EKLEMELİ İMALATLA ÜRETİLEN LATİS YAPILARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL VE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ

Batuhan ÖZMEN

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EKLEMELİ İMALATLA ÜRETİLEN LATİS YAPILARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL VE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ

Batuhan ÖZMEN
0009-0007-6438-3855

Doç. Dr. BETÜL GÜLÇİMEN ÇAKAN
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
EKLEMELİ İMALAT ANABİLİM DALI

BURSA – 2025
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

EKLEMELİ İMALATLA ÜRETİLEN LATİS YAPILARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL VE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ

Batuhan ÖZMEN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Eklemeli İmalat Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. BETÜL GÜLÇİMEN ÇAKAN

Eklemeli imalat yöntemi ile üretim uygulamaları endüstride her yıl artarak yaygınlaşmaktadır. İmalat yöntemi dolayısı ile geleneksel talaşlı imalat yöntemine göre belirli uygulamalarda daha fazla öne çıkmaktadır. Bu uygulamalar arasında hızlı prototipleme ve karmaşık geometrili parçaların üretimi oldukça yaygındır. Latis yapılar bir diğer ismi ile kafes yapılar belirli bir hacim içerisini tekrarlı bir geometri ile dolduran şekillerdir. Bu yapıların tasarımları genellikle doğadan esinlenilmektedir bunun en yaygın örneği bal peteğidir. Latis yapıların geleneksel imalat yöntemleri ile üretilmesi çok zor veya belirli durumlarda mümkün olmadığı gibi bu yapıları eklemeli imalat yöntemleri ile üretmek oldukça kolaydır. Eklemeli imalat yöntemleri birçok alt yönteme ayrılmaktadır en yaygın yöntemlerden birisi Eritilmiş Filaman Biriktirme (FFF) genellikle plastik esaslı filament halindeki hammaddeleri eritme sıcaklığına ulaştırılıp katmanlar halinde geometrik bir şekile dönüştürülmesidir. Eklemeli imalat ve talaşlı imalat yöntemi ile üretilen aynı geometrideki ve malzemedeki iki parçanın üretim yöntemi farklılığı dolayısı ile sergilediği fiziksel dayanım özellikleri farklı olacaktır. Üretilen parçaların deneysel test sonuçları sonlu elemanlar yöntemleri ile doğrulanırken en önemli aşamalardan biri malzemenin bilgisayar ortamında doğru bir şekilde tanımlanması veya modellenmesidir. Çelik gibi yüksek dayanıma ve az uzamaya sahip malzemelerin sonlu elemanlar analizlerinde tanımlanması ve doğrulanması yüksek doğrulukla sonuçlanırken plastik gibi doğrusal olmayan yapıya sahip malzemelerin bilgisayar ortamında yüksek hassasiyet ile modellenmesi ve doğrulanması oldukça zordur. Bu çalışmada eklemeli imalat yöntemlerinden katı eriyik modelleme ile Akrilonitril Stiren Akrilat (ASA) hammaddesi kullanılarak üretilecek latis yapıların ve test numunelerinin deneysel dayanım testleri sonlu bilgisayar ortamında tanımlanacak malzeme modelleri ile yapılacak sonlu elemanlar analizleri karşılaştıralacak ve mekanik özellikleri incelenecektir.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli imalat, sonlu elemanlar analizi, kafes yapılar, malzeme kalibrasyonu, polimerler

2025, xv + 55 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

EXPERIMENTAL AND FINITE ELEMENT ANALYSIS OF MECHANICAL PROPERTIES OF ADDITIVELY MANUFACTURED LATTICE STRUCTURES

Batuhan ÖZMEN

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Additive Manufacturing

Supervisor: Assoc. Prof. BETÜL GÜLÇİMEN ÇAKAN

Additive manufacturing methods are becoming increasingly widespread in industry each year. Due to the manufacturing process, it stands out in certain applications like rapid prototyping and the production of complex-geometry parts. Lattice structures, also known as cellular structures, are shapes that fill a specific volume with a repetitive geometry. The designs of these structures are often inspired by nature, with the most common example being the honeycomb. While it is very difficult or, in certain situations, impossible to produce lattice structures using traditional manufacturing methods, it is quite easy to produce them with additive manufacturing methods. Additive manufacturing methods are divided into many sub-methods. One of the most common methods is Fused Filament Fabrication (FFF), which typically involves heating plastic-based filament raw materials to their melting temperature and converting them into a geometric shape layer by layer. Due to the difference in manufacturing methods, two parts of the same geometry and material produced by additive manufacturing and subtractive manufacturing will exhibit different physical strength properties. While experimental test results of manufactured parts are validated with finite element methods, one of the most important stages is the accurate definition or modeling of the material in the computer environment. While the definition and validation of materials with high strength and low elongation, such as steel, yield highly accurate results in finite element analyses, it is quite difficult to model and validate non-linear materials like plastics with high precision in a computer environment. In this study, experimental strength tests of lattice structures and test specimens produced using Acrylonitrile Styrene Acrylate (ASA) raw material with the FFF additive manufacturing method will be compared with finite element analyses performed with material models defined in the computer environment, and their mechanical properties will be investigated.

Key words: Additive manufacturing, finite element analysis, lattice structures, material calibration, polymers

2025, xv + 55 pages.

TEŞEKKÜR

Öğrenimim boyunca beni sürekli destekleyen ve yanımda olan değerli aile bireylerime teşekkürlerimi sunuyorum.

Tez dönemi ve yüksek lisans boyunca her türlü konuda her zaman yardımcı olan ve desteklerini hiç bir zaman esirgemeyen değerli danışmanım Doç. Dr. Betül Gülçimen ÇAKAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans dönemi boyunca beni maddi, manevi ve teknik olarak destekleyen Barida Grup yöneticilerime ve Sayın Sinan BATIR'a teşekkürlerimi sunuyorum.

Tez döneminde özellikle parça testleri için yardımları için Doç. Dr. Kenan TÜFEKÇİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Tez dönemi boyunca özellikle teknik konularda beni destekleyen ve yönlendiren sayın Dr. Çağlar KAHYA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Batuhan ÖZMEN
28/06/2025

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET viii
ABSTRACT ix
TEŞEKKÜR x
İÇİNDEKİLER xi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ xii
ŞEKİLLER DİZİNİ xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ xiii
1. GİRİŞ 1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI 3
2.1. Kurumsal Temeller 3
2.1.1. Eklemeli İmalat Teknolojisi 3
2.1.2. FFF (Eritilmiş Filaman Biriktirme) Yöntemi 4
2.1.3. Latis (Kafes) Yapılar 5
2.1.4. Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) 8
2.1.5. Polimerler 9
2.1.6. Malzeme Modelleri 10
2.2. Kaynak Araştırması 16
3. MATERYAL ve YÖNTEM 23
3.1. Malzeme 23
3.2. Latis Yapı Tasarımı 23
3.3. Numulerin Üretilmesi 25
3.4. Mekanik Testler 27
3.5. Malzeme Modeli Kalibrasyonu 29
3.6. Sonlu Elemanlar Analizi 31
4. BULGULAR 36
4.1. Mekanik Test Sonuçları 36
4.2. Sonlu Elemanlar Analizi Eleman Boyut Hassasiyeti 40
4.3. Materyal Karakterizasyonu 42
4.4. Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları 47
5. TARTIŞMA ve SONUÇ 50
KAYNAKLAR 53
ÖZGEÇMİŞ 55

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
°C	Santigrat derece
mm	Milimetre
mm/dk	Milimetre/dakika
mm/s	Milimetre/saniye
%	Yüzde

Kısaltmalar	Açıklama
1D	1 Boyutlu
3D	3 Boyutlu
ABS	Akrilonitril Bütadien Stiren
ASA	Akrilonitril Stiren Akrilat
ASTM	American Society for Testing and Materials
BB	Bergstrom-Boyce
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım
FEA	Sonlu Elemanlar Analizi
FEM	Sonlu Elemanlar Yöntemi
FFF	Eritilmiş Filaman Biriktirme
GCODE	Geometrik Kod
HMKZ	Z Dikmeli Hacim Merkezli Kübik Yapı
MISO	Multilinear Isotropic Hardening
OİY	On İki Yüzlü Yapı
UV	Ultraviyole
STL	Standart Mozaik Dili
PA	Poliamid
PLA	Polilaktik Asit
TNM	Three Network Model
YHMKZ	Z Dikmeli Yüzey ve Hacim Merkezli Kübik Yapı

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 2.1.	FFF yöntemi ile üretim için temsili çizim	4
Şekil 2.2.	Latis yapı elemanı tip örnekleri, soldan sağa yüzey bazlı, dikme tabanlı ve düzlemsel latis (*Types of Lattices for Additive Manufacturing – Terms Engineers Need to Know*, t.y.).	5
Şekil 2.3.	Kiriş yapıların yük altındaki davranış tipleri. A) Eğilme-baskın (bending-dominated) yapı B) Gerinme-baskın (stretch-dominated) yapı (Kang vd., 2019).	7
Şekil 2.4.	Temsili gerilme-gerinim eğrileri A) Eğilme-baskın yapılar B) Gerinim-baskın yapılar (Ashby, 2006).	7
Şekil 2.5.	A) Gerilme gerinim grafiğinde lineer, lineer olmayan ve plastik malzeme davranışları B) Polimer malzemelerin lineer olmayan davranış çeşitleri (Meyers & Chawla, 2008).	9
Şekil 2.6.	A) Mükkemmel elasto plastik malzeme ve B) MISO malzeme modeli.	11
Şekil 2.7.	TNM'nin reolojik gösterimi (Bergstrom, 2015).	12
Şekil 2.8.	Tshikwand ve arkadaşlarının çalışmasındaki analiz sonuçları (Tshikwand vd., 2019).	17
Şekil 2.9.	Dar ve arkadaşlarının çalışmasındaki latis yapıların gerilme-gerinim grafiğinde deney ve sonlu elemanlar analiz karşılaştırmaları (Dar vd., 2020).	18
Şekil 2.10.	PLA malzemeli kafes yapılan kuvvet-deplasman grafiği (Tuğcu, 2023).	19
Şekil 2.11.	Niutta'nın çalışmasındaki latis çarpışma kutusu bası sonuçları	21
Şekil 2.12.	Dong'un çalışmasının sonuçları.	22
Şekil 3.1.	Elmas (diamond) latis birim hücre geometrisi.....	24
Şekil 3.2.	NTopology programı arayüzü ve elmas latis yapının önizlemesi.	24
Şekil 3.3.	Yazdırma öncesi latis numunesinin Inventor programında hazırlığı.....	25
Şekil 3.4.	CR-10 model 3D yazıcı ile ASA latis numunenin üretilmesi.....	26
Şekil 3.5.	3D yazıcı ile üretilmiş ASA latis yapı numunesi.....	27
Şekil 3.6.	Özel yapım test cihazı.....	28
Şekil 3.7.	Utest universal test cihazı	28
Şekil 3.8.	Utest test cihazında latis yapının deney düzeneğindeki görüntüsü	29
Şekil 3.9.	TNM modelinin Mcalibration programında çeki ve bası deney sonuçları ile kalibrasyonu	30
Şekil 3.10.	MCalibration programında MISO_1 malzeme modelinin kalibrasyonu	31
Şekil 3.11.	Kiriş (beam) ve tetrahedral eleman tipleri.	31
Şekil 3.12.	3D tetrahedral katı elemanların latis yapının çözüm ağı üzerindeki boyutları A) 0,75 mm ince (fine) eleman B) 1,5 mm orta (medium) boyut eleman C) 3 mm kaba (coarse) eleman boyutu	33
Şekil 3.13.	ANSYS statik modülünde 1D kiriş eleman analizinin sınır şartları	34
Şekil 3.14.	3D Dinamik analiz ortamı A) latis yapının çözüm ağı B) dinamik analiz ayarları C) dinamik analiz sınır şartları D) dinamik analiz çözüm ekranı	35
Şekil 4.1.	Çekme numunesinin deney sonuçlarının gerilme-gerinim grafiği	36
Şekil 4.2.	Bası numunesinin deney sonuçlarının gerilme-gerinim grafiği.....	36

Şekil 4.3. Numunenin test sonundaki deforme olmuş görüntüsü 37
Şekil 4.4. Elmas latis yapı numunelerinin bası deneyi sonuçları..... 38
Şekil 4.5. Deney sonrası elmas latis yapı üzerindeki kırılma düzlemi 39
Şekil 4.6. Elmas latis yapının 30 mm'lik basma deneyi sonucu..... 39
Şekil 4.7. 3D Statik analiz için çözüm ağı boyutu hassasiyeti..... 40
Şekil 4.8. Kiriş (beam) eleman statik analiz çözüm ağı boyut hassasiyeti 41
Şekil 4.9. Ansys parametric ortamında çözüm ağı hassasiyeti analizi 42
Şekil 4.10. MISO materyallerinin Ansys parmetreleri 43
Şekil 4.11. BB materyallerinin Ansys parmetreleri..... 44
Şekil 4.12. TNM materyallerinin Ansys parmetreleri 44
Şekil 4.13. Çeki numunesi için kalibre edilen malzeme modelleri ve deney sonucu karşılaştırması..... 45
Şekil 4.14. D695 bası numunesinin deney ve FEA görüntüleri..... 45
Şekil 4.15. ASTM D695 bası numunesi için kalibre edilen malzeme modelleri ve deney sonucunun karşılaştırılması..... 46
Şekil 4.16. 3D statik analiz sonuçları..... 47
Şekil 4.17. 1D statik analiz sonuçları..... 47
Şekil 4.18. 1D dinamik analiz sonuçları 48
Şekil 4.19. 3D dinamik analiz sonuçları 49
Şekil 4.20. Dinamik analiz ortamından görüntülerin deney ile karşılaştırılması..... 49

ÇİZELGELER DİZİNİ

		Sayfa
Çizelge 2.1.	TNM modeli parametreleri (Bergstrom, 2015).	15
Çizelge 2.2.	Üç farklı literatür çalışmasının karşılaştırılması	20
Çizelge 3.1.	Yazdırma parametreleri	26
Çizelge 3.2.	Malzeme modellerinin desteklediği analiz ve eleman tipleri tablosu	32
Çizelge 4.1.	Çeki ve bası numunelerinin deney sonuçları	37
Çizelge 4.2.	Elmas latis numunelerinin tanımlamaları	38
Çizelge 4.3.	Elmas latis yapıların deney sonucundaki maksimum kuvvet değerleri.	38
Çizelge 4.4.	3D tetrahedral elemanlarda hassasiyet analizi sonuçları tablosu	41
Çizelge 4.5.	1D kiriş elemanlar ile oluşturulan çözüm ağı hassasiyeti çalışması sonuçları	42
Çizelge 4.6.	Malzeme tanımlamaları ve kalibrasyon modelleri	43

1. GİRİŞ

Eklemeli imalatı geleneksel talaşlı imalattan ayıran en önemli özelliklerinden birisi, üretim esnasında hammadde üzerinden talaş kaldırarak şekillendirmek yerine parçayı katman katman oluşturmasıdır. Eklemeli imalat teknolojileri, üretim süreçlerine getirdiği esneklik ve maliyet avantajları sayesinde birçok endüstride hızla yaygınlaşmaktadır. Havacılık ve uzay endüstrisinde, ağırlık azaltma hedefi doğrultusunda geliştirilen karmaşık geometrili parçaların üretiminde eklemeli imalat büyük avantaj sağlamaktadır. Otomotiv sektöründe ise hızlı prototipleme süreçleri ile birlikte, doğrudan kullanılabilir yedek parçaların üretimi için verimli bir çözüm sunmaktadır. Medikal alanda, bireye özel implant ve protezlerin üretilmesi sayesinde hasta uyumu artırılmakta ve tedavi süreçleri optimize edilmektedir. Mimari uygulamalarda ise karmaşık projelerin ölçeklendirilmiş üç boyutlu modelleri, detaylı sunumlar ve tasarım doğrulamaları için etkin bir biçimde üretilebilmektedir (Wong & Hernandez, 2012). Bu örnek senaryolar için özellikle üretilebilirlik sınırlarının daha geniş olması ve ilk yatırım maliyetinin cihazın kendisi haricinde olmamasından dolayı eklemeli imalat küresel endüstiride öne çıkmaktadır.

Latis yapılar, eklemeli imalat teknolojilerinin son yıllarda hızla gelişmesiyle birlikte önemli ölçüde ön plana çıkmıştır. Bu yapılar, özellikle parçaların mekanik dayanımından büyük ölçüde ödün vermeden ağırlıklarının azaltılmasının hedeflendiği uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Diğer adıyla kafes yapılar, tekrarlı geometriler ile belirli bir hacmi doldururlar. Bu kafes yapıların tekrar eden birimlerine hücre denir ve genellikle doğadan ilham alınan hücreler kirişlerden, yüzeylerden veya düzlemlerden oluşur (*What are lattice structures in additive manufacturing? | nTop*, t.y.). Bu yapılar içeriğindeki tekrar eden boşluklar dolayısı ile geleneksel imalat için karmaşık ve üretimi zor veya mümkün olmamaktır ancak eklemeli imalatın katmanlı üretim yöntemi dolayısı ile bu yapılar eklemeli imalat yöntemleri kolaylıkla üretilebilmektedir.

Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) süreçlerinde, doğru materyal modeli seçimi büyük bir öneme sahiptir. Materyal modeli seçildikten sonra bu modelin istenilen malzeme özelliklerini karşılayabilmesi için kalibrasyonunun yapılması gerekmektedir. Yanlış

seçilmiş bir materyal modeli veya hatalı kalibre edilmiş bir model, sonlu elemanlar analizi sonuçlarını doğrudan etkileyerek, mühendislik açısından hatalı ve yanıltıcı sonuçlar ortaya çıkarabilir (Chen vd., 2024).

Bu çalışmada, elmas hücre yapısına sahip latis yapıda bir test numunesi tasarlanmış, ardından eklemeli imalat teknolojisi kullanılarak üretilmiştir. Üretilen numune üzerinde deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiş ve elde edilen veriler, sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan sayısal analiz sonuçlarıyla karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Bu süreçte, ASA malzemesi için birden fazla malzeme modelinin uygunluğu analiz edilmiş; söz konusu modellerin oluşturulması ve kalibrasyonu da çalışmanın bir parçasıdır. Malzeme modellemesi ve kalibrasyon işlemleri, ASTM (American Society for Testing and Materials) D638 standardına uygun çekme (dogbone) numunesi ile ASTM D695 standardına uygun basma numunesi üzerinden elde edilen deneysel veriler kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

Çalışmanın bu bölümünde, ilgili konular hakkında teorik bilgilere yer verilecek ve geçmişteki benzer çalışmalardan bahsedilecektir.

2.1. Kurumsal Temeller

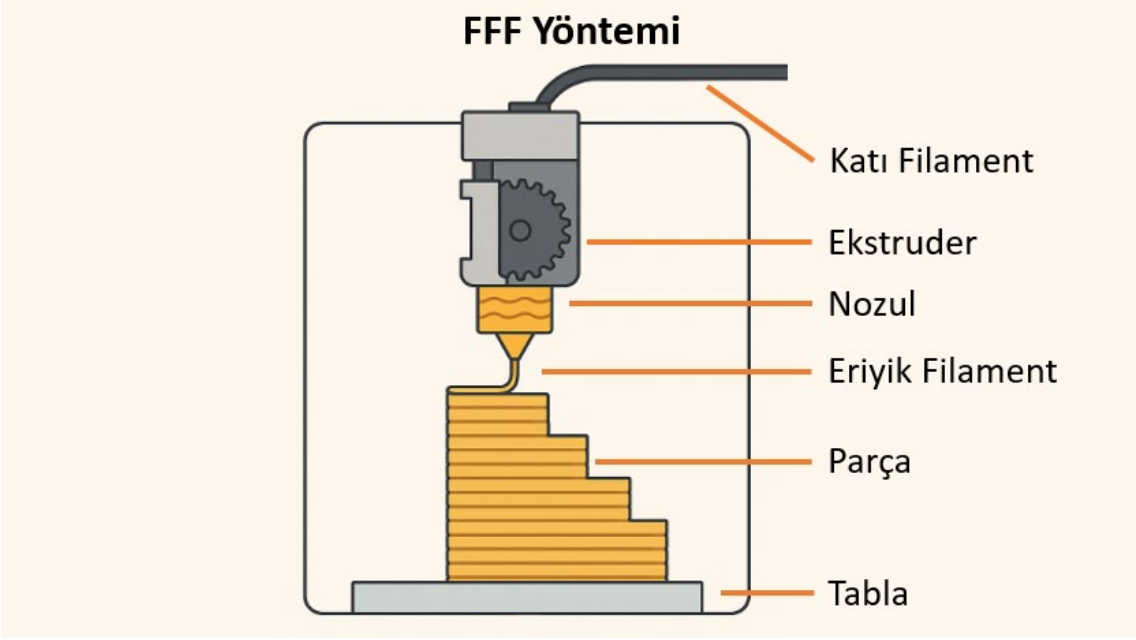
2.1.1. Eklemeli İmalat Teknolojisi

Eklemeli imalat teknolojisi, son ürünü hammaddeyi katmanlar şeklinde üst üste ekleyerek oluşturan bir üretim sürecidir. Geleneksel talaşlı imalat yönteminde parça üretimi hammadde üzerinden malzeme alınarak oluşturulurken eklemeli imalat sürecinde parça malzemeler birleştirilerek oluşturulur. Endüstiride 3D (3 Boyutlu) baskı veya hızlı prototipleme olarak da geçmektedir.

Eklemeli imalat üretim süreci adımları genel olarak; 3D modelleme ve tasarım, dilimleme veya yazdırmaya hazırlık, üretim, ardıl işlemlerinden oluşur. Detaylı olarak bu süreç bilgisayar ortamında üretilecek nesne modellenerek başlar. CAD (Bilgisayar Destekli Tasarım) programı ile hazırlanan parça dilimleme programına aktarılmak üzere STL (Standart Mozaik Dili) formatında çıktı alınır. İçerisinde yüzey geometri bilgisini tutan STL formatı tercih edilen bir dilimleyici programlarına aktarılır, bu program içerisinde STL dosyası yazıcının tanıyacağı ve okuyabileceği GCODE (Geometrik Kod) formatına dönüştürülür. Dönüştürme esnasında program içerisine gerekirse üretim yapılacak yazıcının kapasite bilgileri tanımlanır, istenilen katman yüksekliği, iç dolgu oranı, yazdırma sıcaklığı, hız gibi yazdırma parametreleri ayrıntılı olarak kontrol edilir. 3D yazıcıya aktarılan GCODE dosyası ile yazdırma işlemi başlatılır. Yazdırma sonunda gerekiyorsa parçaya ardıl işlemler uygulanır. Bu ardıl işlemler belirli durumlarda parça yüzeyini zımparalama veya boyama ile parçanın yüzey kalitesini iyileştirmek, kullanıldı ise destek yapılarını çıkarmak veya mekanik özelliklerini artırmak için ısıl işlem gibi ek işlemlerdir.

2.1.2. FFF (Eritilmiş Filaman Biriktirme) Yöntemi

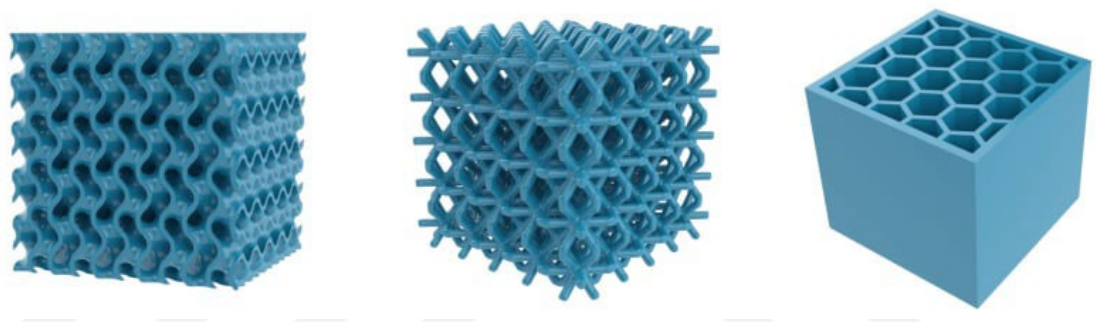
Materyal ekstrüzyon kategorisi altındaki FFF yöntemi, filament halindeki termoplastik hammaddeyi eritme sıcaklığına ulaştırıp katmanlar halinde yazdırma olarak özetlenebilir (Şekil 2.1). Bu yöntemde hammadde olarak en yaygın PLA (Polilaktik Asit) ve ABS (Polietilen Tereftalat) kullanılmaktadır. Diğer eklemeli imalat yöntemlerine kıyas ile daha uygun fiyatlı, basit ve ulaşılabilir olduğundan en yaygın kullanılan eklemeli imalat yöntemlerinden biridir. Bu yöntem ile üretilen parçalar her eksende eşit mekanik özelliklere sahip değildirler belirli eksenlerde daha düşük mekanik özellikler sergileyebilirler bu dezavantaj FFF yönteminin endüstiride kullanımını bir bakıma sınırlamaktadır. FFF yöntemi ile üretilen ürünlerin mekanik özellikleri seçilen hammaddenin yanı sıra yazdırma parametrelerine de bağlıdır. Bu parametrelerden bazıları şunlardır: katman yüksekliği, katman kalınlığı, iç dolgu oranı, katmanlar arasındaki boşluk miktarı, yazdırma yönüdür (Mojabi vd., 2024).



Şekil 2.1. FFF yöntemi ile üretim için temsili çizim

2.1.3. Latis (Kafes) Yapılar

Latis yapılar kendini tekrar eden hücrelerin belirli bir hacmi doldurmasıyla oluşan geometrik şekillerdir. Bu hücreler sütunlar, yüzeyler veya kirişlerden oluşabilir. Karmaşık geometrileri dolayısı ile geleneksel üretim yöntemleri üretimi neredeyse imkansız iken eklemeli imalat teknolojileri bu yapıların üretimini mümkün kılmaktadır. Kafes yapıları sayesinde elde edilen parçaların ağırlık-güç oranları ve enerji absorbe kapasiteleri yüksektir. Bu özellikler latis yapıların uzay endüstrisinde, havacılıkta, otomotiv endüstirisinde ve biomedikal sektöründe yüksek talep görmesine neden olmaktadır.



Şekil 2.2. Latis yapı elemanı tip örnekleri, soldan sağa yüzey bazlı, dikme tabanlı ve düzlemsel latis (*Types of Lattices for Additive Manufacturing – Terms Engineers Need to Know*, t.y.).

Latis yapılar genel olarak Şekil 2.2'de görülebileceği üzere 3 ayrı tip altında incelenebilir bunlar yüzey bazlı latisler, dikme tabanlı latisler ve düzlemsel latislerdir. Yüzey bazlı latisler trigonometrik denklemlerden türetilirler, denklemde yapılan değişiklikler kafes yapının şeklini, boyutunu ve yoğunluğunu etkiler. Bu tipteki kafes yapıların genellikle enerji sönümleme özellikleri yüksektir. Dikme tabanlı yapılar, kiriş (beam) yapıların birleşmeleri ve belirli bir hücre yapısı oluşturup bu yapının tekrarlı olarak hacmi doldurması ile oluşturulur. Düzlemsel latisler iki boyutlu bir geometrik şeklin yükseklik ekseninde ötelenmesi ile elde edilen üç boyutlu yapılardır. Bu tip kafes yapıların en yaygın örneği bal peteği olarak bilinir.

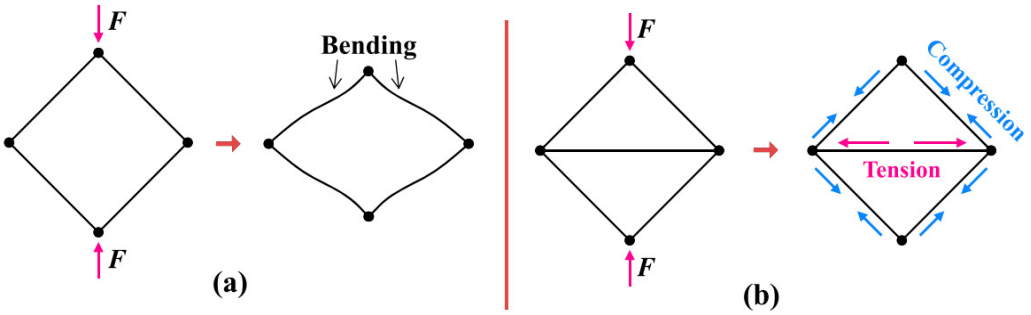
Ayrıca latis yapılar kendi içlerinde periyodik ve stokastik yapılar olarak ikiye ayrılırlar. Periyodik latis yapılar belirli bir hücre yapının tüm latis boyunca tekrar etmesi ile oluşurken stokastik latis yapılar düzenli değil rasgele hücresel bağlantıları olan yapılardır. Stokastik yapılar kemik yapılar gibi biyolojik bileşenleri daha tutarlı bir şekilde taklit edebildiği için medikal alanında oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır (*Types of Lattices for Additive Manufacturing – Terms Engineers Need to Know*, t.y.).

Hücre yapılı geometrilerin fiziksel özelliklerini ifade ederken kullanılan bağıl yoğunluk (relative density) terimi, yapının istenen sertlik, güç ve enerji sönümleme özellikleri ile doğrudan ilişkilendirilebilir (Vigliotti & Pasini, 2012). Hücresel bir geometrinin bağıl yoğunluğunun hesabı, yapının hacminin yapının dolu bir katı halde olduğu durumdaki hacmine oranlanarak yapılabilir. Yapının porozite değeri, hesaplanan bağıl yoğunluk değeri 1'den çıkartılarak hesaplanabilir (Porozite = 1 – Bağıl yoğunluk) (du Plessis vd., 2022).

Maxwell stabilizasyon kriteri özet olarak, b adet dikme (çubuk) ve j adet sürtünmesiz düğüm noktasından oluşan pim bağlantılı 3 boyutlu kafes (pin-jointed frame) yapının kinematik olarak kararlı ve rijit olması için aşağıdaki Denklem 2.1'i sağlaması gerektiğini anlatmaktadır (Maxwell, 1864).

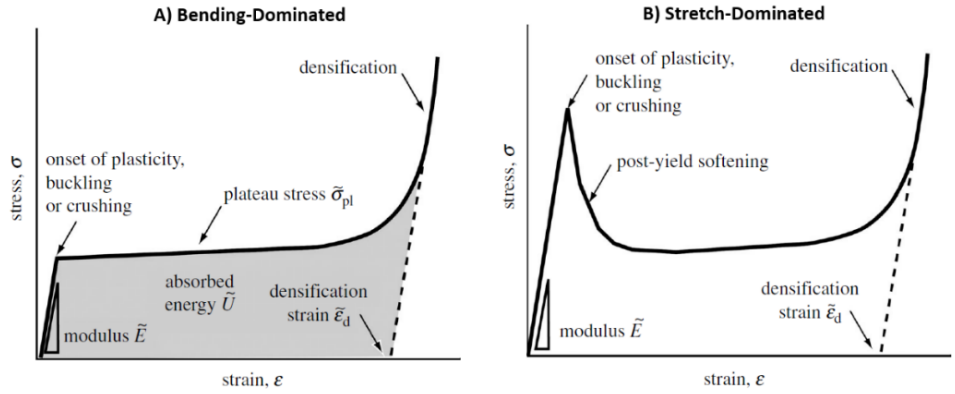
$$M = b - 3j + 6 = 0 \tag{2.1}$$

Dikme tabanlı kafes yapılar için eğer hesaplanan M değeri sıfırdan küçük ise kafes sistemi bir veya birden fazla serbestlik derecesine sahip demektir bu da belirli yönler için sistemin deplasmana uğrayacağı anlamını taşır. Bu durumda dikmelerin bağlantı (düğüm) noktaları kilitli olduklarında (dikme tabanlı latis yapılarda olduğu gibi) yük altında eğilme davranışı gösterirler bu tip yapılar eğilme-baskın (bending-dominated) olarak sınıflandırılır. Eğer denklemdeki M değeri sıfır veya daha büyük ise kafes sistem, kinematik olarak kararlı ve yük altında sistemi oluşturan dikmeler bası-çeki yükleri taşıyabilirler (oynar pim bağlantılı olsalar bile) ve gerinme-baskın (stretch-dominated) yapı halini alırlar (Ashby, 2006). Şekil 2.3'te eğilme-baskın ve gerinme-baskın kafes yapılarının yük altındaki söz konusu eğilme ve gerinim davranışları gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Kiriş yapıların yük altındaki davranış tipleri. A) Eğilme-baskın (bending-dominated) yapı B) Gerinme-baskın (stretch-dominated) yapı (Kang vd., 2019).

Eğilme-baskın yapıya sahip dikme tabanlı latis yapılar bası kuvvetleri altında esneme eğilimindedirler, bu davranışları sayesinde darbe sönümleme veya enerji sönümlemenin öncelikli olduğu uygulamalarda sıkça tercih edilmektedirler. Buna karşın, gerinme-baskın latis yapılar yükleri esas olarak eksenel çekme ve basma kuvvetleri ile taşırlar. Bu durum, söz konusu yapıların başlangıç kırınım yüklerinin eğilme-baskın yapılara kıyasla önemli ölçüde yüksek olmasına neden olur. Bu avantaj, onları özellikle hafif ancak yüksek taşıma kapasitesi gerektiren yapısal uygulamalar için uygun hale getirir. Ayrıca, elastik deformasyon sınırının aşılması durumunda, gerinme-baskın yapıların yük taşıma kapasitesinde ani ve belirgin bir düşüş gözlemlenmektedir; bu da Şekil 2.4'te temsili olarak sunulmaktadır (Ashby, 2006).



Şekil 2.4. Temsili gerilme-gerinim eğrileri A) Eğilme-baskın yapılar B) Gerinim-baskın yapılar (Ashby, 2006).

2.1.4. Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM)

Sonlu elemanlar yöntemi, bir parçanın veya sistemin belirli sınır şartları altında gösterdiği tepkinin nümerik yöntemler aracılığıyla tahmin edilmesini sağlayan bir hesaplama tekniğidir. Geçmişte ilk olarak statik stres analiz problemlerini çözmek için kullanılan yöntem zamanla termal analiz, akış analizi, manyetik analizler gibi birçok problem türü için kullanılmıştır (Dr. G. R. Liu & S. S. Quek, 2003).

Bir statik analiz süreci, genel olarak dört temel aşamada sistematik biçimde yürütülmektedir. İlk olarak, analiz edilecek yapının davranışını temsil edecek uygun bir malzeme modeli seçilir ve bu model, gerilme-gerinim ilişkilerini doğru şekilde yansıtacak parametrelerle tanımlanır. Elastik, elastoplastik ya da viskoelastik gibi farklı malzeme modelleri arasından seçim yapılması, yapının yükleme altındaki davranışının doğru tahmin edilebilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

İkinci aşamada, modelin çevresel etkileşimleri belirlenerek sınır koşulları tanımlanır. Bunlar, dış yüklemeler (noktasal kuvvetler, momentler, basınç vb.) ile rijit cisim hareketlerini önleyici mesnet koşullarını kapsar. Bu adım, yapının veya parçanın fiziksel dünyada karşılaşacağı kısıtların ve koşulların doğru şekilde modele aktarılmasını sağlar.

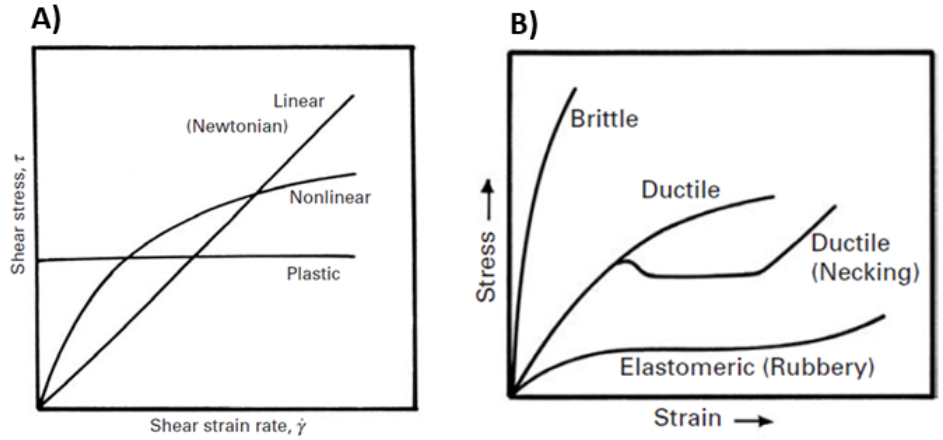
Üçüncü aşamada, modelin sayısal çözüme uygun hale getirilmesi için elemanlara ayrılması gerekmektedir. Geometrik karmaşıklık, malzeme heterojenliği ve beklenen gerilme-yığılma bölgeleri dikkate alınarak uygun ağ yoğunluğu ve eleman tipi seçimi yapılır. Bu adım, hesaplama doğruluğunu ve çözüm kararlılığını doğrudan etkiler.

Son olarak, çözümleme aşamasına geçilir. Bu aşamada, uygun çözüm algoritmaları kullanılarak lineer ya da doğrusal olmayan denklem sistemleri çözülür ve elde edilen sonuçlar, yer değiştirme, gerilme ve gerinim dağılımları gibi çıktılar üzerinden değerlendirilir. Analiz çıktıları, hem mühendislik yorumları hem de güvenilirlik hesapları açısından detaylı şekilde incelenir ve tasarım kriterlerine uygunlukları doğrulanır.

2.1.5. Polimerler

Mikroyapısal düzeyde değerlendirildiğinde, polimerler metal ve seramik malzemelere kıyasla çok daha karmaşık bir yapıya sahiptir. Bununla birlikte, üretim maliyetlerinin düşük olması ve işlenebilirliklerinin kolay oluşu nedeniyle endüstiride geniş bir uygulama alanı bulurlar.

Mekanik özellikler açısından, polimerler nispeten düşük çekme dayanımı, elastik modül ve sıcaklık dayanımına sahiptir. Yapılarında baskın olarak kovalent bağlar bulunmasından ötürü, termal ve elektriksel iletkenlikleri zayıftır. Kimyasal etkilere karşı genellikle metallere göre daha dayanıklı olmalarına rağmen, uzun süreli ultraviyole ışınımı ve bazı organik çözücülerle temas polimerlerin fiziksel ve mekanik özelliklerinde bozulmaya neden olabilir (Meyers & Chawla, 2008).



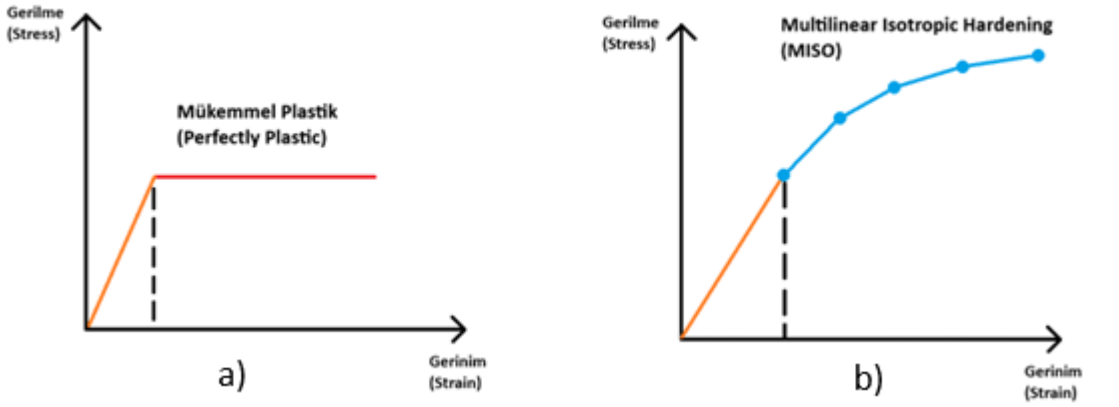
Şekil 2.5. A) Gerilme gerinim grafiğinde lineer, lineer olmayan ve plastik malzeme davranışları B) Polimer malzemelerin lineer olmayan davranış çeşitleri (Meyers & Chawla, 2008).

Polimerler metallerin aksine genellikle gerilme durumunda yüksek uzamaya ve doğrusal olmayan bir uzama davranışa sahiplerdir. Şekil 2.5'te üç farklı genel polimer davranışını, yapı yük altında olduğunda gerilme-gerinim grafiğinde esnek (elostomeric), sünek (ductile) ve kırılgan (brittle) durumunda gözlemleyebiliriz.

2.1.6. Malzeme Modelleri

Sonlu elemanlar analizinin doğru sonuç verebilmesi için öncelikle malzeme tanımının doğru parametreler ve doğru model ile yapılması gerekir. Bir materyali en basit olarak 2 değişken ile tanımlayabiliriz bunlar elastisite modülü ve poisson oranıdır. Elastisite modülü diğer bir adıyla Young modülü, bir materyalin maruz kaldığı kuvvetin artması ile uzama miktarının da belirli bir oran ile artacağını belirtir kısaca birim uzama başına gerilmedir. Elastisite modülü ve poisson oranı parametreleri ile tanımlanan bir materyal modeli analiz sırasında lineer bir elastik davranışta ve plastik bölgeye geçmeyeceği kabul edilir. Bu yaklaşım çoğu metal yapıdaki malzemelerde statik analizler için doğru ve istenilen sonuçları verirken yüksek yer değiştirmeye sahip elastik materyaller için uygun olmamaktadır.

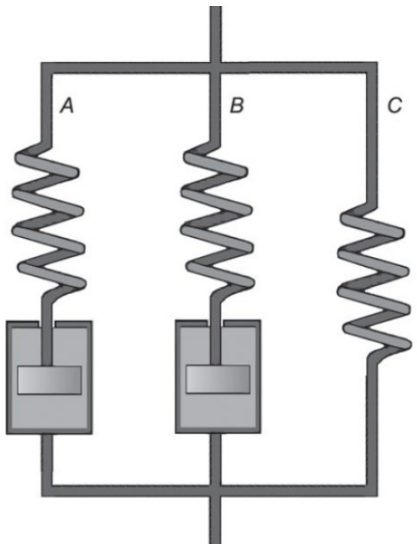
Lineer davranışa sahip olmayan ve elastik bölgenin yanında plastik bölge de malzeme modelinin içerisine katılması gerektiği durumlarda materyal tanımlaması için nonlineer bir malzeme modeli seçilmelidir. Nonlineer veya hiperelastik altyapıdaki malzeme modelleri genellikle davranışlarını zor tahmin ettiğimiz polimer malzemeler için kullanılmaktadır. Bir malzeme modelinin nonlineer olarak en basit tanımlaması mükkemmel elasto plastik malzeme modeli olarak bilinen yöntemdir. Bu modellemede Şekil 2.6'da soldaki grafikte de görülebileceği üzere elastik uzama sınırına ulaşıldıktan sonra, yani elastik bölgeden plastik bölgeye geçişte, stres değeri sabit kalır ve uzama sürekli devam eder. Bu model basittir ancak tutarsız sonuçlar verebilir. MISO (Multilinear Isotropic Hardening) modelinde elastik bölge elastisite modeli ile tanımlanır ve plastik bölge, stres değerinin sabit tutulmasının yerine deneysel olarak ulaşılan sonuçlardan alınacak stres ve uzama değerleri ile tanımlanır (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. A) Mükkemmel elasto plastik malzeme ve B) MISO malzeme modeli

Bergstrom-Boyce malzeme modeli elostomer gibi yüksek uzama davranışına sahip malzemeler için özel olarak geliştirilmiştir (Bergstrom, 2015).

Daha karmaşık polimerlerin malzeme modelleri için geliştirilmiş elastik, hiperelastik, lineer viskoelastik, plastik, viskoplastik gibi birçok malzeme modeli mevcuttur. Viskoplastik modeller içerisinden TNM (Three Network Model) termoplastik materyaller için özel olarak geliştirilmiş bir malzeme modelidir (Bergstrom, 2015). Bu modelin mekanik davranışı üç elemanın paralel olarak bağlanması ile Şekil 2.7'de görüldüğü gibi temsil edilir. Şekil 2.7'deki *A* elemanı (network *A*) elastik deformasyonu veya anlık elastik tepkiyi, *B* elemanı (network *B*) viskoplastik akışı veya zamana bağlı plastik deformasyonu, *C* elemanı (network *C*) *A* ve *B* elemanlarının tepki veremediği ek deformasyonu yani statik yüklemeleri tanımlar (Bergstrom, 2015).



Şekil 2.7. TNM'nin reolojik gösterimi (Bergstrom, 2015).

TNM malzeme modelini oluşturan A elemanı üzerindeki Cauchy gerilme tensörü aşağıdaki 8 aşamalı Denklem 2.2 ile tanımlanabilir.

$$\boldsymbol{T}_A = \frac{\mu_A}{J_A^e \overline{\lambda_A^{e*}}}\left[1 + \frac{\theta-\theta_0}{\hat{\theta}}\right]\frac{\mathcal{L}^{-1}\left(\frac{\overline{\lambda_A^{e*}}}{\lambda^{lock}}\right)}{\mathcal{L}^{-1}\left(\frac{1}{\lambda^{lock}}\right)} dev[\boldsymbol{b}_A^{e*}] + \kappa(J_A^e - 1) \tag{2.2}$$

Denklem 2.2'de bulunan $J_A^e = \det[\boldsymbol{F}_A^e]$, μ_A değeri başlangıç kayma modülünü (intial shear modulus), λ^{lock} değeri zincirleme kilit gerinimini (chain locking stretch), θ değeri mevcut sıcaklığı, $\theta_0 = 293\,K$ sabit referans sıcaklığını, $\hat{\theta}$ değeri sertliğin sıcaklık tepkisini belirten bir materyal parametresini, $\boldsymbol{b}_A^{e*} = (J_A^e)^{-\frac{2}{3}}\boldsymbol{F}_A^e(\boldsymbol{F}_A^e)^T$ değeri Cauchy-Green deformasyon tensörünü, $\overline{\lambda_A^{e*}} = (tr[\boldsymbol{b}_A^{e*}]/3)^{1/2}$ değeri sekiz zincirli topoloji varsayımına dayalı zincir gerinimini (Arruda & Boyce, 1993), $\mathcal{L}^{-1}(x)$ değeri ters (inverse) Langevin fonksiyonunu, $\mathcal{L}(x) = \coth(x) - 1/x$, ve κ değeri hacim modülünü (bulk modulus) temsil etmektedir. Malzemenin sertliği sıcaklığa göre değişebilir. Eğer bu değişim, kesme modülünün sıcaklıkla nasıl değiştiği göz önünde bulundurularak hesaba katılırsa, malzemenin farklı sıcaklıklardaki davranışı daha doğru şekilde tahmin edilebilir (Bergstrom, 2015).

Modelin *B* ağında rol alan viskoelastik deformasyon gradyeni değeri elastik ve viskoz olmak üzere ikiye ayrılabilir:

$$\boldsymbol{F} = \boldsymbol{F}_B^e \boldsymbol{F}_B^v \tag{2.3}$$

Modeldeki *B* ağı üzerinde etkiyen Cauchy gerilimi denklem 2.2 ile benzer olarak belirtilebilir.

$$\boldsymbol{T}_B = \frac{\mu_B}{J_B^e \overline{\lambda_B^{e*}}} \left[1 + \frac{\theta - \theta_0}{\hat{\theta}}\right] \frac{\mathcal{L}^{-1}\left(\frac{\overline{\lambda_B^{e*}}}{\lambda^{lock}}\right)}{\mathcal{L}^{-1}\left(\frac{1}{\lambda^{lock}}\right)} dev[\boldsymbol{b}_B^{e*}] + \kappa(J_B^e - 1) \tag{2.4}$$

Denklem 2.4'teki $J_B^e = \det[\boldsymbol{F}_B^e]$, μ_B değeri başlangıç kayma modülünü (intial shear modulus), $\boldsymbol{b}_B^{e*} = (J_B^e)^{-\frac{2}{3}} \boldsymbol{F}_B^e (\boldsymbol{F}_B^e)^T$ değeri Cauchy-Green deformasyon tensörünü ve $\overline{\lambda_B^{e*}} = (tr[\boldsymbol{b}_B^{e*}]/3)^{1/2}$ değeri sekiz zincirli topoloji varsayımına dayalı zincir gerinimini ifade etmektedir (Arruda & Boyce, 1993). Bu denklemdeki efektif kayma modülünün, μ_{Bi} başlangıç değerinin plastik gerinimi ile geliştiği aşağıdaki 2.5 denklemine göre kabul edilir.

$$\dot{\mu}_B = -\beta[\mu_B - \mu_{Bf}] \cdot \dot{\gamma}_A \tag{2.5}$$

Denklem 2.5'te $\dot{\gamma}_A$ değeri viskoplastik akış hızı olup denlem 2.5'te tanımlanmıştır. Bu denklem malzeme modelinin birçok termoplastikte gözlemlenen dağılmış akma (distributed yielding) değerini daha iyi kavramasını sağlar.

Benzer olarak *C* ağı üzerinde etkiyen Cauchy gerilimi aşağıdaki denklem 2.6 ile tanımlanır.

$$\boldsymbol{T}_C = \frac{\mu_C}{J\overline{\lambda^*}} \left[1 + \frac{\theta - \theta_0}{\hat{\theta}}\right] \frac{\mathcal{L}^{-1}\left(\frac{\overline{\lambda^*}}{\lambda^{lock}}\right)}{\mathcal{L}^{-1}\left(\frac{1}{\lambda^{lock}}\right)} dev[\boldsymbol{b}^*] + \kappa(J - 1) \tag{2.6}$$

Denklem 2.6'daki $J = \det[\boldsymbol{F}]$, μ_C değeri başlangıç kayma modülünü (intial shear modulus), $\boldsymbol{b}^* = J^{-\frac{2}{3}}F(F)^T$ değeri Cauchy-Green deformasyon tensörünü ve $\overline{\lambda^*} = (tr[\boldsymbol{b}^*]/3)^{1/2}$ değeri sekiz zincirli topoloji varsayımına dayalı zincir gerinimini ifade etmektedir (Arruda & Boyce, 1993).

Bu yapıyı kullanarak, sistemin toplam Cauchy gerilme değeri $T = T_A + T_B + T_C$ şeklinde hesaplanır.

A ağının toplam hız gradyanı, $L = \dot{F}F^{-1}$, viskoz ve elastik bölümlerine parçalanabilir: $L = L_A^e + F_A^e L_A^v F_A^{e-1} = L_A^e + \tilde{L}_A^v$, içerisindeki $L_A^v = \dot{F}_A^v F_A^{v-1} = D_A^v + W_A^v$ ve $\tilde{L}_A^v = \tilde{D}_A^v + \tilde{W}_A^v$. Şekil değiştirmiş yani deforme olmuş bir halden gerilmesiz bir ara duruma geçiş süreci, yalnızca şekil değişimini değil, aynı zamanda ara konfigürasyona uygulanan keyfi katı cisim dönmeleri nedeniyle tekil veya özel (unique) olarak tanımlanamaz. Bu modelde, viskoplastik dönüşün dönme bileşeninin sıfırlandığı bir varsayım $W_A^v = 0$ benimsenerek, bu belirsizlik sistematik biçimde giderilmiştir. Bu yaklaşım sonucunda, elastik ve viskoplastik deformasyon gradyanlarının her ikisi de dönme bileşenleri içerebilir. *A* ağı (network A) için viskoplastik akma hızı, $\tilde{D}_A^v = \dot{\gamma}_A N_A$ ifadesiyle tanımlanır; burada N_A değeri, güncel konfigürasyona konvekte edilen gevşemiş konfigürasyondaki devyatörik gerilme tensörünün yönünü belirtirken, $\dot{\gamma}_A$ ise efektif devyatörik akma hızını ifade eder. Gerilme tensörü T_A, yüklü konfigürasyonda hesaplanır ve bu tensörün devyatörik kısmı $T'_A = dev[T_A]$ olarak tanımlanır. Bu tensörün büyüklüğü Frobenius normu ile $\tau_A = ||T'_A||_F \equiv (tr[T'_A T'_A])^{1/2}$ şeklinde tanımlanır ve viskoplastik akma yönü normalize edilerek $N_A = T'_A/\tau_A$ elde edilir (Bergstrom, 2015).

$$\dot{\gamma}_A = \dot{\gamma}_0 \cdot \left(\frac{\tau_A}{\hat{\tau}_A + aR(p_A)}\right)^{m_A} \cdot \left(\frac{\theta}{\theta_0}\right)^n \tag{2.7}$$

Efektif devyatörik akış hızı hem iç gerilme durumu hem de sıcaklık gibi çevresel etkileri dikkate alan denklem 2.7'deki gibi tanımlanır. Bu denklemde $\dot{\gamma}_0$ ölçüsel tutarlılığı sağlamak amacıyla tanımlanmış sabit bir parametredir ve birimi 1/s'dir. $p_A = -[(T_A)_{11} + (T_A)_{22} + (T_A)_{33}]/3$ değeri hidrostatik basınç, $R(x) = (x + |x|)/2$ ifadesi rampa fonksiyonu ve $\hat{\tau}_A, \beta, m_A, n$ ve θ_0 materyale özgü parametrelerdir. Bu yaklaşımda,

akış hızının sıcaklığa bağımlılığı bir kuvvet yasası (power law) formunda modele dâhil edilmiştir. Özetle, ağ *A*'nın viskoelastik akışın hız gradyanı şu şekilde ifade edilir:

$$\dot{F}_A^v = \dot{\gamma}_A F_A^{e-1} \left(\frac{dev[T_A]}{\tau_A}\right) F \tag{2.8}$$

B ağının toplam hız gradyanı *A* ağına oldukça benzer şekilde tarif edilebilir ve aynı adımlar ile *B* ağı için efektif devyatörik akış hızı denklem 2.9 ile temsil edilir. Son olarak B ağının viskoelastik akışın hız gradyanı değeri denklem 2.10 ile verilmiştir.

$$\dot{\gamma}_B = \dot{\gamma}_0 \cdot \left(\frac{\tau_B}{\hat{\tau}_B + aR(p_B)}\right)^{m_B} \cdot \left(\frac{\theta}{\theta_0}\right)^n \tag{2.9}$$

$$\dot{F}_B^v = \dot{\gamma}_B F_B^{e-1} \left(\frac{dev[T_B]}{\tau_B}\right) F \tag{2.10}$$

TNM malzeme modeli tanımı için gerekli parametreler aşağıdaki Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. TNM modeli parametreleri (Bergstrom, 2015).

İndeks	Sembol	Açıklama
1	μ_A	A ağının kayma modülü
2	$\hat{\theta}$	Sıcaklık faktörü
3	λ_L	Kilitleme gerinimi
4	κ	Hacim modülü
5	$\hat{\tau}_A$	A ağının akış direnci
6	α	Akışın basınç bağımlılığı
7	m_A	A ağının gerilme eksponansiyeli
8	n	Sıcaklık eksponansiyeli
9	μ_{Bi}	B ağının başlangıç kayma modülü
10	μ_{Bf}	B ağının bitiş kayma modülü
11	β	μB'nin evrim hızı
12	$\hat{\tau}_B$	B ağının akış direnci
13	m_B	B ağının gerilme eksponansiyeli
14	μ_C	C ağının kayma modülü
15	α	Isıl genleşme sabiti
16	θ_0	Isıl genleşme referans sıcaklığı

2.2. Kaynak Araştırması

Çalışmanın bu bölümünde literatürde yapılan kaynak araştırması sonrası latis (kafes) yapılar ve mekanik davranışları ile ilgili benzer nitelikte içeriğe sahip çalışmalar incelenmiştir. Bu bölümdeki içeriklere erişim için Bursa Uludağ Üniversitesi Merkez Kütüphanesi ve açık erişimdeki kaynaklar kullanılmıştır.

Tshikwand ve arkadaşlarının çalışması (Tshikwand vd., 2019), eklemeli imalat yöntemlerinden seçici lazer eritme yöntemi ile titanyum (Ti6Al4V) alaşımı kullanarak ürettikleri iki tip dikme tabanlı latis yapının deneysel sonuçlarını sonlu elemanlar analiz sonuçları ile karşılaştırmıştır. Çalışmada latis hücre tipi olarak oktet ve elmas yapılar incelenmiştir. Oktet tipi hücre geometrisi gerinme-baskın yapıda ve elmas geometriler eğilme-baskın yapıda olduğu Maxwell kriteri ile belirtilmiş. Sonlu elemanlar analizinde, 1D kiriş elemanlar ve 3D katı elemanlar kullanılmış olup analizler ANSYS programında yapılmış. Çözüm ağı hassasiyet analizi 3 farklı eleman boyutu için sadece 3D katı elemanlar için gerçekleştirilmiş. Analiz ve deney sonuçlarında oktet birim hücreye sahip latis yapıdaki kiriş elemanlarda gerilme oluşurken elmas birim hücreye sahip latis yapıda düğüm noktalarında gerilim gözlenmiş. Ayrıca elmas latis yapının yük altında 45 derecelik bir düzlem hattı üzerinde deforme olduğu ve oktet yapının 45 ve 135 derecelik düzlemlerde deforme olduğu belirtilmiş. Aşağıdaki Şekil 2.8'de görüleceği üzere sonlu elemanlar analizi ile deney sonuçları arasındaki hata oranları belirtilmiştir. Oktet yapıda 3D katı analiz 200% ve 20% arasında bir hata oranı sergiler iken 1D kiriş analizin hata oranı 112% ve %20 arasında saptanmıştır. Elmas yapıda 3D katı analiz hata oranı %146 ile %15 arasında iken 1D kiriş analiz için hata oranı %54 ile %16 arasında olup en düşük seviyededir.

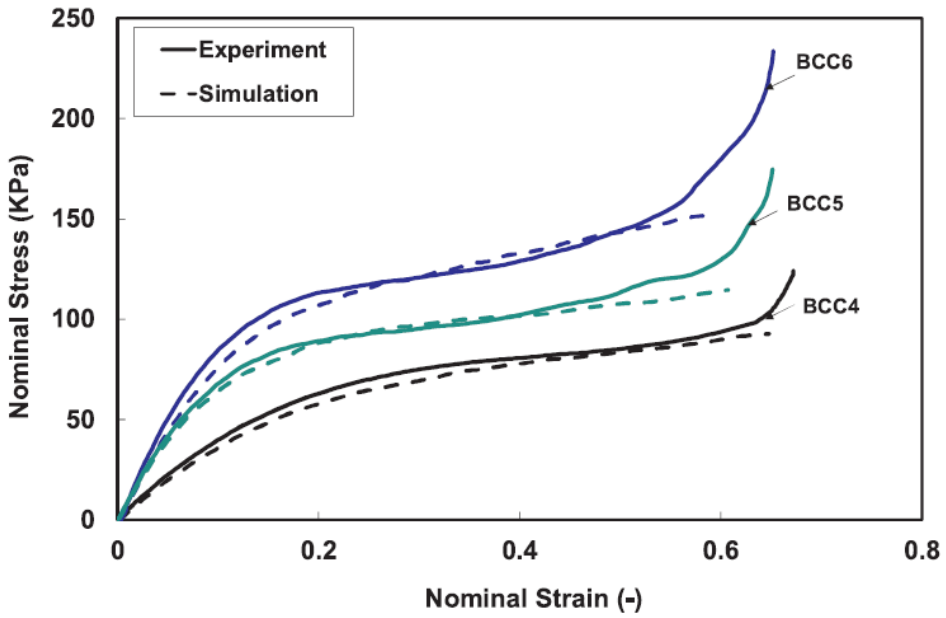
Octet-truss Lattice structure							
Dimension		cross section	Strut Thickness [µm]	Young's modulus [GPa]	Yield strength [MPa]	Maximum stress [MPa]	Plateau stress [MPa]
Physical Testing			347	2.4	184.06	196.6	188.97
FEM Actual	3D Solid	circular		7.4	128.1	157.61	147.25
% Error				208.33	-30.4	-19.83	-22.08
Physical Testing			347	2.4	184.06	196.6	188.97
FEM Actual	1D Beam	circular		5.1	127.34	156.36	149.6
% Error				112.5	-30.82	-20.47	-20.83

Diamond Lattice structure							
Dimension		Cross-section	Strut Thickness [µm]	Young's modulus [GPa]	Yield strength [MPa]	Maximum stress [MPa]	Plateau stress [MPa]
Physical Testing			489	1.8	107.1	121.11	117.49
FEM Actual	3D Solid	circular		4.43	81.21	102.44	95.91
% Error				146.11	-24.17	-15.42	-18.37
Physical Testing			489	1.8	107.1	121.11	117.49
FEM Actual	1D Beam	circular		2.1	49.56	80.46	62.21
% Error				16.67	-53.73	-33.56	-47.05

Şekil 2.8. Tshikwand ve arkadaşlarının çalışmasındaki analiz sonuçları (Tshikwand vd., 2019).

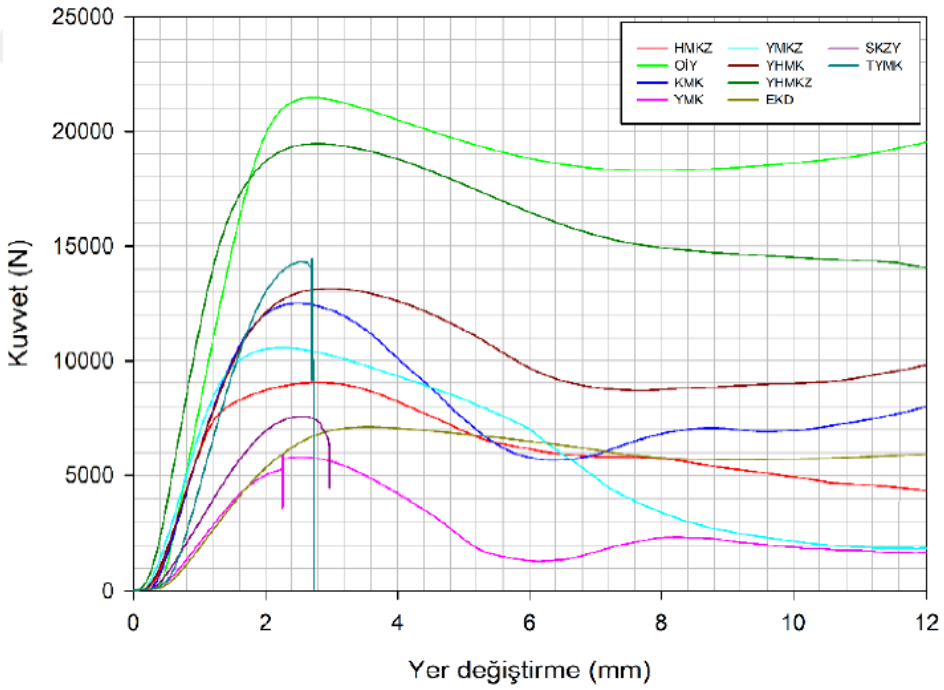
Plessis ve arkadaşları yaptıkları çalışmada (Du Plessis vd., 2018) seçici lazer eritme yöntemi ile ürettikleri mikro latis yapıların mekanik özelliklerini ve üretim sonrası mikro bilgisayarlı topografi cihazı ile incelemesini anlatmaktadırlar. Mikro latislerin malzemesi toz halindeki titanyum alaşımıdır (Ti6Al4V). Latis yapı hücre tipi olarak eğilme-baskın elmas tipi seçilmiş. Kiriş kalınlıkları 0,6 mm, 0,8 mm, 1 mm ve 1,2 mm olacak şekilde 4 farklı latis yapı tasarlanmış ve üretilmiş. Mikro bilgisayarlı tomografi ile üretilen latis yapılar ayrıntılı şekilde ölçümlenip tasarlanan kiriş kalınlıkları ve üretim ile imal edilen kafes yapıların kiriş kalınlıkları karşılaştırılmış. Bu karşılaştırma sonucunda daha küçük kalınlıklara sahip kafes yapılar imal edildikten sonra tasarım kalınlıklıklarından daha fazla sapma gösterdiği rapor edilmiş. Ayrıca yük altında akma durumunda latis yapılar bilgisayarlı tomografi ile görüntülenmiş ve kaydedilmiş.

Dar ve arkadaşlarının çalışmasında (Dar vd., 2020) seçici lazer ergitme yöntemi ile ürettikleri mikro latis yapıların bası altındaki fiziksel davranışlarını incelemişlerdir. Latis yapılar farklı dikme kalınlıklarında ve birim hücre boyutlarında 5 çeşit olarak üretilmiş. Yapıların malzemesi Photosensitive polimer reçine olarak seçilmiş. Latis yapının hücre tipi ise gövde merkezli kübik (BCC) yapılar olarak belirlenmiş. Seçilen malzemenin esnek olması ve yapının birim hücre tipinin eğilme-baskın olmasından dolayı yapılan bası deneyi sonuçlarında yapıda kırılmalar görülmemiş ve yapı esneyerek enerji sönümleme karakteristiğinde bir gerilme-gerinme eğrisi ortaya çıkarmış. Sonlu elemanlar analizi için malzeme modeli tanımlaması için D638 çeki numuneleri aynı malzemeden yazdırılmış ve deneyleri gerçekleştirilmiş. Bu veriler ile gerinme kopma (failure strain) modeli ve akma gerilmesi gibi diğer parametreler Explicit analiz için tanımlanmış. Tek bir birim hücre için 3D katı eleman kullanılarak çözüm ağı hassasiyet analizi yapılmış ve uygun eleman boyutu seçilmiş. Sonlu elemanlar analizi için LS DYNA çözücüsü kullanılmış ve Explicit analiz gerçekleştirilmiş. Analiz sonuçları deneyler ile karşılaştırıldığında oldukça yakın ve benzer gerilme-gerinim eğrileri elde edilmiş (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. Dar ve arkadaşlarının çalışmasındaki latis yapıların gerilme-gerinim grafiğinde deney ve sonlu elemanlar analiz karşılaştırmaları (Dar vd., 2020).

Tuğcu yaptığı tez çalışmasında (Tuğcu, 2023), poliaktik asit (PLA) ve poliamid (PA) malzemeleri ile eriyik yığma metodu yöntemini kullanarak üretmiş olduğu çeşitli kafes yapıların mekanik davranışlarını incelemiştir. Yaptığı çeki testleri neticesinde PLA malzemesi ile ürettiği numunelerin gevrek bir davranış sergilediği, PA malzemesi ile üretilen numunelerin sünek davranış sergilediğini gözlemlemiş. Çekme numuneleri için 3 farklı katman kalınlığı ve 3 farklı yazdırma yönü tercih edilmiş. 0,1 mm, 0,15 mm ve 0,2 mm katman kalınlıkları ile ürettiği numunelerde PLA için en dayanıklı numune 0,1 mm kalınlıkta, PA için ise 0,15 mm kalınlıkta olduğunu saptanmış. Tasarladığı on farklı geometrik tipteki kafes yapısı mekanik bası ve darbe testine dahil edilmiş. PLA malzemeli yapılardan, on ikiyüzlü yapının (OİY) enerji emilim ve özgül enerji emilimi daha yüksek gözlemlenmiş (Şekil 2.10). PA malzeme ile üretilen yapılardan, z dikmeli yüzey ve hacim merkezli kübik yapı (YHMKZ) en yüksek enerji emilimine, z dikmeli hacim merkezli kübik yapı (HMKZ) ise en yüksek özgül enerji değerinde saptanmış (Tuğcu, 2023). Yapılan bu çalışmada çeşitli dikme tabanlı kafes yapıları üretilmiş ve mekanik testler ile karşılaştırılmış. Ancak sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmemiştir.



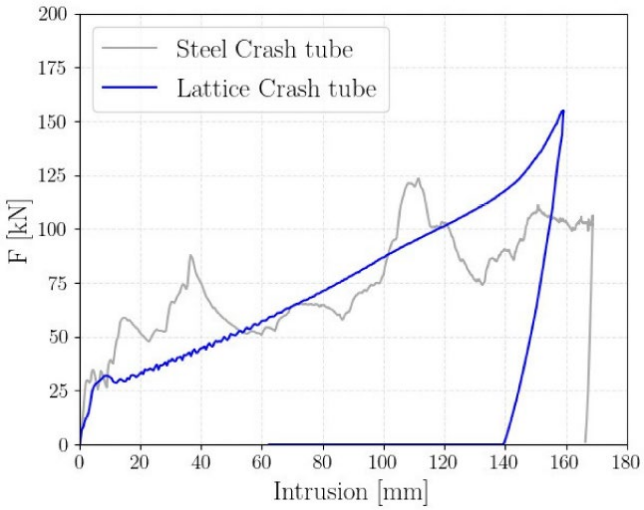
Şekil 2.10. PLA malzemeli kafes yapılan kuvvet-deplasman grafiği (Tuğcu, 2023).

Çizelge 2.2. Üç farklı literatür çalışmasının karşılaştırılması

Çalışma	Latis Tipi	SEA Eleman Tipi	Eleman Boyutu Hassasiyeti analizi var mı?	Sonlu Elemanlar Programı ve Tip	Malzeme Modeli ve kalibre edildiği mekanik test	Malzeme ve Üretim Metodu
Sharma 2022	Doğadan esinlenmiş 2.5 boyutlu model	3B Heksahedral (Hibrit Eleman)	Evet	Abaqus, Eksplisit (Zamana bağlı analiz), Yarı statik bası	Arruda-Boyce Hiperelastik / Çekme testi ile kalibre	TPU / FFF
Niutta 2022	Oktet tipi latis yapı	1B Hughes–Liu kiriş eleman	Evet	LsDyna Eksplisit (Zamana bağlı analiz), Yarı statik bası	Elastoplastik / Çekme testi ile kalibre	Karbon naylon / FFF
Dong 2018	Kübik merkezli ve vintiles yapı	Kiriş, Birleşim noktası güçlendirilmiş Kiriş, Tetrahedral	Evet	Yarı statik bası	Elastik / Çekme testi ile kalibre	ABS benzeri reçine / SLA

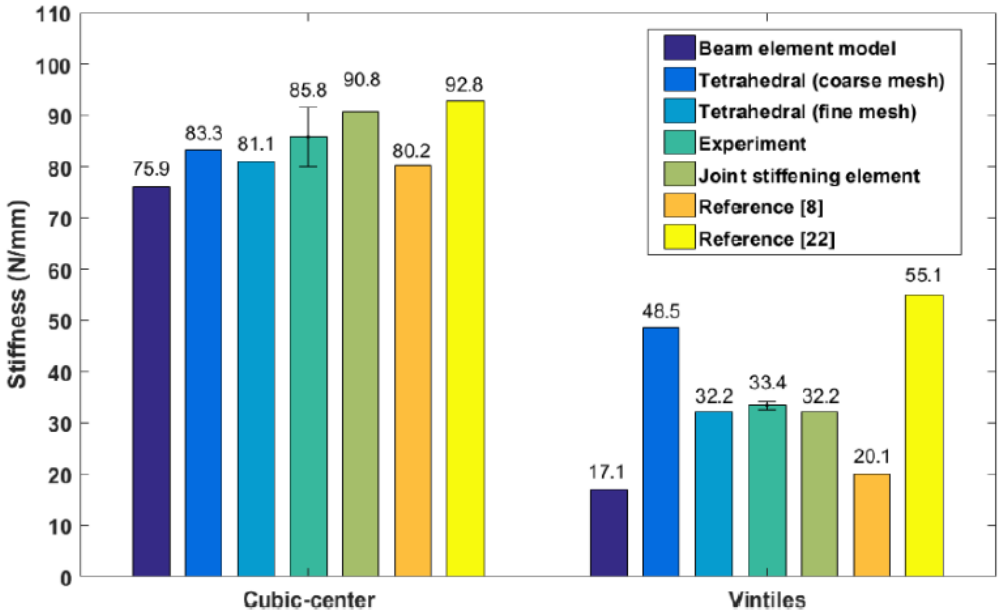
Sharma çalışmasında (Sharma & Hiremath, 2022), cam süngerlerden esinlenerek kafes yapı tasarımları yapmıştır. Bu yapı eğilme-baskın sınıfındadır ve TPU hammaddesi kullanılarak FFF yöntemi ile üretilmiş böylelikle enerji sönümlemesi yüksek bir yapı oluşturulmuş. Farklı parametreler ile oluşturulan geometrilerin bası deneyleri, kullanılan hammadde ile üretilen çekme numunelerinin de çekme deneyleri yapılmış. Çekme deneyleri sonuçlarına göre oluşturulan hiperelastik malzeme modeline ayrıca kopma noktası için gerilme değeri girilmiş. Eleman boyutu hassasiyeti için analiz yapılmış ve eleman boyutu belirlendikten sonra Abaqus programında yarı statik analizler gerçekleştirilmiş ve deneylere yakın sonuçlar elde edilmiş. Sonuçlarda enerji absorbe oranı en yüksek birim hücre sayısı 4 olarak saptanmış.

Niutta ve arkadaşları çalışmalarında (Niutta vd., 2022), oktet tipindeki kübik bir latis yapıyı karbon naylon filamenti kullanarak FFF yöntemi ile çeşitli kiriş kalınlıkları ve hücre sayıları ile üretmişler. Yaptıkları bası deneyleri sonrasında sonlu elemanlar analizi için LS Dyna modülünü kullanmışlar ve malzeme tanımlaması yaparken kopma limiti de tanımlamışlar. Analizler 3D ve 1D elemanlar ile yapılmış ve deneyler ile karşılaştırıldığında elastik bölge için yakın, plastik bölge için benzer sonuçlara ulaşılmış, plastik bölgede yakın sonuçlar alınamamasının nedeni olarak üretilen numunelerin sahip olduğu düzensizlikler ve üretim metodundan gelen dezavantajlar olarak açıklanmış. Spesifik enerji absorbe değerine ürettikleri numuneleri karşılaştırdıktan sonra bu parametreler ile araç için çarpışma kutusu benzeri bir yapı tasarlayıp bu yapıdaki hücre sayısını doğrusal olarak azalacak şekilde uygulamışlar. Tasarlanan bu yapının saatte 15 kilometre hız ile bası deneyleri gerçekleştirilip gerçek bir çelik çarpışma kutusu ile karşılaştırılmış. Şekil 2.11'de görüleceği üzere yapının sıkışma sırasında gösterdiği tepki kuvveti doğrusal benzeri ve yumuşak şekilde artış göstermiş ancak toplam sönümleme enerjisi karşılaştırılan çelik yapıdan neredeyse yarı yarıya daha az olacak şekilde hesaplanmış. Ayrıca çalışmada kullanılan 1D elemanlar 3D elemanlara yakın analiz sonuçları gösterirken analiz süresinden 6 kat gibi oldukça yüksek bir tasarruf sağlamış.



Şekil 2.11. Niutta'nın çalışmasındaki latis çarpışma kutusu bası sonuçları

Dong yaptığı çalışmada (Dong & Zhao, 2018), kübik merkezli ve vintiles tipindeki kafes yapıları tasarlamış ve deneyler gerçekleştirmiş. Yaptıkları 3D analiz ve 1D kiriş eleman analizlerini karşılaştırdıklarında 1D elemanlar ile elde ettiği elastik modül yaklaşık yüzde 40 daha az bulunmuş. Bunun en büyük sebebi olarak kiriş elemanların birleşim noktalarının yeterince güçlü olmaması olarak gösterilmiş. Bunun üzerine birleşim yerleri için güçlendirme (joint stiffening) gerçekleştirilmiş ve 1D analiz sonuçları 3D sonuçlara oldukça yaklaşmış (Şekil 2.12). Bu yöntem ile birleşim noktaları güçlendirilip kalibre edilmiş model kullanılarak çözüm zamanında tasarruf sağlanmış.



Şekil 2.12. Dong'un çalışmasının sonuçları.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Malzeme

FFF yönteminde hammadde erime sıcaklığına ulaştırıp katmanlar halinde yazdırılır. Hammadde olarak termoplastikler yaygın olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda öne çıkan ASA yani Akrilonitril Stiren Akrilat, sentetik bir amorf termoplastik olup ABS'nin yakın bir varyantıdır ve ABS'ye alternatif olarak geliştirilmiştir. ASA malzemesi davranış biçimi bakımından kırılgan tipte polimerlere yakın bir davranış göstermektedir (bkz. Şekil 2.5).

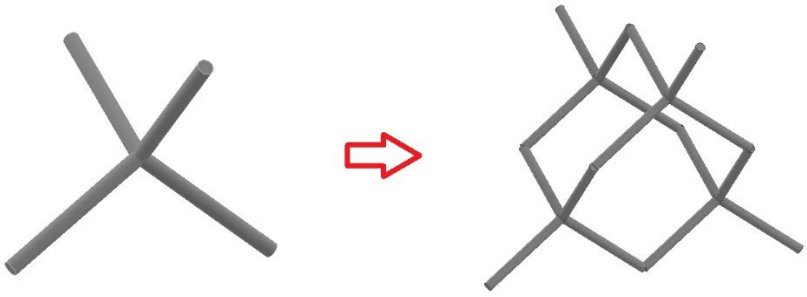
ASA fiziksel özellik bakımından yüksek kimyasal dayanıklılığı, suya dayanıklılığı, anti statik olması, darbe dayanımı ve ısıya dayanıklılığı ile öne çıkmaktadır. Özellikle UV (Ultraviyole) dayanımı sayesinde dış ortam uygulamarında sıkça kullanılmaktadır. Yazdırma bakımından zorlayıcı olan ASA 230-250 °C nozul sıcaklığı ve 90-110 °C tabla sıcaklığında kapalı bir ortam içerisinde yazdırılması tavsiye edilmektedir. Numunelerin üretimi sırasında Porima marka 1,75 mm çapında ASA filament kullanılmıştır.

3.2. Latis Yapı Tasarımı

Literatürde 2011–2021 yılları arasında yapılan kapsamlı incelemelere göre, farklı latis geometrileri arasında elmas tipi birim hücrelerin en yaygın şekilde tercih edildiği rapor edilmiştir (Benedetti vd., 2021). Bu çalışmada, kiriş tabanlı latis (kafes) yapı türüne sahip ve homojen şekilde dağıtılmış Şekil 3.1'deki gibi elmas (diamond) geometrisine sahip birim hücrelerden oluşan bir latis yapı tasarlanmıştır. Tasarım süreci kapsamında, geometrik modelleme ve parametrik yapı kurgusu için nTopology ve Autodesk Inventor yazılımları kullanılmıştır.

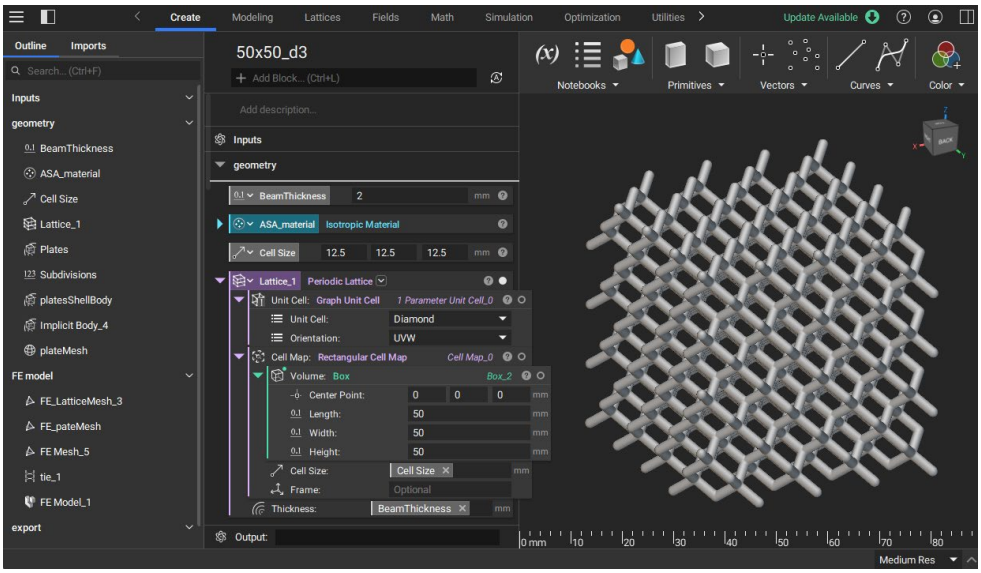
Elmas hücre yapısı Şekil 3.1'de gösterildiği üzere 4 adet birim elmas hücreden oluşmaktadır. Elmas birim hücre yapısal olarak 4 adet dikmeye ve 5 adet düğüm noktasına sahiptir, Maxwell kriterine göre bu yapı için M değeri hesaplandığında -5 bulunur (bkz. Denklem 2.1.) hesaplanan değer sıfırdan küçük olduğu için yapı üstüne

uygulanan kuvvetler için, düğüm noktaları kilitli olduğundan, eğilme davranışı sergileyecektir. Bu sebepten elmas hücre yapısı eğilme-baskın (bending-dominated) olarak sınıflandırılır.



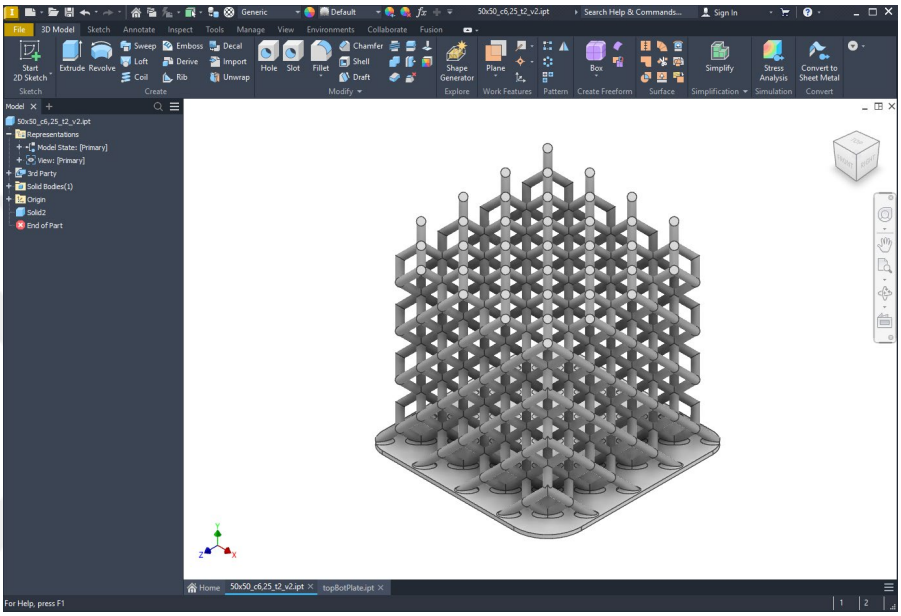
Şekil 3.1. Elmas (diamond) latis birim hücre geometrisi

Şekil 3.2'de gösterildiği üzere, dikme tabanlı latis yapı numunesi 50 mm yüksekliğinde ve kübik formda tasarlanmıştır. Yapının iç hacmini homojen olarak dolduran birim hücreler, boyutu 12,5 x 12,5 x 12,5 mm ve elmas geometrisindedir. Bu hücreleri ve tüm yapıyı oluşturan kiriş elemanlarının çapı ise 2 mm olarak belirlenmiştir. Bu boyutsal parametreler, latis yapının genel mekanik tepkisini etkileyen temel geometrik bileşenleri oluşturmaktadır.



Şekil 3.2. NTopology programı arayüzü ve elmas latis yapının önizlemesi.

Tasarlanan latis yapının bağıl yoğunluğu (relative density) hesaplandığında, yapının dolu (boşluksuz) haline oranı 0,1075'tir. Böylelikle tasarlanan latis yapı 10,75% bağıl yoğunluğa sahiptir. Latis yapı numunelerinin mekanik testler sırasında hücre bütünlüğünü korumaları için yapının alt bölgesine 1 mm kalınlığında plaka eklenmiştir. STL dosya dönüşümü ve alt ilave plakanın eklenmesi gibi yazdırma hazırlıkları ve son modelleme işlemleri Autodesk Inventor programında yapılmıştır (Şekil 3.3).



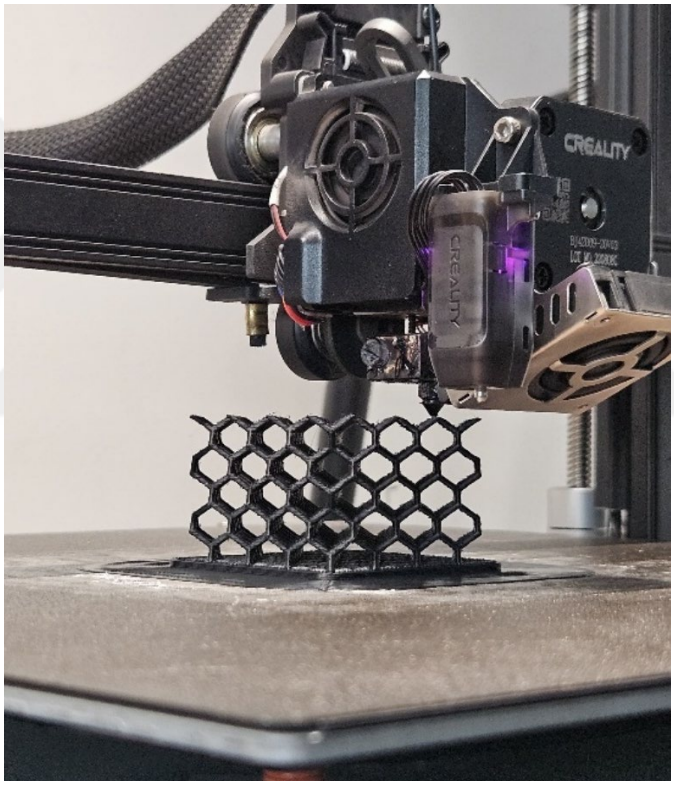
Şekil 3.3. Yazdırma öncesi latis numunesinin Inventor programında hazırlığı.

3.3. Numulerin Üretilmesi

Numuneler Creality marka CR-10 model 3D yazıcı ile ASA filamenti ile üretilmiştir (Şekil 3.4). Üretimin ilk aşamasında numuneler nTopology programında tasarlanmış olup bu tasarıma göre Inventor programında modellenip STL dosya formatında çıktı alınmıştır. STL dosyası Ultimaker Cura adlı 3D dilimleme yazılımına aktarılıp ASA filamentine uygun aşağıdaki Çizelge 3.1'deki yazdırma parametreleri girilip programdan çıktı olarak numerik kontrol biçimindeki GCODE dosyası alınmış, yazıcıya aktarılıp yazdırma işlemi tamamlanmıştır.

Çizelge 3.1. Yazdırma parametreleri

Parametre	Değer
Katman yüksekliği	0,2 mm
Dolgu	100%
Çizgi genişliği	0,4 mm
Nozul sıcaklığı	240 °C
Tabla sıcaklığı	100 °C
Yazdırma hızı	60 mm/s

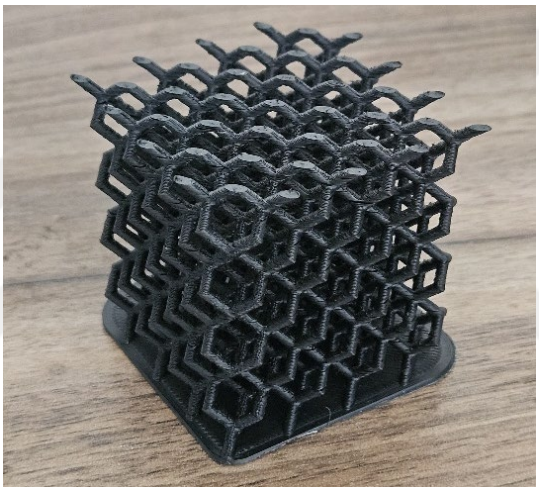


Şekil 3.4. CR-10 model 3D yazıcı ile ASA latis numunenin üretilmesi.

Latis yapıların malzeme modelinin tanımlanması amacıyla ASTM D695 plastikler için basma test numuneleri standartına uygun ölçülerde 9 adet silindirik numunenin üretimi 3D yazıcıda yapılmıştır. Silindirik numunelerin çapları 12,7 mm olup yükseklikleri 25,4 mm'dir.

Basma numunelerinin yanında ayrıca ASTM D638 standart çekme numunelerine benzer ölçüde 6 adet numune 3D yazıcıda aynı parametreler kullanılarak ASA filamenti ile üretilmiştir. Çekme numuneleri yazdırılırken katmanların çekme yönüne paralel olacak şekilde yönlendirilmiştir.

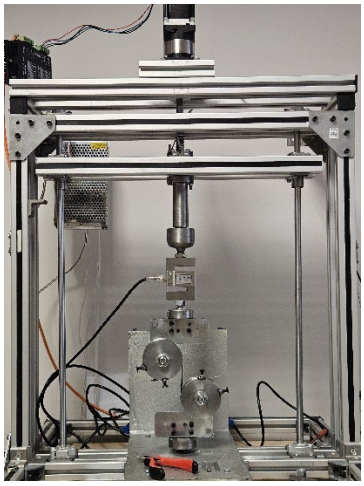
Latis yapı numuneleri, Çizelge 3.1'de belirtilen yazdırma parametreleri kullanılarak iki adet olacak şekilde üretilmiştir (Şekil 3.5). Ayrıca, bu parametreler sabit tutularak yalnızca katman yüksekliği 0,2 mm'den 0,15 mm'ye düşürülmüş ve bu koşullarda da iki adet kontrol numunesi üretilmiştir.



Şekil 3.5. 3D yazıcı ile üretilmiş ASA latis yapı numunesi

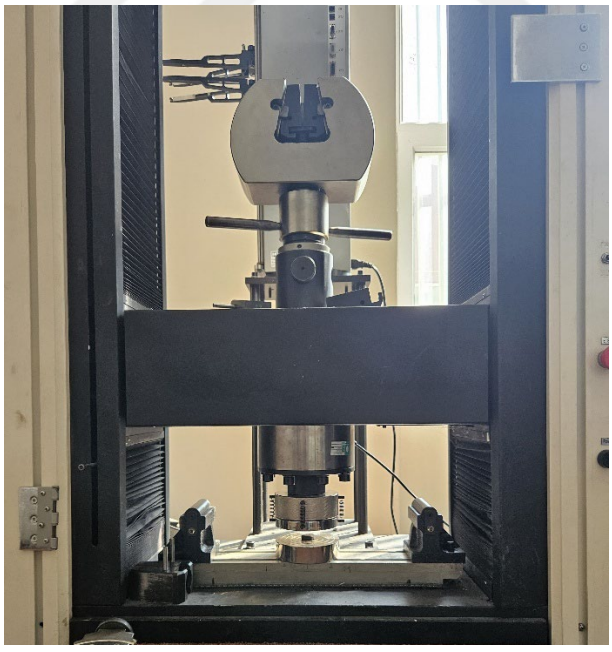
3.4. Mekanik Testler

Deneysel çalışmalar, iki farklı test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Test cihazlarından birincisi Utest marka endüstriyel bir çekme ve basma düzeneğinde olup 2,5 ton kapasiteye sahiptir. İkinci cihaz özel olarak tasarlanmış ve üretilmiş masaüstü 200 kg kapasiteli Şekil 3.6'da görülen test cihazıdır, Atmega2560 işlemciye sahip ve C++ dili ile geliştirilmiş bir yazılım ile kontrol edilmektedir, cihaz ile bilgisayar arasındaki haberleşmeyi sağlayan arayüz programı C# ile geliştirilmiş özel bir yazılımdır (Tüfekci vd., 2023).



Şekil 3.6. Özel yapım test cihazı

ASTM D695 standardına uygun olarak üretilen toplam dokuz adet silindirik basma numunesi, Şekil 3.7 de görülen Utest marka evrensel test cihazında üç farklı hızda (3 mm/dk, 30 mm/dk ve 300 mm/dk) test edilmiştir. Ayrıca, ASTM D638 standardına göre hazırlanan altı adet çekme numunesinin mekanik özellikleri, özel yapım test cihazı kullanılarak iki farklı hızda (1 mm/dk ve 10 mm/dk) değerlendirilmiştir.



Şekil 3.7. Utest universal test cihazı

Üretilen 4 adet latis yapı numunelerinin Utest test cihazında basma deneyleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.8). İki farklı katman yüksekliği parametresiyle üretilen dört adet Latis yapı numunesi, 10 mm/dk sabit test hızı ile mekanik testlere tabi tutulmuştur.



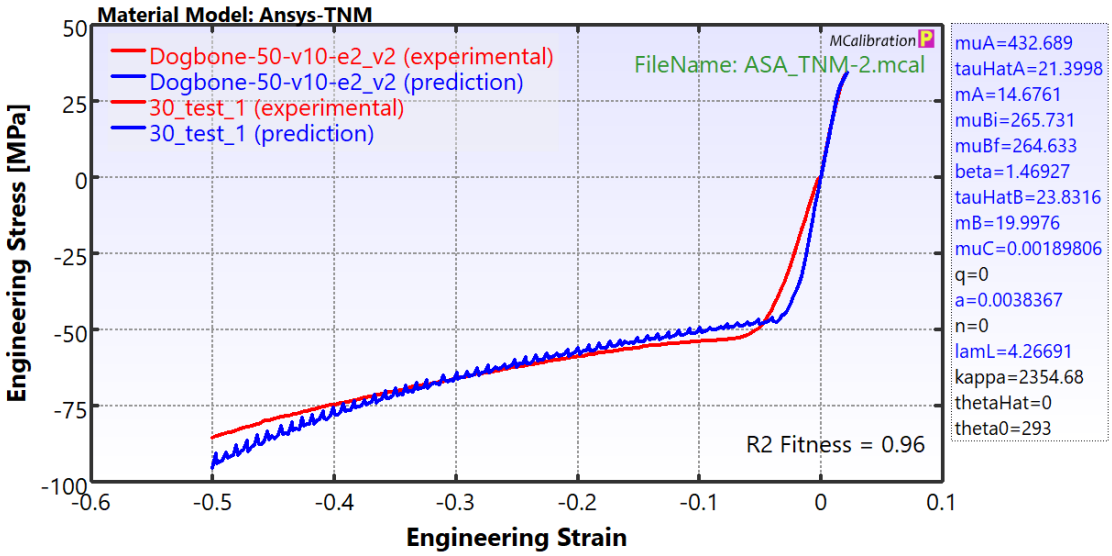
Şekil 3.8. Utest test cihazında latis yapının deney düzeneğindeki görüntüsü

3.5. Malzeme Modeli Kalibrasyonu

Sonlu elemanlar analizinden doğru sonuçlar elde edebilmek için bilgisayar ortamında malzeme modelinin doğru seçilip deney verilerinden alınan değerler ile malzeme parametrelerinin uygun şekilde oluşturulması gerekir. Bu işlem çalışılan malzeme lineer olmayan bir yapıya sahip ise oldukça zorlayıcı bir hal alabilir. Bu durumda yardımcı bir yazılım ile malzeme modeli kalibrasyon işlemi yarı otomatik şekilde hızlandırılabilir, kolaylaştırılabilir ve daha tutarlı modeller oluşturulabilir. Bu çalışmada malzeme modeli kalibrasyonu için MCalibration adlı yazılım kullanılmış ve ASA malzemesi için farklı parametrelerde MISO, TNM ve Bergstrom-Boyce malzeme modelleri kalibre edilmiştir.

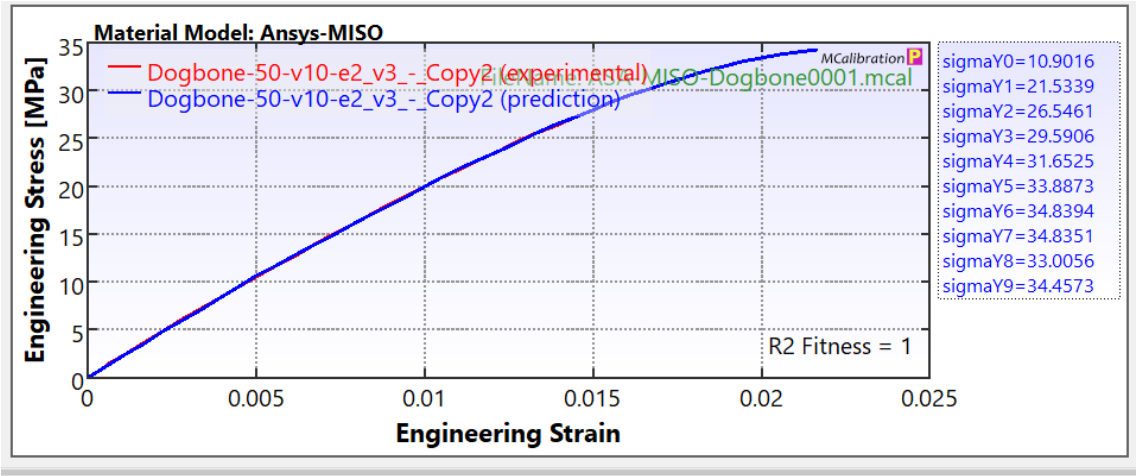
Malzeme kalibrasyonu yapmak için öncelikle program içerisine deneyden elde edilen mühendislik gerilme ve gerinim değerleri yüklenir. Sonrasında istenilen malzeme modeli seçilerek kalibrasyon başlatılır, istenilen yakınsama elde edilene kadar çözdürülür. ASTM D638 çekme numunesinin deney sonuçları Mcalibration programına yüklenmiş ve Ansys MISO malzeme modeli üzerinden kalibrasyonu yapılmıştır (Şekil 3.10). Kalibrasyon sonucunda programdan alınan Elastisite modülü ve plastik bölgeye ait gerilme-birim şekil değiştirme değerleri Ansys programında malzeme tanımlaması yapılırken direkt olarak kullanılmıştır.

TNM (Three Network Model) malzeme modelinin kalibrasyonu amacıyla, ASTM D638 standardına uygun olarak hazırlanmış çekme numunesi ile ASTM D695 standardına uygun basma numunesi üzerinde mekanik testler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deneysel veriler MCalibration yazılımına aktarılmış ve her iki yükleme durumu için TNM malzeme modelinin kalibrasyonu başarıyla gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. TNM modelinin Mcalibration programında çeki ve bası deney sonuçları ile kalibrasyonu

Bergstrom-Boyce malzeme modelinin kalibrasyonu ASTM D638 standartlarındaki çekme numunesinin 1 mm/dk ve 10 mm/dk hızlardaki deney sonuçları Mcalibration programına yüklenerek gerçekleştirilmiştir.

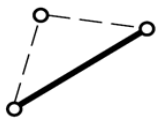
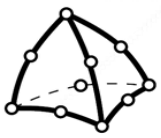


Şekil 3.10. MCalibration programında MISO_1 malzeme modelinin kalibrasyonu

3.6. Sonlu Elemanlar Analizi

Bu çalışmada, latis yapılarının mekanik davranışları ANSYS yazılımının statik ve dinamik analiz modülü kullanılarak sonlu elemanlar analizi (SEA) yöntemiyle incelenmiştir. Malzeme modelleri, MCalibration programında elde edilen kalibrasyon çıktı parametreleri kullanılarak ANSYS malzeme kütüphanesine tanımlanmıştır.

Latis numunelerinin çözüm ağı oluşturulurken, 1D analiz için ANSYS Timoshenko kiriş (BEAM188) elemanlar ve 3D analizler için ANSYS 3D katı (SOLID 187) tetrahedral elemanlar kullanılmıştır (Şekil 3.11). Bu eleman tipleri kafes yapıların bilgisayar ortamında analizi için oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Elements	Pictorials
BEAM188 (p. 891) Structural 3D 2-Node Beam 2 nodes 3D space DOF: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ	
SOLID187 (p. 884) 3D 10-Node Tetrahedral Structural Solid 10 nodes 3D space DOF: UX, UY, UZ	

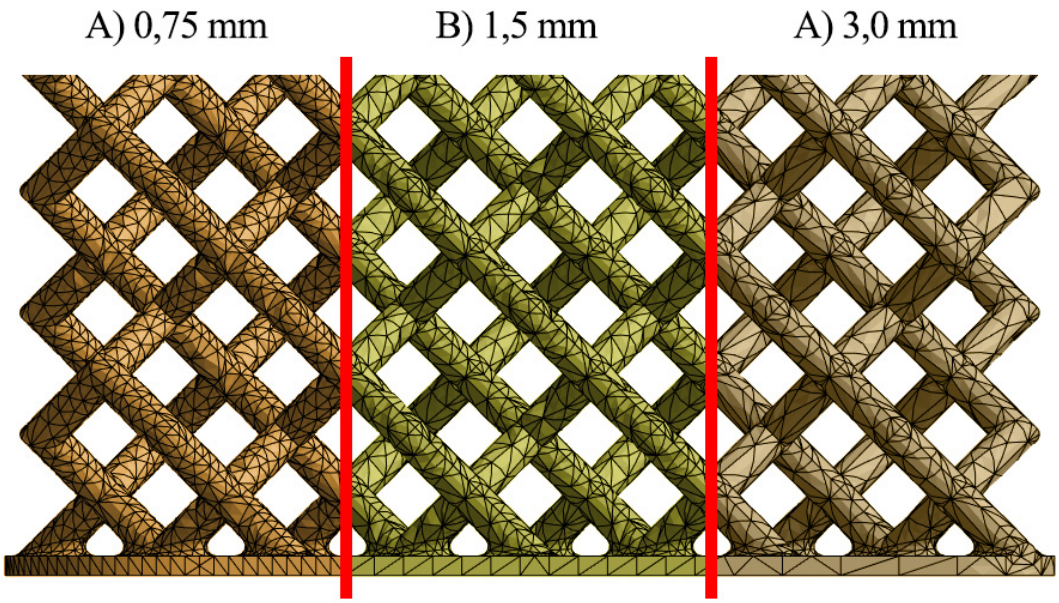
Şekil 3.11. Kiriş (beam) ve tetrahedral eleman tipleri.

Sonlu elemanlar analizinde problem çözümü için statik ve dinamik olmak üzere iki tip seçenek mevcuttur. Eğer sisteminiz zamana bağlı değil ise statik ortamda çözmek size hızlı çözüm süresi ve yakınsama kararlılığı gibi avantajlar sağlayacaktır. Ancak çözülmek istenen probleminiz zamana bağlı gerçekleşiyor, ani yüklemeler veya kırılma gibi kalıcı deformasyonlar içeriyor ise dinamik analiz ile çözüme ulaşılması gerekmektedir. Ansys ortamında dinamik analiz için LS DYNA veya Explicit modülü kullanılırken statik analiz için de bir modül mevcuttur. Kullanılan analiz tipi ona uygun malzeme modeli seçimini gerektirmektedir, tüm malzeme modelleri her analiz tipini desteklemediği için bu konuda dikkat edilmesi gerekmektedir. Bu çalışma için referans alınacak MISO (Multilinear Isotropic Hardening), TNM (Three Network Model) ve Bergstrom-Boyce malzeme modellerinin kendilerine özel karakteristiklerinden dolayı tüm analiz ve eleman tiplerini desteklememektedir. Çizelge 3.2'de bu üç malzeme modeli için uyumlu ve uyumsuz oldukları eleman ve analiz tipleri belirtilmiştir.

Çizelge 3.2. Malzeme modellerinin desteklediği analiz ve eleman tipleri tablosu

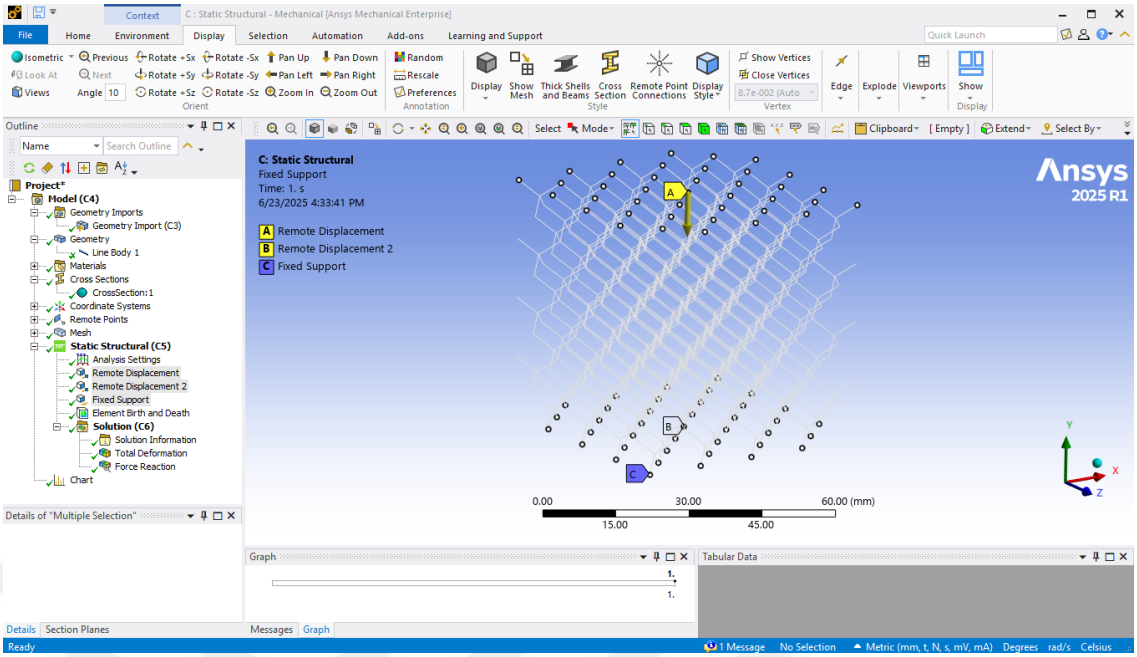
Model	Kiriş (BEAM188) Statik 1D	Tetrahedral (SOLID187) Statik 3D	Kiriş (BEAM188) Dinamik 1D	Tetrahedral (SOLID187) Dinamik 3D
MISO	+	+	+	+
TNM	-	+	-	-
Bergstrom-Boyce	-	+	-	-

Kiriş ve tetrahedral ağ eleman tipleri için oluşturulan çözüm (mesh) ağında kullanılan toplam eleman sayısı analiz sonuçlarını doğrudan etkileyebilir. Bu durumda 3D analizler ve 1D kiriş eleman analizlerinde farklı eleman boyutları için ANSYS yazılımında parametrik yapısal analiz modülü kullanılarak analizler gerçekleştirilmiş ve eleman boyutu hassasiyeti (mesh sensivity) incelenmiştir. Eleman boyut hassasiyeti analizi için tetrahedral katı eleman boyutu olarak Şekil 3.12'de görüleceği üzere 0,75 mm, 1,5 mm ve 3 mm seçilmiş ve elmas hücreli latis numune yapısının çözüm ağı oluşturulmuştur.



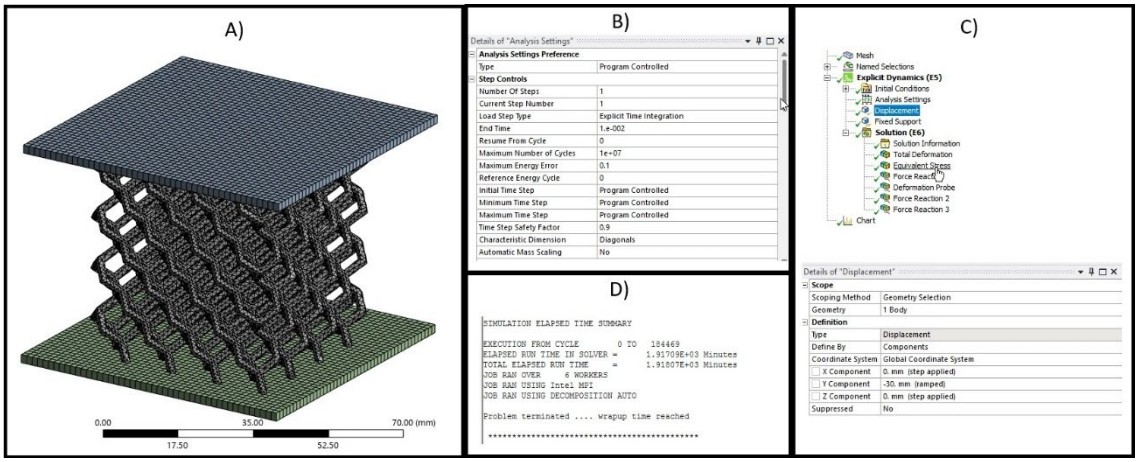
Şekil 3.12. 3D tetrahedral katı elemanların latis yapının çözüm ağı üzerindeki boyutları A) 0,75 mm ince (fine) eleman B) 1,5 mm orta (medium) boyut eleman C) 3 mm kaba (coarse) eleman boyutu

Sonlu elemanlar analizi için gerekli sınır şartları deney ortamını simule etmek için benzer şekilde tanımlanmıştır. Elmas latis yapının zemin ile temas halinde olan alt bölgesindeki yüzey, analiz ortamında tüm eksenlerde hareketi kısıtlanarak sabitlenmiştir. Hücrelerin en üst düğümlerine yani deney sırasında cihazın üst baskı plakasına maruz kalan noktalarına, uzak yer değiştirme (remote displacement) uygulanmış ve bu yer değiştirme dönme eksenleri rijit bir şekilde kapatılarak bası yönünde 5.5 mm olarak verilmiştir (Şekil 3.13). Bu şekilde latis yapının deney şartları simüle edilmiştir.



Şekil 3.13. ANSYS statik modülünde 1D kiriş eleman analizinin sınır şartları

3D statik analiz için sınır şartları tanımlaması sonrasında analiz ayarları bölümünde çeşitli parametreler analizin altyapısı ve çözücüsü ile ilgili olarak değiştirilebilir. Bu ayarlardan deneyde de gözlemlendiği üzere elemanlardaki yer değiştirmeler yüksek seviyede hatta kırılma gözlemlendiği için büyük deplasman (large deflection) seçeneği aktif hale getirilmiştir. Bu özellik, malzemenin doğrusal olmayan geometrik davranışını dikkate alarak daha gerçekçi sonuçlar elde edilmesini sağlamak amacı ile kullanılmıştır. Analiz çözümü için alt adım sayısı 50 olarak belirlenmiştir. Bu yaklaşım ile yükleme adımı daha küçük parçalara bölünerek çözümün stabilitesi ve doğruluğu artmaktadır.



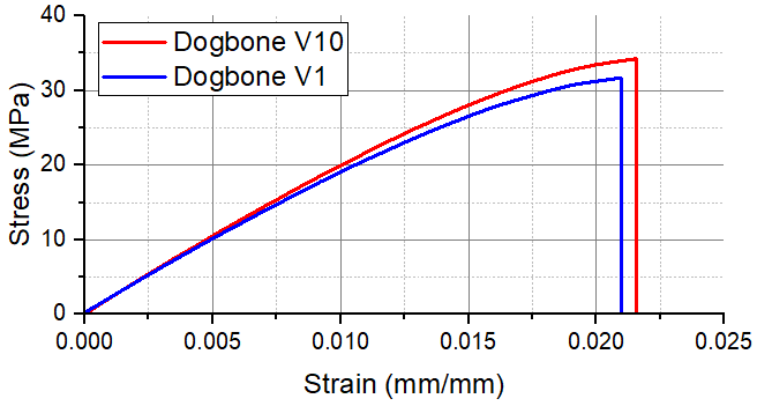
Şekil 3.14. 3D Dinamik analiz ortamı A) latis yapının çözüm ağı B) dinamik analiz ayarları C) dinamik analiz sınır şartları D) dinamik analiz çözüm ekranı

Dinamik analizler ANSYS programının Explicit modülünde gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.14'te dinamik analiz ortamı görülmektedir, burada tetrahedral katı elemanlarla çözüm ağı oluşturulan elmas latis yapı, dinamik analizin bitiş süresi olan 0,01 saniye girdisini, üst plakaya uygulanan 30 mm'lik yer değiştirme ve alt plakanın sabitlenme sınır şartlarını görmekteyiz. Malzeme modellerinin tümü dinamik analiz ortamını desteklemediği için bu analizler sadece MISO modelleri ile gerçekleştirilmiştir. Çözüm ağı oluşturulurken kullanılan tetrahedral eleman boyutu 1,5 olarak belirlenmiştir. Tasarlanan modelde elmas latis yapının alt ve üst bölümüne rijit sıkıştırma plakaları eklenmiş ve basma deneyi simüle edilmek istenmiştir. Oluşturulan rijit plakalar ile latis yapının temas noktaları için bağlantı tanımı yapılmıştır.

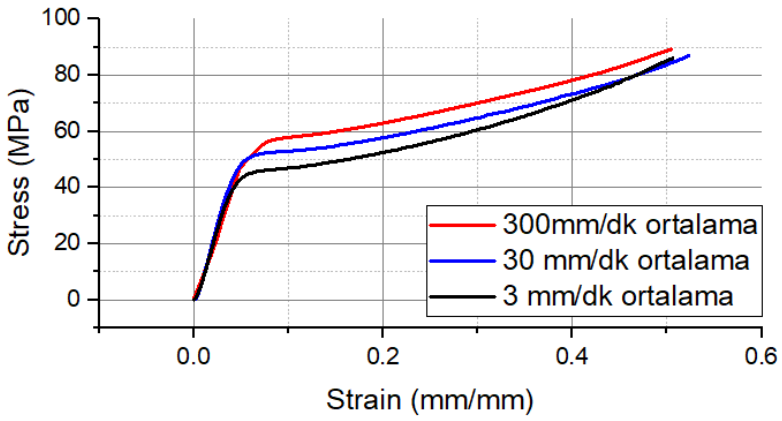
4. BULGULAR

4.1. Mekanik Test Sonuçları

FFF yöntemi kullanılarak ASA hammaddesi ile üretilen ASTM D638 çekme numunesinin testleri özel yapım test cihazında çekme deneyleri her hız için 3'er adet numune ile gerçekleştirilmiştir. ASTM D638 çekme numunesinin Şekil 4.1'de görülen gerilme-gerinim grafiğinde Dogbone V10 verisi 10 mm/dk hız ile yapılan çekme testine, grafikteki Dogbone V1 verisi ise 1 mm/dk hız ile yapılan teste aittir. Hız farkının çekme numuneleri üzerindeki etkisi nispeten az veya düşük olarak yorumlanabilir. Elde edilen çekme deneyi sonuçları elmas tipi latis yapının sonlu elemanlar analizi için malzeme tanımlaması ve kalibrasyonu sırasında kullanılmıştır.



Şekil 4.1. Çekme numunesinin deney sonuçlarının gerilme-gerinim grafiği



Şekil 4.2. Bası numunesinin deney sonuçlarının gerilme-gerinim grafiği

ASTM D695 bası numuneleri 3D yazıcıda 9 adet üretilmiş olup, Utest evrensel test cihazında basma testleri 3 farklı hızda gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.3). Bası numunesinin 3, 30 ve 300 mm/dk hızlarda yapılan 3'er adet deney sonucunun ortalamaları Şekil 4.2'deki grafikte görülebilir. Toplanan veriler incelendiğinde yapının hıza göre verdiği tepkiler göreceli olarak düşük olarak nitelendirilebilir.

Bası ve çeki numunelerinin belirlenen hızlarda mekanik özelliklerinin direkt karşılaştırmasını Şekil 4.1'deki çizelge yardımı ile yapabiliriz. Test edilen numunelerden bası numunesi elastisite modülü bakımından çekme numunesine göre 41% daha düşük bir değere sahip olduğu gözlemlenmiştir. Çekme numunesinin yüzde 2,15 uzama noktasında 411 N kuvvet ile koptuğu gözlemlenirken, bası numunesinin fiziksel bütünlüğü bozulmadan önce yüzde 61 oranında bir deformasyon ve 1145 N maksimum kuvvet değeri elde edilmiştir.

Çizelge 4.1. Çeki ve bası numunelerinin deney sonuçları

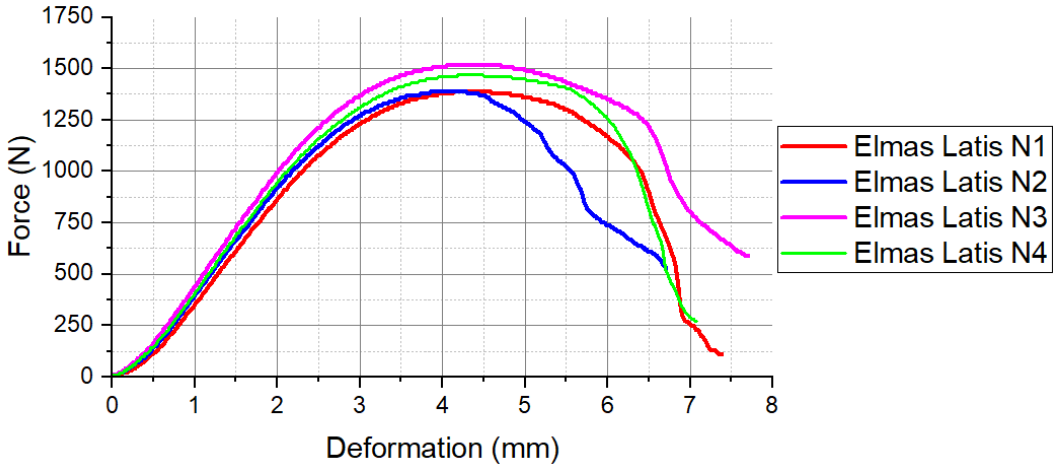
Numune Türü	Maksimum Kuvvet (N)	Maksimum Gerinme	Maksimum Gerilme (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)
Çekme Numunesi (10 mm/dk)	411	0.0215	34.3	2140
Bası Numunesi (30 mm/dk)	1145	0.61	90	1260



Şekil 4.3. Numunenin test sonundaki deforme olmuş görüntüsü

Çizelge 4.2. Elmas latis numunelerinin tanımlamaları

Numune No	Tanımlama	Katman Kalınlığı (mm)
1	Elmas Latis N1	0.2
2	Elmas Latis N2	0.2
3	Elmas Latis N3	0.15
4	Elmas Latis N4	0.15

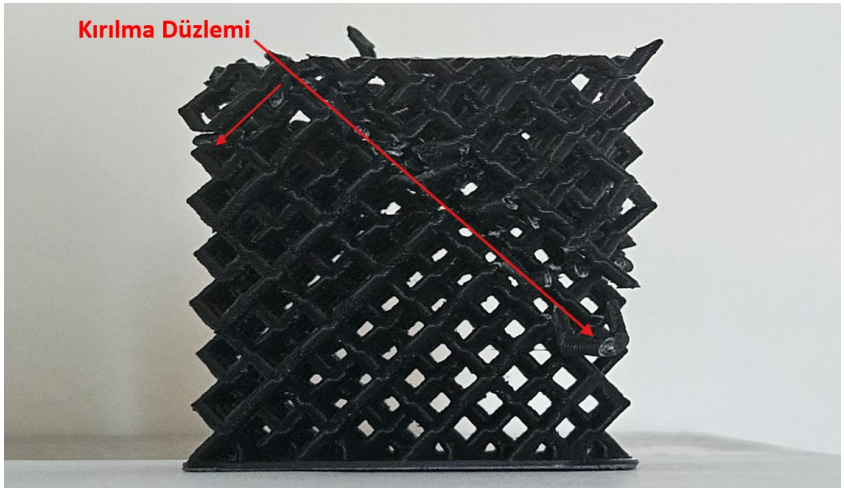


Şekil 4.4. Elmas latis yapı numunelerinin bası deneyi sonuçları

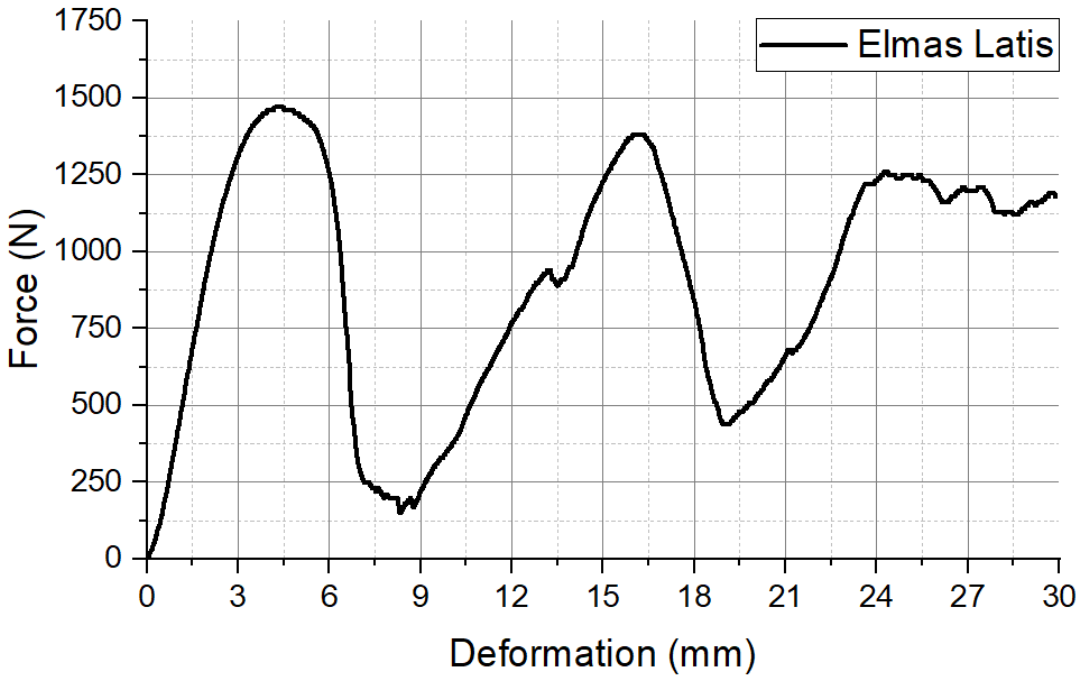
Çizelge 4.2'de tanımlamaları yapılan elmas hücreli latis yapı numuneleri için gerçekleştirilen basma deneylerinde numunelerin benzer davranışlar sergiledikleri görülmektedir (Şekil 4.4). Yapılar 4 ila 5 mm deformasyon anlarında kırılma eğilimi göstermektedirler. Söz konusu kırılma davranışı yaklaşık 45 derecelik bir düzlemde Şekil 4.5'teki gibi gerçekleşmiştir. Deney sonuçlarına göre 0,15 mm katman kalınlığına sahip latis yapılar 0,2 mm katman kalınlığı ile üretilmiş yapılardan daha tutarlı sonuçlar sergilemiştir.

Çizelge 4.3. Elmas latis yapıların deney sonucundaki maksimum kuvvet değerleri

Tanımlama	Katman Kalınlığı (mm)	Maksimum Kuvvet (N)
Elmas Latis N1	0.2	1390
Elmas Latis N2	0.2	1390
Elmas Latis N3	0.15	1520
Elmas Latis N4	0.15	1470



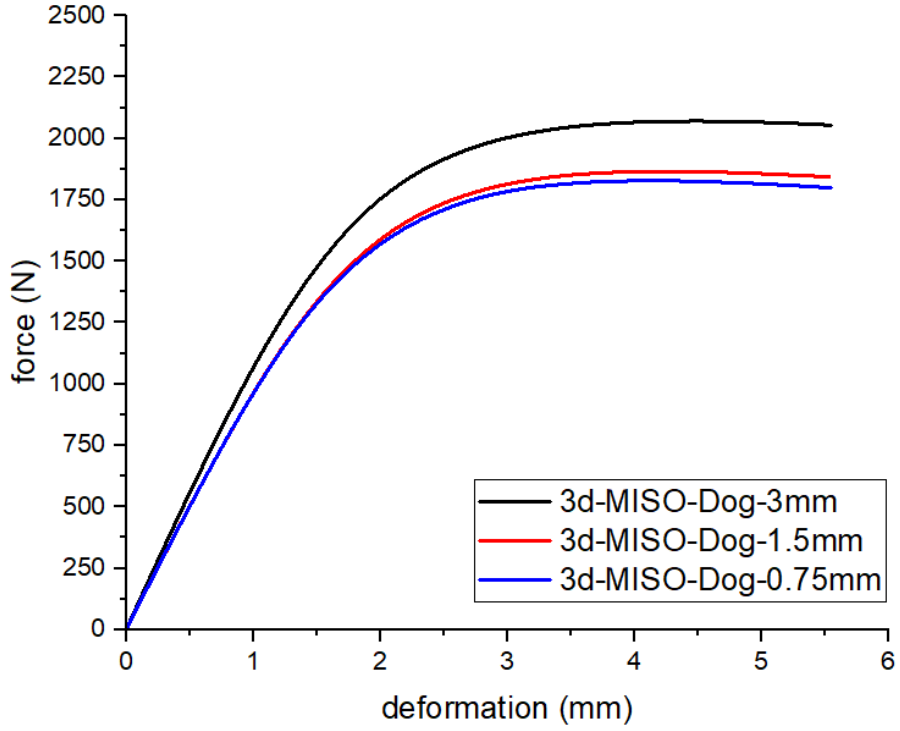
Şekil 4.5. Deney sonrası elmas latis yapı üzerindeki kırılma düzlemi



Şekil 4.6. Elmas latis yapının 30 mm'lik basma deneyi sonucu

Şekil 4.6'da basma testinin 1. kırınım bölgesinin devamında sergilediği kuvvet-deformasyon eğrisi görmekteyiz. Latis yapı ilk kırınım sonrasında geometrik olarak oluşan 45 derecelik kırınım düzlemi ile üzerindeki kuvvetin yaklaşık 1500 N'dan 230 N'a kadar gerilemesine neden olmuştur. Yapılan deneyde elmas latis numune üzerinde 2 önemli pik kuvvet noktası oluştuğu gözlemlenmiştir.

4.2. Sonlu Elemanlar Analizi Eleman Boyut Hassasiyeti



Şekil 4.7. 3D Statik analiz için çözüm ağı boyutu hassasiyeti

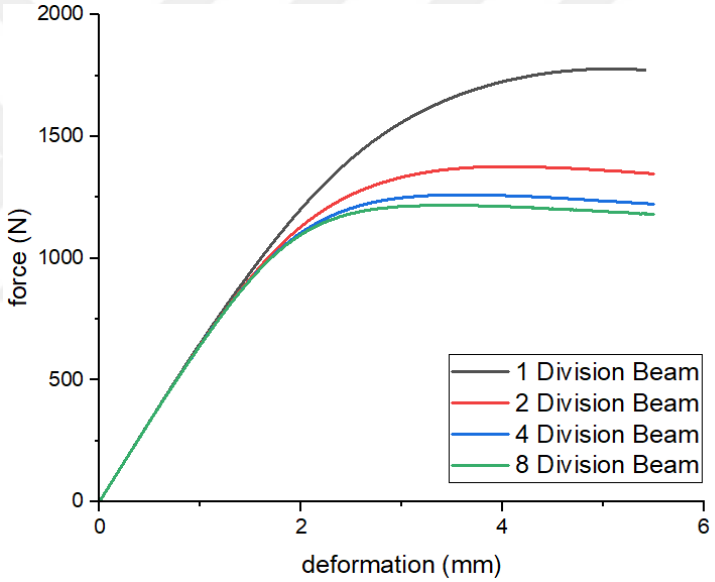
Sonlu elemanlar analizi sonuçları çözüm ağını oluşturan eleman boyutları ile farklılık gösterir. Doğru eleman boyutu yapılacak hassasiyet analizi ile tespit edilebilir. Latis yapının sonlu elemanlar analizinde farklı boyutlardaki çözüm ağı elemanlarının sonuçlarını incelemek için çözüm ağı hassasiyet analizi gerçekleştirildi (Şekil 4.9). 3D statik analiz için kullanılan tetrahedral katı elemanlar için seçilen 3 farklı eleman boyutu 0,75 mm, 1,5 mm ve 3 mm olarak belirlendi. Yapılan analizin kuvvet-deplasman sonuçları Şekil 4.7'deki grafikte görülebilir. Farklı eleman boyutları için elde edilen 3D tetrahedral eleman sayısı, düğüm noktası sayısı, maksimum tepki kuvveti ve çözüm süresi değerleri Çizelge 4.4'te ayrıntılı olarak listelenmiştir.

Analizler sırasında 6 fiziksel 12 sanal çekirdeğe sahip i5 serisi 14. nesil bir işlemci kullanılmıştır. Çözüm süreleri kullanılan bilgisayarın özelliklerine göre değişeceği için anlamlı bir karşılığı olması bakımından ulaşılan değerler birbiri içinde karşılaştırılacaktır. Maksimum tepki kuvveti bakımından 1.5 mm ve 0.75 mm birbirine 2% fark ile oldukça

yakındır. Aradaki maksimum kuvvet farklılığı düşük olduğundan 1.5 mm eleman boyutu için çözüm ağı yakınsamış (converge) olarak kabul edebiliriz, bu seçim yapılarak latis yapının 3D statik analiz çözüm süresi 50% tasarruf edilmiştir.

Çizelge 4.4. 3D tetrahedral elemanlarda hassasiyet analizi sonuçları tablosu

Eleman Boyutu (mm)	3D Tetrahedral Eleman Sayısı	Düğüm Sayısı	Maksimum Tepki Kuvveti (N)	Çözüm Süresi (saniye)
3	79509	157540	2070.6	271
1.5	107160	212590	1865.7	326
0.75	169310	335190	1827.7	680



Şekil 4.8. Kiriş (beam) eleman statik analiz çözüm ağı boyut hassasiyeti

Sonlu elemanlar analizinde kullanılan timoshenko 1D kiriş elemanlar latis yapı için sahip olduğu veya yapıyı oluşturan her bir dikme (strut) elemana karşılık gelmektedir. Literatürde 1D elemanlar için hassasiyet analizi yaygın olmasa da yapılan analizler sonucunda, kiriş elemanların bu çalışmada oluşturulan dikme tabanlı latis yapı tasarımı için sonlu elemanlar sonuçlarını önemli ölçüde etkilediği gözlemlenmiştir (Şekil 4.8). Çözüm hasassiyet analizi ve çözüm ağı yakınsaması penceresinden bakıldığında yapılan analiz sonuçlarına göre 4 bölüme sahip 1D kiriş elemanlar optimum sonucu en iyi sürede

sergilemektedir. Çizelge 4.5'te 1D elemanların bölüm (division) miktarına göre tasarlanan latis yapının çözüm ağı istatistikleri, ulaşılan maksimum tepki kuvveti ve ulaşılan çözüm süresi verilmiştir.

Çizelge 4.5. 1D kiriş elemanlar ile oluşturulan çözüm ağı hassasiyeti çalışması sonuçları

Kiriş Bölüm Miktarı	1D Beam Eleman Sayısı	Düğüm Sayısı	Maksimum Tepki Kuvveti [N]	Çözüm Süresi [saniye]
1	1024	1641	1777,5	16
2	2048	3689	1376,4	30
4	4096	7785	1260,8	100
8	8192	15977	1217,5	786

Table of Design Points

	A	B	C	D	E	F
1	Name	P1 - Edge Sizing Number of Divisions	P2 - Line Body 1 Assignment	P3 - Force Reaction Maximum Total	P4 - Mesh Elements	P5 - Mesh Nodes
2	Units			N		
3	DP 0	1	ASA_MISO...	1777.5	1024	1641
4	DP 1	2	ASA_MISO...	1376.4	2048	3689
5	DP 2	4	ASA_MISO...	1260.8	4096	7785
6	DP 3 (Current)	8	ASA_MISO...	1217.5	8192	15977
*						

Şekil 4.9. Ansys parametric ortamında çözüm ağı hassasiyeti analizi

4.3. Materyal Karakterizasyonu

Sonlu elemanlar sonuçlarının tutarlılığını sağlamak amacıyla yapılan ASTM D695 bası ve ASTM D638 çeki deneyleri yapılmıştır. Elde edilen deneysel veriler ile Mcalibration programında farklı malzeme modelleri için kalibrasyon yapılmış ve oluşturulan malzemeler ANSYS içerisine aktarılmıştır. Aktarılan malzemelerin adlandırılmaları ve hangi deney verileri ile kalibre edildikleri Çizelge 4.6'da listelenmiştir. Çizelgedeki kalibre edilen deney sütununda ilgili malzemenin Mcalibration programında hangi test

verileri ile kalibre edildiği bilgisini vermektedir. TNM malzeme modeli hem bası hem de çeki deneyi ile aynı anda kalibrasyon kapasitesine sahip bir model olduğundan bu malzeme modeli için üç çeşit materyal oluşturulmuştur. Tanımlanan malzemeler içerisinde dinamik analiz desteği olan tek model MISO olmakla birlikte bu malzeme modeli için ek olarak gerinme kırılması (strain failure) malzeme model özelliği tanımlanmıştır. Tanımlanan bu özellik için kırılma uzaması değeri çekme numunesinin deney sonucundan alınmış olunmakla birlikte 0.0215 olarak programa girilmiştir. Tanımlanan bu hasar özelliği dinamik analiz esnasında modeldeki herhangi bir eleman bu uzama değerinin üzerine çıktığı durumda kırılma olayı simüle edilmektedir.

Çizelge 4.6. Malzeme tanımlamaları ve kalibrasyon modelleri

Malzeme Adlandırması	Kalibre Edilen Deney	Malzeme Modeli
MISO_1	Çeki (D638)	Multilinear Isotropic Hardening
MISO_2	Bası (D695)	Multilinear Isotropic Hardening
TNM_1	Çeki (D638) ve bası (D695)	Three Network Model
TNM_2	Bası (D695)	Three Network Model
TNM_3	Çeki (D638)	Three Network Model
BB_1	Çeki (D638)	Bergstrom-Boyce
BB_2	Bası (D695)	Bergstrom-Boyce

MISO_1 Materyal Modeli

	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	1.15E-09	tonne mm^-3
4	Isotropic Elasticity		
5	Derive from	Young's Mod...	
6	Young's Modulus	2469	MPa
7	Poisson's Ratio	0.4	
8	Bulk Modulus	4115	MPa
9	Shear Modulus	881.79	MPa
10	Multilinear Isotropic Hardening	Tabular	
11	Scale	1	
12	Offset	0	MPa
13	Plastic Strain Failure		
14	Maximum Equivalent Plastic Strain EPS	0.0215	

	B	C
1	Plastic Strain (mm mm^-1)	Stress (MPa)
2	0	0.18808
3	0.00080237	11.906
4	0.0016047	18.856
5	0.0024071	24.052
6	0.0032095	27.764
7	0.0040118	30.41
8	0.0048142	32.447
9	0.0056166	33.73
10	0.0064189	34.47
11	0.0072213	35.028
*		

MISO_2 Materyal Modeli

	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	1.15E-09	tonne mm^-3
4	Isotropic Elasticity		
5	Derive from	Young's Mod...	
6	Young's Modulus	2469	MPa
7	Poisson's Ratio	0.4	
8	Bulk Modulus	4115	MPa
9	Shear Modulus	881.79	MPa
10	Multilinear Isotropic Hardening	Tabular	
11	Scale	1	
12	Offset	0	MPa
13	Plastic Strain Failure		
14	Maximum Equivalent Plastic Strain EPS	0.0215	

	B	C
1	Plastic Strain (mm mm^-1)	Stress (MPa)
2	0	0.18808
3	0.00080237	11.906
4	0.0016047	18.856
5	0.0024071	24.052
6	0.0032095	27.764
7	0.0040118	30.41
8	0.0048142	32.447
9	0.0056166	33.73
10	0.0064189	34.47
11	0.0072213	35.028
*		

Şekil 4.10. MISO materyallerinin Ansys parametreleri

Kalibrasyonu MCalibration programında yapılan malzeme modelleri Ansys programında çıktı alınan parametreler ile tanımlanmıştır. Şekil 4.10'da MISO materyal modellerinin parametrelerini, Şekil 4.11'de BB materyal modellerinin, Şekil 4.12'de TNM materyal modellerinin parametreleri verilmiştir. Malzemeler oluşturulup malzeme kütüphanesine eklenmiştir. Tanımlanan materyaller sonlu elemanlar analizlerinde kullanılacaktır.

BB_1 Materyal Modeli

	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	1.1E-09	tonne mm^-3
4	Bergstrom-Boyce		
5	Isochoric Network A		
6	Initial Shear Modulus, μ_0	332	MPa
7	Limiting Chain Stretch, N_0	10	
8	Isochoric Network B		
9	Initial Shear Modulus, μ_1	312.66	MPa
10	Limiting Chain Stretch, N_1	20	
11	Initial Creep-Rate-Flow-Resistance	4.8886E-18	s^-1 (MPa)^ -9.8762838
12	Strain Exponential, c	-1.2978	
13	Stress Exponential, m	9.8763	
14	Strain Adjustment Factor, ε	1E-05	
15	Volumetric Potential		
16	Material Incompressibility, d	2.8168E-05	MPa^-1

BB_1 Materyal Modeli

	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	1.1E-09	tonne mm^-3
4	Bergstrom-Boyce		
5	Isochoric Network A		
6	Initial Shear Modulus, μ_0	20.3	MPa
7	Limiting Chain Stretch, N_0	1.69	
8	Isochoric Network B		
9	Initial Shear Modulus, μ_1	338.2	MPa
10	Limiting Chain Stretch, N_1	20	
11	Initial Creep-Rate-Flow-Resistance	1.4716E-13	s^-1 (MPa)^ -7.81159
12	Strain Exponential, c	-5.4306E-07	
13	Stress Exponential, m	7.8116	
14	Strain Adjustment Factor, ε	1E-05	
15	Volumetric Potential		
16	Material Incompressibility, d	6.5109E-05	MPa^-1

Şekil 4.11. BB materyallerinin Ansys parametreleri

TNM_1 Materyal Modeli

	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	1.1E-09	tonne mm^-3
4	Three Network Model		
5	Network A		
6	Shear Modulus, μ_A	432.69	MPa
7	Flow Resistance, τ_A	21.4	MPa
8	Stress Exponential, m_A	14.676	
9	Network B		
10	Initial Shear Modulus, μ_B	265.73	MPa
11	Final Shear Modulus, μ_B	264.63	MPa
12	Shear Modulus Evolution Rate, β	1.4693	
13	Flow Resistance, τ_B	23.832	MPa
14	Stress Exponential, m_B	19.998	
15	Network C		
16	Shear Modulus, μ_C	0.0018981	MPa
17	Relative Contribution of I_2, q	0	
18	Flow		
19	Pressure Dependence, a	0.0038367	
20	Temperature Exponential, n	0	
21	Temperature Dependencies		
22	Temperature Factor, θ'	-273.15	C
23	Nominal Temperature, θ_0	19.85	C
24	Locking Stretch, λ_L	4.2669	
25	Bulk Modulus, k	2354.7	MPa

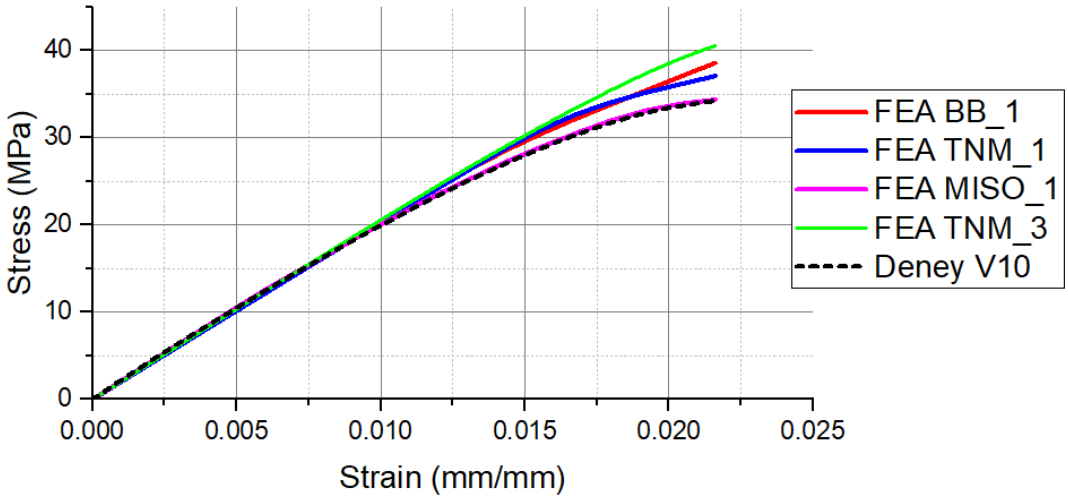
TNM_2 Materyal Modeli

	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	1.1E-09	tonne mm^-3
4	Three Network Model		
5	Network A		
6	Shear Modulus, μ_A	278.78	MPa
7	Flow Resistance, τ_A	39.364	MPa
8	Stress Exponential, m_A	9.5758	
9	Network B		
10	Initial Shear Modulus, μ_B	103.85	MPa
11	Final Shear Modulus, μ_B	78.104	MPa
12	Shear Modulus Evolution Rate, β	7.6572	
13	Flow Resistance, τ_B	65.51	MPa
14	Stress Exponential, m_B	1.8276	
15	Network C		
16	Shear Modulus, μ_C	45.32	MPa
17	Relative Contribution of I_2, q	0	
18	Flow		
19	Pressure Dependence, a	0	
20	Temperature Exponential, n	0	
21	Temperature Dependencies		
22	Temperature Factor, θ'	-273.15	C
23	Nominal Temperature, θ_0	19.85	C
24	Locking Stretch, λ_L	1.3701	
25	Bulk Modulus, k	1535.9	MPa

TNM_3 Materyal Modeli

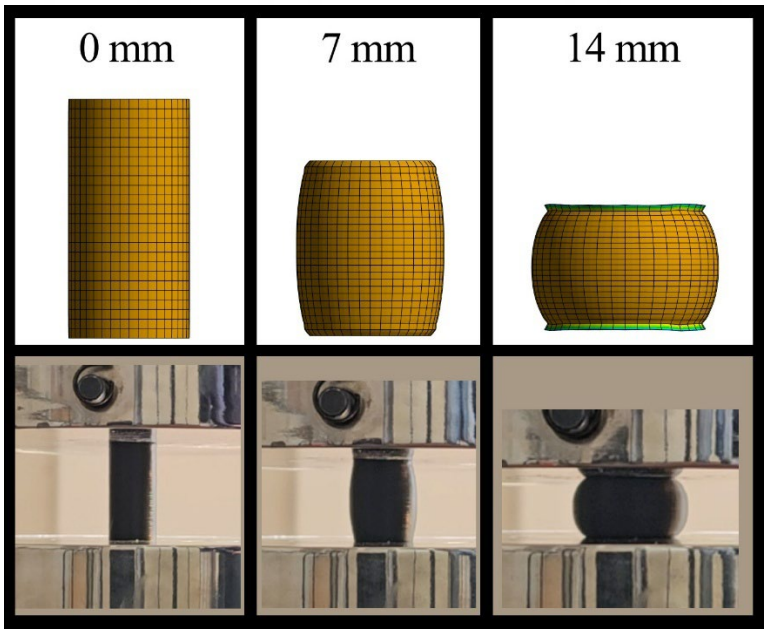
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	1.1E-09	tonne mm^-3
4	Three Network Model		
5	Network A		
6	Shear Modulus, μ_A	312.47	MPa
7	Flow Resistance, τ_A	32.605	MPa
8	Stress Exponential, m_A	4.5164	
9	Network B		
10	Initial Shear Modulus, μ_B	377.44	MPa
11	Final Shear Modulus, μ_B	377.39	MPa
12	Shear Modulus Evolution Rate, β	0.44102	
13	Flow Resistance, τ_B	25.579	MPa
14	Stress Exponential, m_B	15.782	
15	Network C		
16	Shear Modulus, μ_C	12.822	MPa
17	Relative Contribution of I_2, q	0	
18	Flow		
19	Pressure Dependence, a	0	
20	Temperature Exponential, n	0	
21	Temperature Dependencies		
22	Temperature Factor, θ'	-273.15	C
23	Nominal Temperature, θ_0	19.85	C
24	Locking Stretch, λ_L	5.1	
25	Bulk Modulus, k	3541.4	MPa

Şekil 4.12. TNM materyallerinin Ansys parametreleri



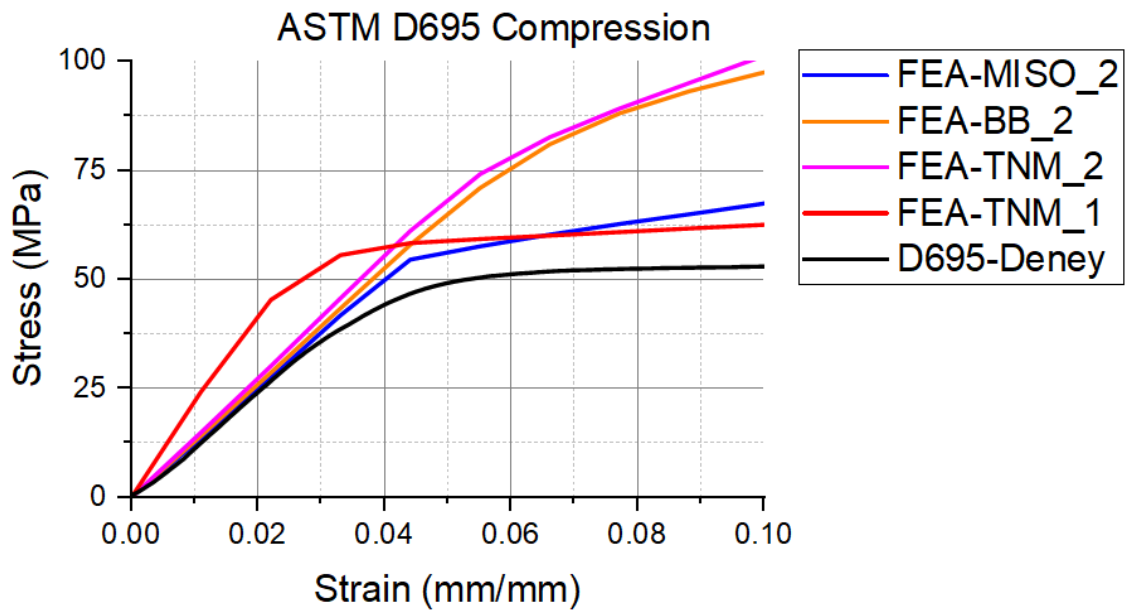
Şekil 4.13. Çeki numunesi için kalibre edilen malzeme modelleri ve deney sonucu karşılaştırması

Şekil 4.13'te D638 çeki deneyi bilgisayar ortamında tanımlanan malzemeler (bkz. Çizelge 4.6) ile analiz edilerek gerilme-gerinim sonuçları deney verisi ile birlikte grafikte sunulmuştur. Deney sonucuna en fazla yakınlık sağlayan malzeme modeli, çekme numunesi ile kalibre edilen MISO_1 malzemesi olduğu görülmüştür.



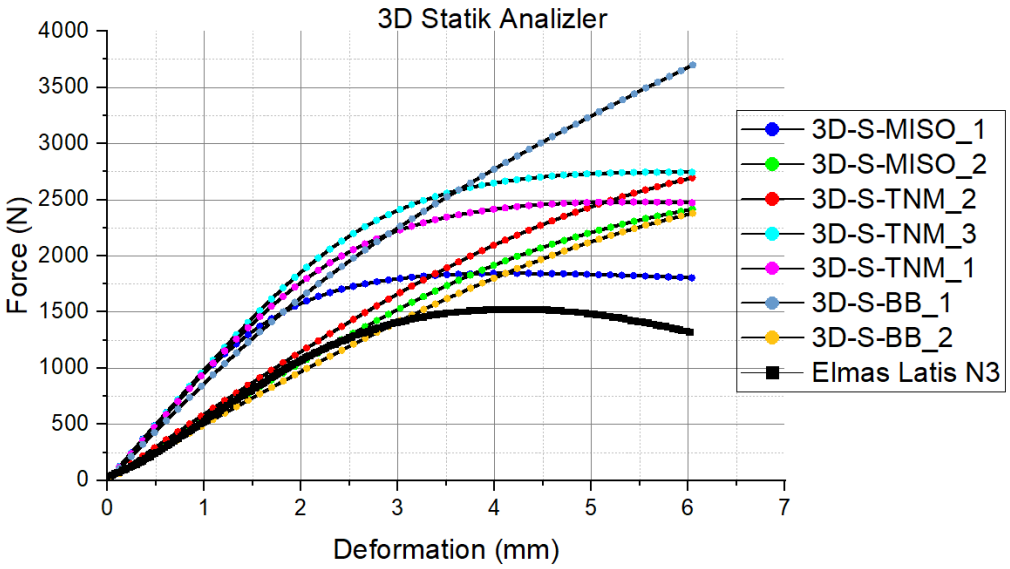
Şekil 4.14. D695 bası numunesinin deney ve FEA görüntüleri

ASTM D695 numunesi ile yapılan deneyler sonucunda toplanan veriler Mcalibration programına aktarılmıştır. Aktarılan veriler ile kalibre edilen malzemeler Ansys üzerinde tanımlanmıştır. D695 bası testinin bilgisayar ortamındaki simülasyonu ilgili malzemeler kullanılarak ANSYS statik modülünde 3D katı elemanlar kullanılarak yapılmıştır. Yapılan analizin 0, 7 ve 14. mm'sindeki görüntüleri Şekil 4.14'te deney ile karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçları Şekil 4.15'teki gerilme-gerinim grafiğinde toplanmıştır. Malzeme modelleri deney sonucu ile karşılaştırıldığında TNM_1 hariç diğer modeller elastik bölgeyi çok yakın takip ederken, plastik bölgeye geçildiğinde MISO_2 öne çıkmaktadır. TNM_1 modelinin elastik eğri değeri deney sonucundan farklı olsa da karakteristik olarak benzerlik göstermektedir.



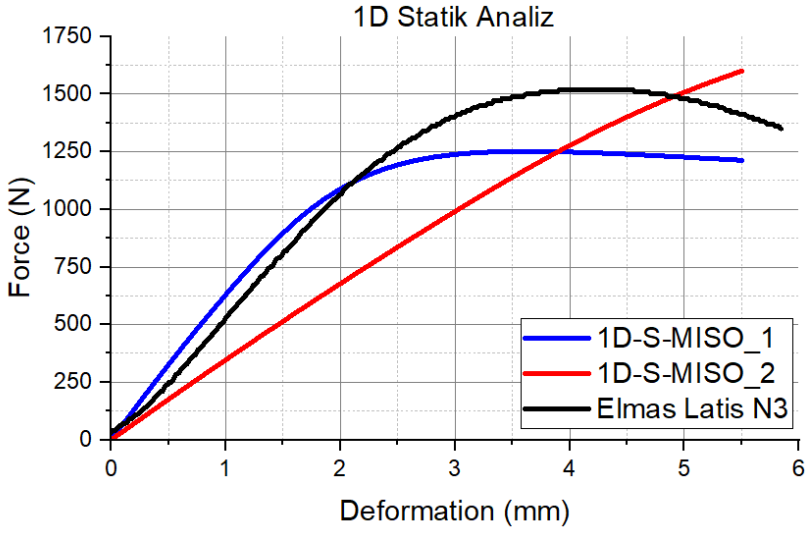
Şekil 4.15. ASTM D695 bası numunesi için kalibre edilen malzeme modelleri ve deney sonucunun karşılaştırılması

4.4. Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları



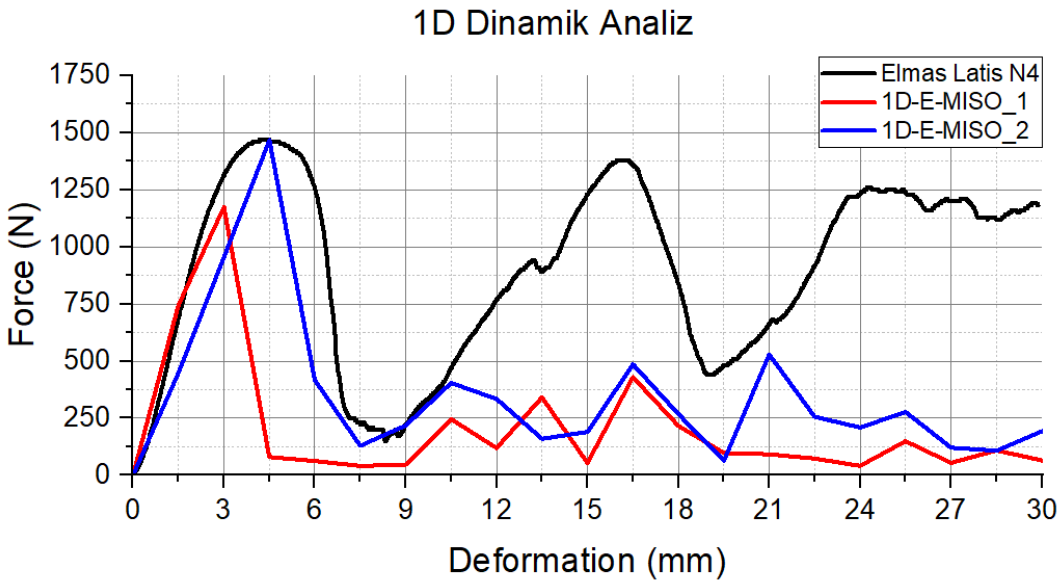
Şekil 4.16. 3D statik analiz sonuçları

ANSYS statik analiz modülünde tetrahedral 3D katı elemanlar kullanılarak elmas latis yapı tasarımının analizleri gerçekleştirilmiştir. Tanımlanan malzeme modelleri (bkz. Çizelge 4.6) içerisinden 3D katı eleman ve statik analiz ile uyumlu olan malzeme modelleri (bkz. Çizelge 3.2) analize dahil edilmiş olup sonuçları, Şekil 4.16'da deney ile karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



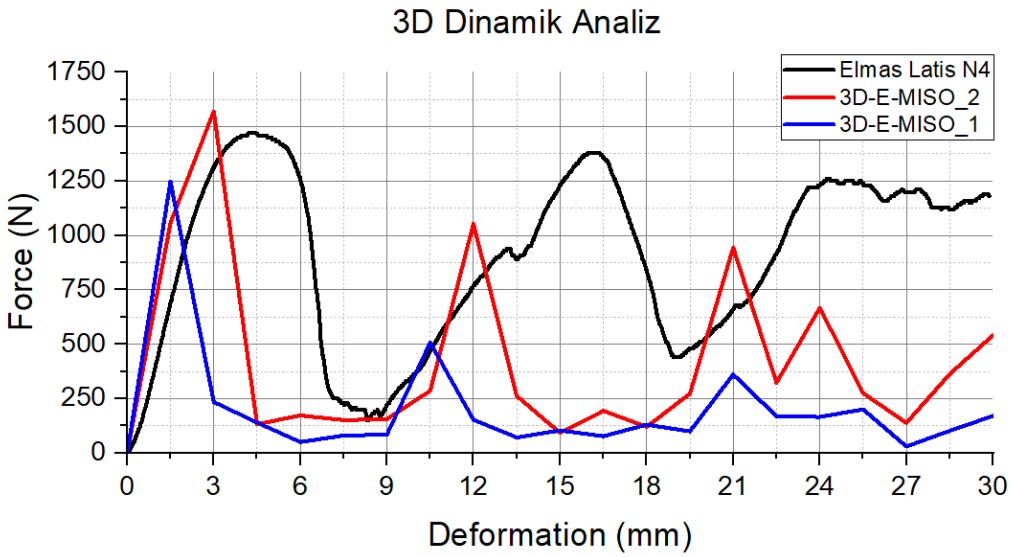
Şekil 4.17. 1D statik analiz sonuçları

1D kiriş elemanlar ile yapılan statik analizler Şekil 4.17'de kuvvet-deplasman grafiği olarak verilmiştir. Kullanılan kiriş elemanlar 4 bölüm olacak şekilde analiz çözdürülmüştür. 1D kiriş elemanları destekleyen malzeme modellerinden MISO için tanımlanan 2 malzemenin analizi yapılmıştır. Grafikte de görülebileceği üzere çeki numunesi ile kalibre edilen malzeme modeli bası numunesi ile kalibre edilene göre kiriş elemanlar için daha iyi bir yakınsama sağlamıştır.



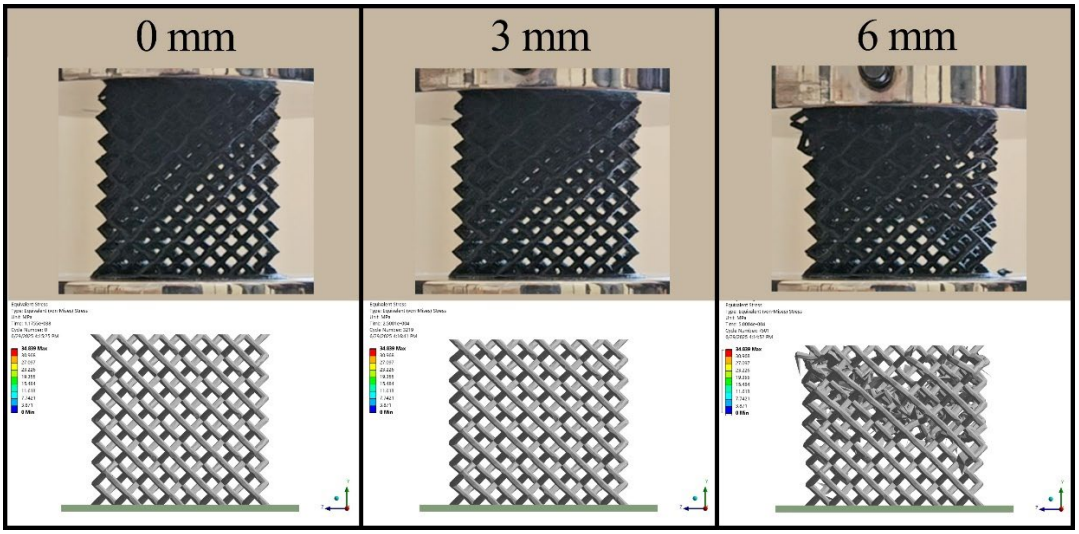
Şekil 4.18. 1D dinamik analiz sonuçları

Kiriş elemanlar ile yapılan 1D dinamik analizler ANSYS yazılımında Explicit modülü kullanılarak gerçekleştirildi. Oluşturulan malzeme modellerinden (bkz. Çizelge 4.6) dinamik analiz ortamını destekleyen MISO modeli kullanılmıştır. Analiz sonuçları Şekil 4.18'de grafik halinde deney sonucu ile karşılaştırılarak verilmiştir. Grafikte MISO_2 malzemesi ile deney sonucunun ilk pik kuvvet noktaları yakınlık göstermektedir.



Şekil 4.19. 3D dinamik analiz sonuçları

Şekil 4.19'da tetrahedral katı elemanlar ile yapılan 3D dinamik analiz sonuçları grafik halinde sunulmuştur. Dinamik analizin hasar simülasyon kabiliyeti, deney sonuçlarına daha yakın FEA sonuçları oluşturmuştur. Grafikte tanımlanan 3D-E-MISO_2 adlı analiz sonucunda deney ile benzer olacak şekilde 3 farklı kuvvet pik noktası gözlemlenmiştir. Yapılan dinamik analizlerde 6. mm'deki deformasyonda ilk kırınım noktası şekil 4.20'de görüleceği üzere deney ile benzer şekilde 45 derecelik bir kırılma açısı ile gerçekleşmiştir.



Şekil 4.20. Dinamik analiz ortamından görüntülerin deney ile karşılaştırılması

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada ASA malzemesi kullanılarak test numuneleri üretilmiş ve bu numuneler ile sonlu elemanlar analizinde kullanılmak üzere BB, TNM ve MISO malzeme modelleri kalibre edilmiştir. Eğilme-baskın yapıdaki elmas birim hücreler ile tasarlanan 50 mm kenar uzunluğundaki küp latis yapı tasarımı yapılmış. Bu latis yapının basma deneyi gerçekleştirilmiştir. Kalibre edilen malzemeler kullanılarak bilgisayar ortamında, 1D kiriş elemanlar ve 3D tetrahedral katı elemanlar kullanılarak statik ve dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler deney sonuçları ile karşılaştırılmış ve malzeme modellerinin bu çalışma için limitleri incelenmiştir.

Elmas hücre tipinde tasarlanıp üretilen latis numunelerinin gerçekleştirilen testleri ve analizleri neticesinde farklı malzeme kalibrasyonları ile analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmalar niteliğinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- ASA hammaddesi ile üretilen çekme numunelerin sergiledikleri mekanik davranışlar incelendiğinde yüksek kırılganlık gözlemlenmiştir. Elde edilen deneylerde malzeme yaklaşık 2-3% kopma uzamasına sahip olduğu görülmüştür. Bu kırılganlık davranışı latis yapı deneyinde de gözlemlenmiştir.

- Kalibre edilen malzeme modelleri incelendiğinde, Bergstrom-Boyce modeli bu çalışma özelinde en uzak sonuçlar verirken MISO modeli hasar kabiliyeti dolayısıyla en yakın sonuçları vermiştir. Polimer malzemeler için özel olarak geliştirilen TNM malzeme modeli kalibre edilen çeki ve bası numunelerinin FEA sonuçlarına yakın sonuçlar vermiştir. Ancak modelde hasar kriteri olmadığından dolayı bu çalışmada tasarlanan elmas latis yapı için deney sonuçlarına yakınsayamamıştır. Bu bağlamda, TNM ve BB modeli çekme ve bası analizlerinde yakınsama sergilemiş olsa da bu çalışma için uygun olmadığı sonucuna varılmıştır. Bu çalışma için seçilen üç farklı malzeme modeli çalışma özelinde uygunluğu incelendiğinde hasar kriterine sahip olan MISO modeli uygunluğunu kanıtlamıştır.

- Tanımlanan malzeme modelleri çekme deneyi ile yakın sonuçlar göstermiştir. Bası deneyi için elastik bölge dışında plastik bölgede analiz sonuçları deney ile uzak sonuçlar vermiştir bunun en büyük nedeni basma numunesi elastik uzama sınırını aştıktan sonra içyapısında oluşan hasarlar ve kalıcı şekil değiştirmelerdir. Bası numunesinde oluşan bu hasar dolayısı ile gözlemlenen gerilme-gerinim eğrisinin plastik bölgesini, bu çalışmada kullanılan statik analiz modülü karşılayamamıştır. D695 basma simülasyonu için dinamik analiz her nekadar uygun gözükse de MISO modeli ile yapılacak dinamik analiz bu şartlar için uygun olmayıp yakınsamamıştır. Bası deneyinin sonlu elemanlar analizi için TNM modeli gibi lineer olmayan polimerler için özel geliştirilmiş malzemeler veya farklı bir çözücü gerekli olabilir.

- Yapılan çözüm ağı hassasiyet analizleri sonrasında 3D tetrahedral elemanlar için seçilmiş olan eleman boyutu çözüm süresini neredeyse yarıya indirerek simülasyon işlemleri için zaman kazandırmıştır. Benzer hassasiyet analizi 1D kiriş elemanlar için de uygulanmış ancak bu uygulama literatürde yaygın olmamakla beraber sonuçları tartışmaya açıktır. Literatürde 1D kiriş elemanlar latis yapılar gibi dikme tabanlı yapılar için tek bölümlü (division) olarak kullanılması önerilmekte ancak bunu destekleyen detaylı bir incelemeye rastlanmamıştır.

- Tasarlanan elmas hücreli latis numunesi eğilme-baskın bir yapıya sahip olmasına rağmen yük altında kırılmalar gerçekleşmiştir. Bu kırılmaların en büyük nedeni kullanılan ASA malzemesinin sert olmasıdır. Ayrıca üretim metodu dolayısı ile katmanlı yapıda yazdırılan numuneler malzemenin özelliklerini tam anlamı ile yansıtamamktadır. FFF yöntemi kullanım kolaylığı ve düşük maliyetleri ile öne çıkarken üretilen parçaların mekanik özellikleri kullanılan hammaddenin mekanik özelliklerini tam anlamı ile yansıtamamaktadır. Bu farklılığın en büyük nedeni yapıların yazdırma yönleri için farklı özellikler sergilediği ve katmanlı bir üretim metodu olduğu içindir.

- Statik analizlerin bu çalışmada deneyi gerçekleştirilen kafes yapının kırılganlık davranışı nedeni ile yetersiz kaldığı görülmüştür. Bunun gibi dinamik bir davranışa sahip problemler için dinamik analiz çözümüne başvurulması gerektiği sonucu çıkarılmıştır.

- Dinamik analiz ile uyumlu olan malzeme modellerinde hasar özelliği mevcut olduğu için analiz sırasında gerinme sınırını aşan elemanlarda kopma meydana gelmiş ve reaksiyon kuvvetinde düşüş gözlemlenmiştir. Bu hasar davranışını bilgisayar ortamında modellemek hasar gözlemlenen veya modelde kırılma gerçekleşen deneyler için önem arz etmektedir. Yapılan 3D ve 1D dinamik analizlerin, deney sonuçlarına daha yakın olduğu gözlemlenmiştir. 3D katı elemanlar ile yapılan dinamik analizler hesaplama süresi olarak statik ve 1D analize göre oldukça yüksek olsa da, bu çalışma için 3D dinamik analizler çözüm hassasiyeti olarak 1D dinamik analizden sonra en yakın sonuçları vermiştir.

Bu sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda, polimer yapıdaki malzemelerin bilgisayar ortamında analiz edilmesi metallere göre çok daha karmaşıktır. Bunun en önemli sebebi polimerlerin farklı uzamalarda lineer olmayan davranışlar sergilemesinden kaynaklanmaktadır. Bu noktada polimer yapılar bilgisayar ortamında analiz ile doğrulanırken malzemenin tanımlanması ve analiz tipi kritik önem arz etmektedir.

Bu tez çalışması için gelecekte, numerik benzetimlerin iyileştirilme imkanı için farklı FEA yazılımlarına başvurulabilir, farklı malzeme modelleri test edilebilir ve farklı çözücü altyapıları kullanılabilir.

KAYNAKLAR

Arruda, E. M., & Boyce, M. C. (1993). Evolution of plastic anisotropy in amorphous polymers during finite straining. *International Journal of Plasticity*, *9*(6), 697-720. https://doi.org/10.1016/0749-6419(93)90034-N

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

Bergstrom, J. (2015). *Mechanics of Solid Polymers: Theory and Computational Modeling*. Elsevier.

Chen, B., Starman, B., Halilovič, M., Berglund, L. A., & Coppieters, S. (2024). Finite Element Model Updating for Material Model Calibration : A Review and Guide to Practice. *Archives of Computational Methods in Engineering*, *0123456789*. https://doi.org/10.1007/S11831-024-10200-9

Dar, U. A., Mian, H. H., Abid, M., Topa, A., Sheikh, M. Z., & Bilal, M. (2020). Experimental and numerical investigation of compressive behavior of lattice structures manufactured through projection micro stereolithography. *Materials Today Communications*, *25*, 101563. https://doi.org/10.1016/J.MTCOMM.2020.101563

Dong, G., & Zhao, F. (2018). *Numerical and Experimental Investigation of the Joint Stiffness in Lattice Structures Fabricated by Additive Manufacturing*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.09.014

Dr. G. R. Liu, & S. S. Quek. (2003). *The Finite Element Method: A Practical Course*.

Du Plessis, A., Kouprianoff, D. P., Yadroitsava, I., & Yadroitsev, I. (2018). Mechanical Properties and In Situ Deformation Imaging of Microlattices Manufactured by Laser Based Powder Bed Fusion. *Materials 2018, Vol. 11, Page 1663*, *11*(9), 1663. https://doi.org/10.3390/MA11091663

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*, 100918. https://doi.org/10.1016/J.PMATSCI.2021.100918

Kang, D., Park, S., Son, Y., Yeon, S., Kim, S. H., & Kim, I. (2019). Multi-lattice inner structures for high-strength and light-weight in metal selective laser melting process. *Materials and Design*, *175*. https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2019.107786

Maxwell, J. C. (1864). L. On the calculation of the equilibrium and stiffness of frames. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, *27*(182), 294-299. https://doi.org/10.1080/14786446408643668

Meyers, M. A., & Chawla, K. K. (2008). *Mechanical Behavior of Materials*. Cambridge University Press.

Mojabi, S., Afsahi, N., & Naseri, N. (2024). Additive manufacturing: New paradigm for developing water splitting systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, *49*, 116-142. https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2023.07.023

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

Sharma, D., & Hiremath, S. S. (2022). Bio-inspired repeatable lattice structures for energy absorption: Experimental and finite element study. *Composite Structures*, *283*. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.115102

Tshikwand, G. K., Blaine, D. C., & Plessis, A. Du. (2019). *DEFORMATION MECHANISMS OF TI6AL4V DIAMOND AND OCTET TRUSS LATTICE STRUCTURES PRODUCED THROUGH LASER POWDER BED FUSION (L-PBF)*. https://doi.org/10.5281/ZENODO.14100609

Tuğcu, S. E. (2023). *ÇEŞİTLİ KAFES YAPILARIN DİNAMİK VE YARI-STATİK YÜKLEME KOŞULLARI ALTINDA ENERJİ EMİLİMLERİNİN İNCELENMESİ YÜKSEK LİSANS TEZİ*.

Tüfekci, K., Çakan, B. G., & Küçükakarsu, V. M. (2023). Stress relaxation of 3D printed PLA of various infill orientations under tensile and bending loadings. *Journal of Applied Polymer Science*, *140*(39). https://doi.org/10.1002/app.54463

Types of Lattices for Additive Manufacturing – Terms Engineers Need to Know. (t.y.). Geliş tarihi 08 Haziran 2025, gönderen https://altair.com/blog/articles/types-of-lattices-for-additive-manufacturing-terms-engineers-need-to-know

Vigliotti, A., & Pasini, D. (2012). Stiffness and strength of tridimensional periodic lattices. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, *229-232*, 27-43. https://doi.org/10.1016/J.CMA.2012.03.018

What are lattice structures in additive manufacturing? | nTop. (t.y.). Geliş tarihi 01 Haziran 2025, gönderen https://www.ntop.com/resources/blog/guide-to-lattice-structures-in-additive-manufacturing/

Wong, K. V., & Hernandez, A. (2012). A Review of Additive Manufacturing. *International Scholarly Research Notices*, *2012*(1), 208760. https://doi.org/10.5402/2012/208760