



**YENİ HİBRİT KAFES YAPI TASARIMLARININ
YARI STATİK BASMA KOŞULLARINDA
MEKANİK DAVRANIŞININ TEST VE NÜMERİK
YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ**

Hüseyin YAŞAR



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YENİ HİBRİT KAFES YAPI TASARIMLARININ YARI STATİK BASMA
KOŞULLARINDA MEKANİK DAVRANIŞININ TEST VE NÜMERİK
YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ**

Hüseyin YAŞAR
0000-0002-3742-2042

Prof. Dr. Kadir ÇAVDAR
0000-0001-9126-0315
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2025
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

YENİ HİBRİT KAFES YAPI TASARIMLARININ YARI STATİK BASMA KOŞULLARINDA MEKANİK DAVRANIŞININ TEST VE NÜMERİK YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ

Hüseyin YAŞAR

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Kadir ÇAVDAR

Kafes yapılar, yüksek dayanım ve düşük ağırlık özellikleri sayesinde hafif ve dayanıklı tasarımlara olanak sağlar. Kontrol edilebilir mekanik özellikleri ile havacılık, savunma, otomotiv, sağlık ve spor ekipmanı sektörlerinde kullanılmaktadır. Bu çalışmada “eşkenar dörtgensel on iki yüzlü (RD)”, “iso truss (IT)” ve “dikme ile güçlendirilmiş yüzey merkezli kübik (FCCZ)” birim kafes hücreleri kullanılarak hibrit birim kafes hücreler tasarlanmıştır. Hibrit ve birim kafes hücreler ile eşit bağıl yoğunlukta ve farklı konfigürasyonlarda kenar uzunluğu 30 mm olan kübik kafes yapılar oluşturulmuştur. Polimer kafes yapılar endüstriyel ABS benzeri reçineden UV led ışıkla kürleme (LCD) Eİ yöntemiyle üretilmiştir. Metal kafes yapılar ise Inconel 718 metal tozu kullanılarak toz yatağında seçici lazer ergitme (SLM) Eİ yöntemiyle üretilmiştir. Üretilen kafes yapıların yarı statik basma testi ile kuvvet-basma eğrileri elde edilmiştir. Bu eğrilerden hesaplanan toplam soğurulan enerji (TSE) değerleri kullanılarak birim ve hibrit kafes yapı tasarımlarının mekanik performanslarının karşılaştırması yapılmıştır. Aynı hacim ve eşit bağıl yoğunlukta olan kafes yapılara, birim hücre boyutu ve sayısının etkisi incelenmiştir. Ayrıca, farklı malzemelerden aynı tasarımla üretilmiş kafes yapıların mekanik davranışlarına, malzemenin etkisi araştırılmıştır. Metal kafes yapıların LS-DYNA çoklu fizik sonlu elemanlar analiz (SEA) yazılımı kullanılarak test benzetimleri yapılmış ve kafes yapılarda SEA yönteminin etkinliği değerlendirilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında incelenen kafes yapılar için, eşit bağıl yoğunlukta hibrit kafes yapı tasarımlarının mekanik kararlılığının daha iyi olduğu ve enerji soğurma kabiliyetlerini geliştirdiği anlaşılmıştır. Kırılgan ve sünek olmak üzere iki farklı malzemeden aynı tasarımlar ile üretilmiş kafes yapıların benzer mekanik davranış gösterdikleri belirlenmiştir. SEA yöntemleri ile yapılan analizlerin, mekanik özelliklerin incelenmesi için bir yöntem olarak kullanılabileceği görülmüştür. Eİ yöntemlerinin yaygınlaşması ile bu kafes yapıların, konstrüksiyonları hafifletme ve enerji soğurma amacıyla yaygın bir kullanım alanına sahip olacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Hibrit kafes yapılar, eklemeli imalat, enerji soğurma, yarı statik basma testi, nümerik analiz

2025, xvi+ 120 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

INVESTIGATION OF MECHANICAL BEHAVIOR OF NOVEL HYBRID LATTICE STRUCTURE DESIGNS UNDER QUASI STATIC COMPRESSION CONDITIONS WITH TEST AND NUMERICAL METHODS

Hüseyin YAŞAR

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Kadir ÇAVDAR

Lattice structures with high strength to low weight ratios allow lightweight and durable structure design. These structures are used in aviation, defense, automotive, medical device and sport equipment industries. In this study, hybrid lattice cells designed using “rhombic dodecahedron (RD)”, “iso truss (IT)” and “rod supported face centered cubic (FCCZ)” unit lattice cells. Hybrid and unit cells were used to design cubic lattice structures that’s edge length is 30 mm with the same relative density and different configurations. Polymer lattice structures were manufactured with industrial ABS like resin by UV led light-curing (LCD) AM method. Metal lattice structures were manufactured with Inconel 718 metal powder by powder bed selective laser melting (SLM) AM method. Quasi static test was applied on printed lattice structures and force-displacement curves of them were made. The total absorbed energy (TSE) values calculated from these curves were used to compare the mechanical performances of unit and hybrid cell lattice structure designs. The unit cell size and number effect on lattice structures with the same volume and relative density was researched. In addition, the effect of material on the mechanical behavior of lattice structures manufactured from different materials with the same design was investigated. Metal lattice structures were simulated using LS-DYNA multiphysics finite element analysis (FEA) software and the effectiveness of the FEA method on lattice structures was evaluated. For the lattice structures investigated in this thesis, it was found that hybrid lattice structure designs with the same relative density have better mechanical stability and enhanced energy absorption capabilities. It has been determined that the lattice structures manufactured from two different materials, brittle and ductile, with the same designs show similar mechanical behavior. It was seen that analyses performed by SEA methods can be used as a method for the investigation of mechanical properties. With the widespread use of AM methods, hybrid lattice structures can be widely used to lightweight design and energy absorption.

Key words: Hybrid lattice structures, additive manufacturing, energy absorption, quasi static compression test, numerical analysis

2025, xvi + 120 pages.

TEŞEKKÜR

Akademik hayatım boyunca, lisans öğrenimimden başlayarak bu zamana kadar geçen süreçte, sadece bir öğrenim sürecinden ziyade eğitime ve kişisel gelişime de her daim katkısı olan, bilgi ve tecrübesiyle her aşamada yol gösteren, beni her zaman cesaretlendiren değerli danışmanım Prof. Dr. Kadir Çavdar'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışması boyunca verdikleri görüşlerle daha nitelikli bir çalışmanın ortaya çıkmasına destek olan Prof. Dr. Ali Durmuş ve Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Akansel'e teşekkür ederim.

Tez çalışması kapsamında polimer test parçalarının üretilmesinde her türlü desteği veren ALIAS Reçine markası ile üretim yapan Dokuz Kimya ARGE firmasına ve çalışanlarına; metal test parçalarının üretilmesinde hem toz hem de yazıcı üreticisi olan Ermaksan Additive firmasına ve çalışanlarına verdikleri desteklerden ötürü teşekkür ederim. Mikroskop kullanımı için destek veren MMO Kaynak Eğitim ve Muayene Merkezi'ne ve değerli arkadaşlarım Dr. Ersan Gönül ve Yüksek Makine Mühendisi Burak Bayraktaroğlu'na teşekkür ederim.

Bilgi ve tecrübelerini hiçbir zaman paylaşmaktan çekinmeyen, testler ve yazılımlar konusunda destek veren Dr. Mesut Şahin'e, LS-DYNA yazılımındaki destekleri için iş arkadaşım Yüksek Makine Mühendisi Yasin Gargı'ya, testlerin icra edilmesinde destek olan Makine Mühendisi Kadir Ayaş'a teşekkür ederim.

Anova ARGE Teknolojileri ve çalışmakta olduğum yeni oluşumu Harpax Sistem Teknolojileri firmalarına akademik çalışmalar için verdikleri desteklerden ötürü teşekkür ederim. İş ve akademik çalışmalarımda sürekli yanımda olan ve tecrübelerini her daim paylaşan değerli yöneticim Doç. Dr. Bülent Özkan'a teşekkür ederim. Kendisi de akademik çalışmalara devam eden ekip arkadaşım Yüksek Makine Mühendisi Ensar Tütüncü'ye ve diğer çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Hayatım boyunca desteklerini her zaman gördüğüm, değerli annem, babam, ablalarım ve eşlerime; sonradan hayatımıza giren ve neşe kaynağımız yeğenim İlkan'a teşekkür ederim. Son olarak bana her zaman iyi hissettiren kedim Karakız'a teşekkür ederim.

27/01/2025
Hüseyin YAŞAR

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	viii
ABSTRACT.....	ix
TEŞEKKÜR.....	x
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
2.1. Kafes Yapılar	4
2.1.1. Kafes yapıların sınıflandırılması	6
2.1.2. Kafes yapı parametreleri ve mekanik özellikler.....	12
2.1.3. Uygulama alanları	18
2.2. Eklemeli İmalat.....	20
2.3. Kaynak Araştırması	25
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	32
3.1. Kafes Yapı Tasarımları	32
3.2. Polimer Kafes Yapılar, Malzeme Özellikleri ve Üretimi	36
3.3. Metal Kafes Yapılar, Malzeme Özellikleri ve Üretimi.....	41
3.4. Yarı Statik Basma Testleri	46
3.5. Nümerik Analiz Çalışmaları	48
4. BULGULAR	56
4.1. Test Numunelerinin Üretim Sonrası Değerlendirilmesi	56
4.2. Basma Testi Sonuçları	63
4.3. Nümerik Analiz Sonuçları	81
5. SONUÇLAR ve TARTIŞMA	93
EK 1 TEST ÇALIŞMALARI.....	103

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

σ_A	Akma gerilmesi
ρ^*	Bağıl yoğunluk
dk	Dakika
E	Elastisite modülü
σ	Gerilme
V	Hacim
F	Kuvvet
m	Kütle
μm	Mikrometre
nm	Nanometre
N	Newton
ν	Poisson oranı
sa	Saat
s	Saniye
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat derece
ρ	Yoğunluk

Kısaltmalar

Açıklama

ASTM	American Society for Testing and Materials
ABS	Akrilonitril bütadien stiren
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım
Eİ	Eklemeli İmalat
FCCZ	Dikme ile güçlendirilmiş yüzey merkezli kübik (face centered cubic with axial strut)
GMK	Gövde Merkezli Kübik
IT	Iso truss
ÖSE	Özgül Soğurulan Enerji
RD	Eşkenar dörtgensel on iki yüzlü (rhombic dodecahedron)
SLA	Stereolitografi
STL	Standard Tessellation Language/ Standard Triangle Language
TPMS	ÜPMY (Üçlü periyodik minimum yüzey)
TSE	Toplam Soğurulan Enerji

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Hücresel yapıların sınıflandırılması (Park vd., 2022)	5
Şekil 2.2. Örnek kafes yapılar; a) gözlemlenen ilk hücre b) bal peteği yapısı c) kemik dokusu d) uzay kafes yapı (Leary, 2020a)	5
Şekil 2.3. 2B örnek kafes yapılar, a) bal peteği b) üçgen c) kare (Yin vd., 2023)	7
Şekil 2.4. 3B kiriş kafes yapılar, a) sekizli b) elmas c) kübik (Yin vd., 2023)	7
Şekil 2.5. ÜPMY kafes yapılar, a) girodial b) primitiv c) diamond (Yin vd., 2023).....	8
Şekil 2.6. 3B plaka kafes yapılar, a) sekizli b) basit kübik c) HMK (Yin vd., 2023).....	9
Şekil 2.7. Örnek 2B ökzetik yapılar (Xue vd., 2023)	9
Şekil 2.8. Örnek gradyan kafes yapılar (Bai vd., 2020)	10
Şekil 2.9. 2B hiyerarşik kafes yapı örneği (Tsang vd., 2019)	11
Şekil 2.10. Birim hücrelerden oluşturulan hibrit birim hücre (L. Li vd., 2022).....	11
Şekil 2.11. Farklı birim hücre dizilimine örnek hibrit kafes yapılar, a) Yang vd. (2023), b) Syrlybayev vd. (2023)	12
Şekil 2.12. Eğilme ve gerinme baskın yapı örnekleri (Leary, 2020a)	14
Şekil 2.13. Eğilme baskın yapı karakteristik gerilme-gerinim eğrisi (Ashby, 2006)	15
Şekil 2.14. Gerinme baskın yapı karakteristik gerilme-gerinim eğrisi (Ashby, 2006).....	15
Şekil 2.15. Eğilme ve gerinme baskın yapı karakteristik hasar ilerlemesi (Leary, 2020a).....	16
Şekil 2.16. 5x5x5 konfigürasyonunda GMK Kafes Yapı.....	17
Şekil 2.17. Enerji soğurma özellikleri (Ha & Lu, 2020)	17
Şekil 2.18. STL dosyası oluşturma adımları (Rasiya vd., 2020)	20
Şekil 2.19. Ürün geliştirme döngüsü (Wong & Hernandez, 2012)	21
Şekil 2.20. Temel üretim yöntemleri (Leary, 2020b).....	21
Şekil 2.21. Eklemeli imalatın sınıflandırılması (Saleh Alghamdi vd., 2021).....	24
Şekil 2.22. Hibrit kafes yapının tasarım stratejisi (Ma vd., 2023).....	25
Şekil 2.23. Hibrit kafes hücre konfigürasyonu (Xiao vd., 2022).....	26
Şekil 2.24. Hibrit kafes yapının enerji soğurma özellikleri (Xiao vd., 2022)	26
Şekil 2.25. Hibrit kafes yapıların tasarım yöntemleri (Wu vd., 2023)	27
Şekil 2.26. Novak vd. (2023) araştırmalarında kullanılan test numuneleri.....	27
Şekil 2.27. Hibrit kafes yapı tasarımları (Kladovasilakis vd., 2023).....	28
Şekil 2.28. Hibrit birim kafes hücre tasarımı (Cui vd., 2024)	29
Şekil 2.29. Hibrit kafes yapı tasarımı (L. Li vd., 2024)	30
Şekil 3.1. FCCZ, RD ve IT birim kafes hücreler (Soldan sağa).....	32
Şekil 3.2. RDIT hibrit birim kafes hücrenin tasarımı	33
Şekil 3.3. RDFC hibrit birim kafes hücrenin tasarımı	33
Şekil 3.4. Eklemeli imalat yöntemleri, a) SLA b) DLP/ LCD (Y. Wu vd., 2023)	36
Şekil 3.5. Rayshape Edge1 LCD 3B yazıcı	37
Şekil 3.6. Polimer kafes yapı üretimi	38
Şekil 3.7. ASTM D698 Tip I plastik çekme testi numunesi ölçüleri	38
Şekil 3.8. Çekme testi numuneleri ve üretim yönleri, a) tablaya paralel üretim yönü, b) tablaya dik üretim yönü	39

Şekil 3.9.	Polimer malzeme çekme testi.....	39
Şekil 3.10.	ABS benzeri polimer malzeme gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri, a) tablaya paralel üretim yönü, b) tablaya dik üretim yönü..	40
Şekil 3.11.	Toz yatağında ergitme eklemeli imalat yöntemi (Benedetti vd., 2021)	41
Şekil 3.12.	ENAVISION120 toz yatağında lazerle ergitme 3B yazıcı.....	42
Şekil 3.13.	Metal kafes yapı üretimi.....	43
Şekil 3.14.	Inconel 718 malzeme tablaya dik üretim yönü gerilme-birim şekil değiştirme grafiği	44
Şekil 3.15.	UVE MNR100 100 kN (sol) ve Zwick Roell 300 kN (sağ) kapasiteli universal test cihazları	46
Şekil 3.16.	Test cihazı numune yerleşimi.....	47
Şekil 3.17.	Video kayıt cihazı ve sabitleme düzeneği	47
Şekil 3.18.	RD kafes yapı tasarım ve üretim çapları	48
Şekil 3.19.	RD kafes yapı analizi için hazırlanan örnek katı model.....	49
Şekil 3.20.	Dört yüzlü (tetrahedron) ve altı yüzlü (hexahedron) elemanlar	49
Şekil 3.21.	RD kafes yapı örnek nümerik analiz modeli ve ağ yapısı.....	50
Şekil 3.22.	Inconel 718 gerçek gerilme-plastik birim şekil değiştirme eğrisi	51
Şekil 3.23.	RD kafes yapı için farklı eleman boyutları görünümü	52
Şekil 3.24.	Eleman boyutlarına göre SEA kuvvet-basma eğrileri.....	53
Şekil 3.25.	2 mm basma durumu için farklı eleman boyutlarında kuvvet değerleri	53
Şekil 3.26.	Eleman formülasyonlarına göre SEA kuvvet-basma eğrileri.....	54
Şekil 3.27.	Farklı eleman formülasyonları ile çözülen analizlerin kuvvet-basma eğrileri	54
Şekil 4.1.	Üretilmiş RD, IT ve RDIT polimer (P) kafes yapılar	57
Şekil 4.2.	Üretilmiş RD, FC ve RDFC polimer (P) ve metal (M) kafes yapılar ...	58
Şekil 4.3.	Stereo mikroskop, ölçüm numunesi ve kalibrasyon bloğu	58
Şekil 4.4.	Stereo mikroskop ölçek kalibrasyonu	59
Şekil 4.5.	Stereomikroskop verisinin Image J yazılımı ile ölçüm yöntemi.....	59
Şekil 4.6.	Stereomikroskop görüntüleri a) FC-M1 b) FC-P1	60
Şekil 4.7.	Hassas terazide kafes yapı kütle ölçümü.....	61
Şekil 4.8.	RD, IT ve RDIT 4x4x4 polimer kafes yapı ezilme davranışları	64
Şekil 4.9.	RD, IT ve RDIT 4x4x4 polimer kafes yapı kuvvet-basma grafikleri ...	64
Şekil 4.10.	RD, IT ve RDIT 4x4x4 polimer kafes yapı TSE ve E değerleri	65
Şekil 4.11.	RD, IT ve RDIT 3x3x3 polimer kafes yapı ezilme davranışları	65
Şekil 4.12.	RD, IT ve RDIT 3x3x3 polimer kafes yapı kuvvet-basma grafikleri ...	66
Şekil 4.13.	RD, IT ve RDIT polimer kafes yapı TSE ve E değerleri	66
Şekil 4.14.	RD, IT ve RDIT 2x2x2 polimer kafes yapı ezilme davranışları	67
Şekil 4.15.	RD, IT ve RDIT 2x2x2 polimer kafes yapı kuvvet-basma grafikleri ...	67
Şekil 4.16.	RD, IT ve RDIT 2x2x2 polimer kafes yapı TSE ve E değerleri	67
Şekil 4.17.	RD, IT ve RDIT 2x2x2 içi boş kiriş polimer kafes yapı ezilme davranışları	68
Şekil 4.18.	RD, IT ve RDIT 2x2x2 içi boş kiriş kafes yapı kuvvet-basma grafikleri	68
Şekil 4.19.	RD, IT ve RDIT 2x2x2 içi boş kiriş polimer kafes yapı TSE ve E değerleri.....	69
Şekil 4.20.	RD, FC ve RDFC 4x4x4 polimer kafes yapı ezilme davranışları	69
Şekil 4.21.	RD, FC ve RDFC 4x4x4 polimer kafes yapı kuvvet-basma grafikleri .	70
Şekil 4.22.	RD, FC ve RDFC 4x4x4 polimer kafes yapı TSE ve E değerleri	70

Şekil 4.23.	RD, FC ve RDFC 4x4x4 metal kafes yapı ezilme davranışları	71
Şekil 4.24.	RD, FC ve RDFC 4x4x4 metal kafes yapı kuvvet-basma grafikleri.....	71
Şekil 4.25.	RD, IT ve RDIT 2x2x2 metal kafes yapı TSE ve E değerleri.....	72
Şekil 4.26.	RD polimer kafes yapı farklı dizilimlerde ezilme davranışları	73
Şekil 4.27.	RD polimer kafes yapı farklı dizilimlerde kuvvet-basma grafikleri	73
Şekil 4.28.	RD polimer kafes yapı farklı dizilimlerde TSE ve E değerleri	74
Şekil 4.29.	IT polimer kafes yapı farklı dizilimlerde ezilme davranışları	74
Şekil 4.30.	IT polimer kafes yapı farklı dizilimlerde kuvvet-basma grafikleri	75
Şekil 4.31.	IT polimer kafes yapı farklı dizilimlerde TSE ve E değerleri	75
Şekil 4.32.	RDIT polimer kafes yapı farklı dizilimlerde ezilme davranışları	76
Şekil 4.33.	RDIT polimer kafes yapı farklı dizilimlerde kuvvet-basma grafikleri ..	76
Şekil 4.34.	RDIT polimer kafes yapı farklı dizilimlerde TSE ve E değerleri	77
Şekil 4.35.	Farklı malzemelerle üretilmiş aynı tasarımların ezilme davranışları	77
Şekil 4.36.	Farklı malzemelerle üretilmiş aynı tasarımların kuvvet-basma grafikleri	78
Şekil 4.37.	Farklı malzemelerle üretilmiş aynı tasarımların ÖSE değerleri.....	79
Şekil 4.38.	Farklı birim hücrelerden oluşturulmuş 4x4x4 yapıların kuvvet-basma grafikleri	79
Şekil 4.39.	Farklı birim hücrelerden oluşturulmuş 4x4x4 yapıların ezilme davranışları	80
Şekil 4.40.	Farklı birim hücrelerden oluşturulmuş 4x4x4 yapıların TSE ve E değerleri.....	80
Şekil 4.41.	RD-M1 kafes yapısı test ve ÜÇ analiz sonrası ezilme durumları	81
Şekil 4.42.	RD-M1 seçici lazer ergitme üretim çalışması, destek yapılar.....	81
Şekil 4.43.	RD-M1 test ve analiz kuvvet-basma grafikleri	82
Şekil 4.44.	RD-M1 test ve analiz TSE ve E değerleri	82
Şekil 4.45.	FC-M1 kafes yapısı test ve ÜÇ analiz sonrası ezilme durumları	83
Şekil 4.46.	FC-M1 test ve analiz kuvvet-basma grafikleri.....	83
Şekil 4.47.	FC-M1 kafes yapısı ÜÇ analiz sonuçları, 12 mm basma efektif plastik gerinim durumları.....	84
Şekil 4.48.	Inconel 718 için oluşturulmuş malzeme kartı ve hata kriteri	85
Şekil 4.49.	Hata kriteri (HK) değerlerinin karşılaştırılması	85
Şekil 4.50.	RD-M1 hata kriteri (HK) tanımlanmış durum için analiz sonuçları	86
Şekil 4.51.	RD-M1 test ve analiz çalışması TSE değerleri (Hata kriteri eklenmiş)	86
Şekil 4.52.	RD-M1 test ve analiz çalışması basma miktarına göre TSE değerleri..	87
Şekil 4.53.	FC-M1 kafes yapısı test ve ÜÇ analiz sonrası ezilme durumları	87
Şekil 4.54.	FC-M1 hata kriteri (HK) tanımlanmış durum için analiz sonuçları.....	88
Şekil 4.55.	FC-M1 test ve analiz çalışması TSE ve E değerleri (Hata kriteri eklenmiş)	88
Şekil 4.56.	FC-M1 test ve analiz çalışması basma miktarına göre TSE değerleri ..	88
Şekil 4.57.	RDFC-M1 kafes yapısı test ve ÜÇ analiz sonrası ezilme durumları	89
Şekil 4.58.	RDFC-M1 test ve analiz çalışması TSE ve E değerleri	89
Şekil 4.59.	RDFC-M1 hata kriteri (HK) tanımlanmış durum için analiz sonuçları	90
Şekil 4.60.	RDFC-M1 test ve analiz çalışması basma miktarına göre TSE değerleri.....	90
Şekil 4.61.	FC-M1 analiz modelleri, a) Z yönü b) X-Y yönü	91
Şekil 4.62.	RDFC-M1 analiz modelleri, a) Z yönü b) X-Y yönü.....	91

Şekil 4.63	FC-M1 ve RDFC-M1 farklı yönlerde analiz sonuçları	91
Ek Şekil 1.	RD-P1 kafes yapı basma testi sonuçları	103
Ek Şekil 2.	IT-P1 kafes yapı basma testi sonuçları	104
Ek Şekil 3.	RDIT-P1 kafes yapı basma testi sonuçları	105
Ek Şekil 4.	RD-P2 kafes yapı basma testi sonuçları	106
Ek Şekil 5.	IT-P2 kafes yapı basma testi sonuçları	107
Ek Şekil 6.	RDIT-P2 kafes yapı basma testi sonuçları	108
Ek Şekil 7.	RD-P3 kafes yapı basma testi sonuçları	109
Ek Şekil 8.	IT-P3 kafes yapı basma testi sonuçları	110
Ek Şekil 9.	RDIT-P3 kafes yapı basma testi sonuçları	111
Ek Şekil 10.	RD-P4 kafes yapı basma testi sonuçları	112
Ek Şekil 11.	IT-P4 kafes yapı basma testi sonuçları	113
Ek Şekil 12.	RDIT-P4 kafes yapı basma testi sonuçları	114
Ek Şekil 13.	FC-P1 kafes yapı basma testi sonuçları	115
Ek Şekil 14.	RDFC-P1 kafes yapı basma testi sonuçları	116
Ek Şekil 15.	RD-M1 kafes yapı basma testi sonuçları	117
Ek Şekil 16.	FC-M1 kafes yapı basma testi sonuçları	118
Ek Şekil 17.	RDFC-M1 kafes yapı basma testi sonuçları	119

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. Birim kafes hücre çeşitleri (Yin vd., 2023)	6
Çizelge 2.2. Kafes yapıların kullanım alanları ve özellikleri (Plessis vd., 2022) ...	19
Çizelge 2.3. Eİ yöntemleri güçlü-zayıf yönler (Ali vd., 2022; Y. Wu vd., 2023) ..	23
Çizelge 3.1. Tasarımı yapılan birim ve hibrit hücrelerin mekanik davranışları.....	34
Çizelge 3.2. RD, IT birim hücre ve RDIT hibrit kafes yapı tasarımları	35
Çizelge 3.3. RD, FC ve RDFC kafes yapı tasarımları	35
Çizelge 3.4. Polimer kafes yapıların üretim parametreleri	38
Çizelge 3.5. ABS benzeri polimer tablaya paralel üretim yönü çekme test verileri	40
Çizelge 3.6. ABS benzeri polimer tablaya dik üretim yönü çekme test verileri.....	40
Çizelge 3.7. ASTM F3055 UNS N07718 malzeme kompozisyonu	43
Çizelge 3.8. Metal kafes yapıların üretim parametreleri	44
Çizelge 3.9. Inconel 718 tablaya dik üretim yönü çekme test verileri.....	45
Çizelge 3.10. Metal kafes yapılar tasarım ve üretim çapı değerleri.....	48
Çizelge 3.11. Inconel 718 malzeme mekanik özellikleri	51
Çizelge 3.12. Inconel 718 gerçek gerilme- plastik birim şekil değiştirme değerleri	51
Çizelge 3.13. Rijit plaka malzeme özellikleri	51
Çizelge 3.14. SEA modelleri.....	55
Çizelge 4.1. Polimer kafes yapıların stereomikroskop ile ölçüm sonuçları.....	60
Çizelge 4.2. Metal kafes yapıların stereomikroskop ile ölçüm sonuçları	61
Çizelge 4.3. Polimer kafes yapı test numunelerinin tasarım ve ölçüm kütleleri.....	62
Çizelge 4.4. Metal kafes yapı test numunelerinin tasarım ve ölçüm kütleleri	62

1. GİRİŞ

Kafes yapılar; havacılık, uzay, savunma, otomotiv ve biyomedikal gibi sektörlerde hızlı geliştirme ve ayarlanabilir özellikleri sayesinde hafif yapı tasarımları, insan vücuduna uyumlu implantlar, çarpışma enerjisi soğurma, paketleme, ısı yönetimi, titreşim sönümleme, filtreleme ve ses yalıtımı gibi pek çok uygulamada kullanılmaktadır (Miao vd., 2024). Kafes yapılar ile ilgili çalışmalara bakıldığında, farklı tasarım yaklaşımları, çeşitli malzemelerin kafes yapılarda uygulaması, eklemeli imalat yöntemleri ve son işlemlerinin etkinliği, nümerik analiz yaklaşımları ve farklı yükleme koşulları altında davranışları incelenmektedir. Düşük kütlelerde üretilebilen kafes yapılar, yüksek enerji soğurma kabiliyetleri ve kullanılacağı bölge için uygulamaya yönelik tasarlanabilir özellikleri sayesinde, yük taşıma, çarpışma ve mekanik şok ortamlarında kullanılmaktadır. Kafes yapıların mekanik özelliklerinin belirlenmesi, enerji soğurma özellikleri, dinamik ve statik yükler altında davranışları üzerine yapılan çalışmalar bulunmaktadır (Maconachie vd., 2020; Niutta vd., 2022; Tancogne-Dejean vd., 2016; T. Zhang vd., 2023).

Kafes yapılar ile ilgili güncel çalışma konularından biri ise hibrit kafes yapı tasarımlarıdır. Hibrit kafes yapı ifadesi genel bir tanım olup, farklı şekillerde ele alınabilir. Bunlardan biri iki farklı malzemenin tek yapıda kullanıldığı kafes yapılardır (W. Wu vd., 2023; J. Zhang vd., 2024). Bir diğer hibrit kafes yapı tanımı ise farklı iki veya daha fazla birim kafes hücrenin bir hacim içinde çeşitli konfigürasyonlarda dizilimidir (C. Li vd., 2022; P. Zhang vd., 2021). Bu çalışmada da yer alan hibrit kafes yapının diğer bir tanımı ise, iki farklı birim kafes hücrenin birleştirilmesi sonucunda ortaya çıkan yeni birim kafes hücre ile oluşturulan kafes yapılar olarak tanımlanmaktadır (Akbaý & Bahçe, 2024; Kladovasilakis vd., 2023).

Eklemeli imalat teknolojisi son yıllarda hızlı gelişmekte ve yaygınlaşmaktadır. Geleneksel imalat yöntemleri ile üretilmesi zor yapıların eklemeli imalat usullerini kullanarak üretilmesi mümkündür. Ayrıca eklemeli imalat yöntemlerinin esnek tasarım avantajının yanında en büyük potansiyellerinden biri daha az malzeme kullanarak daha dayanıklı yapılar elde etme imkanıdır (Ngo vd., 2018). Bu potansiyelin kullanılması için eklemeli imalat teknolojileri ile üretilen kafes yapılar üzerine pek çok çalışma yapılmaktadır (Seharing vd., 2020).

Bu tez çalışması, hibrit kafes yapı tasarımının mekanik özelliklere ve enerji soğurma kabiliyetlerine olan etkisini incelemeyi amaçlamaktadır. Bir malzeme olarak ele alınan eşit hacimli (30 mm x 30 mm x 30 mm boyutlarında kübik tasarım) kafes yapıların aynı bağıl yoğunlukta ve yarı statik basma yükleri altındaki davranışları ve mekanik kararlılıklarına tasarımın etkisini incelenmektedir. Bu sebeple, “eşkenar dörtgensel on iki yüzlü (RD)”, “iso truss (IT)” ve “dikme ile güçlendirilmiş yüzey merkezli kübik (FCCZ)” olarak bilinen üç farklı birim kafesten hibrit kafes hücreler oluşturulmuştur. “RD” birim kafes hücre her iki hibrit kafes hücrede ortak kullanılmıştır. “IT” birim kafes hücrenin kullanıldığı hibrit birim kafes hücre “RDIT”, “FCCZ” birim kafes hücrenin kullanıldığı hibrit birim kafes hücre ise “RDFC” olarak isimlendirilmiştir.

Aynı hacim içerisinde, farklı hücre boyutları ve sayıları ile “RD, IT ve RDIT” kafes yapılar tasarlanarak, yarı statik basma testi koşullarında hücre boyutu ve sayısının mekanik özelliklere etkisi araştırılmaktadır. Ayrıca aynı birim hücre boyutu ve sayısı ile içi boş ve dolu kirişlerle oluşturulan farklı kafes yapı tasarımları kullanılarak, yapıyı oluşturan birim elemanların etkisinin araştırılması hedeflenmiştir.

Aynı boyutlarda ve bağıl yoğunlukta tasarlanan “RD, FC ve RDFC” kafes yapılar için hibrit kafes yapı tasarımının etkisinin yanında, farklı malzemeler kullanılarak basma koşullarında etkisi araştırılmaktadır.

Test çalışmaları için oluşturulan eşit hacimli 14 farklı kafes yapı tasarımı ABS benzeri reçine malzemeden ultraviyole (UV) ışık kaynağı kullanılarak LCD kütleme eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiştir. Buna ek olarak 4x4x4 dizilimi ve 7,5 mm birim hücre boyutu ile tasarlanan “RD, FC ve RDFC” kafes yapılar Inconel 718 metal tozu kullanılarak, toz yatağında seçici lazer ergitme yöntemiyle üretilmiştir.

Tüm yarı statik basma testleri kafes yapının %60’ı (18 mm) basılarak aynı koşullarda gerçekleştirilmiştir. Test çalışmasından kuvvet-basma verileri elde edilmiştir. Bu veriler işlenerek toplam soğurulan enerji (TSE), gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri ve elastisite modülü değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen test görselleri ile kafes yapıların %20, %40 ve %60 birim şekil değiştirme değerlerinde, ezilme davranışları karşılaştırılmıştır.

Ayrıca Inconel 718 malzemeden üretilen metal kafes yapıların LS-DYNA çoklu fizik sonlu elemanlar analiz (SEA) yazılımı kullanılarak yarı statik basma testleri ile benzetimi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda test ve SEA sayısal değerleri ve görselleri karşılaştırılarak kafes yapılarda uygulaması incelenmiştir.

Bu tez çalışmasının 2. bölümünde kuramsal teoremler ve kaynak araştırması yapılarak kafes yapıların sınıflandırılması, kafes yapı mekanik özellikleri ve parametreleri ve uygulama alanları hakkında bilgiler verilmiştir. Ayrıca eklemeli imalat yöntemi hakkında temel bilgiler verilmiştir. Kaynak araştırması ile literatürde yapılan çalışmalar incelenmektedir. Materyal ve yöntemler bölümünde, kafes yapı tasarım ve üretim çalışmaları ile kullanılan malzemeler hakkında bilgiler verilmiştir. Yarı statik basma testleri ve nümerik analiz çalışması parametreleri detaylandırılmıştır. Bulgular bölümünde ise üretilen test parçalarının üretim sonrası değerlendirmesi yapılmıştır. Test ve analiz çalışmaları sonrası elde edilen değerler karşılaştırmalı değerlendirilmektedir. Son olarak sonuç ve tartışma bölümünde tez çalışmasından elde edilen çıktıların genel bir değerlendirilmesi yapılmış ve gelecek çalışmalar için öneriler sunulmuştur.

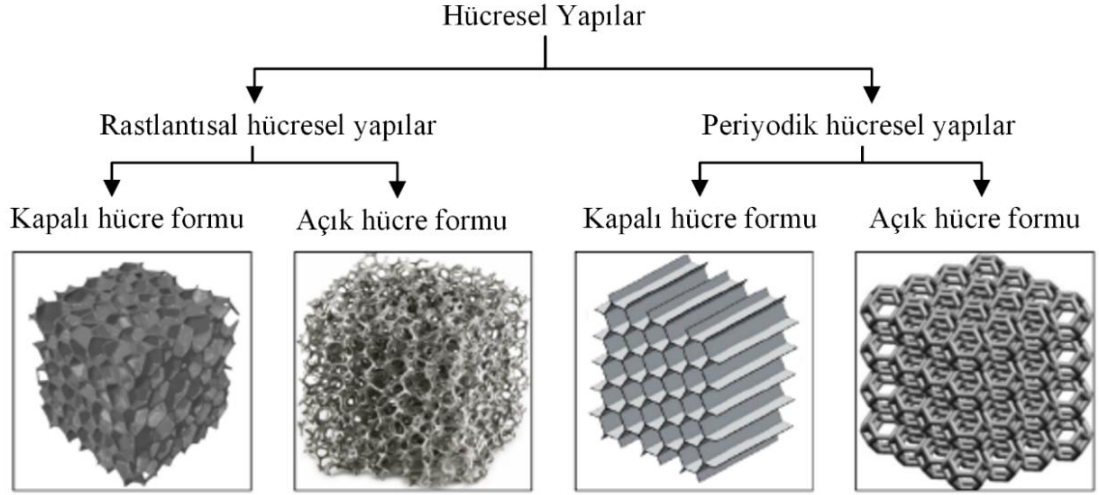
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölümde, tez çalışmasına temel oluşturan teorik bilgiler ve geçmiş dönemlerde benzer konularda yapılmış çalışmalara yer verilmiştir. Kafes yapıların sınıflandırılması, parametreleri, mekanik özellikleri ve uygulama alanları ile ilgili bilgiler verilmiştir. Eklemeli imalat yöntemleri ile ilgili temel bilgiler aktarılmıştır. Kaynak araştırması bölümünde ise hibrit kafes yapılar, yarı statik basma testleri ve bilgisayar ortamında gerçekleştirilen nümerik analizler konusunda literatürde yer alan çalışmalardan bilgiler derlenmiştir.

2.1. Kafes Yapılar

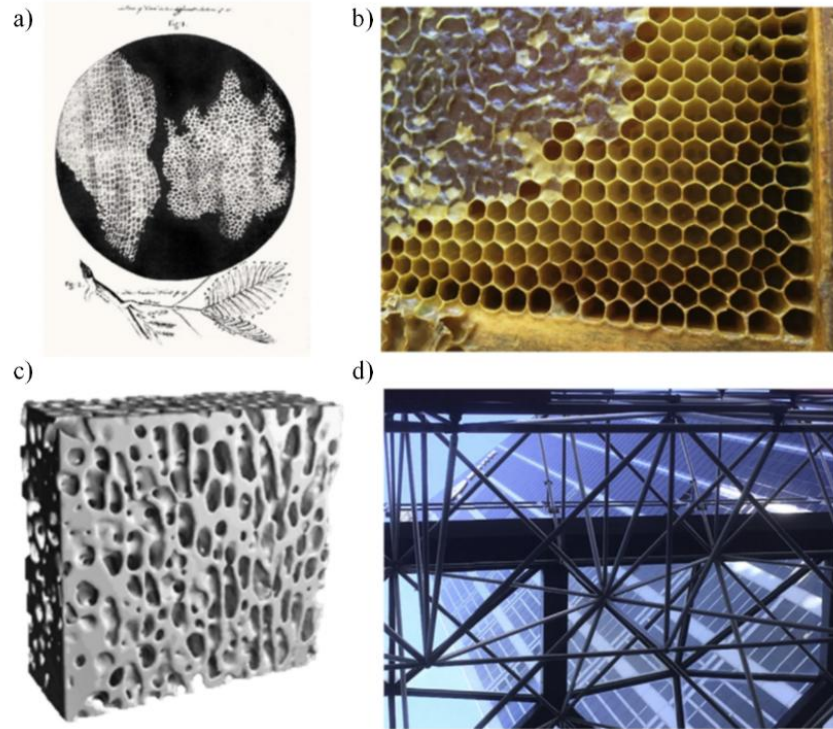
Kafes yapılar hücresel malzemelerin bir türüdür. Hücresel malzemelerin ilk gözlemi 1665 yılında Robert Hooke tarafından ölü mantar dokusu üzerinde yapılmıştır (Leary, 2020a). Hücresel yapılar gözenekli yapılar olarak adlandırılır; köpükler, petek yapılar ve kafes yapılardan oluşur (Plessis vd., 2022; Pan vd., 2020). Doğada, bal peteği, bitki gövdesi, kemik dokusu ve sünger gibi pek çok örnek yapı, hücresel malzemelerin verimli bir şekilde kullanılmasıyla meydana gelmiştir (Zheng vd., 2014). Örneğin sodyum klorür (NaCl) bileşiğinin mikro yapısı yüzey merkezli kübik (YMK) yapı özelliklerine sahip bir kafes yapı örneğidir (Yin vd., 2023). Hücresel malzemeler temelde, birim hücrelerin düzenine bağlı olarak rastlantısal (stokastik) ve periyodik yapılar olarak ikiye ayrılır. Periyodik yapılarda yapının davranışını nümerik ve analitik yöntemlerle hesaplamak daha iyi sonuçlar verirken, rastlantısal yapıların mekanik davranışını belirlemek için istatistik yaklaşımları kullanılmaktadır. Periyodik ve rastlantısal yapılar ise kendi içinde kapalı ve açık hücresel yapılar olarak ikiye ayrılır (Borikar vd., 2023; Park vd., 2022). Hücresel yapılara ait temel sınıflandırma Şekil 2.1’de verilmiştir.

Kafes yapılar, doğada bulunan yapılardan esinlenerek tasarlanan insan yapımı yapılar olup, sağlık, biyomühendislik ve spor gibi sektörlerde için giderek artış gösteren uygulama alanı bulmaktadır. Mühendislik dallarında ise hafif yapıların tasarlanması, enerji soğurma, filtreleme, ısı yönetimi, titreşim sönümleme, ses yalıtımı, gürültü azaltma ve ses soğurma gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır (Ashby, 2006; Zheng vd., 2014). Kafes yapılar diğer hücresel malzemelerle karşılaştırıldığında daha iyi mekanik özellikler gösterir (Dong vd., 2017).



Şekil 2.1. Hücresel yapıların sınıflandırılması (Park vd., 2022)

Kafes yapılar mikro boyutlardan makro boyutlara kadar çeşitlilik gösterir (Şekil 2.2). Bu yapıların temel amacı mümkün olan minimum malzeme ile en dayanıklı yapıyı oluşturabilmektir. Ek olarak, kafes yapılar, ayarlanabilir mekanik özellikleri sayesinde mühendislere esneklik sağlayarak ideale yakın yapıların oluşturulmasına olanak verir (Ashby, 2006).



Şekil 2.2. Örnek kafes yapılar; a) gözlemlenen ilk hücre b) bal peteği yapısı c) kemik dokusu d) uzay kafes yapı (Leary, 2020a)

2.1.1. Kafes yapıların sınıflandırılması

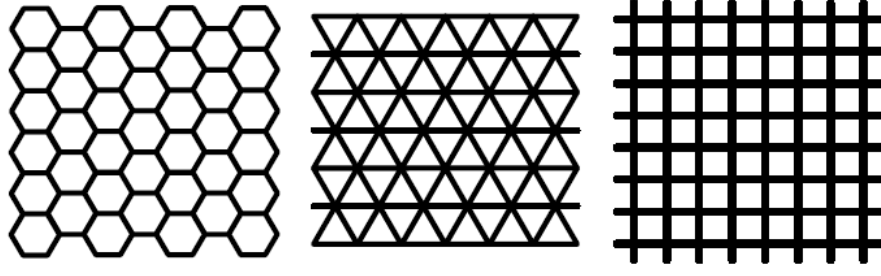
Kafes yapılar, tasarlanmış bir birim hücrenin üç boyutlu uzayda kontrollü bir şekilde tekrarlanmasıyla oluşan gözenekli yapılardır (Riva vd., 2021). Bu yapıların farklı sınıflandırma yöntemleri vardır. Üç boyutlu (3B) ve iki boyutlu (2B) kafes yapılar, üniform ve derecelendirilmiş kafes yapılar ve çoklu malzemeli kafes yapılar gibi sınıflandırılabilir. 2B ve 3B birim kafes hücre sınıflandırması Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Birim kafes hücre çeşitleri (Yin vd., 2023)

2B kafes hücre	3B kafes hücre
Genel 2 boyutlu birim kafes hücre	Kiriş temelli birim kafes hücre
	İçi boş kiriş birim kafes hücre
Ökzetik birim kafes hücre	Üçlü periyodik minimum yüzey (ÜPMY)- Kabuk tabanlı birim kafes hücre
	Plaka temelli birim kafes hücre

2B kafes yapılar

İki boyutlu kafes yapıların en bilineni bal peteği yapısıdır. Bu yapılar uzun yıllardan beri mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır. Ekstrüzyon imalat yöntemleri ile üretimi kolayca yapılabilen bu yapılar, düşük ağırlıklarına rağmen yüksek dayanımlarından dolayı havacılık, otomotiv, mimarlık, spor ve sağlık gibi sektörlerde kullanılmaktadır. Bal peteği yapısının dışında, Şekil 2.3’te geometrik şekle göre adlandırılan üçgen, dörtgen, kagome, elmas, dairesel ve sekizgen gibi 2B kafes yapılar bulunmaktadır (Yin vd., 2023).

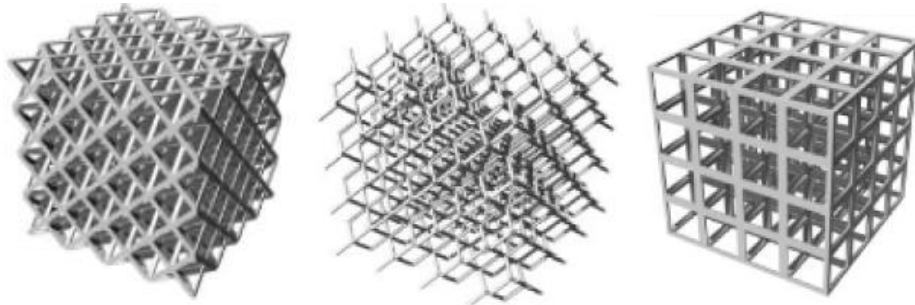


Şekil 2.3. 2B örnek kafes yapılar, a) bal peteği b) üçgen c) kare (Yin vd., 2023)

3B kafes yapılar

Üç boyutlu kafes yapılar, belirlenmiş bir hacim içerisinde oluşturulan yapılar olup, farklı konfigürasyonlarda olabilir. 3B kafes yapılar, kiriş temelli, içi boş kiriş temelli, plaka kafes yapı, üçlü periyodik minimum yüzeyler (ÜPMY-TPMS) ve hiyerarşik kafes yapılar olarak sınıflandırılabilir.

Kiriş ve içi boş kiriş temelli kafes yapılar, hacim içerisinde yer alan kiriş ve bu kirişlerin birbirlerine bağlandığı düğüm noktalarının birleşmesi sonucunda ortaya çıkan birim hücrelerin, periyodik bir şekilde çoğaltılmasıyla oluşturulur. Kirişler iki düğümü bir araya getirirken, bir düğüm noktasında iki veya daha fazla kiriş birleşebilir (Borikar vd., 2023). Kiriş boyutlarının, yönlerinin ve hacimlerin değiştirilmesi ile çeşitli kafes yapılar elde edilebilir. Bu tasarım esnekliği mekanik özelliklerin ayarlanabilir olmasına olanak verir. Kiriş temelli kafes yapıların en bilinenleri, gövde merkezli kübik (GMK-BCC), hacim merkezli kübik (HMK-FCC), basit kübik (BK- SC), düzgün sekizyüzlü (octet), elmas (diamond), eşkenar dörtgensel on iki yüzlü (rhombic dodecahedron), iso truss, kelvin hücresi ve ökzetik 3B kafes yapılar olarak belirtilebilir (Şekil 2.4). Bu yapıları meydana getiren kirişlerin içinin boşaltılması ile oluşturulan yapılar ise, aynı isimle anılarak içi boş kiriş temelli kafes yapılar olarak adlandırılır.



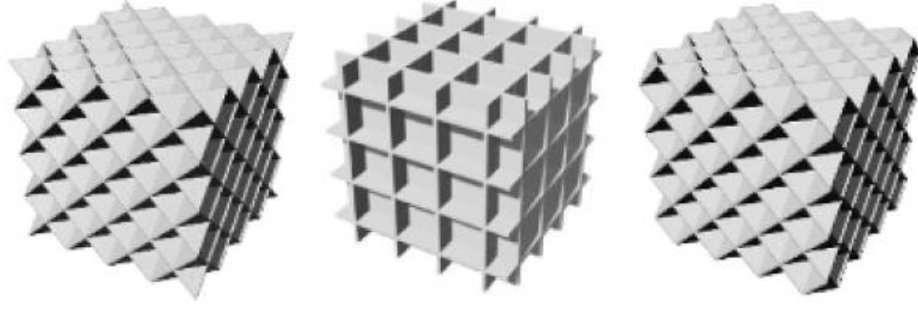
Şekil 2.4. 3B kiriş kafes yapılar, a) sekizli b) elmas c) kübik (Yin vd., 2023)

Üçlü periyodik minimum yüzey (ÜPMY-TPMS) veya diğer adıyla kabuk tabanlı kafes yapılar; minimal yüzeyler, yüzeyin herhangi bir noktasında ortalama eğriliği sıfır olan bir membran yapısını tanımlar. Bu membran yapıları, dış yükleri taşımada yüksek verime sahip sabun köpüğü (soap film) yapılarına benzer. Minimal yüzeylerin alt gruplarından birisi ise, bir hacmi üç yönde de sürekli olarak doldurabilen Üçlü periyodik minimum yüzeydir (ÜPMY-TPMS) (Leary, 2020a). ÜPMY yapıların en büyük avantajı, yük altında yüksek deformasyona dayanıklı olmalarıdır. Bu özellikleri sayesinde, kontrollü ve tahmin edilebilir bir ezilme mekanizması gösterirler. Tıpkı 3B kiriş temelli kafes yapılarda olduğu gibi, bu yapıların da mekanik davranışları kullanıldığı bölgeye göre ayarlanabilir durumdadır (Novak vd., 2023). Eklemeli imalat yöntemlerinin gelişmesiyle birlikte ÜPMY kafes yapılar doku mühendisliği, implantlar ve ısı değişiriciler gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Borikar vd., 2023). En bilinen kabuk tabanlı kafes yapılar, girodial (gyroid), schwarz diamond, primitiv, IWP (GMK-BCC) ve FRD (FCC-HMK) kafes yapılarıdır. Örnek kafes yapılar Şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.5. ÜPMY kafes yapılar, a) girodial b) primitiv c) diamond (Yin vd., 2023)

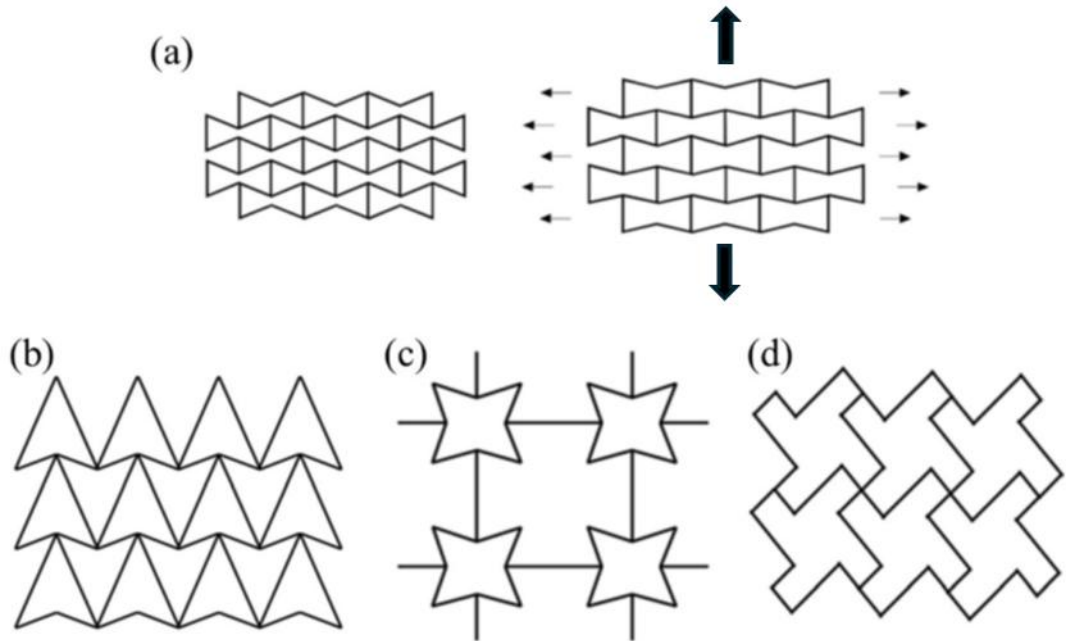
Plaka temelli kafes yapılar, adından da anlaşılacağı üzere plakaların belirli bir hacim içerisinde farklı yönlerde dizilmesiyle elde edilir. Bu yapıların, kiriş temelli ve kabuk temelli kafes yapılara göre en önemli özelliği yüksek dayanımı ve mükemmel enerji soğurma karakteristiğidir. Bunun yanında, diğer yapılara nazaran yüksek deformasyonlara uygun değildir. Literatürde en çok karşılaşılan plaka temelli kafes yapılar, basit kübik (BS- SC), gövde merkezli kübik (GMK- BCC), hacim merkezli kübik (HMK- FCC), düzgün sekizyüzlü (octet), kelvin hücresi ve çoklu prizma olarak adlandırılan yapılardır (J. Wu vd., 2023; Yin vd., 2023). Örnek plaka temelli kafes yapılar Şekil 2.6'da verilmiştir.



Şekil 2.6. 3B plaka kafes yapılar, a) sekizli b) basit kübik c) HMK (Yin vd., 2023)

Ökzetik kafes yapılar

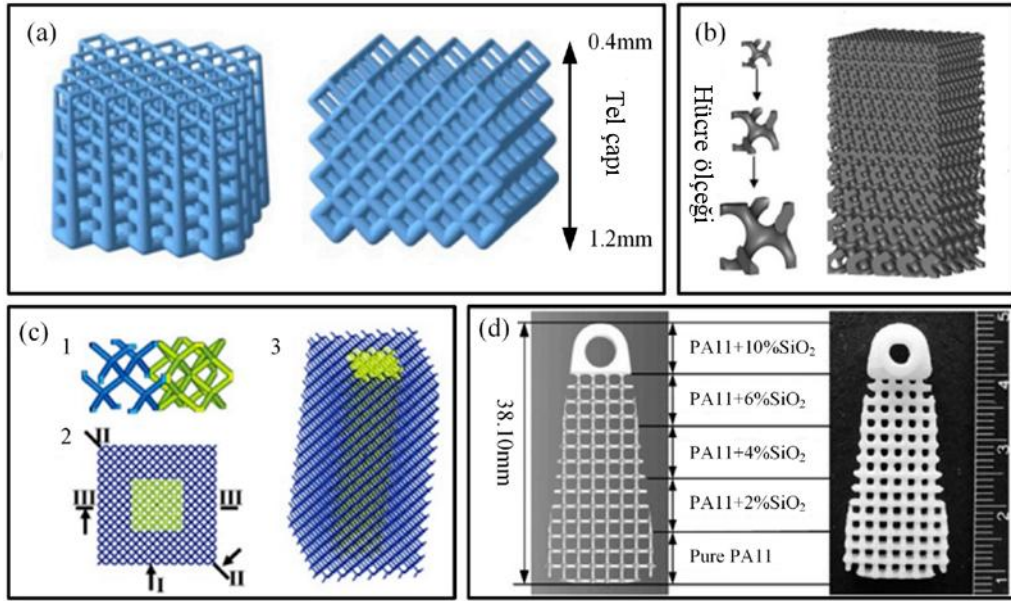
Ökzetik kafes yapılar diğer yapılardan farklı olarak, çekme yükü altında genişlerken basma yükü altında ise daralmaktadır. Ökzetik yapıların diğer bir tanımı ise negatif poisson oranlı yapılardır. Çoğunlukla 2B yapılar olarak tasarlanırken, 3B yapılar da son yıllarda araştırma konusu olarak dikkat çekmektedir. Ökzetik yapılar, yüksek kırılma tokluğu, yüksek enerji soğurma kabiliyeti ve çentik dirençlerinden dolayı tercih edilmektedir (Y. Wu vd., 2023; Xue vd., 2023). En çok bilinen ökzetik yapılar ise girintili altıgen (re-entrant hexagon) yapı (Şekil 2.7 (a)), çift ok ucu şekilli (double arrowhead) yapı (Şekil 2.7(b)), yıldız şekilli (star shaped) yapı (Şekil 2.7(c)) ve eksik destekli (missing rib) yapı (Şekil 2.7(d)) olarak belirtilebilir.



Şekil 2.7. Örnek 2B ökzetik yapılar (Xue vd., 2023)

Gradyan kafes yapılar

Gradyan kafes yapılar, birim hücre boyutlarının değişkenlik gösterdiği ya da hücreyi oluşturan kirişlerin veya levhaların değişken ölçülerde tasarlanmasıyla elde edilir. Bu yapılar tıpkı doğada bulunan yapılarda olduğu gibi bölgesel olarak yoğunluklarının ya da ölçülerinin değişkenlik gösterdiği bir tasarıma sahiptir. Gradyan kafes yapıların, üniform kafes yapılardan en önemli farkı, yük altında bir sonraki katmana göre daha dayanıksız olan katmanın ilk olarak şekil değiştirmesi gösterilebilir. Katmanlardaki yoğunluk değişiklikleri sayesinde ise her bir katman için farklı dayanım özellikleri gösterir (Korkmaz vd., 2022; Seharing vd., 2020). Dört farklı gradyan kafes yapı tasarım metodolojisi vardır. Bunlar; birim hücrelerin tel çaplarının değişkenliği (Şekil 2.8(a)) farklı ölçeklerde birim hücrelerin kullanılması (Şekil 2.8(b)), farklı tip birim hücrelerin kullanılması (Şekil 2.8(c)) ve farklı malzemelerin kullanılarak oluşturulduğu kafes yapılarıdır (Şekil 2.8(d)) (Bai vd., 2020).

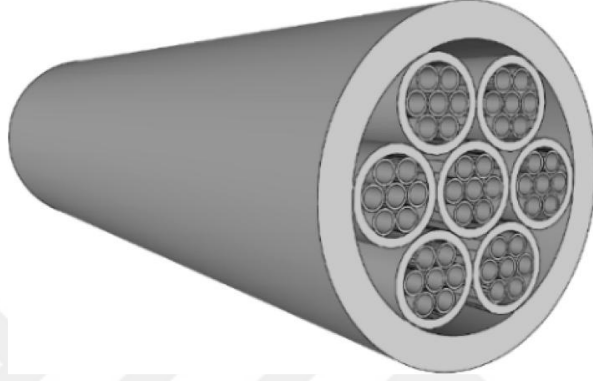


Şekil 2.8. Örnek gradyan kafes yapılar (Bai vd., 2020)

Hiyerarşik kafes yapılar

Hiyerarşik kafes yapılar, küçük boyutlu birim hücrelerin daha büyük boyuttaki bir birim hücre içine yerleştirilmesi prensibine dayanır. Buradan anlaşılacağı üzere, büyük ölçekli birim kafes hücrenin kiriş veya plakası, daha küçük ölçekli birim hücrelerden oluşmuştur. Hiyerarşik kafes yapılarda önemli bir parametre, yapının hiyerarşik düzenleme

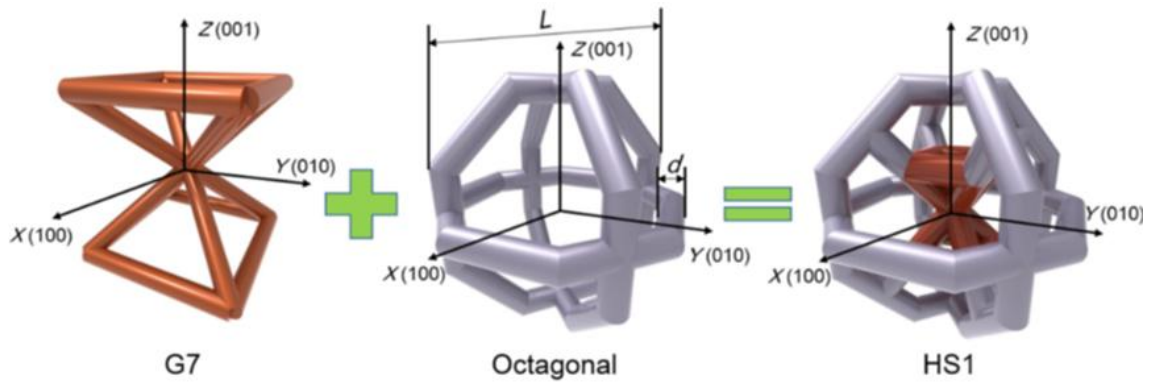
derecesidir. Doğada hiyerarşik kafes yapılara pek çok örnek gösterilebilir. Bunlar; Euplectella sünger, kemik dokusu ve kas hücresi olarak belirtilebilir. Hiyerarşik kafes yapılar hem 2B hem de 3B kafes yapılarda uygulanabilir. Bu tasarım prensibi sayesinde mekanik özellikleri ve davranışı ayarlanabilir kafes yapılar elde edilerek daha hafif ve verimli kafes yapıların elde edilmesi sağlanır (Al Nashar & Sutradhar, 2021; Meza vd., 2015; Tsang vd., 2019; Zheng vd., 2016).



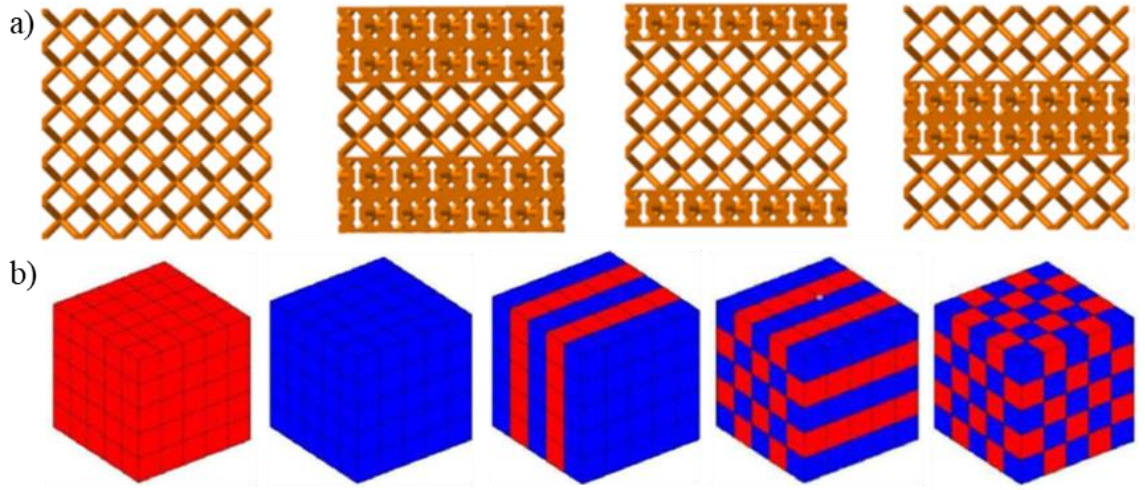
Şekil 2.9. 2B hiyerarşik kafes yapı örneği (Tsang vd., 2019)

Hibrit kafes yapılar

Hibrit tasarım, farklı yapıların üstün özelliklerini birleştirerek daha üstün özelliklere sahip bir tasarım stratejisidir (L. B. Li vd., 2023). Bu strateji kafes yapılara da uygulanabilir. Hibrit kafes yapılar, Şekil 2.10 ve Şekil 2.11’de verildiği gibi farklı malzemelerin tek bir yapıda kullanılması, iki veya daha fazla birim kafes hücrenin birleştirilerek tek bir yapının tasarlanması, iki veya daha fazla birim hücrenin düzenli veya rastgele bir hacim içerisine yerleştirilmesi sonucunda elde edilerek oluşturulur (L. Li vd., 2022; Yang vd., 2023).



Şekil 2.10. Birim hücrelerden oluşturulan hibrit birim hücre (L. Li vd., 2022)



Şekil 2.11. Farklı birim hücre dizilimine örnek hibrit kafes yapılar, a) Yang vd. (2023), b) Syrlybayev vd. (2023)

2.1.2. Kafes yapı parametreleri ve mekanik özellikler

Kafes yapılar hem topolojiye hem de malzemeye bağlı olarak değişen özellikler gösterir. Diğer yandan bu çalışmada belirtilen kafes yapılar, mühendislikte uzun zamandır bilinen ve büyük yapıların inşasında kullanılan kafes yapılardan farklı olarak küçük ölçekte olmaları sebebiyle doğrudan bir yapıdan ziyade kafes malzemeler olarak da değerlendirilebilir. Ashby (2006), bu yapılar üzerinde etkili üç değişkeni aşağıdaki gibi açıklamaktadır.

- Kafes yapının üretildiği malzeme ve özellikleri,
- Kafes yapıyı oluşturan yüzey ya da kiriş elemanların şekilleri (topolojileri) ve bu elemanların birbiriyle bağlantısı (düğüm noktaları)
- Kafes yapının bağıl yoğunluğu

Kafes yapının bağıl yoğunluğu, kafes yoğunluğunun bu yapının üretildiği malzemenin yoğunluğuna oranıdır. Diğer bir deyişle, kafes yapıyı oluşturmak için kullanılan malzeme hacminin, kafes yapı hacmine oranı olarak tanımlanabilir (Ashby, 2006). Bağıl yoğunluk (ρ^*) Denklem (2.1'de verilmiştir.

$$\rho^* = \rho/\rho_s = V_s/V \quad (2.1)$$

Burada ρ kafes yapı yoğunluğu, ρ_s katı malzeme yoğunluğu olup V kafes hacmi, V_s ise katı malzeme hacmidir.

Kafes yapılar yükleme altında oluşan iç yüklere göre eğilme baskın (bending dominated) veya gerinme baskın (stretching dominated) yapılar olarak ikiye ayrılırlar. Bu sayede yapıların yük altında deformasyon ve hata modları için tahminler yapılabilir. Kiriş temelli kafes yapıların bu sınıflandırılmasında Maxwell kararlılık kriteri kullanılır. Ayrıca Gibson-Ashby modeli ile kafes yoğunluğu, ana malzemenin mekanik özellikleri ve yükleme altındaki davranışına göre kafes yapının mekanik özellikleri hakkında öngörü yapmak mümkündür (Leary, 2020a). Burada öncelikle Maxwell kararlılık kriteri açıklandıktan sonra, kafes yapıların yükleme altındaki davranışına göre yapılan sınıflandırmaya ait yaklaşımlar aşağıda karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

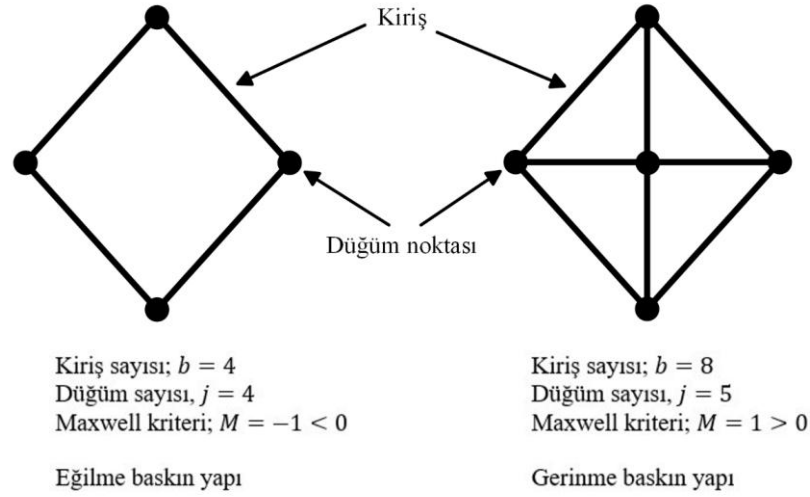
Maxwell kararlılık kriteri

Maxwell, kiriş temelli kafes yapılarda, kafesi oluşturan kirişler ve bağlantı noktalarını (düğüm noktaları) kullanarak bu yapıların yük altındaki davranışı ve kararlılığının belirlenebileceği bir dizi matematiksel denklem önermiştir. 2B ve 3B yapılar için bu denklemler aşağıda belirtilmiştir (Leary, 2020a).

$$2B \text{ yapılar, } M = b - 2j + 3 \quad (2.2)$$

$$3B \text{ yapılar, } M = b - 3j + 6 \quad (2.3)$$

Denklemlerde b yapıda bulunan kirişlerin sayısını ifade ederken, j ise kirişleri birbirine bağlayan düğüm noktalarının sayısını göstermektedir. Burada M ile yapının bir mekanizma olup olmadığı yani birden fazla serbestlik derecesi olup olmadığına karar verilir (Ashby, 2006; Deshpande vd., 2001). $M < 0$ olduğunda kafes yapı, en az bir serbestlik derecesine bağlı bir mekanizma gibi davranır ve eğilme baskın yapı olarak sınıflandırılır. $M \geq 0$ olduğunda ise dış yüklerin altında yapıyı oluşturan kirişlerde çekme ve basma kuvvetlerinin etkisiyle iç gerilmeler oluşur. Bu yapılar gerinme baskın yapılar olarak adlandırılır (Leary, 2020a).



Şekil 2.12. Eğilme ve gerinme baskın yapı örnekleri (Leary, 2020a)

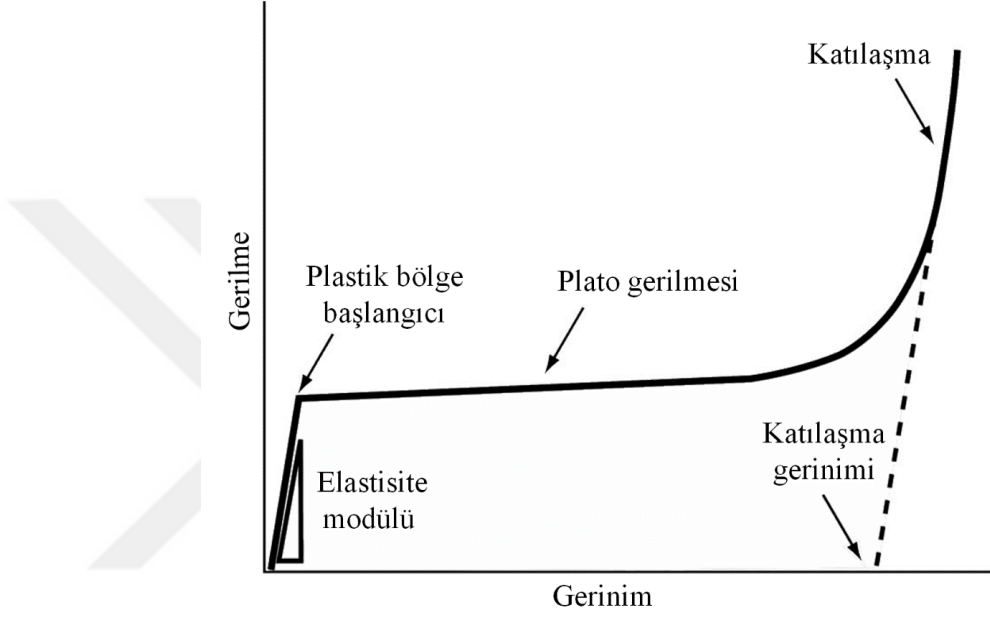
Eğilme baskın ve gerinme baskın yapıların karakteristik özellikleri

Bir kafes yapının mekanik davranışı büyük ölçüde yapının yükleme tipine bağlıdır. Eğilme baskın bir kafes yapı için bası yükü altında yeteri kadar rijitlik sağlayacak elemanlar olmadığı için yapıyı oluşturan elemanlar eğilmeye maruz kalır ve yapı bir mekanizma gibi davranır. Gerinme baskın yapılarda ise, kafes yapı yeterince rijit olduğu için yüksek iç gerilmeler oluşur ve yapıyı oluşturan elemanlar çeki ve bası yönünde çalışır (Ashby, 2006; Leary, 2020a).

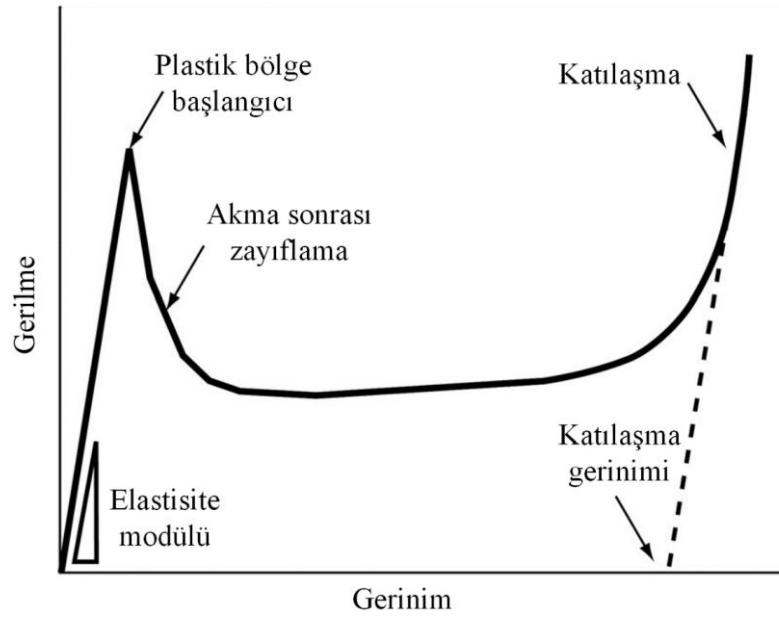
Eğilme baskın bir yapının yük altında karakteristik gerilim-gerinim eğrisi Şekil 2.13 ile verilmiştir. Yapı belli bir deformasyon değerine kadar elastik davranış gösterir. Bu bölge geçildikten sonra yapıya yük uygulanmaya devam edilirse, malzeme akma değeri aşıldıktan sonra elastik-plastik bölge olarak adlandırılan bölgede doğrusal olmayan davranış gösterir. Sonrasında kafes yapıyı oluşturan elemanlar dış kuvvetin etkisiyle birbirine temas edinceye kadar ezilme gerçekleşir, bu bölgede gerilme hızlı artış göstermez. Kafes yapı elemanları birbirine temas ederek ezilme hızı azaldığında katılma bölgesi olarak adlandırılan bölge görülür ve burada gerilmeler çok yüksek değerlere çıkmaktadır.

Gerinme baskın bir kafes yapıda ise kuvvetin etkisiyle, yapıyı oluşturan elemanlar çeki-bası yüklerine maruz kalırlar. Bu tip yapılarda elastik bölge aşıldıkça gerilme değerleri artar ve en yüksek noktasına ulaşır. Sonrasında gerilme hızlı bir şekilde düşmeye

başlar, bu bölgede lineer olmayan davranış görülür ve yük kaldırılırsa yapı deformasyona uğramış şekilde kalır. Basma yükü etkimeye devam edilirse, gerilme değerlerinin değişim hızı düşer ve yapı ezilmeye devam eder. Eğilme baskın yapılarda olduğu gibi kafes yapıyı oluşturan elemanların birbirine temas etmesinden dolayı ezilmenin yavaşladığı bölgede katılaşma denilen bölge başlar ve gerilme değerleri çok hızlı bir şekilde artış gösterir (Şekil 2.14).

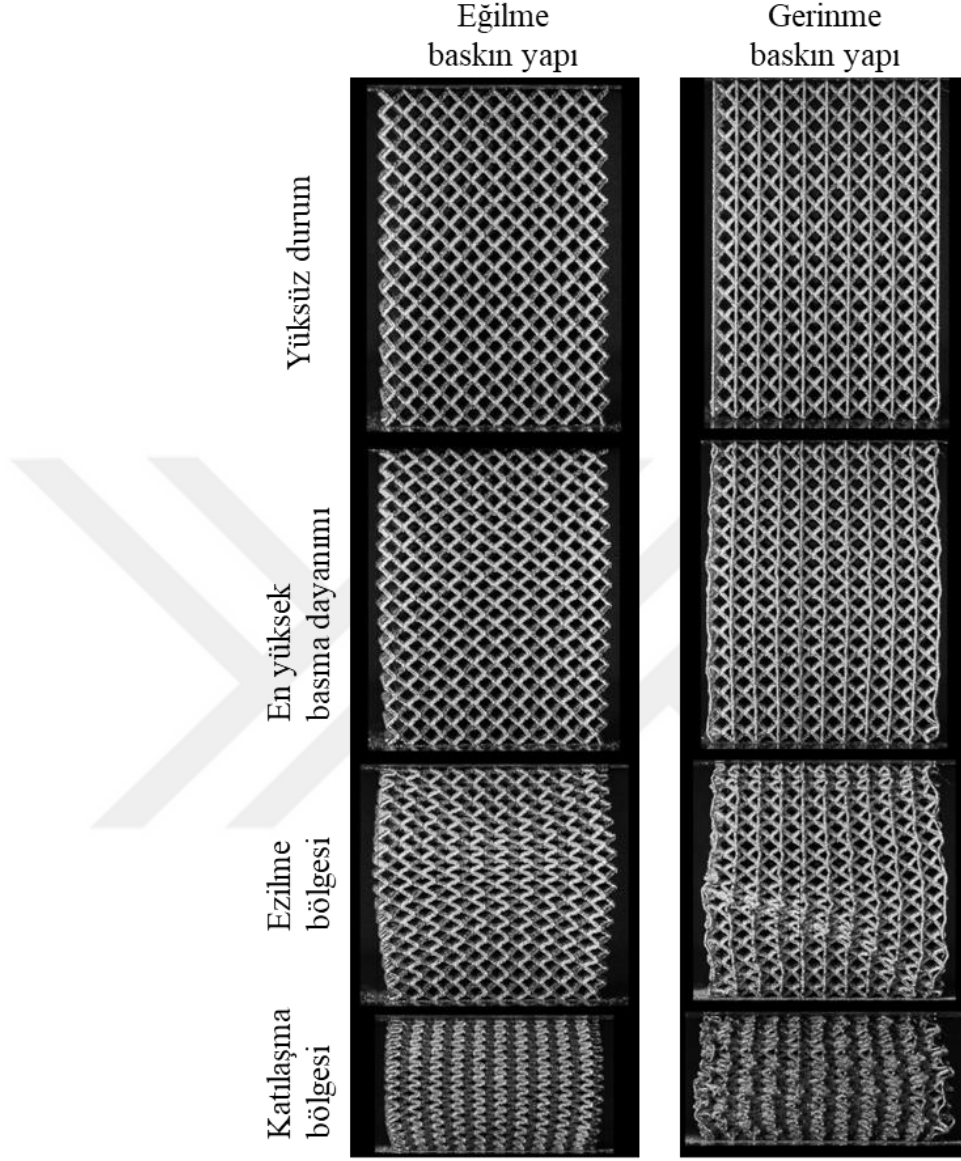


Şekil 2.13. Eğilme baskın yapı karakteristik gerilme-gerinim eğrisi (Ashby, 2006)



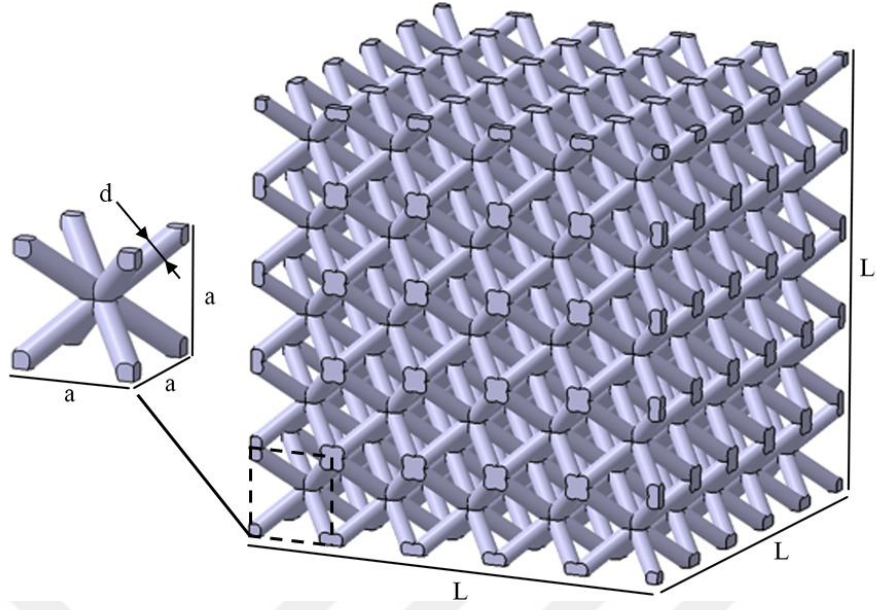
Şekil 2.14. Gerilme baskın yapı karakteristik gerilme-gerinim eğrisi (Ashby, 2006)

Eğilme baskın ve gerinme baskın kafes yapıların basma yükü altında hasar ilerleme karakteristikleri Şekil 2.15 ile gösterilmektedir.



Şekil 2.15. Eğilme ve gerinme baskın yapı karakteristیک hasar ilerlemesi (Leary, 2020a)

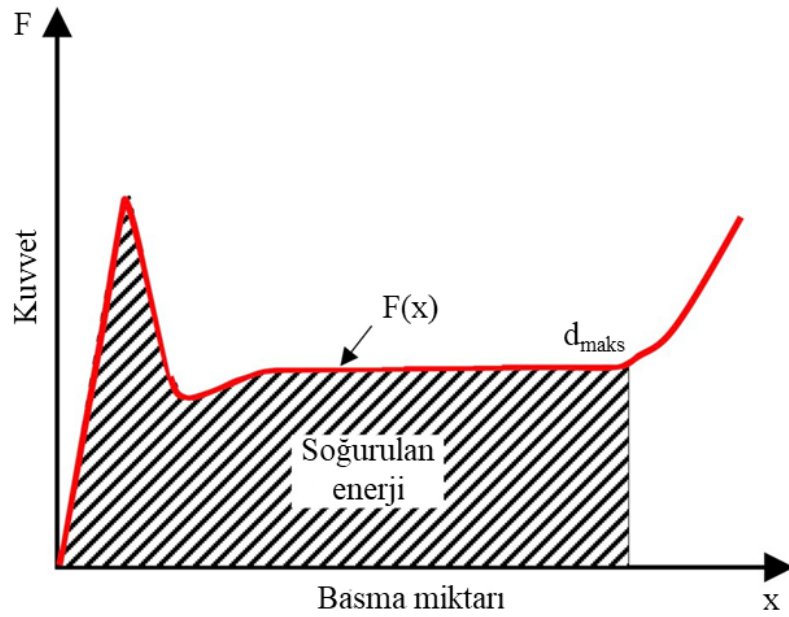
Gövde merkezli kübik (GMK) birim kafes hücre ve 5x5x5 konfigürasyonunda tasarlanan kafes yapının temel özellikleri Şekil 2.16’da gösterilmektedir. Burada “a” birim kafes hücrenin dıştan dışa bir kenarının uzunluğu, “L” kafes yapının dıştan dışa bir kenarının uzunluğu ve “d” ise birim kafes hücreyi oluşturan kirişin çapıdır. Kafes yapı kübik olarak tasarlandığı için tüm kenarlar eşittir ve üniform kafes tasarımı olmasından dolayı kiriş çapları da eşittir. Ancak bu yapıların birim hücre ölçülerinde, dış ölçülerinde ve kiriş kesitlerinde değişken ölçü veya şekiller olabilmektedir.



Şekil 2.16. 5x5x5 konfigürasyonunda GMK Kafes Yapı

Kafes yapılar da enerji soğurma

Kafes yapıların basma yükleri altında enerji soğurma özellikleri, Şekil 2.17 ile verilen grafikten anlaşılacağı üzere, yapıyı deforme eden kuvvet ve gerçekleşen ezilme miktarı ile oluşturulan kuvvet-basma grafiğinin altında kalan alanın hesaplanması ile belirlenebilir. Buradan hareketle toplam soğurulan enerji (TSE), özgül soğurulan enerji (ÖSE) nicelikleri aşağıdaki denklemler ile elde edilir.



Şekil 2.17. Enerji soğurma özellikleri (Ha & Lu, 2020)

Toplam soğurulan enerji (TSE);

$$TSE = \int_0^{d_{maks}} F(x)dx \quad (2.4)$$

Burada x değeri basma miktarı olup, F(x) kafes yapıya basma yükü ettiği durumunda ezilme miktarına karşılık gelen kuvvet değeridir. d_{maks} değeri ise katılaşma bölgesinin başladığı ezilme miktarıdır.

Özgül soğurulan enerji (ÖSE) ise toplam soğurulan enerji miktarının kütleyle bölünmesi ile elde edilir. Aşağıdaki denklemde verilen m değeri, yapının kütlesidir.

$$\text{ÖSE} = \frac{TSE}{m} \quad (2.5)$$

2.1.3. Uygulama alanları

Kafes yapılar düşük ağırlık özellikleri ve yüksek enerji soğurma kabiliyetleri, yüksek dayanımları ve rijitlikleri, ayarlanabilir mekanik özelliklerinin yanında karmaşık yapılarda üretilebildikleri için pek çok uygulamada iyi bir seçimdir (Ali vd., 2022). Kafes yapı uygulama alanları ve tercih edilen özellikleri Çizelge 2.2’de verilmiştir.

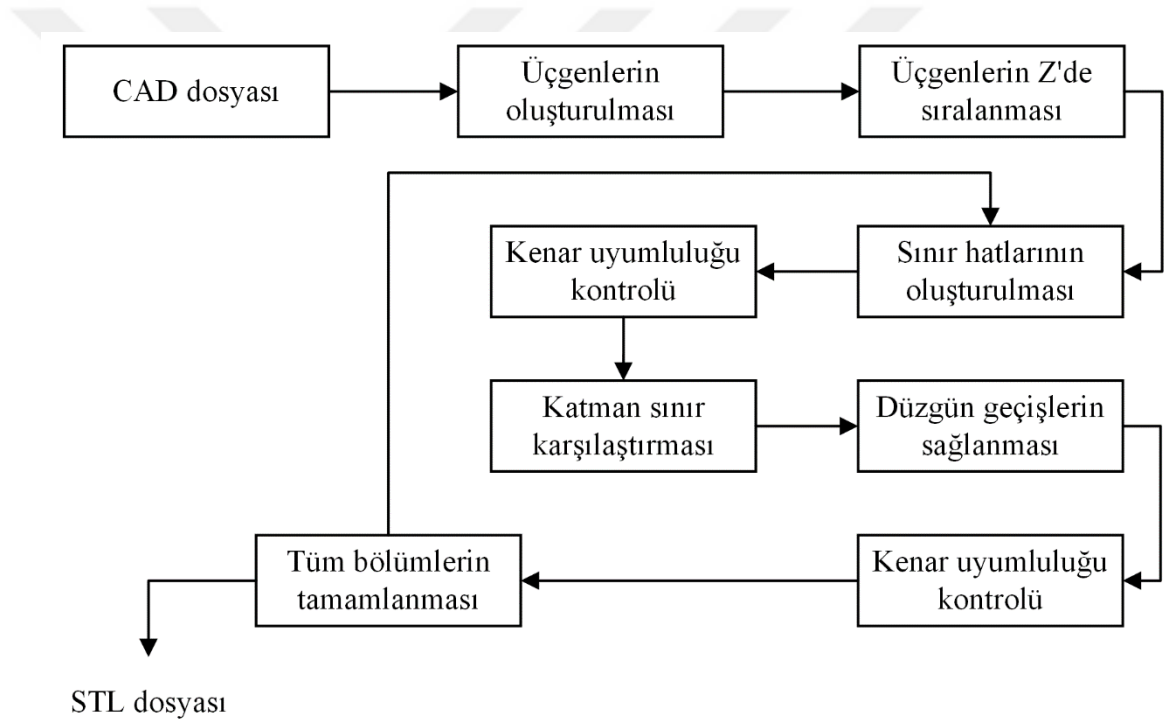
Kafes yapılar otomotivde ve havacılıkta hafif yapıların tasarlanması, ses yalıtımı, şok ve titreşim sönümleme, ısı değiştiricilerin performansını artırma, ısı yalıtımı amacıyla kullanılırlar. Sağlık sektöründe ise kişiye özel implantların tasarlanmasını sağlarlar (Ali vd., 2022; Korkmaz vd., 2022; Yin vd., 2023). Moon vd. (2014) yaptıkları çalışmada 3 farklı kafes yapıyı insansız hava aracı kanat profiline içine yerleştirerek bu yapıların karşılaştırması üzerine çalışma yapmışlardır. İzotropik düzgün sekiz yüzlü (octet truss) kafes yapı kullanarak medikal implant tasarım çalışması gerçekleştiren Feng vd. (2021), anizotropi kontrol çalışmaları ile mekanik özellikleri ayarlanabilir yapılar üzerine yaklaşım gerçekleştirmişlerdir. C. Y. Wang vd. (2018) çalışmalarında kare kesitli bir profil içine 3B negatif poisson oranına sahip kafes yapı tasarımını ekleyerek otomotiv sektörü için çarpışma kutusu (crash box) tasarımı yapmışlardır.

Çizelge 2.2. Kafes yapıların kullanım alanları ve özellikleri (Plessis vd., 2022)

Uygulama alanı	Özellik
Hafif yapılar	• Yüksek rijitlik • Yüksek dayanım
Biyomedikal implantlar	• Kontrol edilebilir mekanik özellikleri sayesinde kemiğe uyumlu yapının geliştirilebilmesi • Uygun gözenek yapısı ve geniş yüzey alanı
Çarpışmaya dayanıklılık Paketleme Şok sönümlenme	• Yüksek enerji soğurma kabiliyeti
Titreşim kontrolü	• Yüksek sönümlenme faktörü
Elektrotlar ve katalizörler	• Yüksek alan/hacim oranı
Isı yalıtımı	• Düşük ısı iletkenliği • Düşük özgül ısı
Isı değiştiriciler	• Yüksek ısıl yayılım • Düşük ısıl genleşme
Isı atımı	• Yüksek ısı atımı • Düşük termal direnç
Filtrasyon	• Yüksek gözenek boyutunun kontrol edilebilmesi • Gözenekler arası bağlantının kontrol edilebilmesi
Ses yalıtımı	• Yüksek ses yalıtım kabiliyeti

2.2. Eklemeli İmalat

Eklemeli imalatın (Eİ) temellerini oluşturan hızlı prototipleme ilk olarak 1980’lerde model ve prototip parçalar oluşturmak amacıyla kullanılmıştır (Wong & Hernandez, 2012). Günümüzde ise, üç boyutlu yazdırma teknolojisi ile sürekli gelişmekte olup geniş bir kullanım yelpazesine sahiptir. Eİ teknolojisinde, temel olarak bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımları kullanılarak tasarım dosyası oluşturulur. Sonrasında katman bilgilerinin oluşturulmasını sağlayan küçük üçgen parçalara bölünerek stereolitografi (STL) dosya formatına dönüştürülür (Şekil 2.18). Yazdırma işlemi öncesinde dilimleme yazılımları kullanılarak her bir katmanın detayı 3B yazıcıya aktarılır ve yazdırma işlemi gerçekleştirilir (Rasiya vd., 2020).

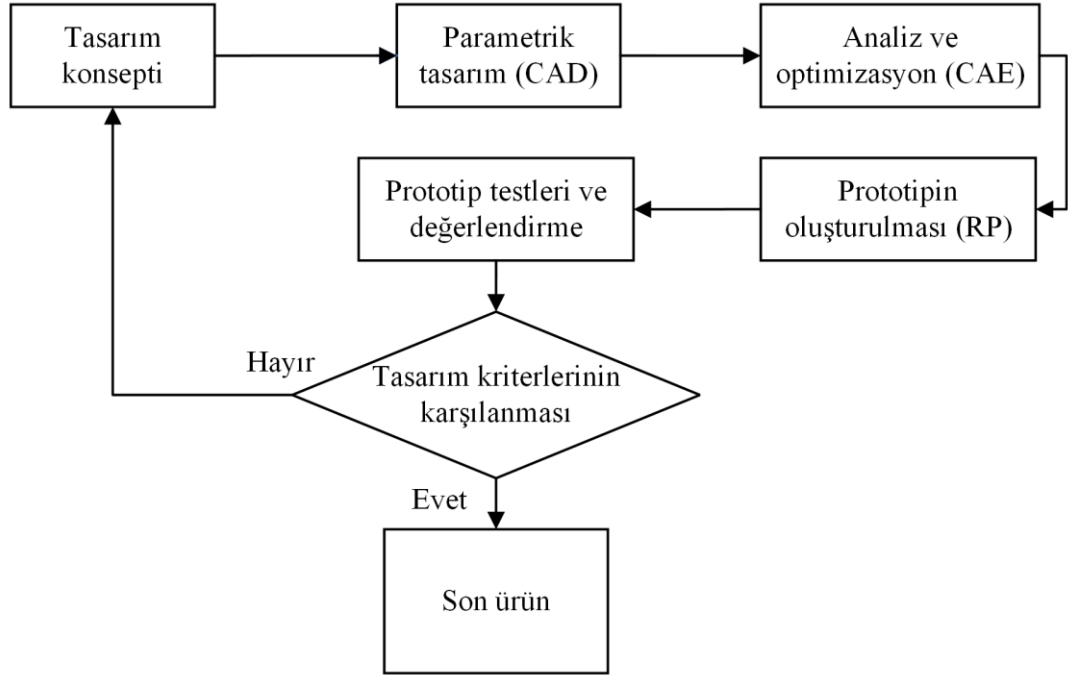


Şekil 2.18. STL dosyası oluşturma adımları (Rasiya vd., 2020)

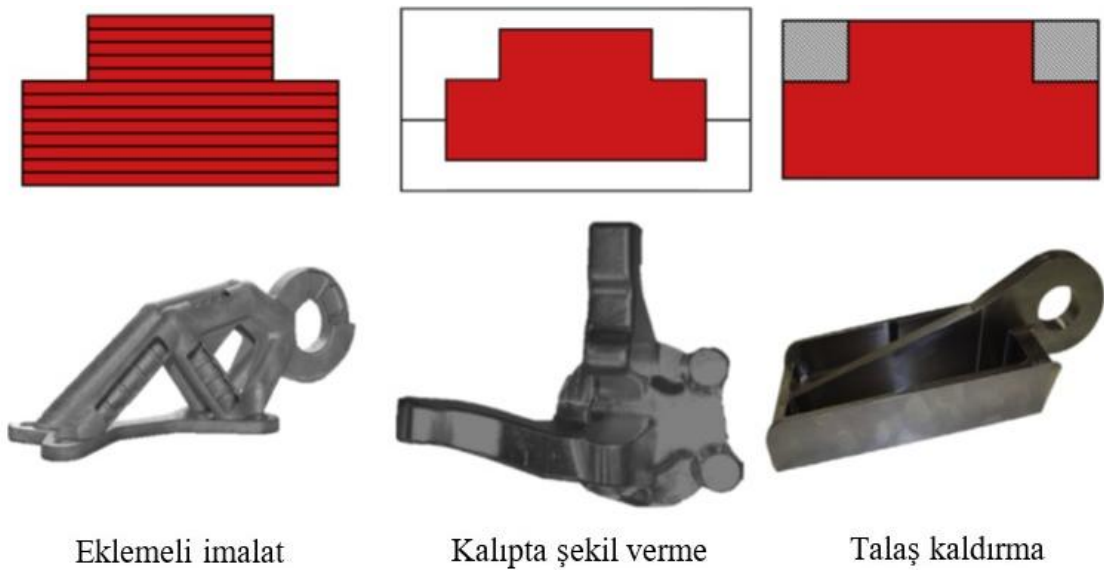
Eklemeli imalat yöntemleri ile üretilen bir parçaya ait ürün geliştirme döngüsü Şekil 2.19’da verilmiştir. Eİ, Şekil 2.20 ile şematik olarak verilen diğer imalat yöntemlerinden temel olarak farklı olup, ham malzemeden, malzeme çıkarmak yerine katı, eriyik ya da toz malzemeyi katmanlar halinde ekleyerek ürüne dönüştürülmesine olanak verir. Eklemeli imalat yöntemlerinin geleneksel yöntemlere göre güçlü ve zayıf yönleri aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır (Korkmaz vd., 2022; Leary, 2020b).

Güçlü yönler;

- Kompleks geometriye sahip ve üretimi geleneksel yöntemlerle zor olan parçaların kolaylıkla ve düşük maliyetlerle üretilmesine olanak sağlar. Çok küçük boyutlarda parçalar dahil olmak üzere karmaşık geometrideki parçaların ek maliyet gerektirmeden üretilmesini sağlar.



Şekil 2.19. Ürün geliştirme döngüsü (Wong & Hernandez, 2012)



Şekil 2.20. Temel üretim yöntemleri (Leary, 2020b)

- Üretim esnekliği sayesinde parça tasarımlarına dahil edilen kafes yapılar ile dayanıklı ve hafif parçaların üretilmesini kolaylaştırır. 3B yazdırma teknolojisindeki gelişmeler, üretken tasarım yöntemlerinin gelişmesini, bu sayede tasarım olanaklarının genişlemesini ve hızlanmasını sağlamaktadır. Doğadan esinlenerek tasarlanan karmaşık yapılar eklemeli imalat yöntemleri ile üretilebilir durumdadır.
- Eİ yönteminde, geleneksel yöntemlere göre üretime yardımcı malzemelere ihtiyaç duyulmaması nedeniyle özellikle düşük hacimli üretimlerde ürün maliyetinin düşmesini sağlar.
- Malzeme eksiltme ile parça üretim yöntemlerinde oluşan atık malzemeler ürünün birim maliyetinin artmasına sebep olurken, Eİ yöntemlerinde malzeme sarfiyatı asgari düzeyde olduğu için atık malzeme ve ürün malzeme maliyeti azalmaktadır.
- Eİ yöntemlerinde malzeme çeşitliliği çok daha fazladır. Ayrıca metalürjik olarak geleneksel yöntemlerde kullanılamayan malzemelerin kullanılmasını sağlar.

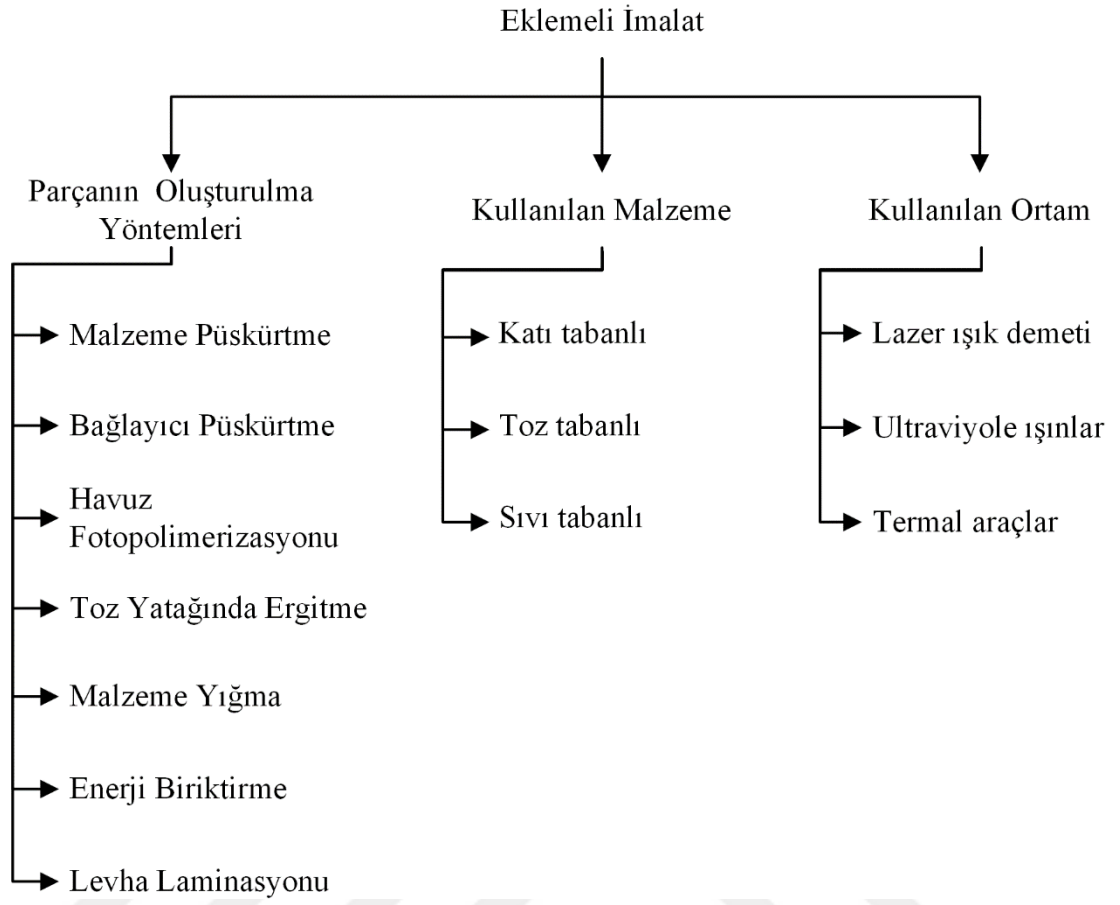
Zayıf yönleri ise şu şekilde sıralanabilir;

- Yüksek adetli üretimler için henüz ekonomik ve yeterince hızlı değildir. Büyük boyutlu parçaların üretimi kısıtlıdır.
- Bazı eklemeli imalat yöntemlerinde parçanın son haline ulaşabilmesi için ısıtma işlemi, polisaj gibi imalat sonrası işlemlerin yapılması zorunludur.
- Gelişmekte olan teknolojiler olduğu için henüz standartlaşma ve kalite kontrol yöntemleri tam olarak olgunlaşmamıştır.

Eİ sınıflandırması, parçanın oluşturulma yöntemine, kullanılan malzemeye ve parçayı oluşturmak için kullanılan ortama bağlı olarak sınıflandırılabilir (Şekil 2.21). ASTM F2792-12a'ya göre 50'den fazla eklemeli imalat yöntemi vardır. Ancak ISO/ASTM 52900:2021 standardında parçanın oluşturulma yöntemine göre 7 temel eklemeli imalat yöntemi verilmektedir. Eklemeli imalat yöntemlerinin güçlü ve zayıf yönlerinin yer aldığı bilgiler Çizelge 2.3 ile verilmiştir.

Çizelge 2.3. El yöntemleri güçlü-zayıf yönler (Ali vd., 2022; Y. Wu vd., 2023)

Yöntem	Güçlü yönler	Zayıf yönler
Malzeme Püskürtme	• Çoklu malzeme yazabilme • Yüzey kalitesi yüksek	• Düşük dayanımlı yapılar • Düşük çözünürlük • Sık makine bakımı
Bağlayıcı Püskürtme	• Ürünü renkli yazabilme • Geniş malzeme seçeneği	• Gözenekli son ürün • Son işlemde infiltrasyon gerekliliği
Havuz Foto Polimerizasyonu	• Yüksek üretim hızı • Yüksek parça çözünürlüğü	• Kırılma gerekliliği • Yüksek malzeme maliyeti • Sınırlı malzeme çeşidi
Toz Yatağında Ergitme	• Yüksek hassasiyet • Yüksek dayanımlı parçalar • Ham maddenin tekrar kullanılabilirliği	• Destek ve sabitleyici parça kullanımı zorunluluğu • Düşük üretim hızı • Yüksek maliyet
Malzeme Yığma	• Düşük maliyetli • Çoklu malzeme yazabilme • Yüksek üretim hızı	• Sınırlı parça çözünürlüğü • Düşük dayanımlı parçalar • Düşük yüzey kalitesi • Sınırlı malzeme çeşidi
Enerji Biriktirme	• Yüksek biriktirme oranı • Hasarlı parçanın onarım imkânı	• Son işlem gerekliliği • Düşük çözünürlük • Düşük yüzey kalitesi
Levha Laminasyonu	• Yüksek yüzey kalitesi • Düşük malzeme, makine ve proses maliyeti	• Parça temizliğinin zor olması

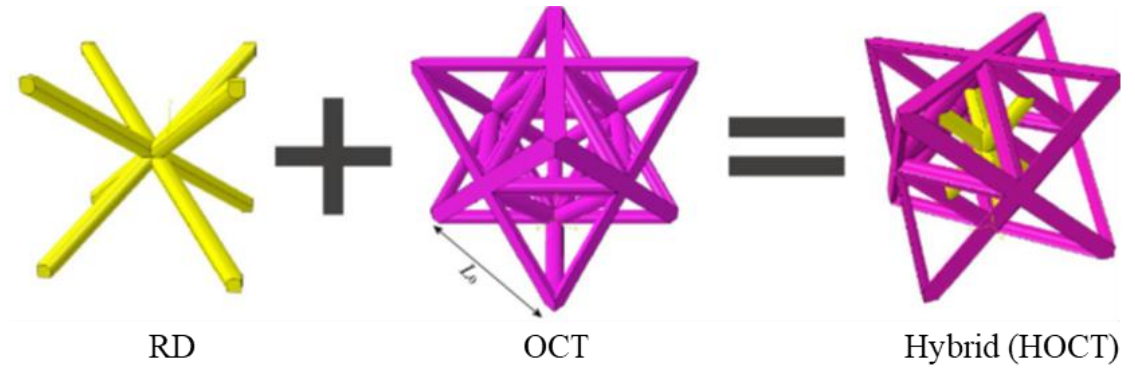


Şekil 2.21. Eklemeli imalatın sınıflandırılması (Saleh Alghamdi vd., 2021)

2.3. Kaynak Araştırması

Kaynak araştırması bölümünde, kafes yapılar ve enerji soğurma özellikleri ile ilgili literatürde yer alan güncel çalışmalar incelenmektedir. Araştırmalar; hibrit kafes yapılar, yarı statik basma deneyleri, enerji soğurma kabiliyetleri ve tez çalışmasında kullanılacak malzemelere odaklanacak şekilde yapılmıştır. Burada yer alan bilgilere erişim için YÖKTEZ (YÖK Ulusal Tez Merkezi), Bursa Uludağ Üniversitesi Merkez Kütüphanesi ve açık erişim çevrimiçi kaynakları kullanılmıştır.

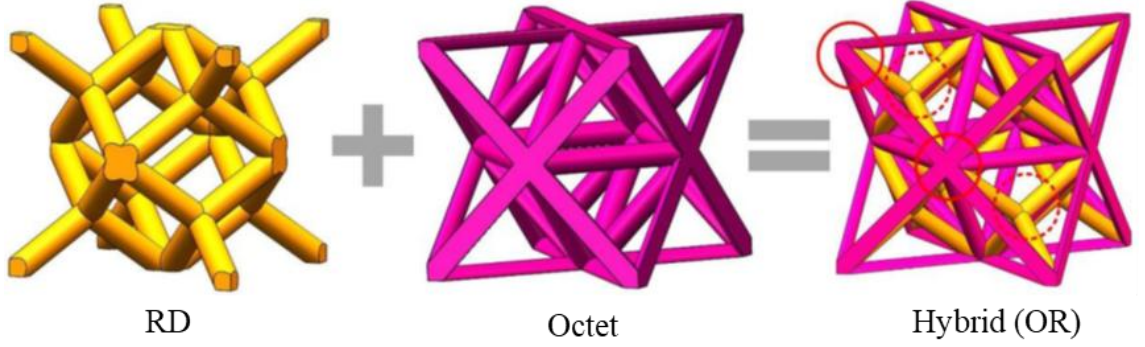
Ma vd. (2023) yaptıkları çalışmada, gövde merkezli kübik (GMK) ve sekizli (octet) birim kafes hücrelerden hibrit kafes yapının (Şekil 2.22) tasarımı ve özellikleri üzerinde durmuşlardır. AISI 316L paslanmaz çelik metal tozu kullanılarak toz yatağında seçici lazer ergitme Eİ yöntemiyle üretilen kafes yapılar yarı statik basma koşulları göz önüne alınarak sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiş ve basma testleri gerçekleştirilerek enerji soğurma kabiliyeti ve deformasyon mekanizmaları araştırılmıştır. Sonuçlar, hibrit kafes yapının basma modülünde ve akma dayanımında sırasıyla maksimum %10 ve %16 oranında iyileştirdiğini ve iyileştirmenin enerji soğurma özelliğinin, geleneksel yapılara göre %20 daha iyi olduğunu göstermiştir.



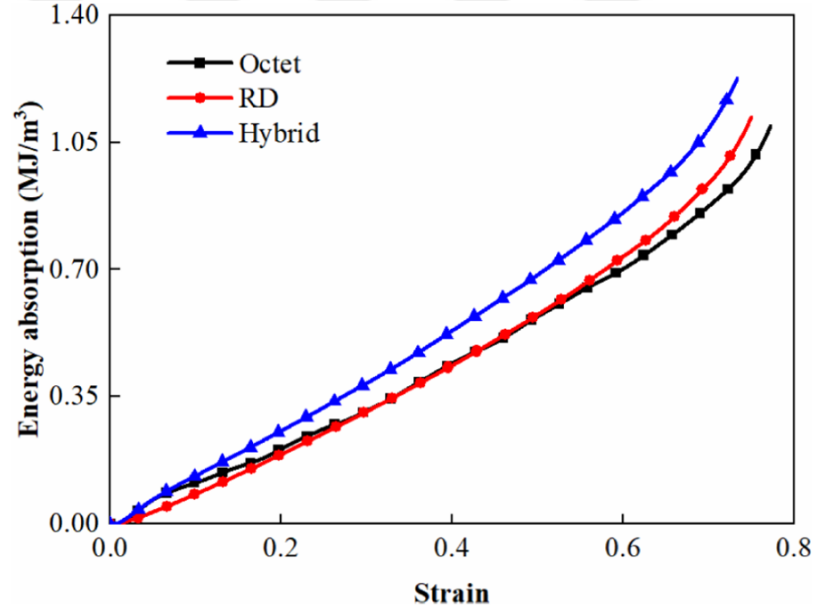
Şekil 2.22. Hibrit kafes yapının tasarım stratejisi (Ma vd., 2023)

Xiao vd. (2022) tarafından yayınlanan makalede, eklemeli imalat yöntemiyle üretilen hibrit kafes yapıların basma performansları ve enerji sönümlenme özellikleri incelenmiştir. Sekizli (octet cell) ve eşkenar dörtgensel on iki yüzlü kafesten (rhombic dodecahedron) (Şekil 2.23) oluşan hibrit kafes hücre konfigürasyonu oluşturulmuştur. Seçici lazer ergitme (SLM) eklemeli imalat yöntemiyle AISI 316L paslanmaz malzemeden üretilen yapıya yarı statik basma deneyleri uygulanmıştır. Sonlu elemanlar yöntemiyle analiz

edilerek sanal ve gerçek ortamdaki yapı davranışı karşılaştırılmıştır. Hibrit kafes yapıların, tek tip birim kafes hücrelerden oluşturulmuş yapılara göre enerji soğurma performanslarının daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır (Şekil 2.24).

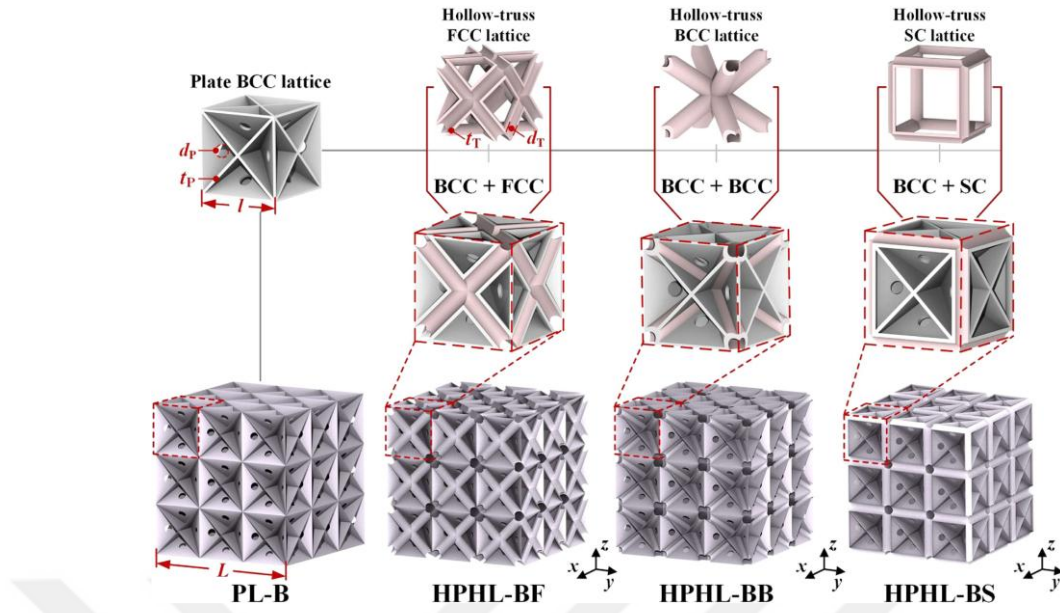


Şekil 2.23. Hibrit kafes hücre konfigürasyonu (Xiao vd., 2022)



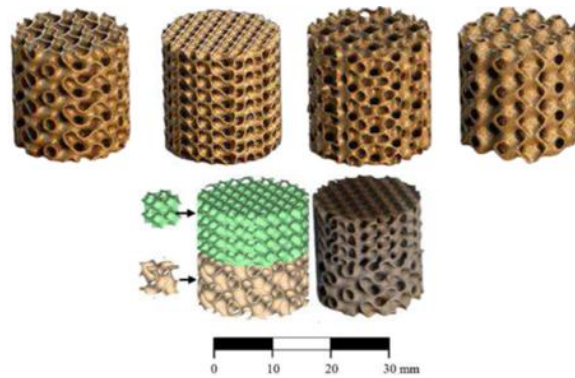
Şekil 2.24. Hibrit kafes yapının enerji soğurma özellikleri (Xiao vd., 2022)

Wu vd. (2023), yaptığı araştırmada ise plaka tabanlı birim hücre ile içi boş kiriş tabanlı birim hücreden elde edilen 10x10x10 mm boyutlarındaki hibrit birim hücre tasarımı yapmışlardır. Bu birim hücrelerden 3x3x3 adet diziliminde hibrit kafes yapılar oluşturulan kafes yapılar yarı statik basma koşullarında test edilmiştir (Şekil 2.25). Ayrıca benzer sınır koşullarını sağlayacak şekilde nümerik analizler gerçekleştirilmiştir. Analiz çalışmaları LS DYNA (USA) sonlu elemanlar yazılımında gerçekleştirilmiştir. Hibrit kafes yapıların yalnızca plaka tabanlı birim hücrelerden oluşan PL-B yapıya göre daha iyi mekanik özellikler sergilediği sonucuna varılmıştır.



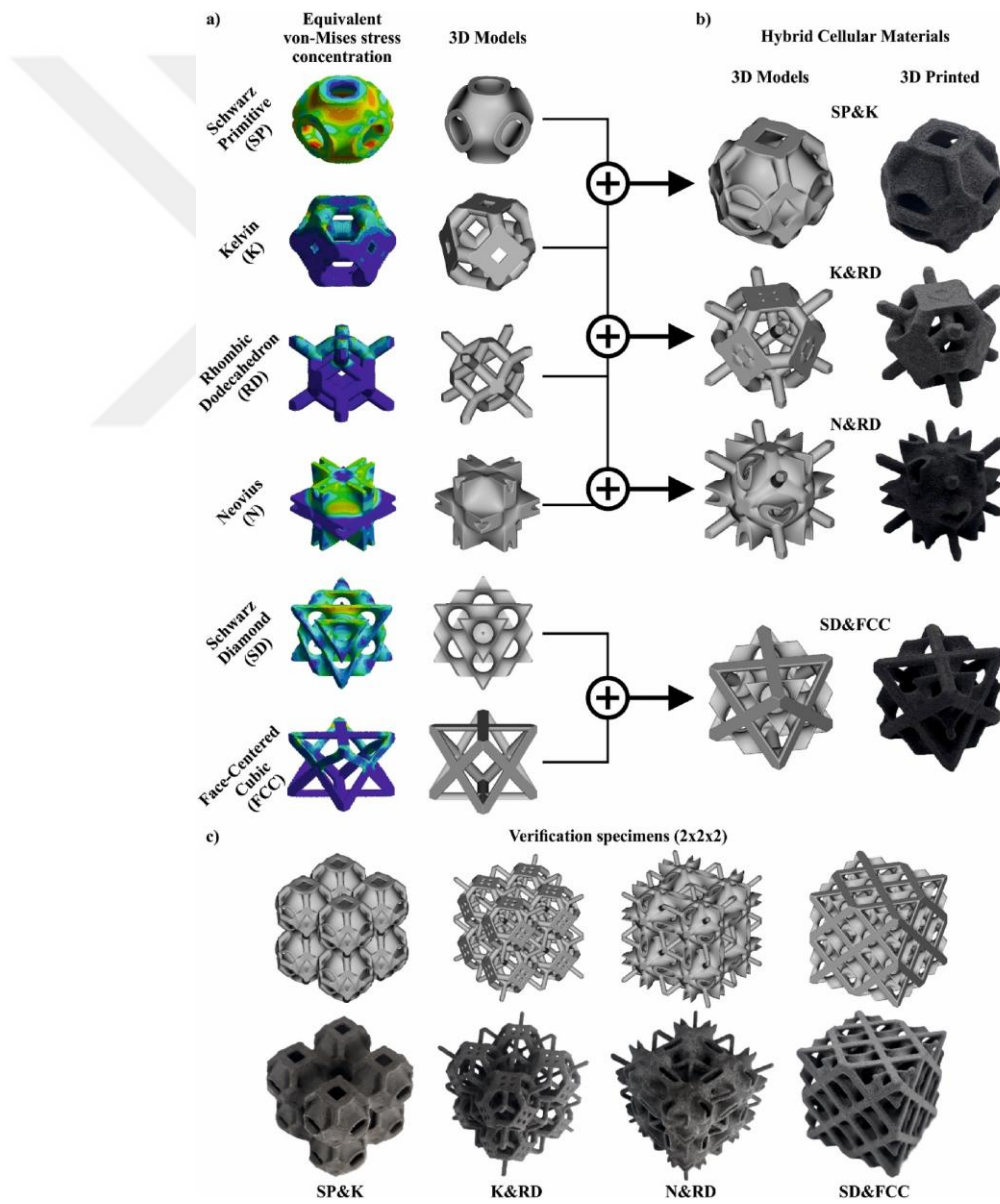
Şekil 2.25. Hibrit kafes yapıların tasarım yöntemleri (Wu vd., 2023)

Novak vd. (2023) yaptığı çalışmada, üçlü periyodik minimum yüzey (ÜPMY) birim hücrelerden 20 mm çapında ve yüksekliğinde silindir formunda kafes yapılar oluşturulmuştur. Ayrıca elmas ve giroid birim yapılardan hibrit test numunesi tasarlanmıştır (Şekil 2.26) AISI 316L paslanmaz çelik metal tozu kullanılarak, toz yatağında ergitme eklemeli imalat yöntemiyle numuneler üretilmiştir. Düşük ve yüksek şekil değiştirme hızlarında kafes yapıların enerji soğurma kabiliyetleri incelenmiştir. Yarı statik ve düşük dinamik koşullar basma test cihazında, yüksek dinamik koşullar ise Split Hopkinson Bar testi cihazında ve çok yüksek dinamik koşullar ise powder gun test cihazında gerçekleştirilmiştir. Farklı koşullarda kafes yapıların davranışları incelenmiştir. Sonuç olarak kafes yapıda hibrit hücre yönlerinin ve dağılımının önemli bir etken olduğu sonucuna varılmıştır.



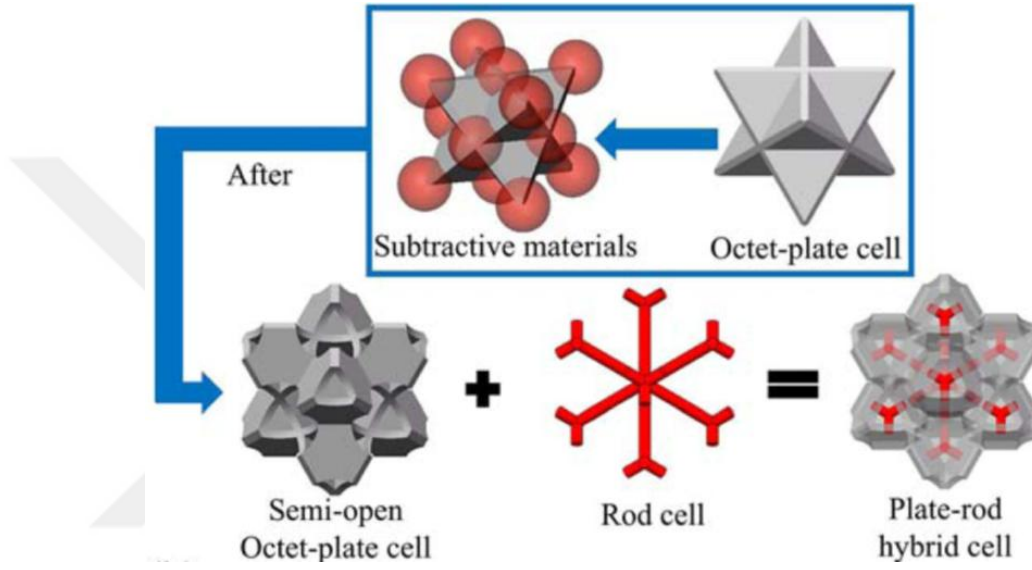
Şekil 2.26. Novak vd. (2023) araştırmalarında kullanılan test numuneleri

Kladovasilakis vd. (2023) yaptığı çalışmada farklı kiriş, içi boş kiriş, plaka ve üçlü periyodik minimum yüzey (ÜPMY) tabanlı kafes yapıların temel birim hücre olarak kullanılıp hibrit birim hücrenin tasarım çalışmasının yapıldığı görülmektedir. Bu çalışmada 4 farklı hibrit birim hücre tasarımı ve bunların oluşturduğu 2x2x2 kafes yapıda test ve nümerik analiz çalışmaları gerçekleştirmişlerdir (Şekil 2.27). Çalışmada seçici lazer sinterleme (SLS) eklemeli imalat yöntemi ve poliamid 12 (PA12) toz malzeme kullanılmıştır. Yarı statik basma testi ve bu teste benzetim yaparak sonlu elemanlar analiz yöntemi ile mekanik özellikleri araştırılmıştır. Hibrit kafes yapıların üstün mekanik özelliklerinin olduğu sonucuna varılmıştır.



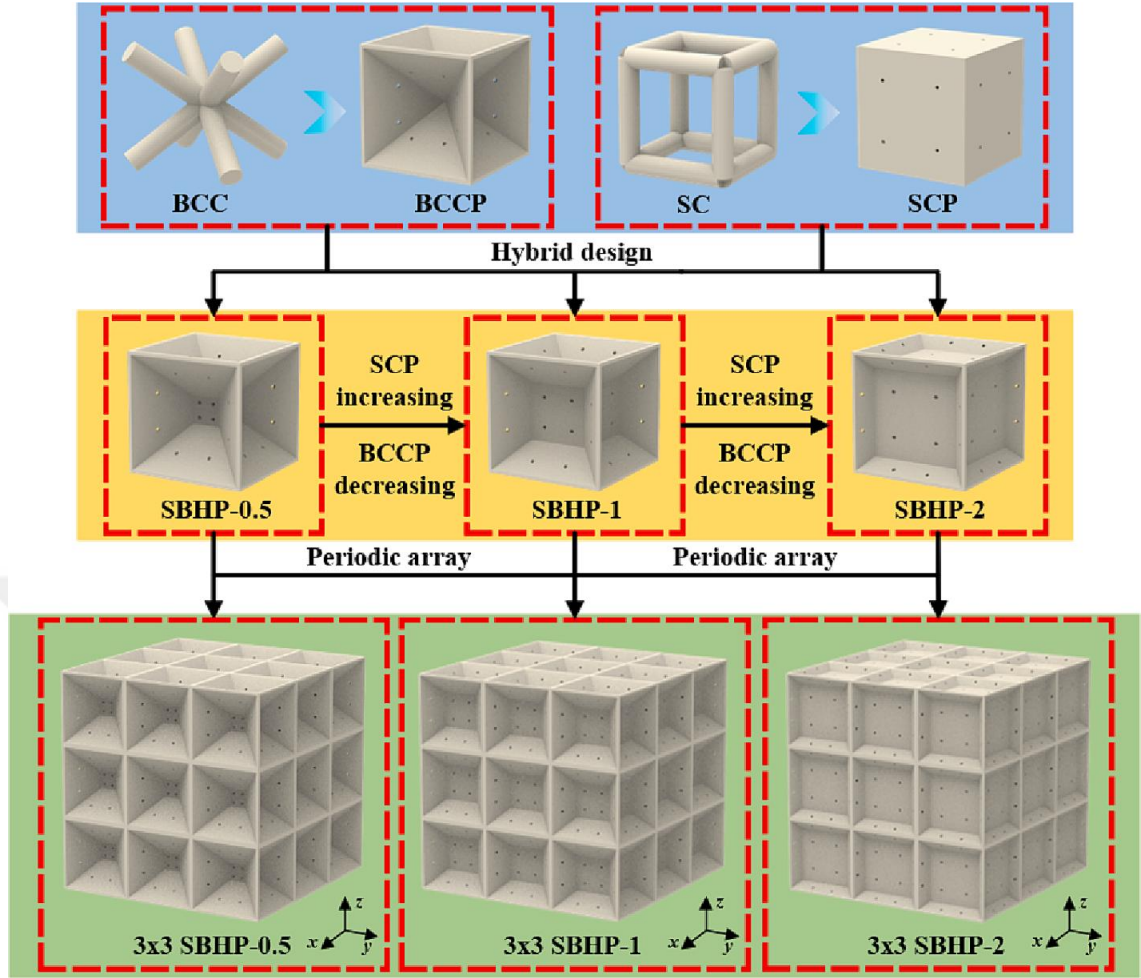
Şekil 2.27. Hibrit kafes yapı tasarımları (Kladovasilakis vd., 2023)

Cui vd. (2024) hibrit kafes yapı tasarımının, enerji soğurma, elastisite modülü ve akma gerilmesi gibi kafes yapı mekanik özelliklerine etkilerini incelemişlerdir. Kiriş ve plaka temelli birim kafes hücrelerden oluşturdukları hibrit birim hücre (Şekil 2.28) ile 4x4x4 diziliminde kafes yapılar oluşturulmuştur. Seçici lazer sinterleme Eİ yöntemiyle PLA toz malzemeden üretilen kafes yapılar yarı statik basma testleri ile test edilmiştir. Testler sonucunda hibrit kafes yapının akma gerilmesi değerinde %13,4, özgül soğurulan enerji değerinde ise %18,5 artış olduğu belirtilmiştir.



Şekil 2.28. Hibrit birim kafes hücre tasarımı (Cui vd., 2024)

L. Li vd. (2024) tarafından yapılan araştırmada hibrit kafes yapılar tasarlanarak, bu yapıların enerji soğurma ve ses yalıtımı gibi çoklu işlevleri üzerinde araştırmalar yapılmıştır. Plaka temelli GMK ve basit kübik yapıların birleştirilmesiyle ortaya çıkan hibrit birim hücreler farklı boyutlarda tasarlanarak Şekil 2.29’da gösterilen kafes yapılar oluşturulmuştur. Eriyik yığma Eİ yöntemi ile üretilen kafes yapılarda herhangi bir son işleme gerek kalmadığı belirtilmektedir. Yapı üzerinde açılan delik çapı ve plaka kalınlıklarının ses yalıtımı ve enerji soğurma üzerine etkileri incelenmiştir. Hibrit kafes yapı tasarımı sayesinde, birim kafes yapılara göre ses soğurma katsayıları karşılaştırıldığında, GMK yapıya göre %24, basit kübik yapıya göre %62 artış göstermiştir. 0,168 eşit bağıl yoğunluk değerleri ile üretilen kafes yapılara yarı statik basma testi uygulanmıştır. Hibrit kafes yapının daha kararlı bir yapı olmasının yanında, GMK yapıya göre %31, basit kübik yapıya göre %23 dolaylarında daha fazla enerji soğurduğu gözlenmiştir.



Şekil 2.29. Hibrit kafes yapı tasarımı (L. Li vd., 2024)

Zaharia vd. (2024) yaptıkları çalışmada Inconel 718 metal tozu kullanarak seçici lazer ergitme Eİ yöntemiyle küresel ve hiperbolik şekle sahip kafes yapılar ile çalışmalar yapmıştır. Çalışmada iki farklı kafes yapı için, ısıtılma tabii tutulan ve üretildiği gibi test edilen kafes yapıların karşılaştırılması yapılmıştır. Basma testlerinde ısıtılma tabii tutulan kafes yapılardan hiperbolik şekilli tasarıma sahip kafes yapı, ısıtılma uygulanmamış yapıya göre %45,1 daha fazla dayanım göstermiştir. Küresel şekilli tasarıma sahip kafes yapılarda ise, ısıtılma uygulanmış kafes yapı, uygulanmamış kafes yapıya göre %52,3 daha fazla dayanım göstermiştir. Ayrıca ısıtılma tabii tutulmuş kafes yapıların mikro sertlik testlerinde ve iç yapılarında daha iyi sonuçlar görülmüştür.

Xu vd. (2024), çalışmalarında yarı statik basma koşullarında ve yorulma yüklerinde plaka temelli kafes yapı tasarımları için duvar kalınlığının etkisini araştırmışlardır. %12,5, %25, %37,5 ve %50 olmak üzere dört farklı bağıl yoğunluğa sahip kafes yapı toz yatağında

lazer ergitme Eİ yöntemi ile Inconel 718 metal tozu kullanılarak üretilmiştir. Kafes yapılar üretildikten sonra kalıntı gerilmelerin giderilmesi için ısıtıl işlem uygulanmıştır. Yarı statik basma koşullarında ve yorulma yükleri altında yapılan farklı testlerde bağl yoğunluğu ve duvar kalınlığı fazla olan kafes yapıların özelliklerinin daha iyi olduğu gözlemlenmiştir.

Havuz foto polimerizasyonu yöntemiyle üretilen kafes yapı çalışmaları incelendiğinde, bu eklemeli imalat yöntemlerinin üretim hassasiyetinin yüksek olmasından kaynaklı tercih edildiği görülmektedir. DLP ve SLA yöntemleri ile üretilmiş kafes yapılarda yarı statik ve dinamik basma testleri ile kafes yapıların mekanik davranışları üzerine çalışmalar yapılmıştır (Ling vd., 2019; Mancini vd., 2024). Malekan & Sigurjónsson (2024) tarafından yapılan çalışmada, gevrek ve sünek iki farklı polimer malzeme kullanarak SLA yöntemiyle eşit hücre boyutlu ve gradyan kafes yapıları üretilip, yarı statik basma testleri ile mekanik davranışlarını incelemiştir. Gradyan kafes yapıların, eşit hücre boyutlu kafes yapılara göre daha iyi mekanik davranış gösterdiği belirtilmektedir.

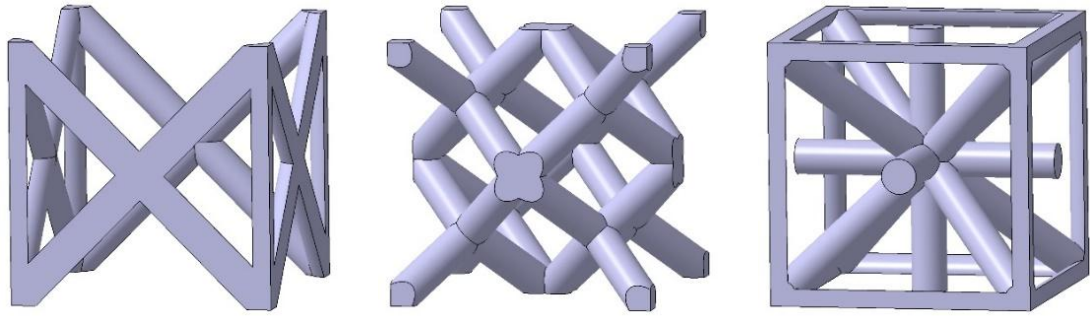
Literatürde bulunan kaynaklar incelendiğinde, kiriş temelli ve plaka temelli hibrit kafes yapı çalışmalarının son yıllarda artış gösterdiği ve güncel bir araştırma konusu olduğu anlaşılmaktadır. Ancak RD, FCCZ ve iso truss birim kafes hücreleriyle oluşturulmuş hibrit kafes yapılar üzerine çalışma bulunmadığı ve özgün bir çalışma konusu olacağı düşünülmüştür. Ayrıca iki farklı kiriş temelli kafes yapıdan içi boş kirişler kullanılarak oluşturulan hibrit kafes yapı tasarımı henüz araştırılmamıştır. Gevrek ve sünek olmak üzere, iki farklı malzemeden aynı hücre tasarımlarıyla oluşturulan karşılaştırmalı çalışmaların yetersiz olduğu görülerek, Inconel 718 ve ABS benzeri reçine kullanılarak üretilcek kafes yapıların literatüre önemli bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Kafes yapılar üzerine pek çok test çalışmasının yanında sonlu elemanlar analizi yöntemiyle yapılan çalışmalarda, Inconel 718 malzeme için SEA çalışmalarının sınırlı olduğu görülmektedir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çalışmada tasarımı bilinen birim kafes hücreler ile iki farklı hibrit birim kafes hücre tasarımı oluşturulmuştur. Özgün hibrit birim hücreler ve bunları oluşturan birim hücreler ile çeşitli konfigürasyonlarda kafes yapılar tasarlanmıştır. Eklemeli imalat yöntemleri kullanılarak iki farklı malzemeye üretimler yapılmıştır. Bu yapıların yarı statik basma koşullarında testleri gerçekleştirilmiş ve veriler toplanmıştır. Ayrıca nümerik analizler ile test benzetimleri yapılarak sanal ortamda mekanik davranışlara ait veriler elde edilmiştir. Bu bölümde kafes yapıların tasarım, üretim, test ve nümerik analiz çalışmaları hakkında detaylı bilgiler verilmektedir.

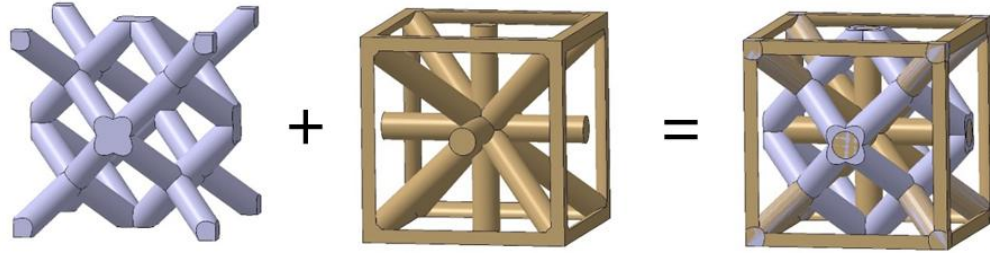
3.1. Kafes Yapı Tasarımları

Hibrit kafes yapıların oluşturulması için öncelikle birim kafes hücre tasarımlarının gerçekleştirilmesi gereklidir. Hibrit kafes tasarımında “eşkenar dörtgensel on iki yüzlü (rhombic dodecahedron (RD))”, “iso truss (IT)” ve “dikme ile güçlendirilmiş yüzey merkezli kübik (FCCZ)” birim kafes hücreler (Şekil 3.1) seçilmiştir. Tasarım çalışmalarında Catia V5R19 (Dassault System) bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımı kullanılmıştır.

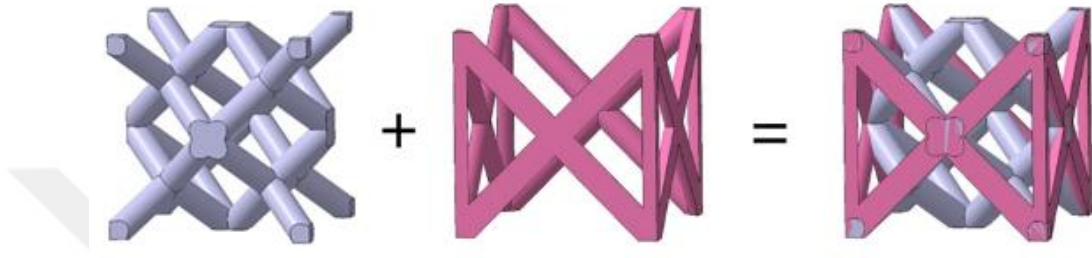


Şekil 3.1. FCCZ, RD ve IT birim kafes hücreler (Soldan sağa)

Yukarıda verilen birim hücrelerden; eşkenar dörtgensel on iki yüzlü (RD) ve iso truss (IT) hücreleri birleştirilerek “RDIT” hibrit birim kafes hücre tasarımı yapılmıştır (Şekil 3.2). Eşkenar dörtgensel on iki yüzlü (RD) ve dikme ile güçlendirilmiş yüzey merkezli kübik (FCCZ) hücrelerden ise “RDFC” hibrit birim kafes hücre oluşturulmuştur (Şekil 3.3). Birleştirilmiş hücrelerin üst üste denk gelen kirişleri tek bir kiriş olacak şekilde tasarımlar yapılarak tekil yapı haline getirilmiştir.



Şekil 3.2. RDIT hibrit birim kafes hücrenin tasarımı



Şekil 3.3. RDFC hibrit birim kafes hücrenin tasarımı

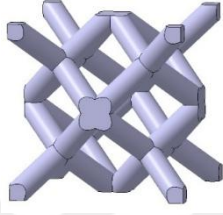
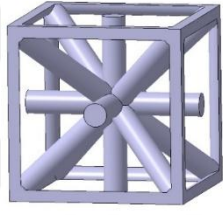
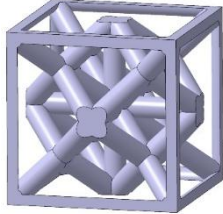
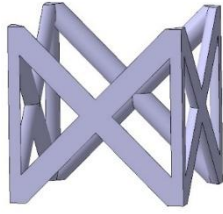
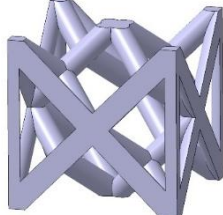
Tasarım çalışmalarında, hibrit hücreler ve bu yapıların oluşturulmasında kullanılan birim hücrelerin Maxwell kararlılık kriteri değerlendirmeleri yapılmıştır. Ayrıca basma yönüne dik kiriş olup olmadığı da incelenmiştir. Yalnızca IT birim hücrenin gerinme baskın olduğu görülmektedir. Basma yönüne dik kirişlerin değerlendirildiği durum için ise yalnızca RD yapıda dik kirişin olmadığı görülmektedir (Çizelge 3.1).

Her bir birim kafes hücre tasarımı tamamlandıktan sonra, bu kafes hücreler ile farklı dizilimlerde kafes yapılar tasarlanmıştır. Bütün kafes yapılar, kenar ölçüleri 7,5 mm, 10 mm ve 15 mm olan birim hücreler kullanılarak 30 mm x 30 mm x 30 mm boyutlarında olan bir küp hacim içerisine yerleştirilecek şekilde boyutlandırılmıştır. Oluşturulan kafes yapıların bağıl yoğunlukların birbirine eşit olması amaçlanmış, bu şartın sağlanması için, yapıyı oluşturan dairesel kesitli kirişlerin çapları değiştirilmiştir. Bütün kafes yapıların bağıl yoğunlukları %22,4 ile %22,9 aralığında olacak şekilde tasarımlar tamamlanmıştır.

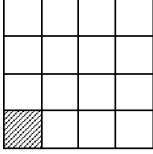
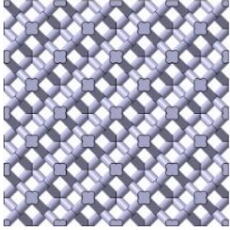
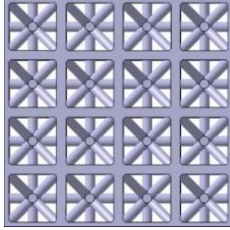
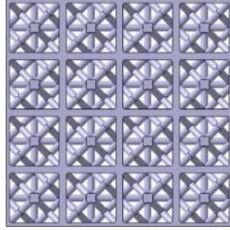
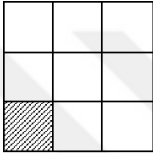
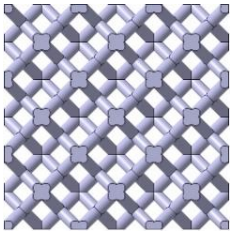
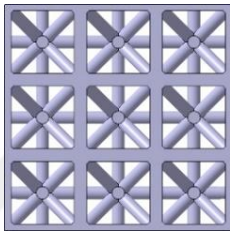
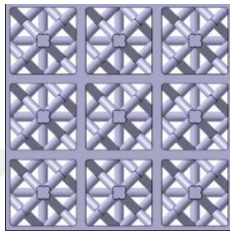
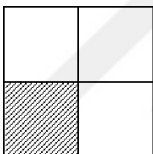
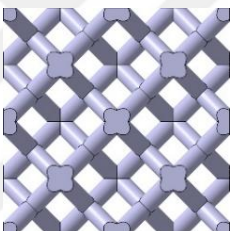
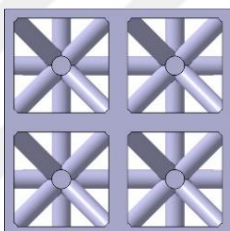
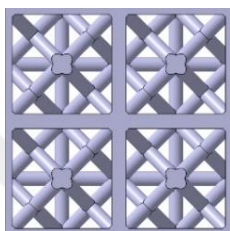
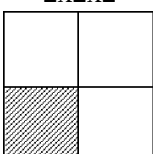
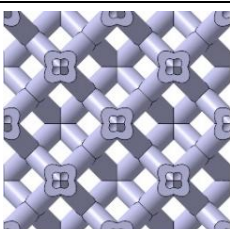
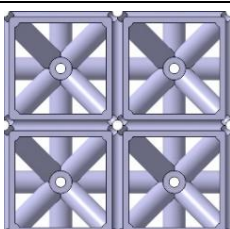
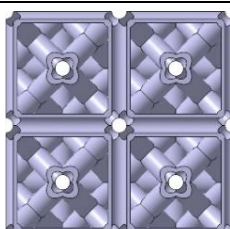
Kafes yapılar için birim hücrelerin kısaltmalarıyla Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3'te sütunlar oluşturulmuştur. Her bir sütunda farklı hücre konfigürasyonu ile kafes yapı tasarımları verilmiştir. Yapıların adlandırılmasında, hücre tipinden sonra metal veya polimer malzeme olmasına göre; metal kafes yapılar için “M”, polimer kafes yapılar için ise “P”

kısaltması kullanılmıştır. Kafes yapı görselinin verildiği çizelge bölümünde kiriş çapı (d), içi boş olan kirişler için et kalınlığı (t) ve bağıl yoğunlukları (ρ^*) verilmiştir. Örneğin RD-P1 olarak adlandırılan kafes yapı, 4x4x4 hücre konfigürasyonuna sahip, tel çapı d=1,22 mm ve bağıl yoğunluğu $\rho^* = \%22,5$ olan kafes yapıyı ifade etmektedir.

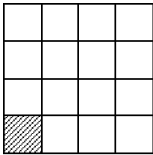
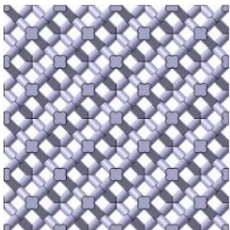
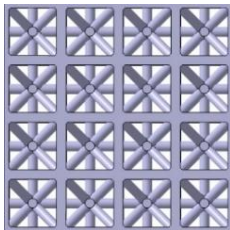
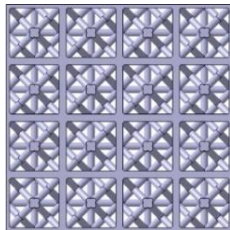
Çizelge 3.1. Tasarımı yapılan birim ve hibrit hücrelerin mekanik davranışları

Birim hücre	Görsel	Maxwell kararlılık kriteri	Mekanik davranış	Basma yönüne dik kiriş
RD Eşkenar dörtgensel on iki yüzlü		$b = 32$ $j = 14$ $M = -4 < 0$	Eğilme baskın yapı	Yok
IT Iso truss		$b = 26$ $j = 9$ $M = 5 > 0$	Gerinme baskın yapı	Var
RDIT Hibrit		$b = 58$ $j = 23$ $M = -5 < 0$	Eğilme baskın yapı	Var
FCCZ Dikme ile güçlendirilmiş yüzey merkezli kübik		$b = 20$ $j = 12$ $M = -10 < 0$	Eğilme baskın yapı	Var
RDFC Hibrit		$b = 52$ $j = 22$ $M = -8 < 0$	Eğilme baskın yapı	Var

Çizelge 3.2. RD, IT birim hücre ve RDIT hibrit kafes yapı tasarımları

30x30x30 mm	RD (Tekil)	IT (Tekil)	Hibrit RDIT
P1 a=7,5 mm 4x4x4 	 d=1,22 $\rho^* = \%22,5$	 d=1,25 $\rho^* = \%22,5$	 d=0,95 $\rho^* = \%22,9$
P2 a=10 mm 3x3x3 	 d=1,63 $\rho^* = \%22,5$	 d=1,67 $\rho^* = \%22,5$	 d=1,25 $\rho^* = \%22,4$
P3 a=15 mm 2x2x2 	 d=2,46 $\rho^* = \%22,8$	 d=2,52 $\rho^* = \%22,8$	 d=1,9 $\rho^* = \%22,9$
P4 a=15 mm 2x2x2 	 d=3 t=0,73 $\rho^* = \%22,4$	 d=3 t=0,75 $\rho^* = \%22,9$	 d=3 t=0,5 $\rho^* = \%22,7$

Çizelge 3.3. RD, FC ve RDFC kafes yapı tasarımları

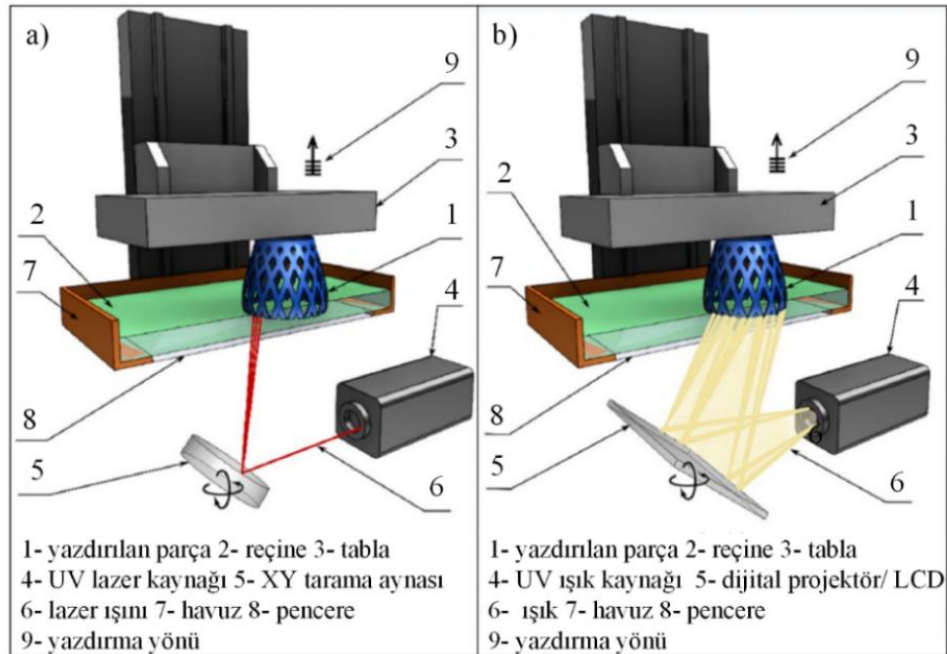
30x30x30 mm	RD (Tekil)	FC (Tekil)	Hibrit RDFC
P1, M1 a=7,5 mm 4x4x4 	 d=1,22 $\rho^* = \%22,5$	 d=1,8 $\rho^* = \%22,6$	 d=1,02 $\rho^* = \%22,4$

3.2. Polimer Kafes Yapılar, Malzeme Özellikleri ve Üretimi

Polimer kafes yapılar, ABS benzeri reçine (ABS like resin) kullanılarak temel eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan havuz foto polimerizasyonu yöntemi ile üretilmiştir. Aşağıda imalat yöntemi, üretim parametreleri ve malzeme mekanik özellikleri hakkında bilgiler verilmektedir.

Havuz foto polimerizasyonu eklemeli imalat yöntemi

Havuz foto polimerizasyonu yöntemi en eski eklemeli imalat yöntemidir. Bu yöntemde, temelde belirli bir dalga boyundaki ışıkla kürleşerek katı hale geçen sıvı polimer malzemeler kullanılır. Bu malzemeler genel olarak foto polimerler olarak adlandırılır (Dave vd., 2022; Gibson vd., 2021). Stereolitografi (SLA) foto polimerizasyon eklemeli imalat yöntemlerinin ilki olup 1986 yılında Charles Hull tarafından bulunmuştur. SLA yönteminde foto polimer malzemeyi kürleştirmek için lazer ışık kaynağı kullanılır (Şekil 3.4). Diğer bir yöntem olan dijital ışık sentezi (DLP- digital light processing) yönteminde ise benzer foto polimer malzemeyi kürleştirmek için ultraviyole (UV) ışık kaynağı olarak projektör kullanılmaktadır. Sıvı kristal ekran (liquid crystal display- LCD) eklemeli imalat yönteminde ise UV LED ışık kaynağı kullanılır (Şekil 3.4). Bu yöntemlerde parça hassasiyeti ışık kaynağının çözünürlüğüne bağlıdır (Y. Wu vd., 2023).



Şekil 3.4. Eklemeli imalat yöntemleri, a) SLA b) DLP/ LCD (Y. Wu vd., 2023)

Polimer kafes yapıların üretimi ve parametreleri

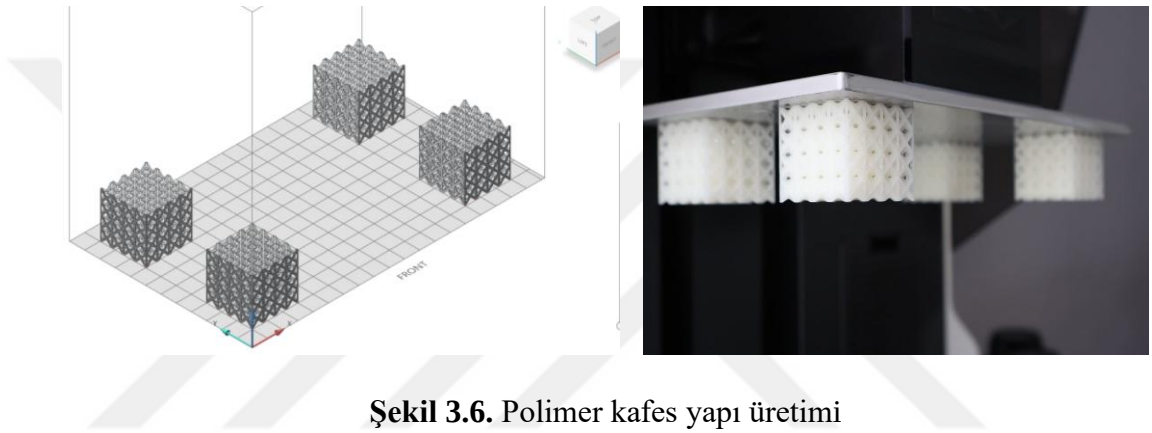
Polimer kafes yapılar, ALIAS marka endüstriyel ABS benzeri reçine malzeme kullanılarak sıvı kristal ekran (LCD) yöntemi ile üretilmiştir. CAD yazılımında oluşturulan tasarım STL formatına dönüştürülmüş ve sonrasında Shapeware dilimleme yazılımı ile yazdırılabilir format haline getirilmiştir. Üretim çalışmalarında Şekil 3.5'te gösterilen Rayshape Edge1 3B yazıcı kullanılmıştır. 3B yazıcı ile üretim sonrasında kafes yapıların üzerinde bulunan kürlenmemiş artık reçinelerin temizlenmesi amacıyla izopropil alkol havuzunda 6 dakika boyunca yıkanmıştır. Son aşama olarak üretilen kafes yapılar ShapeCure kürleme cihazında 40 °C sıcaklıkta 15 dakika boyunca kürlenmiştir. Her bir kafes yapı tipi tablaya paralel ve aynı üretim tablasında olacak şekilde üretimler tamamlanmıştır (Şekil 3.6). Polimer kafes yapıların bağıl yoğunlukları eşit olduğu için üretim süreleri ve kullanılan hammadde miktarı birbirine yakındır. Bu nedenle kafes yapıların birim maliyetleri aynı olarak kabul edilebilir. Polimer kafes yapılara ait üretim parametreleri Çizelge 3.4 ile verilmiştir.



Şekil 3.5. Rayshape Edge1 LCD 3B yazıcı

Çizelge 3.4. Polimer kafes yapıların üretim parametreleri

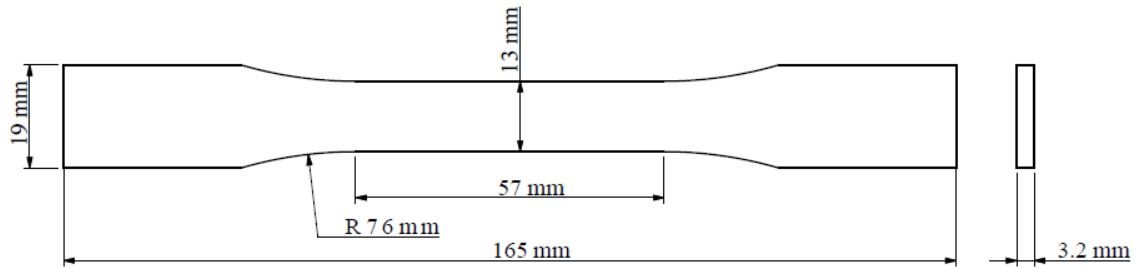
Üretim parametreleri	Parametre değerleri
Işık kaynağı ve dalga boyu	LED, 405 nm
Katman kalınlığı	50 μm
Reçine viskozitesine göre bekleme süresi	1 s
Reçineye göre maruz kalma süresi	2 s
Yazdırma hızı	40 mm/sa
Ortam sıcaklığı	25 °C



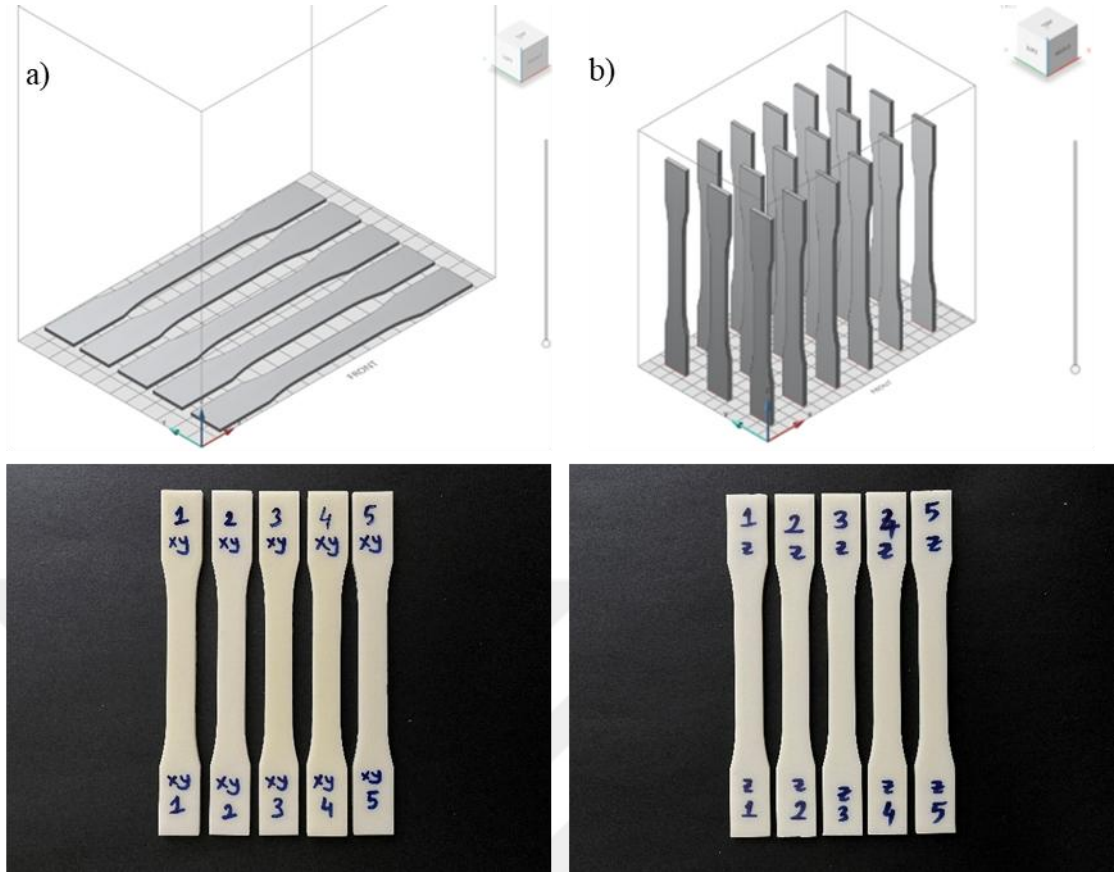
Şekil 3.6. Polimer kafes yapı üretimi

Polimer kafes yapı malzeme özellikleri

Polimer kafes yapılarda kullanılan malzemenin mekanik özelliklerinin tespit edilmesi amacıyla ASTM D698-22 Plastiklerin Çekme Özellikleri için Standart Test Yöntemleri başlıklı standartta verilen ölçüleriyle Tip I çekme test numuneleri tasarlanmıştır (Şekil 3.7). Çekme test numuneleri, yazdırma yönü tablaya paralel ve dik olacak şekilde iki farklı yönde olmak üzere, kafes yapı parametreleri ile aynı parametreler kullanılarak 5'er adet üretilmiştir (Şekil 3.8).



Şekil 3.7. ASTM D698-22 Tip I plastik çekme testi numunesi ölçüleri

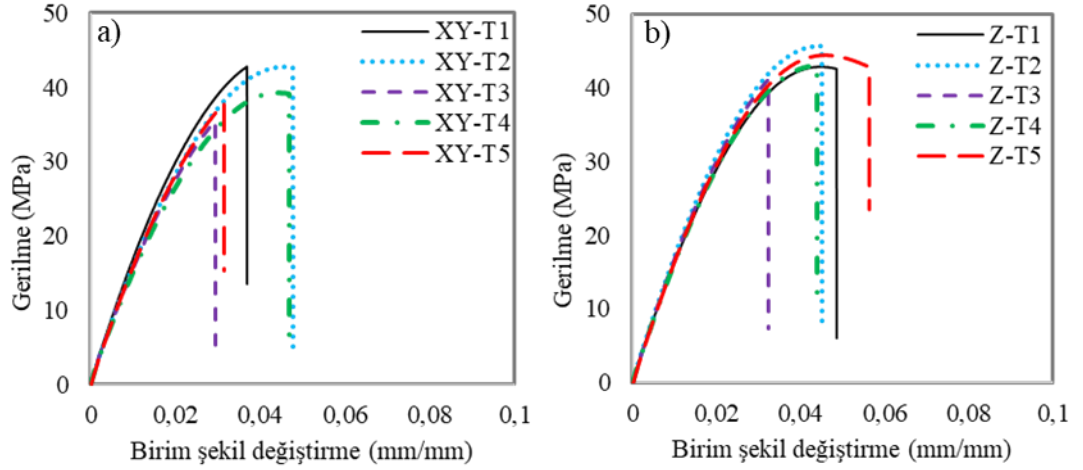


Şekil 3.8. Çekme testi numuneleri ve üretim yönleri, a) tablaya paralel üretim yönü, b) tablaya dik üretim yönü

Üretimi tamamlanan çekme testi numuneleri 100 kN kapasiteli yük hücresine sahip UVE marka MNR100 model üniversal çekme-basma test cihazı ile 5 mm/dk hızla test edilmiştir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Polimer malzeme çekme testi



Şekil 3.10. ABS benzeri polimer malzeme gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri, a) tablaya paralel üretim yönü, b) tablaya dik üretim yönü

Çekme testleri tamamlandıktan sonra Şekil 3.10 ile verilen gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri oluşturulmuştur. Sonuçlar incelendiğinde numunelerin düşük uzama değerlerinde koptuğu ve malzemenin gevrek davranış gösterdiği görülmektedir. Test sonuçlarına ait veriler Çizelge 3.5 ve Çizelge 3.6’da gösterilmektedir.

Çizelge 3.5. ABS benzeri polimer tablaya paralel üretim yönü çekme test verileri

Numune	En yüksek gerilme (MPa)	Kopma uzaması (%)	Elastisite modülü (GPa)
XY-T1	42,76	3,7	1,90
XY-T2	42,84	4,75	1,76
XY-T3	35,42	2,94	1,70
XY-T4	39,24	4,69	1,70
XY-T5	37,85	3,15	1,75

Çizelge 3.6. ABS benzeri polimer tablaya dik üretim yönü çekme test verileri

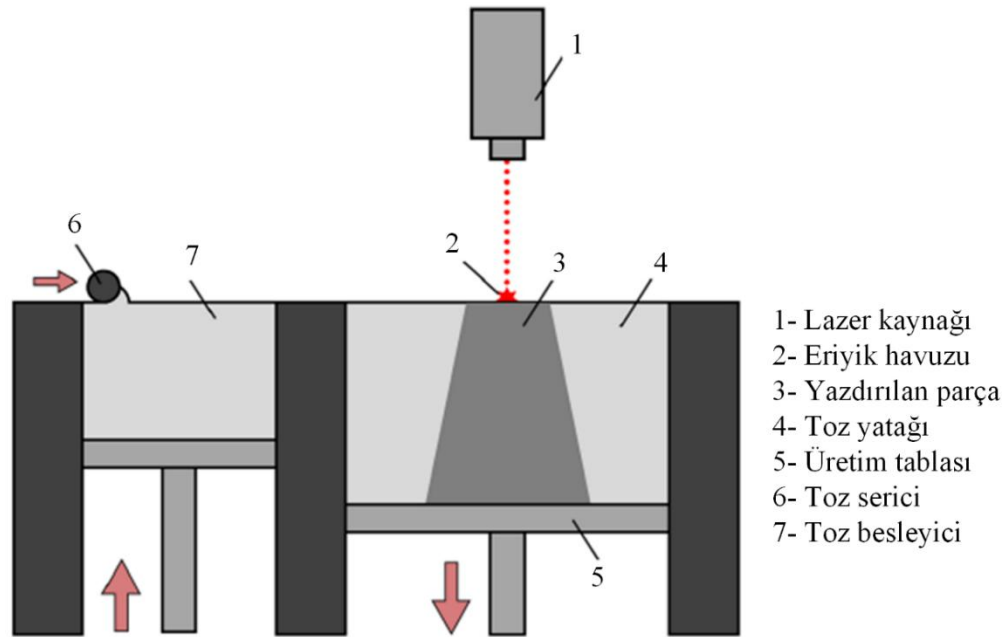
Numune	En yüksek gerilme (MPa)	Kopma uzaması (%)	Elastisite modülü (GPa)
Z-T1	42,89	4,9	1,80
Z-T2	45,76	4,5	1,85
Z-T3	41,08	3,2	1,82
Z-T4	43,01	4,4	1,74
Z-T5	44,41	5,6	1,78

3.3. Metal Kafes Yapılar, Malzeme Özellikleri ve Üretimi

Metal kafes yapılar, Inconel 718 nikel-krom süper alaşım metal tozu kullanılarak, toz yatağında seçici lazer ergitme imalat yöntemiyle üretilmiştir. Aşağıda imalat yöntemi, üretim parametreleri, malzeme kompozisyonu ve mekanik özellikleri hakkında bilgiler verilmektedir.

Toz yatağında seçici lazer ergitme eklemeli imalat yöntemi

Bu yöntemin başlıca alt yöntemleri, seçici lazer sinterleme (selective laser sintering- SLS), seçici lazer ergitme (selective laser melting- SLM) ve elektron ışık demeti ile ergitme (electron beam melting- EBM) olarak belirtilebilir (Chen vd., 2021). Bahsedilen yöntemlerde metal ve polimer malzeme tozları geniş bir kullanım alanına sahipken seramik, kompozit gibi malzemeler de kullanılabilir (Gibson vd., 2021). Lazerle üretim yöntemlerinde ısı girdisi yüksek olmasından kaynaklı kalıntı gerilmeler oluşur. Bu gerilmeler parçanın yorulma dayanımını olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca kalıntı gerilmeler parçanın çarpılmasına, parça üzerinde çatlaklara ve katman ayrışmalarına sebep olabilir (Chen vd., 2021). Toz yatağında ergitme eklemeli imalat yönteminde temel olarak; ergitme öncesi tozun serilmesini sağlayan toz serici, toz besleyici, lazer kaynağı ve tarayıcı ve üretim tablası bulunmaktadır (Şekil 3.11).



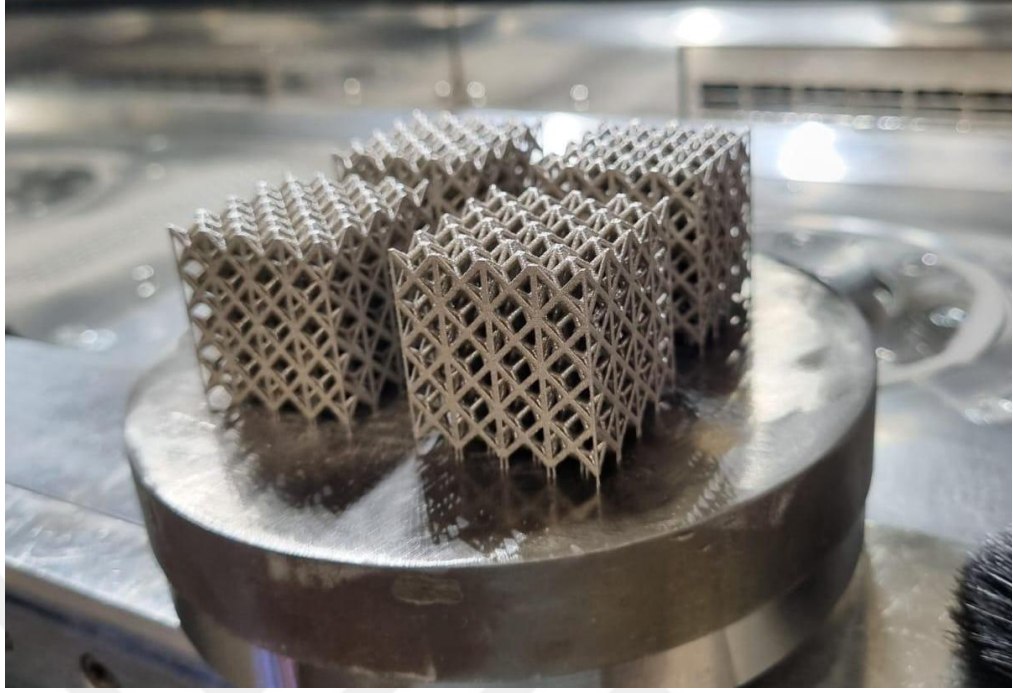
Şekil 3.11. Toz yatağında ergitme eklemeli imalat yöntemi (Benedetti vd., 2021)

Metal kafes yapıların üretimi ve parametreleri

Metal kafes yapılar, ENAVISION120 toz yatağında lazerle ergitme 3B yazıcısı ile üretilmiştir (Şekil 3.12). ERMAK A241-INC718 ticari adıyla sunulan ve ASTM F3055 standardında UNS N07718 koduyla belirtilen, bilinen adıyla Inconel 718 nikel-krom süper alaşım malzeme tozu kullanılmıştır. ASTM F3055 standardında verilen ve numune üretiminde kullanılan metal tozuna ait kompozisyon Çizelge 3.7’de verilmiştir. CAD yazılımında oluşturulan kafes yapı tasarımları STL formatına dönüştürülmüş ve sonrasında dilimleme yazılımı ile yazdırılabilir format haline getirilmiştir. Her bir kafes yapı konfigürasyonu tablaya paralel ve aynı üretim tablasında olacak şekilde üretimler tamamlanmıştır (Şekil 3.13). Metal kafes yapıların üretiminde kullanılan yazıcı parametreleri Çizelge 3.8’te verilmiştir.



Şekil 3.12. ENAVISION120 toz yatağında lazerle ergitme 3B yazıcı



Şekil 3.13. Metal kafes yapı üretimi

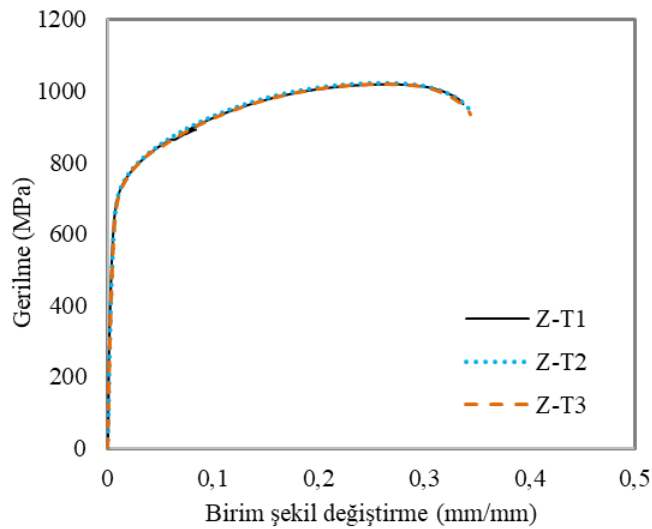
Çizelge 3.7. ASTM F3055 UNS N07718 malzeme kompozisyonu

Element	En büyük (%)	En küçük (%)	Ölçülen (%)
Karbon	-	0,08	0,01
Mangan	-	0,35	0,10
Silisyum	-	0,35	0,07
Fosfor	-	0,015	0,005
Kükürt	-	0,015	<0,001
Krom	17,0	21,0	19,1
Kobalt	-	1,0	<0,1
Molibden	2,80	3,30	3,03
Niyobyum+ Tantalyum	4,75	5,50	5,16
Titanyum	0,65	1,15	0,96
Alüminyum	0,20	0,8	0,57
Demir	Balans		
Bakır	-	0,3	<0,1
Nikel	50,00	55,00	52,30
Bor	-	0,006	0,002

Çizelge 3.8. Metal kafes yapıların üretim parametreleri

Üretim parametreleri	Parametre değerleri
Lazer tipi	Fiber lazer
Lazer gücü	220 Watt
Lazer odak çapı	0,075 mm
Tarama hızı	800 mm/s
Tarama boşluğu	0,1 mm
Katman kalınlığı	30 μ m

Inconel 718 yüksek dayanımı, korozyon direnci ve yüksek sıcaklıklarda çalışabilme özelliği sayesinde hafif yapılarda, gaz türbinleri, roketler, uçaklar, nükleer reaktörler, pompalar ve kalıp uygulamalarında kullanılır (Lu vd., 2015; Z. Wang vd., 2024). Inconel 718 malzemenin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için tablaya dik baskı yönüyle ve aynı parametrelerle üretilmiş üç farklı numuneye ait çekme testi verisi üretici firmadan temin edilmiştir. ASTM E8/E8M-24 Metalik Malzemelerin Çekme Testi için Standart Test Yöntemleri kapsamında 3 mm/dk çekme hızıyla elde edilen test verileri ile gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri oluşturulmuştur (Şekil 3.14). Elastisite modülü 125 GPa olarak hesaplanan malzemenin diğer mekanik özellikleri Çizelge 3.9’da verilmiştir. Test verileri ve gerilme-birim şekil değiştirme grafiği incelendiğinde üç farklı test numunesine ait sonuçların birbirine çok yakın olduğu belirtilebilir.



Şekil 3.14. Inconel 718 tablaya dik üretim yönü gerilme-birim şekil değiştirme grafiği

Çizelge 3.9. Inconel 718 tablaya dik üretim yönü çekme test verileri

Numune	%0,2 akma gerilmesi (MPa)	En yüksek gerilme (MPa)	Kopma uzaması (%)
Z-T1	683,69	1018,02	33,53
Z-T2	682,92	1021,59	34,02
Z-T3	674,33	1018,53	34,37

3.4. Yarı Statik Basma Testleri

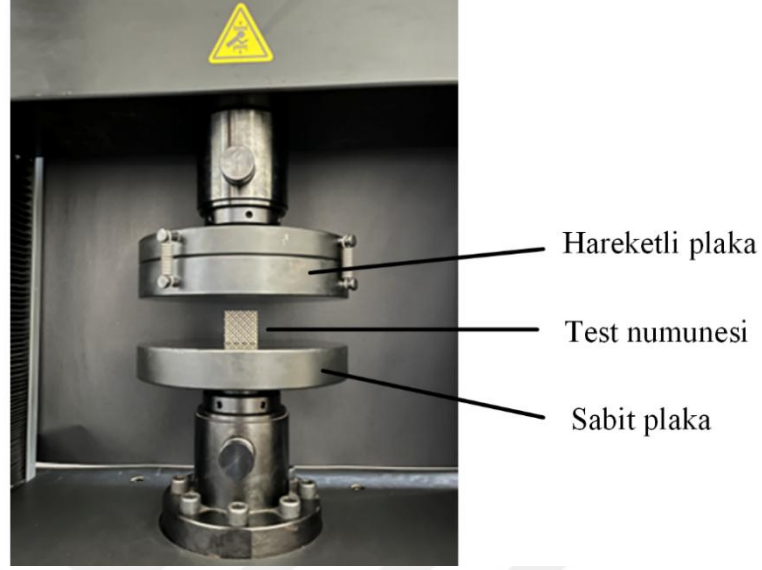
Üretimi tamamlanan parçalar, universal çekme- basma test cihazı ile yarı statik basma koşullarında test edilmiştir. Test çalışmaları için Şekil 3.15'te verilen 100 kN kapasiteli yük hücresine sahip UVE marka MNR100 model universal çekme-basma test cihazı kullanılmıştır. Yalnızca FC-M1 adlı metal kafes yapının maksimum kuvvet değeri 100 kN değerinin üzerinde olduğu için 300 kN kapasiteli yük hücresine sahip Zwick/Roell marka Z300 model universal basma cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.15).



Şekil 3.15. UVE MNR100 100 kN (sol) ve Zwick Roell 300 kN (sağ) kapasiteli universal test cihazları

Test cihazının sabit plakasının üzerine yerleştirilen test numuneleri, hareketli plaka hızı sabit 5 mm/dk olacak şekilde basma testi uygulanmıştır (Şekil 3.16). Test öncesinde kafes yapılar üzerine 20 N ön yük uygulanmıştır. Testler, basma yönü ile numunelerin yazdırma

doğrultusu aynı olacak şekilde yapılmıştır. Deplasman kontrolü ile sabit hızda ilerleyen hareketli plaka ile test numuneleri yüksekliğinin %60'ına kadar basılması sağlanmıştır.



Şekil 3.16. Test cihazı numune yerleşimi

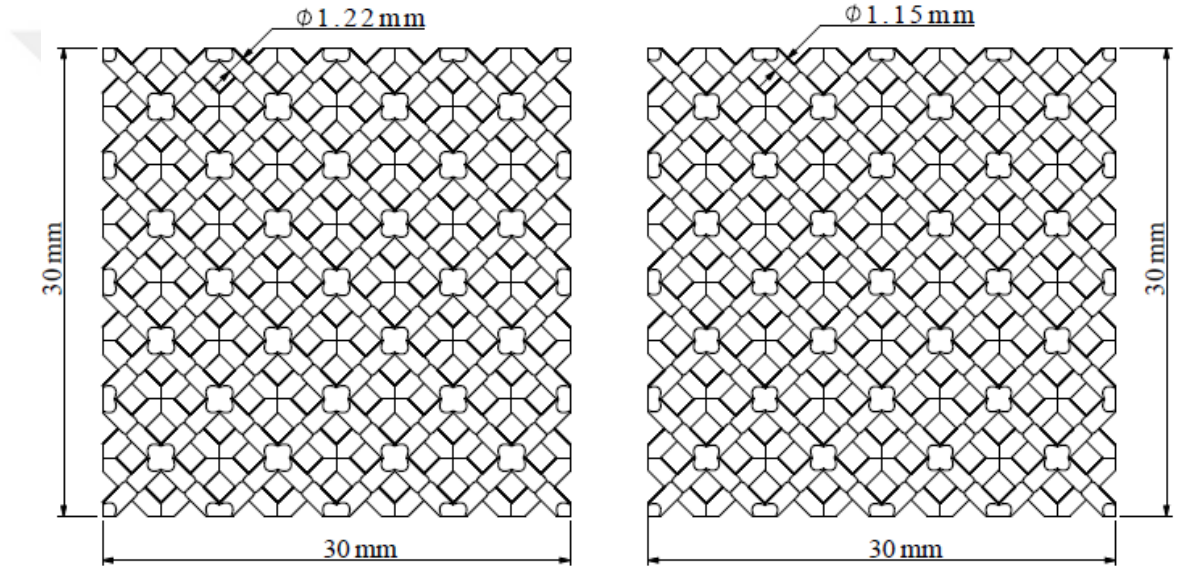
Test çalışmalarında hareketli plakanın düşey doğrultuda ilerlediği mesafe ve yük hücresinden alınan kuvvet değerleri kaydedilmiştir. Ayrıca her bir numunenin basma testi aşamasında video kayıt cihazı ile görüntü toplanmıştır (Şekil 3.17).



Şekil 3.17. Video kayıt cihazı ve sabitleme düzeneği

3.5. Nümerik Analiz Çalışmaları

Nümerik analiz çalışmaları, Inconel 718 toz malzemeden üretilen ve RD, FC ve hibrit RDFC olarak adlandırılan metal kafes yapılar için LS- DYNA çoklu fizik sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Doğrusal olmayan (nonlinear) sonlu elemanlar analiz çalışmaları, açık zaman (explicit) integrasyonu olarak gerçekleştirilmiştir. Kafes yapıların analiz çalışmasında, Şekil 3.18’de gösterildiği gibi katı modelde tasarlandığı kiriş çapı ve üretim sonrası ölçülen kütleyle eşit olacak biçimde hesaplanan kiriş çapı olarak iki farklı kiriş çapı kullanılmıştır. Analiz çalışması yapılan kafes yapılara ait kiriş çapı değerleri Çizelge 3.10 ile verilmiştir.



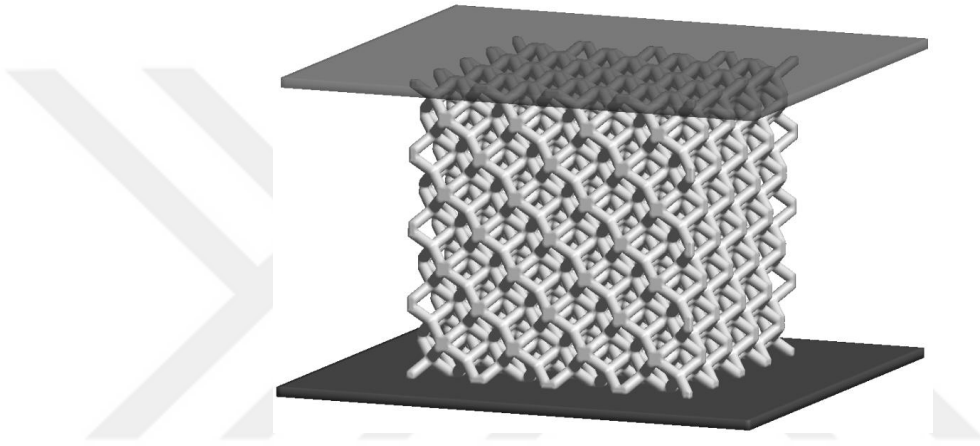
Şekil 3.18. RD kafes yapı tasarım ve üretim çapları

Çizelge 3.10. Metal kafes yapılar tasarım ve üretim çapı değerleri

Kafes yapı	Tasarım kiriş çapı	Üretim sonrası kütleden hesaplanan kiriş çapı
Eşkenar dörtgensel on iki yüzlü (RD)	1,22 mm	1,15 mm
Dikme ile güçlendirilmiş yüzey merkezli kübik (FCCZ)	1,8 mm	1,74 mm
RDFC hibrit kafes yapı	1,02 mm	0,97 mm

Analiz modelinin hazırlanması

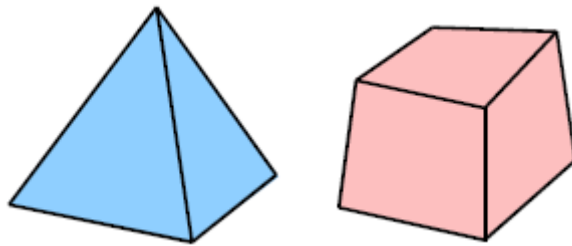
Catia V5R19 bilgisayar destekli tasarım yazılımında kafes yapılara ek olarak basma test cihazında bulunan plakaları benzetecek şekilde 50x50 mm boyutlarında ve 1 mm kalınlığında plakalar tasarlanmıştır. Test başlangıcında olduğu gibi iki plaka arasına kafes yapı yerleştirilerek montaj dosyası haline getirilmiş ve katı model .stp dosya formatında kaydedilmiştir (Şekil 3.19). Sonrasında LS-PrePost yazılımında içe aktararak analiz modeli kurulmuştur. LS-PrePost yazılımı, analiz öncesi modelin oluşturulduğu ve çözüm sonrasında verilerin işlendiği bir arayüzdür.



Şekil 3.19. RD kafes yapı analizi için hazırlanan örnek katı model

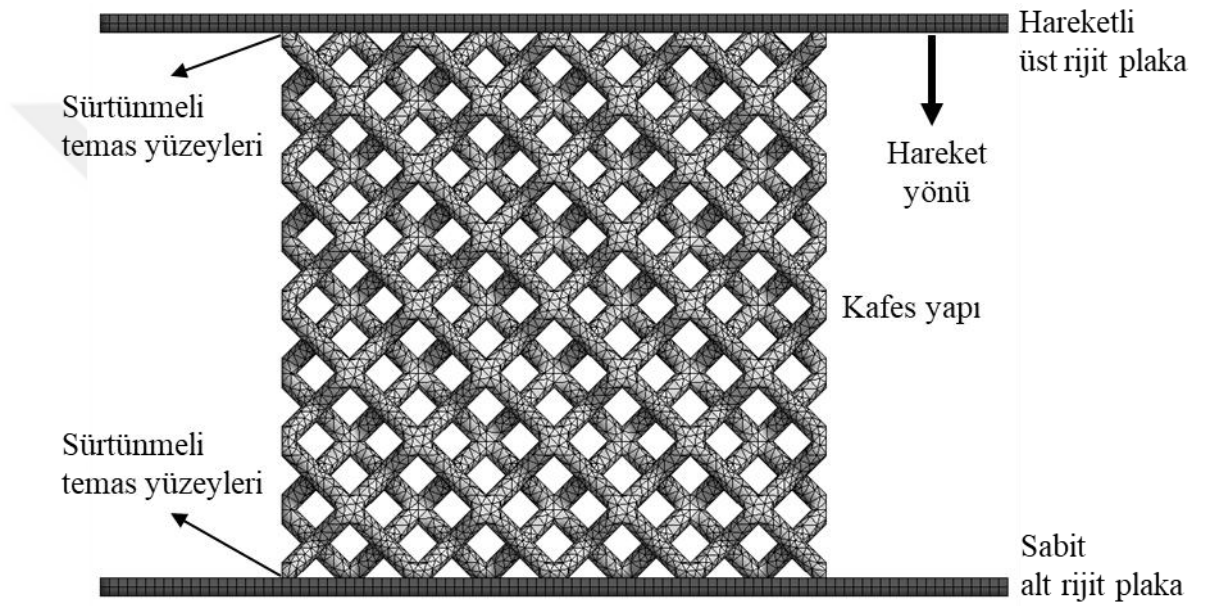
Sınır koşulları ve ağ (mesh) yapısının oluşturulması

Analiz modelinin (Şekil 3.21) hazırlanmasında en önemli adımlardan birisi, ağ yapısının oluşturulmasıdır. Ağ yapısı LS-PrePost yazılımı kullanılarak, kafes yapılarda, dört ve on düğüm noktalı (4node ve 10node) dört yüzlü (tetrahedron) katı elemanlar ile oluşturulmuştur. Basma plakalarında ise sekiz düğüm noktalı altı yüzlü (hexahedron) katı eleman tipi kullanılmıştır (Şekil 3.20).



Şekil 3.20. Dört yüzlü (tetrahedron) ve altı yüzlü (hexahedron) elemanlar

Kafes yapı şekil değiştirebilir, basma plakaları ise rijit olarak tanımlanmıştır. Test cihazında olduğu gibi, alt rijit plaka sabit olup, üst rijit plakaya hareket verilmiştir. Üst rijit plakanın hızı sabit 1000 mm/s olarak atanmıştır. Kafes yapının ezilmesi esnasında kirişlerin temas ederek birbiri üzerinde kayarak hareket edeceği durum için “CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE” kontak kartı tanımlanmıştır ve sürtünme katsayısı 0,36 alınmıştır. Üst ve alt rijit plakalar ile kafes yapının temas ettiği yüzeyler arasında ise “CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE” kontak kartı tanımlanmış ve sürtünme katsayısı 0,2 alınmıştır.



Şekil 3.21. RD kafes yapı örnek nümerik analiz modeli ve ağ yapısı

Malzeme modeli

Kafes yapılar ve basma plakaları için farklı malzeme kartları kullanılmıştır. Kafes yapı için “MAT24_PIECEWISE_ LINEAR_ PLASTICITY” lineer plastisite malzeme kartı kullanılmıştır. Inconel 718 malzemenin Şekil 3.14’de verilen çekme testi sonuçlarından Z-T2 numaralı numuneye ait test verileri kullanılarak Çizelge 3.11’de verilen malzeme kartı oluşturulmuştur. Ayrıca akma sonrası plastik bölgeyi tanımlamak için, MAT24 malzeme kartına girilmesi gereken gerçek gerilme-plastik birim şekil değiştirme eğrisi aşağıda verilen denklemlerle hesaplanarak malzeme kartına tanımlanmıştır. Bu hesaplar sonucunda elde edilen veriler Şekil 3.22 ve Çizelge 3.12’de verilmiştir.

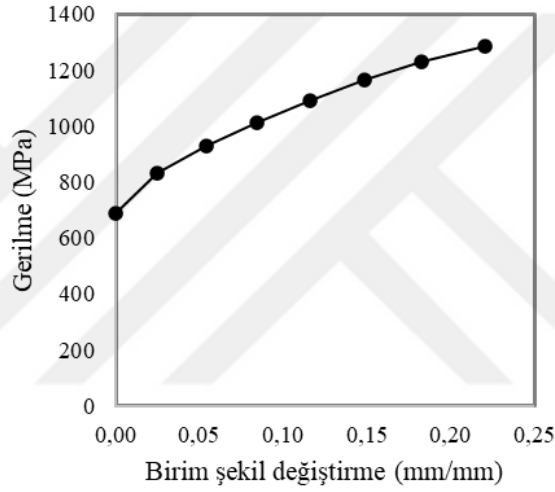
Çizelge 3.11. Inconel 718 malzeme mekanik özellikleri

Yoğunluk	Elastisite Modülü	Poisson Oranı	Akma Mukavemeti
8,19 g/cm ³	125 GPa	0,3	683 MPa

Gerçek birim şekil değiştirme; $\varepsilon_t = \ln(1 + \varepsilon)$ 3.1

Gerçek gerilme; $\sigma_t = \sigma * (1 + \varepsilon)$ 3.2

Plastik bölge birim şekil değiştirme; $\varepsilon_p = \varepsilon_t - \left(\frac{\sigma_t}{E}\right)$ 3.3



Şekil 3.22. Inconel 718 gerçek gerilme-plastik birim şekil değiştirme eğrisi

Çizelge 3.12. Inconel 718 gerçek gerilme- plastik birim şekil değiştirme değerleri

ε_p	0	0,0249	0,0538	0,0841	0,1155	0,1481	0,1822	0,2206
σ_t	688,60	833,49	929,94	1014,14	1092,00	1163,54	1227,98	1286,92

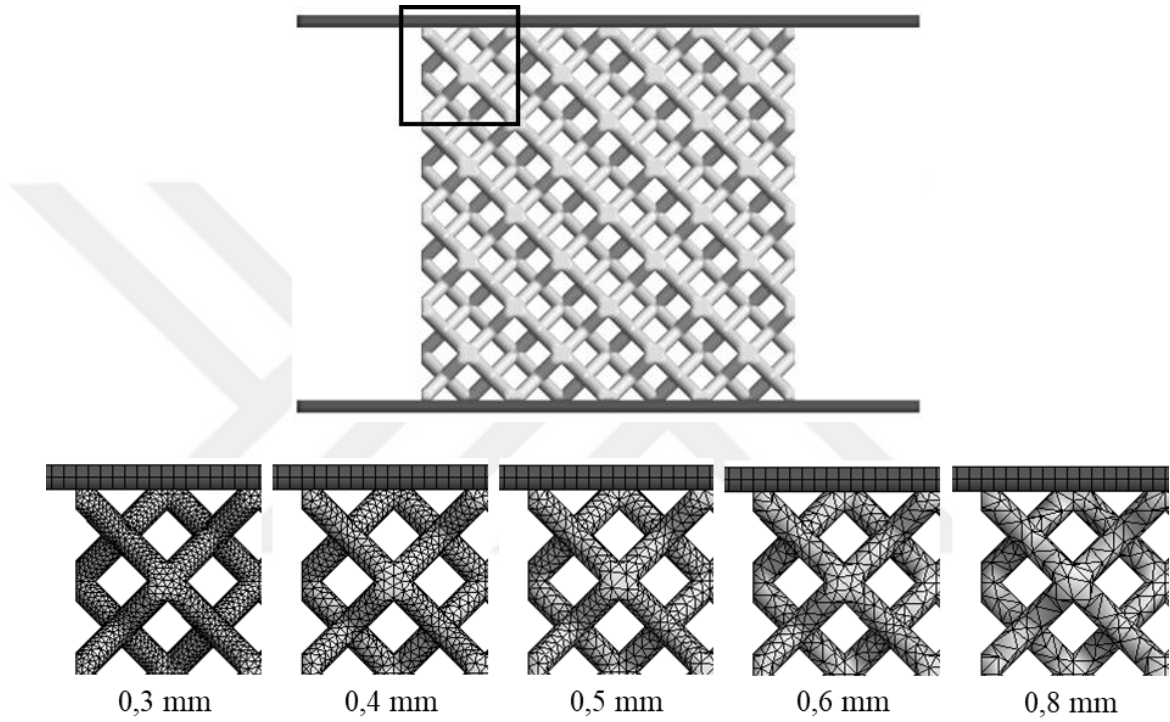
Sabit ve hareketli rijit plakalar için “MAT20_RIGID” rijit malzeme kartı kullanılmıştır. Malzeme özellikleri Çizelge 3.13’te verilmiştir.

Çizelge 3.13. Rijit plaka malzeme özellikleri

Yoğunluk	Elastisite Modülü	Poisson Oranı
7,85 g/cm ³	200 GPa	0,3

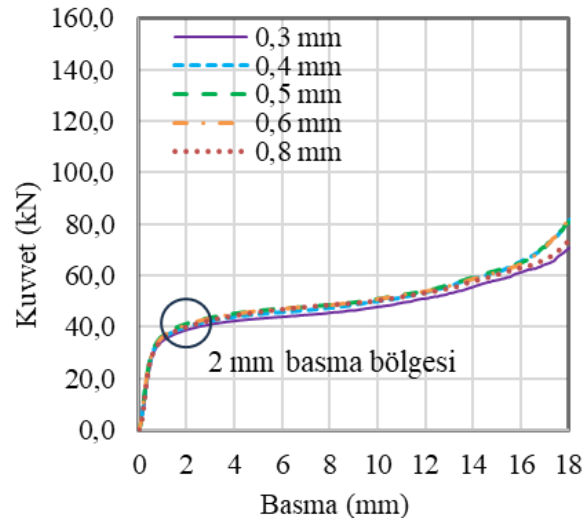
Ağ yapısı hassasiyet analizi

Üç farklı kafes yapıya ait analiz modellerinin oluşturulmasından önce eşkenar dörtgensel on iki yüzlü (RD) kafes yapı tasarımıyla ağ yapısı hassasiyet analizi yapılarak, eleman boyutlarının analiz sonuçlarına etkisi incelenmiştir. Bu çalışma için Şekil 3.23’de gösterildiği gibi 0,3, 0,4, 0,5, 0,6 ve 0,8 mm boyutlarında elemanlar ile oluşturulan ağ yapısı ile aynı sınır koşullarında analiz çalışması yapılmıştır.

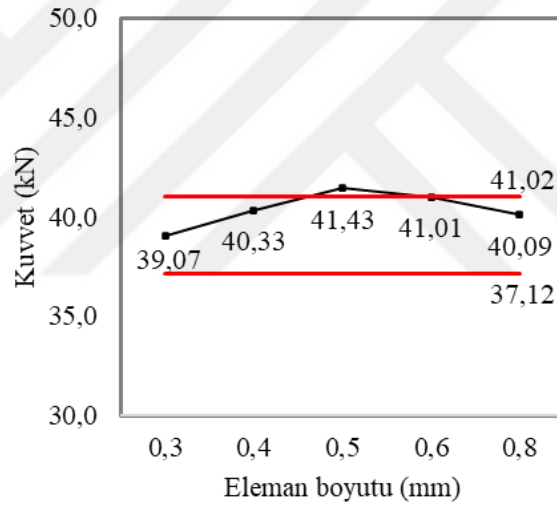


Şekil 3.23. RD kafes yapı için farklı eleman boyutları görünümü

Analiz çalışmalarının tamamlanmasıyla, 5 farklı eleman boyutu için Şekil 3.24’te verilen kuvvet-basma grafikleri elde edilmiştir. Bu grafikler değerlendirildiğinde, eğrilerin birbiri ile örtüştüğü ve kiriş çapından daha küçük eleman boyutlarının kullanılabilir olduğu görülmektedir. Ayrıca kafes yapının 2 mm basma durumunda Şekil 3.25’te gösterilen değerler incelendiğinde, 0,3 mm eleman boyutunun gerçeğe en yakın sonuçları vereceği düşünüldüğü; bu boyutta alınan kuvvet değerinin %5 aşağısı ve yukarısı içerisinde kalacak bir değer kabul edilebilir olduğu değerlendirilmiştir. Hesaplama süreleri göz önüne alınarak RD kafes yapı için 0,6 mm eleman boyutu ile analizlere devam edilmiştir. FC kafes yapı için 0,7 mm, RDFC kafes yapı için ise 0,6 mm eleman boyutları olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.24. Eleman boyutlarına göre SEA kuvvet-basma eğrileri

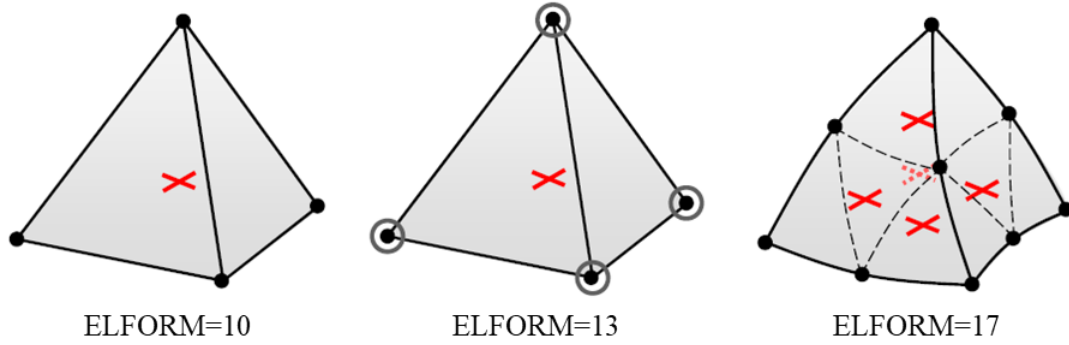


Şekil 3.25. 2 mm basma durumu için farklı eleman boyutlarında kuvvet değerleri

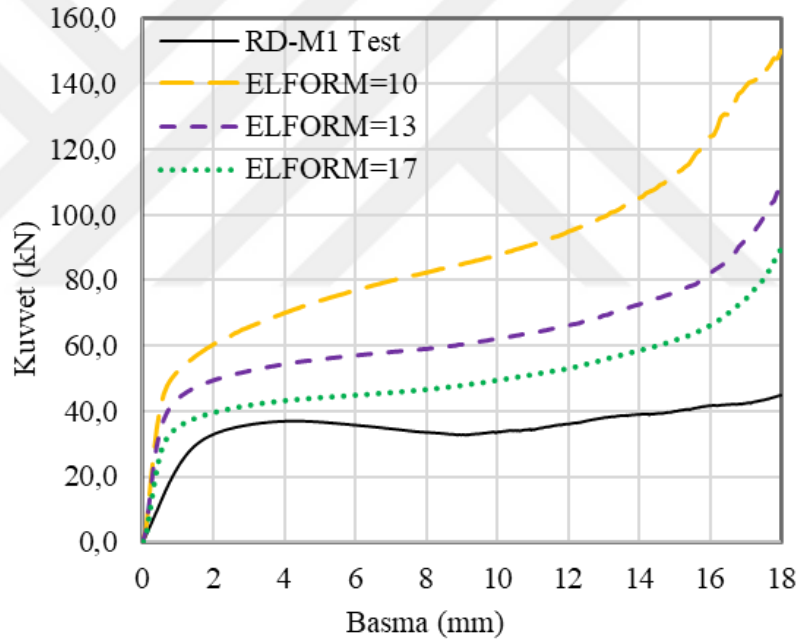
Eleman formülasyonu etkisinin incelenmesi

Eleman boyutunun etkisi belirlendikten sonra, kafes yapı ağ yapısını oluşturan dört yüzlü katı elemanların formülasyonlarının etkisi incelenmiştir. “SECTION_SOLID” kartı ile atanan eleman formülasyonlarında, dört düğüm noktalı elemanlar için “ELFORM=10” ve “ELFORM=13”, on düğüm noktalı elemanlar için ise “ELFORM=17” değerleri alınarak RD kafes yapı basma testi değerleri ile karşılaştırılmıştır (Şekil 3.26). Erhart (2011) tarafından yapılan karşılaştırmada “ELFORM=10” formülasyonunda elemanın bir noktasından gerilme okunması ve rijit davranması sebebiyle tavsiye edilmediğini belirtmiştir. “ELFORM=13” ve “ELFORM=17” eleman formülasyonları

karşılaştırıldığında ise, on düğüm noktalı elemanlar için kullanılan “ELFORM=17” formülasyonunun çözüm hızlarının yavaş olmasına rağmen test değerlerine en yakın sonuçları verdiği görülmüştür (Şekil 3.27).



Şekil 3.26. Eleman formülasyonları gösterimi



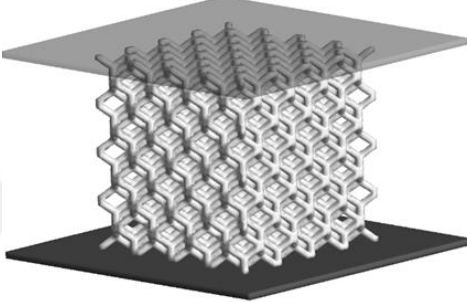
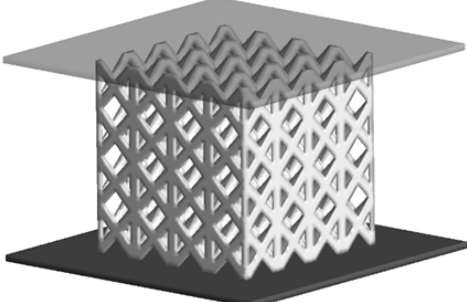
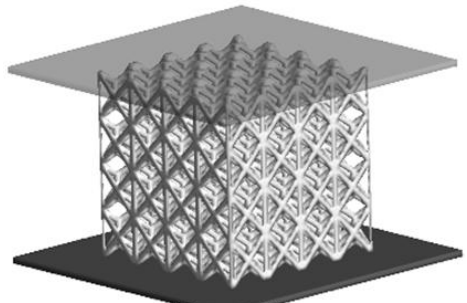
Şekil 3.27. Eleman formülasyonlarına göre SEA kuvvet-basma eğrileri

Analiz modellerinin kurulması sonrasında hesaplama sürelerinin uzun sürmesi sebebiyle modellere “CONTROL_TIMESTEP” kontrol kartı altında “DT2MSLC” bölümünden kütle ölçeklendirme (mass scaling) eklenmiştir. Ayrıca hesaplama sürelerini azaltmak amacıyla basma hızı da artırılmıştır. Daha hızlı çözüm elde edilmesi amaçlanan bu durumların kabul görmesi için analiz verilerinde kinetik enerji değerinin toplam enerjinin %5’ini geçmemesi ve rijit plakalarda aynı tepki kuvvetlerinin oluştuğunun görülmesi gereklidir (Bora vd., 2023; Han vd., 2024).

Sonlu elemanlar analizi modelleri

Yukarıda verilen bilgiler doğrultusunda oluşturulan SEA modellerine ait görseller ve temel bilgiler aşağıda verilmektedir.

Çizelge 3.14. SEA modelleri

Kafes yapısı	Eleman boyutu (mm)	Kiriş çapı (mm)	Hata kriteri	Görsel
RD-M1	0,6 mm	1,22	Yok	
		1,22	0,7	
		1,15	Yok	
		1,15	0,7	
FC-M1	0,7 mm	1,8	Yok	
		1,8	0,7	
		1,74	Yok	
		1,74	0,35	
		1,74	0,7	
RDFC-M1	0,6 mm	1,74	1,05	
		1,02	Yok	
		1,02	0,7	
		0,97	Yok	
		0,97	0,7	

4. BULGULAR

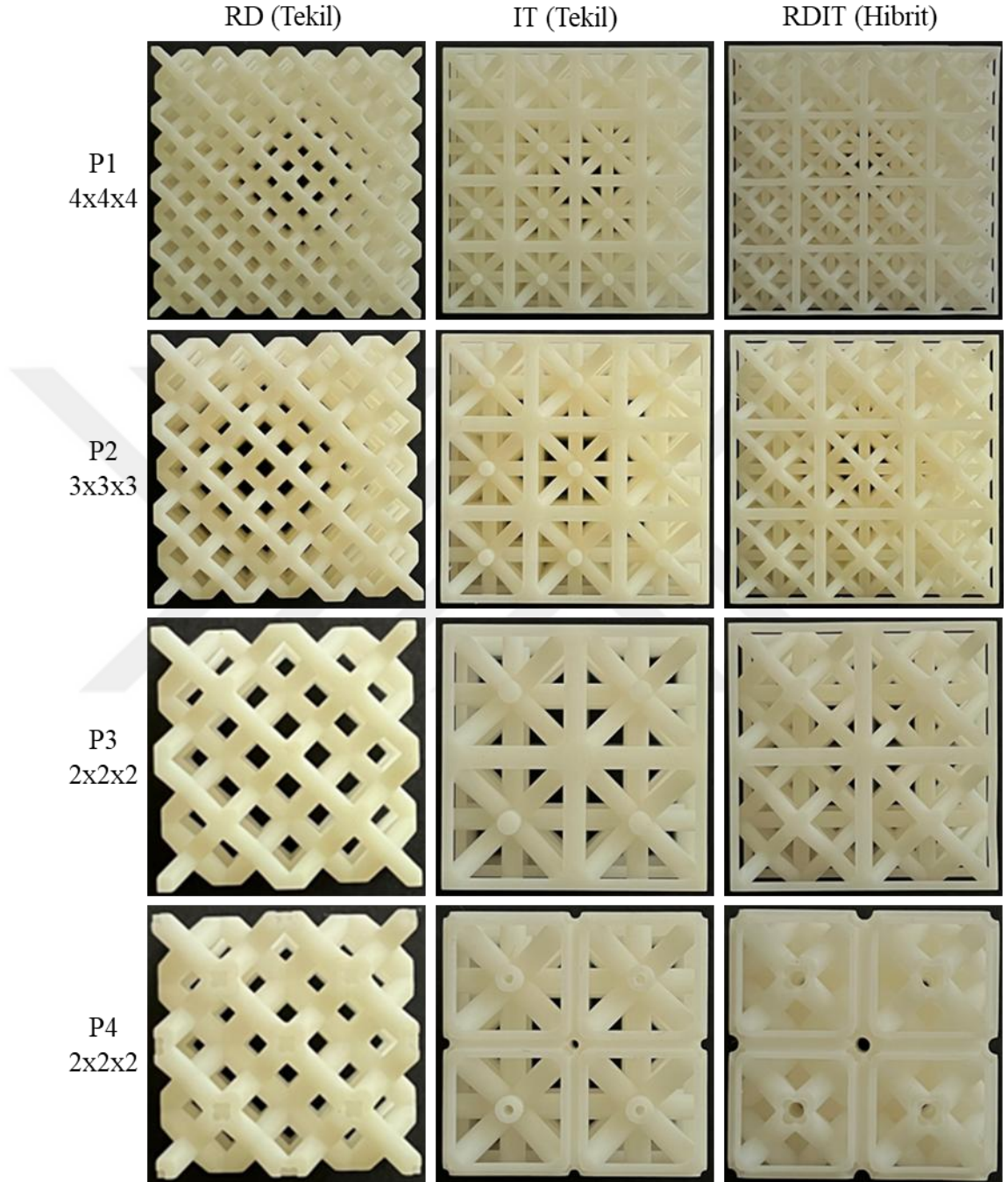
Kafes yapı tasarım ve üretim çalışmasının ardından, test çalışmaları tamamlanmıştır. Bu bölümde test çalışması öncesinde, bilgisayar ortamında hatasız tasarlanan kafes yapılar ile üretilen kafes yapılar arasındaki kütle ve giriş çapı farkları incelenmiştir. Test ve analiz çalışmaları sonuçlarının değerlendirilmesi ve karşılaştırması yapılmıştır. Aynı bağıl yoğunluğa sahip polimer kafes yapıların basma testleri, yine aynı bağıl yoğunlukta tasarlanan metal kafes yapıların test ve analiz çalışmaları sonrasında, elde edilen kuvvet-basma verileri kullanılarak aşağıdaki araştırmalar yapılmıştır.

- Kafes yapıların kuvvet-basma ve gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri oluşturularak, toplam soğurduğu enerji (TSE) ve elastisite modülleri hesaplanmış ve ezilme mekanizmaları incelenmiştir.
- Aynı bağıl yoğunlukta tasarlanmış tekil ve hibrit kafes yapılarda, hibrit tasarımın etkileri değerlendirilmiştir.
- Farklı tasarımlara sahip tekil ve hibrit kafes yapıların mekanik özelliklerine, birim hücre boyutu ve sayısının etkisi araştırılmıştır.
- Eşit birim hücre boyutuna ve sayısına sahip polimer kafes yapılar için içi dolu ve boş giriş yapısının mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir.
- Aynı tasarım ve bağıl yoğunluğa sahip polimer ve metal kafes yapıların basma testi sonrasında mekanik davranışları incelenmiştir.
- Inconel 718 malzemeden üretilmiş metal kafes yapıların LS-DYNA sonlu elemanlar yazılımında gerçekleştirilen analiz çalışmaları sonucunda toplanan kuvvet-basma verileri ile test sonuçları karşılaştırılmıştır. Gerçek test şartları ve bilgisayar ortamında oluşturulan analiz çalışmaları ile elde edilen ezilme davranışları incelenmiştir.

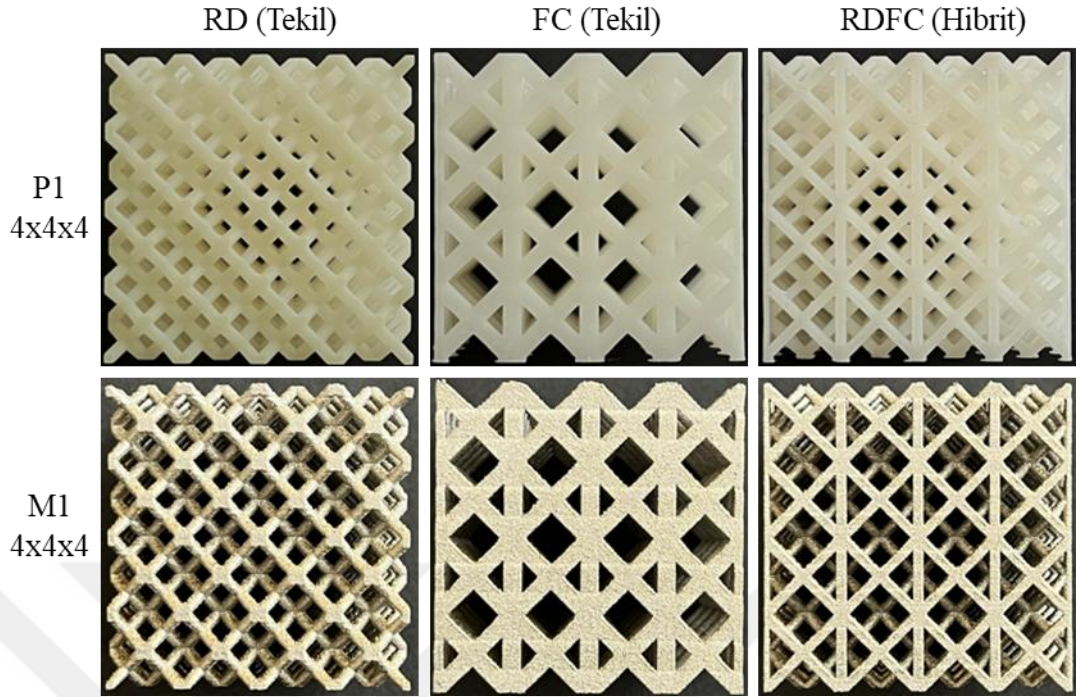
4.1. Test Numunelerinin Üretim Sonrası Değerlendirilmesi

Bu bölümde, üretimi tamamlanan kafes yapıların test çalışmaları öncesinde kütle ve giriş çapı ölçülerek tasarım ve üretim arasındaki farklılıklar belirlenmiştir. Test numunelerinin

üretimleri tamamlandıktan sonra kafes yapıların fotoğrafları çekilmiştir. Görseller Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de verilmiştir.

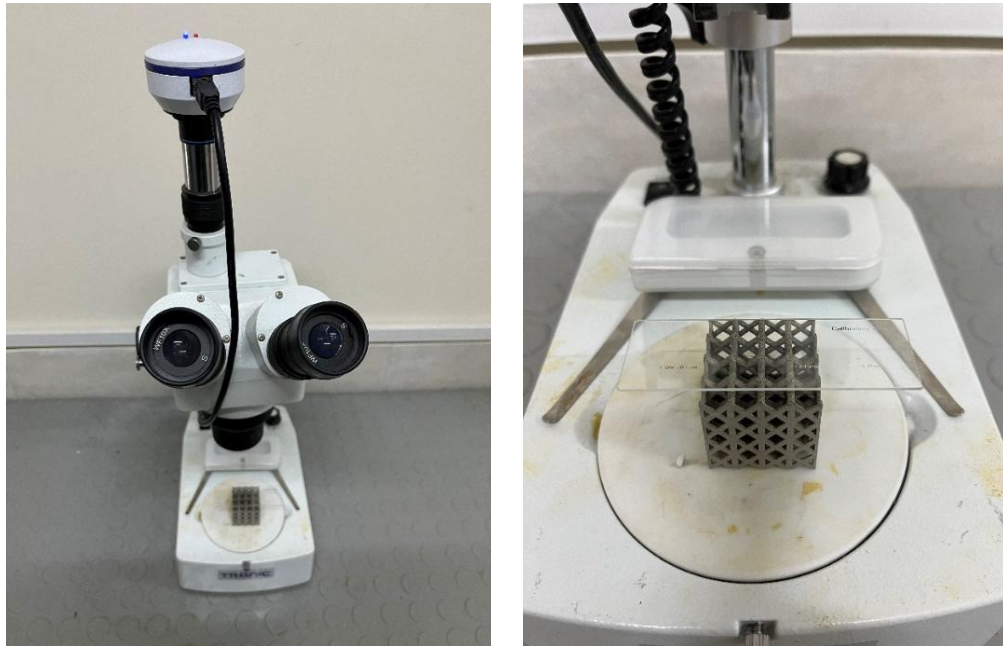


Şekil 4.1. Üretilmiş RD, IT ve RDIT polimer (P) kafes yapılar

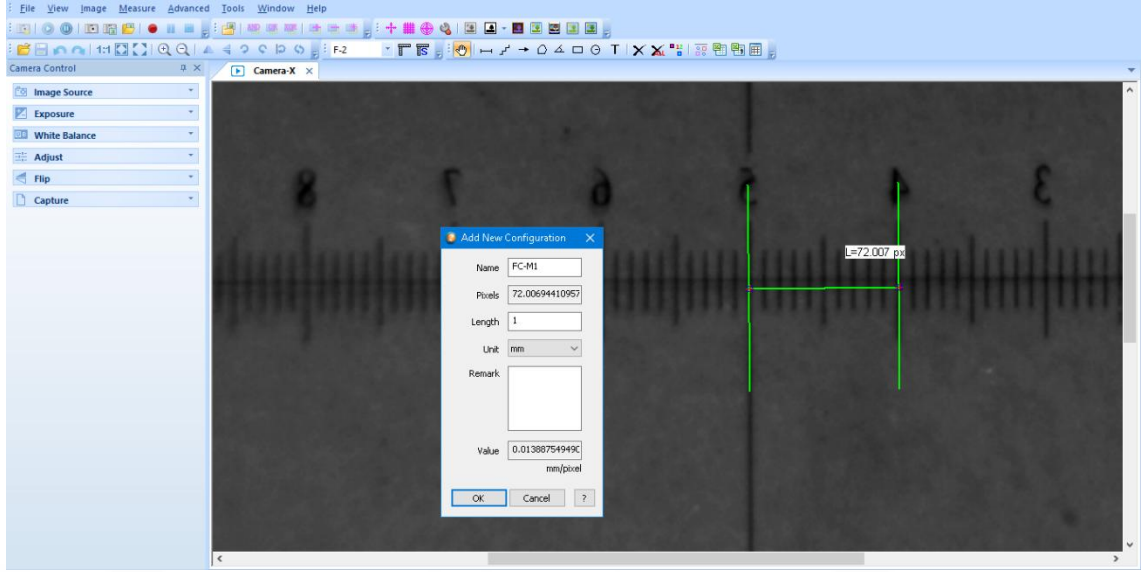


Şekil 4.2. Üretilmiş RD, FC ve RDFC polimer (P) ve metal (M) kafes yapılar

Kafes yapı giriş çaplarının ölçülmesi için Şekil 4.3 ile gösterilen Tronic marka stereo mikroskop kullanılmıştır. Mikroskopta ölçek kalibrasyonu yapılması için her bir bölmesi 100 μm olan bir kalibrasyon bloğu kullanılır ve Şekil 4.4'te belirlenen ölçek 1 mm'lik ölçüyü belirtmektedir.

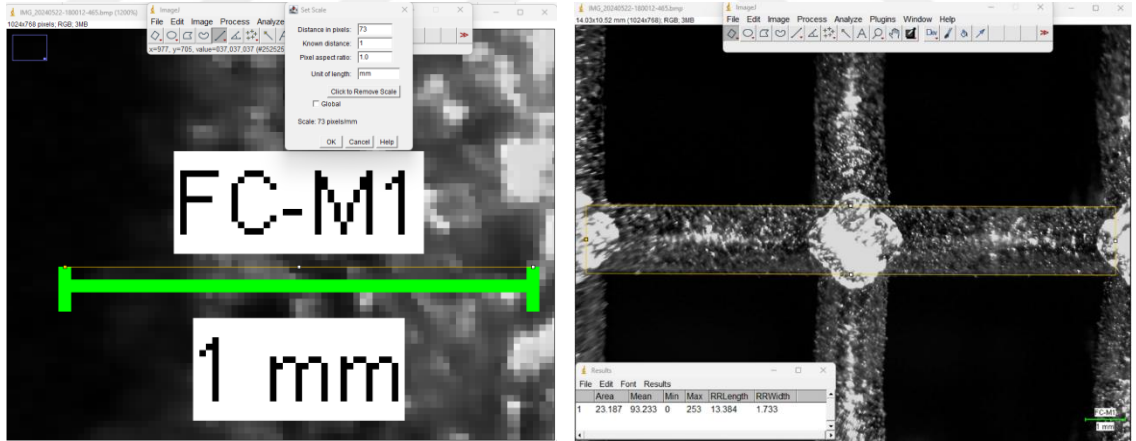


Şekil 4.3. Stereo mikroskop, ölçüm numunesi ve kalibrasyon bloğu



Şekil 4.4. Stereo mikroskop ölçek kalibrasyonu

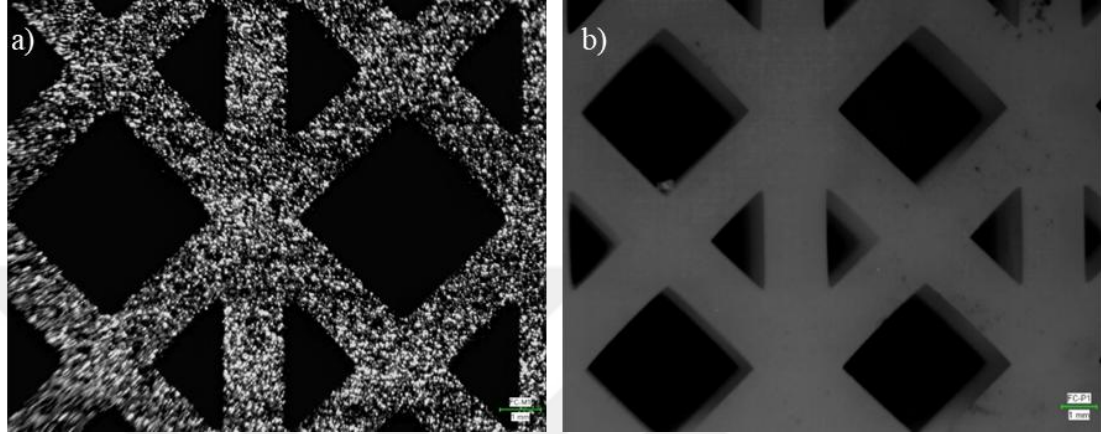
Mikroskoptan alınan görüntüler kullanılarak, kafes yapı kiriş çaplarının değerlendirilmesi “Image J” görsel değerlendirme yazılımı ile yapılmıştır. Görüntü üzerinde bulunan ölçekle 1 mm ölçüsünün piksel olarak değeri belirlenir ve ölçek ayarlanır. Sonrasında kiriş çapı ölçülür (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. Stereomikroskop verisinin Image J yazılımı ile ölçüm yöntemi

Ölçümler öncesinde mikroskop görüntüleri incelendiğinde kiriş yüzeylerinde üretime bağlı olarak özellikle metal kafes yapılarda ergimemiş toz kalıntıları olduğu görülmüştür. Reçineden LCD yöntemi ile üretilen kafes yapıların ise kiriş yüzey kalitelerinin daha iyi olduğu görülmektedir (Şekil 4.6). Ölçülen kiriş çapları, katı modelden alınan ölçüler ile karşılaştırılmıştır. Polimer kafes yapıların ölçümleri incelendiğinde en büyük hata değerinin %4,84, en küçük hata değerinin ise %0,4 olduğu görülmektedir. Bununla

birlikte polimer kafes yapılardan 4x4x4 ve 3x3x3 diziliminde olanların kiriş çapları daha büyüktür, 2x2x2 diziliminde olanlarda ise kiriş çaplarının daha küçük olduğu görülmektedir (Çizelge 4.1). Metal kafes yapıların Çizelge 4.2’de verilen ölçümlerine bakıldığında ise üretim sonrası kiriş çapları tasarım çaplarından daha küçük olduğu görülmektedir.



Şekil 4.6. Stereomikroskop görüntüleri a) FC-M1 b) FC-P1

Çizelge 4.1. Polimer kafes yapıların stereomikroskop ile ölçüm sonuçları

Kafes yapısı	Tasarım çapı (mm)	Ölçülen çap (mm)	Hata (%)
RD-P1	1,22	1,246	(+) 2,13
RD-P2	1,63	1,647	(+) 1,04
RD-P3	2,46	2,416	(-) 1,79
RD-P4	3	2,959	(-) 1,37
IT-P1	1,25	1,306	(+) 4,48
IT-P2	1,67	1,707	(+) 2,22
IT-P3	2,52	2,429	(-) 3,61
IT-P4	3	2,966	(-) 1,13
RDIT-P1	0,95	0,976	(+) 2,74
RDIT-P2	1,25	1,298	(+) 3,84
RDIT-P3	1,9	1,808	(-) 4,84
RDIT-P4	3	2,988	(-) 0,40
FC-P1	1,8	1,862	(+) 3,44
RDFC-P1	1,02	1,062	(+) 4,12

Çizelge 4.2. Metal kafes yapıların stereomikroskop ile ölçüm sonuçları

Kafes yapı	Tasarım çapı (mm)	Ölçülen çap (mm)	Hata (%)
RD-M1	1,22	1,179	(-) 3,36
FC-M1	1,8	1,733	(-) 3,72
RDFC-M1	1,02	0,993	(-) 2,65

Test numunelerinin kütleleri 0,01 g çözünürlüğünde hassas terazi ile ölçülerek kayıt altına alınmıştır (Şekil 4.7). Kafes yapıların tasarım kütlesi Catia V5R19 (Dassault System) bilgisayar destekli tasarım yazılımı kullanılarak katı modeller ile hesaplanmıştır. Hesaplamalarda, malzeme özkütleleri ABS benzeri reçineden üretilmiş polimer yapılar için 1,25 g/cm³ ve Inconel 718 metal tozundan üretilmiş yapılar için 8,19 g/cm³ alınmıştır.



Şekil 4.7. Hassas terazide kafes yapı kütle ölçümü

Çizelge 4.3'te verilen polimer kafes yapı kütle ölçümleri incelendiğinde, ölçümlerin tasarım kütesinden daha fazla olduğu görülmüştür. Yazıcı hassasiyetinin yanı sıra, üretim sonrası kiriş yüzeylerinde kalan ve kürlenmeyen reçinelerin alkol ile yıkanmasına rağmen kiriş yüzeylerinden uzaklaştırılamaması sebebiyle bu durumun oluştuğu söylenebilir. 4x4x4 dizilimindeki kafes yapıyı oluşturan toplam kiriş sayısı, 3x3x3 ve 2x2x2 kafes yapılarda bulunan kiriş sayısından daha fazla olduğu için hata paylarının daha yüksek olması beklenir. Ayrıca 4x4x4 dizilimde olan farklı tipteki P1 kafes yapıları ile 2x2x2 diziliminde olan içi boş kirişlerden oluşan P4 kafes yapıların toplam yüzey alanı diğerlerine göre daha büyük olduğu için kütleleri daha fazladır.

Çizelge 4.3. Polimer kafes yapı test numunelerinin tasarım ve ölçüm kütleleri

Kafes yapı	Tasarım kütlesi (g)	Ölçülen kütle (g)	Tasarım yüzey alanı (mm ²)	Hata (%)
RD-P1	7,58	7,78	17610,23	(+) 2,6
RD-P2	7,61	7,69	13352,71	(+) 1,0
RD-P3	7,69	7,70	9108,15	(+) 0,1
RD-P4	7,55	8,11	16158,17	(+) 6,9
IT-P1	7,58	7,81	18714,63	(+) 2,9
IT-P2	7,61	7,71	14498,96	(+) 1,3
IT-P3	7,69	7,78	10299,63	(+) 1,1
IT-P4	7,72	8,15	16055,97	(+) 5,3
RDIT-P1	7,41	8,01	23743,33	(+) 3,6
RDIT-P2	7,75	7,75	18037,14	(+) 2,6
RDIT-P3	7,42	7,92	12594,70	(+) 2,5
RDIT-P4	7,34	8,49	24780,43	(+) 9,9
FC-P1	7,63	8,05	13939,74	(+) 5,2
RDFC-P1	7,57	8,31	18915,20	(+) 8,9

Çizelge 4.4 ile verilen metal kafes yapılara ait ölçümlerde ise, kiriş çaplarının daha küçük olması ve seçici lazer ergitme ile üretilen yapıların gözenekli kiriş iç yapısından dolayı, üretilmiş numune kütlelerinin tasarım kütlesinden daha hafif olmasına sebep olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 4.4. Metal kafes yapı test numunelerinin tasarım ve ölçüm kütleleri

Kafes yapı	Tasarım kütlesi (g)	Ölçülen kütle (g)	Hata (%)
RD-M1	49,69	44,51	(-) 11,6
FC-M1	49,97	47,05	(-) 6,6
RDFC-M1	49,60	45,21	(-) 9,7

4.2. Basma Testi Sonuçları

Basma testi çalışmalarında ABS benzeri reçineden ve Inconel 718 malzemeden üretilen 17 farklı kafes yapı ve her bir kafes yapı tipinden 3 adet numune T1, T2 ve T3 olarak adlandırılmış ve aynı test koşullarında test edilmiştir. 30 mm yüksekliğindeki kafes yapıların sırasıyla basma başlangıcından (0 mm), 6 mm (%20), 12 mm (%40) ve 18 mm (%60) ezildiği durumlar için oluşturulan görsellerle kafes yapıların ezilme mekanizmaları incelenmiştir. Test cihazı yük hücresinden okunan kuvvet değerleri ve basma miktarı ile grafikler oluşturulmuştur. Kuvvet-basma grafiğinin altında kalan alan hesaplanarak TSE değerlerine ulaşılmıştır. 30 mm x 30 mm x 30 mm boyutlarında tasarlanan kafes yapıların basma yüzey alanı 900 mm² alınarak gerilme değerleri hesaplanmış ve gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri oluşturulmuştur. Bu grafikler kullanılarak kafes yapıların elastisite modülleri hesaplanmıştır. Testlere ait görseller ve grafikler, EK-1 Test Çalışmaları başlığı altında Ek Şekil 1 ile Ek Şekil 17 aralığındaki şekillerde verilmiştir.

Test sonuçlarına bakıldığında; tüm kafes yapılar için tekrarlı gerçekleştirilen üç test verisinin birbirine yakın olduğu söylenebilir. Ancak Ek Şekil 4'te verilen RD-P2 T1 ve T2 testleri; Ek Şekil 7'de verilen T2 ve T3 testleri ve Ek Şekil 8'de verilen T2 numaralı testlerde ezilme esnasında kırılan yapılardan dolayı süreksizlik oluşmuş ve kuvvet değerleri sıfıra indiği için test cihazı durdurulmuştur. Polimer kafes yapıların yüksek kırılmalıkları sebebiyle bu durumların oluştuğu söylenebilir.

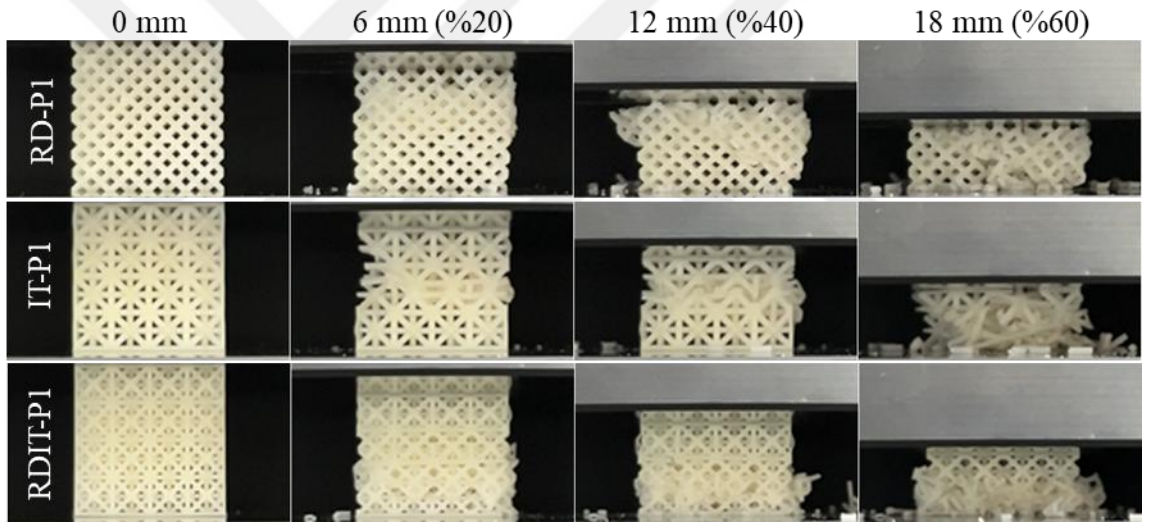
Her bir kafes yapı tipinde T1, T2 ve T3 numuneleri ile yapılan 3 adet test sonucunda, en yüksek enerji soğuran yapının verileri diğer kafes yapılarla karşılaştırma için kullanılmıştır. Bu bölümde farklı karşılaştırma kriterlerine göre elde edilen sonuçlar verilmektedir. Her bir karşılaştırma kriteri alt başlıklar halinde verilerek ezilme mekanizmaları ve gerilme-birim şekil değiştirme, toplam soğurulan enerji ve elastisite modül değerleri karşılaştırılmaktadır.

Hibrit ve tekil kafes yapıların mekanik özelliklerinin karşılaştırılması

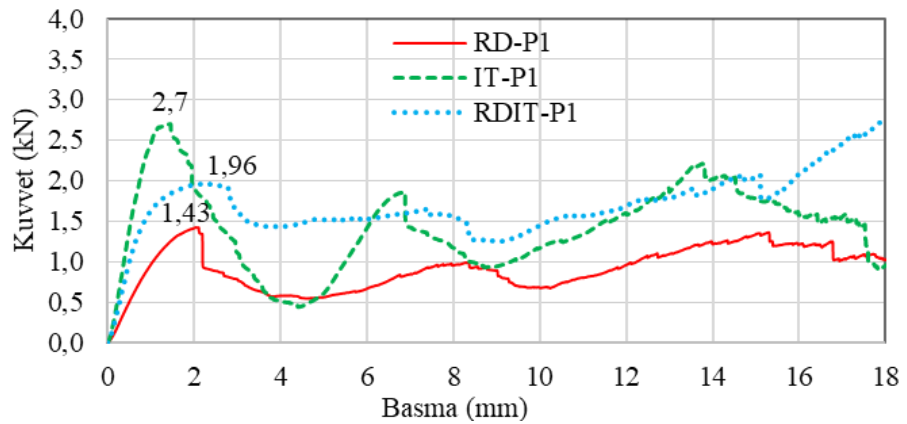
Polimer kafes yapılardan, 4x4x4 hücre diziliminde olan RD-P1 (d=1,22 mm), IT-P1 (d=1,25) ve hibrit RDIT-P1 (d=0,95 mm) yapılarının Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da verilen test sonuçları ve ezilme davranışlarına bakıldığında, 30,54 J ile en yüksek enerjiyi hibrit RDIT-P1 soğurmuştur. IT-P1 kafes yapısı 25,61 J ile hibrit yapının yaklaşık %84'ü, RD-

P1 16,5 J ile hibrit yapının yaklaşık %54'ü kadar enerji soğurmuştur. Ezilme davranışlarına bakıldığında malzemenin gevrek yapısından dolayı tüm kafes yapılarda basma miktarı arttıkça kırılmalar gerçekleşmiştir. Ancak hibrit yapının akma sonrası plato bölgesinde diğer tekil kafes yapılara göre hem kuvvet-basma grafiği hem de ezilme davranışına bakarak daha kararlı olduğu söylenebilir.

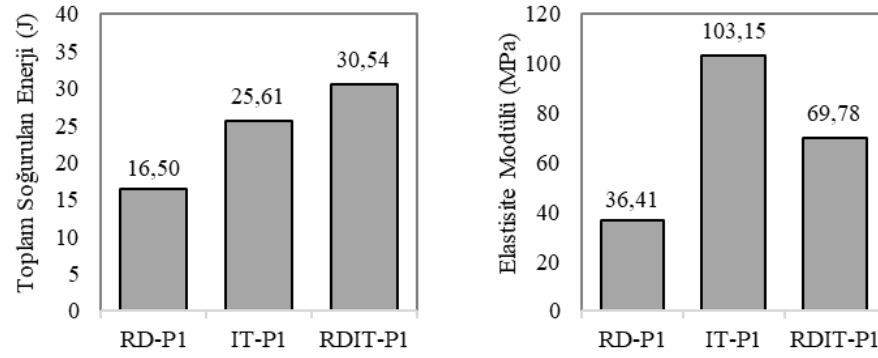
Akma bölgesinde 2,7 kN ile en yüksek kuvvet değeri IT-P1 yapısında görülmüştür. Bu değer RDIT-P1 numunesinde 1,96 kN ve RD-P1 yapısında 1,43 kN olarak belirlenmiştir. Elastisite modülünün en yüksek olduğu kafes yapı yine IT-P1 yapısı olup 103,15 MPa değerindedir. Bunun temel sebebi IT-P1 kafes yapısının gerinme baskın olması ve basma yönüne dik kirişlerin bulunması gösterilebilir. Bu durum kirişlerin burkulması sebebiyle kuvvetin hızlıca artıp sonrasında ani düşmesine neden olur.



Şekil 4.8. RD, IT ve RDIT 4x4x4 polimer kafes yapı ezilme davranışları



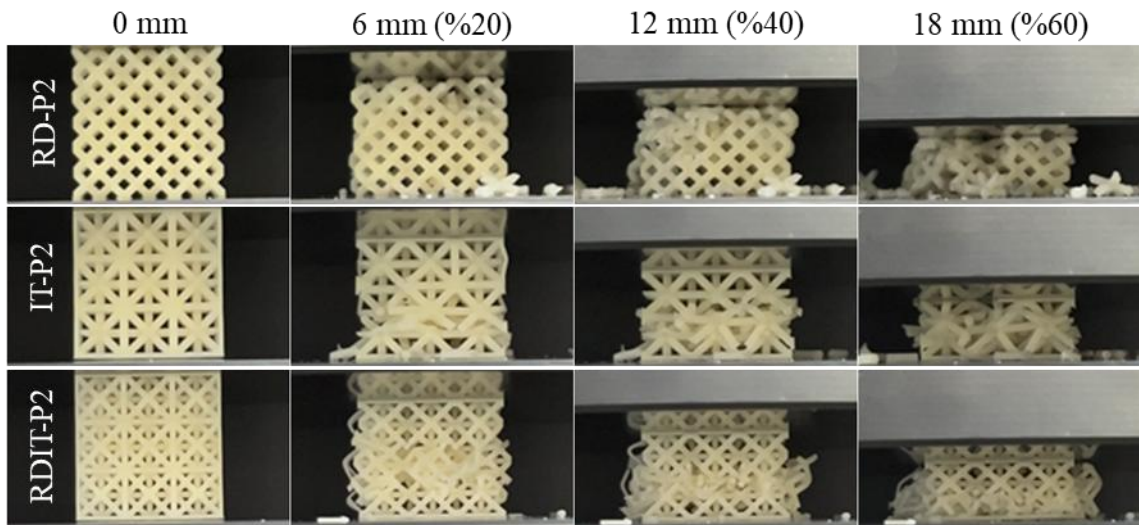
Şekil 4.9. RD, IT ve RDIT 4x4x4 polimer kafes yapı kuvvet- basma grafikleri



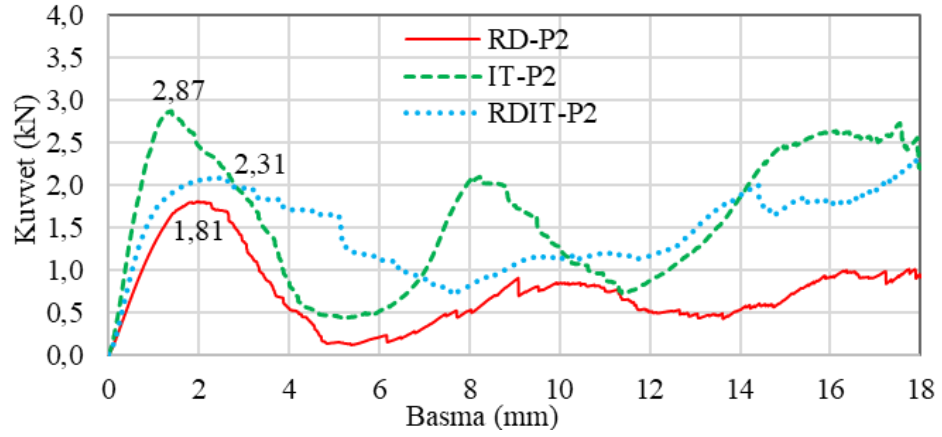
Şekil 4.10. RD, IT ve RDIT 4x4x4 polimer kafes yapı TSE ve E değerleri

3x3x3 hücre diziliminde tasarlanan RD-P2 ($d=1,63$ mm), IT-P2 ($d=1,67$ mm) ve RDIT-P2 ($d=1,25$ mm) kafes yapılarında, en yüksek TSE değeri IT-P2 kafes yapısında 28,73 J olarak hesaplanmıştır. RD-P2 kafes yapısı 13,14 J ve RDIT-P2 yapısı 26,37 J ile IT-P2 yapısının sırasıyla yaklaşık %45 ve %92'si kadar enerji soğurmuştur. Yukarıda verilen 4x4x4 diziliminde olduğu gibi akma bölgesi sonrasında plato bölgesinde en kararlı hibrit kafes yapının olduğu görülmektedir. Ancak IT-P2 yapısının en yüksek enerjiyi soğurması birim hücre boyutlarının artması sebebiyle daha ince kirişleri olan RDIT-P2 yapısında basma yönüne dik kirişlerin daha erken burkulmalarından kaynaklı olduğu düşünülebilir.

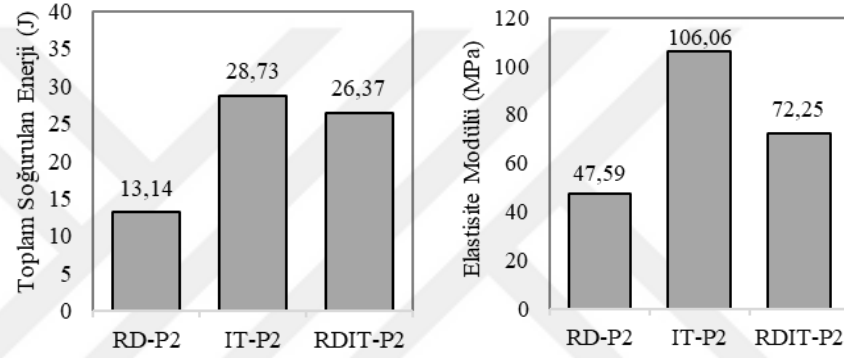
Akma bölgesinde 2,87 kN ile en yüksek kuvvet değeri IT-P2 yapısında görülmüştür. Bu değer RDIT-P2 numunesinde 2,31 kN ve RD-P2 yapısında 1,81 kN olarak belirlenmiştir. Elastisite modülünün en yüksek olduğu kafes yapı IT-P2 yapısı olup 106,06 MPa değerindedir.



Şekil 4.11. RD, IT ve RDIT 3x3x3 polimer kafes yapı ezilme davranışları



Şekil 4.12. RD, IT ve RDIT 3x3x3 polimer kafes yapı kuvvet-basma grafikleri

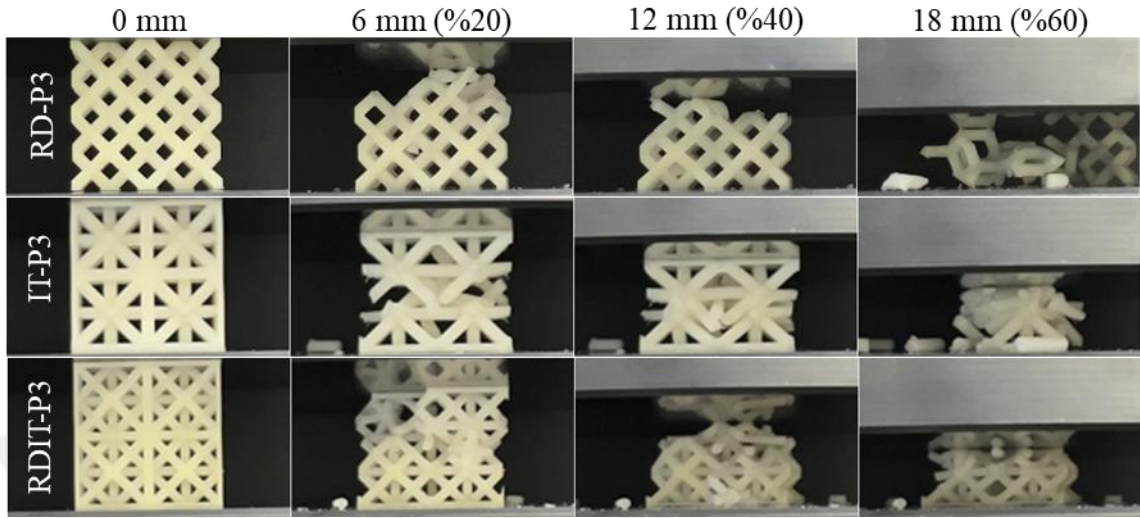


Şekil 4.13. RD, IT ve RDIT polimer kafes yapı TSE ve E değerleri

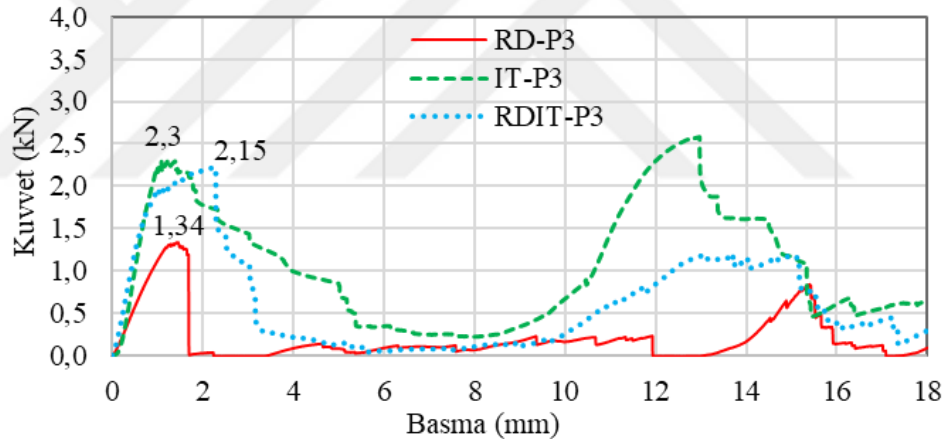
Hücre diziliminin 2x2x2 olduğu ve test sonuçları Şekil 4.15 ve Şekil 4.16’te verilen RD-P3 (d=2,46 mm), IT-P3 (d=2,52 mm) ve RDIT-P3 (d=1,9 mm) kafes yapılarında, en yüksek TSE değeri 19,07 değeri ile IT-P3 kafes yapısında gözlenmiştir. RD-P3 kafes yapısı 3,73 J ve RDIT-P3 yapısı 11,6 J ile IT-P3 yapısının sırasıyla yaklaşık %19 ve %60’ı kadar enerji soğurmuştur. IT-P3 ve RDIT-P3 kafes yapıları akma bölgesi sonrasında plato bölgesinde benzer davranışlar göstermiştir.

RD-P3 yapısında ise akma bölgesin sonrası kuvvet değeri neredeyse sıfıra düşmüştür. Akma bölgesinde en yüksek kuvvet değeri 2,3 kN IT-P3 yapısında görülmüştür. Bu değer RDIT-P3 kafes yapısında 2,15 kN ve RD-P3 yapısında ise 1,34 kN olarak belirlenmiştir. Elastisite modülünün en yüksek olduğu kafes yapı IT-P3 yapısı olup 104,44 MPa değerindedir. En düşük elastisite modülü değeri RD-P3 yapısındadır. Bu değer RD-P3 yapısında en düşük olmasının sebebi olarak yapının eğilme baskın bir yapı olması gösterilebilir. RDIT-P3 yapısının kiriş çapları RD-P3 yapısından düşük olmasına rağmen

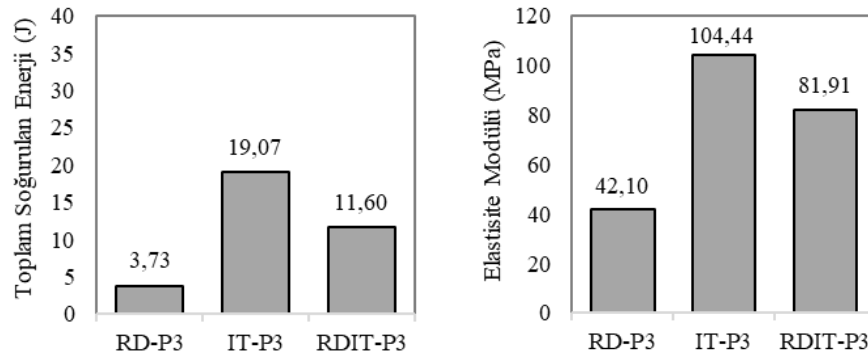
daha yüksek rijitlikte çıkması hibrit yapının oluşturduğu bir avantaj olup basma yönüne dik kirişler ile diğer kirişlerin desteklenmesidir.



Şekil 4.14. RD, IT ve RDIT 2x2x2 polimer kafes yapı ezilme davranışları

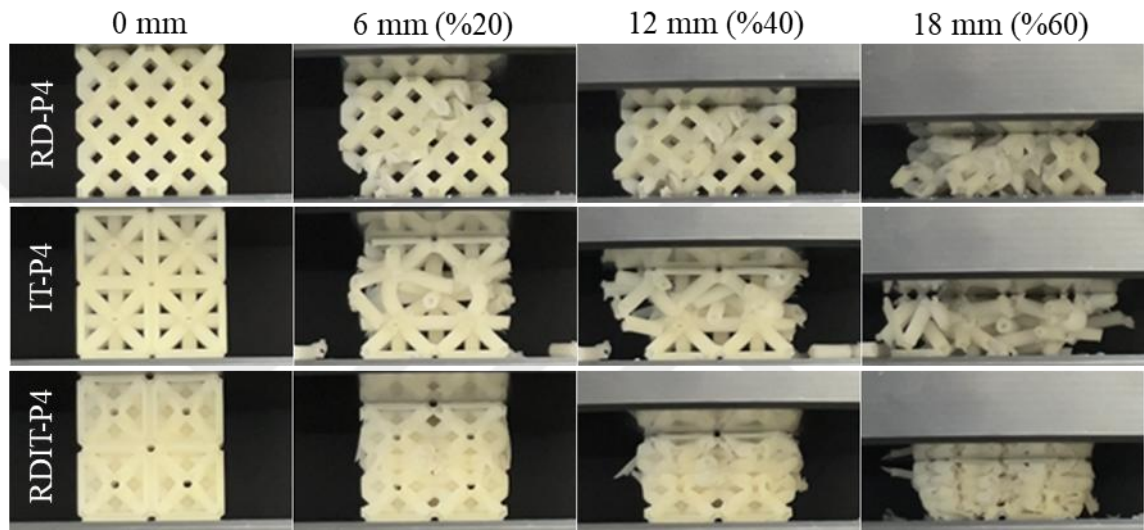


Şekil 4.15. RD, IT ve RDIT 2x2x2 polimer kafes yapı kuvvet-basma grafikleri

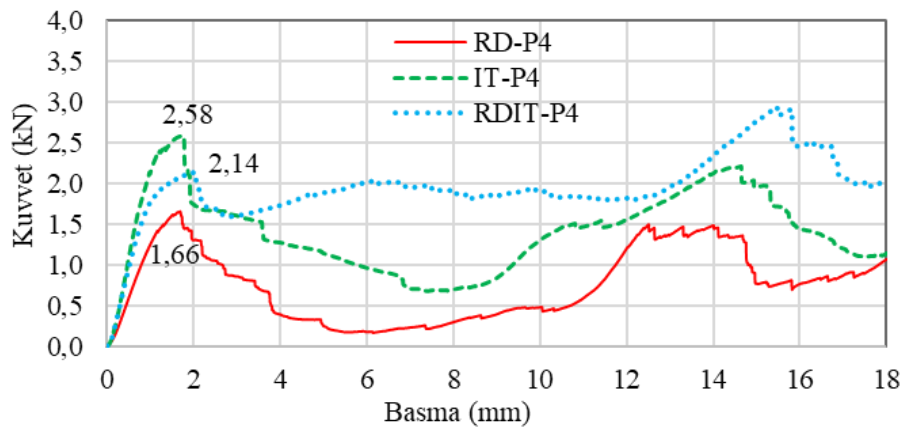


Şekil 4.16. RD, IT ve RDIT 2x2x2 polimer kafes yapı TSE ve E değerleri

Şekil 4.17’te gösterilen 2x2x2 dizilimde diğer kafes yapılarla aynı bağıl yoğunluğa sahip, kiriş dış çapı 3 mm, et kalınlıkları değişken içi boş kirişler ile tasarlanan RD-P4 ($t=0,73$ mm), IT-P4 ($t=0,75$ mm) ve RDIT-P4 ($t=0,5$ mm) kafes yapıların basma testleri incelendiğinde en kararlı yapının hibrit kafes yapı olduğu görülmektedir (Şekil 4.18). Ayrıca 35,2 J değeri ile en yüksek TSE değeri olan RDIT-P4 yapısıdır. RD-P4 ve IT-P4 TSE değerleri sırasıyla 13,55 J (yaklaşık %38) ve 25,14 J (yaklaşık %71) olarak hesaplanmıştır.



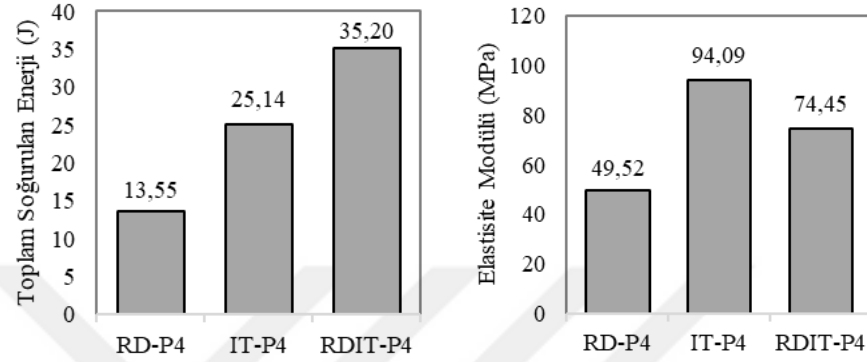
Şekil 4.17. RD, IT ve RDIT 2x2x2 içi boş kiriş polimer kafes yapı ezilme davranışları



Şekil 4.18. RD, IT ve RDIT 2x2x2 içi boş kiriş kafes yapı kuvvet-basma grafikleri

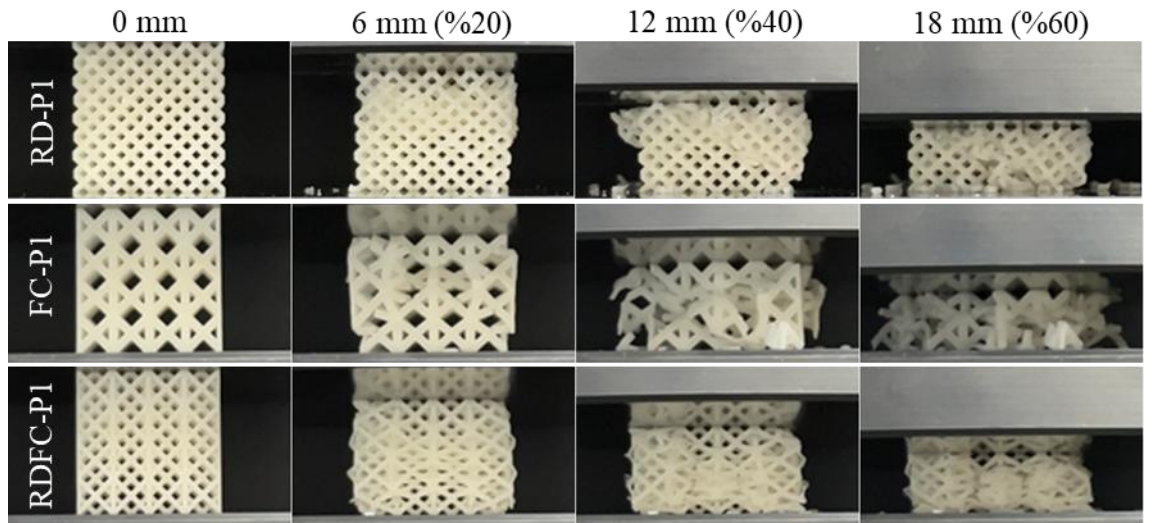
Hibrit kafes yapı plato bölgesi ve sonrasında diğer kafes yapılara göre daha kararlı olduğu için bütünlüğünü korumuştur (Şekil 4.17). En yüksek kuvvet değeri IT-P4 yapısında 2,58 kN olarak görülmüştür. Ancak basma yönüne dik kafes yapıların hibrit yapıdaki gibi desteklenmemesi sonucunda kuvvet akma bölgesi sonrasında hızlıca düşmektedir. RD-

P4 kafes yapısı ise 49,52 MPa değeri ile en düşük elastisite modülü değerinde olmasına rağmen plastik bölgedeki değeri yine hızlıca düşmektedir. Bunun sebebi ise kiriş uzunluklarının artması sebebiyle düğüm noktalarında gerilmelerin yükselmesi sonucunda kırılmaların oluşması söylenebilir. Elastisite modülü en yüksek IT-P4 kafes yapısında görülmüş olup 94,09 MPa olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.19).



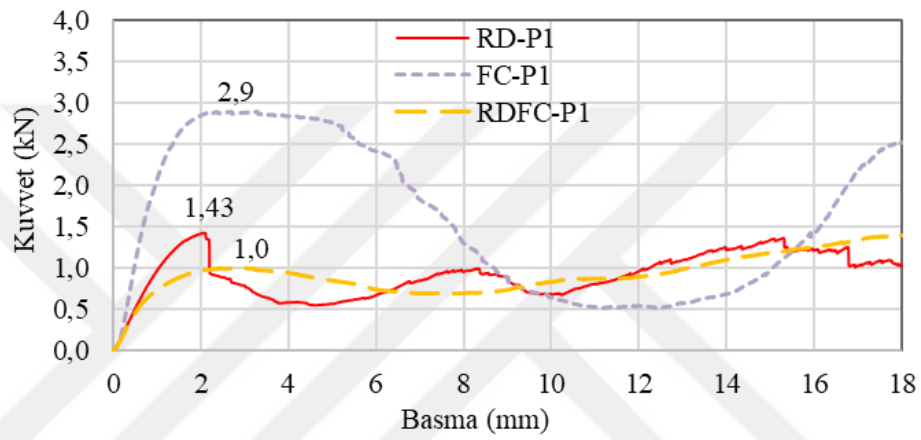
Şekil 4.19. RD, IT ve RDIT 2x2x2 içi boş kiriş polimer kafes yapı TSE ve E değerleri

Şekil 4.20 ile verilen hibrit kafes yapı RDFC ve bu yapıyı oluşturan RD ve FC yapılarının test verileri incelendiğinde en yüksek TSE değeri 28,82 J ile FC-P1 ($d=1,8$ mm) kafes yapısında olup, RD-P1 ($d=1,22$ mm) yapısının TSE değeri 16,5 J ve RDFC-P1 ($d=1,02$ mm) kafes yapısının değeri 16,59 J olarak hesaplanmıştır. Bu değerler en yüksek TSE değerinin yaklaşık %57'si kadardır. En kararlı yapı, hibrit kafes yapı olup plato bölgesinde çok az yumuşama yaparak neredeyse yatay bir kuvvet-basma davranışı göstermiştir (Şekil 4.21).

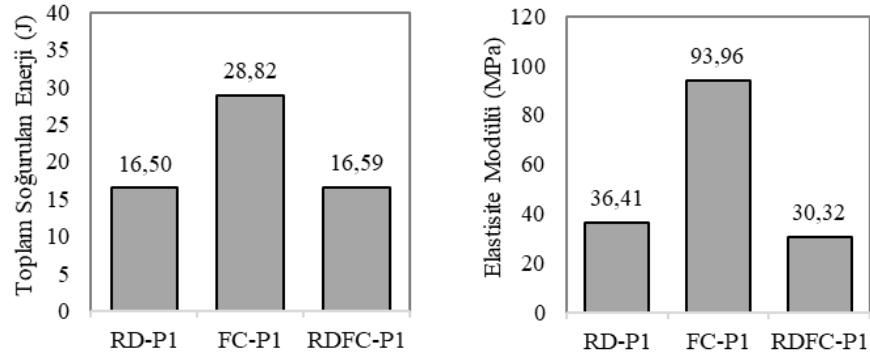


Şekil 4.20. RD, FC ve RDFC 4x4x4 polimer kafes yapı ezilme davranışları

En yüksek kuvvet ve elastisite modülü değerleri sırasıyla 2,9 kN ve 93,96 MPa olarak FC-P1 yapısında görülmüştür (Şekil 4.22). Bu kafes yapı Maxwell kararlılık kriterine göre eğilme baskın davranış göstermektedir. Akma bölgesi sonrasında kuvvet değeri bir süre yatay olarak hareket etmiş olsa da basma yönüne dik kirişlerin düğüm noktalarında oluşan kırılmalar sebebiyle kuvvet değeri hızlıca düşerek bir yumuşama görülmektedir. Diğer iki yapıdan RD-P1, RDFC-P1 yapısına göre daha rijit olmasından kaynaklı akma bölgesinde daha yüksek kuvvet değeri görülürken, hibrit yapıdaki gibi kirişlerin desteklendiği bir tasarım olmamasından kaynaklı kuvvet değeri hızlıca düşmektedir.



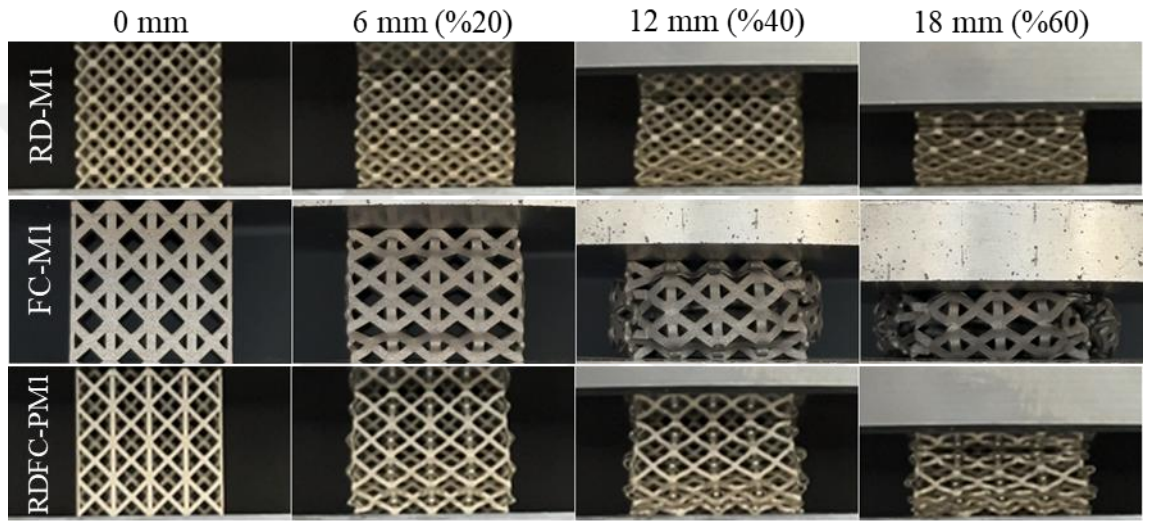
Şekil 4.21. RD, FC ve RDFC 4x4x4 polimer kafes yapı kuvvet-basma grafikleri



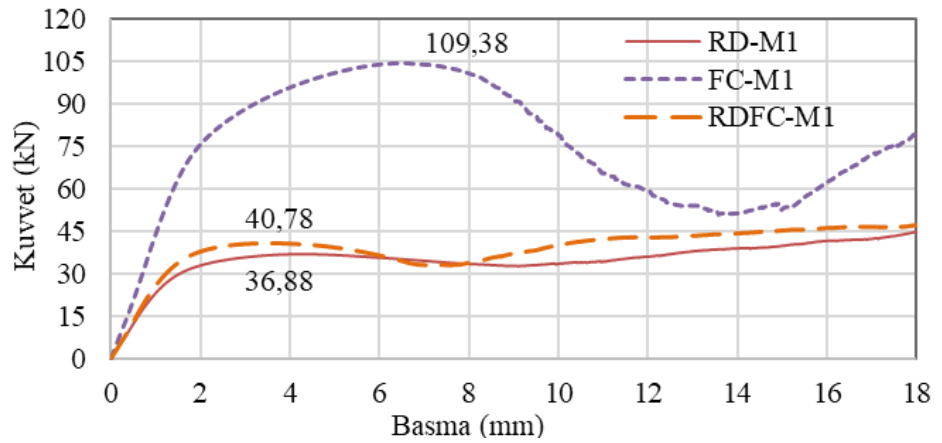
Şekil 4.22. RD, FC ve RDFC 4x4x4 polimer kafes yapı TSE ve E değerleri

Inconel 718 malzemeden üretilmiş RD-M1, FC-M1 ve hibrit RDFC-M1 metal kafes yapıların Şekil 4.24'te verilen test sonuçları incelendiğinde, TSE değeri en yüksek 1342,54 J olan FC-M1 ($d=1,8$ mm) yapısıdır. Bu değeri sırasıyla 699,87 J ile hibrit RDFC-M1 ($d=1,02$ mm) kafes yapısı ve 629,88 J TSE değeri ile RD-P1 ($d=1,22$ mm) yapısı takip etmektedir. RDFC-M1 ve RD-P1 kafes yapıları benzer davranış göstermiştir,

ancak hibrit yapıda yer alan ve basma yönüne dik olan kirişlerden kaynaklı olarak yumuşama daha fazladır. Bu yapılarda Şekil 4.23’de görüldüğü gibi gözle görülür bir kırılma gözlenmemiştir. Enerji soğurma değerleri incelendiğinde, RD-M1 ve RDFC-M1 yapıları en yüksek TSE değerinin sırasıyla yaklaşık %47’si ve %52’si olduğu hesaplanmıştır. Aynı bağıl yoğunluk değerleri için FC-M1 kafes yapısının diğer yapılara göre kiriş çapı daha büyüktür. Buna ek olarak diğerlerine göre daha kalın kirişlerin basma yönüne dik olması da TSE’yi ve en büyük kuvvet değerinin artıran bir etken olduğu düşünülebilir.



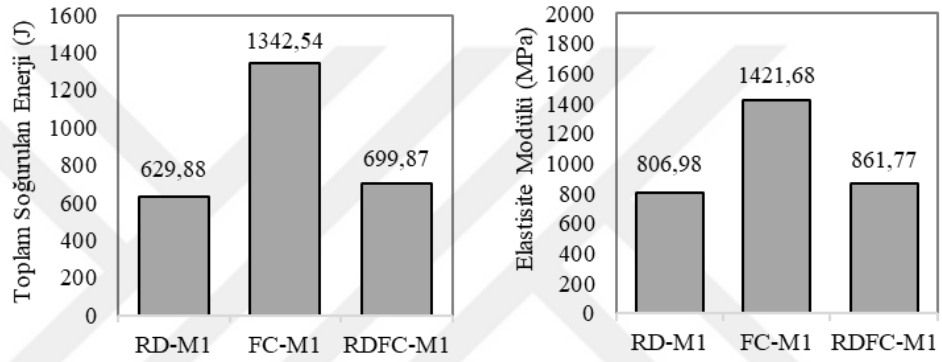
Şekil 4.23. RD, FC ve RDFC 4x4x4 metal kafes yapı ezilme davranışları



Şekil 4.24. RD, FC ve RDFC 4x4x4 metal kafes yapı kuvvet-basma grafikleri

En yüksek kuvvet ve elastisite modülü değeri yine FC-M1 kafes yapısında görülmüştür (Şekil 4.25). Bunlar sırasıyla 109,38 kN ve 1421,68 MPa olarak hesaplanmıştır.

Dolayısıyla en rijit yapının da FC-M1 olduğu görülmektedir. Kalın kirişlerinin yanında birim hücre boyutunun küçük olmasından dolayı hata başlangıcı bağlantı noktalarından başlayarak devam etmiştir. Bağlantı noktalarında oluşan yüksek gerilmeler sonucunda kırılmalar başlamış ve sonrasında kuvvet değerinde hızlı bir düşüş gözlenmiştir. Hibrit kafes yapının akma bölgesinde en yüksek kuvvet 40,78 kN değerindedir. Basma yönüne dik kirişler bu yapıda da bulunduğu için yumuşama RD-P1 yapısında da olmasına rağmen daha belirgin görülmektedir. Yumuşamada temel etken kiriş bağlantı bölgelerinde oluşan yüksek gerilmeler ve hata başlangıçlarıdır. RDFC-P1 hibrit yapısı 861,77 MPa elastisite modülü değeri ile 806,98 MPa olan RD-P1 yapısından daha rijittir.

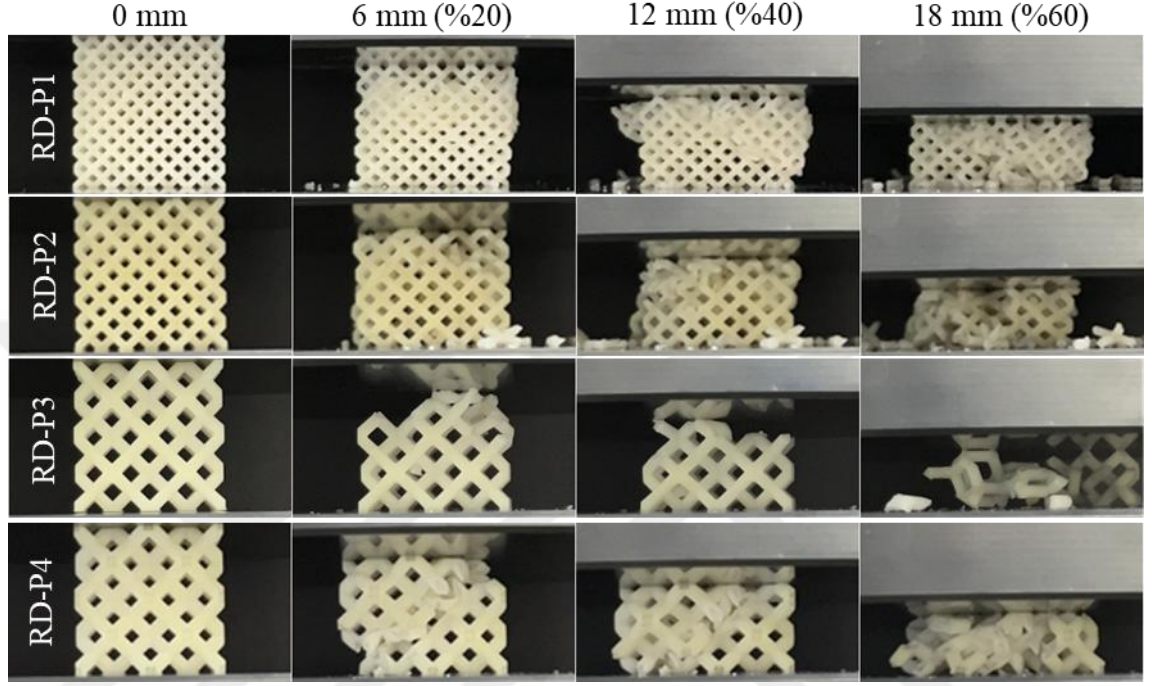


Şekil 4.25. RD, IT ve RDIT 2x2x2 metal kafes yapı TSE ve E değerleri

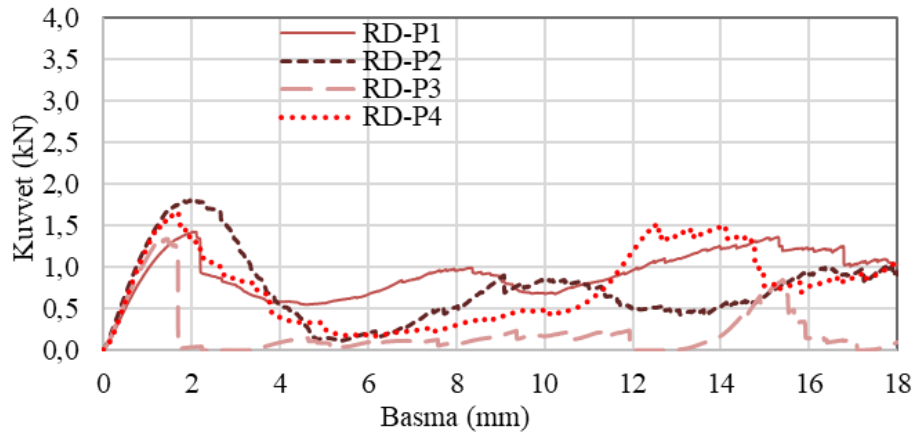
Birim hücre boyutu ve sayısının mekanik özelliklere etkisinin araştırılması

Şekil 4.26’te verilen RD kafes yapılar aynı birim hücre tasarımının farklı hücre boyutlarıyla eşit hacim içine P1 tasarımında 64 adet, P2 tasarımında 27 adet ve P3-P4 tasarımlarında 8 adet yerleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Burada basma koşulları altında birim hücre boyutu ve sayısının mekanik özelliklere etkisi incelenmektedir. 4x4x4 dizilimde olan RD-P1 kafes yapısı 16,5 J ile en yüksek TSE değerine sahiptir. En düşük TSE değeri ise RD-P3 kafes yapısına ait olup kuvvet değeri ana malzemenin gevrek yapısından dolayı akma sonrası hızlıca sıfıra yaklaşmış ve test bu şekilde devam etmiştir. RD-P1 yapısına bakıldığında, birim hücredeki kiriş uzunluklarının diğerlerine göre daha kısa olması sebebiyle bağlantı noktalarında oluşan gerilmeler düşük olduğu için daha kararlı bir yapı olduğu söylenebilir. Bununla birlikte en düşük elastisite modülü değeri 36,41 MPa ile RD-P1 yapısına aittir. RD kafes yapı tipinde hücre boyutunun artması ve sayısının azalması daha rijit yapılara olanak verirken, enerji soğurma kabiliyetleri düşmektedir. İçi boş kirişlerle oluşturulan RD-P4 kafes yapısı, aynı hücre boyutu ve sayısında olan RD-

P3'e göre daha üstün mekanik özelliklere sahiptir. Bunun nedeni olarak, içi boş kiriş sayesinde bağlantı noktalarının birbirine yaklaşması ve kiriş boyunun azalması ve çaptaki büyüme söylenebilir. RD-P4 yapısı 49,52 MPa ile en yüksek elastisite modülüne sahiptir (Şekil 4.27 ve Şekil 4.28).



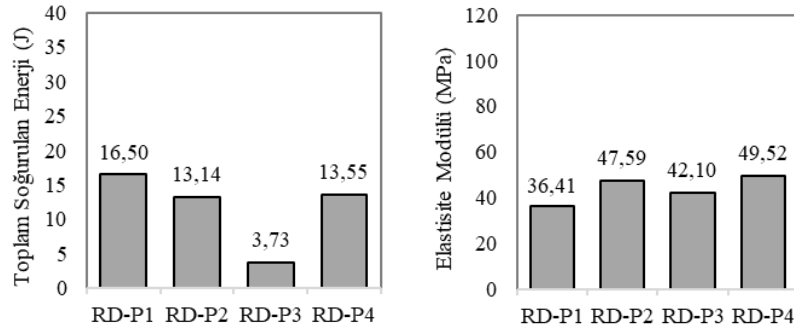
Şekil 4.26. RD polimer kafes yapı farklı dizilimlerde ezilme davranışları



Şekil 4.27. RD polimer kafes yapı farklı dizilimlerde kuvvet-basma grafikleri

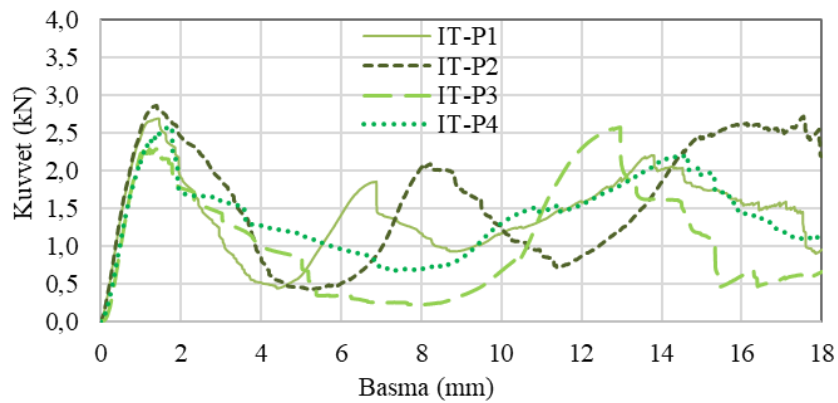
IT birim hücrelerin farklı boyut ve sayısı ile oluşturulan, aynı bağıl yoğunluğa sahip dört farklı kafes yapının mekanik özelliklerine bu değişkenlerin etkisi incelenmiştir (Şekil 4.30). 3x3x3 diziliminde ve 27 adet birim hücreden oluşan IT-P2 kafes yapısı 28,73 J

değeri ile en yüksek TSE değerine sahiptir. En düşük TSE değeri ise 19,07 J ile IT-P3 kafes yapısına ait olup IT-P2 yapısı yaklaşık %50 daha fazla enerji soğurmuştur.

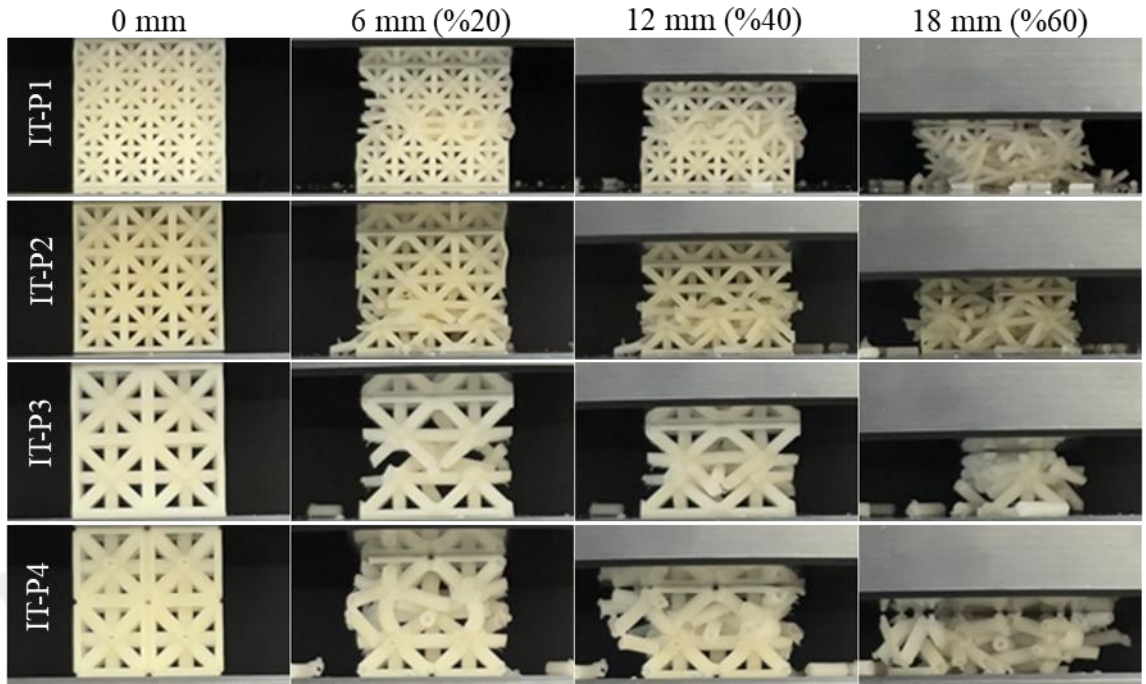


Şekil 4.28. RD polimer kafes yapı farklı dizilimlerde TSE ve E değerleri

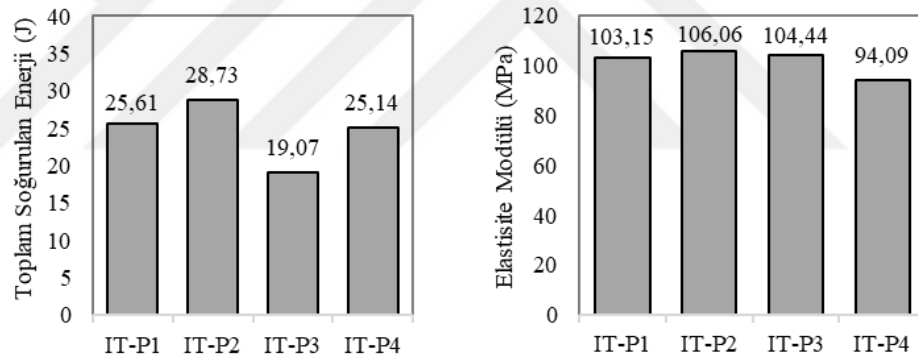
Yukarıda verilen RD-P3 yapısında olduğu gibi kiriş boylarının artması ile bağlantı noktalarına etki eden momentlerin artması sonucunda kırılmalar gerçekleşir ve yapı daha kararsız bir davranış gösterir. IT kafes yapısı gerinme baskın bir yapı olduğu için kuvvet önce hızlıca artmış akma bölgesinden sonra hızlıca düşmüştür. Ana malzemenin gevrek yapısından kaynaklı tüm IT kafes yapılarda benzer ezilme davranışı görülmüştür. Ancak IT-P4 adlandırılan içi boş kirişlerden oluşturulan kafes yapı diğerlerine göre daha kararlı durumdadır. En yüksek kuvvet değeri IT-P2 numunesinde 2,87 kN olarak ölçülmüştür. Kuvvet değerleri ile TSE değerlerinin sıralaması aynıdır. IT kafes yapılar benzer rijitlik özellikleri taşımaktadır ve elastisite modülü değerleri birbirine yakındır. Yalnızca IT-P4 kafes yapısı diğerlerinden daha az rijit olup bu davranışın temel nedeni boşluklu kiriş yapısı gösterilebilir. Hücre sayısının azalıp ve boyutunun artması yapı kararlılığı azalırken, içi boş kiriş yapısında durum farklılık göstererek daha stabil bir yapı olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.29. IT polimer kafes yapı farklı dizilimlerde kuvvet-basma grafikleri



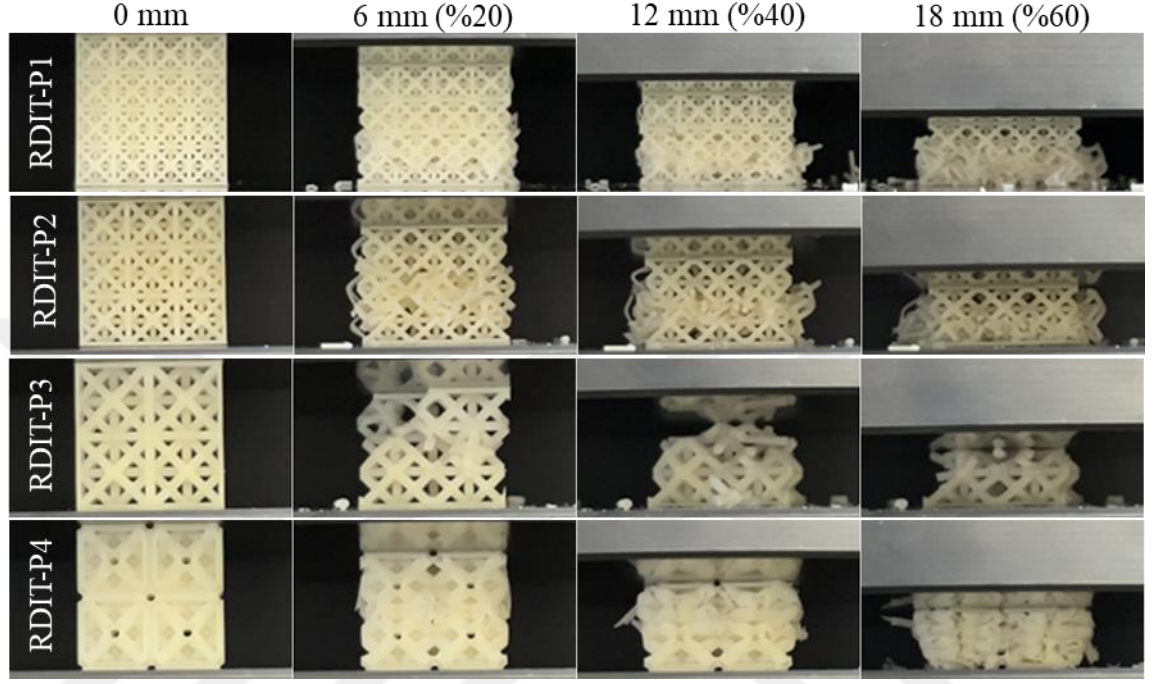
Şekil 4.30. IT polimer kafes yapı farklı dizilimlerde ezilme davranışları



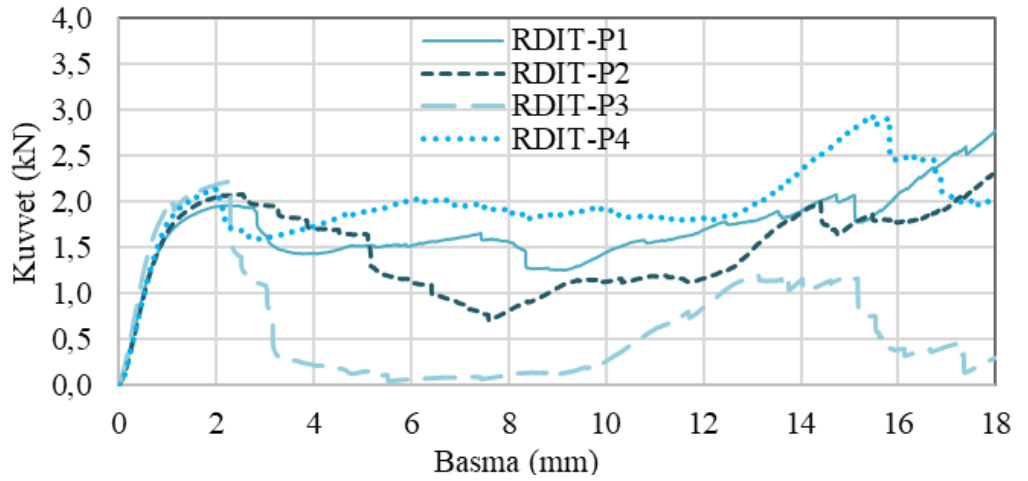
Şekil 4.31. IT polimer kafes yapı farklı dizilimlerde TSE ve E değerleri

Hibrit RDIT kafes yapısında, birim hücre boyutunun artması ve sayısının azalması, RD ve IT kafes yapılarda olduğu gibi daha kararsız bir yapıya sebep olmaktadır. Ancak aynı birim hücre boyutu ve sayısı ile üretilen, aralarındaki tek farkın dolu ve içi boş kiriş yapısı olduğu RDIT-P3 ve RDIT-P4 kafes yapılarının mekanik özellikleri arasında kayda değer farklılıklar gözlenmiştir. Şekil 4.32’de gösterilen dört farklı kafes yapı tasarımının arasında, en üstün mekanik özelliklere ve kararlı ezilme durumuna sahip olan yapı RDIT-P4 yapısı olmuştur. RDIT-P3 tasarımında, diğer P3 kodlu tasarımlarda olduğu gibi kiriş uzunluklarının artması sebebiyle basma durumunda kararsızlık ortaya çıkmaktadır. En yüksek TSE değeri 35,2 J ile RDIT-P4 kafes yapısında olup bu değeri sırasıyla 30,54 J ile RDIT-P1, 26,37 J değeri ile RDIT-P2 takip etmektedir. Bu grup içinde en az enerji

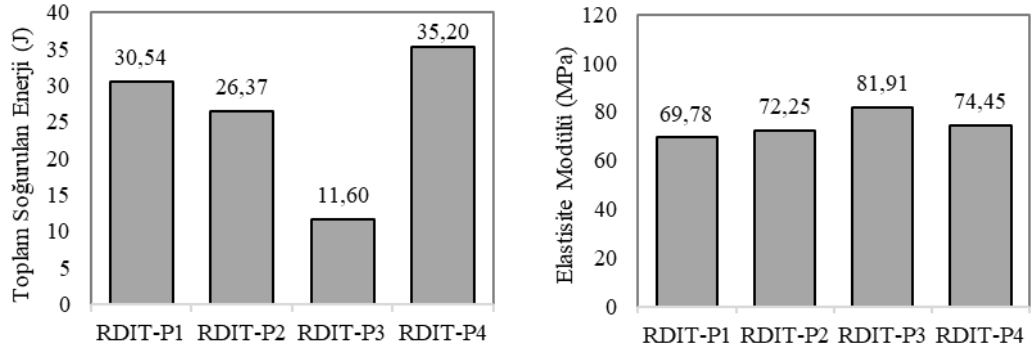
soğuran kafes yapı ise RDIT-P3 olmuştur. Basma yönüne dik ve kalın kiriş çapları ile en yüksek elastisite modülü değeri 81,91 MPa ile RDIT-P3 yapısındadır. Rijitliği yüksek bu tasarımda düşey kirişlerin kırılması sonucunda kuvvet değerinin hızlıca düştüğü görülmektedir (Şekil 4.33).



Şekil 4.32. RDIT polimer kafes yapı farklı dizilimlerde ezilme davranışları



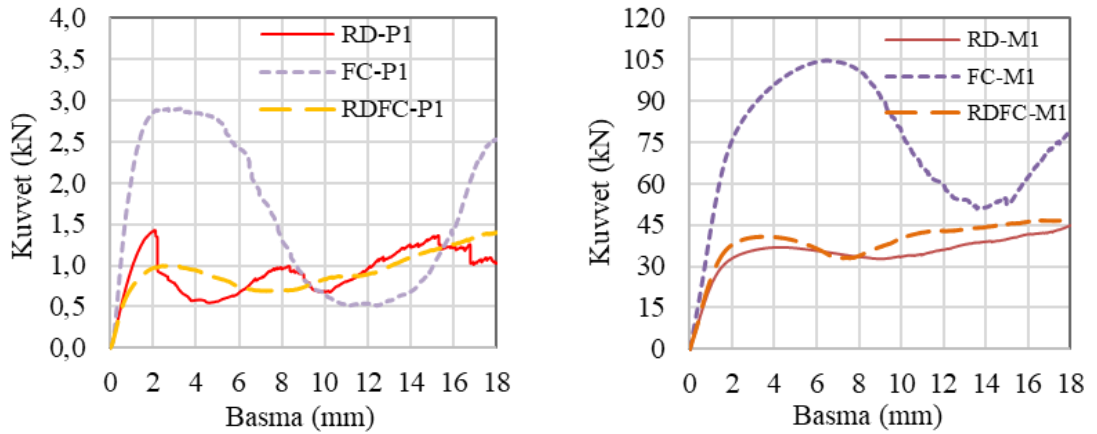
Şekil 4.33. RDIT polimer kafes yapı farklı dizilimlerde kuvvet-basma grafikleri



Şekil 4.34. RDIT polimer kafes yapı farklı dizilimlerde TSE ve E değerleri

Aynı kafes yapı tasarımında farklı malzemelerin mekanik davranışa etkisi

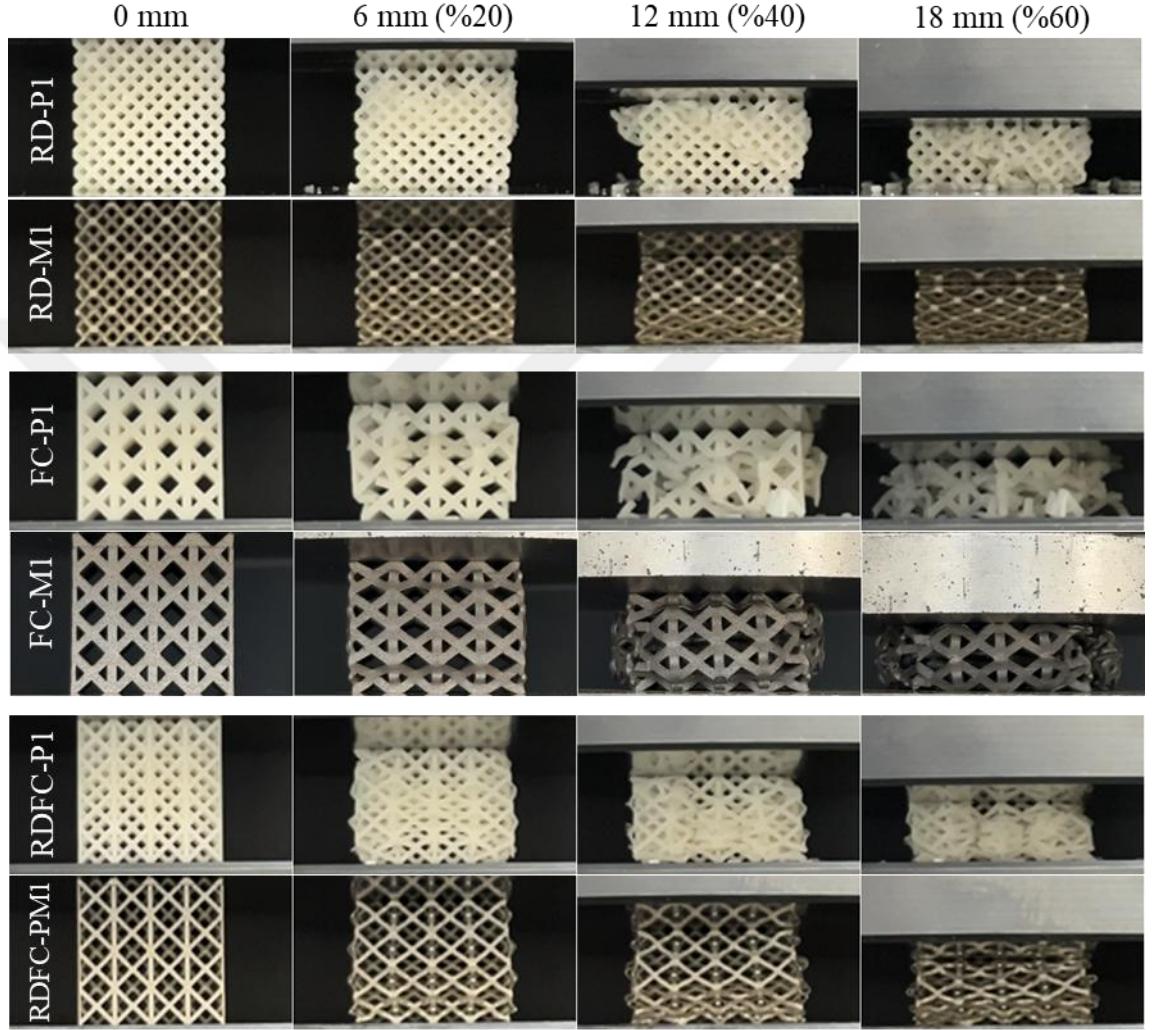
Farklı malzemelerin aynı kafes yapı tasarımında etkilerini görebilmek amacıyla, RD, FC ve RDFC tasarımları ABS benzeri reçine malzeme ve Inconel 718 metal tozundan üretilmiş ve yarı statik basma testleri gerçekleştirilmiştir. Her ne kadar üretim yöntemi farklı olsa da basma testi sonunda hem kuvvet-basma grafiklerinde hem de ezilme mekanizmalarında benzer bulgular elde edilmektedir (Şekil 4.35 ve Şekil 4.36). Deformasyonlardaki benzerlikler 6 mm (%20) basma durumunda belirgin bir şekilde görülürken, sonraki aşamalarda polimer kafes yapılarıdaki kırılmalar sebebiyle farklılıklar oluşmuştur. Her iki malzeme için FC kafes yapısı en fazla enerjiyi soğurmuştur ve elastisite modülü en yüksek yapıdır.



Şekil 4.35. Farklı malzemelerle üretilmiş aynı tasarımların kuvvet-basma grafikleri

İki farklı malzemenin ele alındığı bu bölüm için, kütle farklılıklarından kaynaklı olarak özgül soğurulan enerji (ÖSE) değerlerinin incelemesi yapılmıştır (Şekil 4.37). FC kafes yapısı en her iki malzemede de en yüksek ÖSE değerine sahiptir. Diğer kafes yapılarında

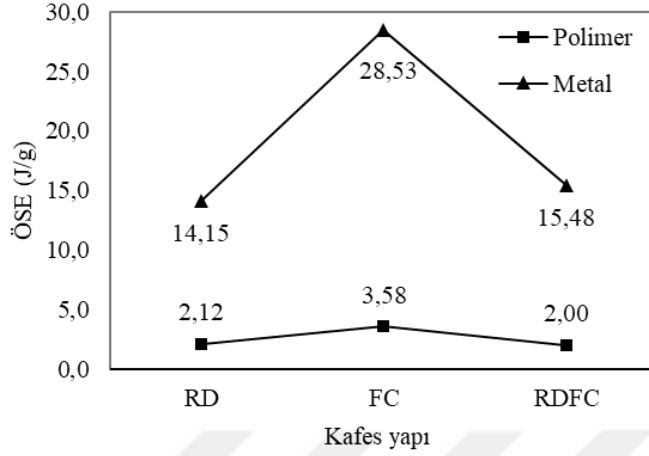
ise aynı malzeme grupları için değerler yakın olup, polimer malzemede RD kafes yapısının ÖSE değeri daha büyükken, metal malzemede ise RDFC hibrit kafes yapısının ÖSE değeri daha yüksektir. ÖSE değerlerinin metal malzemelerde daha yüksek çıkması, ham malzemenin daha dayanıklı ve tok olmasından kaynaklıdır.



Şekil 4.36. Farklı malzemelerle üretilmiş aynı tasarımların ezilme davranışları

Polimer malzemede, FC kafes yapısının ÖSE değeri 3,58 J/g olup RD tasarımı 2,12 J/g değeri ile en yüksek değerin %59'u, RDIT tasarımı ise en yüksek ÖSE değerinin %55'i olarak hesaplanmıştır. Metal kafes yapılarda ise ÖSE değerlerindeki farklar incelendiğinde RD kafes yapı FC tasarımının %49'u, RDFC kafes yapı ise %54'ü olarak hesaplanmıştır. Bir diğer bakış açısından değerlendirme yapılacak olursa, aynı tip kafes yapı için ÖSE değerleri oranlanırsa, RD yapı için 6,67, FC yapı için 7,97 ve RDFC hibrit

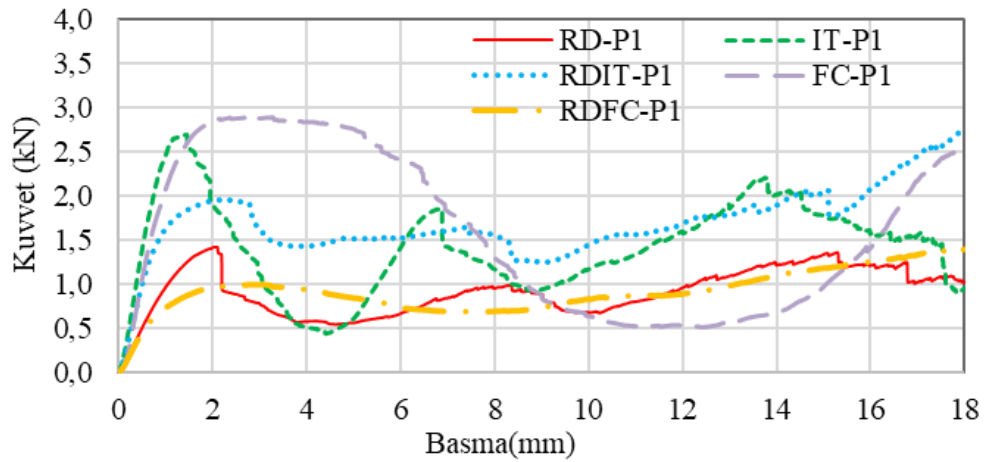
yapı için 7,74 olarak bulunur. Bu durumda malzeme değişikliği sonucunda en yüksek fark FC kafes yapıda olup en düşük fark ise RD kafes yapıdadır.



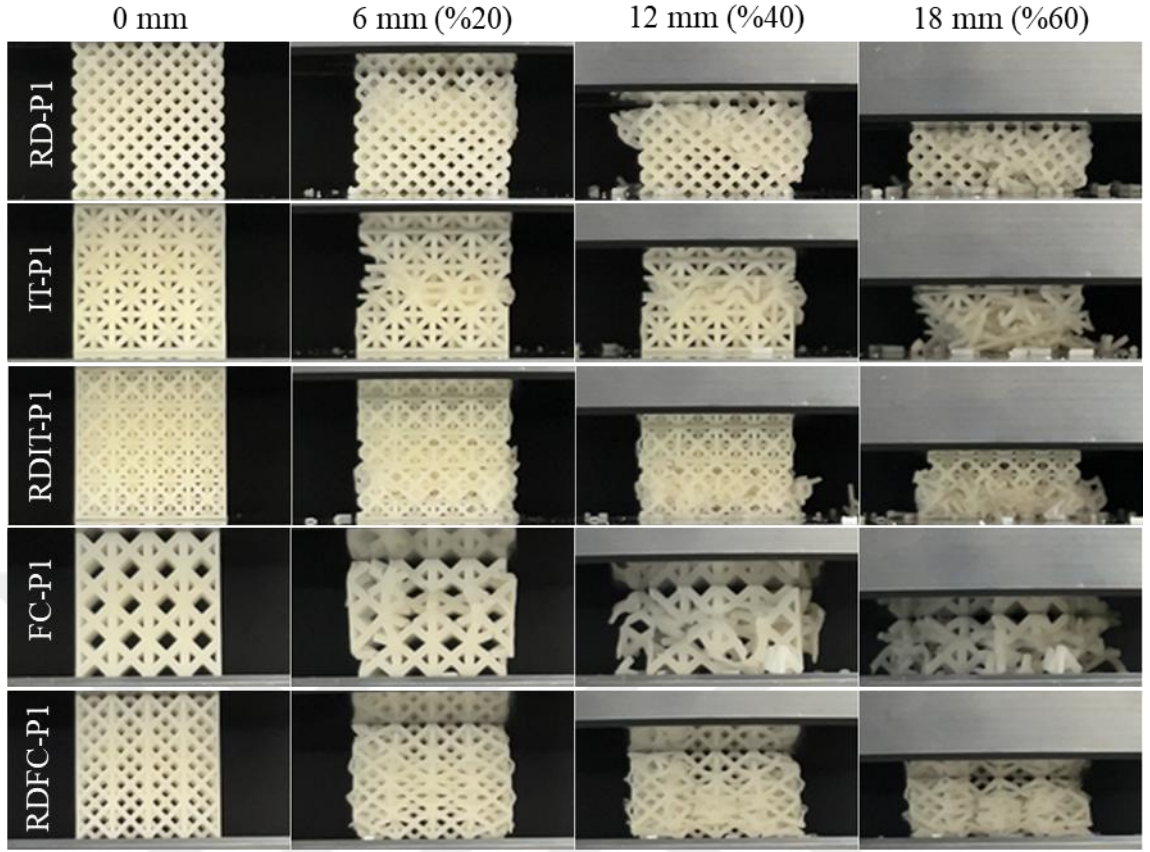
Şekil 4.37. Farklı malzemelerle üretilmiş aynı tasarımların ÖSE değerleri

Birim hücre tasarımının kafes yapı mekanik özelliklerine etkisi

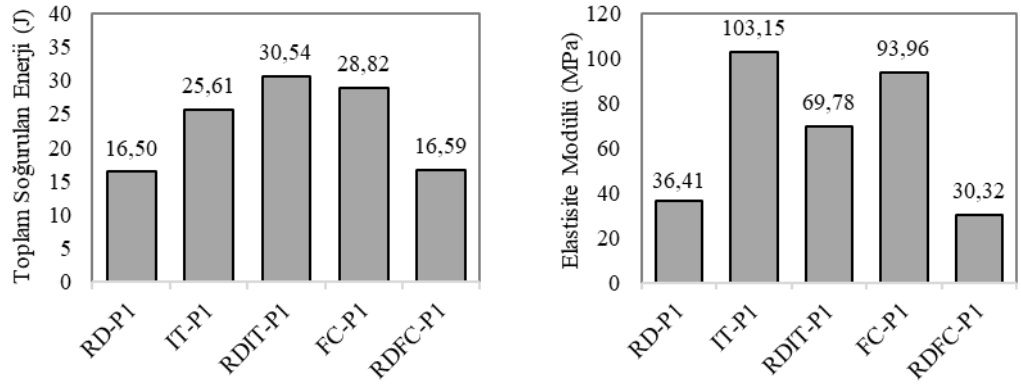
Farklı birim hücreler ile aynı malzemeden aynı sayı ve dizilimlerle üretilmiş kafes yapıların basma testleri sonucunda ezilme davranışları ve mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır (Şekil 4.38 ve Şekil 4.39). En yüksek kuvvet değeri FC-P1 yapısında görülmüştür. En yüksek enerji soğurma değeri ise 30,54 J ile RDIT hibrit kafes tasarımında hesaplanmıştır. Ayrıca her iki hibrit kafes yapının da diğerlerinden daha kararlı ezilme davranışı gösterdiği görülmektedir. En yüksek elastisite modülü değeri IT-P1 yapısında olup, gerinme baskın yapı özelliklerini göstermektedir.



Şekil 4.38. Farklı birim hücrelerden oluşturulmuş 4x4x4 yapıların kuvvet-basma grafikleri



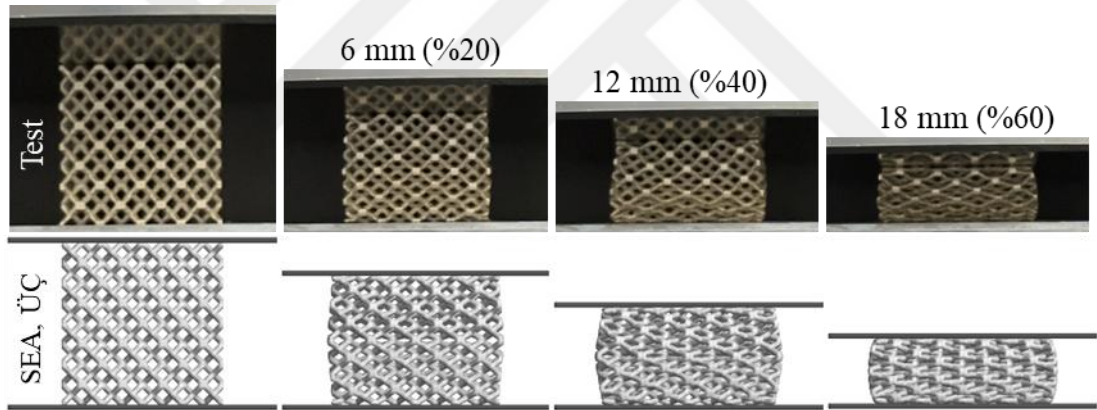
Şekil 4.39. Farklı birim hücrelerden oluşturulmuş 4x4x4 yapıların ezilme davranışları



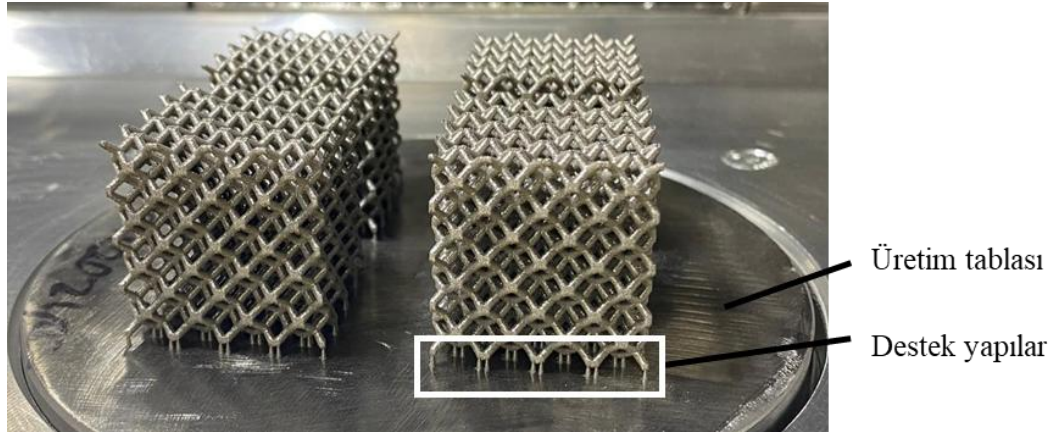
Şekil 4.40. Farklı birim hücrelerden oluşturulmuş 4x4x4 yapıların TSE ve E değerleri

4.3. Nümerik Analiz Sonuçları

Nümerik analiz çalışmalarına RD-M1 kafes yapısı ile başlanmıştır. Tasarım kiriş çapı ($d_{TÇ}=1,22$ mm) ve üretim sonrası kütleden hesaplanan kiriş çapı ($d_{ÜÇ}=1,15$ mm) ile analiz modelleri diğer şartlar aynı kalacak şekilde oluşturulmuştur. 0,6 mm eleman boyutu ile analizler yapılmıştır. Analiz sonuçları LS-PrePost arayüzü kullanılarak işlenmiştir. Şekil 4.41’da verilen ezilme durumları incelendiğinde, test ve sonlu elemanlar analizinde (SEA) RD kafes yapının benzer şekillerde ezildiği görülmektedir. Ancak test çalışmasından alınan görüntülerde sabit plakaya yakın tarafın daha fazla ezilmesi üretim kaynaklı kusurların etkisi olarak söylenebilir. Bu etki Şekil 4.42’da gösterilen destek yapıların, üretim sonrası kafes yapıdan uzaklaştırılması esnasında oluşan düzensizlikler ve kusurlar olarak belirtilebilir. Analiz modelinde, üretim kusurlarının olmaması kafes yapının alt ve üst bölgelerinden simetrik bir ezilme durumunun gözlenmesini sağlamaktadır.

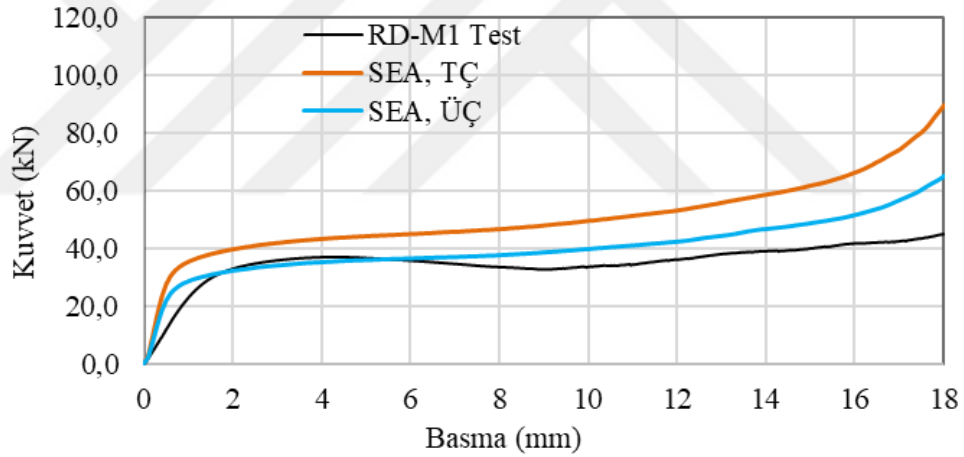


Şekil 4.41. RD-M1 kafes yapısı test ve ÜÇ analiz sonrası ezilme durumları

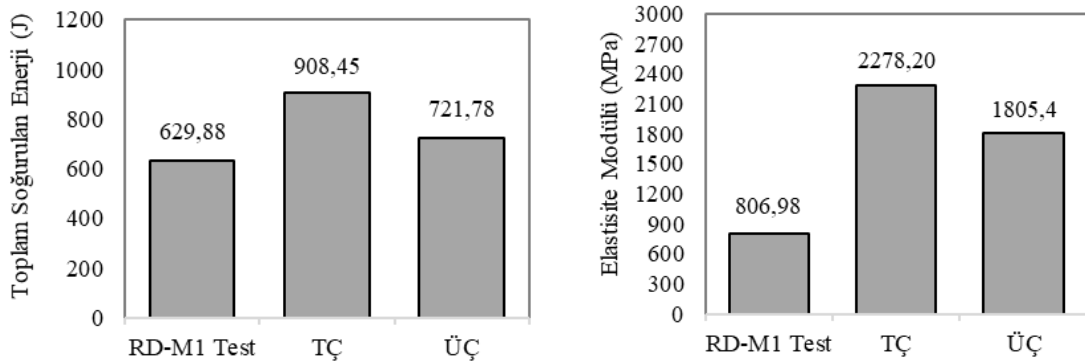


Şekil 4.42. RD-M1 seçici lazer ergitme üretim çalışması, destek yapılar

RD-M1 metal kafes yapı için Şekil 4.43’de verilen test ve sonlu elemanlar analizi (SEA) sonuçları karşılaştırıldığında, test için TSE değeri 628,88 J iken, tasarım çapı (TÇ) ile modellenen analiz sonucunda 908,45 J ve üretim çapı (ÜÇ) ile yapılan analiz çalışmasında 721,78 J olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.44). Bu durumda TÇ analiz sonucu test değerinden yaklaşık %44,4 fazladır, ÜÇ analiz sonucu ise test değerinden yaklaşık %14,7 daha fazla bulunmuştur. Bununla birlikte 6 mm (%20) basma durumunda, maksimum kuvvet değeri ÜÇ analizinde neredeyse aynıdır. Üretim çapı olarak ele alınan analiz sonucunun test değerine daha yakın olduğu görülmektedir. Üretilmiş numunenin gözenekli yapısı ve kiriş çapındaki değişiklikler göz önüne alındığında bu yaklaşımın anlamlı olduğu analiz sonuçlarından da görülebilir. Elastisite modülü değerlerinde bakıldığında analiz modellerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. RD-M1 kafes yapısı analiz sonucunda hesaplanan elastisite modülü değerleri test için $E=806,98$ MPa, tasarım çapı (TÇ) için 2278,2 MPa ve üretim çapı (ÜÇ) için $E=1805,4$ MPa değerindedir.

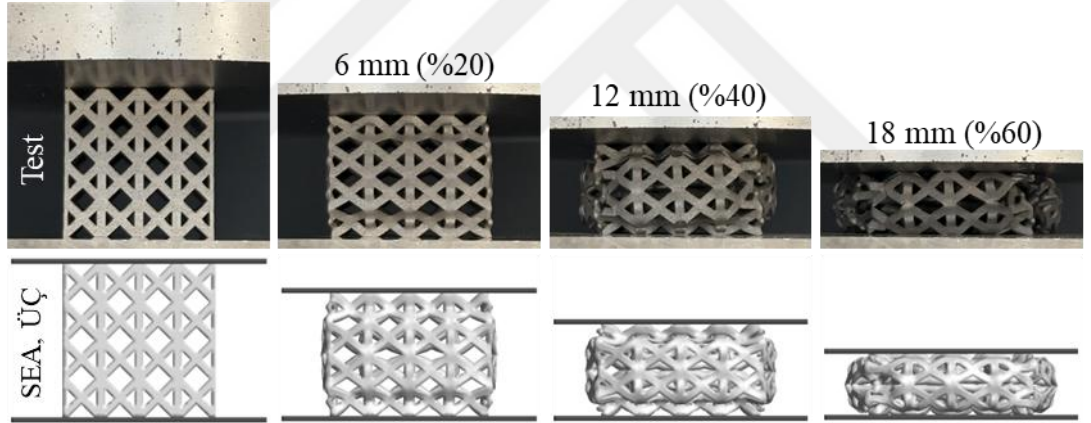


Şekil 4.43. RD-M1 test ve analiz kuvvet-basma grafikleri

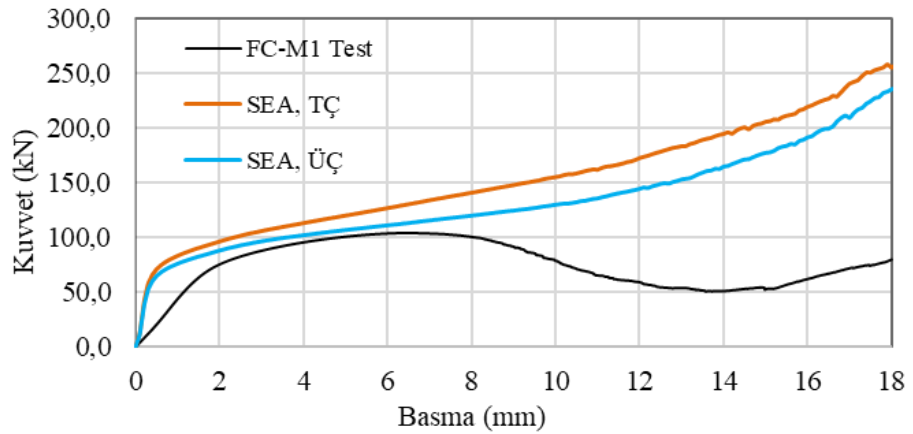


Şekil 4.44. RD-M1 test ve analiz TSE ve E değerleri

RD-M1 analiz çalışmasının ardından FC-M1 analiz çalışmaları ile devam edilmiştir. Analiz çalışmasında kullanılmak üzere tasarım kiriş çapı ($d_{TÇ}=1,8$ mm) ve üretim kiriş çapı ($d_{ÜÇ}=1,74$ mm) olarak katı modeller hazırlanarak modeller oluşturulmuştur. 0,7 mm eleman boyutu ile analizler yapılmıştır. Analiz sonuçları test ile karşılaştırıldığında, test grafiğinde yaklaşık 8 mm sonrasında kuvvette hızlıca bir düşüş gözükürken, analiz çalışmalarında bu durum görülmemiştir. Ayrıca Şekil 4.45’de verilen ezilmeler incelendiğinde %20 ve %40 basma durumunda her ne kadar benzerlik gösterse de %60 basma durumunda testte kırılmalar bariz bir şekilde görülmektedir. RD-M1 kafes yapısında ise gözle görülür bir kırılma test boyunca olmamıştır. Bu durumda analiz çalışmaları için kullanılan MAT24 malzeme kartında bulunan “FAIL” değeri için inceleme yapılmıştır. Malzeme kartında belirtilen “FAIL” değeri efektif plastik gerinim (effective plastic strain) değeri olup, LS-PrePost ile analiz sonuçları incelenerek hata kriteri belirlenmiştir.

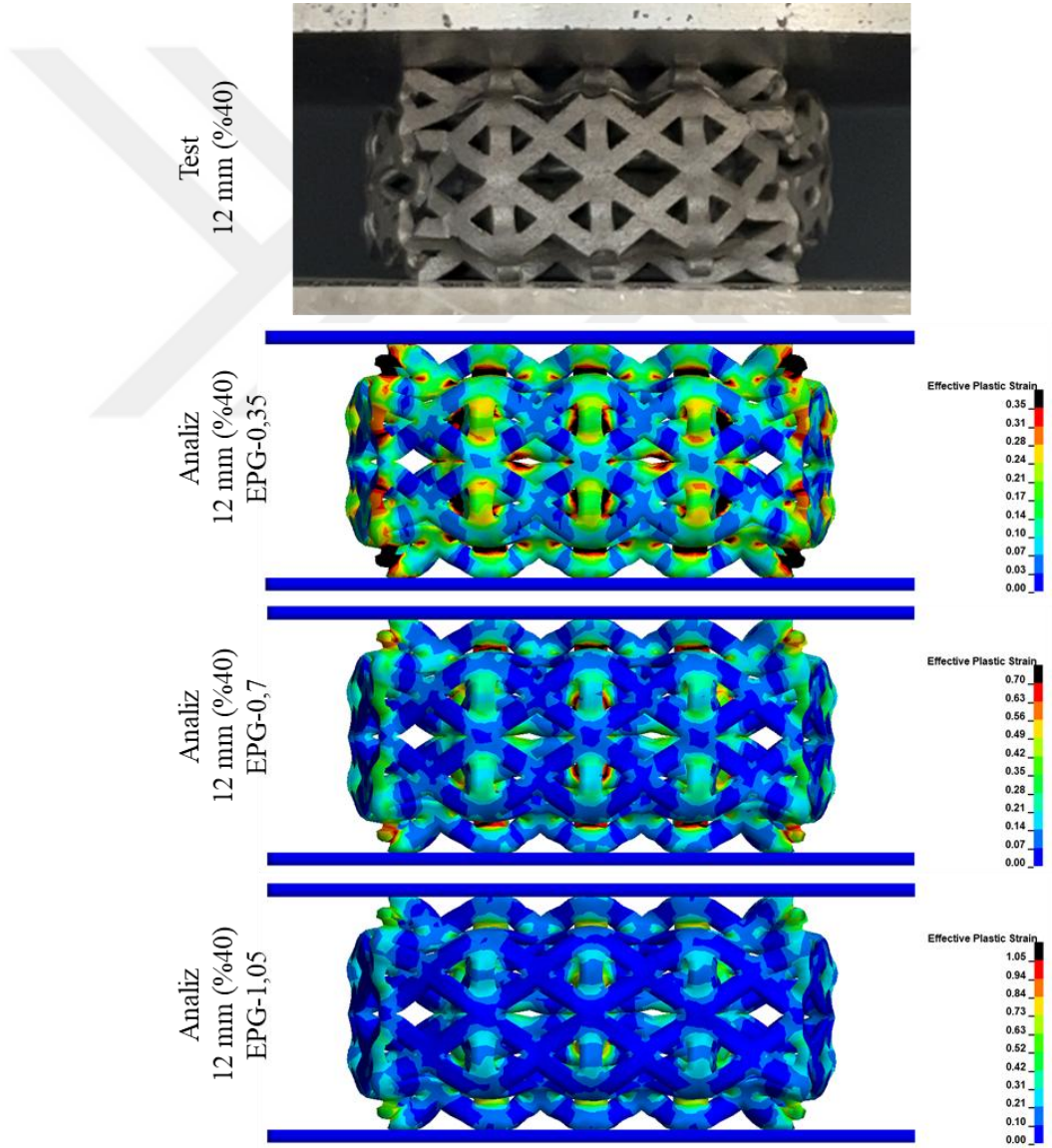


Şekil 4.45. FC-M1 kafes yapısı test ve ÜÇ analiz sonrası ezilme durumları



Şekil 4.46. FC-M1 test ve analiz kuvvet-basma grafikleri

Hata kriterinin belirlenmesi için, öncelikle LS-PrePost yazılımında efektif plastik gerinim (EPG) görselleri incelenmiştir. 12 mm (%40) basma durumu için EPG ölçeğinde üst değer sırasıyla 0,35-0,7 ve 1,05 değerlerine ayarlanmıştır. Görsellerin belirginleştirilmesi amacıyla üst değerler siyah renkle gösterilmiştir (Şekil 4.47). Görseller incelendiğinde, 0,35 olan üst değerde siyah bölgelerin çok yoğun olduğu, 1,05 olan değerde ise hatanın oluşmadığı ancak test çalışmasında kırılmaların başladığı görülmektedir. Analiz çalışmasında 0,7 olarak verilen hata kriteri değerinin testle daha uyumlu olduğu söylenebilir. Bu değerlendirmeye ek olarak MAT24 malzeme kartında hata kriteri bölümüne yukarıdaki değerler girilerek analiz çalışmaları yapılmıştır.



Şekil 4.47. FC-M1 kafes yapısı ÜÇ analiz sonuçları, 12 mm basma efektif plastik gerinim durumları

Keyword Input Form

☐ Use *Parameter ☐ Comment (Subsys: 1 FCM1_0.7mm_URETIM_10NODE_E125_ELF17_WFail_0.7.k)

*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY_(TITLE) (024) (1)

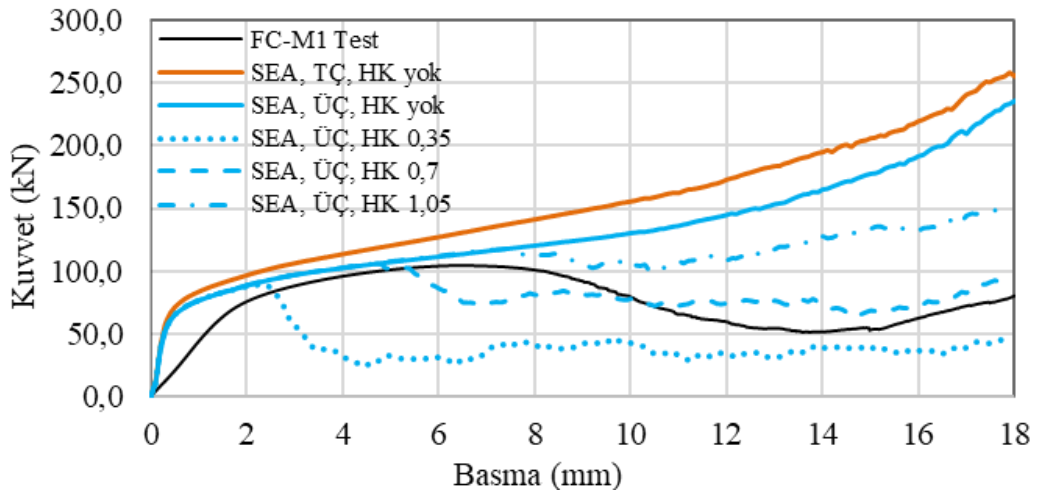
TITLE

SLM IN718 As Built Z

1	MID	RO	E	PR	SIGY	ETAN	FAIL	TDEL
	1	8.190e-09	1.250e+05	0.3000000	683.00000	0.0	0.7000000	0.0
2	C	P	LCSS	LCSR	VP			
	0.0	0.0	0	0	0.0			
3	EPS1	EPS2	EPS3	EPS4	EPS5	EPS6	EPS7	EPS8
	0.0	0.0248800	0.0537900	0.0841400	0.1155100	0.1480600	0.1822400	0.2205900
4	ES1	ES2	ES3	ES4	ES5	ES6	ES7	ES8
	688.60461	833.49481	929.93927	1014.1360	1091.9987	1163.5363	1227.9769	1286.9154

Şekil 4.48. Inconel 718 için oluşturulmuş malzeme kartı ve hata kriteri

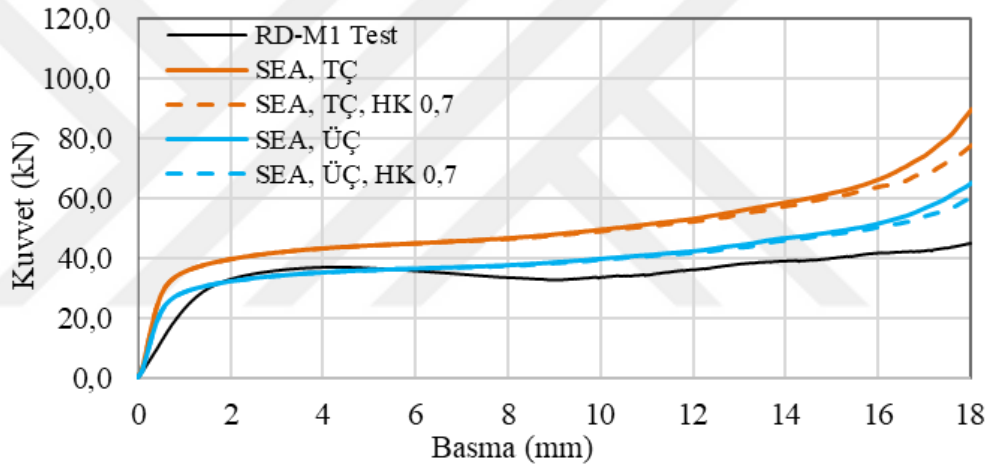
Farklı hata kriteri değerleri ile yapılan analiz sonuçları Şekil 4.49’de verilmiştir. Test grafiği ile en uyumlu grafiğin, üretim çapı ile oluşturulmuş analiz modelinde MAT24 malzeme kartına hata kriterinin (HK) 0,7 olarak girilen durum olduğu görülmektedir. Bu durumda, diğer analiz çalışmaları için tasarım çapı ve üretim çapı ile oluşturulan modellerde hata kriterinin olmadığı ve bu kriterin 0,7 olduğu durumlar analiz edilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır.



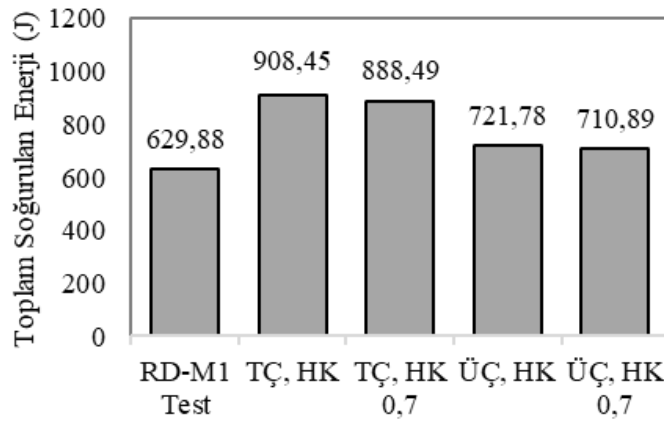
Şekil 4.49. Hata kriteri (HK) değerlerinin karşılaştırılması

RD-M1 analiz çalışmalarında, MAT24 malzeme kartına hata kriterinin 0,7 olarak girildiği durum için analiz yapıldığında kuvvet değerleri 8 mm basma sonrasında bir miktar değişmiştir. Buradan hareketle ezilmenin fazla olduğu durum için kafes yapıda hataların

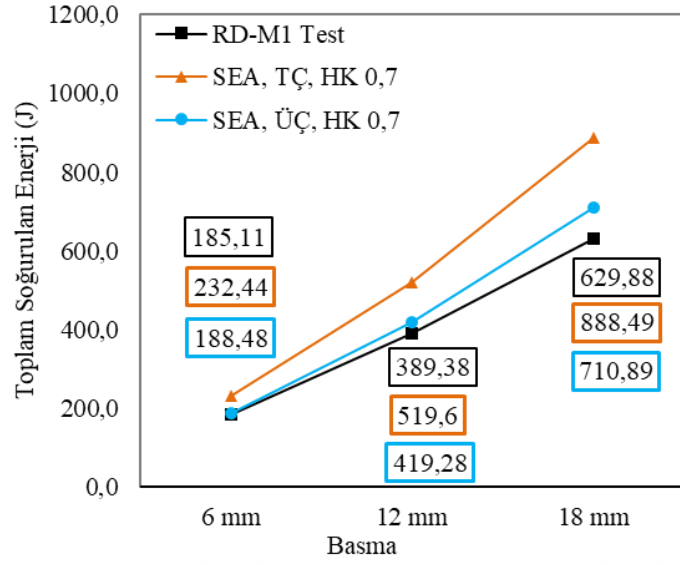
oluşmaya başladığı düşünülebilir. 18 mm basma sonrasında TSE değerine bakıldığında ÜÇ ile oluşturulan modelde ve hata kriterinin 0,7 olduğu durum için 710,89 J olarak hesaplanmıştır. İlk durumda hata kriteri olmadan %14,7 daha fazla olan bu değer, hata kriteri girildikten sonra %12,8 olarak hesaplanmıştır ve analiz sonucu TSE değeri test sonucunda hesaplanan TSE değerine bir miktar daha yaklaşmıştır. Bunun yanında Şekil 4.52’de verilen basma miktarına göre TSE değerleri karşılaştırıldığında, basma miktarı arttıkça test ve analiz sonuçları arasındaki fark artmaktadır. Buna sebep olan durumlar ise, test numunesinin üretim kusurları ve gözenekli yapıdan kaynaklı yumuşama gösterilebilir. Ek olarak test ve analizde kirişlerin birbirine temasındaki farklılıklar gösterilebilir. Test boyunca yapıda gözle görülür kırılma meydana gelmediği için ezilme mekanizmaları Şekil 4.41 ile verilen analiz görselleri ile benzerdir.



Şekil 4.50. RD-M1 hata kriteri (HK) tanımlanmış durum için analiz sonuçları

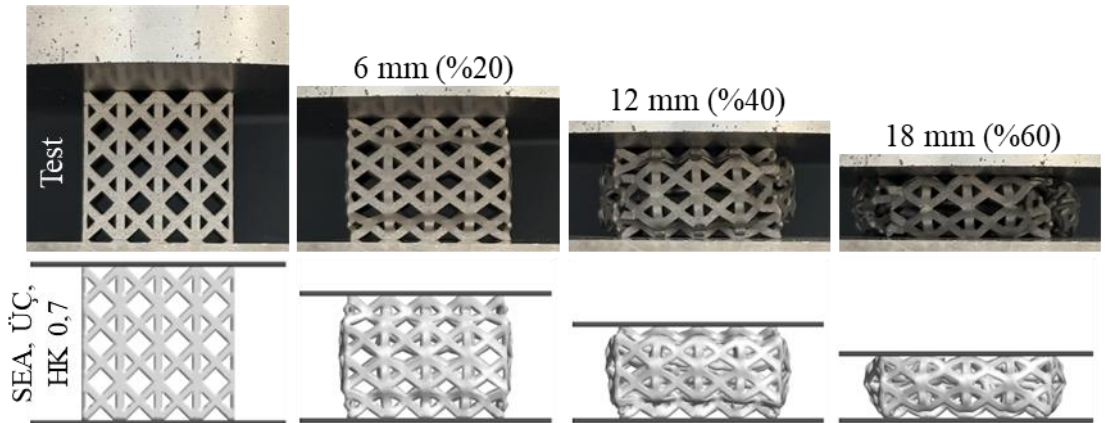


Şekil 4.51. RD-M1 test ve analiz çalışması TSE değerleri (Hata kriteri eklenmiş)

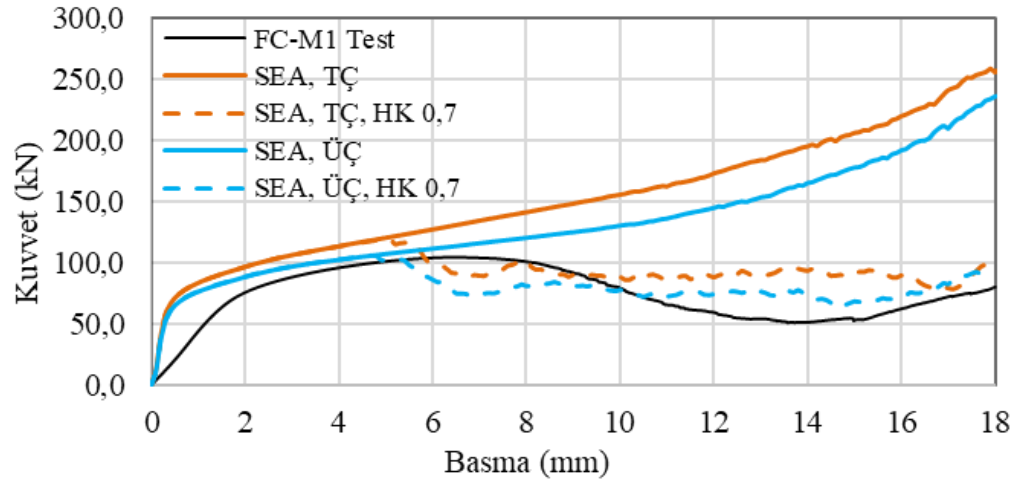


Şekil 4.52. RD-M1 test ve analiz çalışması basma miktarına göre TSE değerleri

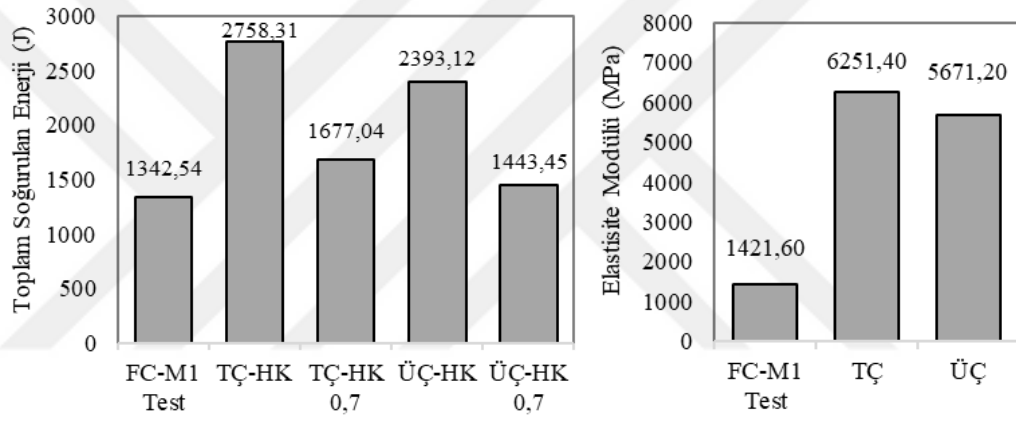
FC-M1 kafes yapısının sonlu elemanlar analiz modelinde, malzeme kartına hata kriterinin eklendiği durum için Şekil 4.54'te verilen sonuçlar incelendiğinde, kuvvet değerlerinin teste benzer hale geldiği görülmektedir. ÜÇ ($d_{ÜÇ}=1,74$ mm) ile oluşturulan ve hata kriterinin 0,7 olduğu analiz modelinin TSE değeri 1443,45 J olup, test sonucunda hesaplanan 1309,1 J değerinden yaklaşık %10 daha fazladır (Şekil 4.55). Buna ek olarak ezilme durumlarının da benzer olduğu söylenebilir. Elastisite modülü değerlerinin ise analiz modellerinde daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun temel sebebi analizde kusursuz olarak tasarlanmış kafes yapı modelinin kullanılmasıdır. ÜÇ elastisite modülü değeri, test değerinden %77 daha büyük olduğu görülmektedir.



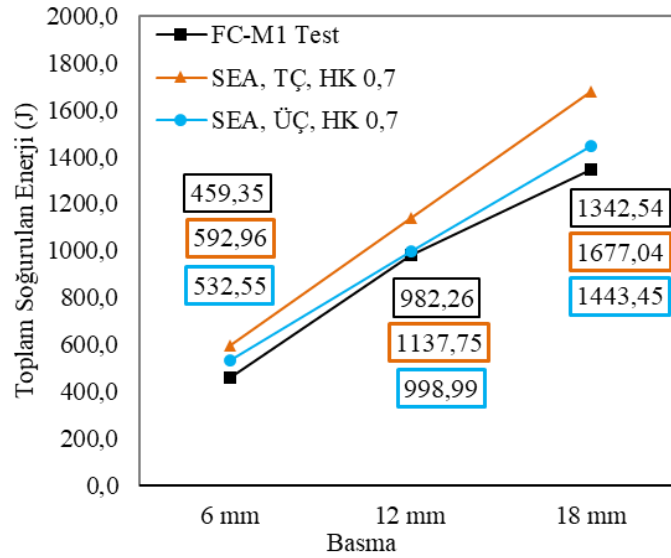
Şekil 4.53. FC-M1 kafes yapısı test ve ÜÇ analiz sonrası ezilme durumları



Şekil 4.54. FC-M1 hata kriteri (HK) tanımlanmış durum için analiz sonuçları

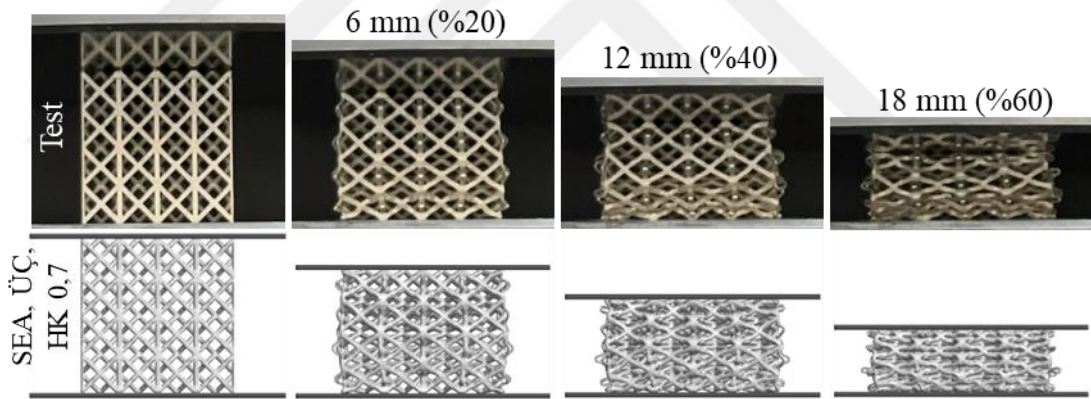


Şekil 4.55. FC-M1 test ve analiz çalışması TSE ve E değerleri (Hata kriteri eklenmiş)

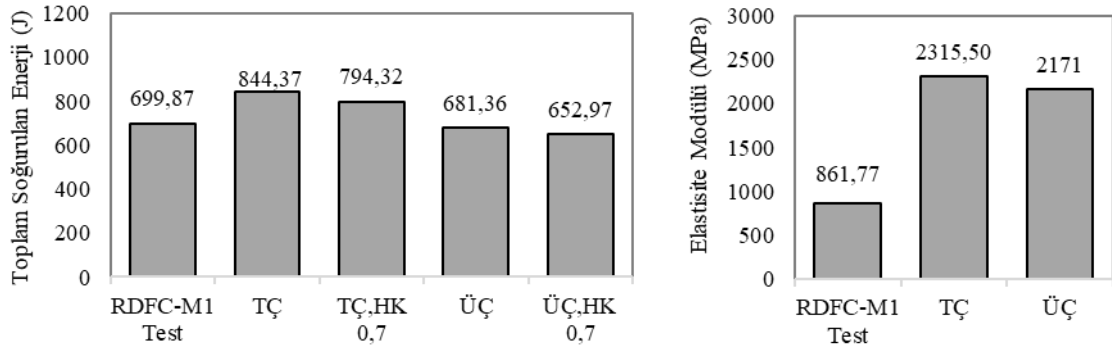


Şekil 4.56. FC-M1 test ve analiz çalışması basma miktarına göre TSE değerleri

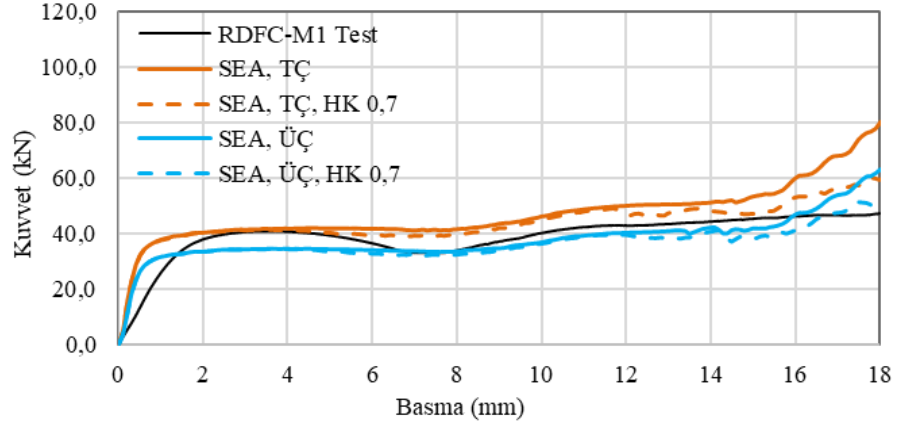
RDFC-M1 kafes yapısı için analiz çalışmasında kullanılmak üzere tasarım kiriş çapı ($d_{TÇ}=1,02$ mm) ve üretim kiriş çapı ($d_{ÜÇ}=0,97$ mm) ile katı modeller hazırlanmış ve analiz modelleri oluşturulmuştur. 0,6 mm eleman boyutu ile analizler yapılmıştır. Analiz sonuçları incelendiğinde kuvvet değerlerinin test değerlerine yakın olduğu görülmektedir. Bununla birlikte diğer iki kafes yapıdan farklı olarak tasarım çapı değerinde elde edilen kuvvetler test değerine daha yakındır. Üretim çapı değerleri ise daha düşük olduğu görülmektedir. Bunun temel sebebi olarak kiriş çaplarının diğer kafes yapılara göre ince olması ve aynı birim hücre boyutlarında RDFC-M1 kafes yapısında burkulmaların daha erken başlaması gösterilebilir. TSE değerlerinde ise diğer iki yapıda bakıldığı gibi ÜÇ ile oluşturulan model ve 0,7 hata kriterinin ele alındığı sonuç alındığında, analizde elde edilen 652,92 J, test sonucunda hesaplanan 679,75 J'den yaklaşık %4 daha azdır. Elastisite modüllerine bakıldığında analiz sonuçları RD-M1 ve FC-M1'de olduğu gibi daha yüksek çıkmaktadır. RDFC-M1 için ÜÇ elastisite modülü 2171 MPa olup, test değerinden yaklaşık %62 daha büyüktür.



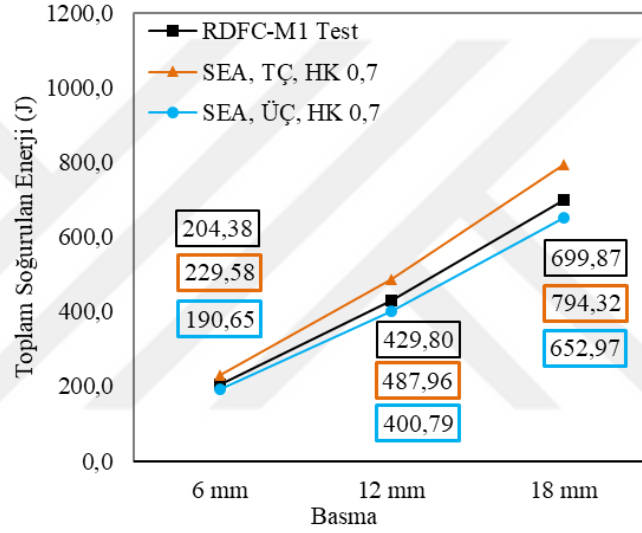
Şekil 4.57. RDFC-M1 kafes yapısı test ve ÜÇ analiz sonrası ezilme durumları



Şekil 4.58. RDFC-M1 test ve analiz çalışması TSE ve E değerleri



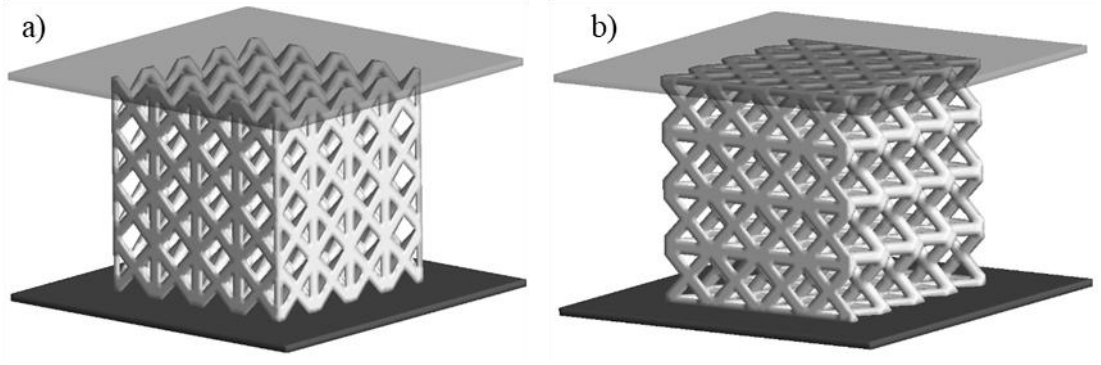
Şekil 4.59. RDFC-M1 hata kriteri (HK) tanımlanmış durum için analiz sonuçları



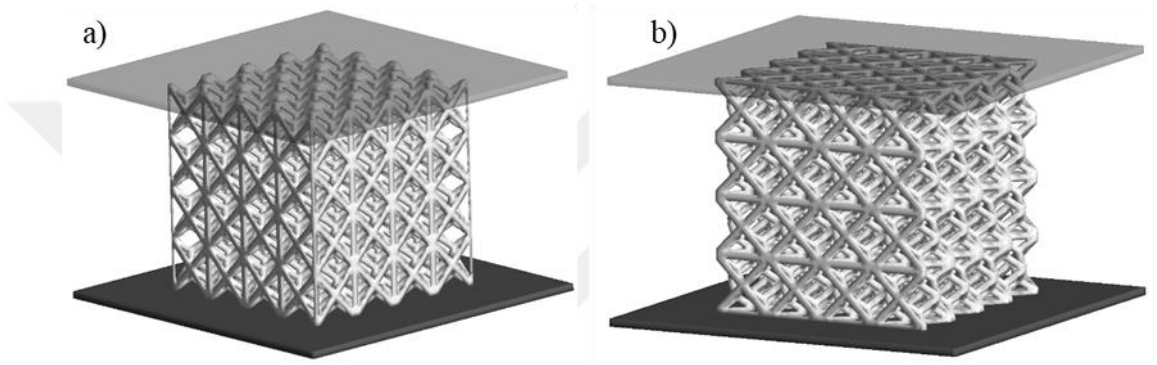
Şekil 4.60. RDFC-M1 test ve analiz çalışması basma miktarına göre TSE değerleri

Kafes yapıların SEA yöntemiyle farklı yönlerde basılması

Kafes yapılar test ve analiz çalışmalarında üretim yönü, sabit ve hareketli iki plakaya dik olacak arasına yerleştirilmiştir. Bu yön, üretim tablasına dik olması sebebiyle Z yönü olarak belirlenmiştir. Diğer yönler ise X ve Y yönü olarak belirlenmiştir. RD kafes yapısı her yönden aynı tasarımda olup, izotropik malzeme şartlarını sağlamaktadır. Ancak FC ve RDFC kafes yapılarında, FC kafes yapının tasarımından kaynaklı olarak yöne bağlı değişikliklerin meydana geldiği düşüncesiyle, X-Y yönleri için analiz çalışmaları yapılmıştır ve her iki kafes yapı için de X-Y yönleri aynıdır (Şekil 4.61 ve Şekil 4.62). SEA çalışmaları için tasarım çapı değerleri ile oluşturulmuş katı modeller kullanılmış olup, hata kriteri 0,7 olarak alınan Z yönü değerleri ile karşılaştırma yapılmıştır. Diğer bütün analiz şartları aynı alınmıştır.

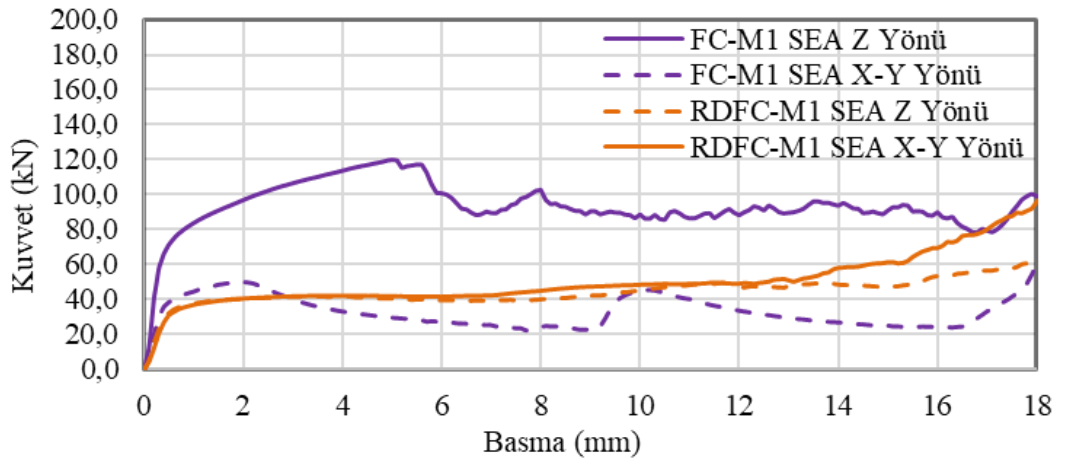


Şekil 4.61. FC-M1 analiz modelleri, a) Z yönü b) X-Y yönü



Şekil 4.62. RDFC-M1 analiz modelleri, a) Z yönü b) X-Y yönü

Şekil 4.63 ile verilen SEA sonuçları incelendiğinde, FC-M1 kafes yapısının Z yönünde basmaya dik kirişlerinden kaynaklı olarak daha dayanıklı olduğu ve 1677,04 J ile en yüksek TSE değerine ulaştığı ancak X-Y yönünde yapılan analiz sonucunda ise 596,6 J değeri ile TSE değerinde ve en yüksek kuvvet değerlerinde ciddi düşüş olduğu görülmektedir.



Şekil 4.63. FC-M1 ve RDFC-M1 farklı yönlerde analiz sonuçları

RDFC-M1 kafes yapısının Z ve X-Y yönleri için yapılan SEA çalışmasında ise, Z yönünde 794,32 J olan TSE değeri diğer yönde 901,67 J olarak hesaplanmıştır. Burada X-Y yönünde katılma bölgesi sebebiyle TSE değerinin arttığı düşünülmektedir. Ancak kuvvet değerleri incelendiğinde birbirine yakın olduğu görülmektedir. Bu durumda analiz sonuçlarından hibrit RDFC-M1 kafes yapısının tam olarak yönden bağımsız olduğu görülmesi de izotropik şartlara daha yakın olduğu anlaşılmaktadır. Bu durumun, hibrit tasarım yönteminin olumlu bir etkisi olduğu düşünülmektedir.



5. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Bu çalışmada tekil ve hibrit birim hücreler, bir kenarı 30 mm olan küp hacim içine farklı boyut ve sayılarda yerleştirilerek, eşit bağıl yoğunlukta tasarlanan kafes yapılar polimer ve metal malzemelerden üretilmiştir. Yarı statik basma testleri üniversal basma-çekme test cihazlarında 5 mm/dk sabit hızla gerçekleştirilmiştir. Ayrıca metal kafes yapıların test benzetimleri sonlu elemanlar analizi ile yapılmıştır. Elde edilen veriler ile kafes yapıların enerji soğurma kabiliyetleri ve mekanik davranışları incelenmiştir.

Hibrit kafes yapı tasarımı, iki farklı birim hücre tasarımının birleştirilmesiyle oluşturulmuştur. RD ve IT birim kafes hücrelerden oluşturulan RDIT hibrit kafes yapı ile RD ve FC birim kafes hücrelerden oluşturulan RDFC hibrit kafes yapının eşit hacim ve bağıl yoğunluklarda tasarlanması için birim hücreleri oluşturan kiriş çapları değiştirilmiştir. RD, IT ve RDIT kafes yapıları içi dolu kirişler ile eşit hacim içerisine 4x4x4, 3x3x3 ve 2x2x2 konfigürasyonlarında ve 2x2x2 konfigürasyonunda dış çapları eşit fakat et kalınlıkları farklı olan içi boş kirişler tasarlanarak ABS benzeri reçineden UV led ışık LCD ile kütleme yöntemiyle üretilmiştir. RD, FC ve RDFC kafes yapıları ise diğer kafes yapılarla eşit bağıl yoğunlukta 4x4x4 konfigürasyonunda tasarlanarak ABS benzeri reçineden LCD ile kütleme ve Inconel 718 metal tozundan seçici lazer ergitme yöntemleriyle üretilmiştir. Toplamda 17 farklı kafes yapı tasarımından 51 adet kafes üretilmiştir.

Eşit hacim ve bağıl yoğunluklarda tasarlanıp üretilen kafes yapıların test ve analiz çalışmalarının verileri kullanılarak, hibrit tasarımın, birim hücre boyutu ve sayısının ve farklı malzemelerin yarı statik basma koşullarında kafes yapıların mekanik özelliklerine etkileri incelenmiştir. Bu çalışmalar çerçevesinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- ABS benzeri reçineden üretilen çekme numunelerinin test edilmesi sonucunda malzemenin yüksek kırılma davranışı gösterdiği görülmektedir. Yaklaşık olarak %3-5 aralığında kopma uzaması değerleri görülmüştür. Üretim tablasına paralel ve dik yönde üretilen test parçalarının benzer özelliklerde olduğu görülmektedir. Malzemenin yüksek kırılma davranışı kafes yapı testlerinde de görülmektedir.

- Inconel 718 metal tozundan üretilen kafes yapılar ise yaklaşık %35 kopma uzaması değerleri ile polimer malzemeye göre daha sünek olduğu görülmektedir. Bu durum basma testlerinde RD-P1 kafes yapısının yaklaşık %10 basma değerlerinde kırılıp, RD-M1 kafes yapısında aynı koşullarda yapılan testlerde herhangi bir kırılma görülmemesi ile doğrulanmıştır.
- Üretimi yapılan kafes yapıların kütleleri incelendiğinde, reçineden üretilen yapılar tasarım kütlelerinden daha fazla ölçülürken, metal tozundan üretilen kafes yapıların ise daha düşük kütlelerde olduğu görülmektedir. Bunun temel sebebi olarak, reçine bazlı üretimde alkolle yıkanmasına rağmen yüzeyde kalan kürlenmemiş reçineler olduğu düşünülmektedir. Metal kafes yapılarda ise üretime bağlı gözenekli yapı ve üretim parametrelerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.
- Hibrit kafes yapılar ile tekil kafes yapılar altı farklı durumda karşılaştırılmıştır. Yarı statik basma testleri sonucunda oluşturulan kuvvet-basma grafikleri incelendiğinde hibrit kafes yapı tasarımları, tekil hücrelerden oluşturulan kafes yapılara göre tüm durumlarda daha kararlı bir mekanik davranış göstermiştir. RDIT kafes yapısı 4x4x4 konfigürasyonunda RD ve IT kafes yapılarına göre daha fazla enerji soğurmuştur. Hibrit kafes yapı 3x3x3 ve 2x2x2 konfigürasyonlarında RD kafes yapısından daha fazla enerji soğurmasına rağmen IT kafes yapısının altında kalmıştır. IT kafes yapısının, RDIT kafes yapısı giriş çaplarına oranları 3x3x3 ve 2x2x2 konfigürasyonlarında 4x4x4'e göre daha fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. IT kafes yapısı Maxwell kararlılık kriterine göre gerinim baskın bir davranış gösterdiği için en yüksek kuvvet değerleri ve elastisite modülü değerlerine sahiptir. 3x3x3 konfigürasyonunda en kararsız mekanik davranışlar görülmüştür. Bunun sebebi olarak artan giriş boylarından kaynaklı bağlantı noktalarında oluşan yüksek gerilmeler gösterilebilir. RDIT-P1 kafes yapısı 9 farklı test çalışması içinde 30,54 J ile en yüksek TSE değerine ulaşmıştır. En düşük mekanik özellikler RD kafes yapısında görülmektedir. Bunun sebebi olarak RD tasarımının köşelerinde ucu açık girişler gösterilebilir.
- RD ve FC kafes yapıları ile hibrit kafes yapı tasarımı karşılaştırıldığında hem polimer hem de metal malzemeden üretilen FC kafes yapının en üstün mekanik

özellikleri gösterdiği görülmüştür. Bunun temel sebebinin FC kafes yapıyı oluşturan giriş çaplarının, diğer iki kafes yapıdan daha kalın olması ve aralarındaki farkın fazla olması düşünülmektedir. Ek olarak aynı tasarımlar farklı malzemelerden üretildiği için özgül soğurulan enerji (ÖSE) kıyaslaması da yapılmıştır. Metal kafes yapının ÖSE değeri polimere göre tüm kafes tiplerinde daha yüksektir.

- 2x2x2 konfigürasyonunda ve içi boş girişlerle tasarımı yapılan polimer kafes yapıların mekanik özellikleri karşılaştırıldığında, 35,2 J ile en fazla enerji hibrit kafes yapı tarafından soğurulmuştur. Ayrıca bu değer RD, IT ve RDIT kafes yapıları ile yapılan 12 farklı test içinde en yüksek değerdir. Ezilme davranışı incelendiğinde yüksek deformasyonda bağlantı noktalarında kırılmalar başlamasına rağmen yapı bütünlüğünü korumuş ve yükün kaldırılmasından sonra bir miktar eski boyutlara yaklaşmıştır.
- Birim hücre boyutu ve sayısının mekanik davranışa etkisi için yapılan çalışmada, hücre boyutları artarken sayıları azalmaktadır. Hücre boyutunun artması ve sayının azalması sonucunda, reçineden üretilen hem birim kafes hem de hibrit kafes yapılarda kararlılık ve toplam soğurulan enerji değerleri azalmıştır. Elastisite modülü değerleri artış göstermiştir.
- Inconel 718 malzeden üretilen RD, FC ve RDFC kafes yapıları LS-DYNA çoklu fizik sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak benzetim çalışmaları yapılmış ve test sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Tasarım çapı ve üretim sonrası kütleden hesaplanan çaplar ile farklı analiz modelleri oluşturulmuştur. Ayrıca hata kriterinin olduğu ve olmadığı durumlar da göz önüne alınmıştır. En yakın sonuçlar, hata kriteri tanımlanmış ve üretim sonrası kütleden hesaplanan çaplar ile oluşturulan analiz modelleri ile elde edilmiştir. 18 mm’de TSE değerleri karşılaştırıldığında, RD-M1 kafes yapısı için yaklaşık %12,8, FC-M1 kafes yapısında yaklaşık %10, RDFC-M1 kafes yapısında ise yaklaşık %4 fark bulunmaktadır. Bu değerlerin kabul edilebilir aralıkta olduğu söylenebilir. Ayrıca 6 mm ve 12 mm basma durumlarında TSE değerleri karşılaştırıldığında analiz değerleri test değerlerine yaklaşmaktadır. Bunun temel sebebi olarak analiz ve

testlerde yüksek deformasyon dolayısıyla kirişlerin birbirine temasının farklı zamanlarda gerçekleşmesi ve tasarım ile üretim arasındaki farklılıklar gösterilebilir.

- Test ve analizleri yapılan metal kafes yapılarda, RD kafes yapı mekanik özelliklerinin yönden bağımsız olduğu ancak FC ve RDFC kafes yapılarının farklı yönlerde mekanik özelliklerinin değişebileceği düşüncesiyle Z yönünde yapılan analizlere ek olarak X-Y yönleri için analizler yapılmıştır. FC kafes yapıda TSE ve maksimum kuvvet değerlerinde ciddi düşüşler görülürken, hibrit RDFC kafes yapıda benzer mekanik özellikler görülmüştür. Bu durumun hibrit tasarımın getirdiği bir fayda olduğu düşünülmektedir.

Yukarıda verilen bilgiler sonucunda, kafes yapıların yüksek mekanik dayanımlarının yanında düşük kütleleri ile enerji soğurma ve hafifletme çalışmalarında iyi bir alternatif olarak kullanılabilmesi düşünülmektedir. Hibrit kafes yapıların ise tekil kafes yapıların üstün özelliklerini bir araya getirmesinden kaynaklı önemli bir avantaj sağladığı görülmektedir. İçi boş kafes yapıların farklı bir tasarım kriteri olarak ele alınması gerektiği anlaşılmaktadır. Nümerik analizler ile gerçekleştirilen benzetim çalışmaları için sonuçların tatmin edici olduğu görülmektedir.

Bu tez çalışmasının devamında gelecekte yapılabilecek çalışmalar aşağıda sıralanmıştır.

- Üretim kısıtları sebebiyle metal malzemeden üretilmeyen içi boş kafes yapıların farklı tasarımlarda üretilmesi ve içi boş kirişlerden üretilen hibrit kafes yapıların geniş bir çalışma konusu olacağı değerlendirilmektedir.
- Inconel 718 malzeme ile üretilen kafes yapılarda bu tez çalışması kapsamında ısıtım işlemi yapılmamıştır. Ancak bu malzemeden üretilmiş hibrit ve tekil kafes yapıların ısıtım işlemine tabi tutularak karşılaştırma çalışması yapılabilir.
- ABS benzeri reçineden üretilen kafes yapılarda malzemenin yüksek kırılma dayanımı sebebiyle kırılmalar görülmüştür. Daha sünek bir malzeme kullanılarak etkileri üzerine çalışmalar yapılabilir. Özellikle içi boş kirişler ile oluşturulan kafes yapıların bu durumda tekrarlı kullanıma olanak sağlayıp sağlamayacağı araştırılabilir.

- LS-DYNA yazılımında çekme testleri ile oluşturulan malzeme modeli ve kullanılan MAT24 malzeme kartının yerine, ana malzemenin farklı testler sonucunda elde edilen verileriyle yeni bir malzeme kartı tanımlanarak aynı koşullarda malzeme modelinin etkisi araştırılabilir.
- Bu çalışma kapsamında yarı statik koşullarda gerçekleştirilen testlerin daha yüksek hızlarda gerçekleştirilerek enerji soğurma ve çarpışma kabiliyetleri araştırılabilir.



KAYNAKLAR

- Akbay, Ö. C., & Bahçe, E. (2024). Investigation of mechanical performance of hybrid design porous structures manufactured from CoCr Alloy. *Progress in Additive Manufacturing*. <https://doi.org/10.1007/s40964-024-00842-3>
- Al Nashar, M., & Sutradhar, A. (2021). Design of hierarchical architected lattices for enhanced energy absorption. *Materials*, 14(18). <https://doi.org/10.3390/ma14185384>
- Ali, M., Sajjad, U., Hussain, I., Abbas, N., Ali, H. M., Yan, W. M., & Wang, C. C. (2022). On the assessment of the mechanical properties of additively manufactured lattice structures. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 142, 93-116. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2022.05.019>
- Ashby, M. F. (2006). The properties of foams and lattices. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 364(1838), 15-30. <https://doi.org/10.1098/rsta.2005.1678>
- Bai, L., Gong, C., Chen, X., Sun, Y., Xin, L., Pu, H., Peng, Y., & Luo, J. (2020). Mechanical properties and energy absorption capabilities of functionally graded lattice structures: Experiments and simulations. *International Journal of Mechanical Sciences*, 182. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105735>
- 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 R: Reports*, 144. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2021.100606>
- Bora, R., Shukla, M., & Kumar, A. (2023). Finite element analysis based design of biomimetic functionally graded Ti-6Al-4V alloy scaffolds for human cortical bone applications. *Materials Today: Proceedings*, 90, 81-85. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.05.057>
- Borikar, G. P., Patil, A. R., & Kolekar, S. B. (2023). Additively Manufactured Lattice Structures and Materials: Present Progress and Future Scope. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 24(11), 2133-2180. <https://doi.org/10.1007/s12541-023-00848-x>
- 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 R: Reports*, 146. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2021.100648>
- Cui, Z., Zhao, J., Xu, R., Ding, Y., & Sun, Z. (2024). Mechanical design and energy absorption performances of novel plate-rod hybrid lattice structures. *Thin-Walled Structures*, 194. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.111349>
- Dave, H. K., Karumuri, R. T., Prajapati, A. R., & Rajpurohit, S. R. (2022). Specific energy absorption during compression testing of ABS and FPU parts fabricated using LCD-SLA based 3D printer. *Rapid Prototyping Journal*, 28(8), 1530-1540. <https://doi.org/10.1108/RPJ-04-2021-0075>
- Deshpande, V. S., Ashby, M. F., & Fleck, N. A. (2001). Foam Topology Bending Versus Stretching Dominated Architectures. *Acta mater*, 49, 1035-1040.
- Dong, G., Tang, Y., & Fiona Zhao, Y. (2017). A Survey of Modeling of Lattice Structures Fabricated by Additive Manufacturing. *Journal of Mechanical Design*, 139(10). <https://doi.org/10.1115/1.4037305>

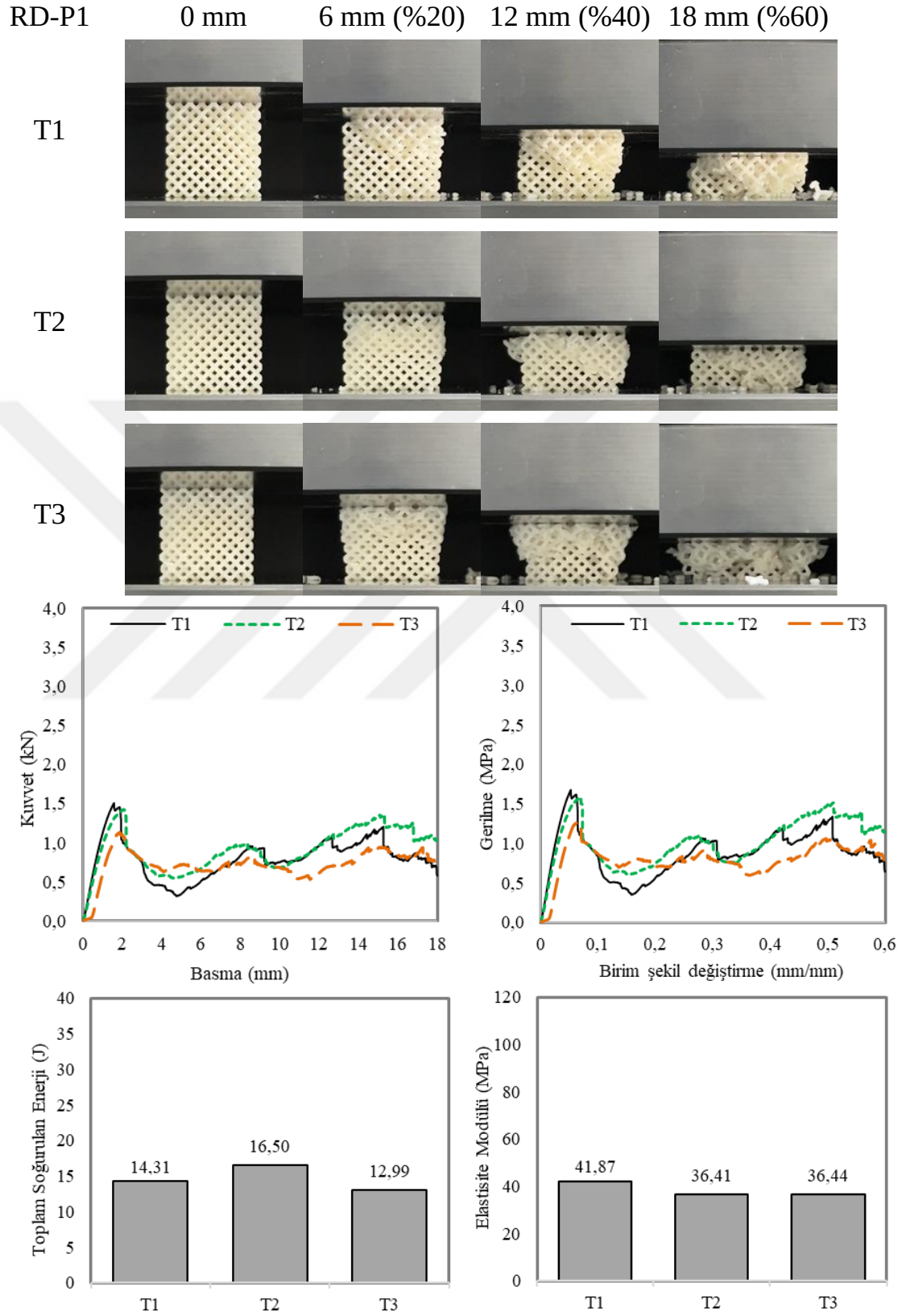
- Du Plessis, A., Razavi, N., Benedetti, M., Murchio, S., Leary, M., Watson, M., Bhate, D., & Berto, F. (2022). Properties and applications of additively manufactured metallic cellular materials: A review. *Progress in Materials Science*, 125. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2021.100918>
- Erhart, T. (2011, October-12). Review of Solid Element Formulations in LS-DYNA [Conference presentation]. LS-DYNA Forum 2011, Stuttgart, Germany. <https://www.dynamore.de/de/download/papers/forum11/entwicklerforum-2011/erhart.pdf>
- Feng, J., Liu, B., Lin, Z., & Fu, J. (2021). Isotropic octet-truss lattice structure design and anisotropy control strategies for implant application. *Materials and Design*, 203. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109595>
- Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., & Khorasani, M. (2021). *Additive Manufacturing Technologies* (Third). Springer Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7>
- Ha, N. S., & Lu, G. (2020). A review of recent research on bio-inspired structures and materials for energy absorption applications. *Composites Part B: Engineering*, 181. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107496>
- Han, T., Qi, D., Ma, J., & Sun, C. (2024). Generative design and mechanical properties of the lattice structures for tensile and compressive loading conditions fabricated by selective laser melting. *Mechanics of Materials*, 188. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2023.104840>
- Kladovasilakis, N., Tsongas, K., & Tzetzis, D. (2023). Development of novel additive manufactured hybrid architected materials and investigation of their mechanical behavior. *Mechanics of Materials*, 176. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2022.104525>
- Korkmaz, M. E., Gupta, M. K., Robak, G., Moj, K., Krolczyk, G. M., & Kuntoğlu, M. (2022). Development of lattice structure with selective laser melting process: A state of the art on properties, future trends and challenges. *Journal of Manufacturing Processes*, 81, 1040-1063. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.07.051>
- Leary, M. (2020a). Design of lattice and zero-mean curvature structures. *Design for Additive Manufacturing* (ss. 123-163). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816721-2.00005-1>
- Leary, M. (2020b). Introduction to AM. *Design for Additive Manufacturing* (ss. 1-6). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816721-2.00001-4>
- Li, C., Qi, J., Wang, P., Zhao, Z., Wang, Z., Lei, H., & Duan, S. (2022). A novel hybrid design method of lattice structure based on failure mode. *Science China: Physics, Mechanics and Astronomy*, 65(9). <https://doi.org/10.1007/s11433-021-1905-9>
- Li, L. B., Yang, F., Wang, P., & Guo, Z. M. (2023). A new hybrid lattice structure with improved modulus, strength and energy absorption properties. *Science China Technological Sciences*, 66(7), 2119-2133. <https://doi.org/10.1007/s11431-022-2199-5>
- Li, L., Yang, F., Jin, Y., Li, P., Zhang, S., Xue, K., Lu, G., & Fan, H. (2024). Multifunctional hybrid plate lattice structure with high energy absorption and excellent sound absorption. *Materials and Design*, 241. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.112946>
- Li, L., Yang, F., Li, P., Wu, W., & Wang, L. (2022). A novel hybrid lattice design of nested cell topology with enhanced energy absorption capability. *Aerospace Science and Technology*, 128. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2022.107776>

- Ling, C., Cernicchi, A., Gilchrist, M. D., & Cardiff, P. (2019). Mechanical behaviour of additively-manufactured polymeric octet-truss lattice structures under quasi-static and dynamic compressive loading. *Materials and Design*, 162, 106-118. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.11.035>
- Lu, Y., Wu, S., Gan, Y., Huang, T., Yang, C., Junjie, L., & Lin, J. (2015). Study on the microstructure, mechanical property and residual stress of SLM Inconel-718 alloy manufactured by differing island scanning strategy. *Optics and Laser Technology*, 75, 197-206. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2015.07.009>
- Ma, X., Zhang, N., & Tian, X. (2023). A novel hybrid lattice structure for improving compression mechanical properties. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. <https://doi.org/10.1080/15376494.2023.2222125>
- Maconachie, T., Leary, M., Zhang, J., Medvedev, A., Sarker, A., Ruan, D., Lu, G., Faruque, O., & Brandt, M. (2020). Effect of build orientation on the quasi-static and dynamic response of SLM AlSi10Mg. *Materials Science and Engineering: A*, 788. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139445>
- Malekan, M., & Sigurjónsson, B. (2024). On the mechanical behavior of polymeric lattice structures fabricated by stereolithography 3D printing. *Engineering Reports*. <https://doi.org/10.1002/eng2.13003>
- Mancini, E., Utzeri, M., Farotti, E., Lattanzi, A., & Sasso, M. (2024). DLP printed 3D gyroid structure: Mechanical response at meso and macro scale. *Mechanics of Materials*, 104970. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2024.104970>
- Meza, L. R., Zelhofer, A. J., Clarke, N., Mateos, A. J., Kochmann, D. M., & Greer, J. R. (2015). Resilient 3D hierarchical architected metamaterials. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112(37), 11502-11507. <https://doi.org/10.1073/pnas.1509120112>
- Miao, X., Hu, J., Xu, Y., Su, J., & Jing, Y. (2024). Review on mechanical properties of metal lattice structures. *Composite Structures* (C. 342). <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2024.118267>
- Moon, S. K., Tan, Y. E., Hwang, J., & Yoon, Y. J. (2014). Application of 3D printing technology for designing light-weight unmanned aerial vehicle wing structures. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing- Green Technology*, 1(3), 223-228. <https://doi.org/10.1007/s40684-014-0028-x>
- Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering* (C. 143, ss. 172-196). <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
- Niutta, C. B., Ciardiello, R., & Tridello, A. (2022). Experimental and Numerical Investigation of a Lattice Structure for Energy Absorption: Application to the Design of an Automotive Crash Absorber. *Polymers*, 14(6). <https://doi.org/10.3390/polym14061116>
- Novak, N., Tanaka, S., Hokamoto, K., Mauko, A., Yilmaz, Y. E., Al-Ketan, O., Vesenjak, M., & Ren, Z. (2023). High strain rate mechanical behaviour of uniform and hybrid metallic TPMS cellular structures. *Thin-Walled Structures*, 191. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.111109>
- Pan, C., Han, Y., & Lu, J. (2020). Design and Optimization of Lattice Structures: A Review. *Applied Sciences*, 10(18), 6374. <https://doi.org/10.3390/APP10186374>

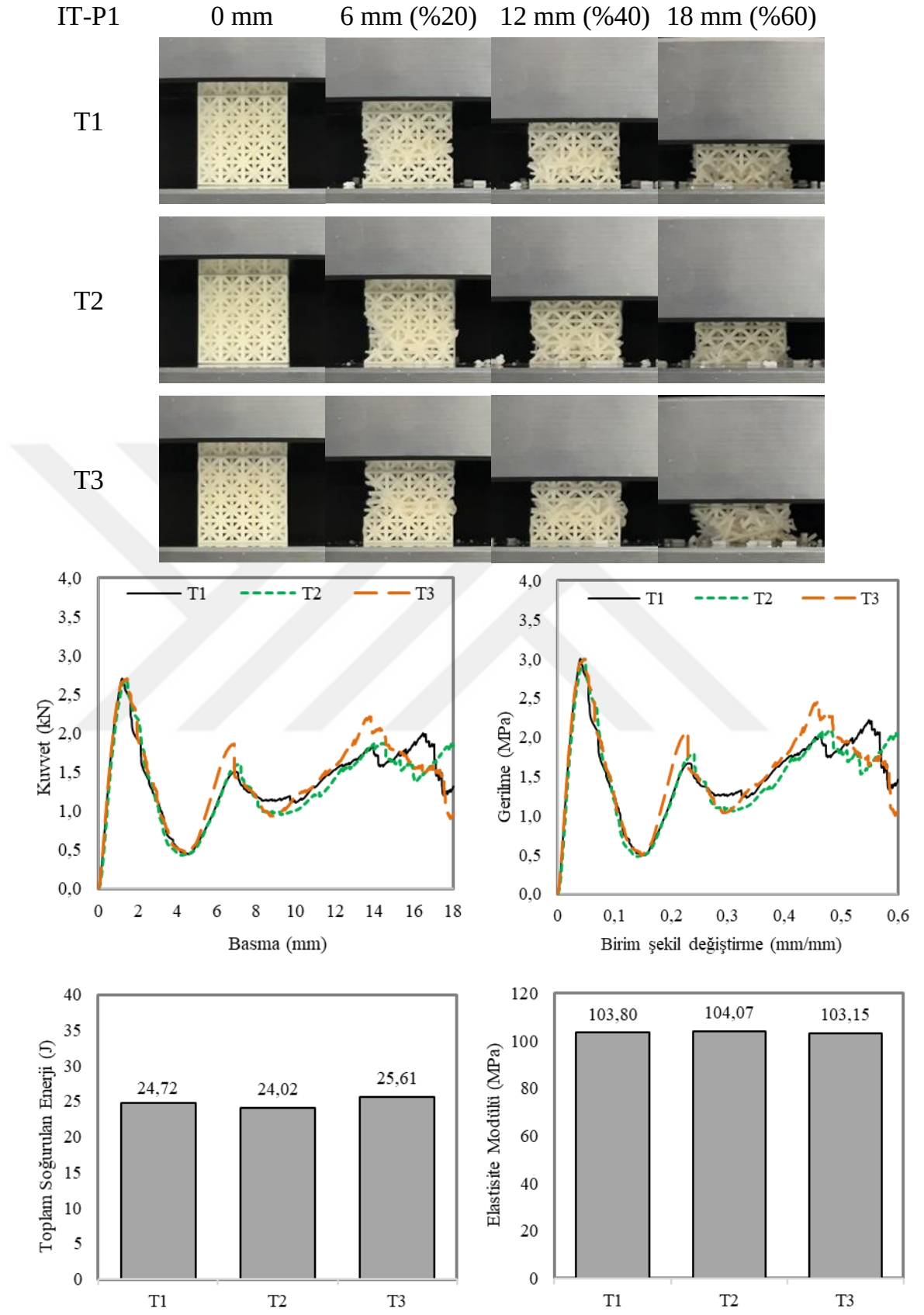
- Park, K. M., Min, K. S., & Roh, Y. S. (2022). Design Optimization of Lattice Structures under Compression: Study of Unit Cell Types and Cell Arrangements. *Materials*, 15(1). <https://doi.org/10.3390/ma15010097>
- Rasiya, G., Shukla, A., & Saran, K. (2020). Additive Manufacturing-A Review. *Materials Today: Proceedings*, 47, 6896-6901. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.181>
- Riva, L., Ginestra, P. S., & Ceretti, E. (2021). Mechanical characterization and properties of laser-based powder bed-fused lattice structures: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 113, 649-671. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06631-4>/Published
- Saleh Alghamdi, S., John, S., Roy Choudhury, N., & Dutta, N. K. (2021). Additive Manufacturing of Polymer Materials: Progress, Promise and Challenges. *Polymers*, 13(5), 753. <https://doi.org/10.3390/polym13050753>
- Seharing, A., Azman, A. H., & Abdullah, S. (2020). A review on integration of lightweight gradient lattice structures in additive manufacturing parts. *Advances in Mechanical Engineering*, 12(6). <https://doi.org/10.1177/1687814020916951>
- Syrlybayev, D., Perveen, A., & Talamona, D. (2023). Experimental investigation of mechanical properties and energy absorption capabilities of hybrid lattice structures manufactured using fused filament fabrication. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 125(5-6), 2833-2850. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-10922-3>
- Tancogne-Dejean, T., Spierings, A. B., & Mohr, D. (2016). Additively-manufactured metallic micro-lattice materials for high specific energy absorption under static and dynamic loading. *Acta Materialia*, 116, 14-28. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.05.054>
- Tsang, H. H., Tse, K. M., Chan, K. Y., Lu, G., & Lau, A. K. T. (2019). Energy absorption of muscle-inspired hierarchical structure: Experimental investigation. *Composite Structures*, 226. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111250>
- Wang, C. Y., Li, Y., Zhao, W. Z., Zou, S. C., Zhou, G., & Wang, Y. L. (2018). Structure design and multi-objective optimization of a novel crash box based on biomimetic structure. *International Journal of Mechanical Sciences*, 138-139, 489-501. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.01.032>
- Wang, Z., Zhao, Z., Bai, P., Ren, J., Liu, B., Naik, N., Liu, B., & Qu, H. (2024). The microstructure and property evolutions of Inconel718 lattice structure by selective laser melting. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 7(2). <https://doi.org/10.1007/s42114-024-00869-8>
- Wong, K. V., & Hernandez, A. (2012). A Review of Additive Manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering*, 2012, 1-10. <https://doi.org/10.5402/2012/208760>
- Wu, J., Zhang, Y., Yang, F., Jiang, F., Xu, X., Tan, Y., & Su, L. (2023). A hybrid architectural metamaterial combining plate lattice and hollow-truss lattice with advanced mechanical performances. *Additive Manufacturing*, 76. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103764>
- Wu, W., Liu, P., Wang, Y., & Kang, Z. (2023). Design of dual-material lattice structures with compression-torsion bistability. *Materials and Design*, 230. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111996>
- Wu, Y., Fang, J., Wu, C., Li, C., Sun, G., & Li, Q. (2023). Additively manufactured materials and structures: A state-of-the-art review on their mechanical characteristics and energy absorption. *International Journal of Mechanical Sciences*, 246. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2023.108102>

- Xiao, L., Xu, X., Feng, G., Li, S., Song, W., & Jiang, Z. (2022). Compressive performance and energy absorption of additively manufactured metallic hybrid lattice structures. *International Journal of Mechanical Sciences*, 219. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.107093>
- Xu, Z., Tvenning, T., Wu, T., & Razavi, N. (2024). Evaluating quasi-static and fatigue performance of IN718 gyroid lattice structures fabricated via LPBF: Exploring relative densities. *International Journal of Fatigue*, 178. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2023.108028>
- Xue, X., Lin, C., Wu, F., Li, Z., & Liao, J. (2023). Lattice structures with negative Poisson's ratio: A review. *Materials Today Communications*, 34. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.105132>
- Yang, X., Gong, Y., Zhao, L., Zhang, J., & Hu, N. (2023). Compressive mechanical properties of layer hybrid lattice structures fabricated by laser powder bed fusion technique. *Journal of Materials Research and Technology*, 22, 1800-1811. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.12.031>
- Yin, H., Zhang, W., Zhu, L., Meng, F., Liu, J., & Wen, G. (2023). Review on lattice structures for energy absorption properties. *Composite Structures*, 304. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116397>
- Zaharia, S. M., Lancea, C., Kruk, A., Cempura, G., Gruszczyński, A., Chicos, L. A., & Pop, M. A. (2024). Mechanical Properties and Microstructure of Inconel 718 Lattice Structures Produced by Selective Laser Melting Process. *Materials*, 17(3). <https://doi.org/10.3390/ma17030622>
- Zhang, J., Yang, X., Zuo, H., & Dong, Y. (2024). Study on mechanical response control of metal-ceramic dual phase hybrid lattice structure. *Materials Today Communications*, 41. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.110656>
- Zhang, P., Biligetu, Qi, D. X., Xue, R., Liu, K., Huang, Z. X., Wu, W. W., & Li, Y. (2021). Mechanical design and energy absorption of 3D novel hybrid lattice metamaterials. *Science China Technological Sciences*, 64(10), 2220-2228. <https://doi.org/10.1007/s11431-020-1756-x>
- Zhang, T., Huang, Z., Li, Y., Xu, Z., Zhou, Z., & Chen, Z. (2023). Compressive mechanical behaviors of PPR and NPR chiral compression–twist coupling lattice structures under quasi-static and dynamic loads. *Thin-Walled Structures*, 182. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.110234>
- Zheng, X., Lee, H., Weisgraber, T. H., Shusteff, M., DeOtte, J., Duoss, E. B., Kuntz, J. D., Biener, M. M., Ge, Q., Jackson, J. A., Kucheyev, S. O., Fang, N. X., & Spadaccini, C. M. (2014). Ultralight, ultrastiff mechanical metamaterials. *Science*, 344(6190), 1373-1377. <https://doi.org/10.1126/science.1252291>
- Zheng, X., Smith, W., Jackson, J., Moran, B., Cui, H., Chen, D., Ye, J., Fang, N., Rodriguez, N., Weisgraber, T., & Spadaccini, C. M. (2016). Multiscale metallic metamaterials. *Nature Materials*, 15(10), 1100-1106. <https://doi.org/10.1038/nmat4694>

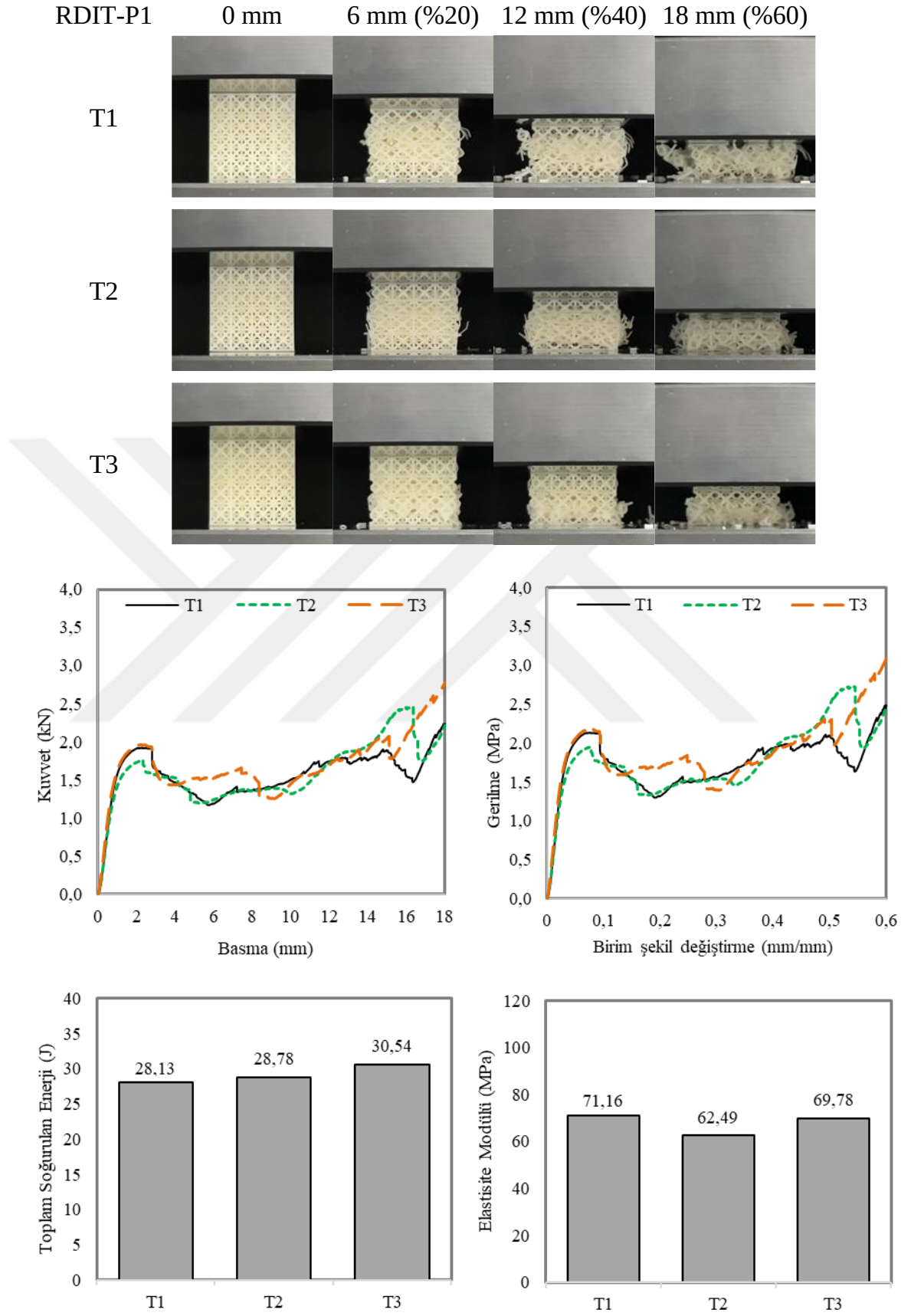
EK 1 TEST ÇALIŞMALARI



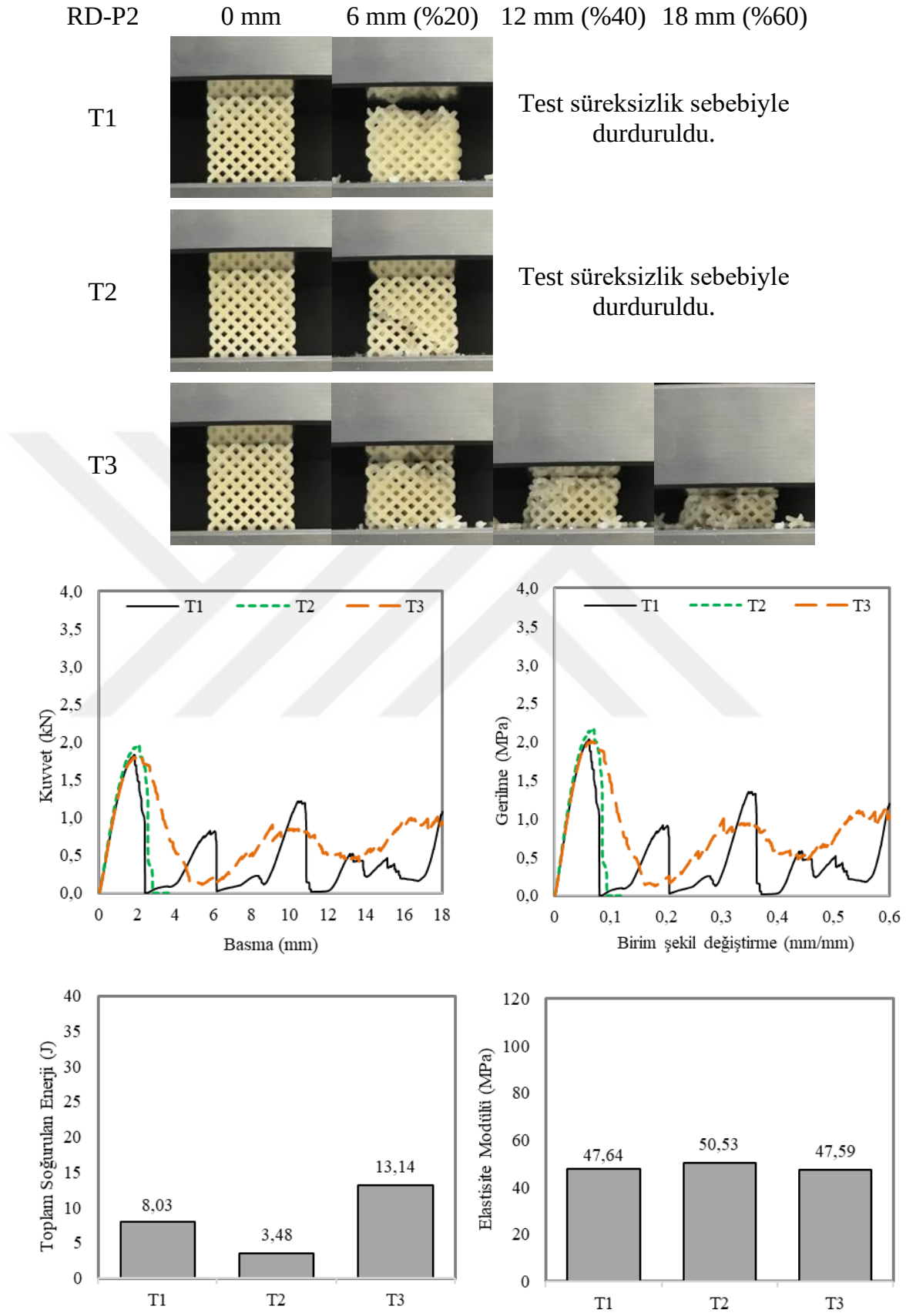
Ek Şekil 1. RD-P1 kafes yapı basma testi sonuçları



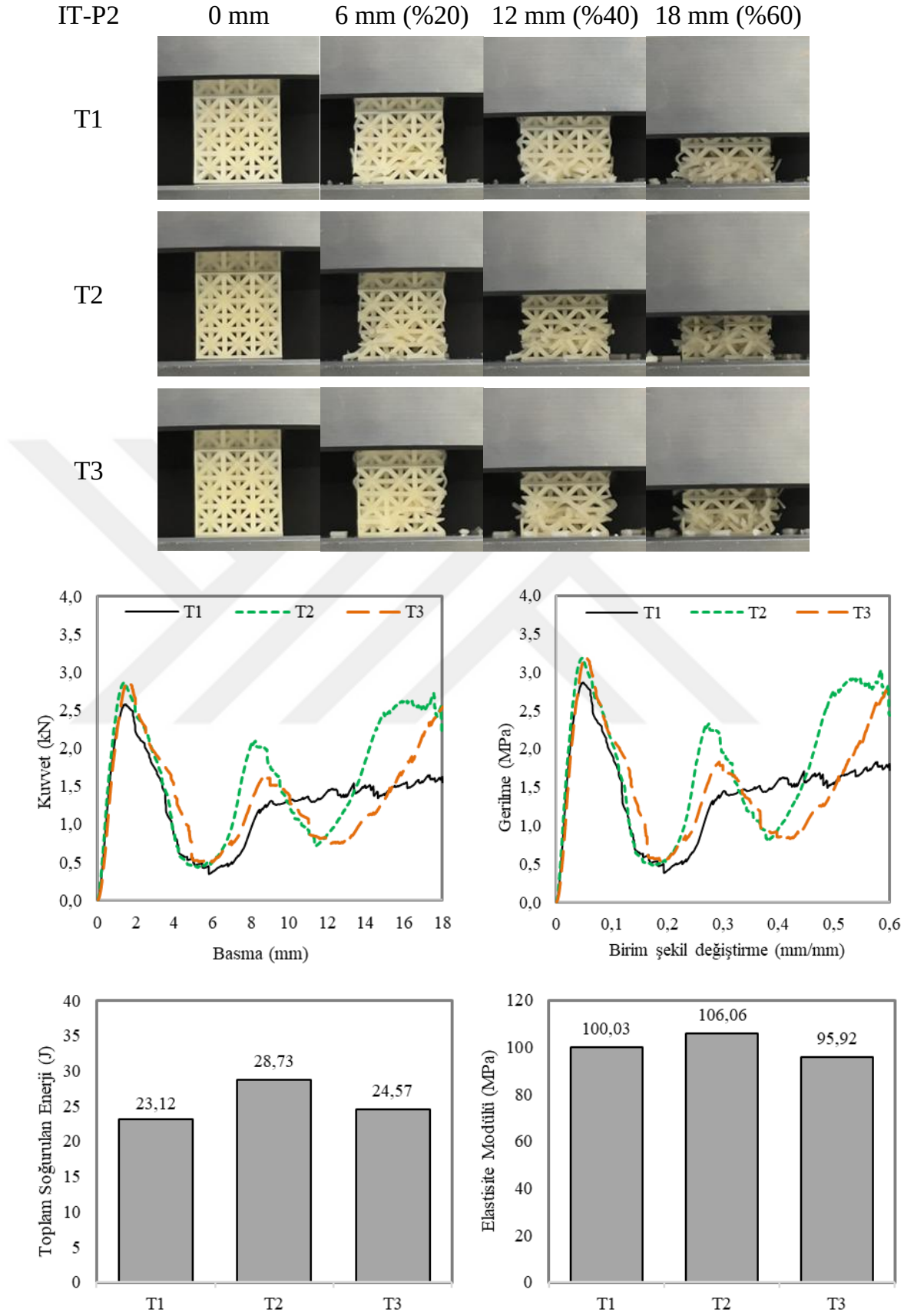
Ek Şekil 2. IT-P1 kafes yapı basma testi sonuçları



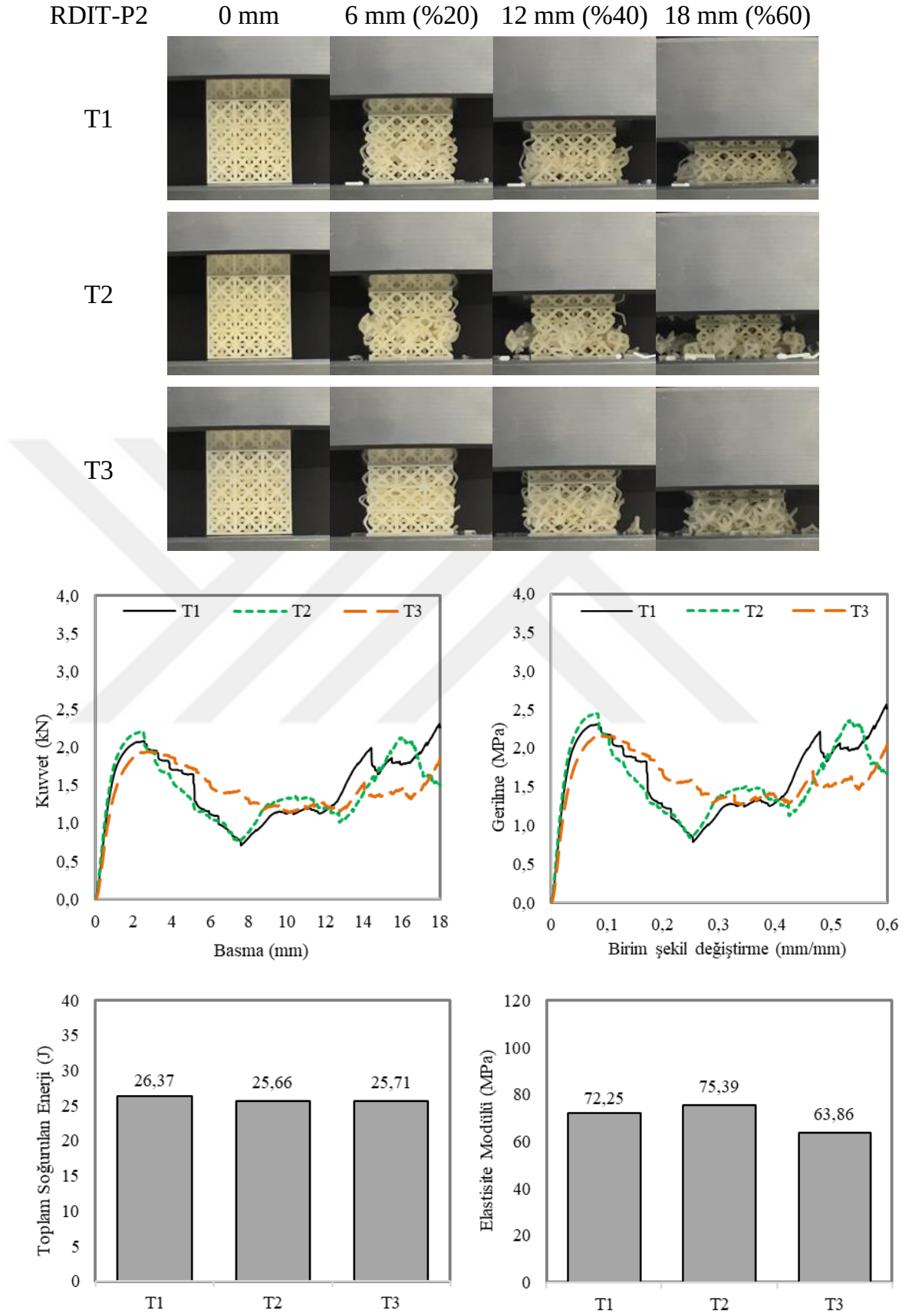
Ek Şekil 3. RDIT-P1 kafes yapı basma testi sonuçları



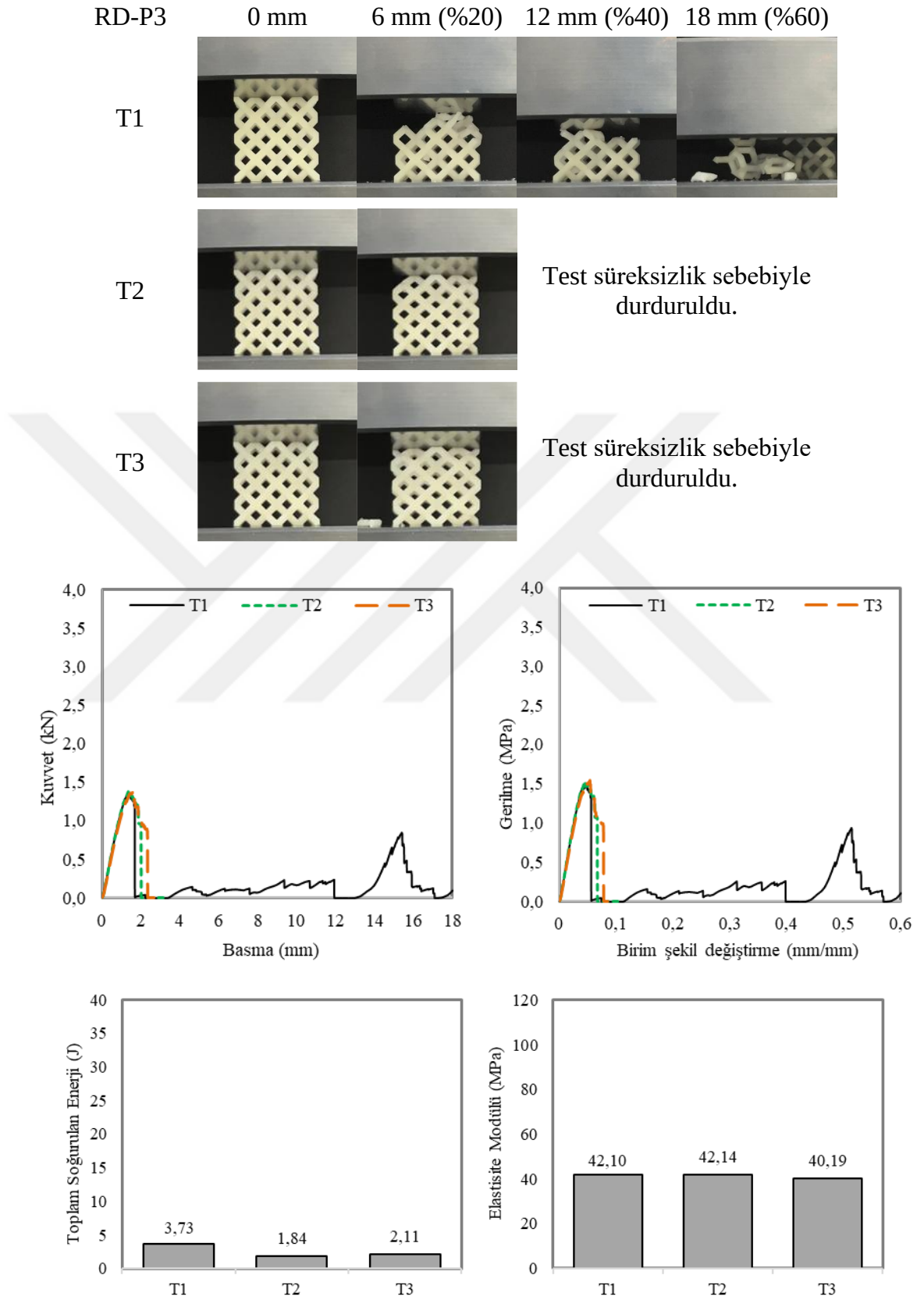
Ek Şekil 4. RD-P2 kafes yapı basma testi sonuçları



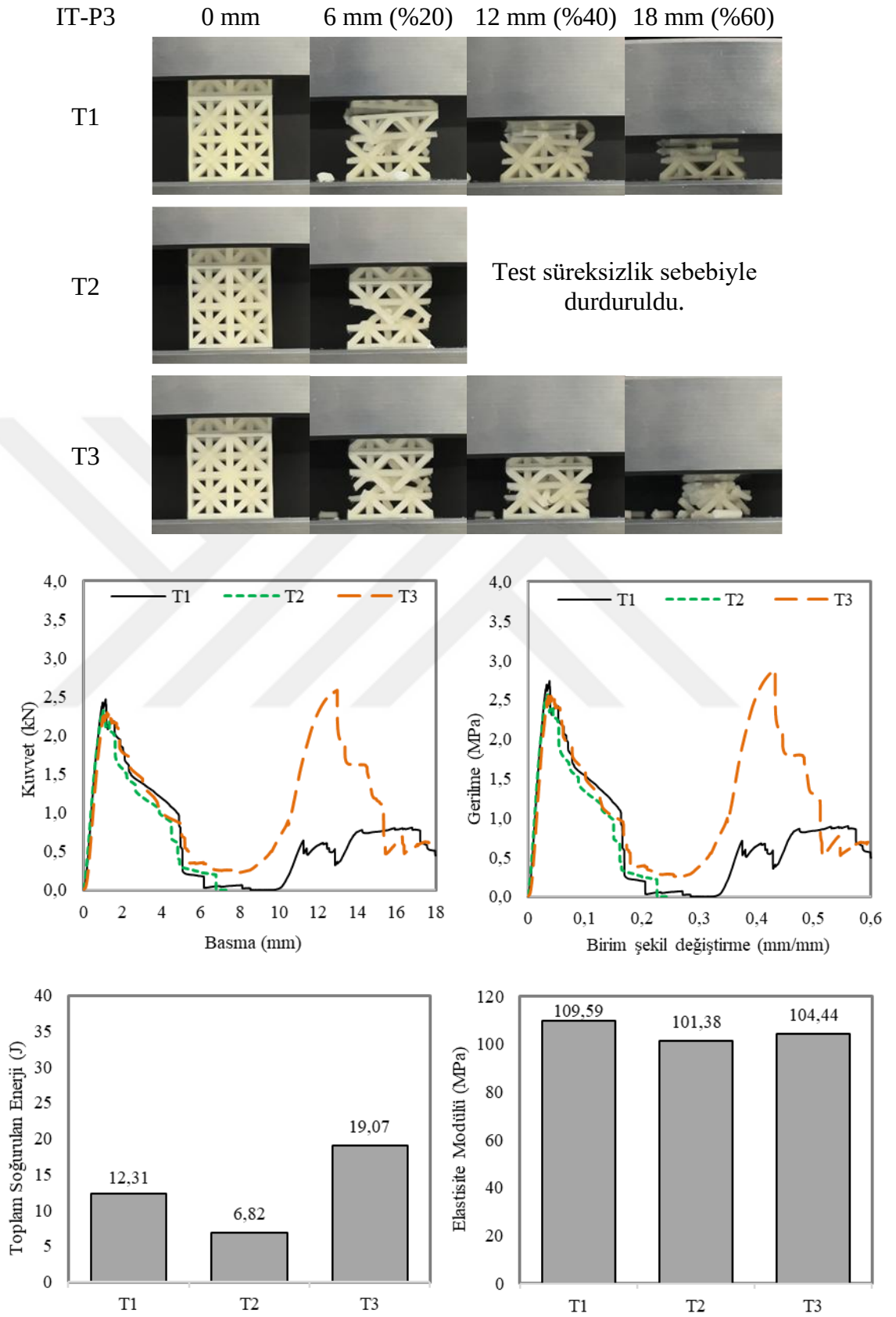
Ek Şekil 5. IT-P2 kafes yapı basma testi sonuçları



Ek Şekil 6. RDIT-P2 kafes yapı basma testi sonuçları



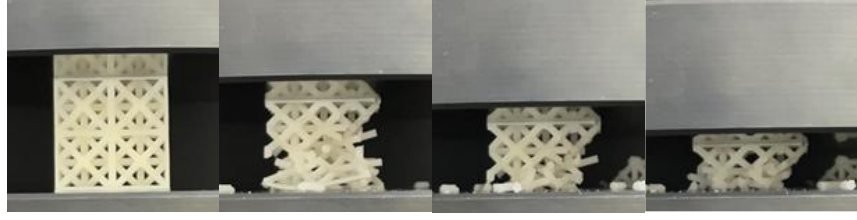
Ek Şekil 7. RD-P3 kafes yapı basma testi sonuçları



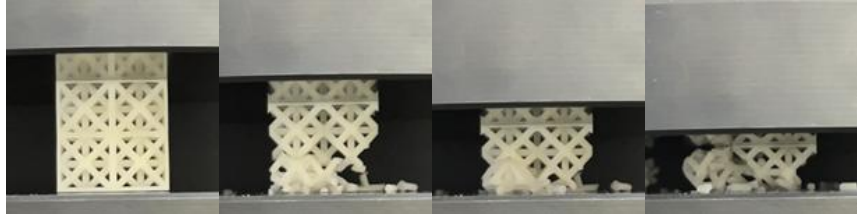
Ek Şekil 8. IT-P3 kafes yapı basma testi sonuçları

RDIT-P3 0 mm 6 mm (%20) 12 mm (%40) 18 mm (%60)

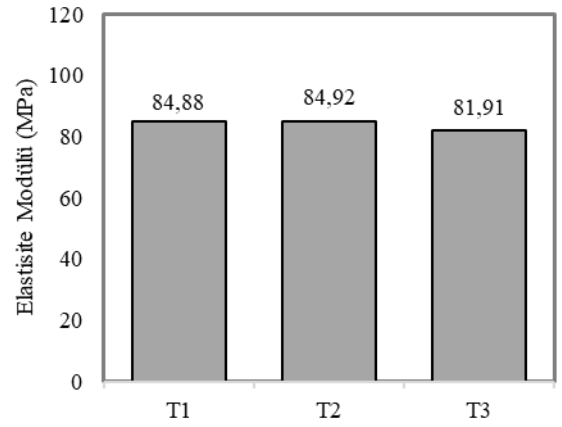
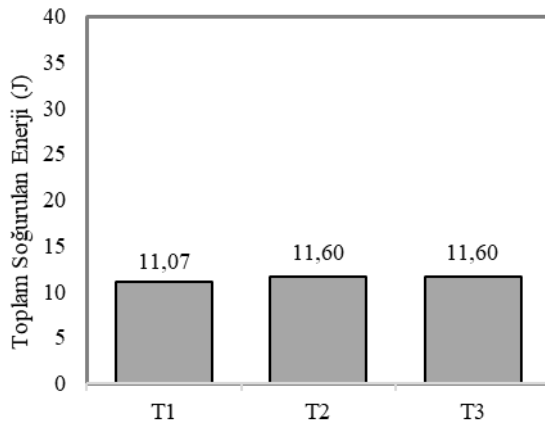
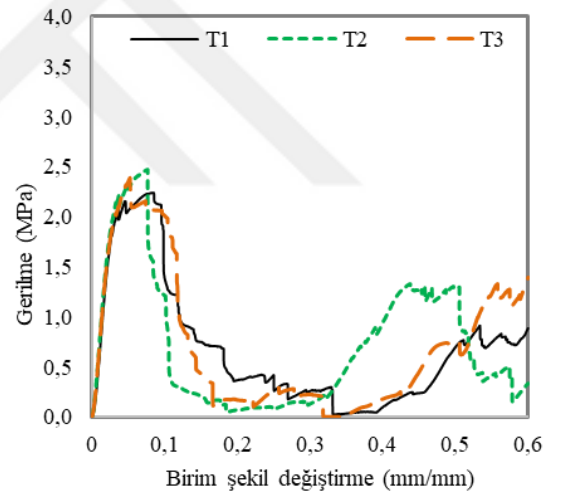
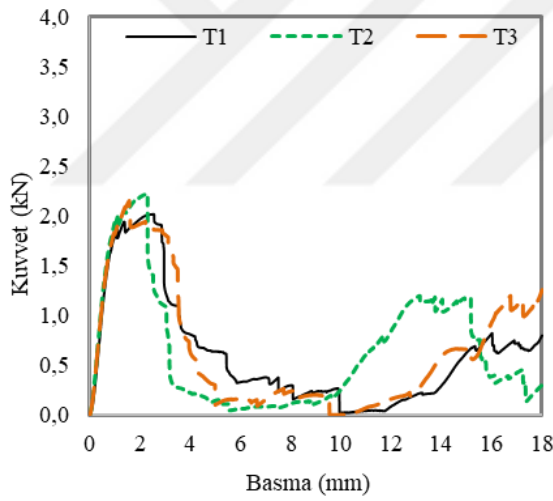
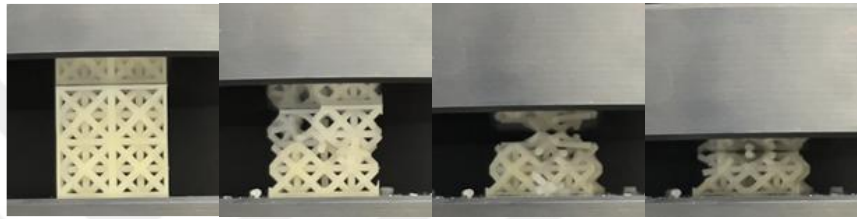
T1



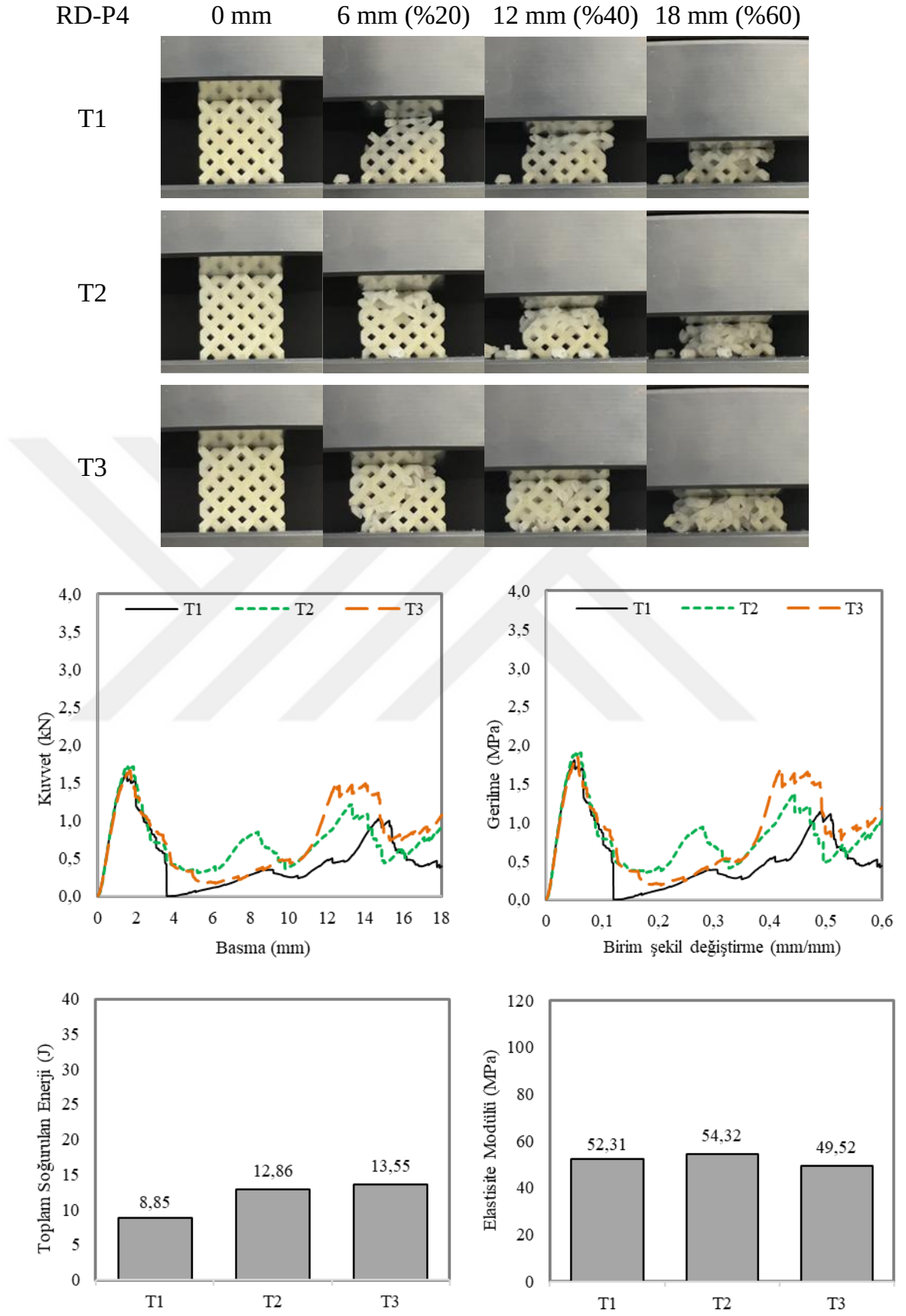
T2



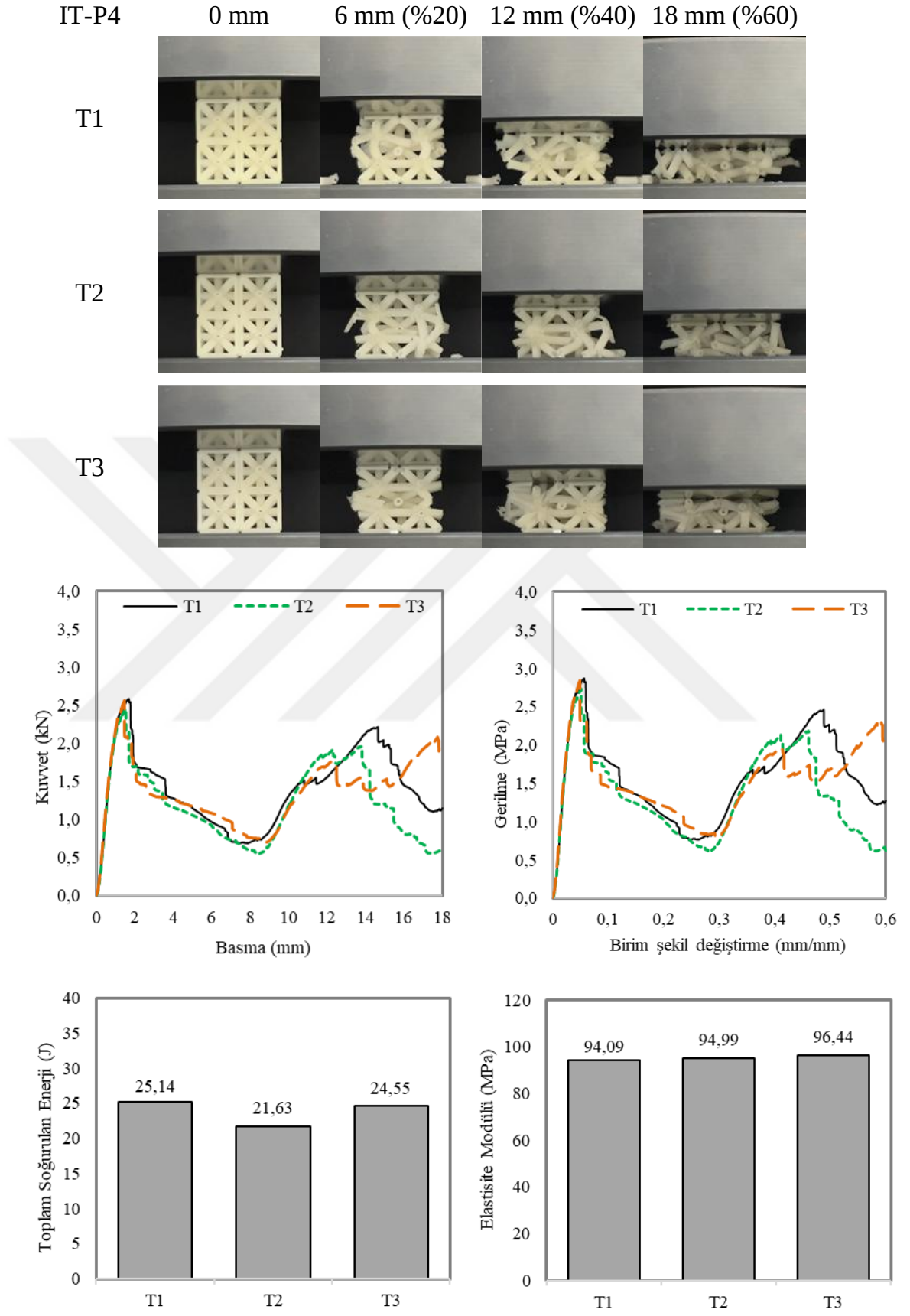
T3



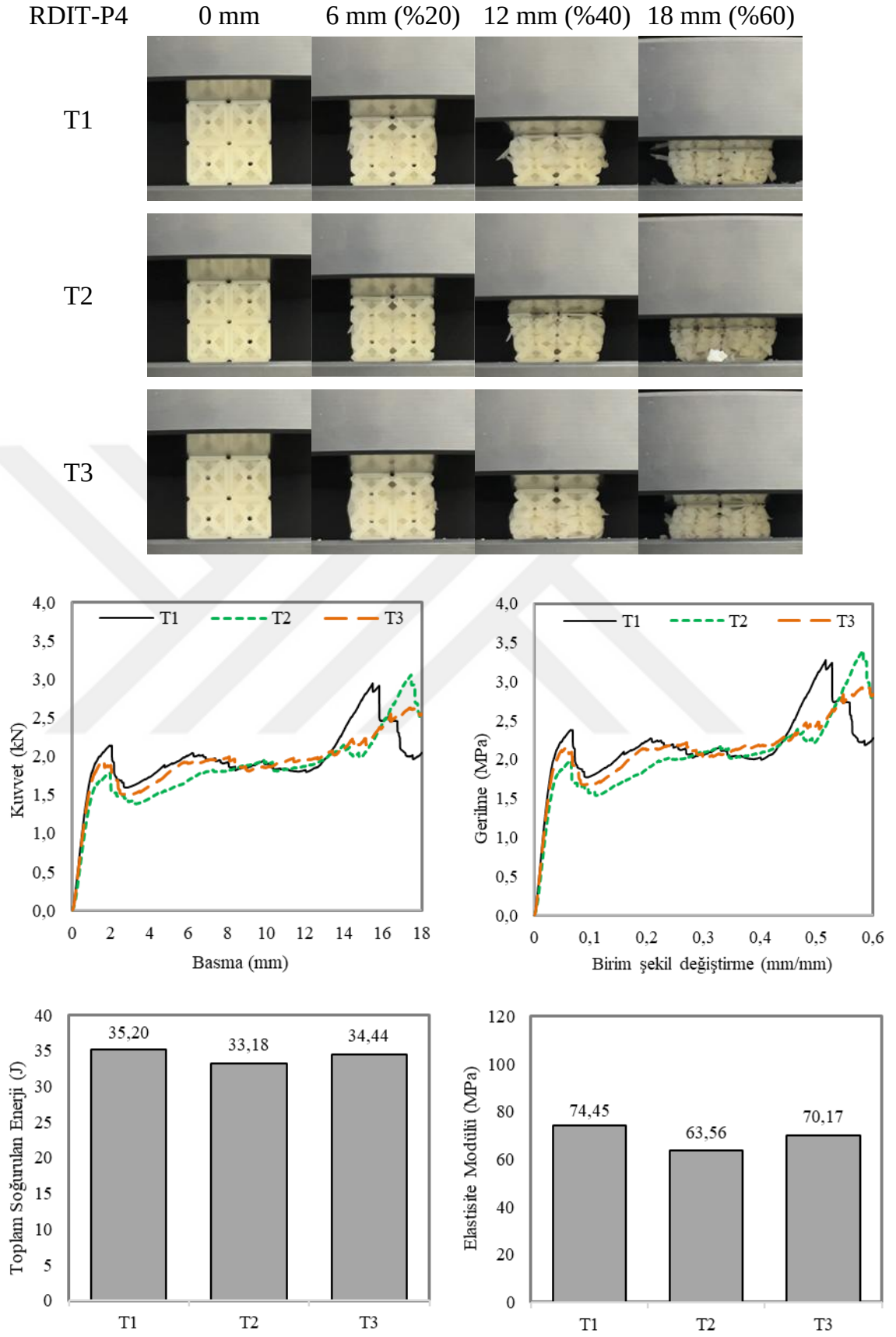
Ek Şekil 9. RDIT-P3 kafes yapı basma testi sonuçları



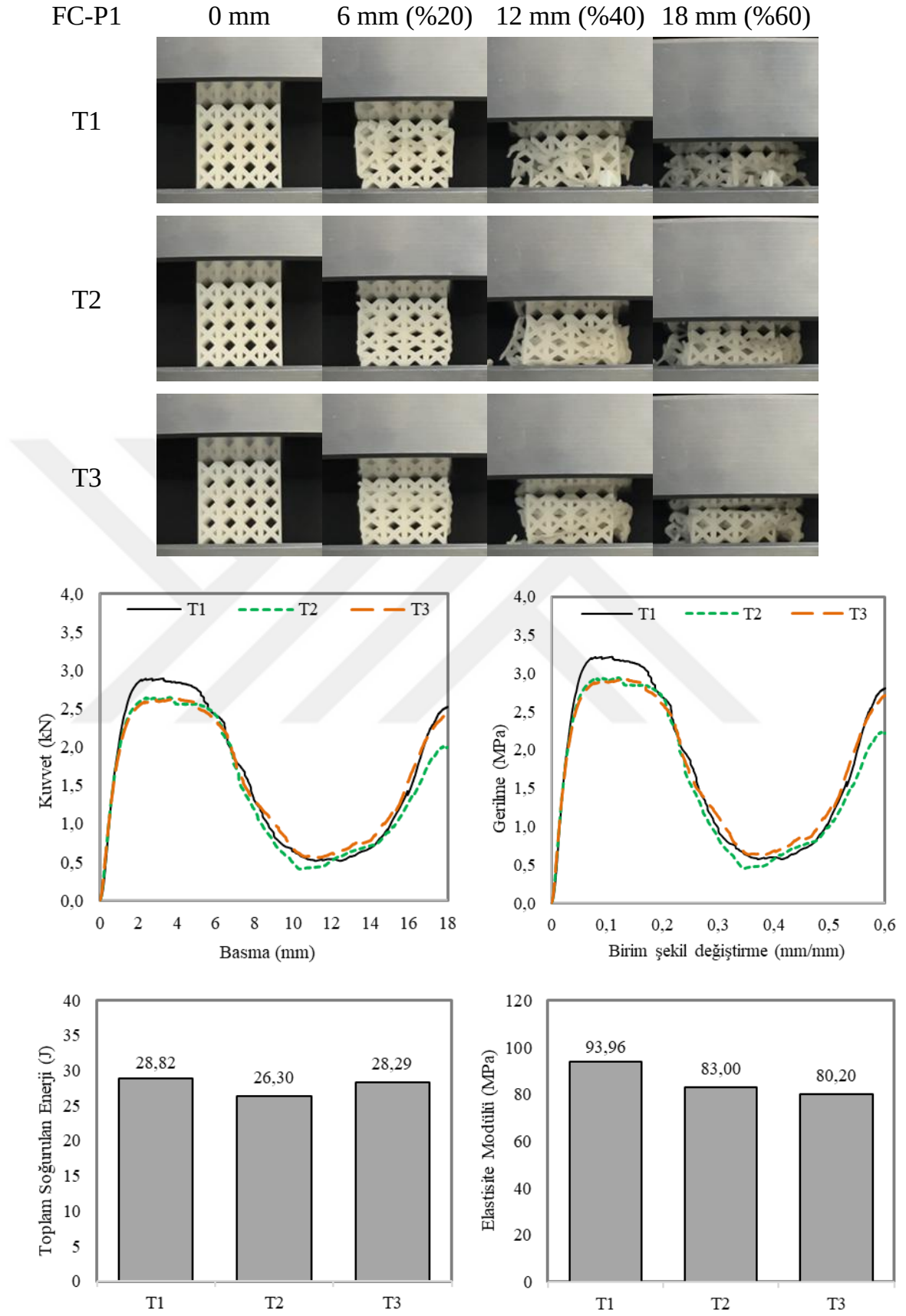
Ek Şekil 10. RD-P4 kafes yapı basma testi sonuçları



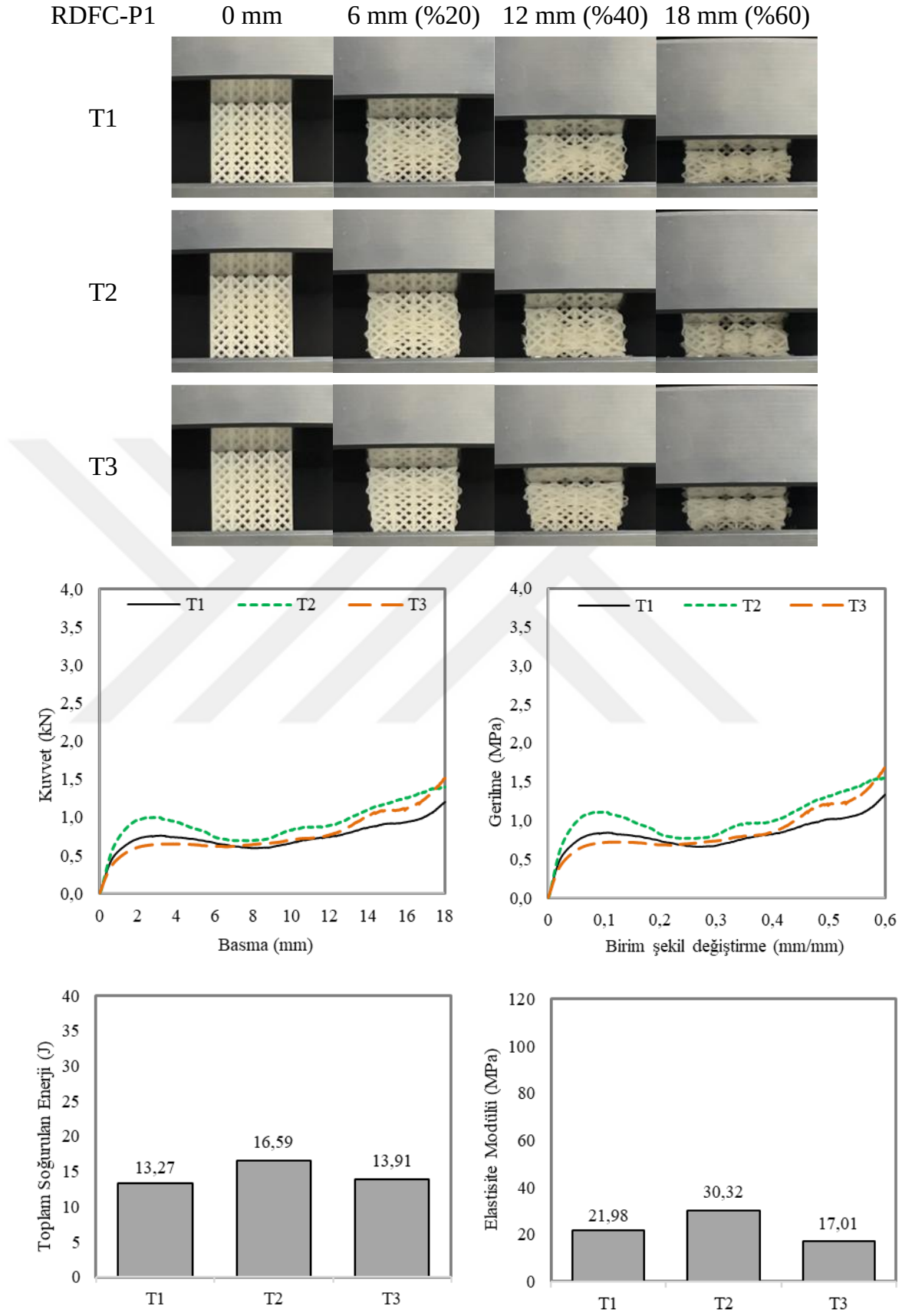
Ek Şekil 11. IT-P4 kafes yapı basma testi sonuçları



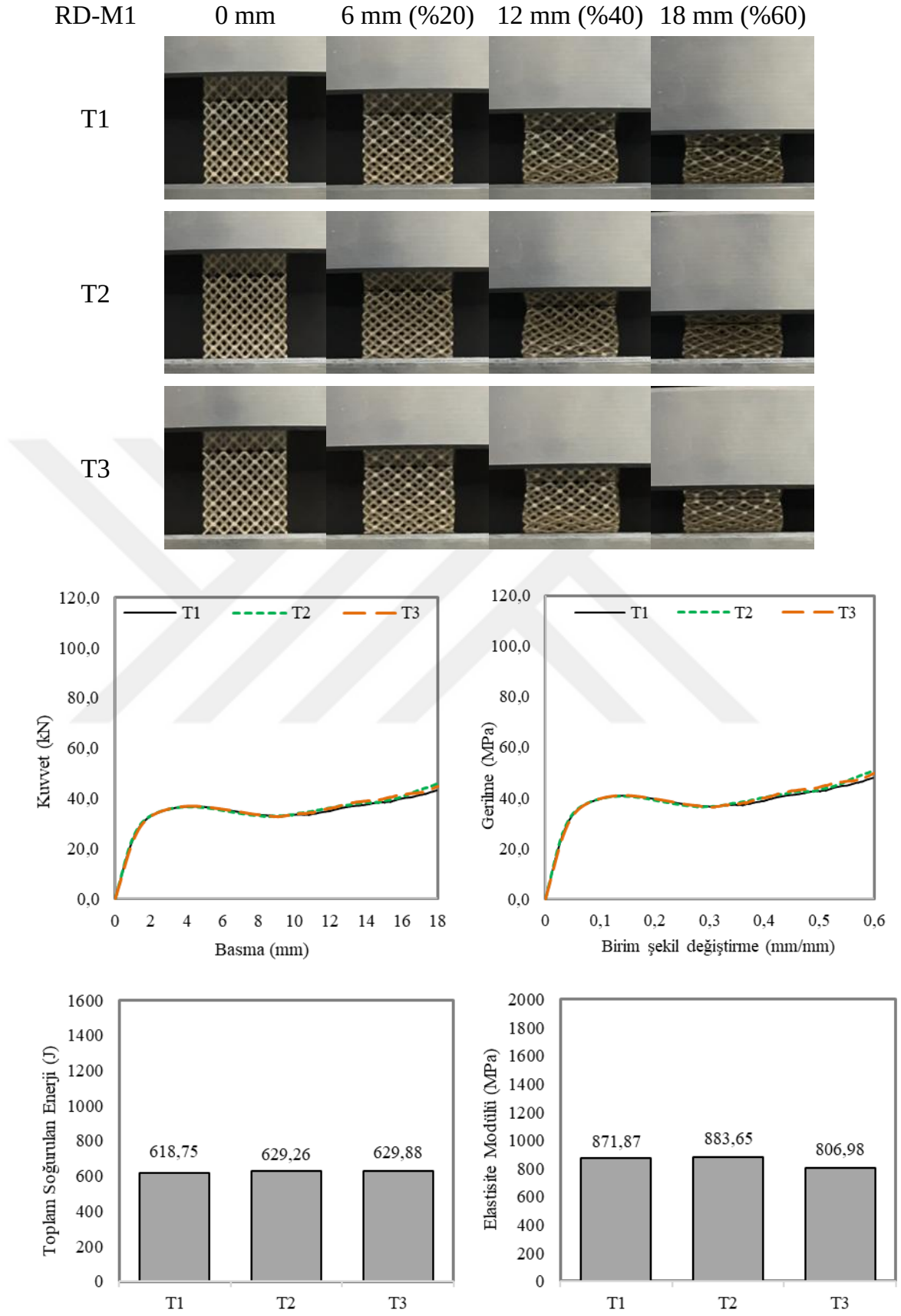
Ek Şekil 12. RDIT-P4 kafes yapı basma testi sonuçları



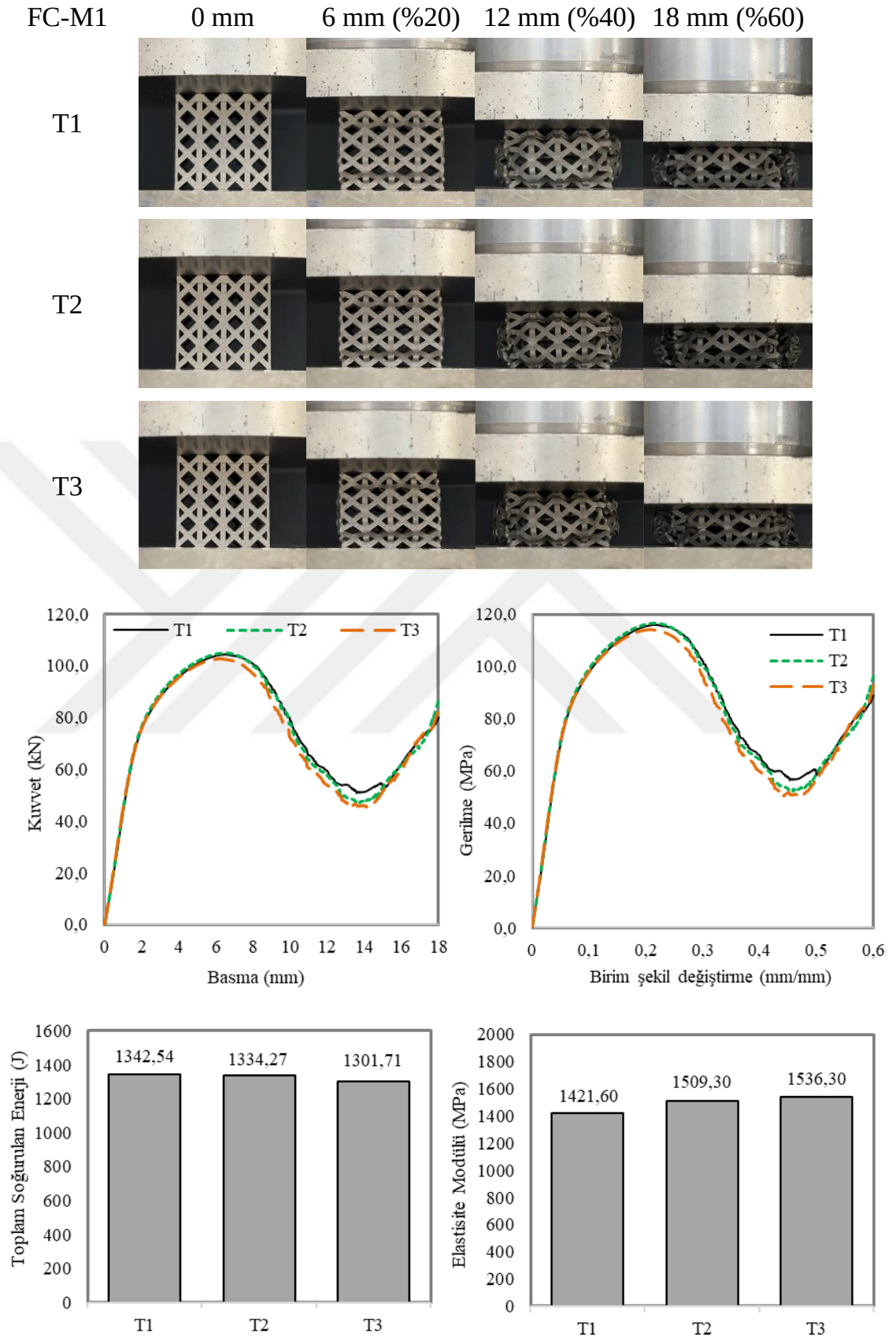
Ek Şekil 13. FC-P1 kafes yapı basma testi sonuçları



Ek Şekil 14. RDFC-P1 kafes yapı basma testi sonuçları



Ek Şekil 15. RD-M1 kafes yapı basma testi sonuçları



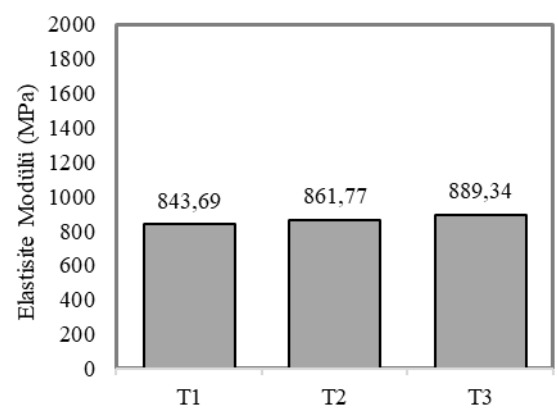
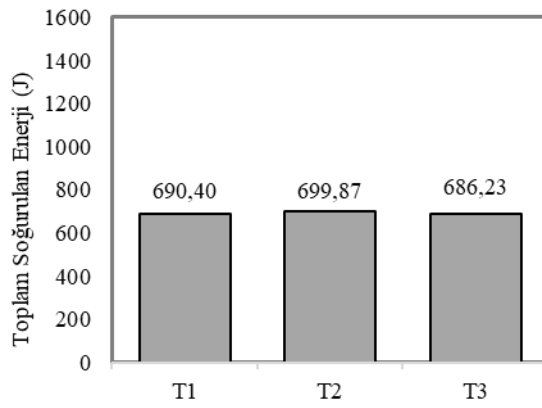
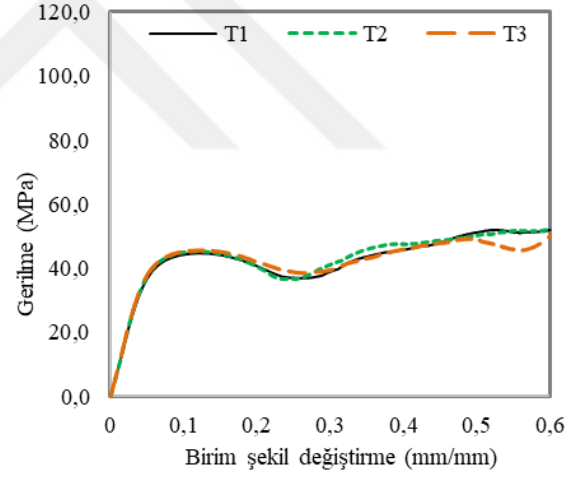
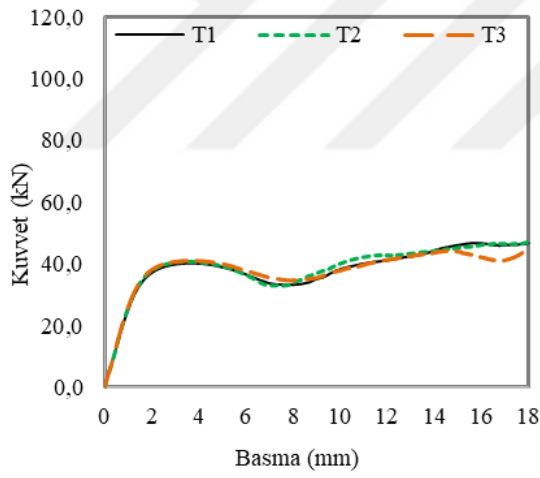
Ek Şekil 16. FC-M1 kafes yapı basma testi sonuçları

RDFC-M1 0 mm 6 mm (%20) 12 mm (%40) 18 mm (%60)

T1

T2

T3



Ek Şekil 17. RDFC-M1 kafes yapı basma testi sonuçları