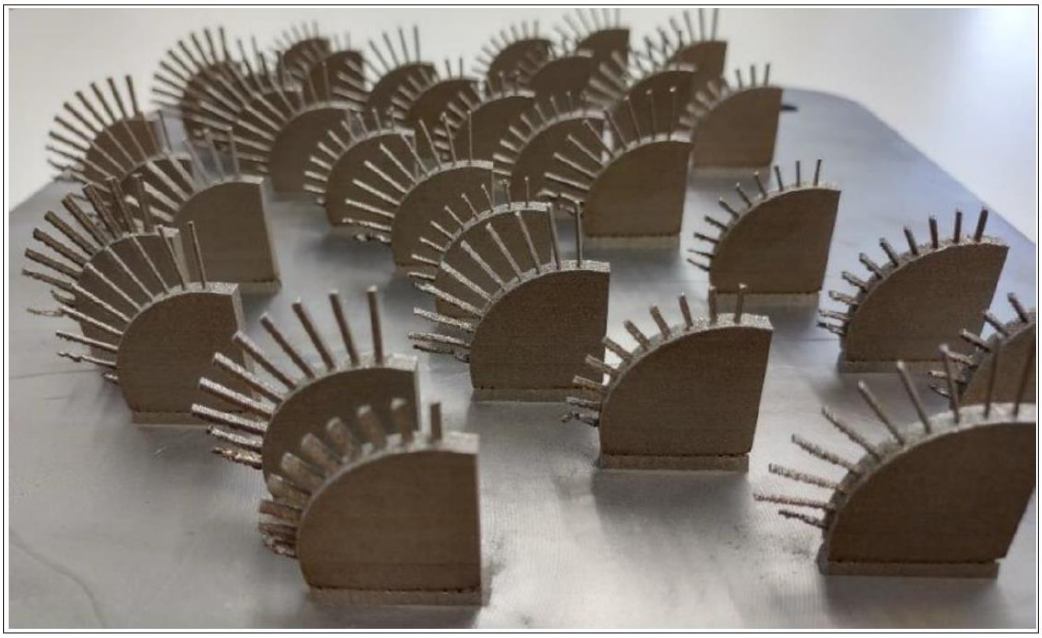
3D kafes yapılar ise kiriş elemanlı ve yüzey elemanlı kafes yapılar olarak ikiye ayrılabilir. Kiriş elemanlı kafes yapılarından bazıları, simple cubic (SC), body-centered cubic (BCC), face-centered cubic (FCC) gibi hücre konfigürasyonlarını içerir. Yüzey elemanlı kafes yapılar eğri yüzeylerden oluşur ve genellikle minimum yüzey alanına sahip üçlü periyodik yapılar olarak bilinir. Bu yapılar, diamond, gyroid, schwarz gibi yapıları içerir [9,18,19] .

Bu çalışma kapsamında kiriş elemanlı kafes yapılar üzerine çalışma yapılacaktır. Şekil 2.2'de görüleceği üzere literatürde çok fazla çeşitte kiriş elemanlı kafes yapı türleri bulunmaktadır. Çalışma kapsamında BCC, Fluorite, Truncated Octahedron ve bu tez çalışması için geliştirilmiş olan özel kafes yapısı üzerine çarpışma analizi gerçekleştirilmiştir. Kafes yapıların seçiminde özellikle üretilebilir olması göz önüne alınmıştır. Kafes yapıları FDM, SLM gibi yöntemlerle üretilebilmektedir. Her iki yöntemi için de kiriş elemanların üretim için gereken minimum açı değeri vardır. Yere paralel yatay kiriş elemanlara sahip kafes yapıların üretimi için ek desteklere ihtiyaç duyulmaktadır. Kafes

yapıların üretimi için ek destekler atılması, üretim sonrasında desteklerin temizleme ihtiyacı nedeniyle zorluk çıkarmaktadır. Bu nedenle bu çalışma içerisinde yere göre belirli derecede açı yapan kiriş elemanlarına sahip kafes yapıları kullanılmıştır. Kessler, Balc, Gebhardt ve Abbas tarafından gerçekleştirilen çalışmalardan elde edilen bulgulara göre SLM ile üretilen ve yere göre 20 dereceden az açıya sahip kiriş elemanlarda kalite kayıpları görülmüştür [20]. Şekil 2.3'te bu çalışmada farklı açılarda üretilen kiriş elemanları görseli paylaşılmıştır. Bu görselden de görüleceği üzere yere göre paralel olan yani sıfır derece açıya sahip kirişler destek elemansız üretilememektedir. Bu nedenle bu çalışma içerisinde SLM ya da FDM yöntemlerine uygun olacak şekilde yere göre belli derecelerde açı yapan kiriş elemanlarına sahip kafes yapıları kullanılmıştır.



Şekil 2.2. Literatürdeki bazı kiriş elemanlı kafes yapıları [9]



Şekil 2.3. SLM yöntemi ile üretim tablasına göre farklı açılara sahip kiriş üretimi [20]

2.2. Kafes Yapıların Uygulama Alanları

Kafes yapılar, mühendislik alanlarında yüksek mukavemet-ağırlık oranları, malzeme kullanımında verimlilik ve belirli mekanik, optik ve elektriksel özelliklere sahip olma avantajları nedeniyle büyük ilgi görmektedir. Bu yapılar, otomotiv, havacılık ve biyomedikal mühendislik gibi alanlarda yaygın olarak araştırılmaktadır.

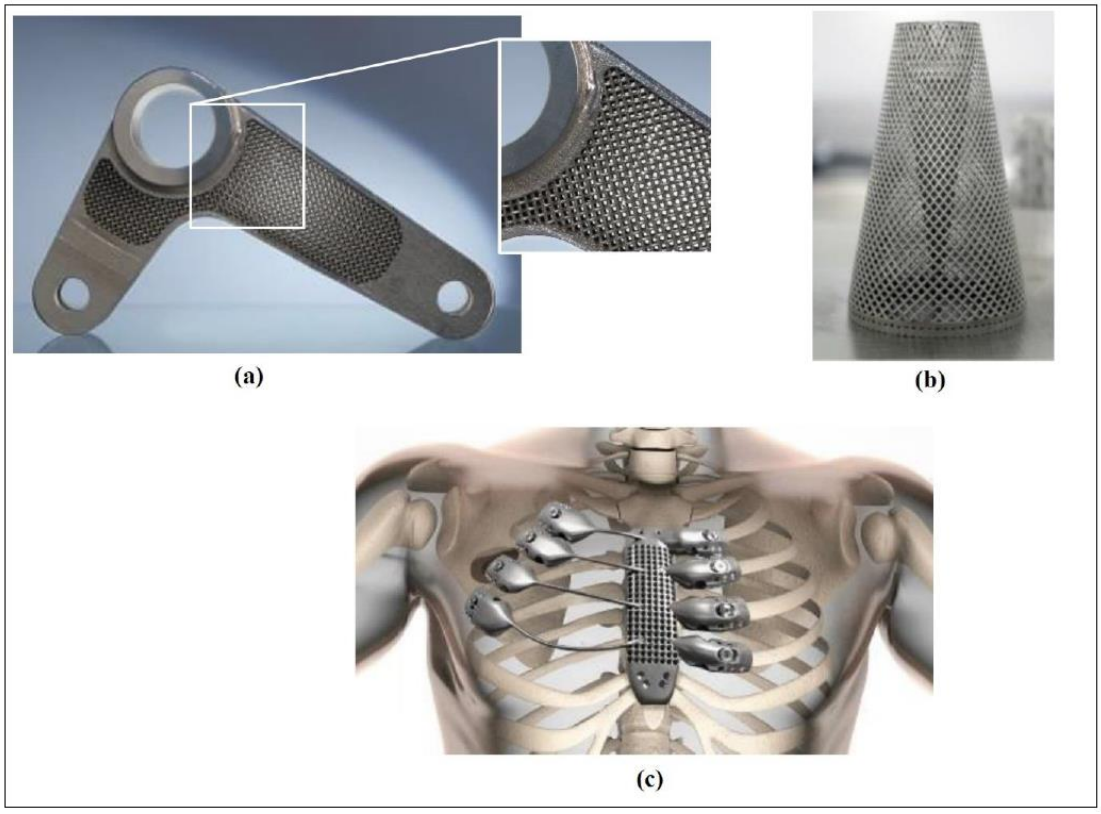
Havacılık alanında, kafes yapılar uçak parçalarının tasarımında ve üretiminde kullanılır. Bu yapılar hafif tasarımları sayesinde uçakların toplam ağırlığını azaltarak yakıt verimliliğini artırır ve daha fazla kargo taşıma kapasitesi sağlar. Uçak motor bileşenleri, türbin kanatları, kompresör kanatları ve yanma odaları gibi parçalar, yüksek çalışma sıcaklıkları ve yükler için uygun olan kafes yapılarla üretilir. Ayrıca kafes yapılar, motor bileşenleri ve ısı değiştiriciler gibi yüksek sıcaklık ve yük gerektiren parçaların üretiminde de kullanılır [21,22].

Otomotiv mühendisliğinde kafes yapılar, hafif araç yapılarının, şasi, çerçeve ve gövde panellerinin tasarımında kullanılır. Bu yapılar araçların toplam ağırlığını azaltarak yakıt tüketimini ve emisyonları düşürür, manevra kabiliyetini artırır ve yük taşıma kapasitesini yükseltir. Ayrıca darbe enerjisini emme ve dağıtma yetenekleri sayesinde otomotiv güvenlik sistemlerinde kullanılır. Örneğin, yarış arabalarının süspansiyon sistemlerinde iç kafes

yapılar kullanılarak ağırlık azaltılarak aracın performansı arttırılabilmektedir. Ayrıca, kafes yapılar geniş yüzey alanı sayesinde ısı transfer verimliliğini artırarak silindir kapakları gibi parçalarda da kullanılır [21,22].

Biyomedikal alanında kafes yapılar, ortopedik implantlar ve doku iskeleleri gibi parçaların tasarımında kullanılır. Bu yapıların mekanik özellikleri insan kemik yapısına benzeterek implantın dayanıklılığını arttırılır ve bu sayede doku entegrasyonu desteklenir. Vidalar ve kalça protezleri gibi ürünlerde mekanik stabilite sağlamak ve uzun süreli doku entegrasyonunu teşvik etmek için kullanılırlar [21,22].

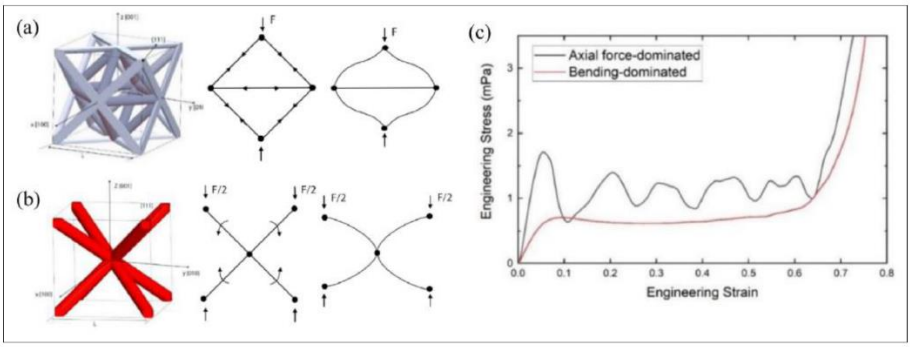
Şekil 2.4'te kafes yapıların kullanıldığı tasarımlara ait görseller verilmiştir.



Şekil 2.4. Kafes yapılarının kullanım alanları (a) helikopter parçası, (b) filtre parçası, (c) göğüs kafesi desteği parçası [21,22]

2.3. Kafes Yapılar Üzerine Gerçekleştirilen Çalışmaların İncelenmesi

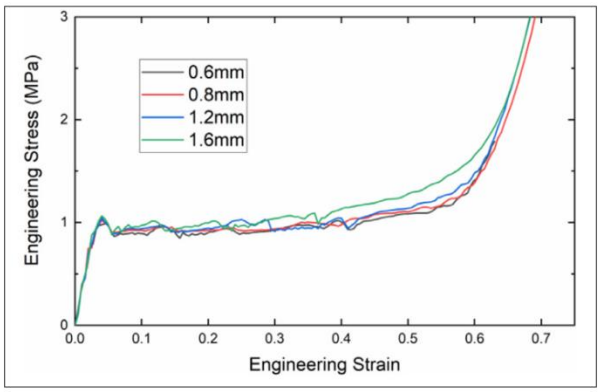
Sun ve diğerleri enerji absorpsiyon uygulamaları için eklemeli imalat yöntemi ile üretilen polimerik hibrit kafes yapılarının modellemesini incelemişlerdir. Çalışma kapsamında octet yapısı ele alınmıştır. Octet yapısı gerilme-baskın (stretch-dominated) bir yapı göstermektedir. Gerilme baskın yapılar yüksek rijitliğe sahip yapılardır. BCC gibi yapılar ise eğilme-baskın (bending-dominated) yapılardır. Şekil 2.5'de görüleceği üzere bu iki yapının gerilme-gerinim eğrisi gösterilmiştir. Octet yapısının BCC yapısına göre daha kararsız olduğu görülmektedir. Eğilme-baskın yapılar daha esnek ve eğilmeye yatkın bir kafes yapısı iken gerilme-baskın yapılar daha yüksek rijitliğe sahip kafes yapılarıdır. Eğilme baskın yapıların gerilme-gerinim eğrilerinde, başlangıçtaki akma noktasından sonra gerilme yavaşça artar fakat gerilme-baskın yapılarda bu bölge dalgalı bir yapıya sahiptir. Bu bölge plateau bölgesi olarak isimlendirilmektedir. Bu çalışma içerisinde ise octet yapısının enerji absorpsiyon kabiliyetini arttırmak için octet ile eğilme-baskın yapının avantajlarını birleştiren iki yeni hibrit üç boyutlu kafes tasarımı geliştirilmiştir. PLA malzemesinden yapılan numuneler üzerinde gerçekleştirilen yarı-statik eksenel sıkıştırma testleri ile bu yeni hibrit kafeslerin enerji absorpsiyon kapasiteleri doğrulanmıştır. Sonuç olarak yeni tasarım hibrit yapının octet yapısına göre %30 daha yüksek enerji absorpsiyon kabiliyetine sahip olduğu görülmüştür [13].



Şekil 2.5. (a) Oktet hücre yapısının ve deformasyon modunun şematik diyagramı; (b) BCC hücre yapısının ve onun deformasyon modunun şematik diyagramı; (c) Octet ve BCC yapılarının gerilme-gerinim eğrilerinin karşılaştırılması [13]

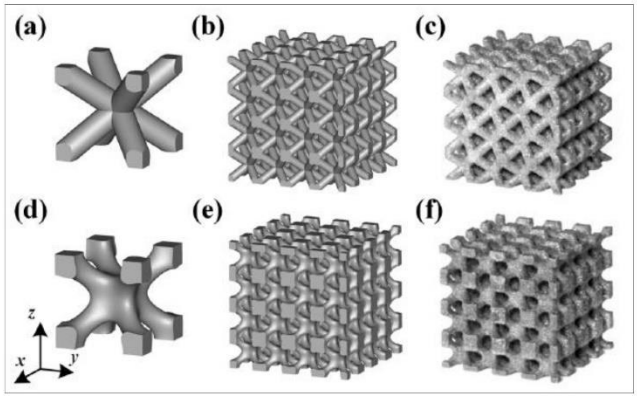
Bu çalışma kapsamında mesh duyarlılığı için uygun eleman boyutu belirlenmiştir. Bu çalışmada kullanılan FEM modelleri için 0,6 mm ve 0,8 mm boyutlarında tetrahedral elemanlarla yapılan modellerin aynı gerilme-gerinim tepkileri verdiği gözlemlenmiştir. 0,6 mm'lik eleman boyutuyla yapılan model çok daha uzun bir hesaplama süresi gerektirdiği

için bu çalışmada 0,8 mm kullanılmıştır. Şekil 2.6'da 0,6 mm, 0,8 mm, 1,2 mm, 1,6 mm mesh boyutları sonucu oluşan gerilme gerinim grafiği gösterilmiştir [13].



Şekil 2.6. Farklı mesh boyutları için gerilme-gerinim grafiği (0,6- 0,8- 1,2- 1,6 mm) [13]

Zhao ve diğerlerinin gerçekleştirdiği çalışma içerisinde BCC yapılar ile TPMS yapılar birleştirilerek yeni bir BCC-TPMS yapısı oluşturulmuştur. BCC-TPMS yapısı sayesinde düğüm noktalarındaki kesit alanının daha düzgün geçişi sağlanmış ve BCC yapıların düğüm noktalarında meydana gelen kırılmalar azaltılmıştır. Sonuç olarak bu yeni yapıların enerji absorpsiyon değerleri ve diğer mekanik özellikleri önemli ölçüde iyileştirilmiştir. Yapılan testler sonucunda TPMS tabanlı örneklerin elastik modül, akma dayanımı ve sıkıştırma dayanımında artışlar meydana gelmiştir. Şekil 2.7'de BCC ve BCC-TPMS yapının görseli gösterilmiştir [11].



Şekil 2.7. (a–c) BCC kafes yapıları (d–f) TPMS tabanlı BCC kafes yapıları [11]

Caliskan ve diğerlerinin gerçekleştirdiği çalışma, seçici lazer ergitme (SLM) kullanılarak üretilen AlSi10Mg kafes yapıların dinamik davranışlarını incelemek ve bu davranışları doğru bir şekilde simüle etmek amacıyla Johnson-Cook malzeme parametrelerini

belirlemeyi amaçlamaktadır. SLM ile üretilen AlSi10Mg malzeme örnekleri üzerinde çeşitli sıcaklık ve gerinim hızlarında çekme ve basma testleri yapılarak Johnson-Cook model parametreleri deneysel olarak belirlenmiştir. Split Hopkinson basınç bar (SHPB) testleri kullanılarak yüksek gerinim hızlarında dinamik testler yapılmış ve bu testlerin sayısal simülasyonları Ls-Dyna yazılımında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında şu bulgular elde edilmiştir: FCC kafes yapılarının elmas yapılarından daha yüksek özgül mukavemet ve enerji absorpsiyon değerlerine sahip olduğu, dinamik yükler altında FCC yapılarında maksimum gerilmelerin kiriş bağlantı noktalarında yoğunlaştığını, elmas yapılarında ise daha homojen bir gerilme dağılımı gözlemlendiğini göstermiştir. Sayısal analizler deneysel sonuçlar karşılaştırılmış ve Johnson-Cook model parametrelerinin doğruluğu doğrulanmıştır. Çalışma kapsamında farklı gerinim değerlerinde testler yapılmıştır. Bu testler sonucunda gerinim oranı etkisi görülmemiştir [23].

Wu ve diğerlerinin gerçekleştirdiği çalışma kapsamında düğüm noktalarının iyileştirilmesi sağlanarak otomotiv için enerji absorbe eden yapı tasarlanmıştır. Araştırma sonuçlarına göre otomobillerde önden çarpışma yaşanma olasılığı daha yüksektir. Önden çarpışma gerçekleştiğinde ilk olarak ön tampon darbeye maruz kalır ve bu darbe kuvveti enerji absorbe eden kutuya iletilir. Enerji absorbe kutusu darbe kuvvetinin bir kısmını emerek çarpışmanın araca verdiği hasarı azaltır ve araç içindeki yolcuların güvenliğini sağlanır. Bu çalışma kapsamında BCC yapısının düğüm noktası iyileştirilerek yeni bir kafes yapı türü geliştirilmiştir. Bu sayede yüksek hızlarda daha yüksek enerji absorpsiyon yeteneğine sahip bir yapı elde edilmiştir [24].

Okorugbo'nun (2019) gerçekleştirdiği çalışma kapsamında otomotiv endüstrisinde yolcu güvenliğini artırmak amacıyla kullanılan ince cidarlı darbe emici yapıların enerji emme karakteristiklerinin çarpma hızı etkisi altında nasıl değiştiğini incelenmektedir. Darbe emiciler çarpışma anında meydana gelen enerjiyi plastik deformasyon yoluyla emerler. Bu çalışmada farklı ince cidarlı modellerin çarpma hızının enerji emme karakteristiklerine olan etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Performans değerlendirmeleri, absorbe edilen enerji, çarpışma anındaki ilk kuvvet, ortalama kuvvet ve ezme kuvveti verimliliği paramatreleri karşılaştırılarak yapılmıştır. Analizler Ls-Dyna programında gerçekleştirilmiştir. Analizler LS-Dyna yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda test edilen numuneler üzerindeki çarpışma hızı arttıkça enerji absorpsiyon değerlerinin arttığı görülmüştür. Çarpışma esnasında oluşan ilk kuvvetin yüksek olmasının yolcu güvenliği

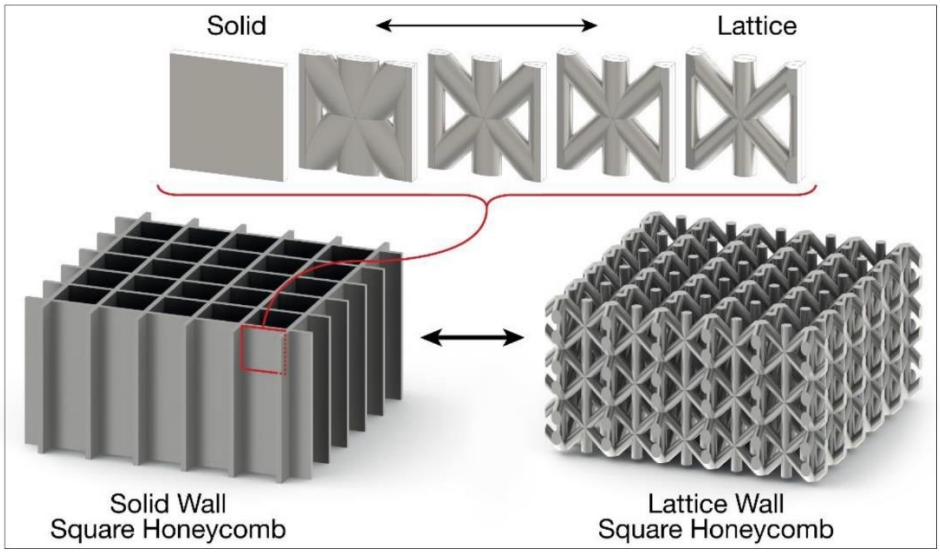
açısından kritik bir değer olduğu ve azaltılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Ezilme kuvveti verimliliğinin yüksek hızlarda azaldığı görülmüştür [25].

Park ve diğerlerinin gerçekleştirdiği çalışma kapsamında, kafes yapılarının basma testleri altındaki mekanik davranışlarını optimize edilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmada, farklı birim hücre tiplerinin ve hücre dizilimlerinin, kafes yapıların mekanik özelliklerine olan etkileri incelenmiştir. 11 farklı birim hücre tipi seçilerek her birinin çeşitli yerleşim düzenlerinde oluşturulan kafes yapılarının sıkıştırma kuvvetine karşı tepkileri, doğrusal statik sonlu eleman analizi (FEA) ve deneysel testlerle değerlendirilmiştir. Çalışmada, aynı bağıl yoğunluk koşulları altında basit kübik, oktahedron, truncated küp ve truncated oktahedron temelli kafes yapıların en iyi basma direncine sahip olduğu tespit edilmiştir. Çalışma kapsamında bağıl yoğunluk arttıkça eksenel basma dayanımının arttığı görülmüştür. Basit kübik ve FCC yapısında gerilme kenarlarda yoğunlaşırken BCC yapısında gerilme merkezde yoğunlaştığı görülmüştür. Gerilme yoğunluğunu azaltmak için basit kübik yapısında köşelere radyus verilmiştir. Bu sayede bu yapının akma dayanımı arttırılmıştır. Buradan yola çıkarak şekil optimizasyonunun parçanın mekanik performansı üzerinde etki gösterdiği anlaşılabilir. Ayrıca bu yapılar arasında hücre tipleri, kafes yapı topolojileri ve mekanik özellikleri arasındaki ilişkiler ortaya konulmuştur. Bu sayede kafes yapılarının mekanik özelliklerini iyileştirmek için optimal hücre tipleri ve yerleşim düzenleri belirlenmiştir [14].

Fadeel ve diğerlerinin gerçekleştirdiği çalışma kapsamında, dik kirişlere sahip 3D baskı ile üretilmiş polimer kafes yapılarının basma testleri sonucundaki etkisi hem deneysel testler hem de hesaplamalı modelleme ile incelenmiştir. Bu çalışmada, BCC birim hücresine dayalı dört farklı kafes yapı konfigürasyonu, rijitlik, kırılma yükü ve birim kütle başına enerji absorpsiyonu (SEA) üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla incelenmiştir. Bu çalışmada şu konfigürasyonlar incelenmiştir; temel BCC yapısı, her düğümde dikey destek bulunan BCCV yapısı, alternatif katmanlarda dikey destek bulunan BCCA ve üstten alta doğru dikey destek sayısının kademeli olarak arttığı BCCG yapılarını içermektedir. Çalışmanın bulgularına göre dikey desteklerin varlığı, yapının mekanik performansını önemli ölçüde etkilemiş ve özellikle BCCV konfigürasyonunun en yüksek rijitlik, akma dayanımı ve enerji absorpsiyon kapasitesine sahip olduğunu göstermiştir. Hem fiziksel deneyler hem de sonlu elemanlar analizi sonuçları iyi bir uyum göstermiş ve sonlu elemanlar analizlerinin bu tür kafes yapıların sıkıştırma davranışını tahmin etmede etkili bir yöntem

olduğu doğrulanmıştır [26].

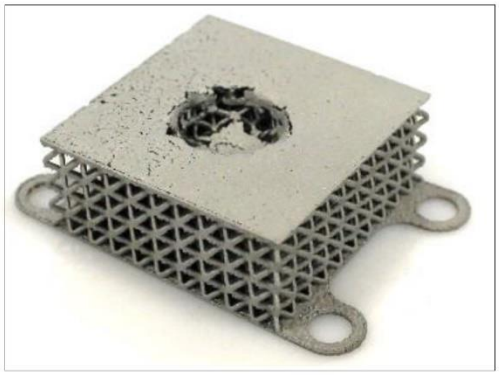
Harris ve diğerlerinin gerçekleştirdiği çalışma kapsamında, eklemeli imalat yöntemiyle üretilen metalik hibrit kafes yapılarının darbe etkisi incelenmiştir. Seçici lazer eritme (SLM) yöntemiyle üretilen bu yapılar, balistik ve darbe etkilerini hafifletmek için tasarlanmıştır. Bu çalışmada, geleneksel kare petek yapıların rijitliği ve enerji absorpsiyonu özellikleri hibrit bir tasarımla karşılaştırılmıştır. Hibrit yapıda, kare petek duvarlarının yerini kafes kirişler almış ve aynı bağıl yoğunluk korunarak daha karmaşık bir geometrik yapı elde edilmiştir. Bu yeni hibrit yapılar, statik ve dinamik yükleme koşulları altında test edilerek mukavemet, enerji absorpsiyonu ve maksimum yük değerleri açısından değerlendirilmiştir. Sonuçlara göre hibrit yapının özellikle orta hızlardaki (yaklaşık 100 m/s) darbe altında, kare petek yapıdan daha verimli olduğu görülmüştür. Kare petek yapılar, yüksek mukavemete sahip olsa da burkulmaya karşı daha hassastır ve yüksek hızlarda daha kısa dalga boylu burkulmalar meydana getirmiştir. Hibrit kafes yapılar ise burkulma etkilerine karşı daha dayanıklı olup kademeli burkulma göstererek yapının daha uzun süre stabil kalmasını sağlamıştır. Bu çalışmada darbe hızı arttıkça kare petek yapıların ilk tepki mukavemeti önemli ölçüde artmıştır. Buna karşın hibrit kafes yapılar hız değişimlerine karşı daha dengeli bir mukavemet eğrisi sergilemiştir [27].



Şekil 2.8. Hibrit kafes yapı tasarımı [27]

Vrana ve diğerlerinin gerçekleştirdiği çalışma kapsamında, seçici lazer eritme (SLM) teknolojisi kullanılarak üretilen farklı tipte kafes yapıların darbe direnci incelenmiştir.

AlSi10Mg alaşımıyla üretilen beş farklı kafes yapı topolojisi (BCC, BCCZ, FBCC, FBCCZ ve 3D Gyroid) üzerine odaklanılmıştır. Tüm yapılar aynı bağıl yoğunluğa sahip olacak şekilde tasarlanmış ve darbe testleri, bir düşme ağırlığı testi cihazıyla gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma, her kafes yapısının darbe direncinin farklı olduğunu ve bu farkın hücre topolojisinin mekanik özellikler üzerindeki etkisinden kaynaklandığını ortaya koymuştur. FBCCZ yapısı en yüksek darbe direncine sahip olmasının yanında enerji absorpsiyonu sırasında çok yüksek bir reaksiyon kuvveti göstermiştir. Bu yapı, hem bükülme hem de burkulma kuvvetlerini bir arada taşıyabilen bir topolojiye sahiptir ve diğer yapılara göre daha yüksek bir mukavemet sunmuştur. Kafes yapılarının hasar modları, bükülme ve burkulmaya bağlı olarak farklılık göstermiştir. Bu çalışma, farklı topolojilerin darbe altındaki davranışlarını ve enerji absorpsiyon yeteneklerini inceleyerek gelecekteki FEM modellemeleri için önemli veriler sunmuştur [28].

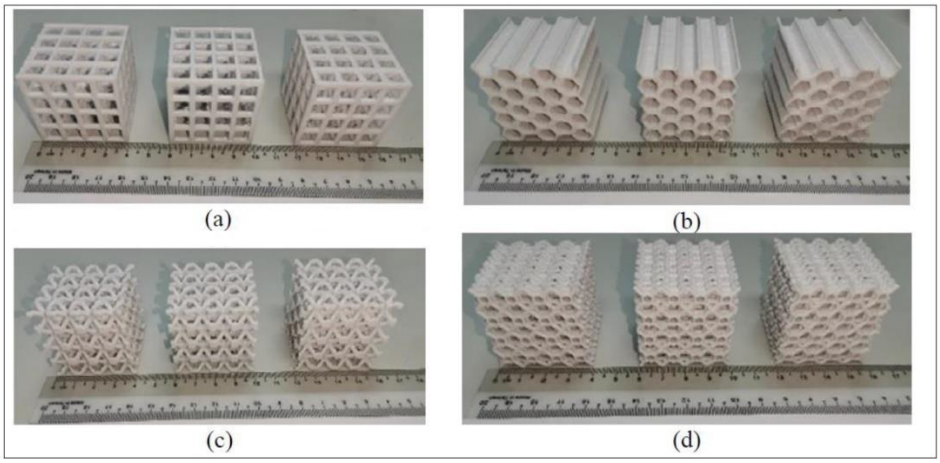


Şekil 2.9. Düşme testi sonucu oluşan kafes yapı görüntüsü [28]

Ozdemir ve diğerlerinin gerçekleştirdiği çalışma kapsamında, kafes yapılarının dinamik yük altındaki enerji emilim özellikleri hem deneysel hem de teorik olarak incelenmiştir. Kafes yapılar, ileri üretim yöntemleri kullanılarak özellikle darbe ve patlama durumlarındaki uygulamalar için tasarlanmıştır. Bu çalışmada kübik, elmas ve re-entrant küp olmak üzere üç farklı kafes yapı, hem statik hem de dinamik yükleme koşulları altında test edilmiştir. Hopkinson basınç çubuğu (HPB) testleri, bu yapılar üzerindeki darbe yanıtını değerlendirmek için kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar, kafes yapıların darbe yükünü zaman içinde yayarak maksimum darbe gerilimini azaltabildiğini göstermiştir. Ayrıca yük-deformasyon özelliklerinde önemli bir hız bağımlılığı ve şok benzeri bir davranış tespit edilmiştir. Özellikle yüksek hızdaki darbe testlerinde, kafes yapıların katman katman çökerek yükü yüzeyden derinlemesine ilettiği gözlemlenmiştir. Karşılaştırılan kafes yapılarından elde edilen sonuçlara göre kübik ve elmas kafes yapılar, darbe yüklerini

yaymada ve en yüksek gerilimi azaltmada re-entrant küp yapısına kıyasla daha etkili bulunmuştur. Kübik ve elmas kafes yapılar, en yüksek darbe gerilimini %20 ile %35 oranında azaltırken re-entrant küp yapısı daha düşük oranda kalmıştır [2].

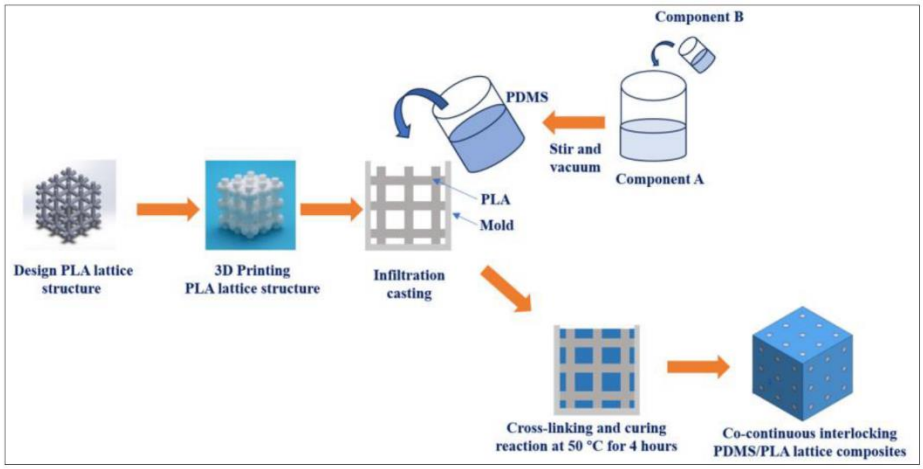
Seek ve diğerlerinin gerçekleştirdiği çalışma kapsamında, basit kübik (SC), petek (HC), gövde merkezli kübik (BCC) ve yeni önerilen PeckGy80 (PG80) yapısı da dahil olmak üzere çeşitli kafes yapıların enerji emilim kapasiteleri değerlendirilmiş ve karşılaştırılmıştır. Kafes yapılar, PLA malzemesi kullanılarak FDM yöntemiyle üretilmiş ve basma testlerine tabi tutulmuştur. Numuneler, yarı-statik yük-deplasman davranışı, özgül enerji emilimi ve ezilme yükü verimliliği açısından analiz edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde yeni PG80 kafes yapısının, özgül enerji emilimi açısından diğer yapılardan en az dört kat daha üstün enerji emilim özellikleri sergilediği görülmüştür. Farklı kafes yapıları, enerji emilim performanslarını önemli ölçüde etkileyen farklı deformasyon modları sergilemiştir. Basit kübik (SC) yapısı, düşey kolonlar boyunca elastik burkulma ve yatay kolonlarda kırılmalar göstererek düşük enerji emilimi sergilemiştir. Petek (HC) yapısında, duvar bükülmesi ve kırılmalar enerji emilimini artırmış ancak maksimum kuvvetin artmasını engellemiştir. Gövde merkezli kübik (BCC) yapısı, 45 derecelik bir kesme bandı boyunca çatlayarak strutların en yüksek gerilimi karşılaştığı yerlerde kırılmalar meydana getirmiştir. Buna karşılık PG80 yapısı, tabandan üst katmanlara doğru kademeli bir katlanma göstererek hem yüksek enerji emilimi hem de stabil bir akma sonrası davranış sergilemiştir [29].



Şekil 2.10. FDM ile üretilmiş kafes yapılar (a) Kübik (b) Petek yapı (c) BCC (d) PG80 [29]

Wang ve diğerlerinin gerçekleştirdiği çalışma kapsamında, polidimetilsiloksan/polilaktik asit (PDMS/PLA) kafes kompozitlerinin basma dayanımı ve enerji absorpsiyon karakteristikleri incelenmiştir. Farklı çaplara sahip kiriş elemanlarla tasarlanan PDMS/PLA kafes kompozitleri, FDM tekniği ve infiltrasyon yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Bu kompozitlerin mekanik özellikleri, yarı-statik basma testleri ile değerlendirilmiş ve kiriş çapının basma dayanımı ve enerji absorpsiyon davranışları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sonuçlara göre PDMS/PLA kafes kompozitlerinin basma dayanımı ve enerji absorpsiyon değerinin, kiriş çapı arttıkça belirgin bir şekilde iyileştiğini göstermiştir. PLA malzemeden üretilen kafes yapısı, kompozitlerde ana yük taşıyıcı iskelet rolünü üstlenirken PDMS dolgu malzemesi ise deformasyon süreçlerini desteklemiştir. Ayrıca PLA hacim oranının artışıyla kompozitlerin basma dayanımı, plateau gerilmesi ve enerji absorpsiyon yoğunluğu arasında doğrusal bir ilişki bulunmuştur. Bu bulgulardan yola çıkarak PDMS/PLA kafes kompozitlerinin optimize edilebilir mekanik özelliklere sahip olduğunu ve hafif yapılarıyla yüksek enerji absorpsiyon kapasiteleri sunarak özellikle otomotiv sektöründe darbe ve çarpma gibi uygulamalar için potansiyel bir malzeme olduğunu ortaya koymuştur [30].

Aşağıdaki şekilde bu çalışma kapsamında gerçekleştirilmiş olan infiltrasyon yönteminin görseli verilmiştir.



Şekil 2.11. PDMS/PLA infiltrasyon işlemi [30]

2.4. Split Hopkinson Basınç Çubuğu Testi

Split-Hopkinson Basınç Çubuğu (SHPB) testi, ilk olarak Hopkinson tarafından geliştirilmiş ve 1949 yılında Kolsky tarafından günümüzdeki formuna getirilmiştir. SHPB, yüksek

deformasyon hızlarında malzemelerin dinamik gerilme-gerinim tepkisini ölçmek için en yaygın kullanılan deneysel yöntemlerden biridir. Test, özellikle 1×10^{3} s^{-1} ile 1×10^{6} s^{-1} arasındaki yüksek deformasyon hızlarında malzemelerin nasıl davrandığını incelemek amacıyla kullanılır [31–34].

Deneysel Kurulum**:** SHPB sisteminde üç ana bileşen bulunmaktadır:

- Çarpıcı Çubuk (Striker Bar): Genellikle bir gaz tabancası kullanılarak giriş çubuğuna (incident bar) yüksek hızda çarptırılan kısa bir çubuktur. Bu çarpma sonucunda giriş çubuğunda bir elastik basınç dalgası oluşturur [31–34].
- Giriş Çubuğu (Incident Bar): Darbenin iletildiği ve gerilme dalgalarının başladığı uzun ve yüksek mukavemetli bir çubuktur. Giriş çubuğunda oluşan stres dalgası numuneye doğru iletilir [31–34].
- Çıkış Çubuğu (Transmission Bar): Numune üzerinden geçen gerilme dalgasının iletildiği diğer uzun ve yüksek mukavemetli çubuktur. Dalganın numuneden sonraki davranışını izlemek için çıkış çubuğu kullanılır [31–34].

Çalışma Prensibi: Çarpıcı çubuk, giriş çubuğuna çarparak bir gerilim dalgası oluşturur. Bu oluşan dalga, giriş çubuğu boyunca ilerleyerek numuneye ulaşır. Gerilim dalgası numuneye ulaştığında dalganın bir kısmı numuneden çıkış çubuğuna geçerken bir kısmı giriş çubuğuna geri yansır. Çubukların yüzeyine yerleştirilen gerinim ölçerler (strain gauges) aracılığıyla yansıyan ve iletilen dalgalar ölçülür. Gerinim ölçerler genellikle bir Wheatstone köprüsü konfigürasyonu kullanılarak gerinimleri kaydeder [31–34].

Temel Varsayımlar:

- Tek Boyutlu Dalga Yayılımı: Çubuklar içinde oluşan dalgaların tek boyutlu olduğu ve çubukların elastik davranış sergilediği varsayılır [31–34].

- Homojen Gerilme ve Deformasyon: Numune boyunca gerilme ve deformasyonun homojen olarak dağıldığı kabul edilir. Bu durum, numunenin küçük ve çubukların çok daha sert olmasıyla desteklenir [31–34].

Gerilme ve Deformasyon Hesaplamaları: Çubuklardan elde edilen yansıyan ve iletilen dalga verileri kullanılarak numunenin ortalama gerilmesi, deformasyon hızı ve deformasyon

değerleri hesaplanır. Düzlem dalga yayılım teorisi uygulanarak malzemenin dinamik gerilim-gerinim eğrisi oluşturulur. Bu analiz sayesinde malzemenin elastik ve plastik deformasyon sınırları hakkında bilgi sağlanır [31–34].

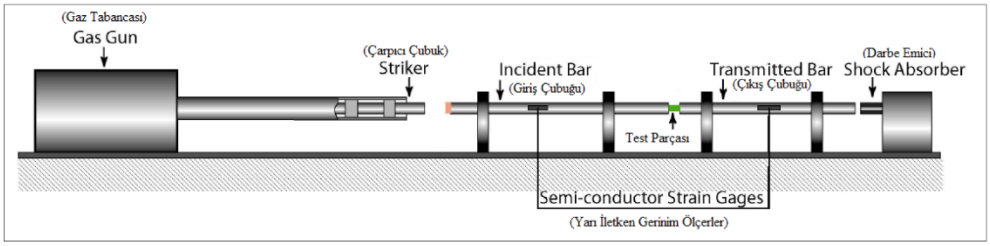
Dalga Yansıması ve İletimi: Deney sırasında giriş ve çıkış çubuklarında oluşan, yansıyan ve iletilen dalgaların analizi, malzemenin dinamik tepkisinin doğru anlaşılması için kritiktir. Çubuklardan ve numuneden geçen dalgaların izlenmesi, malzemede oluşan deformasyonun ve gerilmenin dağılımını anlamaya yardımcı olur [31–34].

Avantajları ve faydaları:

- Geniş Hız Aralığı: SHPB testi, malzemelerin çok geniş bir deformasyon hızı aralığında (1×10^{3} s^{-1} ile 1×10^{6} s^{-1}) test edilmesine olanak tanır [31–34].
- Çok Yönlülük: Basınç, çekme, kayma ve kırılma tokluğu testleri gibi farklı mekanik testlerin gerçekleştirilmesini sağlar [31–34].
- Dinamik Yükleme Koşulları: Kısa sürede yüksek hızlarda yükleme yaparak malzemelerin dinamik çarpışma ve darbe koşullarındaki performansını değerlendirmeye imkan tanır [31–34].

SHPB testi, malzemelerin yüksek deformasyon hızlarında nasıl davrandığını incelemek için etkili ve yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Özellikle çarpma, darbe ve dinamik yükler altında malzeme özelliklerinin değerlendirilmesinde kritik veriler sağlar. Bu sayede, çarpışma güvenliği, balistik performans ve dinamik yükleme gibi uygulamalarda malzemelerin dayanıklılığı ve performansı hakkında önemli bilgiler elde edilir [31–34].

Aşağıda Split-Hopkinson basınç çubuğu testinin görseli verilmiştir.



Şekil 2.12. Split-Hopkinson basınç çubuğu testi [34]

2.5. İnfiltrasyon ve Basınçsız İnfltrasyon Yöntemi

İnfiltrasyon, sıvı bir malzemenin (genellikle metalin) gözenekli bir takviye malzemesi (seramik, metal tozları vb.) içerisine nüfuz ederek kompozit bir yapı oluşturma bir işlemdir. Bu süreç sonunda, sıvı metal gözenekli yapının içerisine sızarak takviye malzemesiyle homojen bir karışım elde edilir. İnfiltrasyon yöntemleri, dışarıdan basınç uygulanarak (basınçlı infiltrasyon), basınç uygulanmaksızın (basınçsız infiltrasyon) veya vakumda infiltrasyon yöntemiyle gerçekleştirilebilir. Bu yöntemin temel amacı, bir metal matris içerisine güçlü ve dayanıklı bir takviye malzemesi ilave ederek mekanik, termal ve fiziksel özellikleri daha iyi olan kompozit malzeme geliştirmektir [35–37].

İnfiltrasyon yöntemleri, alüminyum, magnezyum gibi hafif metallerin ve seramiklerin birleşimini sağlayarak yüksek mukavemetli, aşınma direncine sahip malzemeler elde etmek için sıkça kullanılır. Bu yöntemle üretilen metal matrisli kompozitler, havacılık, otomotiv ve savunma sanayilerinde yaygın olarak tercih edilmektedir [35–37].

Basınçsız infiltrasyon

Basınçsız infiltrasyon, sıvı metalin herhangi bir dış basınç uygulamadan gözenekli bir yapıya kendi doğal hareketi ile sızdırılması işlemidir. Bu yöntemde sıvı metal, yerçekimi ve yüzey gerilimi gibi doğal etkilerle takviye malzemesiyle birleşir ve kompozit yapı oluşturur. Basınçsız infiltrasyon, basınçlı infiltrasyona kıyasla daha düşük maliyetli, daha basit ve büyük ölçekte uygulanabilir bir yöntemdir. Yine de sürecin başarılı olması için bazı kritik değişkenlerin kontrol edilmesi gerekir [35–37].

Basınçsız infiltrasyonun temel değişkenleri:

- Islatma yeteneği: Sıvı metalin takviye malzemesini ıslatabilmesi, işlemin temel aşamasıdır. Islatma, sıvı metalin katı yüzeyde yayılma kapasitesiyle tanımlanır ve bu yayılma ne kadar iyi olursa, sıvı metalin takviye malzemesine sızması o kadar kolay olur. Islatmayı artırmak için metalin içeriğine uygun alaşım elementleri (örneğin, magnezyum gibi) eklenebilir [35–37].
- Sıcaklık: İnfiltrasyon sıcaklığı, sıvı metalin akışkanlığını artıran en önemli faktörlerden biridir. Sıvı metalin akışkanlığı arttıkça gözenekli yapıya sızması kolaylaşır. Özellikle

alüminyum matrisli kompozitlerde yüksek sıcaklık, takviye malzemesiyle daha iyi bir bağlanma sağlar. Genellikle infiltrasyon işlemi 900°C ile 1200°C arasında yapılır [35–37].

- Alaşım bileşimi: Kullanılan metalin bileşimi, sıvı metalin takviye malzemesiyle uyumunu ve ıslatma yeteneğini doğrudan etkiler. Örneğin, alüminyum alaşımlarına magnezyum eklemek, seramik takviyelerle daha iyi bir bağlanma sağlar. Ayrıca bazı alaşım elementleri (örneğin, bakır) ıslatma yeteneğini olumsuz etkileyebilir [35–37].
- Takviye malzemesi ve gözeneklilik: Takviye malzemesi olarak kullanılan seramik veya metal tozlarının gözenekliliği, sıvı metalin infiltrasyon derinliğini ve kompozit yapının homojenliğini belirler. Yüksek gözenekliliğe sahip bir yapı, sıvı metalin daha kolay nüfuz etmesini sağlar. Bu durum kompozit malzemenin mekanik özelliklerini iyileştiren önemli bir faktördür [35–37].

Basınçsız infiltrasyonun avantajları:

- Dışarıdan basınç uygulamadan gerçekleştirildiği için ekipman maliyetleri daha düşüktür [35–37].
- Basit bir süreç olup, üretimi kolay ve hızlıdır [35–37].
- İyi bir infiltrasyon sağlandığında kompozit malzemede homojen bir yapı elde edilir ve mekanik özellikler malzemenin her yerinde benzer olur [35–37] .

Sonuç olarak basınçsız infiltrasyon yöntemi, hafif ve dayanıklı kompozit malzemeler üretmek için ideal bir yöntemdir. Özellikle alüminyum matrisli kompozitler ve seramik takviyeli yapılar için yüksek mukavemet, aşınma direnci ve termal kararlılık sağlayarak otomotiv ve havacılık gibi ileri teknoloji gerektiren sektörlerde geniş bir kullanım alanı bulmaktadır [35–37].

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. AlSi10Mg Malzeme Özellikleri

AlSi10Mg, eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan seçici lazer ergitme (SLM) teknolojisi ile üretilen bir alüminyum alaşımıdır. Bu alaşım, alüminyum, silisyum ve magnezyum bileşenlerinden oluşur ve yüksek enerji absorpsiyon kapasitesi, mükemmel mekanik özellikler ve yüksek spesifik mukavemet sunar. AlSi10Mg, hafifliği ve dayanıklılığı nedeniyle otomotiv, havacılık ve savunma sanayilerinde yaygın olarak kullanılır [23].Bu yöntem, malzemenin yüksek hassasiyetle üretilmesini ve kompleks geometrilerin elde edilmesini sağlar. AlSi10Mg, mükemmel dökülebilirlik, yüksek mukavemet ve iyi korozyon direnci gibi özelliklere sahiptir [38]. Yüksek silisyum içeriği, hızlı soğutma sırasında alaşımın sıvı fazını uzatarak katılaşma hızını yavaşlatır ve bu nedenle SLM endüstrisinde sıkça tercih edilir [39]. Hızlı soğuma nedeniyle ince taneli bir yapıya sahip olmaktadır [40].

AlSi10Mg'nin mekanik özellikleri, üretim yöntemi ve son işlemlere bağlı olarak değişir. Malzeme, yüksek mukavemet ve sertlik özellikleri ile öne çıkar. Isıl işlem görmemiş örnekler, yaklaşık 125 HV sertlik değerine sahipken, ısıl işlem sonrasında bu değer yaklaşık 110 HV'ye düşer. Çekme testleri, malzemenin yönelime bağlı olarak farklılık gösterdiğini ortaya koyar; yatay, dikey ve 45 derece yönelimli örnekler farklı mukavemet ve süneklik değerleri sergiler. Ayrıca, ısıl işlem uygulaması, iç gerilmeleri azaltarak malzemenin sünekliğini artırır [39]. Isıl işlem görmüş numuneler, işlenmemiş numunelere göre %20 daha düşük akma dayanımına sahiptir ve Z-yönelimli numuneler, X-yönelimli numunelere göre daha yüksek gerilme değerleri göstermiştir. Ayrıca AlSi10Mg'nin 10^3–8×10^3 s^{-1} gerinim hızları aralığında gerinim hızına duyarlılığı olmadığı belirlenmiştir [27,28]. Johnson-Cook (J-C) malzeme modeli parametreleriyle karakterize edilen alaşım, çeşitli gerinim oranlarında ve sıcaklık koşullarında yüksek dayanıklılık sergiler. Belirlenen J-C parametreleri A = 251.45 MPa, B = 1664.61 MPa, n = 0.68, C = 0.00605, m = 0.835 ve hasar parametreleri D1 = 1.047, D2 = −0.965, D3 = 0.0432, D4 = 0.0205, D5 = 0.785 olarak bulunmuştur [23].

AlSi10Mg'nin termal özellikleri, mikro yapısı ve üretim parametreleri ile yakından ilişkilidir. Lazer gücü, tarama hızı ve toz katman kalınlığı gibi faktörler, malzemenin ısıl iletkenliğini ve nihai mikro yapısını etkiler. Isıl işlem, malzemenin iç yapısındaki silisyum

fazının dağılımını değiştirerek termal iletkenlik ve mekanik özelliklerde iyileştirmeler sağlar. Isıl işlem sırasında 300°C'de 2 saatlik bir tavlama işlemi, malzemenin mikro yapısında daha homojen bir dağılım ve süneklik sağlar [39]. AlSi10Mg alaşımı, yüksek sıcaklıklarda mukavemetini koruyabilen bir malzemedir. Özellikle ısıl işlem görmüş haliyle, termal dayanımı ve mukavemeti artar. Bu özellik, malzemenin yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılmasını mümkün kılar [23].

Bu alaşımın bileşimi, ağırlıklı olarak alüminyum (Al) ve yaklaşık %10 oranında silisyum (Si) ile birlikte az miktarda magnezyum (Mg) içerir. AlSi10Mg, koruyucu bir oksit tabakası oluşturarak oksidasyona ve korozyona karşı iyi direnç gösterir. Bu kimyasal özellikler, alaşımın uzun ömürlü ve dayanıklı olmasını sağlar, bu da çeşitli endüstriyel uygulamalarda güvenilir bir malzeme olarak kullanılmasını destekler [41].

AlSi10Mg, iyi akışkanlığa ve ince toz haline dönüştürülebilme yeteneğine sahip olduğu için eklemeli imalat için oldukça uygundur. Seçici Lazer Ergitme (SLM) ve Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (DMLS) yöntemleri kullanılarak üretilebilir. Bu yöntemler, karmaşık geometrik şekillerin ve hassas özelliklerin elde edilmesini sağlar. Ayrıca, eklemeli imalat süreçleri, malzemenin mikro yapısını ve mekanik özelliklerini optimize etmeye olanak tanır [41].

AlSi10Mg çeşitli kullanım alanlarına sahiptir. Bunlar arasında havacılıkta hafif yapı elemanları, otomotivde yüksek mukavemet-ağırlık oranı gerektiren parçalar ve ısı kontrolü gerektiren soğutma cihazları bulunur. AlSi10Mg, ayrıca tıbbi cihazlar ve spor ekipmanları gibi alanlarda da kullanılmaktadır çünkü bu malzeme, yüksek performans ve dayanıklılık gerektiren uygulamalar için idealdir. Hafif ve yüksek mukavemetli yapısı, bu alaşımı enerji absorpsiyonu ve hafif tasarım gerektiren uygulamalarda ideal kılar [40,41].

AlSi10Mg'nin dinamik mekanik özellikleri, split hopkinson basınç çubuğu (SHPB) testleri ile incelenmektedir [23]. Malzemenin dinamik özellikleri bu test ile belirlenmektedir. Bu test sonucunda Johnson-Cook malzeme parametreleri belirlenmektedir. Johnson-Cook modeli, malzemenin akma gerilimini; gerinim, gerinim hızı ve sıcaklık fonksiyonu olarak tanımlayan bir modeldir. Bu modelin parametreleri deneysel verilerden elde edilir ve malzemenin dinamik yükleme koşulları altındaki davranışını tahmin etmek için kullanılır. AlSi10Mg'nin gerinim hızına duyarlılığı, mekanik davranışını önemli ölçüde etkiler ve bu

özellik yüksek hızlı çarpışma analizlerinde dikkate alınmalıdır. Modelin doğruluğu deneysel sonuçlarla uyumlu olmasıyla kanıtlanmıştır bu sayede simülasyonların güvenilirliği yüksektir. [41]. Bu çalışma kapsamında çarpışma analizlerinde kullanılan Johnson-Cook parametreleri Caliskan ve diğerleri (2024) tarafından gerçekleştirilen çalışmadan alınmıştır. Çizelge 3.1'de bu çalışmadan elde edilen değerler verilmiştir.

3.2. Johnson-Cook Malzeme Modeli

Johnson-Cook malzeme modeli, metalik malzemelerin darbe davranışını simüle etmek için yaygın olarak kullanılan bir modeldir. Bu model, malzemenin plastik gerilme, deformasyon hızı ve sıcaklık gibi değişkenlere bağlı olarak nasıl davrandığını tanımlar. Johnson-Cook malzeme modeli beş temel parametreye dayanır: A, B, C, n ve m. Bu parametreler çekme testleri kullanılarak belirlenir [41].

Johnson-Cook modeli, akma gerilmesini (σ) şu şekilde ifade eder:

$$\sigma_e q = \left[A + B\left(\varepsilon_p\right)^n\right]\left[1 + Cln\left(\dot{\varepsilon}_p/\dot{\varepsilon}_0\right)\right][1 - (T - T_0/(T_m - T_0))^m] \quad (3.1)$$

A: Malzemenin akma gerilmesi,
B: Pekleşme modülü,
ϵ_p: Plastik gerinim,
n: Pekleşme üssü,
C: Gerinim hız sabiti,
$\dot{\epsilon}_p$: Plastik gerinim hızı,
$\dot{\epsilon}_0$: Referans gerinim hızı,
T: Mevcut sıcaklık,
T_0: Referans sıcaklık,
T_m: Ergime sıcaklığı,
m: Sıcaklık sabiti

Modelin üç ana bileşeni vardır: gerinim, gerinim hızı ve sıcaklık. Her bileşen, malzemenin akma gerilmesine belirli bir katkı yapar ve bu katkılar çarpılarak toplam akma gerilmesi elde

edilir. Bu sayede malzemenin farklı koşullar altındaki davranışı modelle doğru bir şekilde tahmin edilebilir [23].

Johnson-Cook modelinin oluşturulabilmesi için çeşitli testlerden elde edilen veriler kullanılarak model parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Yarı-statik çekme testlerinden elde edilen veriler kullanılarak A, B ve n parametreleri belirlenir. Yüksek gerinim hızlarında yapılan testlerle C parametresi ve sıcaklık etkisini içeren testlerle m parametresi belirlenir [23].

Johnson-Cook parametrelerinin belirlenmesi

Model parametrelerini belirlemek için farklı test yöntemleri kullanılır. Bu testler, malzemelerin elastik ve plastik davranışlarını anlamak ve modelin parametrelerini doğru bir şekilde belirlemek için gereklidir [23,38].

- Yarı statik çekme testleri, malzemenin akma mukavemeti ve pekleşme özelliklerinin belirlenmesinde kullanılır. Yarı statik testler, düşük şekil değiştirme hızlarında gerçekleştirilir ve elde edilen veriler gerilme-gerinim eğrilerinin oluşturulmasında kullanılır [23,38].
- Split hopkinson basınç çubuğu testleri ise malzemenin yüksek şekil değiştirme hızlarındaki davranışını belirlemek için kullanılır. SHPB testleri, malzemenin dinamik gerilme-şekil değiştirme eğrilerini elde etmek için yüksek mukavemetli çubuklar arasında sıkıştırılarak yapılır [23,38].

Johnson-Cook hasar modeli

Johnson-Cook hasar modeli, malzemenin hasar birikimini ve kırılma davranışını modellemek için kullanılır. Bu model, kümülatif hasarın belirli bir eşiği aştığında malzemenin kırılacağını varsayar. Hasar birikimi, her bir plastik gerinim artışına karşılık gelen hasar değeri olarak tanımlanır [23].

$$D = \sum \Delta\epsilon / \epsilon f \tag{3.2}$$

Burada:

- D: Kümülatif hasar
- Δϵ: Plastik gerinim artışı
- ϵf: Kırılma gerinimi

Kırılma gerinimi ise aşağıdaki ifade ile tanımlanır:

$$\epsilon_f = (D_1 + D_2 \exp(D_3\sigma^*))\left(1 + D_4 ln\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon_0}}\right)(1 + D5T*) \quad (3.3)$$

Burada D1, D2, D3, D4, D5 malzemenin kırılma davranışını tanımlayan ve testlerden elde edilen malzeme sabitleridir. Denklemdeki ilk parantez gerinimi, gerilme üç eksenlilik oranına göre ifade ederken ikinci parantez gerinim hızı etkilerini ve üçüncü parantez sıcaklık etkilerini gösterir. Kırılma, malzeme elemanındaki hasar değeri bire ulaştığında gerçekleşir çünkü hasar ile esas denklem arasında doğrudan bir ilişki yoktur [41,42].

Çizelge 3.1 AlSi10Mg Johnson-Cook malzeme parametreleri [23]

A	251,45
B	1664,61
n	0,68
C	0,00605
m	0,835
D1	1,047
D2	-0,965
D3	0,0432
D4	0,0205
D5	0,785

3.3. Ntopology

Kafes yapılarının karmaşıklığı, bu parçaların eklemeli imalat yöntemiyle üretilmesini gerektirir. Standart üretim yöntemlerine göre programlanmış olan bilinen mekanik çizim programları, kafes yapılarını tasarlamayı hem zorlaştırır hem de tasarlanan parçaların dosya boyutlarının fazla olmasına neden olur. Bu sorunu çözmek amacıyla Ntopology firması 2015

yılında gelecek nesil mühendislik tasarım yazılımı adıyla kurulmuştur. Bu yazılım, eklemeli imalat yöntemine uygun parça tasarımı yapmak amacıyla özel araçlarla donatılmıştır [43].

Geleneksel CAD yazılımlarına göre farklı bir yapısı olan Ntopology programı, mühendislerin ve tasarımcıların daha karmaşık ve optimize edilmiş yapılar tasarlamalarına olanak tanır. Özellikle kafes yapılar gibi karmaşık geometrilerin tasarımında büyük avantaj sağlar. Kafes yapılar, hafiflik ve yüksek dayanıklılık özellikleriyle öne çıkar ve geleneksel yöntemlerle üretilemeyecek kadar karmaşık olabilir. Ntopology'nin tasarım araçları, bu tür yapıların kolayca ve verimli bir şekilde tasarlanmasını mümkün kılar.

Ntopology'nin önemli bir diğer özelliği, tasarımların eklemeli imalat yöntemine uygun şekilde optimize edilebilmesidir. Program, topolojik optimizasyon, parametrik tasarım ve üretken tasarım gibi ileri düzey araçlarla donatılmıştır. Bu araçlar, mühendislerin ve tasarımcıların belirli kriterlere göre optimize edilmiş yapılar oluşturmalarına imkan tanır [43]. Örneğin, bir parçanın ağırlığını azaltmak, malzeme kullanımını optimize etmek veya belirli yük taşıma kapasitelerine göre tasarım yapmak gibi hedeflere ulaşmak Ntopology ile mümkündür.

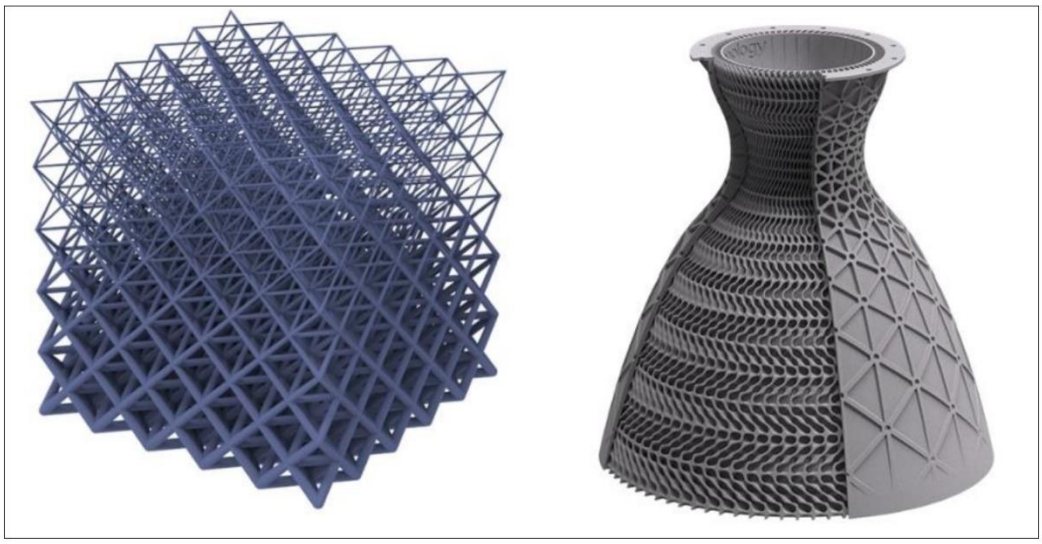
Ntopology tasarım programı, eklemeli imalat yöntemine uygun bir tasarım aracı olduğundan içinde çok çeşitli birim hücre yapıları barındırır. Ayrıca kullanıcılar kendi özel birim hücrelerini oluşturarak kafes yapıları tasarlayabilirler. Bu esneklik, kullanıcıların ihtiyaçlarına göre özelleştirilmiş parçalar geliştirmesine olanak tanır.

Ntopology, diğer CAD yazılımlarıyla uyumlu çalışabilme yeteneğiyle de ön plana çıkar. Bu sayede mevcut tasarım süreçlerine kolayca entegre edilebilir ve var olan CAD dosyaları üzerinde çalışmalar yapılabilir. Bu entegrasyon yeteneği kullanıcıların tasarımlarını farklı yazılımlar arasında taşırken veri kaybı yaşamadan çalışmalarına devam edebilmelerini sağlar [43].

Sonuç olarak, Ntopology programı, kafes yapıları ve diğer karmaşık yapıların tasarımı için ideal bir platform sunar. Programın güçlü tasarım ve analiz araçları ve eklemeli imalata uygunluğu, mühendisler ve tasarımcılar için büyük avantajlar sağlar. Geleneksel CAD yazılımlarının ötesine geçerek eklemeli imalatın sunduğu olanakları tam anlamıyla

kullanabilmeyi mümkün kılan Ntopology, modern mühendislik tasarımında önemli bir yer almaktadır [43].

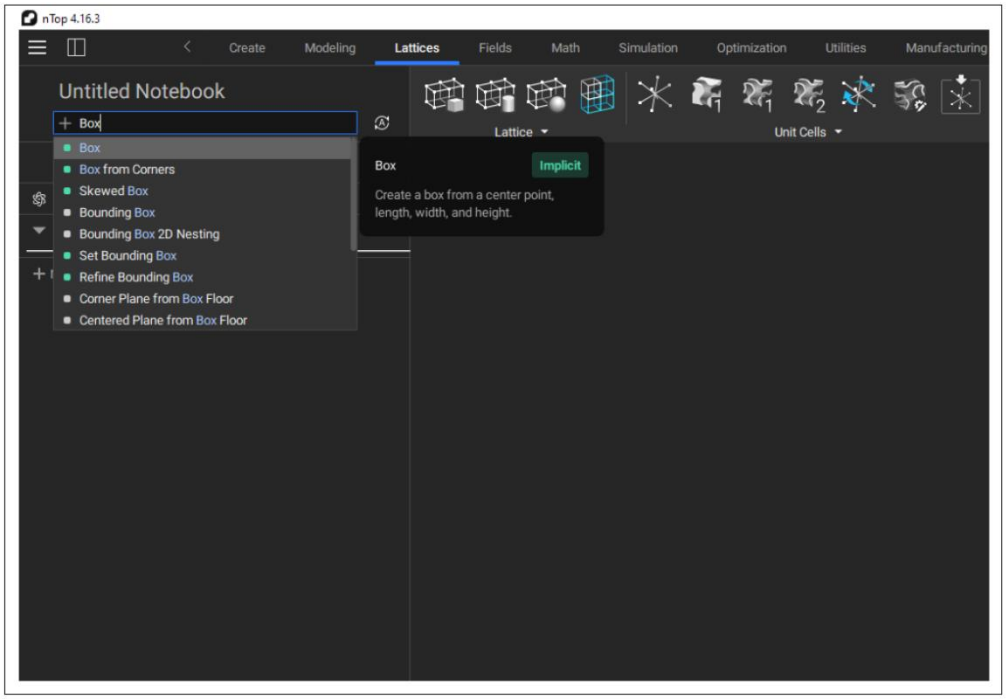
Özetle, Ntopology, mühendisler ve tasarımcılar için yalnızca bir tasarım aracı değil, aynı zamanda eklemeli imalatın tüm potansiyelini kullanabilen bir platformdur. Bu program, karmaşık geometrilerin ve optimize edilmiş yapıların tasarımını kolaylaştırırken, üretim süreçlerinde de önemli avantajlar sağlar. Ntopology programının sunduğu bu esneklik ve yeni nesil tasarım anlayışı bu programı modern mühendislik tasarımında vazgeçilmez kılma eğilimindedir.



Şekil 3.1. Ntopology programı ile tasarlanan bazı parçalar

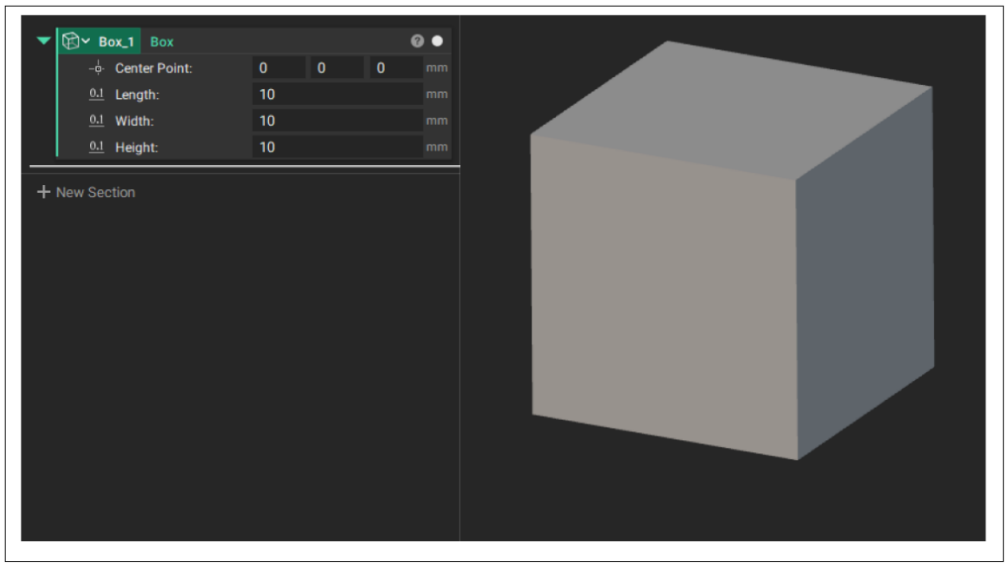
Ntopology kafes yapı tasarımı

Bu başlık içerisinde Ntopology programı içerisinde kafes yapılarının nasıl tasarlandığı açıklanmıştır. Şekil 3.2'de gösterildiği gibi Ntopology içerisindeki arama kısmına Box yazılarak Box komutu seçilir.



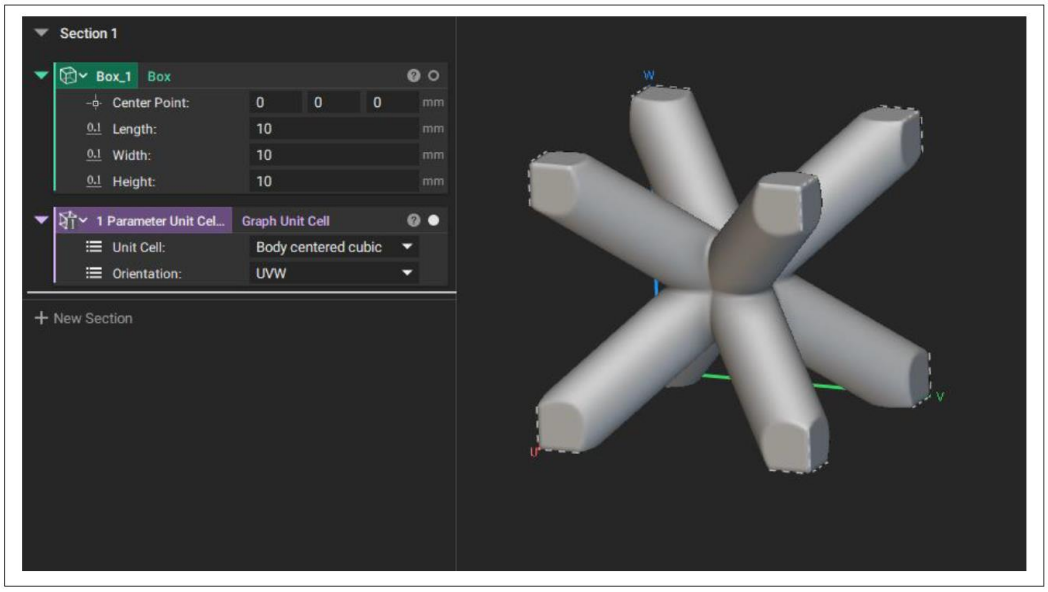
Şekil 3.2. Ntopology kutu (box) oluşturma

Box komutu içerisindeki en, boy ve yükseklik değerleri girilir.



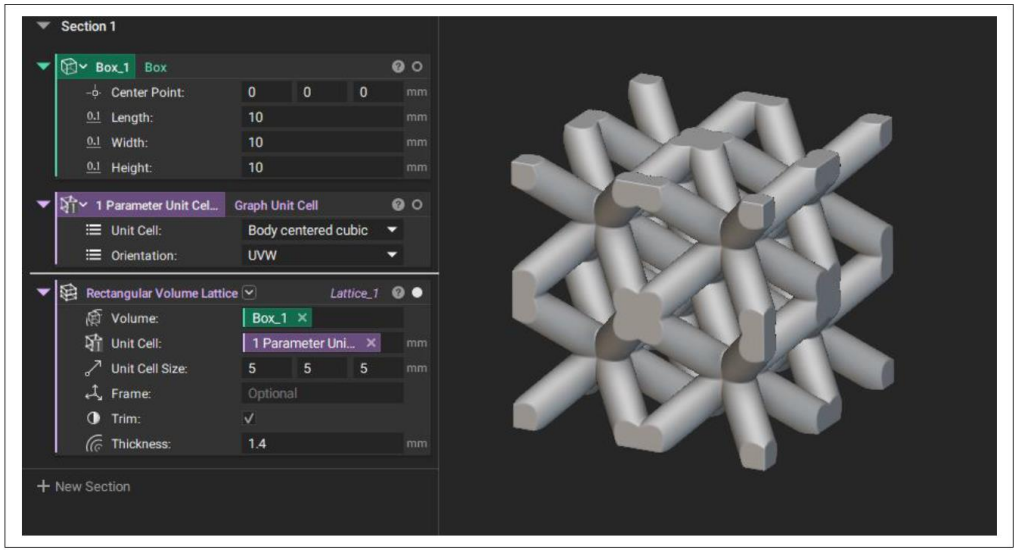
Şekil 3.3. Ntopology kutu (box) oluşturmak için değer girme işlemi

Bu çalışma kapsamında kiriş elemanlı kafes yapı tasarımları üzerine çarpışma analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle birim hücreyi oluşturmak için Ntopology programında Graph Unit Cell komutu kullanılmıştır. Bu komut içerisinde istenilen birim hücre yapısı seçilir.



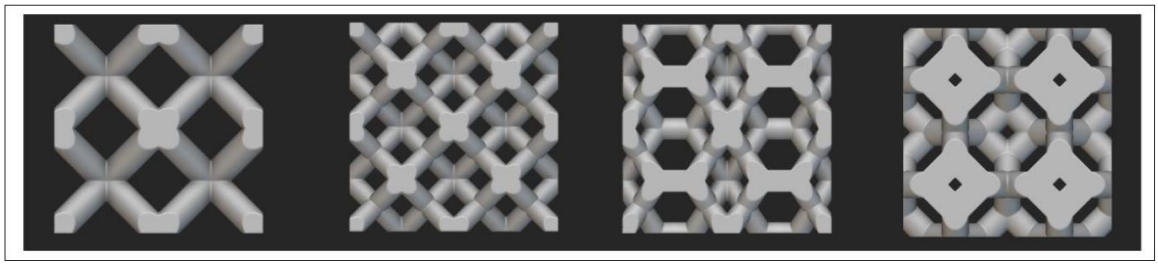
Şekil 3.4. Ntopology birim hücre oluşturma

Rectangular Volume Lattice, nTop içinde bir hacim oluşturmak ve bu hacim içinde düzenli bir kafes yapısı tasarlamak için kullanılan bir araçtır. Bu özellik, özellikle dikdörtgen prizma şeklindeki yapıların içini birim hücre yapıları ile doldurmak için kullanılır. Kafes hücre tipinin seçimi, bu hücrelerin boyutları, kalınlıkları ve dağılımları bu komut içerisinde ayarlanmaktadır. Şekil 3.5'de görüleceği üzere Rectangular Volume Lattice içerisindeki Volume içerisine daha önce oluşturduğumuz Box eklenir. Unit cell kısmına da daha önce oluşturduğumuz birim hücre yapısı eklenir. Birim hücre seçiminden sonra birim hücrenin X, Y ve Z boyutlarında ne kadar hacim kaplayacağını tanımlamak için Unit Cell Size içerisindeki X, Y ve Z değerleri girilir. Bu boyut, birim hücrelerin X, Y ve Z eksenlerinde ne kadar büyük olacağını tanımlar ve kafesin genel yoğunluğu ile yapısal özelliklerini etkiler. Tasarımcılar, belirli bir geometrik hacimde istedikleri kafes yapı yoğunluğunu ve hücre boyutlarını ayarlayarak optimize edebilirler. Bu, kafes yapının mekanik performansını ve malzeme kullanımını doğrudan etkileyen önemli bir parametredir.



Şekil 3.5. Ntopology kafes yapı oluşturma

Ntopology kütüphanesindeki kafes yapıları kullanılarak homojen kafes yapıları yukarıda anlatıldığı şekilde oluşturulmuştur. Şekil 3.6'da homojen BCC, Fluorite, Truncated Octahedron ve Kelvin kafes yapıları gösterilmiştir. Bu çalışma kapsamında tasarlanan tüm kafes yapılarının dış ölçüleri 10x10x10 mm'dir. Bu çalışma kapsamında tasarlanan tüm kafes yapıların içerisindeki birim hücre boyutları 5x5x5 mm'dir. Tasarlanan tüm kafes yapılarının kütlesi eşit olacak şekilde tasarlanmıştır ve dolayısıyla tüm kafes yapıların bağıl yoğunları da eşittir. Tüm kafes yapıların kütle, hacim ve dolayısıyla bağıl yoğunluklarının eşit olması sayesinde analiz sonuçlarının daha doğru değerlendirileceği düşünülmektedir.



Şekil 3.6. Soldan sağa sırayla homojen BCC, Fluorite, Truncated Octahedron, Kelvin kafes yapıları

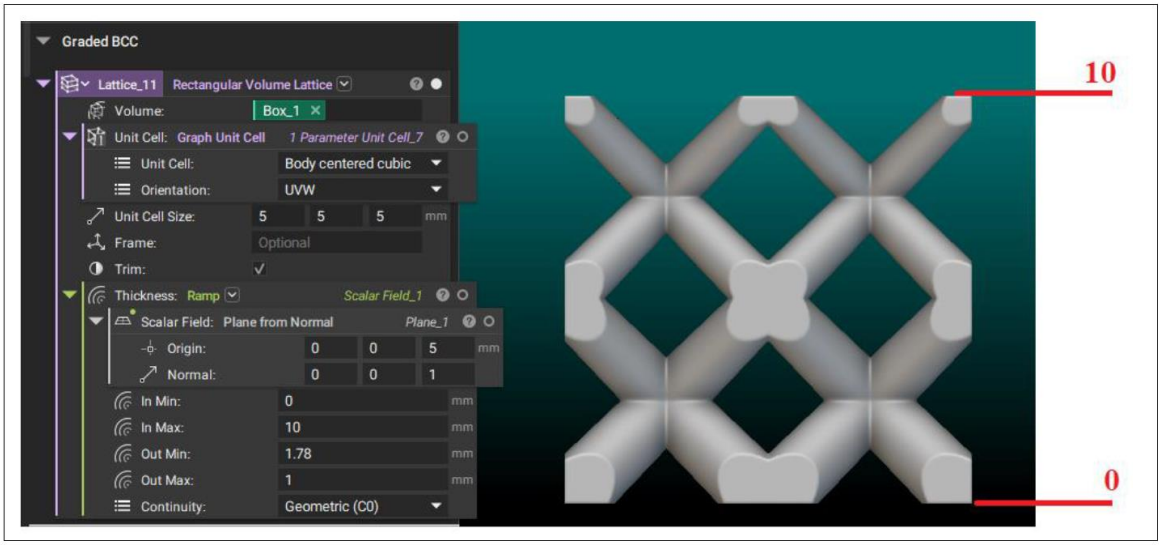
Ntopology programında kademeli (graded) kafes yapı tasarımı, Field-Driven Design yöntemi kullanılarak yapılmaktadır. Field-Driven Design, belirli bir alanda geometrik ve fiziksel parametrelerin kontrol edilebilmesini sağlar. Bu yöntem, tasarım parametrelerinin

matematiksel alanlarla tanımlanarak özelleştirilmiş ve optimize edilmiş yapılar oluşturulmasına olanak tanır.

Ramp fonksiyonu ise bu parametrelerde kademeli geçişler oluşturarak özelliklerin dereceli olarak değişmesini mümkün kılmaktadır. Ramp fonksiyonu ile yoğunluk, kalınlık gibi parametrelerin bir bölgeden diğerine yumuşak bir geçişle değişimi sağlanabilir. Özellikle malzeme kullanımını optimize etmek ve performansı artırmak için kritik bir araçtır. Örneğin, yük taşıma kapasitesinin farklı olduğu bölgelerde yapısal özelliklerin optimize edilmesine olanak tanır.

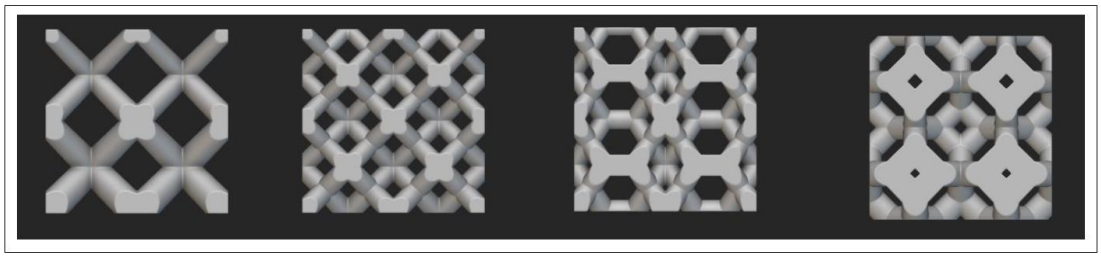
Bu yöntem, optimize edilmiş ve performansı yüksek kademeli kafes yapıların tasarımında önemli araçlar olarak kullanılmaktadır. Kademeli yapılar, belirli mühendislik uygulamaları için gerekli olan mekanik özellikleri sağlarken aynı zamanda malzeme verimliliğini artırır ve üretim maliyetlerini düşürür.

Şekil 3.7’de kademeli kafes yapısının nasıl oluşturulduğuna dair Ntopology görseli paylaşılmıştır. Kademeli kafes yapısı oluşturmak için yine Rectangular Volume Lattice komutu kullanılır. Bu komut içerisinde yine birim hücre yapısı ve birim hücrenin boyutunu belirleyen Unit Cell Size değerleri girilir. Thickness (et kalınlığı) kısmına ise normal bir kalınlık değeri yazılmayıp Ramp fonksiyonu eklenir. Ramp fonksiyonu içerisinde öncelikle orijin noktası ve kademeli geçişin oluşturulacağı yön belirlenmektedir. Ramp fonksiyonu içerisinde In Min-In Max ve Out Min-Out Max değerleri belirlenmelidir. Buradaki In min değeri kademeli geçişin başlayacağı sıfır noktası olarak kabul edilir. In Max ise kademeli geçişin sonlanacağı son noktayı temsil eder. Out Min değer kademeli geçişin başladığı sıfır noktasındaki et kalınlığını temsil ederken Out Max değeri kademeli geçişin sonlandığı son kısımdaki et kalınlığını temsil eder. Bu komut sayesinde aşağıdan yukarıya doğru kademeli bir şekilde et kalınlığının azaldığı bir yapı elde edilir.



Şekil 3.7. Ntopology kademeli kafes yapı oluşturma

Ntopology kütüphanesindeki kafes yapıları kullanılarak kademeli kafes yapıları yukarıda anlatıldığı şekilde oluşturulmuştur. Şekil 3.8'de kademeli BCC, Fluorite, Truncated Octahedron ve Kelvin kafes yapıları gösterilmiştir. Tüm kademeli kafes yapıların toplam ağırlığı yine 0,85 gr olarak ayarlanmıştır. Bu sayede hem kademeli kafes yapılarını birbirleri ile doğru bir şekilde karşılaştıracağız hem de homojen kafes yapılarına göre doğru bir şekilde karşılaştırabileceğiz.



Şekil 3.8. Soldan sağa sırayla kademeli BCC, Fluorite, Truncated Octahedron, Kelvin kafes yapıları

3.4. Özel Kafes Yapı Tasarımı

Kafes yapılar taşıyabileceği yükün üzerinde kuvvet uygulandığı takdirde kırılma davranışı gösterir. Kırılma davranışı nedeniyle kafes yapının taşıyabileceği yük ve enerji absorpsiyon kabiliyeti azalmaktadır. Aşağıda, düğüm noktalarını iyileştirmek amacıyla yapılan bazı çalışmalar ve sonuçları eklenmiştir.

Mines ve diğerleri tarafından BCC yapısına gerçekleştirilen yarı statik testlerde, düğüm noktalarında bölgesel kırılmaların meydana geldiği görülmüştür. Bu çalışmada malzeme kırılmasının düğüm noktalarına yakın bölgelerde gerçekleştiğini görülmüştür [44].

Miao ve diğerleri, düğüm noktalarındaki gerilme yoğunluğunu azaltmak ve mekanik özellikleri iyileştirmek amacıyla konik çubuklarla BCC kafes yapılarının parametrik bir modelleme yaklaşımını sunmuştur. Farklı konik çubuklara sahip kafes yapıların mekanik özellikleri ve deformasyon davranışları, sonlu elemanlar analizi ve tek eksenli sıkıştırma testleri ile incelenmiştir. Sonuçlar, konik çubukların BCC kafes yapılarının anizotropisini önemli ölçüde azalttığını ve elastik modülünü %67'ye kadar arttırdığı görülmüştür [45].

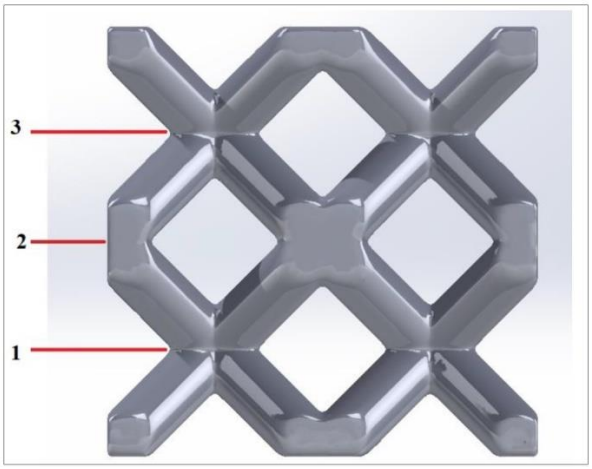
Liu ve diğerleri, Ti6Al4V alaşımından üretilmiş elmas birim hücrelerine dayalı kafes yapıları kullanarak birim hücrelere ait düğümlerin yüzey eğriliğinin optimize edilmesi sağlamışlardır. Bu optimizasyon sonucunda düğümlerin pürüzsüz ve eğimli hale getirilmesi sağlanmıştır. Yapılan basma testleri sonucunda optimize edilmiş düğümlere sahip yapılar gerilme yoğunluğunu azaltarak mekanik dayanımı arttırmış ve deformasyon davranışını iyileştirmiştir [46].

Wu ve diğerleri, BCC kafes yapısındaki düğüm noktalarına küçük küreler eklemiş ve yapılan düğüm güçlendirme sonucunda, standart BCC kafes yapısına göre %24,7 daha yüksek bir eşdeğer elastik modül sağladığı görülmüştür. Bu güçlendirilmiş yapı, yarı statik basma testlerinde yüksek enerji emme ve yük taşıma kapasitesi sergilemiştir. Yüksek hızdaki darbe altında, düğüm güçlendirilmiş kafes yapısının (NBCC) yük taşıma performansının önemli ölçüde arttığı görülmüştür [24].

Literatürdeki çalışmalara göre düğüm noktalarındaki gerilmeyi azaltarak yapının enerji absorpsiyon kabiliyetini arttıracağı sonucuna varılmıştır. Bu nedenle özel kafes yapısı tasarlanırken düğüm noktalarındaki gerilmeyi azaltmak için bu bölgedeki kesit kalınlığının arttırılması sonucuna ulaşılmıştır. Buradan elde edilen sonuçlarla özel kafes yapısı tasarlanmasına karar kılınmıştır. Özel kafes yapısı tasarlanırken iki kısıt göz önüne alınmıştır. Birinci kısıt olarak yeni tasarlanacak kafes yapısı BCC kafes yapısına benzeyecek şekilde tasarlanarak eğilme-baskın (bending-dominated) bir davranış göstermesi sağlanmalı, ikinci kısıt olarak yeni tasarlanacak kafes yapısının düğüm noktalarındaki kesit alanı arttırılarak düğüm noktalarının ve dolayısıyla kafes yapının bütününün mekanik dayanımını

arttırmak amaçlanmıştır. Bu tasarım kısıtları ile yeni tasarlanacak parçaya yüksek hızlı çarpışma gerçekleştirildiği durumda, kafes yapının hem rijit davranması hem de kafes yapı kırılmadan önce esneyerek daha fazla enerji absorbe edebilmesi sağlanacaktır. Bu çalışma kapsamında, düğüm noktasındaki kesit alanının arttırılmasının yanında birim hücrelere ait olan kirişlerin, düğüm noktasına olan mesafesi arttırılmıştır. Kirişlerin boyu uzadığından dolayı kirişlerin daha fazla deformasyon yapacağı öngörülerek düğüm noktalarındaki gerilmenin azalacağı tahmin edilmektedir.

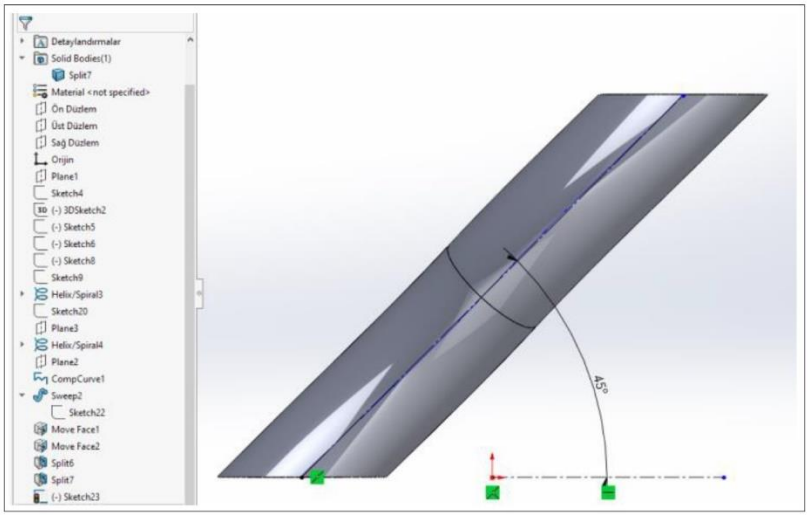
Özel kafes yapının kiriş uzunluğunun, BCC yapısına göre daha fazla olabilmesi için özel kafes yapısındaki kiriş şeklinin helisel olarak yapılmasına karar verilmiştir. Kafes yapı tasarlarken sadece birim hücre tasarımı değil aynı zamanda birim hücrelerin oluşturduğu kafes yapısı da yapının performansını etkilemektedir. Bu nedenle özel birim hücre tasarlandıktan sonra kafes yapı haline getirilip düğüm noktalarında kesit analizi yapılacaktır. Şekil 3.9'da gösterildiği gibi kafes yapısı 3 bölgeye ayrılmıştır. 1 ve 3 no'lu bölgedeki düğüm noktalarındaki kesit alanları, birim hücrenin merkezindeki kesit alanları toplamından yani birim hücrenin kendisinden gelmektedir. 2 no'lu bölgedeki düğüm noktasındaki kesit alanı ise birim hücrelerin birbirleri ile birleşimi sonucunda oluşan kesit alanına karşılık gelir. Tasarlanan BCC ve özel kafes yapısı yapısı simetrik bir yapıya sahip olduğundan dolayı her biri için 1 ve 3 no'lu bölgesindeki kesit alanları eşittir.



Şekil 3.9. Kafes yapısı düğüm bölgeleri

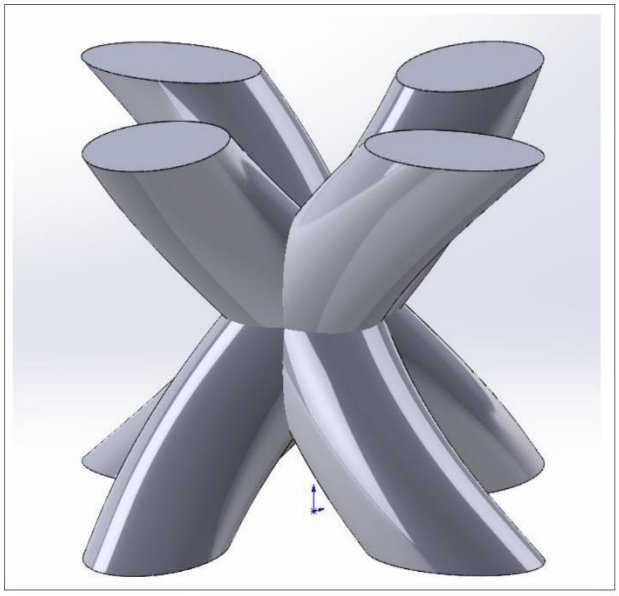
Bu çalışma kapsamındaki özel birim hücre tasarımı Solidworks programında gerçekleştirilmiştir. Birim hücre tasarımındaki kirişler helis komutu ile oluşturulmuştur.

Şekil 3.10'da görüleceği üzere helisin yatay düzlemle yaptığı açı, BCC yapısındaki gibi 45 derece olarak ayarlanmıştır.



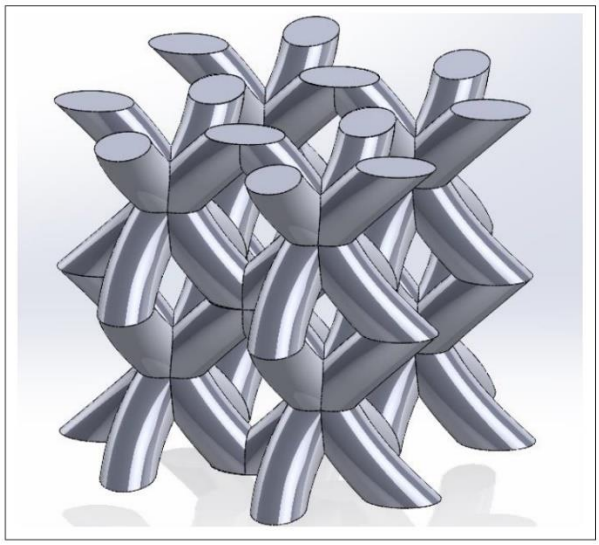
Şekil 3.10. Özel birim hücre kiriş tasarımı

Birim hücreye ait kiriş, ekseni etrafında döndürülerek birim hücre oluşturulmaktadır. Şekil 3.11'de birim hücre yapısı gösterilmiştir.



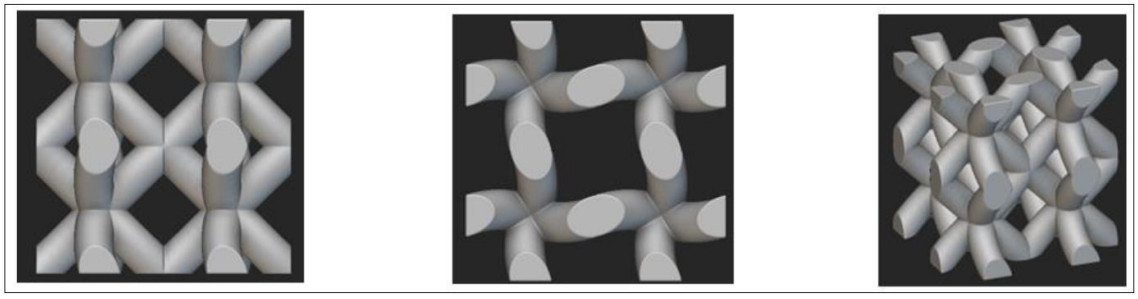
Şekil 3.11. Özel birim hücre tasarımı

Birim hücre yapısı çoğaltılarak kafes yapı haline getirilmiştir. Şekil 3.12'de gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Solidworks programında tasarlanan özel kafes yapısı

Tüm kafes yapıları Ntopology programı üzerinden çıktı alındığı için bu özel kafes yapısı da Ntopology programına yüklenmiştir. Daha sonra kafes üzerindeki dışa doğru olan çıkıntılar temizlenip mesh yapısı oluşturulup step olarak export edilmiştir. Şekil 3.13'te özel kafes yapısının son hali gösterilmiştir. Şekilde, özel kafes yapısının önden, üstten ve perspektif görünüşleri verilmiştir. Özel kafes yapısına önden bakıldığında BCC yapısına benziyorken üstten bakıldığında düzlemsel kafes yapısına benzemektedir. Bu benzetim nedeniyle özel kafes yapısının düzlemsel kafes yapılar gibi rijit ve BCC yapılar gibi esnek davranması sağlanabilir.



Şekil 3.13. Ntopology programında düzenlenen özel kafes yapısının son hali

Kafes yapılarının kesit alan hesabı

Kesit alan hesabını gerçekleştirebilmek için BCC ve Özel Kafes yapısının alt yüzeyinden başlayarak yukarıya doğru 0,5 mm adım aralıklarında kesit alanları hesaplanmıştır. Çizelge 3.2'de tüm kafes yapılarına ait her bir adımdaki kesit alanı değeri verilmiştir. Bu tablodaki adım 2,5 ve 7,5 mm değerleri 1 ve 3 no'lu bölgeye denk gelmektedir. 5 mm olarak belirtilen değer 2 no'lu bölgeye denk gelmektedir. Buradaki kesit analiz değerlerinden yola çıkarak çarpışma analiz sonuçları yorumlanacaktır. Çizelge içerisine çalışma kapsamında incelenen diğer kafes yapılarının da kesit alanları eklenmiştir.

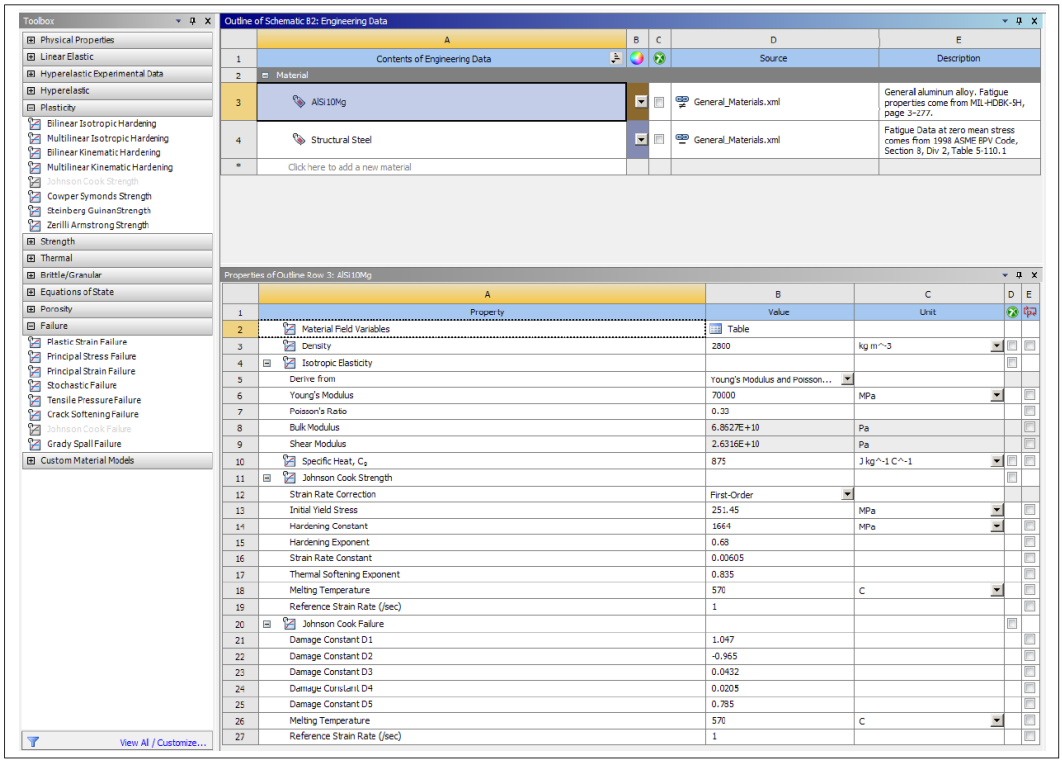
Çizelge 3.2. Kafes yapılarının yükseklik boyunca 0,5 mm adımlardaki kesit alanları (mm^2)

Adım (mm)	BCC	Özel	Kelvin	Fluorite	Truncated Octahedron
0,5	28,75	34,04	41,16	28,97	43,92
1	41,83	42,38	20,14	25,35	41,74
1,5	42,45	36,59	20,12	25,38	37
2	28,96	24,14	41,1	29	13,2
2,5	15,53	14,09	40,08	12,98	10,34
3	28,97	24,15	41,15	29	13,21
3,5	42,48	36,61	20,11	25,42	37
4	41,92	42,4	20,11	25,4	41,61
4,5	28,9	34,04	41,14	29	43,89
5	15,55	23,37	40,42	12,95	30,51
5,5	28,84	34,09	41,14	29	43,89
6	41,91	42,48	20,11	25,4	41,61
6,5	42,56	36,65	20,11	25,42	37
7	29,01	24,18	41,15	29	13,21
7,5	15,48	14,09	40,08	12,98	10,34
8	28,97	24,14	41,1	29	13,2
8,5	42,47	36,59	20,12	25,38	37
9	41,9	42,38	20,14	25,35	41,74
9,5	28,84	34,04	41,16	28,97	43,92

3.5. Ansys Programında Çarpışma Analizinin Kurulumu

Bu başlık altında Ansys programında kafes yapılar üzerine gerçekleştirilen çarpışma analizi adımları anlatılmıştır. Çarpışma analizi yüksek hızda gerçekleştirildiği için ve dolayısıyla gerinim oranları yüksek olduğu için Ansys programındaki explicit modülü kullanılmıştır.

Bu çalışma kapsamında Caliskan ve diğerlerinin gerçekleştirdiği testler sonucunda belirlemiş oldukları AlSi10Mg Johnson Cook parametreleri referans alınmıştır. Bu değerler Ansys programındaki Engineering Data kısmına yeni malzeme olarak eklenmiştir. Şekil 3.14'te Ansys program ekran görüntüsü verilmiştir.

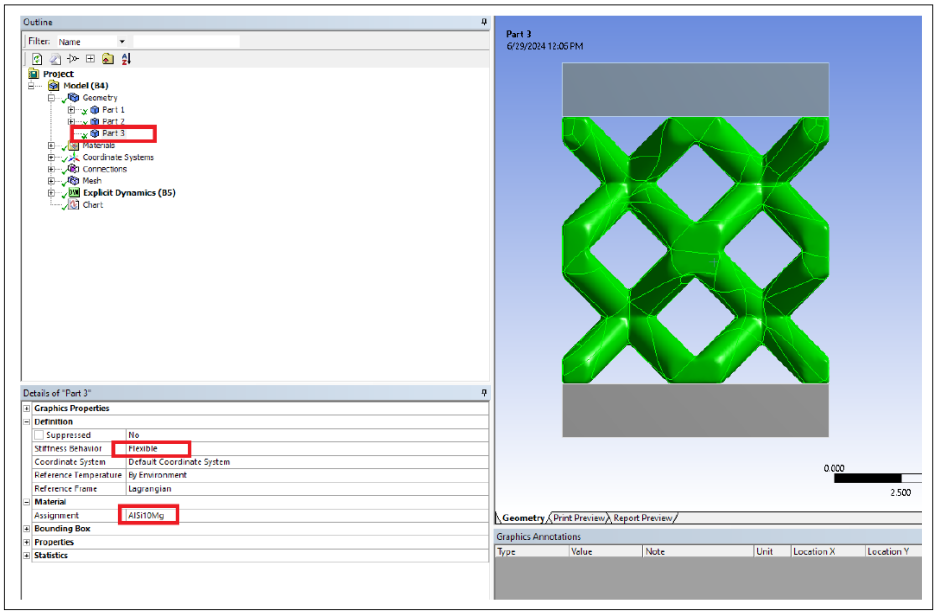


Şekil 3.14. Ansys AlSi10Mg malzeme değerlerinin girişi

Kafes yapısına çarpan malzeme olarak çelik malzemesi seçilmiştir. Kafes yapısına çarptırılan parçanın boyutları 10x10x2 mm belirlenmiştir.

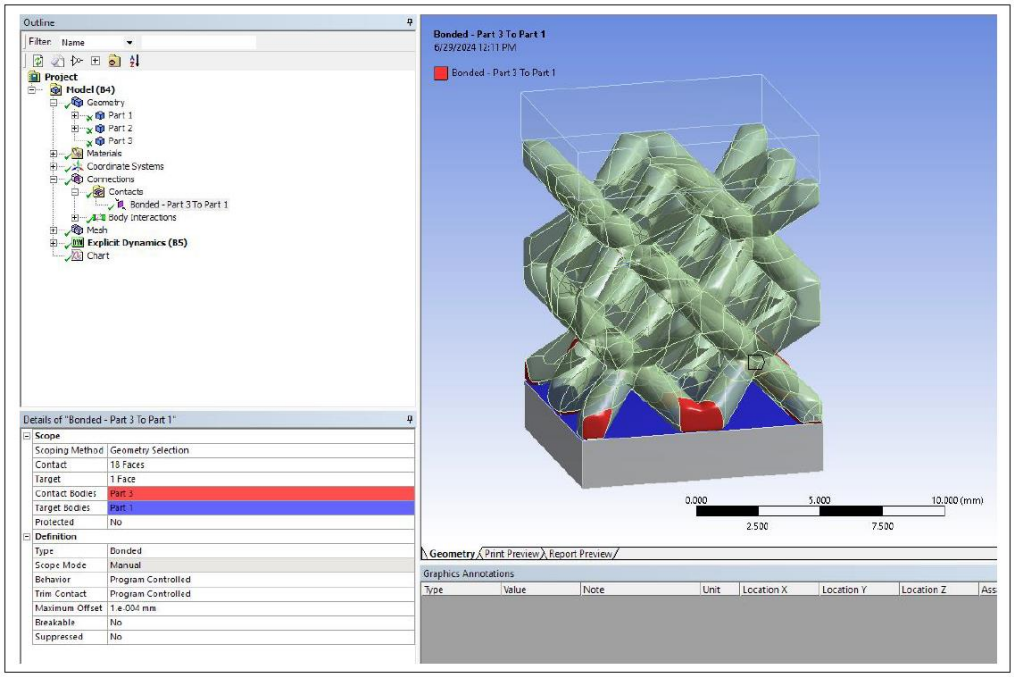
Ansys progamındaki Geometry kısmına model aktarımı da yapıldıktan sonra Explicit Dynamic modülüne giriş yapılmıştır. Şekil 3.15'te görüleceği üzere kafes yapısına AlSi10Mg malzemesi atanmış ve rijitlik davranışı olarak Flexible seçilmiştir. Görselde

gözüken diğer iki parçadan biri kafes yapısının temas ettiği yer düzlemi olarak belirlenmiştir diğer parça ise kafes yapısına çarptırılan malzeme olarak belirlenmiştir. Bu iki parçanın rijitlik davranışı olarak Rigid seçilmiştir.



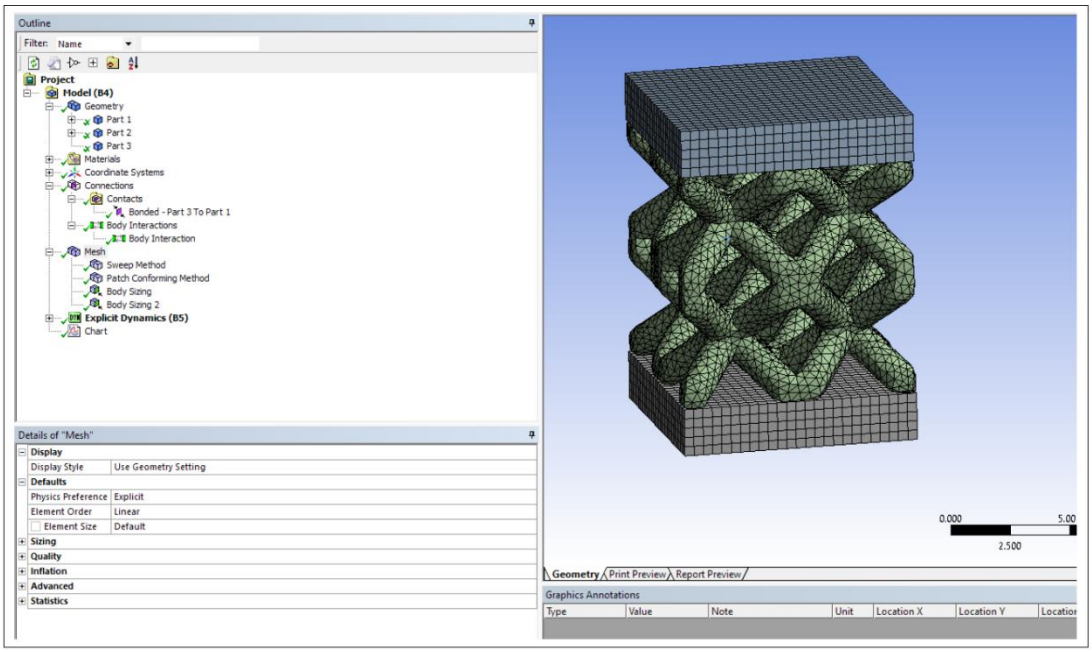
Şekil 3.15. Parça üzerine malzeme atama işlemi

Daha sonra sınır koşulları belirlenmiştir. Şekil 3.16'da görüleceği üzere kafes yapısının yer düzlemine temas ettiği yüzeyler ile yer düzlemi arasında Bonded contact belirlenmiştir. Ayrıca Explicit Dynamic içerisinde Body Interactions isimli contact türü otomatik olarak belirlenmektedir. Bu contact türü, çarpışma analizi esnasında otomatik temas tanımlamak için kullanılmaktadır. Bu sayede çarpışma süresince temas yüzeyleri program tarafından belirlenmektedir.



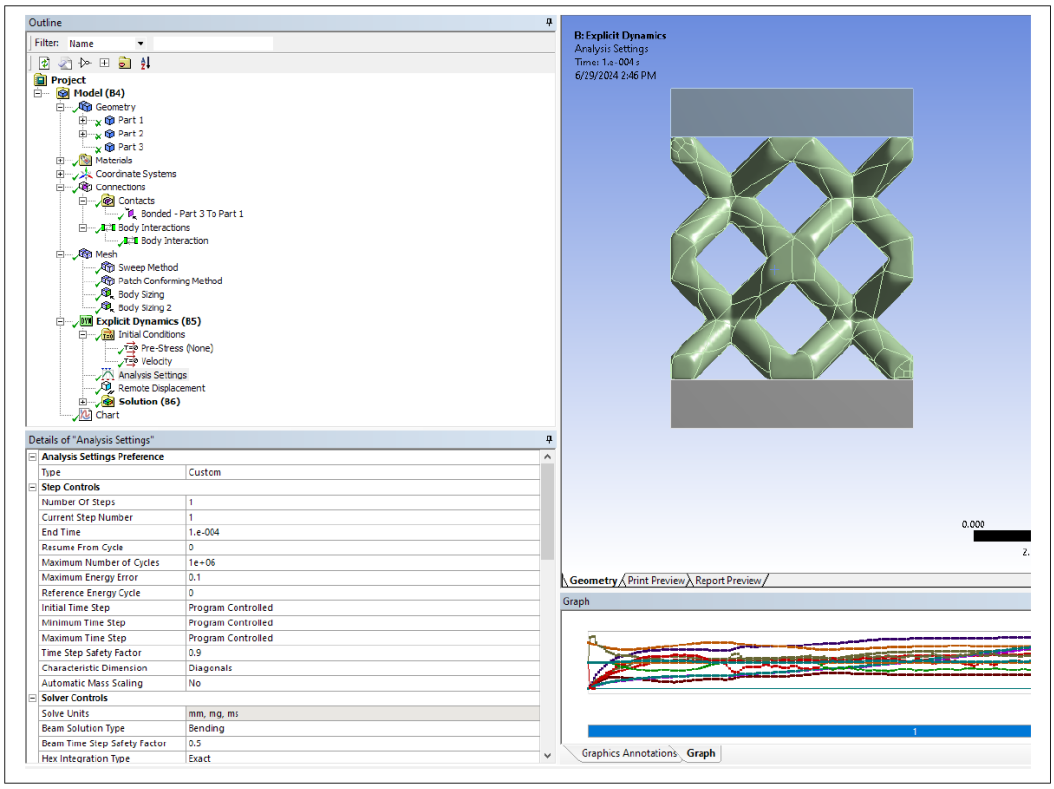
Şekil 3.16. Parça temas yüzeylerinin belirlenmesi

Daha sonra mesh oluşturma işlemi gerçekleştirilmiştir. Yer düzlemi olarak belirlenen parça ve çarpan parçaya Sweep metodu, kafes yapısına ise tetrahedron mesh uygulanmıştır. Mesh boyutu olarak 0,4 mm belirlenmiştir.



Şekil 3.17. Mesh yapısı oluşturma işlemi

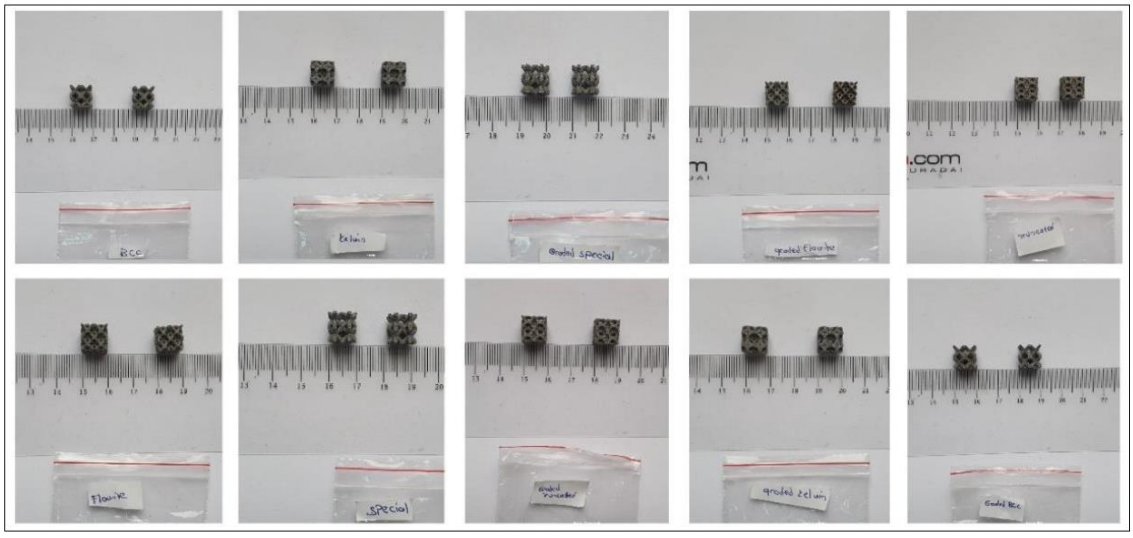
Daha sonra sınır koşulları ve analiz parametreleri eklenmiştir. Tüm kafes çarpışma analizlerinde çarpan parçanın hızı 80 m/s olarak belirlenmiştir. Yer düzlemi olarak belirtilen parçaya remote displacement uygulanmıştır ve tüm eksenlerde hareketi kısıtlanmıştır. Çarpışma süresini etkileyen end time ve maximum number of cycles değerleri sırayla 0,0001 ve 1.000.000 olarak belirlenmiştir. Hasar etkisini de analizde dahil etmek için on material failure seçeneği “yes” olarak ayarlanmıştır. Şekil 3.18’de analiz kurulumu sonucundaki görsel gösterilmiştir.



Şekil 3.18. Analiz kurulumu son işlemleri

3.6. Kafes Yapılarının Üretimi

Bu çalışma kapsamında Ntopology programında tasarlanan kafes yapıları .3mf olarak çıktı alınmıştır. Lattice yapıların modelinde herhangi bir düzeltme yapılmadan, destek yapıları kullanılmadan EOS M290 cihazında, SLM yöntemiyle AlSi10Mg malzemesinden üretilmiştir. Üretilen kafes yapıların fotoğrafları aşağıdadır.



Şekil 3.19. Çalışma kapsamında AlSi10Mg malzemeden üretilen kafes yapıları

Tüm kafes yapıları aynı parametreler ile üretilmiştir. Parametrelerin değerleri aşağıda verilmiştir.

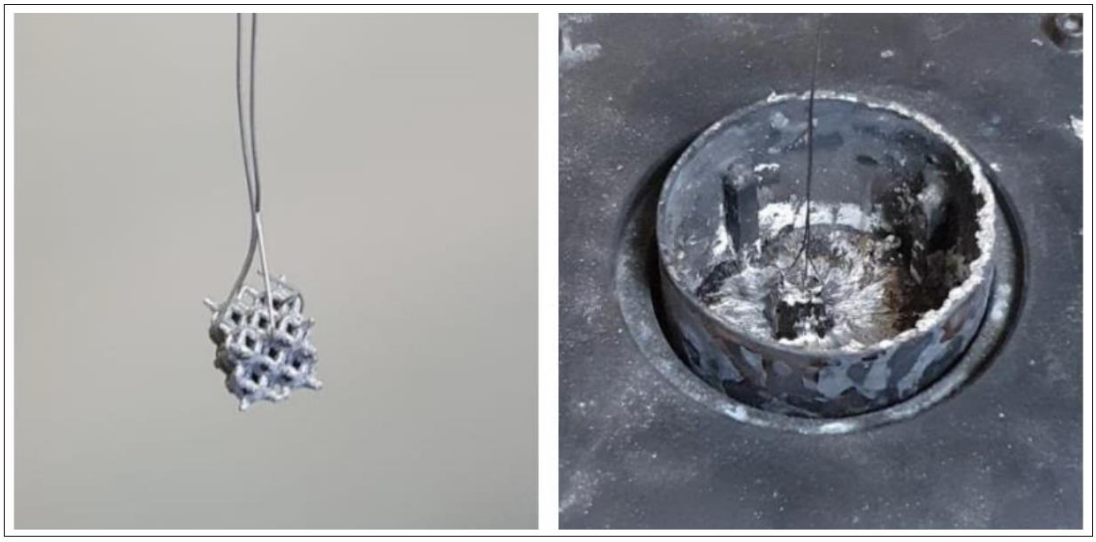
- Lazer gücü: 370 W
- Işın çapı: 100 mikron
- Tarama hızı: 1300 mm/s
- Katman kalınlığı: 30 mikron
- Platform ısıtma sıcaklığı: 165 °C
- Atmosfer: Argon
- Tarama aralığı: 0,19 mm

3.7. Zamak İnfiltrasyon İşlemi ve Basma Testleri

Bu çalışma kapsamında, üretilen kafes yapıların bir kısmına Zamak 5 (ZnAl4Cu1) infiltrasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu sayede zamak malzemesinin AlSi10Mg malzemesi üzerine nüfuziyeti konusunda bilgi sahibi olunmak istenmiştir. Zamak malzemesi döküm işlemlerinde sıklıkla kullanılan bir malzeme olduğundan dolayı iyi akışkanlık özelliğine sahiptir ayrıca zamak malzemesinin ergime sıcaklığı AlSi10Mg malzemesinden daha düşüktür. Bu sebeplerden ötürü infiltrasyon işlemi için Zamak malzemesi tercih edilmiştir. Çalışma kapsamında basınçsız infiltrasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle kafes yapılarının bazılarına Zamak malzemesi hiç nüfuz edememişken bir kısmı da kısmi

olarak nüfuz etmiştir. Zamak malzemesinin infiltrasyon işlemi için gerçekleştirilen aşamalar aşağıda anlatılmıştır.

Zamak malzemesi basınçsız infiltrasyon yöntemi ile yani daldırma yöntemiyle AlSi10Mg malzemesine nüfuz ettirilmeye çalışılmıştır. Aşağıdaki görselde görüleceği üzere kafes yapılarının etrafından tel geçirilmiştir. Daha sonra bu yapı yaklaşık 400 derecede olan ergiyik Zamak malzemesi içerisine daldırılıp çıkarılmıştır.



Şekil 3.20. İnfiltrasyon işlemi ilk aşama

Bu işlemden sonra aşağıdaki şekildeki gibi bir yapı oluşmuş olur.



Şekil 3.21. İnfiltrasyon işlemi sonucu oluşan ikinci aşama

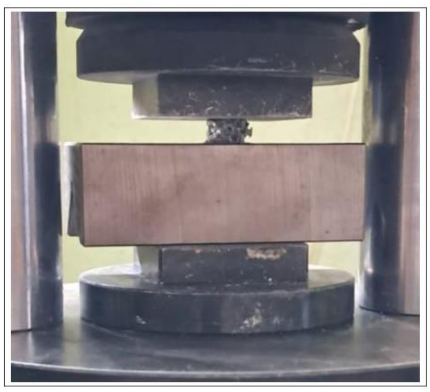
Daha sonra fazlalık olan çelik tel kesilip atılmıştır ve parça üzerinde fazlalık olan Zamak malzemesi temizlenmiştir. Aşağıdaki görsellerde görüleceği üzere zamak malzemesinin Alsi10Mg kafes yapılarına tam nüfuz etmediği görülmektedir.



Şekil 3.22. Kademeli özel ve kademeli Truncated Octahedron kafes yapılarının infiltrasyon sonucu

Çalışma kapsamında kısmi infitrasyon işleminin gerçekleştiği kafes yapıları şunlardır: Özel, Kelvin, Truncated Octahedron ve bu kafes yapılarının kademeli olan tasarımları.

Yukarıda isimleri verilen kısmi zamak nüfuz ettirilmiş kafes yapıları, PCM 304 model basma testi cihazı ile test edilmiştir. Her bir kafes yapısı için deformasyonun başladığı ilk kuvvet değeri not edilmiştir.



Şekil 3.23. Zamak infiltrasyon işlemi yapılmış kafes yapısına basma testinin gerçekleştirilmesi

Kısmi olarak zaman infiltrasyon işlemi gerçekleştirilmiş olan kafes yapılarının basma testi sonucunda, ilk deformasyonun başladığı yük değerleri aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 3.3. İnfiltrasyon sonucu kafes yapılarının basma testi sonuçları

Kafes Yapı	Deformasyon (kN)
Truncated Octahedron	4,75
Kelvin	10,54
Kademeli Özel	11,63
Kademeli Truncated Octahedron	9,83
Özel	7,08
Kademeli Kelvin	7,85

Basınçsız infiltrasyon yöntemiyle AlSi10Mg malzemesine zamak malzemesi tam olarak nüfuz ettirilememiştir. Yukarıdaki tablodaki Kelvin yapısı hariç diğer yapıların kademeli hallerine nispeten daha fazla nüfuziyet gerçekleşmiştir. Bu nedenle bu kademeli yapıların ilk deformasyon değerleri daha yüksek çıkmıştır. Tüm kafes yapılarına tam olarak nüfuziyet gerçekleşmediğinden dolayı bu çalışma kapsamında tasarlanan kafes yapılarının zamak malzemesi ile basınçsız infiltrasyon işleminin uygun olmadığı görülmüştür. Bu nedenle bu tablodaki veriler bu çalışma kapsamındaki sonuçlar kısmında yorumlanmamıştır.

3.8. Deneysel Çarpışma Testi

Bu çalışma kapsamında üretilen kafes yapılara, split-hopkinson basınç çubuğu testi yapılmıştır. Bu sayede bilgisayar ortamında yapılan simülasyon ile deneysel test sonuçlarının karşılaştırılması planlanmıştır.

Deneysel test için gerinim oranı (strain rate) değeri 1800 (1/s) olarak belirlenmiştir. Bu değer, çalışma kapsamında kullanılan test cihazının maksimum değeridir. Bu gerinim oranına karşılık gelen cihazdaki giriş çubuğunun hızı 19 m/s olarak gerçekleşmiştir. Deneysel test sonucunda kuvvet-deformasyon eğrileri oluşturulmuştur. Bu eğriler ile bilgisayar ortamında gerçekleştirilen analizler karşılaştırılmıştır.

Deneysel teste başlamak için test parçası, giriş ile çıkış çubuğu arasına aşağıdaki şekildeki gibi yerleştirilmiştir.

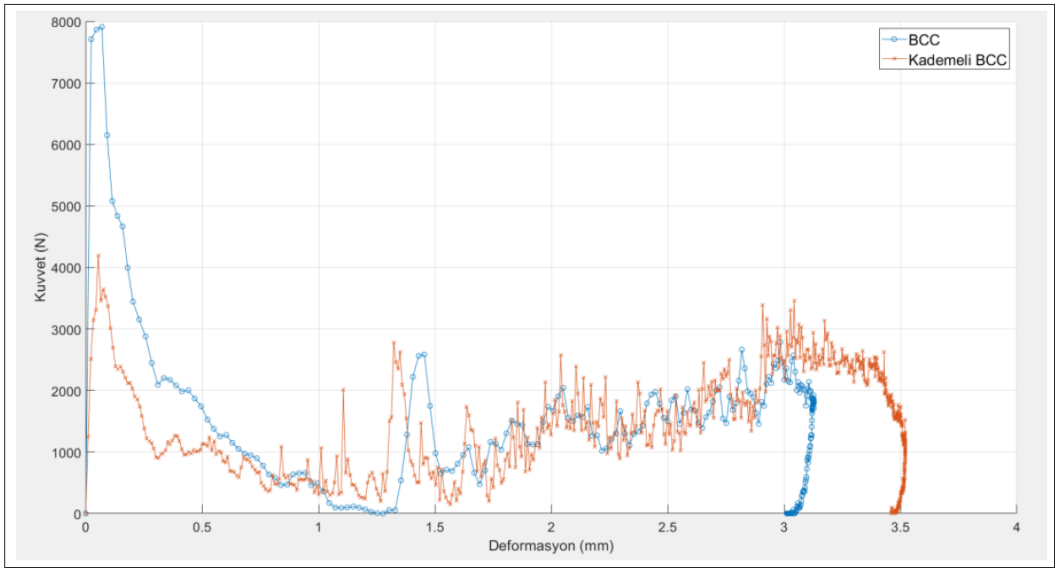


Şekil 3. 24. Giriş ve çıkış çubuğu arasına yerleştirilen test parçası

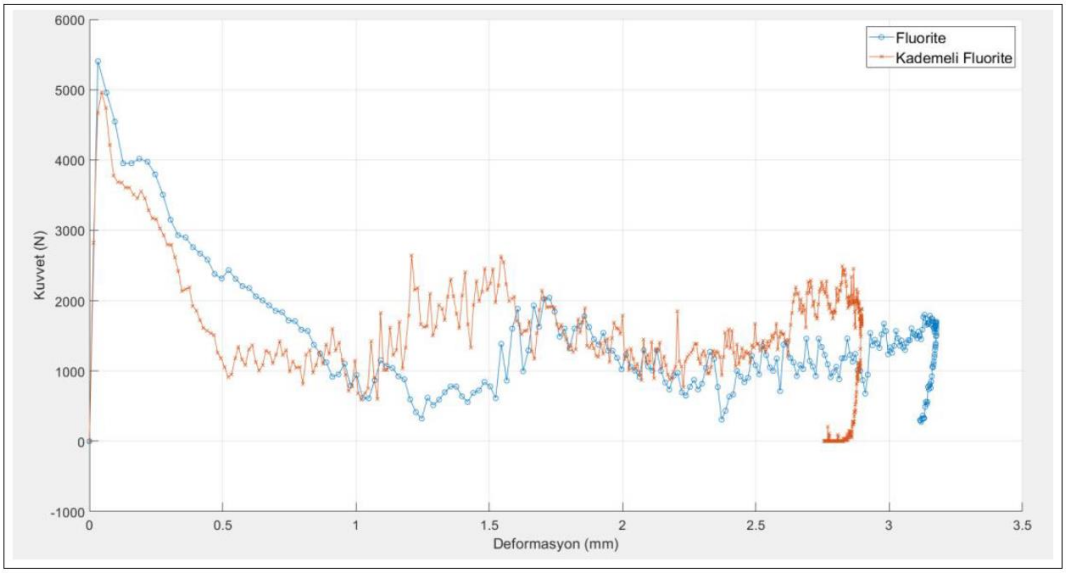
4. TARTIŞMA VE BULGULAR

4.1. Homojen Kafes Yapılarının Kuvvet – Deformasyon Grafikleri

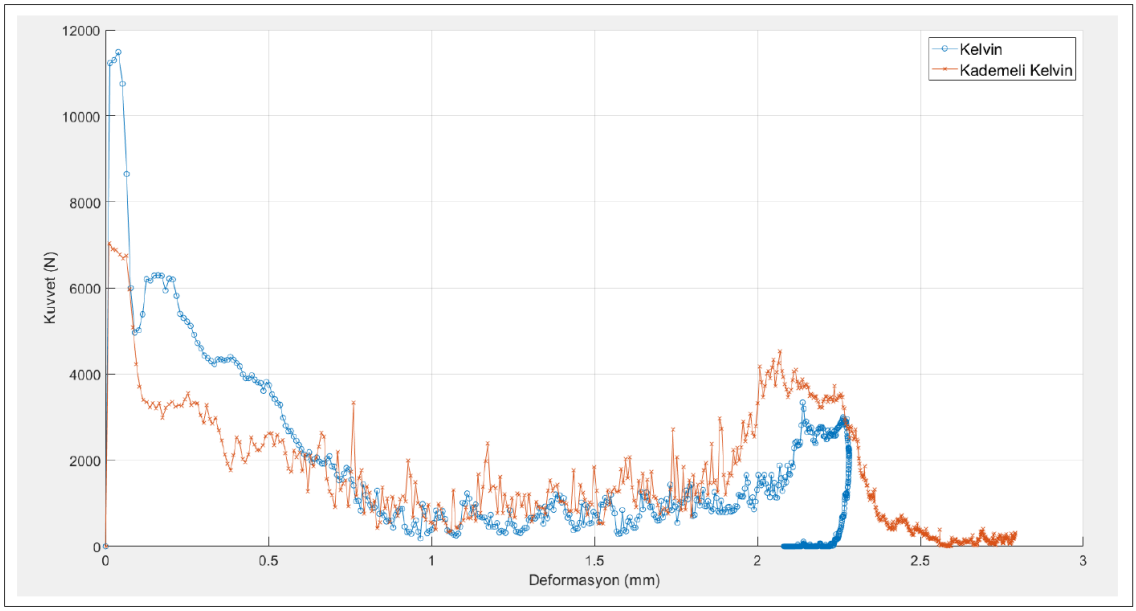
Bu başlık içerisinde bilgisayar ortamında gerçekleştirilen çarpışma testi sonucunda elde edilen kuvvet-deformasyon grafikleri gösterilmiş ve başlığın sonunda grafikler hakkında elde edilen bulgular yazılmıştır.



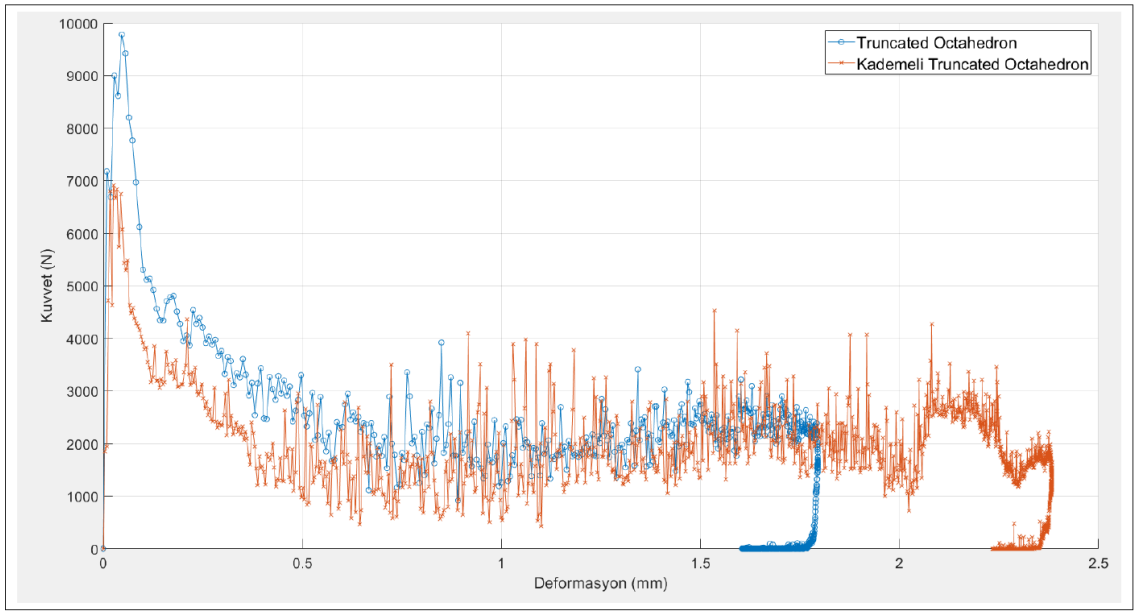
Şekil 4.1. BCC – Kademeli BCC yapılarının kuvvet-deformasyon grafiği



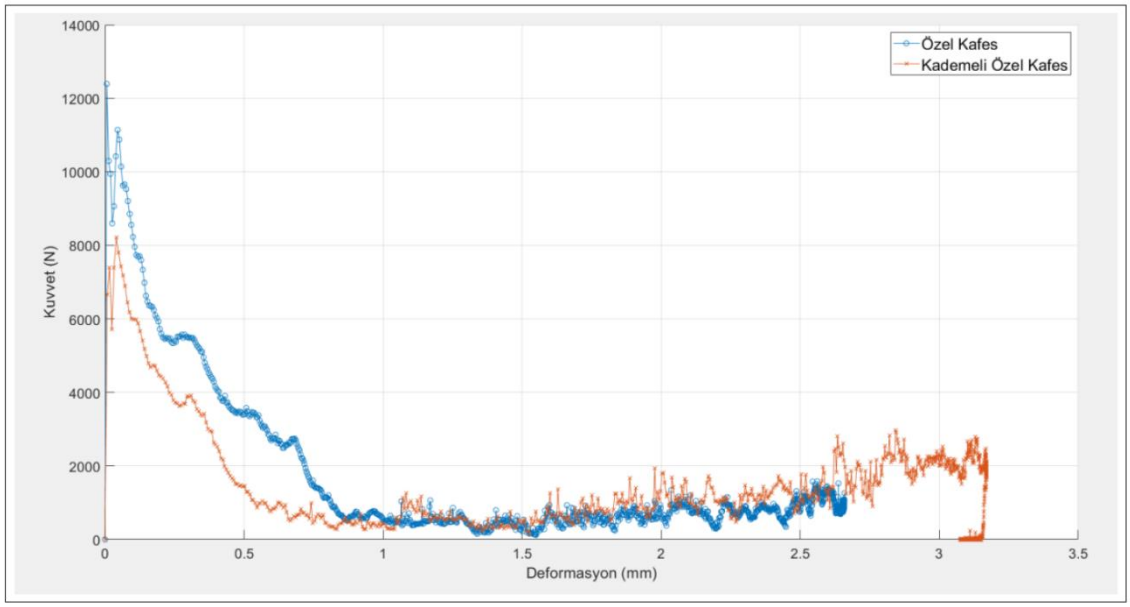
Şekil 4.2. Fluroite – Kademeli Fluorite yapılarının kuvvet-deformasyon grafiği



Şekil 4.3. Kelvin – Kademeli Kelvin yapılarının kuvvet-deformasyon grafiği



Şekil 4.4. Truncated Octahedron – Kademeli Truncated Octahedron yapılarının kuvvet-deformasyon grafiği



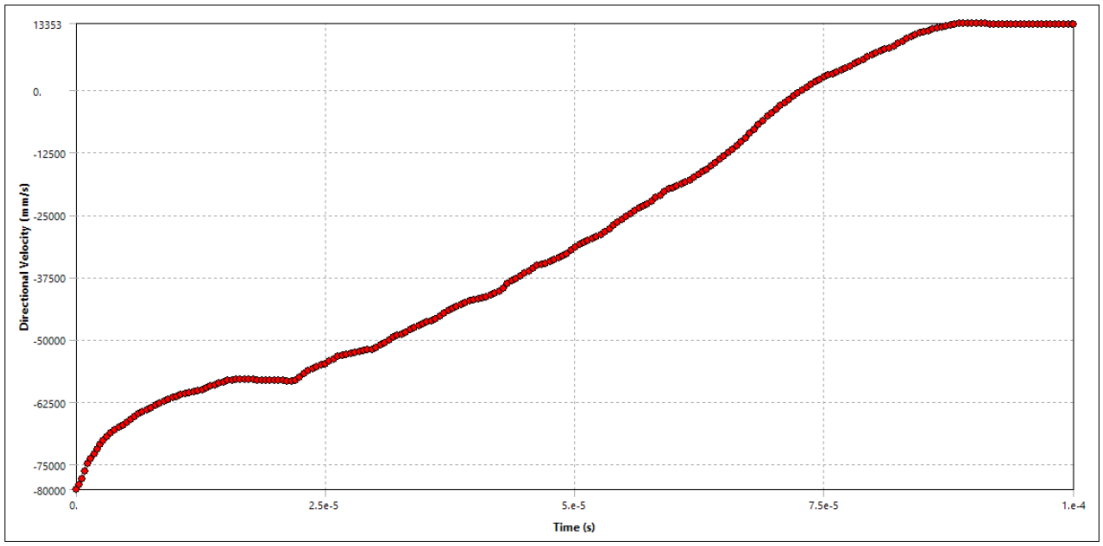
Şekil 4.5. Özel Kafes – Kademeli Özel Kafes yapılarının kuvvet-deformasyon grafiği

Yukarıdaki kuvvet-deformasyon eğrileri incelendiğinde kademeli kafes yapılarının aynı kafes tipinin homojen yapısına göre daha düşük ilk çarpışma kuvveti sergilediği görülmektedir. Bu durum, bu yapıların ilk darbe anında daha esnek olduklarını ve ani yüksek kuvvetlere daha az maruz kaldıklarını göstermektedir.

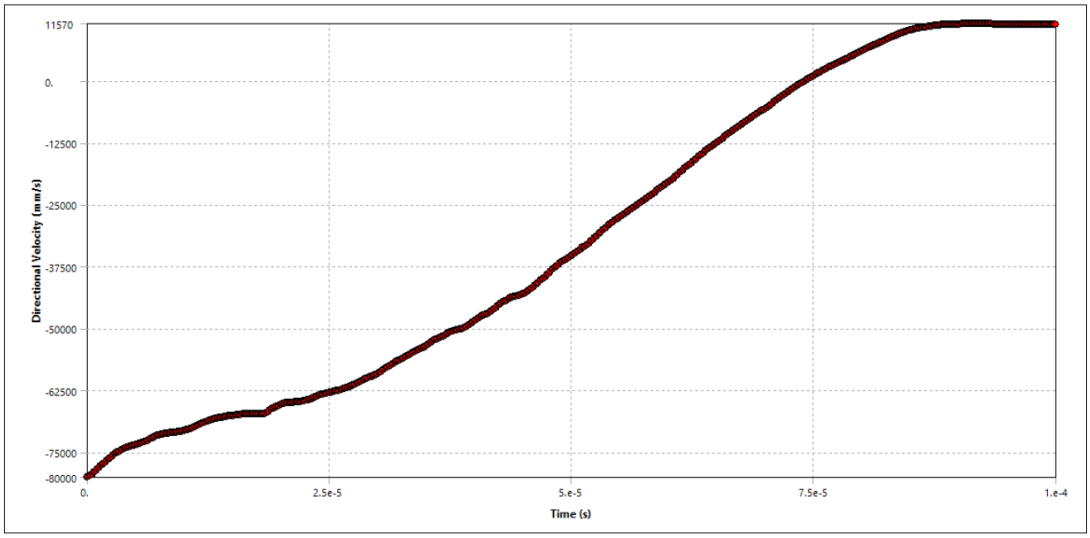
Grafiklerdeki deformasyon değerleri incelendiğinde fluorite kafes yapısı hariç diğer kafes yapılarının kademeli olan tasarımlarının, homojen tasarımlarına göre daha fazla deformasyona uğradığı görülmektedir. Tüm grafiklerdeki kuvvet değerleri, yaklaşık 1 mm'lik deformasyona kadar ani bir azalış göstermektedir. Yaklaşık 1 mm'lik deformasyondan sonra kuvvet değerlerinde genel olarak ani bir yükseliş ya da azalış görülmemektedir.

4.2. Kafes Yapılarının Hız – Zaman Grafikleri

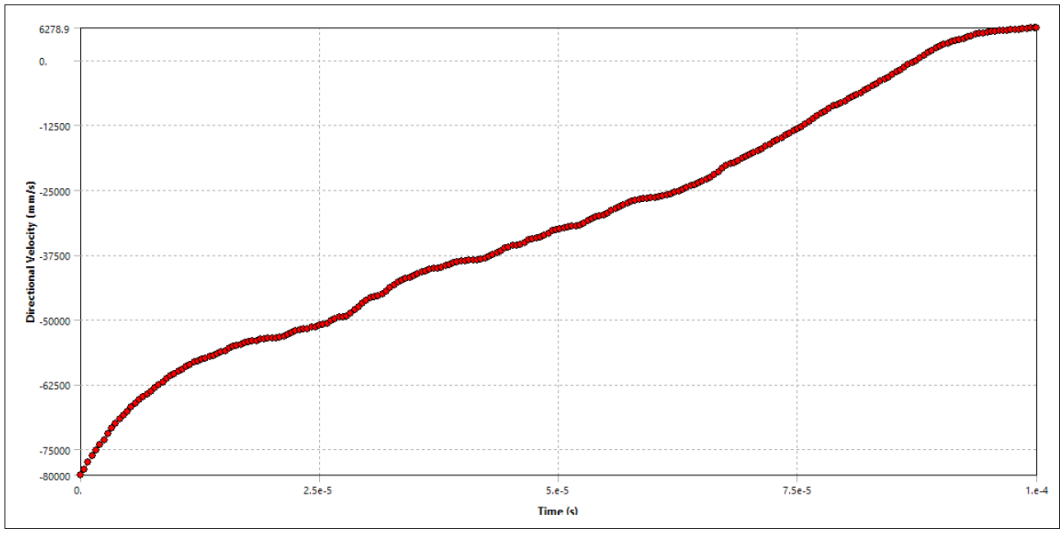
Bu başlık içerisinde çarpışma testi sonucunda elde edilen hız-zaman grafikleri gösterilmiş ve başlığın sonunda grafikler hakkında elde edilen bulgular yazılmıştır.



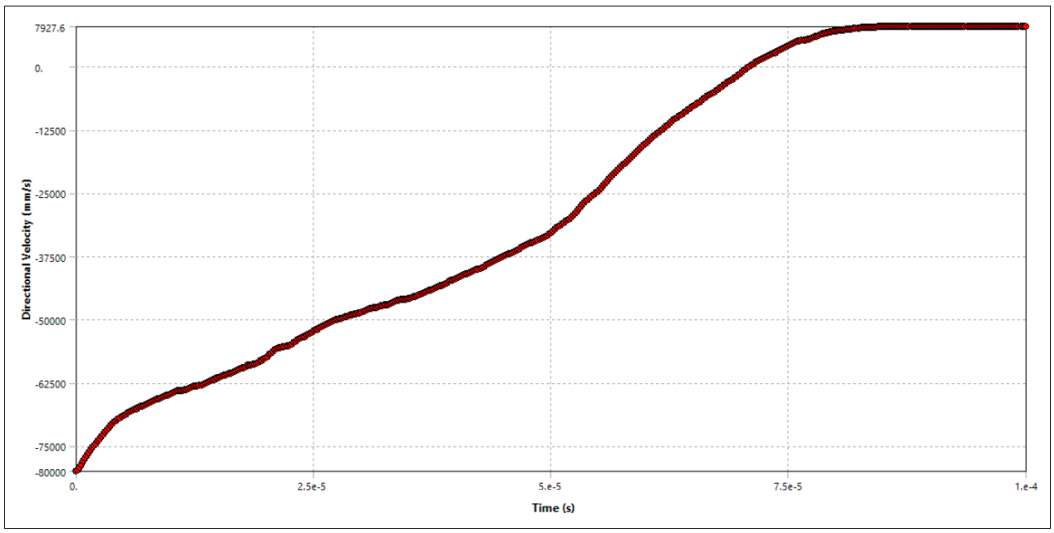
Şekil 4.6. BCC yapısının hız – zaman grafiği



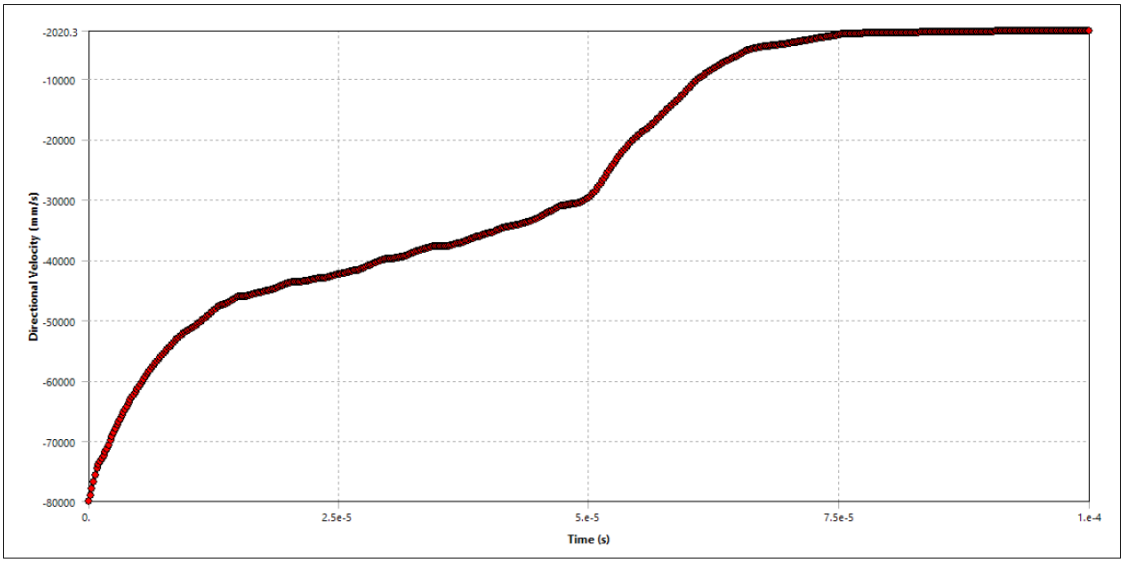
Şekil 4.7. Kademeli BCC yapısının hız – zaman grafiği



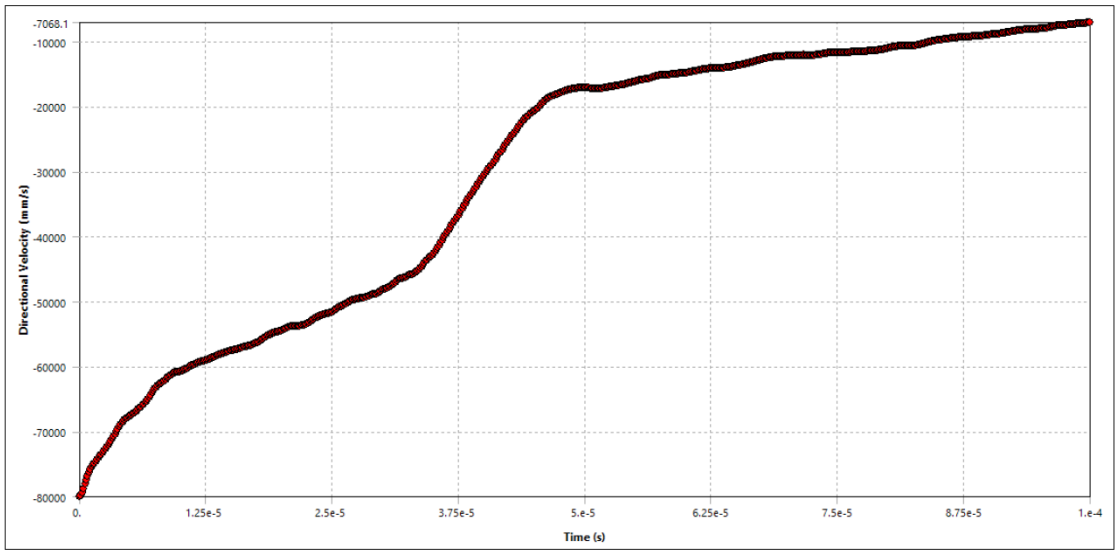
Şekil 4.8. Fluorite yapısının hız – zaman grafiği



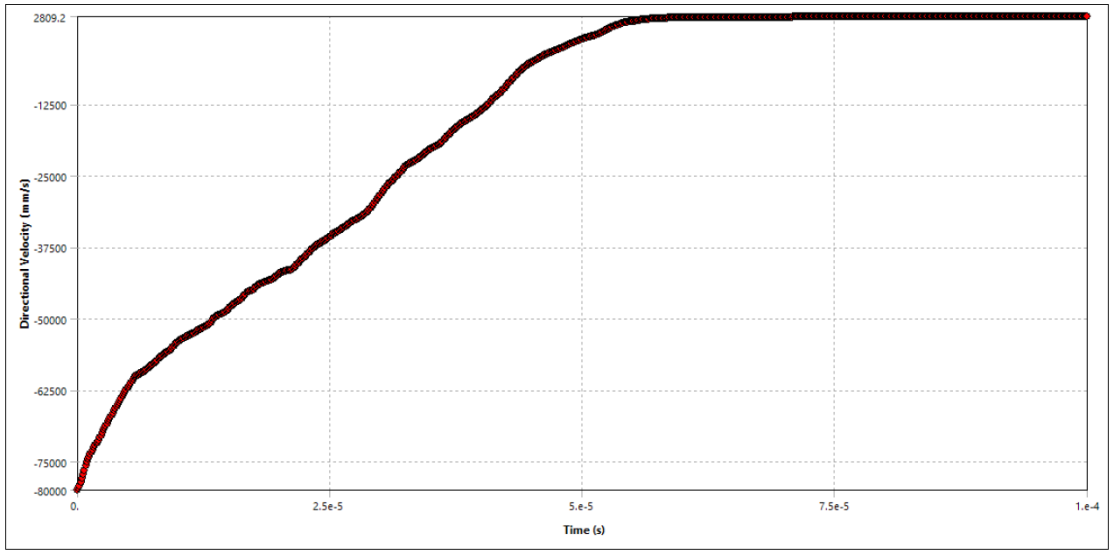
Şekil 4.9. Kademeli Fluorite yapısının hız – zaman grafiği



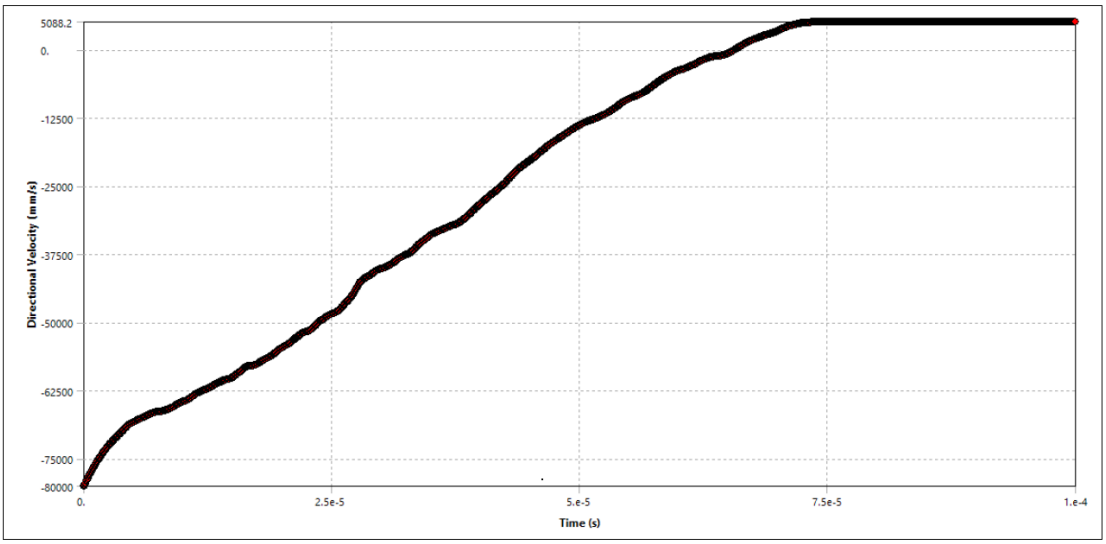
Şekil 4.10. Kelvin yapısının hız – zaman grafiği



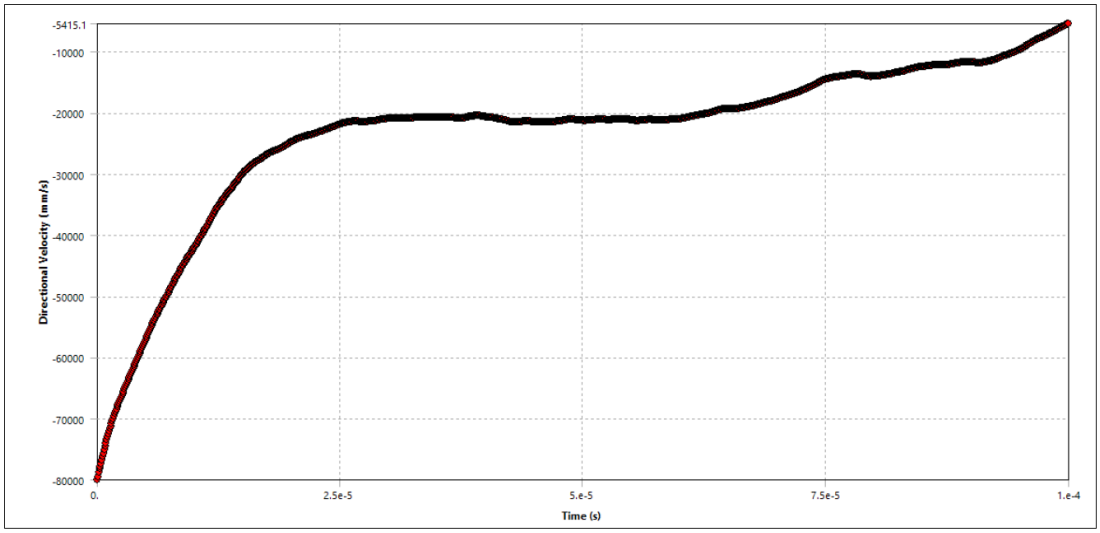
Şekil 4.11. Kademeli Kelvin yapısının hız – zaman grafiği



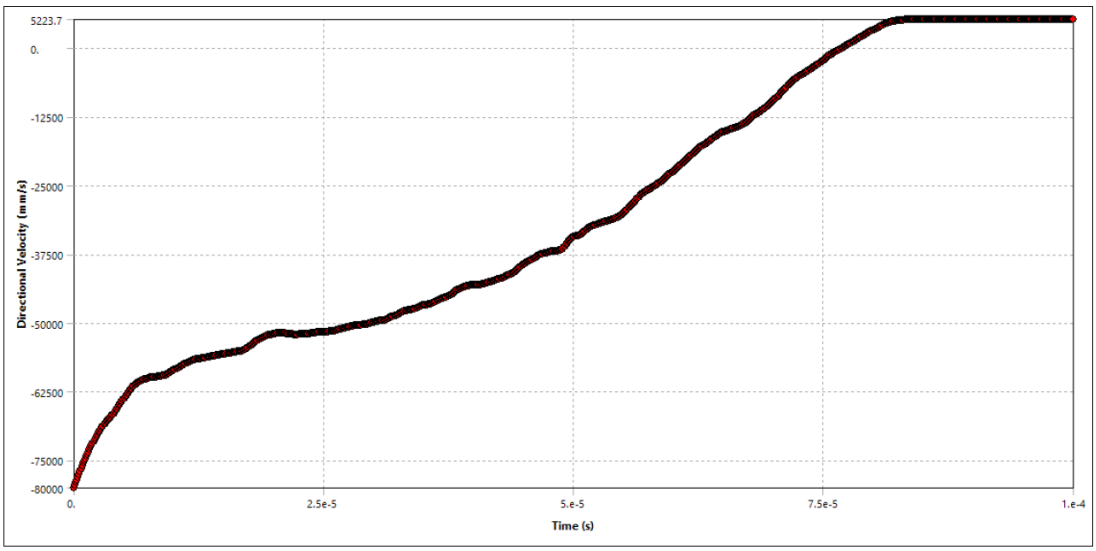
Şekil 4.12. Truncated Octahedron yapısının hız – zaman grafiği



Şekil 4.13. Kademeli Truncated Octahedron yapısının hız – zaman grafiği



Şekil 4.14. Özel kafes yapısı



Şekil 4.15. Kademeli özel kafes yapısı

Hız-zaman grafikleri ile kuvvet-deformasyon grafiklerini karşılaştırdığımızda bazı önemli çıkarımlar elde edilmektedir. Başlangıçta görülen yüksek kuvvetler, hız-zaman grafikleri ile ilişkilidir. İlk anda yüksek kuvvetlerin oluştuğu yapıların hız-zaman grafiklerine bakıldığında ilk andaki hız değişimi yüksek olmaktadır. Bu durum, yapının çarpışma anındaki sertliğini ve darbe dayanımını yansıtmaktadır. Kademeli yapılarda ise hem hız-zaman hem de kuvvet-deformasyon grafiklerinde dalgalanmaların daha az olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum, bu yapıların daha kontrollü bir deformasyon sergilediğini göstermektedir. Hız-zaman grafiklerindeki hız değişimlerinin yavaşladığı noktalarda parça

üzerinde kırılmalar gerçekleşmekte ve bu durum kuvvet-deformasyon grafiklerinde ani kuvvet artışları olarak kendini göstermektedir.

4.3. Enerji Absorpsiyon Değerleri ve ilk Çarpışma Kuvveti ilişkisi

Bilgisayar ortamında yapılan çarpışma analizleri sonucunda ilk çarpışma kuvveti ve enerji absorpsiyon değerlerini içeren değerler Çizelge 4.1'de paylaşılmıştır.

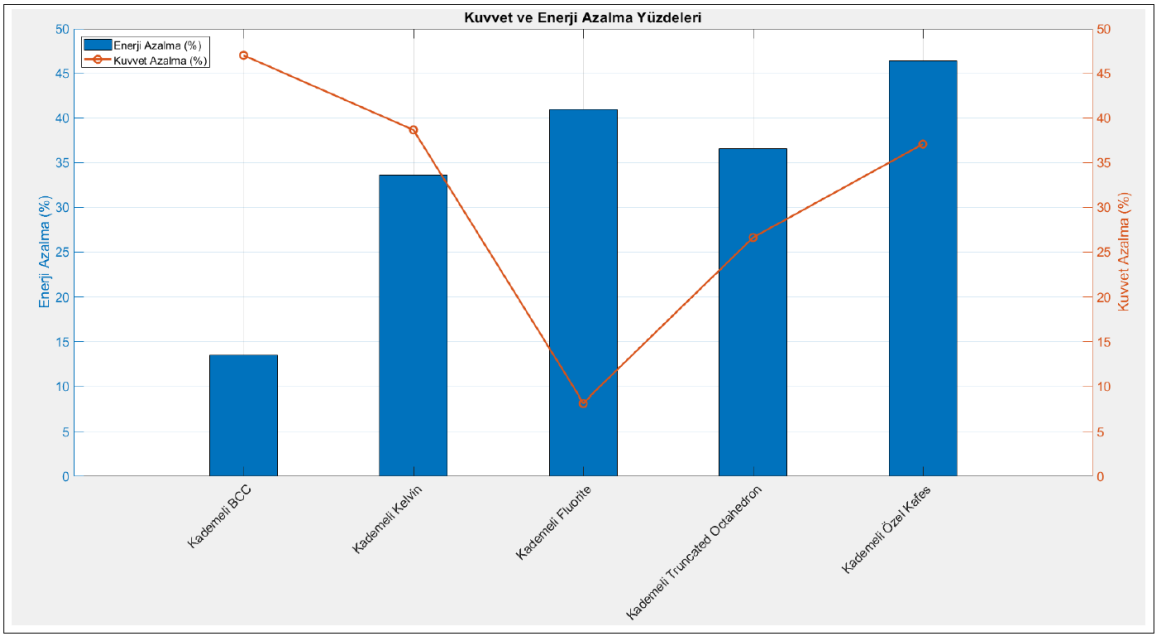
Çizelge 4.1. Kafes yapılarının ilk çarpışma kuvveti – enerji absorpsiyon değerleri

	İlk Çarpışma Kuvveti (N)	Absorbe Edilen Enerji (J)
BCC	7908	1,85
Kademeli BCC	4190	1,6
Kelvin	11481	2,65
Kademeli Kelvin	7041	1,76
Fluorite	5403	2,1
Kademeli Fluorite	4962	1,24
Truncated Octahedron	9421	1,42
Kademeli Truncated Octahedron	6911	0,9
Özel Kafes	12389	2,8
Kademeli Özel Kafes	7794	1,5

Kademeli kafes yapılarının kuvvet – enerji absorpsiyon ilişkisi

Çizelge 4.1'de yer alan veriler incelendiğinde, kademeli kafes yapıların hem kuvvet hem de absorbe edilen enerji miktarlarının, aynı kafes tipinin homojen kafes yapısına göre daha düşük olduğu görülmektedir. Bu nedenle kademeli kafes yapıların ilk çarpışma kuvvetlerinin az olması, bazı durumlarda homojen kafes yapılarına göre tercih edilmelerini sağlayabilir. Bununla birlikte homojen yapıdan kademeli yapıya geçildiğinde enerji absorpsiyonundaki azalışın mümkün olduğunca minimum seviyede olması sağlanarak birim kütleye oranla daha yüksek enerji absorpsiyonu sağlanabilir.

Şekil 4.15'te kafes homojen kafes yapısından kademeli kafes yapısına geçildiği durumda, enerji absorpsiyon ve ilk çarpışma esnasında oluşan kuvvet değerlerinin azalış yüzdeleri grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.16. Kademeli yapıya geçildiği durumda enerji ve kuvvet değişimi

Grafik incelendiğinde kademeli kafes yapıların homojen yapılarına kıyasla hem kuvvet hem de enerji absorpsiyonunda farklı azalma yüzdeleri gösterdiği görülmektedir. Kademeli BCC yapısı %47 oranında kuvvet azalması ve %14 oranında enerji azalması ile dikkat çekmektedir. Buradan yola çıkarak kademeli BCC yapısının homojen BCC yapısına göre ilk çarpışma kuvvetinde önemli bir azalma yaşarken enerji absorpsiyonunda nispeten daha az bir düşüş gösterdiğini ortaya koyar. Diğer yandan, kademeli Fluorite yapısı, sadece %8 oranında kuvvet azalması gösterirken enerji absorpsiyonunda %41 oranında azalma ile karşılaşmaktadır. Bu durum, kademeli Fluorite yapısının homojen Fluorite yapısına kıyasla kuvvet dayanıklılığında çok az bir kayıp yaşarken enerji absorpsiyon kapasitesinde ciddi bir düşüş yaşadığını gösterir. Dolayısıyla kademeli BCC yapısı enerji absorpsiyon verimliliği açısından daha avantajlı görünmektedir çünkü kuvvet azalma yüzdesine oranla enerji absorpsiyonundaki azalma yüzdesi daha düşüktür. Buna karşılık olarak kademeli Fluorite yapısı, kuvvet dayanıklılığı açısından avantajlı olmasına rağmen enerji absorpsiyon verimliliği açısından en düşük performansı sergilemektedir. Bu bulgular, kafes yapılarının kademeli versiyonlarının enerji absorpsiyon ve kuvvet dayanıklılığı performanslarının farklı olduğunu ve uygulama alanlarına göre uygun yapının dikkatle seçilmesi gerektiğini göstermektedir.

Bu bağlamda kafes yapıların enerji verimliliğini değerlendirmek gerekmektedir. Enerji verimliliği, kuvvet azalış yüzdesine oranla enerji absorpsiyonundaki azalış oranının karşılaştırılması ile belirlenebilir. Bu değerlendirme, kademeli kafes yapıların tasarımında ve seçiminde daha bilinçli kararlar alınmasına olanak tanıyabilir.

Enerji verimliliği yüzdesi için aşağıdaki formül belirlenmiştir.

$$\text{Enerji Verimliliği} = \frac{\text{Kuvvet Azalma Yüzdesi}}{\text{Enerji Azalma Yüzdesi}} \tag{4.1}$$

Yukarıdaki formüle göre hesaplar yapıldığında aşağıdaki sonuçlar elde edilir.

$$\text{Kademeli BCC Enerji Verimliliği} = \frac{47.02}{13.51} \approx 3.48 \tag{4.2}$$

$$\text{Kademeli Kelvin Enerji Verimliliği} = \frac{38.67}{33.58} \approx 1.15 \tag{4.3}$$

$$\text{Kademeli Fluorite Enerji Verimliliği} = \frac{8.16}{40.95} \approx 0.20 \tag{4.4}$$

$$\text{Kademeli Truncated Octahedron Enerji Verimliliği} = \frac{26.64}{36.62} \approx 0.73 \tag{4.5}$$

$$\text{Kademeli Özel Kafes Enerji Verimliliği} = \frac{37.09}{46.43} \approx 0.80 \tag{4.6}$$

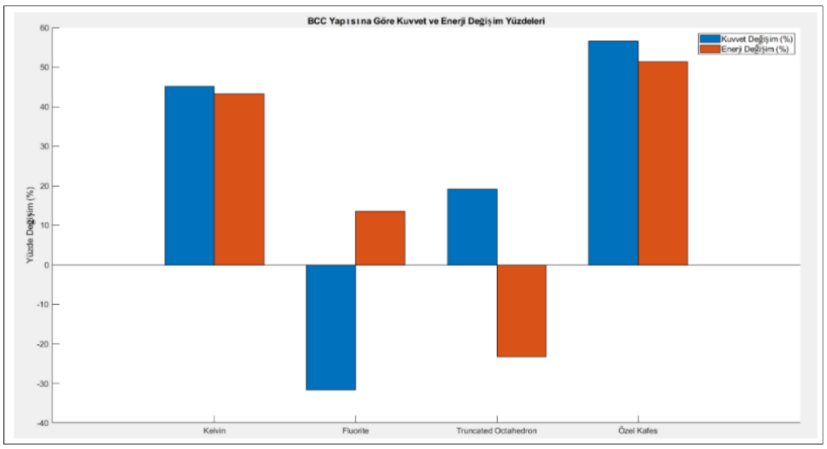
Yukarıdaki hesaplamalardan görüleceği üzere, homojen yapıdan kademeli kafes yapısına geçildiğinde en verimsiz yapı Fluorite yapısı ve en verimli yapı BCC yapısı olarak görülmektedir. Bu sonuçlardan yola çıkarak homojen bir yapıdan kademeli yapıya geçilmesinin mantıklı bir tasarım olup olmayacağına karar verilebilir.

Homojen kafes yapılarının kuvvet – enerji absorpsiyon ilişkisi

Bu başlık içerisinde homojen kafes yapılarının kuvvet ve enerji absorpsiyon değerleri karşılaştırılmıştır. Kafes yapılarını karşılaştırmak için BCC yapısı baz alınmıştır. Her bir kafes yapısının kuvvet ve enerji absorpsiyon değerlerinin, BCC yapısına göre yüzdesel olarak artış ve azalış miktarları belirlenmiştir.

BCC yapısını referans alarak yapılan karşılaştırmada, Kelvin yapısının kuvvet değeri %45.18 oranında artarken, enerji absorpsiyonu %43.24 oranında artmıştır. Fluorite yapısı ise %31.67 oranında kuvvet azalması gösterirken enerji absorpsiyonunda %13.51 oranında artış sergilemiştir. Truncated Octahedron yapısında kuvvet değeri %19.14 oranında artış gösterirken enerji absorpsiyonu %23.24 oranında azalmıştır. Özel Kafes yapısı ise %56.63 oranında kuvvet artışı ve %51.35 oranında enerji absorpsiyonu artışı ile dikkat çekmektedir. Bu bulgular, farklı kafes yapıların BCC yapısına kıyasla kuvvet ve enerji absorpsiyon performanslarının çeşitlilik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Şekil 4.16'da BCC yapısına göre kuvvet ve enerji absorpsiyon değerlerinin artış ve azalış yüzdeleri gösterilmiştir.

Grafik incelendiğinde, Fluorite kafes yapısının kuvvet değişim yüzdesi BCC yapısına göre belirgin bir azalma gösterirken enerji absorpsiyon değerinde artış olduğu gözlemlenmiştir. Özel kafes yapısında ise hem kuvvet hem de enerji absorpsiyon değerlerinde yüksek artış yüzdeleri görülmektedir. Truncated Octahedron yapısına bakıldığında, kuvvet değişim yüzdesinde artış yaşanırken, enerji değişim yüzdesinde azalma olduğu tespit edilmiştir.

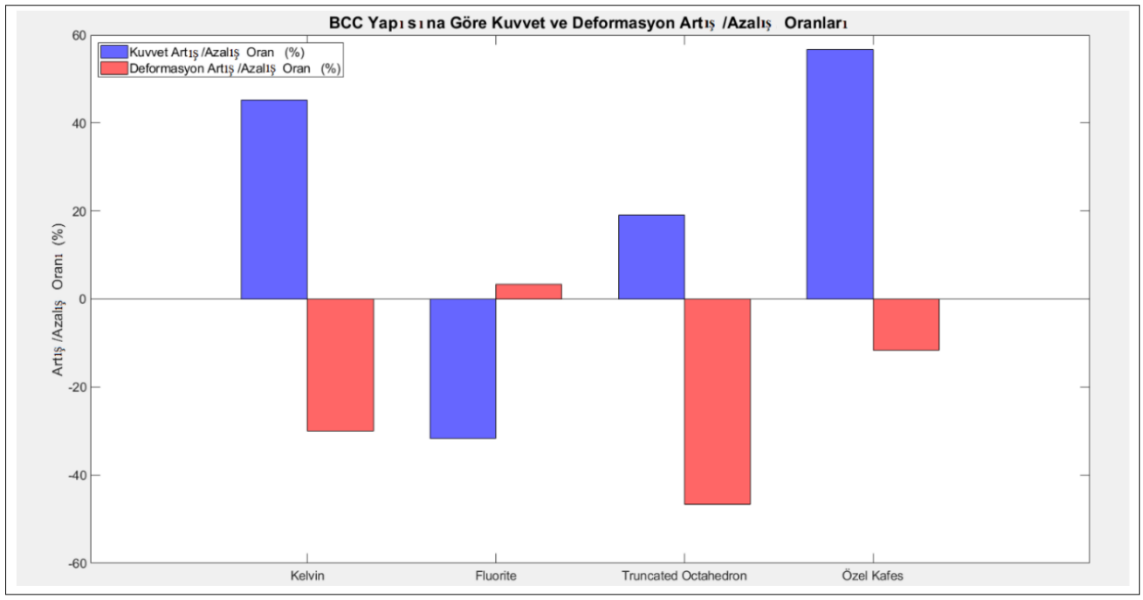


Şekil 4.17. BCC yapısına göre homojen kafes yapılarının kuvvet – enerji değişimi

4.4. Homojen Kafes Yapılarının Karşılaştırılması

4.4.1. BCC kafes yapısına göre karşılaştırma

Bu başlık altında, BCC kafes yapısına göre diğer kafes yapılarının deformasyon ve kuvvet artış/azalış yüzdeleri açıklanmaktadır. Şeki4.17 ’de görüleceği üzere, Kelvin, Truncated Octahedron ve Özel kafes yapılarının deformasyon değeri BCC yapısına göre azalış gösterirken, kuvvet değerleri artış göstermektedir. Fluorite yapısının ise deformasyon değeri artış gösterirken, kuvvet değeri azalış göstermektedir. Bu grafikten elde edilen bilgiye dayanarak deformasyon değerindeki artışın kuvvet değerinde azalışa neden olduğu ve deformasyon değerindeki azalışın kuvvet değerinde artışa neden olduğu sonucuna ulaşılabilir. Ayrıca, bu bulgulara dayanarak, en rijit yapının Özel Kafes yapısı olduğu ve en az rijitliğe sahip yapının Fluorite kafes yapısı olduğu sonucuna varılmaktadır.

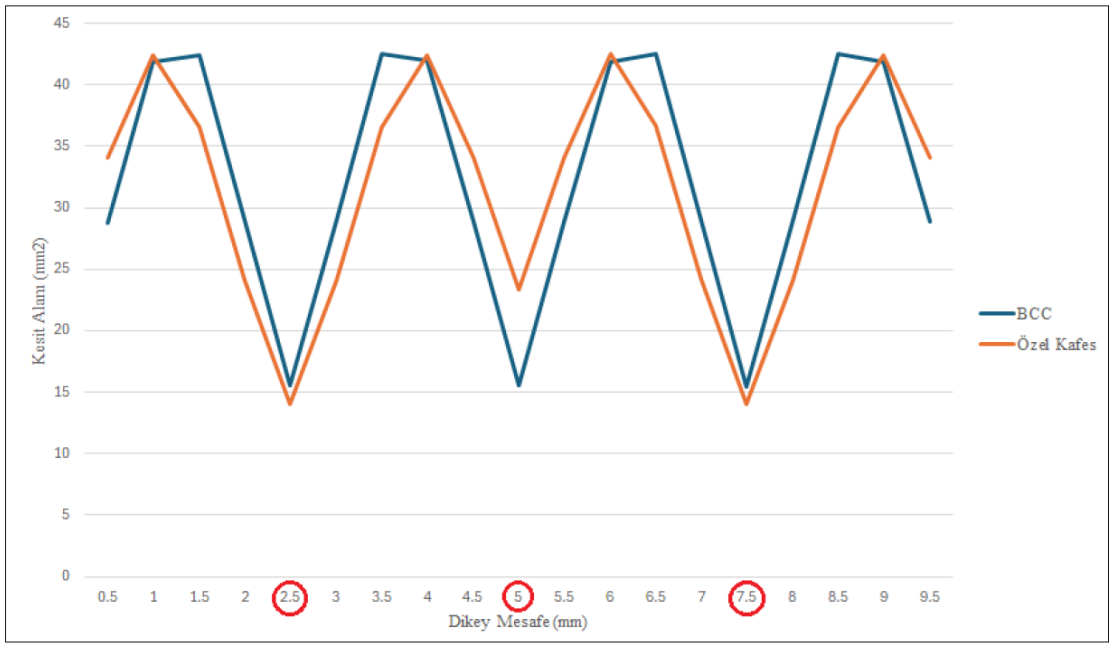


Şekil 4.18. BCC yapısına göre diğer yapıların kuvvet – deformasyon yüzdesi

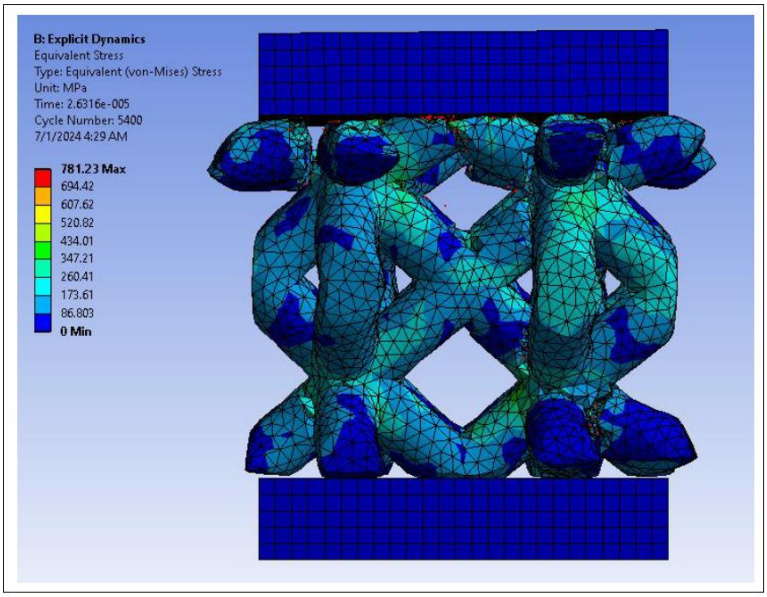
4.4.2. Homojen BCC ve özel kafes yapılarının kesit alanları ve enerji absorpsiyon değerlerinin karşılaştırılması

Çizelge 3.2’de belirtilmiş olan kesit alan değerleri kullanılarak BCC ve özel kafes yapıları bir grafik haline getirilmiştir. Şekil 4.18’de bu grafik gösterilmiştir. Grafikten görüleceği üzere BCC ve özel kafes yapılarının alt yüzeyinden itibaren 2,5 mm ve 7,5 mm

mesafelerindeki kesit alanları karşılaştırıldığında BCC yapının kısmen yüksek kesit alanına sahip olduğu görülmektedir. BCC ve özel kafes yapılarının alt yüzeyinden itibaren 5 mm mesafelerindeki kesit alanları yani yapının tam orta bölgesindeki kesit alanları karşılaştırıldığında özel kafes yapısının daha yüksek kesit alanına sahip olduğu görülmektedir. Orta bölge dışında, genel olarak özel kafes yapısı ve BCC yapısı benzer kesit alanlarına sahiptir. Yapılan çarpıma analizleri sonucunda özel kafes yapısının hem ilk çarpışma kuvvetinin hem de enerji absorpsiyon değerlerinin BCC yapısına göre yüksek olması bu bölgedeki kesit alanı artışından dolayı olduğu sonucuna ulaşılabilir. Özel kafes yapısının BCC yapısına göre düşük kesit alanına sahip olduğu bölgeler 2,5 mm ve 7,5 mm olan bölgelerdir. Şekil 4.19'da görüleceği üzere özel kafes yapısının ilk kırılmaya başladığı bölgenin 2,5 mm ve 7,5 mm olarak belirtilen (1 ve 3 no'lu bölge) bölgedir. Analiz sonucundan da görüleceği üzere ilk kırılma bölgesi en düşük kesit alanına sahip olan bölgelerdir. Burada şu unutulmamalıdır. BCC yapısı ile özel kafes yapısı birbirine benzeyen yapılardır. Özel kafes yapısı, BCC gibi yere göre 45 derece açı yapan bir kirişe sahiptir. Bu yapının BCC yapıdan farklarına baktığımızda düz kiriş yerine helisel kiriş kullanımı ve özel kafes yapısına yandan bakıldığında BCC yapısına benzer bir görsel sergilerken üstten bakıldığında düzlemsel kafes yapısına benzer bir görsel sergilemesidir. Bu yapıların birbirine benzerliği nedeniyle bu yapılar birbirleri ile özel olarak karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.19. BCC ve özel kafes yapısının kesit alanlarının karşılaştırılması



Şekil 4.20. Özel kafes yapısının çarpışma esnasında oluşan görüntüsü

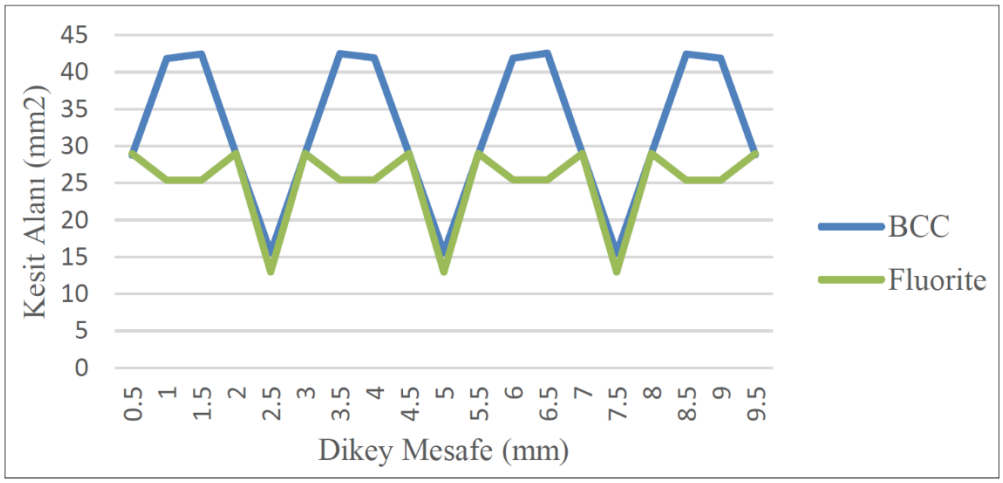
4.4.3. Homojen kafes yapılarının kesit alanları değerleri ile enerji absorpsiyon ve çarpışma kuvveti değerlerinin karşılaştırılması

Bu başlık içerisinde Çizelge 3.2'de verilen tüm kafes yapıların kesit alanları ile Çizelge 4.1 'de verilen homojen kafes yapılarına ait enerji absorpsiyon değerleri arasındaki ilişki açıklanmıştır. Çizelge 3.2'de gösterilen kesit alan değerleri incelendiğinde diğerlerine göre en düşük kesite sahip bölgenin 10,34 mm^2 ile Truncated Octahedron yapısında olduğu görülmektedir. Ayrıca bu yapı üzerinde düşük kesit alanına sahip birden fazla bölge bulunmaktadır ve bu bölgeler birbirine komşudur. Diğer kafes yapılarında düşük kesit alanlarına sahip bölgeler daha sınırlıdır. Çarpışma analizlerinden elde edilen sonuçlara göre Truncated Octahedron yapısı en düşük enerji absorpsiyon değerine sahiptir. Bu bulgulardan yola çıkarak kafes yapı üzerinde düşük kesit alanına sahip bölgenin olması ve bu düşük kesit alanı bölgelerinin diğer kafes yapılarına göre daha fazla olması yapının enerji absorpsiyon kabiliyetini düşürmektedir.

Kelvin ve Truncated Octahedron yapılarını geometrik olarak karşılaştırdığımızda, her iki yapının da yere göre dik kiriş elemanlara sahip olduğu görülmektedir fakat kesit analizi açısından incelediğimizde Kelvin kafes yapısının kesit alanı değerlerinin Truncated Octahedron yapısına göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu bulgulardan yola çıkarak Kelvin kafes yapısının enerji absorpsiyon değerlerinin Truncated Octahedron yapısına göre yüksek olmasının sebebini Kelvin kafes yapısının kesit alanının Truncated Octahedron

yapısına göre daha yüksek olması ile ilişkilendirebiliriz. Çarpışma kuvveti açısından incelediğimizde bu iki yapının 90 dereceli elemanlara sahip olmasından kaynaklı olarak ilk çarpışma kuvvetleri BCC yapısına göre daha yüksek çıkmıştır. Her ne kadar 90 derece elemanlara sahip olsa bile Truncated Octahedron yapısındaki kesit alanının zayıflığı nedeniyle bu yapının enerji absorpsiyon değeri BCC yapısına göre daha az bir değere sahip olmaktadır. Kelvin yapısı, Truncated Octahedron yapısındaki gibi bir kesit alanı zayıflığına sahip olmadığından dolayı bu yapıdaki dik elemanların enerji absorpsiyon verimi daha yüksek olmaktadır.

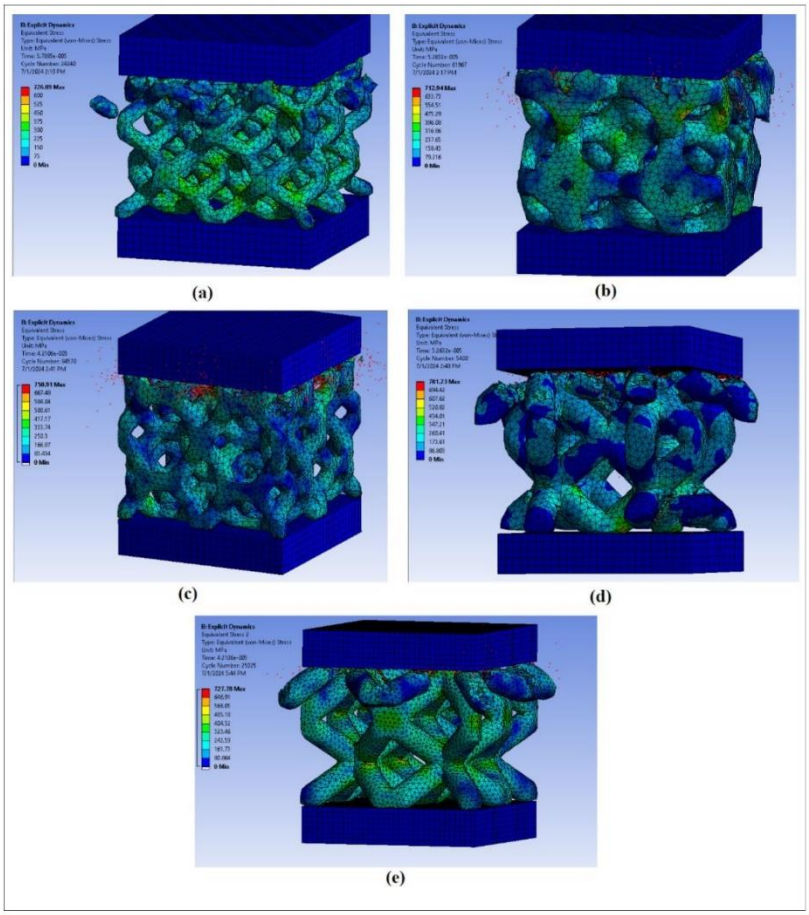
Fluorite yapısını incelediğimizde, bu yapnın kesit alanlarının diğer kafes yapılarına göre daha homojen olduğu görülmektedir. Fluorite yapısı yere göre belirli derecelerde açı yapan kiriş elemanlara sahip olmasından kaynaklı olarak eğilme-baskın davranış gösterecektir. BCC yapı da yere göre belirli derecede açı yapan kiriş elemanlı bir yapıdır ve dolayısıyla bu yapı da eğilme-baskın davranış gösteren bir yapıya sahiptir. BCC ile Fluorite yapılarının kesit alanlarını karşılaştırdığımızda, Fluorite yapısının birbirine yakın değerlerde yani daha homojen kesit alanlarına sahip olduğu görülmektedir. Bunun sonucunda Fluorite yapısı BCC yapısı kadar yüksek kesit alanlarına sahip olmasa bile kesit alanı homojenliğinden kaynaklı olarak BCC yapısına göre daha yüksek enerji absorpsiyon değerine sahip olabilmektedir. Ayrıca Fluorite yapısının daha homojen kesit alanına sahip olmasından kaynaklı olarak çarpışma esnasında oluşan gerilme, homojen olarak dağıtıldığı için ilk çarpışma kuvveti BCC yapısına göre daha düşük bir değer göstermiştir. Şekil 4.20'de bu iki yapının yükseklik boyunca kesit alanı değerleri grafik haline getirilmiştir.



Şekil 4.21. BCC – Fluorite yapılarının kesit alan grafiği

4.4.4. Homojen kafes yapılarının gerilme değerlerinin karşılaştırılması

Ansys programındaki çarpışma analizi sonucunda Von-Misses gerilme sonuçları elde edilmiştir. Fluorite, Kelvin, Truncated Octahedron, Özel kafes ve BCC yapıları için sırayla 92 MPa, 94 MPa, 78 MPa, 259 MPa ve 79 MPa ‘dır. Şekil 4.21’de çarpışma esnasında kafes yapıları üzerindeki gerilme dağılım görseli gösterilmiştir. Bu görsele göre BCC ve Fluorite yapısındaki gerilmelerin daha homojen bir şekilde dağıldığı görülmektedir. Diğer üç yapıda ise daha heterojen bir gerilim dağılımı gözükmektedir. Ayrıca özel kafes yapısının ortalama gerilme değerinin çok yüksek olması, bu yapının çok rijit bir yapı olduğunu ve şekil değişimine karşı çok direngen bir yapı olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.22. Kafes yapılarının gerilme dağılımı (a) Fluorite, (b) Kelvin, (c) Truncated Octahedron, (d) Özel Kafes, (e) BCC

4.5. Deneysel Testler ile Bilgisayar Analizlerinin Karşılaştırılması

Bu başlık altında, numunelere gerçekleştirilen split-hopkinson çarpışma test sonuçları ile bilgisayar ortamındaki çarpışma analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Çalışma kapsamında kademeli BCC hariç (numune yetersizliğinden kaynaklı olarak) tüm kafes yapılarına çarpışma testi gerçekleştirilmiştir. Deneysel testler 1800 gerinim oranında (1/s) ve 3 metre uzunluğa sahip giriş çubuğu ile gerçekleştirilmiştir. Aşağıdaki çizelgede test sonucu elde edilen çarpışma kuvveti değerleri ve her bir kafes yapısının test sonucunda oluşan ezilme miktarları verilmiştir. (Kelvin yapısı çapraz kırılmaya maruz kaldığından dolayı dikey yöndeki ezilme miktarı ölçülememiştir.)

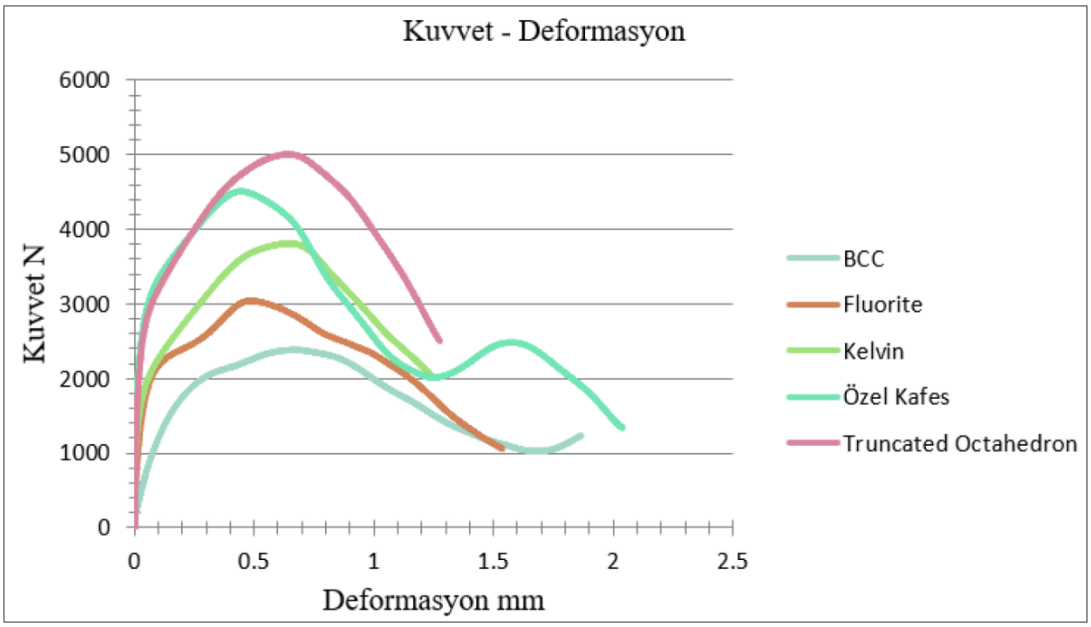
Çizelge 4.2. Deneysel test sonucu elde edilen değerler

	Ezilme miktarı (mm)	Deneysel Test Maksimum Çarpışma Kuvveti (N)
BCC	2.6	2380
Kelvin	-	3800
Kademeli Kelvin	2.1	3280
Fluorite	2.7	3000
Kademeli Fluorite	1.6	2100
Truncated Octahedron	1.9	5000
Kademeli Truncated Octahedron	1.8	3200
Özel Kafes	2	4500
Kademeli Özel Kafes	1.9	3400

Yukarıdaki değerler ile analiz sonucu elde edilen değerler karşılaştırıldığında ilk fark edilen nokta şu olmuştur: Hem analiz hem de test sonuçlarına göre her bir kafes yapı türünün kademeli olan tasarımı, homojen tasarıma göre daha düşük çarpışma kuvveti oluşturmuştur.

Deneysel test sonucu homojen kafes yapılarının kuvvet-deformasyon ilişkisi

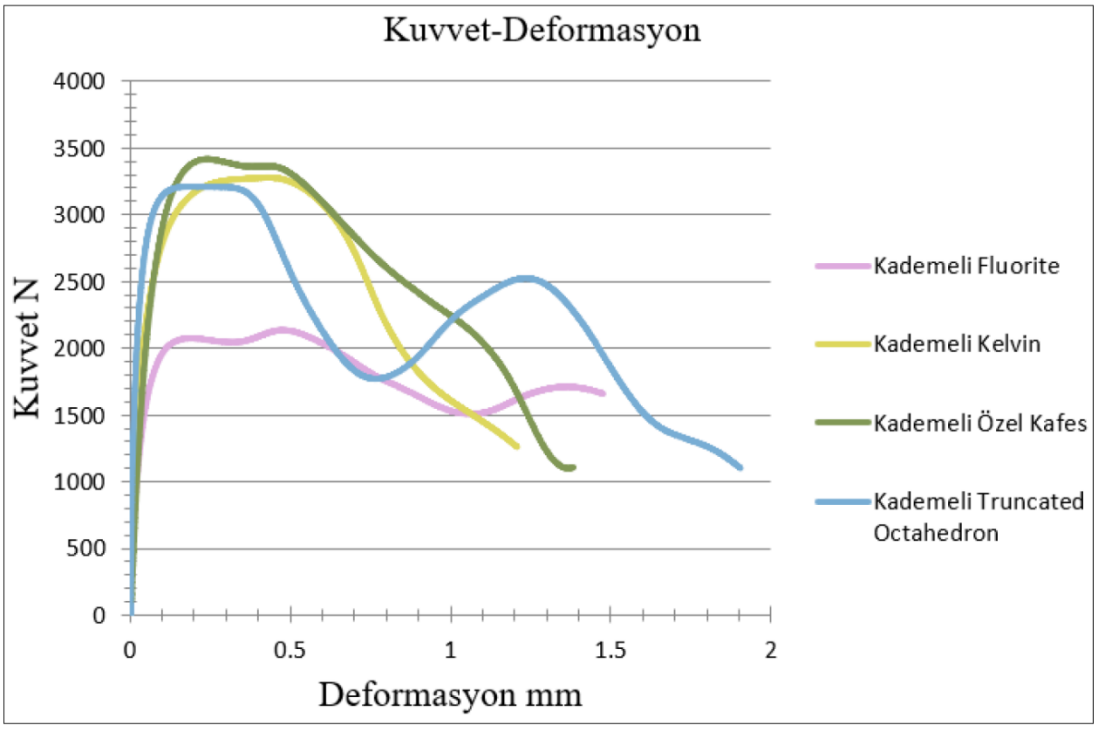
Aşağıdaki şekilde homojen kafes yapılarının çarpışma esnasında oluşan grafikleri paylaşılmıştır.



Şekil 4.23. Homojen kafes yapılarının deneysel test sonuçları

Yukarıdaki grafiklerde belirtilen deneysel test sonuçlarına göre en yüksek çarpışma kuvvetinin Truncated Octahedron ve ardından Özel kafes yapılarının olduğu görülmüştür. En düşük çarpışma kuvvetinin ise BCC ve onun üstünde Fluorite yapılarının olduğu görülmüştür. Analiz programından elde edilen sonuçlara göre ise en yüksek çarpışma kuvvetinin Özel kafes ve ardından Kelvin yapısında olduğu görülmüştü. Analiz sonuçlarına göre en düşük çarpışma kuvvetinin ise Fluorite ve onun üstünde BCC yapısının olduğu görülmüştü. Buradan yola çıkarak analiz sonuçlarına göre yüksek çarpışma kuvveti veren kafes yapıları deneysel testlere göre yine yüksek çarpışma kuvveti vermektedir. Yine aynı şekilde analiz sonuçlarına göre düşük çarpışma kuvveti veren kafes yapıları, deneysel sonuçlara göre yine düşük çarpışma kuvveti vermektedir.

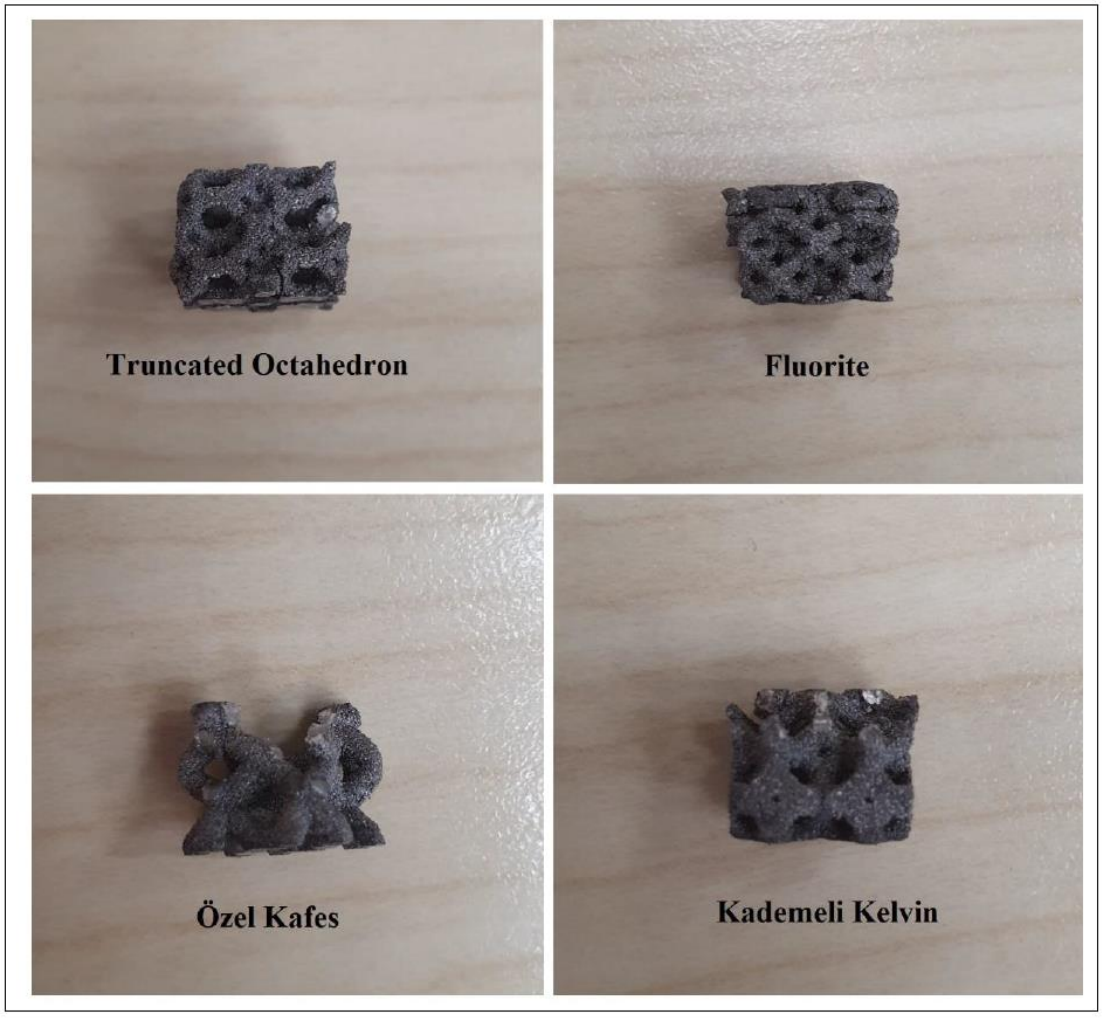
Deneysel test sonucu kademeli kafes yapılarının kuvvet-deformasyon ilişkisi



Şekil 4.24. Kademeli kafes yapılarının deneysel test sonuçları

Yukarıdaki grafik incelendiğinde kademeli Özel Kafes, Kelvin ve Truncated Octahedron yapılarının neredeyse aynı çarpışma kuvvetine sahip olduğu görülmektedir. Bilgisayarda gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre kademeli özel kafes yapısı en yüksek çarpışma kuvvetini vermişti. Deneysel sonuçlar incelendiğinde de kademeli özel kafesin en yüksek çarpışma kuvveti verdiği görülmüştür. Kademeli kafes yapılarına gerçekleştirilen deneysel çarpışma testi sonucunda en yüksek çarpışma kuvvetinden en düşük çarpışma kuvveti veren yapılar sırayla: Kademeli Özel Kafes, Kelvin, Truncated Octahedron ve Fluorite yapılarının olduğu görülmüştür. Bilgisayarda gerçekleştirilen analiz sonuçları, en yüksek kuvvetten en düşük çarpışma kuvvetine doğru sıralandığında deneysel test ile aynı sıraya sahip olduğu görülmüştür. Kademeli Fluorite yapısının ise çarpışma esnasında neredeyse düz bir eğri sergilediği görülmektedir. Buradan yola çıkarak kademeli Fluorite yapısının daha homojen ezildiği sonucu çıkarılabilir.

Aşağıdaki görsellerde, bazı kafes yapılarının çarpışma testi sonucundaki durumları gösterilmiştir.



Şekil 4.25. Deneysel test sonucu bazı kafes yapılarının son durumu

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, AlSi10Mg malzemesi kullanılarak tasarlanan farklı kafes yapıların yüksek hızlı çarpışmalar sırasında enerji absorpsiyonu ve tepki kuvvetlerini analiz etmiştir. Ayrıca kafes yapılarının kesit alanları karşılaştırılarak enerji absorpsiyon değerleri arasındaki farklar yorumlanmıştır. Yapılan çarpışma analizleri sonucunda aynı bağıl yoğunluk ve kütleye sahip olmasına rağmen farklı birim hücrelerle tasarlanan kafes yapılar birbirinden farklı enerji absorbe edebilme yeteneğine ve davranışlarına sahip olabildiği görülmüştür. Parça üzerine çarpışma etkisinin ilk gerçekleştiği andaki kuvvet değerleri ne kadar yüksekse, enerji absorbe değeri de genel olarak yüksek olmaktadır. Buna karşıt olarak, Fluorite birim hücrelerinden oluşturulan kafes yapısı, diğer kafes yapılarından farklı olarak düşük çarpışma kuvvetine ters oranda yüksek enerji absorbe yeteneği göstermiştir. Bunun sebebi olarak Fluorite kafes yapısının kesit alanı değerlerinin yükseklik boyunca eşit kesit alana sahip olması ve dolayısıyla homojen bir gerilme dağılımına sahip olması gösterilebilir. Tüm kademeli tip kafes yapılarının enerji absorpsiyonu, aynı kafes tipinin homojen yapısına göre daha az enerji absorpsiyonu değeri göstermiştir. Kademeli yapılardaki ilk çarpışma kuvveti, aynı kafes tipinin homojen yapısına göre daha az olmaktadır. Kademeli yapılardaki ilk çarpışma kuvvetinin daha az olması sayesinde, bu tür yapıların darbe güvenliği gerektiren alanlarda kullanılabileceğini işaret etmektedir. Bu çalışma kapsamında özel olarak tasarlanan kafes yapısı, çalışma kapsamında kullanılan literatürdeki kafes yapılarına oranla daha yüksek enerji absorpsiyon değeri (2,8 Joule) ve daha yüksek ilk çarpışma kuvveti (12389 N) göstermiştir. Örneğin BCC yapısına göre yüzde 51, kelvin yapısına göre yüzde 5,6 daha yüksek enerji absorpsiyonu göstermiştir. BCC yapısı baz alınarak geliştirilen yeni özel kafes yapısının daha yüksek ilk çarpışma kuvveti ve enerji absorpsiyona kabiliyetine sahip olmasının sebebi olarak yapının orta bölgesindeki kesit alanlarındaki artışı ve kiriş yapısının helisel bir formda düzenlenerek ve dolayısıyla kiriş boyu arttırılarak kirişin esneyebileceği mesafe arttırılması gösterilebilir. Ayrıca özel kafes yapısına önden bakıldığında BCC gibi bir yapı sergilerken yandan bakıldığında düzlemsel kafes yapı görünüşü sergilemektedir.

Literatürdeki birim hücrelerden oluşan kafes yapılarına yapılan modifikasyonlar veya özel birim hücre tasarlanarak oluşturulan kafes yapılar ile çok farklı kafes yapı tasarımları oluşturulabilir. Yere göre daha az açı yapan kiriş elemanlı yapılar, yere göre dik açı yapan kiriş elemanlı yapılar, düğüm noktalarındaki kesit alanlarının yükseklik boyunca orantılı

olarak arttırıldığı veya azaltıldığı yapılar, et kalınlığının orantılı olarak değiştirildiği kademeli yapılar, zayıf düğüm noktalarına eklenebilecek yere göre dik eksenli kirişli yapılar, zayıf düğüm noktalarındaki kesit alanların arttırılması için ek çalışmalar gibi sayısız konfigürasyon ve düzende kafes yapı türleri oluşturulabilmektedir. Bu kafes yapı türlerini oluşturmadan önce referans alınacak kafes yapılar belirlenmelidir. Aynı sınır şartlar altında yapılan testler sonucunda bu kafes yapıların birbirlerine göre avantaj/dezavantajları karşılaştırılmalıdır. Sayısız farklı tipte kafes yapı türü oluşturulabileceği için bu karşılaştırma biçimi önemlidir çünkü karşılaştırma yaparken birbirlerine benzer kafes tiplerini değerlendirmek daha doğru sonuç verecektir. Örneğin yere göre dikey kirişlere sahip kafes yapıların, aynı bağıl yoğunlukta BCC yapılarına göre daha rijit davranacağı neredeyse kesindir. Bu nedenle bu iki yapıyı rijitlik açısından karşılaştırmak çok anlamlı olmayacaktır. Ayrıca bu çalışma kapsamında tüm yapıları doğru bir şekilde değerlendirebilmek için tüm kafes yapıları aynı bağıl yoğunluğa sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu çalışma kapsamında değerlendirme yapılırken bu düşünceler dikkate alınmıştır. Örneğin kesit alanlarına göre karşılaştırma yaparken, BCC ile özel kafes, BCC ile Fluorite, Kelvin ile Truncated Octahedron yapısı karşılaştırılmıştır. Bunun sebebi, karşılaştırılan yapıların geometrik olarak birbirlerine benzemesinden kaynaklıdır.

Bu çalışma kapsamında kafes yapının yükseklik boyunca kesit alanlarındaki değişimin, enerji absorpsiyon ve ilk çarpışma kuvveti değerlerinde ciddi farklar oluşturduğunu göstermektedir. Özellikle yapının belli bölgelerinde, yapının ortalama kesit alanı değeri altında düşük kesit alanına sahip bölgenin olması ve komşu bölgelerde de yine bu düşük kesit alanı bölge bulunması yapıyı zayıflatmaktadır. Bu zayıflayan bölgeler nedeniyle çarpışma esnasında bu bölgelerde parça kırılmakta ve yapının enerji absorpsiyon değerini azaltmaktadır. Mevcutta üzerine çalışılan bir yapının mekanik özelliklerini iyileştirmek istendiğinde bu yapının zayıf bölgeleri iyileştirilebilir ya da yükseklik boyunca bu yapı üzerindeki kesit alanları eşdeğer yapılmaya çalışarak yapının homojenliği arttırılabilir. Özellikle Fluorite kafes yapısının düşük ilk çarpışma kuvveti göstermesine rağmen yüksek enerji absorpsiyon değeri göstermesi sayesinde bu yapı, darbe güvenliği istenen uygulamalarda kullanılabilir.

Bu çalışma kapsamında analiz programında gerçekleştirilen sonuçların doğruluğunu değerlendirebilmek için split-hopkinson basınç çubuğu ile deneysel testler gerçekleştirilmiştir. Deneysel testler ile analiz programında gerçekleştirilen sonuçlar

neredeyse benzerlik göstermektedir. Örneğin analiz programına göre en yüksek çarpışma kuvveti veren kafes yapısı özel kafes yapısı iken deneysel test sonucuna göre Truncated Octahedron yapısının olduğu görülmüştür. Deneysel test sonucuna göre bu farkın oluşma sebebi olarak üretim kaynaklı hatalar olabileceği düşünülmektedir. Kademeli kafes yapılarını kendi aralarında karşılaştırdığımızda ise en yüksek çarpışma kuvvetini kademeli özel kafes yapısı vermiştir. Kademeli kafes yapılarının analiz sonuçlarına göre çarpışma kuvveti büyüklüğü sıralaması ile deneysel test sonuçlarına göre çarpışma kuvveti büyüklüğü sıralaması aynıdır. Homojen kafes yapılarında her ne kadar analiz ve deneysel sonuçlara göre en yüksek tepki kuvveti veren kafes yapısı ile en düşük tepki kuvveti veren kafes yapısı arasında farklar olsa bile analiz sonuçlarına göre düşük tepki kuvveti veren kafes yapıları, deneysel sonuçlara göre de düşük kuvvetler göstermiş ve analiz sonuçlarına göre yüksek tepki kuvveti veren kafes yapıları, deneysel sonuçlara göre de yüksek tepki kuvvetleri sergilemiştir. Ayrıca analiz sonuçlarında olduğu gibi deneysel sonuçlarda da her bir kademeli kafes yapısı, aynı kafes tipinin homojen yapısına göre düşük tepki kuvveti göstermiştir.

İstenilen koşula göre özel birim hücreler ve özel kafes yapıları tasarlanabilir. Bu yapılar sayesinde birim ağırlığa oranla daha iyi mekanik özellikler elde edilebilir. Bu özel kafes yapılarını tasarlarken üretilebilirlik göz ardı edilmemelidir. Örneğin bu çalışma kapsamında tasarlanan birim hücrelerin yere göre 45 derece açı yapması sayesinde ve yapı üzerinde yatay kirişler bulunmaması sayesinde bu yapı hem FDM hem de SLM yöntemleri ile desteksiz olarak üretilebilmektedir.

Bu çalışma kapsamında BCC, Fluorite, Truncated Octahedron ve özel kafes yapılarının her birinin kademeli kafes yapıları da incelenmiştir. Her bir kademeli kafes yapısı, aynı tip homojen kafes yapısına göre daha düşük ilk çarpışma kuvveti ve daha düşük enerji absorpsiyon değeri göstermiştir. Buradan yola çıkarak düşük çarpışma kuvveti istenilen durumda kademeli kafes yapıların kullanılması bir avantaj olacaktır. Burada şu konuya dikkat edilmelidir. Kademeli kafes yapısına geçildiği durumda enerji absorpsiyon değerleri azalmaktadır. Ayrıca bu azalma oranları her bir kafes yapısı için farklıdır. Bu nedenle ilk çarpışma kuvvetinin azalması amacıyla kademeli yapıya geçildiği durumda, enerji absorpsiyon seviyesindeki düşüş de göz önüne alınmalıdır. Kademeli yapı tasarlanırken aşağıdan yukarı doğru yani yükün temas edeceği ilk bölgeye doğru kiriş çapları azaltılmıştır. Buradan şu sonuç çıkarılmaktadır. Bağıl yoğunluk aynı kaldığı sürece ilk çarpışma

bölgesindeki kesit alanlarının azaltılması sayesinde ilk çarpışma anındaki darbe yükleri azaltılmaktadır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlardan yola çıkarak gelecek çalışmalarda şu konular üzerine durulabilir.

- Kiriş tasarımında kullanılan helis ölçüleri parametreleri değiştirilerek farklı şekillerde helisel kafes tasarımları gerçekleştirilebilir. Bu tasarımlara yapılacak olan çarpışma analizleri ile helis ölçülerinin enerji absorpsiyon ve kuvvet değerlerine etkisi incelenebilir. Bu sayede birim ağırlığına göre daha rijit parça tasarımları yapılabilir.
- Bu çalışma kapsamında kafes yüksekliği boyunca kesit alanının neredeyse değişmediği Fluorite kafes yapısı düşük çarpışma kuvveti sergilerken yüksek enerji absorpsiyon değeri göstermiştir. Yükseklik boyunca kesit alanının hiç değişmediği tasarımlar ile çarpışma analizleri yapılabilir. Bu sayede daha düşük çarpışma kuvveti ve nispeten daha yüksek enerji absorpsiyon değeri sergileyen yapı tasarlanabilir.
- Bu çalışma kapsamında kademeli kafes yapılar tasarlanmıştır. Bu tasarımların et kalınlığı alt yüzeyden üst yüzeye doğru azaltılmıştır. Daha farklı tepkiler görebilmek için iki ya da daha fazla birim hücrenin tek bir kafes yapısında kullanıldığı ve bu birim hücreler arasında kademeli geçişler sağlayarak daha farklı kafes yapı tepkileri elde edilebilir.

KAYNAKLAR

1. İnternet: Heimbs, S. Energy Absorption in Aircraft Structures. URL: http://www.heimbs-online.de/publications.htm, Son Erişim Tarihi: 01.06.2024.

2. Ozdemir, Z., Hernandez-Nava, E., Tyas, A., Warren, J.A., Fay, S.D., Goodall, R. (2016). Energy absorption in lattice structures in dynamics: Experiments. *International Journal of Impact Engineering*, 89, 49–61.

3. He, G., Yang, H., Chen, T., Ning, Y., Zou, H., Zhu, F. (2022). Lattice Structure Design Method Aimed at Energy Absorption Performance Based on Bionic Design. *Machines*, 10(10), 965-983.

4. Yin, H., Zhang, W., Zhu, L., Meng, F., Liu, J., Wen, G. (2023). Review on lattice structures for energy absorption properties. *Composite Structures*, 304, 116397.

5. Sun, Z. P., Guo, Y. B., Shim, V. P. W. (2021). Characterisation and modeling of additively manufactured polymeric hybrid lattice structures for energy absorption. *International Journal of Mechanical Sciences*, 191, 106101.

6. Zhu, J., Zhou, H., Wang, C., Zhou, L., Yuan, S., Zhang, W. (2021). A review of topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges. *Chinese Journal of Aeronautics*, 34(1), 91-110.

7. Chen, L. Y., Liang, S. X., Liu, Y., Zhang, L. C. (2021). Additive manufacturing of metallic lattice structures: Unconstrained design, accurate fabrication, fascinated performances, and challenges. *Materials Science and Engineering*, 146, 100648.

8. Gorguluarslan, R. M., Güngör, O. U., Yildiz, S., Erem, E. (2019). *Lattice-based crash box design by discrete topology optimization for 3d printing*. 4th International Congress on 3D Printing (Additive Manufacturing) Technologies and Digital Industry, Antalya, 170-181.

9. Benedetti, M., du Plessis, A., Ritchie, R. O., Dallago, M., Razavi, N., Berto, F. (2021). Architected cellular materials: A review on their mechanical properties towards fatigue-tolerant design and fabrication. *Materials Science and Engineering*, 144, 100606.

10. Sokollu, B. (2022). *Mechanical properties comparison of strut-based and tpms lattice structures produced by EBM*, Master Thesis, Middle East Technical Unıversity Mechanical Engineering Department, Ankara.

11. Zhao, M., Liu, F., Fu, G., Zhang, D. Z., Zhang, T., Zhou, H. (2018). Improved mechanical properties and energy absorption of BCC lattice structures with triply periodic minimal surfaces fabricated by SLM. *Materials*, 11(12),2411.

12. Zhang, L., Feih, S., Daynes, S., Chang, S., Wang, M. Y., Wei, J., Lu, W.F. (2018). Energy absorption characteristics of metallic triply periodic minimal surface sheet structures under compressive loading. *Additive Manufacturing*, 23, 505–515.

13. Sun, Z. P., Guo, Y.B., Shim, V. P. W. (2021). Characterisation and modeling of additively manufactured polymeric hybrid lattice structures for energy absorption. *International Journal of Mechanical Sciences,* 191, 106101.

14. Park, K. M., Min, K. S., Roh, Y. S. (2022). Design Optimization of Lattice Structures under Compression: Study of Unit Cell Types and Cell Arrangements. *Materials*, 15(1), 97.

15. Gibson, L. J., Ashby, M. F. (2014). *Cellular Solids*. (Second Edition). Cambridge: Cambridge University Press, 1–14.

16. Pan, C., Han, Y., Lu, J. (2020). Design and optimization of lattice structures: A review. *Applied Sciences,* 10(18), 6374.

17. Platek, P., Sienkiewicz, J., Janiszewski, J., Jiang, F. (2020). Investigations on mechanical properties of lattice structures with different values of relative density made from 316L by selective laser melting (SLM). *Materials,* 13(9), 2204.

18. Yin, H., Zhang, W., Zhu, L., Meng, F., Liu, J., Wen, G. (2023). Review on lattice structures for energy absorption properties. *Composite Structures*, 304, 116397.

19. İnternet: Investigation of lattice structures and analysis of strut geometry. URL: https://ir.library.louisville.edu/etd/2814, Son Erişim Tarihi: 01.06.2024.

20. Kessler, J., Balc, N., Gebhardt, A., Abbas, K. (2017) *Basic design rules of unit cells for additive manufactured lattice structures*. MATEC Web of Conferences, Online, 137, 02005.

21. Chibinyani, M., Dzogbewu T. C., Maringa, M., Muiruri A. (2023) *A review of the types and tessellation of lattice structures, their effectiveness and limitations in mimicking natural cellular structures*. MATEC Web of Conferences, Online, 388, 06008.

22. Tao, W., Leu, M. C. (2016) *Design of lattice structure for additive manufacturing*. International Symposium on Flexible Automation, Ohio, 325, 332.

23. Caliskan, M., Hafizoglu, H., Babacan, N. (2024). Dynamic mechanical properties of selective laser-melted AlSi10Mg lattice structures: experimental and numerical analysis with emphasis on Johnson-Cook model parameters. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 132, 3861–3875.

24. Wu, B., Chen, Q., Liu, F., Chen, M., Lu, Y., Jiang, D. (2023). Study on Dynamic Mechanics of Node-Enhanced Graded Lattice Structure and Application Optimization in Automobile Energy Absorbing Box. *Materials*, 16(21), 6893.

25. Okorugbo, P. A. (2019). *Effect of impact velocity on the energy absorption characteristics of crash boxes*. Master Thesis, Graduate School of Applied Sciences Near East University, Nicosia.

26. Fadeel, A., Mian, A., Al Rifaie, M, Srinivasan, R. (2019) Effect of Vertical Strut Arrangements on Compression Characteristics of 3D Printed Polymer Lattice Structures: Experimental and Computational Study. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 28(3), 709–716.

27. Harris, J. A., Winter, R. E., McShane, G. J. (2017). Impact response of additively manufactured metallic hybrid lattice materials. *International Journal of Impact Engineering*, 104, 177–191.

28. Vrana, R., Koutny, D., Palousek, D. (2016). Impact resistance of different types of lattice structures manufactured by SLM. *MM Science Journal*, 2016, 1579–1585.

29. Seek, C. Y., Kok, C. K., Lim, C. H., Liew, K. W. (2022). A Novel Lattice Structure for Enhanced Crush Energy Absorption. *International Journal of Technology*, 13(5), 1139–1148.

30. Wang, H., Wang, K., Lei, J., Fan, X. (2024) Compressive Properties and Energy Absorption Characteristics of Co-Continuous Interlocking PDMS/PLA Lattice Composites. *Materials*, 17(16), 3894.

31. Omidvar, M., Iskander, M., Bless, S. (2012). Stress-strain behavior of sand at high strain rates. *International Journal of Impact Engineering*, 49, 192–213.

32. Wang, L. (2007). *Foundations of Stress Waves*. (First Edition). USA: Elsevier, 57–93.

33. Sreenivasan, P. R., & Ray, S. K. (2001). *Mechanical testing at high strain rates*. In K. H. Jürgen Buschow, R. W. Cahn, M. C. Flemings, B. Ilschner, E. J. Kramer, S. Mahajan, & P. Veyssière (Eds.), Encyclopedia of materials: Science and technology, 5269-5271.

34. Gao, J. (2017). *Split-Hopkinson Pressure Bar Testing and Constitutive Model Evaluation for 7050-T7451 Aluminum, IN718 Superalloy, & 300M Steel*. Master Thesis, Department of Mining and Materials Engineering McGill University, Canada.

35. Şimşek, İ., Yıldırım, M., Özyürek, D., Şimşek, D. (2019). Basınçsız İnfiltrasyon Yöntemiyle Üretilen SiO2 Takviyeli Alüminyum Kompozitlerin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. *Journal of Polytechnic*, 22(1), 81-85.

36. Kalemtaş A, Arslan G., Kara, F. (2006). *Basınçsız İnfiltrasyonla Sic-B4C-Al kompozitlerinin üretimi ve özellikleri*. Savunma teknolojileri kongresi, Ankara.

37. İnternet: Kalemtas, A. İnfiltrasyon Yöntemiyle Kompozit Üretiminde Etkili Olan Temel Değişkenler. URL: https://www.researchgate.net/publication/311193096, Son Erişim Tarihi: 01.06.2024.

38. Stanczak, M., Rusinek, A., Broniszewska, P., Fras, T., Pawlowski, P. (2022) Influence of strain rate and temperature on the mechanical behaviour of additively manufactured AlSi10Mg alloy – experiment and the phenomenological constitutive modelling. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences*, 70(4), e141983.

39. Nurel, B., Nahmany, M., Stern, A., Frage, N., Sadot, O. (2018). *Study on the dynamic properties of AM-SLM AlSi10Mg alloy using the Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) technique*. EPJ Web of Conferences, 183, 04005.

40. Ghisi, N. B., Ramos, H., Kindleyside, L., Aboulkhair, N. T., Santiago, R. (2022). The influence of the characteristic microstructure of additively manufactured AlSi10Mg on the plastic behaviour at various strain rates. *Material Design*, 223, 111112.

41. Aktürk, M. (2021) *Eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiş Alsi10mg malzemesinin malzeme yapısal parametrelerinin belirlenmesi ve sonlu elemanlar yöntemiyle doğrulanması*, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.

42. Vrána, R., Cervinek, O., Manas, P., Koutný, D., Paloušek, D. (2018). Dynamic loading of lattice structure made by selective laser melting-numerical model with substitution of geometrical imperfections. *Materials*, 11(11), 2129.

43. İnternet: Ntopology Design Program. URL: https://www.ntop.com/, Son Erişim Tarihi: 01.06.2024

44. Mines, R. A. W., Tsopanos, S., Shen, Y., Hasan, R., McKown, S.T. (2013). Drop weight impact behaviour of sandwich panels with metallic micro lattice cores. *International Journal of Impact Engineering*, 60, 120–132.

45. Zhao, M., Zhang, D. Z., Li, Z., Zhang, T., Zhou, H., Ren, Z. (2022) Design, mechanical properties, and optimization of BCC lattice structures with taper struts. *Composite Structures*, 295, 115830.

46. Liu, F., Zhang, D. Z., Zhang, P., Zhao, M., Jafar, S. (2018). Mechanical properties of optimized diamond lattice structure for bone scaffolds fabricated via selective laser melting. *Materials*, 11(3), 374.



Gazili olmak ayrıcalıktır