

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KAFES YAPILI SANDVIÇ PANELLERDE KİRİŞ VE YÜZEY PLAKASI
GEÇİŞ GEOMETRİSİNİN EFEKTİF MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kaan Akın ARI

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Recep M. GÖRGÜLÜARSLAN

NİSAN 2025



TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Kaan Akın ARI



ÖZET

Yüksek Lisans

KAFES YAPILI SANDVIÇ PANELLERDE KİRİŞ VE YÜZEY PLAKASI GEÇİŞ GEOMETRİSİNİN EFEKTİF MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN

İNCELENMESİ

Kaan Akın ARI

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Recep Muhammet Görgülüarslan

Tarih: Nisan 2025

Doğada bulunan bazı cisimler boşluklu yapıya sahiptir ve bu sayede hafif olup yüksek mukavemet elde edebilmektedirler. Bundan ilham alarak havacılık uzay sanayi başta olmak üzere otomotiv, tıp, deniz bilimleri gibi alanlarda giderek daha fazla ilgi gören bu boşluklu yapıdaki malzemeler tasarlanıp üretilmekte ve hücre malzemeler olarak adlandırılmaktadırlar. Hücre malzemeler farklı geometrilerde olabilirler, bunlardan birisi de kiriş bazlı hücre malzemelerdir ve bunlar Kafes Yapılar sınıfında yer alırlar. Geometrik parametrelerinin kolay kontrol edilebilmesi ve üretilebilirlik açısından öne çıkan Hacim Merkezli Kübik Kafes Yapı da en sık kullanılan hücre yapılarından birisidir. Sandviç yapılarda iki yüksek rijitlikte yüzey plakası arasında daha az rijit olan bir çekirdek yapı bulunmakta ve bazı sandviç yapılarda bu çekirdek geometrisi için Hacim Merkezli Kübik Kafes Yapılar kullanılmaktadır. Bu tezde Hacim Merkezli Kübik Kafes Yapı'ya sahip sandviç yapılar modellenip statik yükler ve titreşim altındaki davranışları incelenmiş ve deneyler ile sonlu elemanlar analizi ve homojenizasyon süreci doğrulanmıştır. Deneyler için 3 farklı numune çeşidinden beşer adet olmak üzere toplamda 15

sandviç yapı Toz Yataklı Füzyon teknolojisi ile AlSi10Mg malzemesi ile üretilmiştir. Bunlara mikro yapı taraması, doğal frekans tespiti için titreşim testi ve efektif elastik modül belirlemek için basma testleri yapılmıştır. Bu hücrelerde yüzey plakasına bağlanan kısımlarında bir geçiş yarıçapı oluşturulmuş ve bu geleneksel Hacim Merkezli Kübik yapıya alternatif olarak yeni bir hücre tipi sunulmuştur. Oluşturulan bu yeni hücre ile yeni modeller oluşturulup basma ve eğilme yükleri altında statik analizler ve titreşim analizleri yapılarak Hacim Merkezli Kübik yapı ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Hacim merkezli kübik, Sandviç yapı, Homojenizasyon, Titreşim, Eklemeli imalat, Toz yataklı füzyon



ABSTRACT

Master of Science

THE EFFECT OF STRUT TO FACE-SHEET TRANSITION GEOMETRY ON THE EFFECTIVE MECHANICAL PROPERTIES OF SANDWICH PANELS WITH BODY-CENTERED CUBIC CORE STRUCTURE

Kaan Akın ARI

TOBB University of Economics and Technology
Institute of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Programme

Supervisor: Assoc. Prof. Recep Muhammet Görgülüarslan

Date: April 2025

Porous structures found in nature offer benefits such as lightweight properties and high strength, driving innovations in industries like aerospace, automotive, medicine, and marine sciences. These increasingly studied porous structures are engineered and manufactured as cellular structures. Among them, strut-based cellular materials, known as Lattice Structures, include the Body-Centered Cubic Lattice Structure, which is notable for its adjustable geometric parameters and ease of fabrication.

Sandwich structures consist of a less rigid core layer positioned between two high-rigidity surface plates. In some designs, the core incorporates Body-Centered Cubic Lattice Structures. This thesis focuses on modeling sandwich structures with a Body-Centered Cubic Lattice core and analyzing their behavior under static loads and vibration. Finite element analysis and the homogenization process were validated through experimental testing.

For the experiments, 15 sandwich structures, comprising three different sample types, with five specimens each, were fabricated from AlSi10Mg material using Powder Bed Fusion technology. Microstructural scanning, vibration tests to

determine natural frequencies, and compression tests were conducted to assess the effective elastic modulus. A transition radius was introduced in the struts connecting to the surface plate, leading to the development of a novel cell type as an alternative to the conventional Body-Centered Cubic structure. Using this new cell design, additional models were created, and static and vibration analyses were performed under compression and bending loads, comparing their performance with the traditional Body-Centered Cubic structure.

Keywords: Body centered cubic, Sandwich structure, Homogenization, Vibration, Additive manufacturing, Powder bed fusion



TEŞEKKÜR

Lisans eğitimimin ilk senesinden itibaren sekiz senedir derslerimde, yarışmalarda, projelerde ve daha birçok alanda değerli tecrübeleriyle her zaman destek olan ve ilham veren sayın Doç. Dr. Recep Muhammet Görgülüarslan'a sonsuz teşekkürler. Hem Lisans hem de Yüksek Lisans eğitimim boyunca ferdi olduğum, başta Makine Mühendisliği Bölümü olmak üzere TOBB ETÜ ailesine teşekkürler.

Tez çalışmasına desteklerinden ötürü Türk Uzay ve Havacılık Sanayi mühendisleri İstemihan Gökdağ, Akın Dağkolu ve Mehmet Şahin'e, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü öğretim üyesi Prof. Dr. Mustafa Güden'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmasındaki modelleme ve analizlerde kullanılan Siemens NX, Simcenter ve Multimech akademik lisanslarını temin ettiği için Boğaziçi Yazılım şirketine teşekkürlerimi sunuyorum.

Yıllardır yanımda olan, sadece bu akademik yolculukta değil, hayatın her anında desteğini hissettiğim dostlarıma sonsuz minnettarım. Paylaştığımız anılar, gösterdiğimiz dayanışma ve hiç eksilmeyen dostluğumuz, sizlerle birlikte ilerlemek ve bu yolu yürümek benim için büyük bir şanstı.

Biricik ailem Emine ARI, İbrahim ARI, Meltem ARI, Neşet AKIN, Hasan AKIN, Ece AKIN, Defne Melek AKIN ve Kumsal AKIN'a, sonsuz destekleri için sonsuz teşekkürler.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	v
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
KISALTMALAR	xvii
SEMBOL LİSTESİ	xix
1. GİRİŞ	1
1.1. Hücresel Malzemeler	1
1.1 Eklemeli İmalat	4
1.2.1 Metal Eklemeli İmalat.....	4
1.2.1.1 Toz Yataklı Füzyon (TYF)	6
1.2 Sandviç Yapılar.....	8
1.3.1 Kiriş Yapıda Çekirdekli Sandviç Yapılar	9
1.4 Homojenizasyon.....	10
1.4.1 Analitik Homojenizasyon	11
1.4.1 Nümerik Homojenizasyon	13
1.5 Amaç	13
2. YÖNTEM.....	15
2.1 Kafes Yapıların ve Sandviç Panellerin Modellenmesi.....	16
2.2 Sonlu Elemanlar Analizi İçin Girdi Dosyası Hazırlanması	18
2.3 Homojenizasyon.....	18
2.4 Python Algoritması ile Sonlu Elemanlar Analizleri ve Sonuçlar.....	23
2.4.1 Basma Yüğü Altındaki Davranışın İncelenmesi	23
2.4.2 Eğilme Yüğü Altındaki Davranışın İncelenmesi	25
2.4.3 Titreşim (Modal) Davranışın İncelenmesi	26
3. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ VE DENEYLER.....	29
3.1 Numune Geometrilerinin Seçimi ve Üretim	29
3.2 MicroCT Tarama İşlemi ve Arşimet Testi	30
3.2.1 Tarama ve Arşimet Testi Sonuçları	30
3.3 Titreşim Testi	32
3.3.1 Deney Düzenneği.....	32
3.3.2 Deney Çalışma Prensibi	34
3.3.3 Titreşim Deneyi Sonuçları ve Değerlendirme	35
3.4 Basma Testi	38
3.4.1 Test Prosedürü.....	38
3.4.2 Sonuçlar	38
4. GEÇİŞ YARIÇAPININ MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ.....	41
4.1 Geçiş Yarıçapının Mekanik Özelliklere Etkisinin Basma Yüğü Altında İncelenmesi.....	41
4.1.1 Hücre Sayısının Optimal Geçiş Yarıçapına Etkisi.....	43

4.1.2 Kiriş Çapının Optimal Geçiş Yarıçapına Etkisi	45
4.2 Geçiş Yarıçapının Mekanik Özelliklere Etkisinin Eğilme Altında İncelenmesi	46
4.3 Geçiş Yarıçapının Titreşim Performansına Etkisi	47
5. ÖNERİLEN GEÇİŞ YARIÇAPLI HMK HÜCRE İLE ANALİZ	
SONUÇLARI.....	51
5.1 Birim Hücre Geometrisinin Oluşturulması	51
5.2 GHMK Homojenizasyonu ve HMK Homojenize Özellikler ile Kıyaslaması ..	52
5.3 GHMK Çekirdekli Homojenize Eşlenik Modellerin Basma Yüğü Altında Katı Kafes Modele Göre Farklarının İncelenmesi	52
5.4 GHMK Çekirdekli Homojenize Eşlenik Modellerin Eğilme Altında Katı Kafes Modele Göre Farklarının İncelenmesi	54
5.5 GHMK Çekirdekli Homojenize Eşlenik Modellerin Titreşim Performansının İncelenmesi.....	55
6. DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER.....	59
6.1 HMK Yapının Titreşim ve Basma Altında İncelenmesi ve Deneyler ile Karşılaştırılması.....	59
6.2 Geçiş Yarıçapının Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi	60
6.3 Önerilen Yeni GHMK Yapının Basma, Eğilme ve Titreşim Altında İncelenmesi.....	60
6.4 Gelecek Çalışmaları ve Öneriler	61
KAYNAKLAR.....	63

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Kuzeyli Kırmızı Gagalı Boynuzgaga kuşuna ait bir gaganın kesiti (üstte) ve bir kuşa ait bir kemiğin kesidi (altta) [2].	1
Şekil 1.2: Hücresel yapıların sınıflandırılması [7].	2
Şekil 1.3: Hacim Merkezli Kübik Yapı [14].	3
Şekil 1.4: Eklemeli İmalat yöntemleri [25].	4
Şekil 1.5: SLE eklemeli imalat süreci [46].	6
Şekil 1.6: (A) İçten yanmalı bir motor pistonunun kesiti [51], (B) içinden yağ ve akaryakıt geçen bir otomotiv parçası [52], (C) bir deney aracı için yapılan bir braket [53], (D) bir yarış otomobilinin silindir kafasının kesiti [54], (E) bir hava aracı için tasarlanan braket [55], (F) Hibrit optimizasyon ile üretilmiş bir örümcek braket [56].	7
Şekil 1.7: Sandviç Yapı [62].	8
Şekil 1.8: (a) Bal peteği, (b) kıvrımlı şerit, (c) yumurta kutusu, (d) giriş yapı [63].	9
Şekil 1.9: (a) Tetrahedral yapı, (b) piramit yapı, (c) Kagome yapı [70].	9
Şekil 1.10: Heterojen yapının homojenize birim hücre olarak gösterimi [76].	10
Şekil 2.1: Sonlu elemanlar analiz sonuçlarının elde için izlenen iş akış şeması.	15
Şekil 2.2 : nTop ile modellenen parametrik sandviç model ve parametreler, (Nx: x eksenindeki hücre sayısı, Ny: y eksenindeki hücre sayısı, Nz: z eksenindeki hücre sayısı, r: geçiş yarıçapı, D: giriş çapı).	16
Şekil 2.3 : 2x3x1 boyutlarında, 1mm çap ve 1.5 mm geçiş yarıçapına sahip sandviç yapı (üstteki) ve 2x2x1 boyutlarında 2mm çap ve geçiş yarıçapı olmayan sandviç yapı (alttaki).	17
Şekil 2.4 : Farklı çözüm ağı eleman boyutlarında modellenen HMK hücrenin giriş ucu yakın görselleri (D: giriş çapı 1mm, birim hücre boyutu 10mm).	20
Şekil 2.5 : Farklı çözüm ağı eleman boyutlarında modellenen HMK hücrenin homojenize malzeme özelliklerinin yakınsaması.	21
Şekil 2.6: Katı kafes modelin homojenize model gösterimi ve homojenize modelin malzeme özellikleri.	22
Şekil 2.7 : Basma analizi için geliştirilen Python algoritmasının iş akışı.	24
Şekil 2.8 : Eğilme analizi için geliştirilen Python algoritmasının iş akışı.	25
Şekil 2.9 : Titreşim (Modal) analiz için geliştirilen Python algoritmasının iş akışı.	26
Şekil 3.1 : Üretilen numunelerin eklemeli imalat tablasındaki konumlarını gösteren, MicroCT tarama sonucunda elde edilmiş bir görsel.	30
Şekil 3.2 : 2x2x2 numunelerinden birinin ön ve yandan görünüşü.	31
Şekil 3.3 : 2x2x2 numunesinde kesilen yüzeyden alınan mikroskop görseli.	31
Şekil 3.4 : Titreşim testlerinde kullanılan ekipmanlar: (a) ve (b) Veri Toplama Sistemi; (c) ve (d) Lazer Hız Ölçer (Vibrometer); (e) Darbe Çekici; (f) Deney düzeneği.	33
Şekil 3.5 : 3 farklı ölçüm için girdi ve çıktı noktaları.	34

Şekil 3.6 : Serbest sınır koşullarını temsil etmek için 4 noktadan yumuşak sünger üzerine oturtulmuş numune örnekleri.....	35
Şekil 4.1 : Kirişler ile yüzey plakası arasında uygulanan geçiş yarıçapı.....	41
Şekil 4.2 : 2x2x2 numunesinde geçiş yarıçapının efektif elastik modüle etkisi.....	42
Şekil 4.3 : 2x2x2 modelinde geçiş yarıçapının basma yükü altındaki performansı....	42
Şekil 4.4 : Farklı Ny değerlerinde geçiş yarıçapının basma yükü performansına etkisi.....	43
Şekil 4.5 : Farklı Ny ve Nx değerlerinde geçiş yarıçapının basma yükü performansına etkisi.....	44
Şekil 4.6 : Farklı Nz değerlerinde geçiş yarıçapının basma yükü performansına etkisi.....	44
Şekil 4.7 : Farklı kiriş çap değerlerinde geçiş yarıçapının basma yükü performansına etkisi.....	45
Şekil 4.8 : 5x12x1 boyutlarındaki modellerin farklı kiriş çap değerlerinde ve farklı geçiş yarıçapı değerlerinde eğilme performansına etkisi.....	69
Şekil 4.9 : Farklı boyutlardaki modellerin farklı kiriş çap değerlerinde titreşim performansının incelenmesi.....	48
Şekil 4.10 : 2x5x2 boyutlu numune için farklı kiriş çaplarında titreşim performansı.....	49
Şekil 5.1 : GHMK birim hücre geometrisi (L=10mm, D=1mm, r=1.5mm).....	51
Şekil 5.2 : GHMK çekirdekli yapılarda Katı Kafes Model ile Homojenize Eşlenik Model arasındaki farkların yatay eksenindeki hücre sayılarına göre değişimi.....	53
Şekil 5.3 : 5x12x1 için oluşturulan model.....	54
Şekil 5.4 : 2x2x2 boyutlarında GHMK yapıya sahip bir sandviç yapı.....	55
Şekil 5.5 : 2x2x2 boyutlarında GHMK çekirdek yapıda sandviç panel için titreşim analizi sonuçları.....	55
Şekil 5.6 : 5x5x5 boyutlarında GHMK çekirdek yapıda sandviç panel için titreşim analizi sonuçları.....	56
Şekil 5.7 : 10x10x2 boyutlarında GHMK çekirdek yapıda sandviç panel için titreşim analizi sonuçları	56

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1: Metal eklemeli İmalatta kullanılan bazı ham malzemelerin kullanıldığı alanlar [31].....	5
Çizelge 1.2 : Eklemeli İmalatta kullanılan bazı eklemeli imalat makineleri [31].....	5
Çizelge 2.1 : 2x2x2 ve 5x5x5 boyutlarındaki modeller için hesaplama maliyet karşılaştırması (i7-12700H 2,30GHz işlemci ile tek çekirdek kullanılarak hesaplanmıştır).....	19
Çizelge 2.2 : Farklı çözüm ağı eleman boyutlarında modellenen HMK hücrenin homojenizasyon analizi sonuçları ve hesaplama süresi (i7-12700H 2,30GHz işlemci ile tek çekirdek kullanılarak hesaplanmıştır).....	20
Çizelge 3.1 : Testte kullanılan ekipmanların listesi.....	32
Çizelge 3.2 : 2x2x2 numune için titreşim deneyi sonuçları ve sonlu elemanlar analizinin deney ortalaması ile karşılaştırması.....	36
Çizelge 3.3 : 5x5x5 numune için titreşim deneyi sonuçları ve sonlu elemanlar analizinin deney ortalaması ile karşılaştırması.....	37
Çizelge 3.4 : 10x10x2 numune için titreşim deneyi sonuçları ve sonlu elemanlar analizinin deney ortalaması ile karşılaştırması.....	38
Çizelge 3.5 : Basma deneyi sonuçları ve sonlu elemanlar analizi karşılaştırması (MPa).....	39
Çizelge 5.1 : 10mm hücre boyu ve 1mm giriş çapı için homojenize edilen geleneksel HMK hücre ve yeni önerilen GHMK hücre homojenize malzeme özellikleri (E=65GPa, $\nu=0,3$, Gy: Görece Yoğunluk).....	52
Çizelge 5.2 : GHMK çekirdekli yapılarda basma yükü altındaki Katı Kafes Model ile Homojenize Eşlenik Model Karşılaştırması.....	53
Çizelge 5.3 : GHMK çekirdekli yapılarda eğilme altındaki Katı Kafes Model ile Homojenize Eşlenik Model Karşılaştırması.....	54
Çizelge 5.4 : 2x2x2, 5x5x5 ve 10x10x2 boyutlarında GHMK çekirdek yapıdaki sandviç yapıların titreşim analizi sonuçları.....	57



KISALTMALAR

BDÇ: Bilgisayar Destekli Çizim
BJ: Birleştirme Jeti
DED: Doğrudan Enerji Dağıtımı
DMLS: Doğrudan Metal Lazer Sinterleme
EHE: Elektron Hüzme Eritme
Eİ: Eklemeli İmalat
FTF: Frekans Tepki Fonksiyonu
GHMK: Geçişli Hacim Merkezli Kübik
GPa: Gigapascal
HMK: Hacim Merkezli Kübik
İYTE: İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü
MPa: Megapascal
ODTÜ: Orta Doğu Teknik Üniversitesi
PSK: Periyodik Sınır Koşulları
SL: Sac Lamineleme
SLE: Seçici Lazer Eritme
SLS: Seçici Lazer Sinterleme
TUSAŞ: Türk Havacılık Uzay Sanayii
TYF: Toz Yataklı Füzyon
ÜPMY: Üçlü Periyodik Minimal Yüzeyler
YMK: Yüzey Merkezli Kübik



SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamalarıyla birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
E	Elastisite Modülü
G	Elastisite Modülü
ν	Poisson Oranı
N_x	X eksenindeki hücre sayısı
N_y	Y eksenindeki hücre sayısı
N_z	Z eksenindeki hücre sayısı
D	Kiriş çapı (mm)
L	Hücre uzunluğu (mm)
G_y	Göreceli yoğunluk
R^2	R Kare hata Değeri
%	Yüzde işareti
$\bar{A}$	Homojenize malzeme özelliği
$A(x)$	Mikro yapı özelliği
C	Rijitlik matrisi
u_i	x_i eksenindeki i. yer değiştirme vektörü bileşeni
V	Tekrar eden birim hücre hacmi
E_c	Homojenize elastik modül
E_s	Ana malzeme elastik modülü
$\gamma_{x,y,z}$	Kirişlerin sırasıyla x, y ve z eksenleri ile yaptığı açılar



1. GİRİŞ

1.1. Hücresel Malzemeler

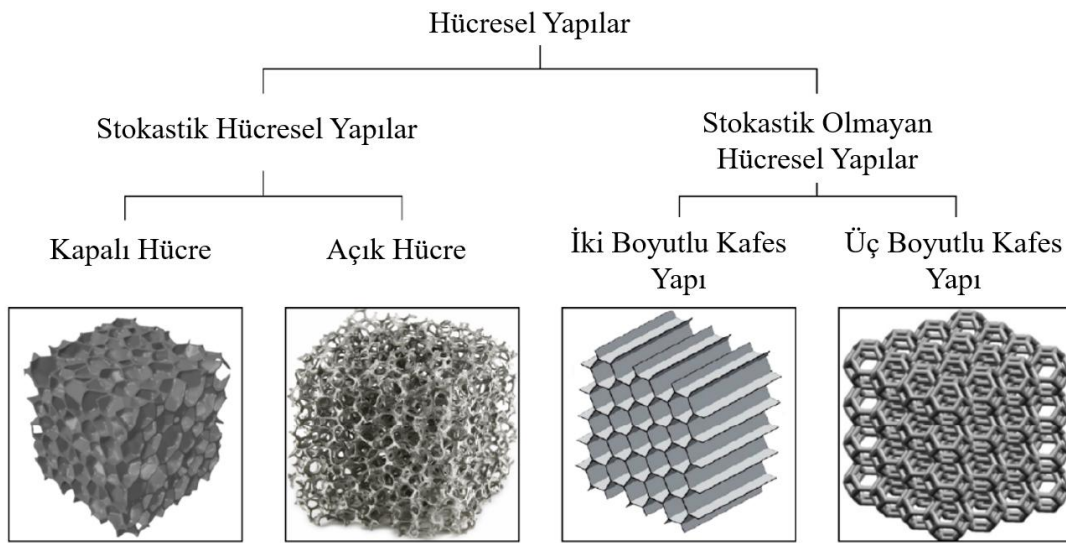
Doğada bulunan malzemelerden bazıları, metal, polimer gibi geleneksel mühendislik malzemelerine kıyasla boşluklu bir yapıya sahiptir. Kemik, odun ve mantar gibi doğal maddeler ve cisimler, karmaşık çok ölçekli hiyerarşik, boşluklu bir mimariye sahiptir [1]. Şekil 1.1’de bir kuş gagası ve kemiğine ait görseller yer almaktadır. Bu yapılar tamamıyla dolu olmayıp boşluklu bir yapıda olduğu gözlenmektedir. Bu doğal biyomalzemelerin, yapısal dayanıklılık, sertlik, sıvı geçirgenliği, ısı yalıtımı ve benzeri sergilediği çok işlevli özellikler, geleneksel tam dolu malzemelerle kolayca elde edilemez.



Şekil 1.1: Kuzeyli Kırmızı Gagalı Boynuzgaga kuşuna ait bir gaganın kesiti (üstte) ve bir kuşa ait bir kemiğin kesidi (altta) [2].

Doğadan ilham alarak, akademik ve endüstriyel alanlarda giderek daha fazla ilgi gören bu boşluklu yapıdaki malzemeler, genel olarak "mimari meta-malzemeler" veya "hücrel malzemeler" olarak adlandırılmaktadır [3]. Bu tezde de bu malzemeler hücrel malzemeler olarak tanımlanmıştır. Polimer bazlı köpük yapılar, metal bazlı petek yapılar ve kiriş bazlı yapılar, yaygın olarak kullanılan hücrel yapılardır [4]. Polimer köpükleri, genellikle ambalaj kapları ve yalıtım gibi uygulamalarda kullanılır [5]. Metal petek yapılar ve kiriş bazlı yapılar, havacılık, mimarlık, otomotiv ve elektronik gibi çeşitli endüstrilerde, hafif yapılar ve şok emici malzemeler olarak kullanılır [6].

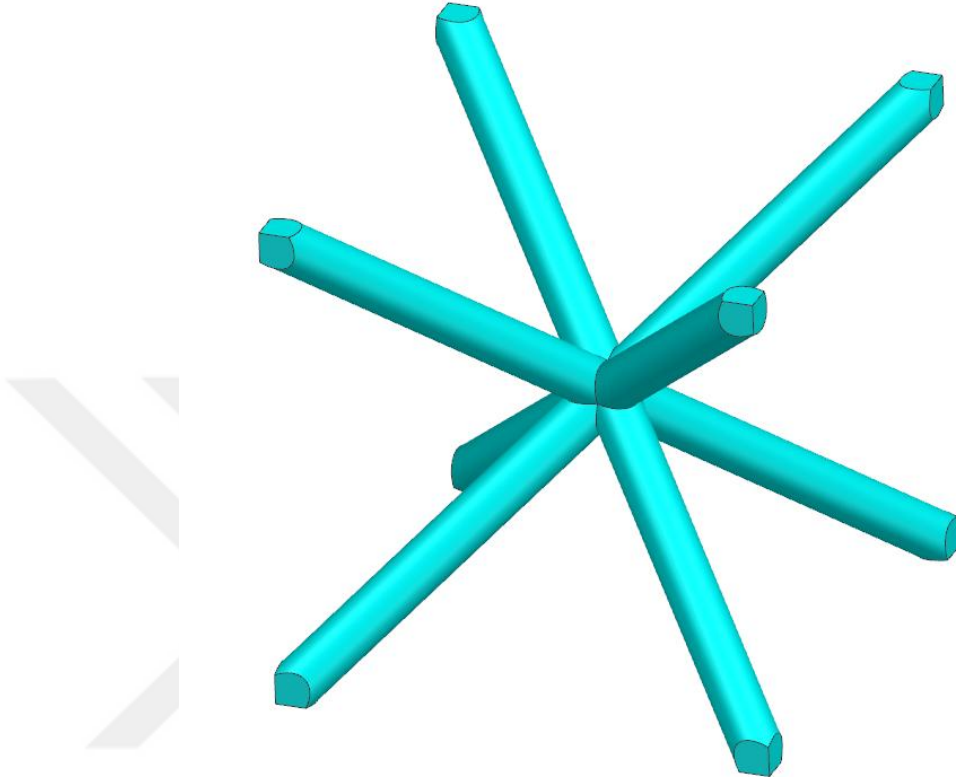
Üç boyutlu hücrel yapılar, genellikle birim hücrelerinin düzenine bağlı olarak rastgele (köpük) ve rastgele olmayan (periyodik) yapılar olarak sınıflandırılır ve her bir yapı, kapalı hücrel ve açık hücrel yapılar olarak sınıflandırılır [7]. Bu sınıflandırma şeması Şekil 1.2’de gösterilmiştir. Stokastik olmayan yapılar periyodik yapı veya kafes yapı olarak adlandırılır ve tekrar eden birim hücrelere sahiptirler, bunlara örnek olarak petek yapı ve kiriş bazlı kafes yapılar verilebilir [8].



Şekil 1.2: Hücrel yapıların sınıflandırılması [7].

Kafes yapılar güçlü mekanik özellikleri, çok hafif olmaları ve yüksek enerji emilimi özellikleri ile avantajlıdır [9-11]. Örneğin, havacılık ve uzay uygulamalarında yapısal tasarımlar, hafif malzemeler kullanarak mükemmel mekanik özellikler elde etmeyi amaçlar ve bu sebeple bu alanlarda tercih edilirler [12,13].

Kafes hücresel yapılar genel olarak üç gruba ayrılır, bunlar kiriş bazlı, ince duvarlı Üçlü Periyodik Minimal Yüzeyler (ÜPMY) ve iskeletsel ÜPMY'lerdir [14]. Kiriş bazlı kafes yapılardan olan Hacim Merkezli Kübik (HMK) yapıya bir örnek Şekil 1.3'te gösterilmiştir.

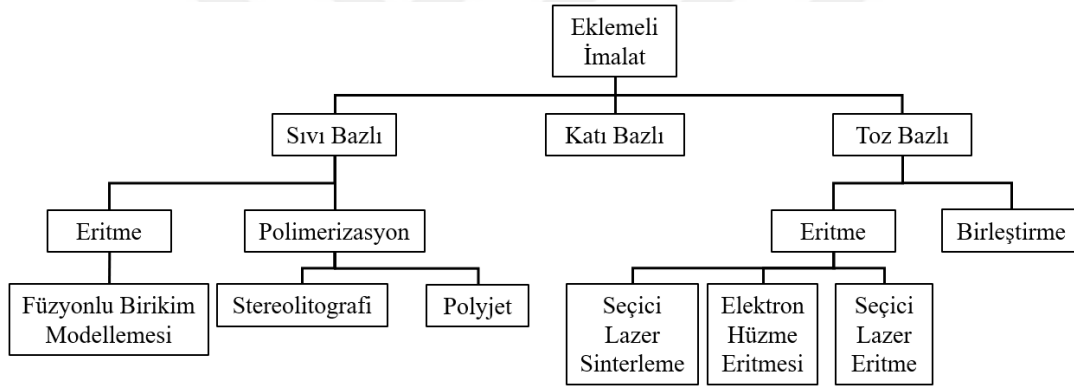


Şekil 1.3: Hacim Merkezli Kübik Yapı [14].

Metal ve polimer gibi tam dolu katı malzemeler endüstride sıkça kullanılmasına karşın üretim sırasında ortaya çıkan atık malzeme, tasarımın kolay kontrol edilememesi ve büyük yapısal hacim gibi dezavantajları vardır [15]. Kiriş bazlı kafes yapılar kirişlerden ve düğüm noktalarından oluşur ve geleneksel malzemelerin aksine, göreceli yoğunluğun yanı sıra birim hücrenin topolojisi değiştirilerek farklı makroskobik mekanik davranışlar elde edilebilir [16]. Bunun için topolojik parametrelere kolay manipüle edilebildiği Yüzey Merkezli Kübik yapı (YMK) ve Hacim Merkezli Kübik Yapı (HMK) yapılar sıkça kullanılmaktadır [17,18].

1.1 Eklemeli İmalat

Kafes yapılı hücresel malzemeler birçok avantaja sahip olmasına karşın karmaşık yapılarının üretim sürecini zorlaştırması en büyük dezavantajlarından biridir [15]. Eklemeli imalat buna olanak sağlamakta ve bu yapıların üretilmesinde sıklıkla kullanılmaktadır [19]. Kontrol edilmesi gereken yüzlerce değişken son ürün kalitesine etki etmektedir [20-22]. Bu sebeple farklı amaçlar için farklı teknolojiler geliştirilmiştir [15]. Farklı üretim teknikleri farklı yöntemler gerektirse de eklemeli İmalat (Eİ) süreçleri, 3 boyutlu Bilgisayar Destekli Çizim (BDÇ) modeli oluşturulması ile başlar [15]. Bu model, daha sonra kullanılan eklemeli imalat yöntemine bağlı olarak genellikle 20 µm ile 1 mm arasında değişen katmanlara ayrılır [23,24]. Ardından katmanlar üst üste birleşerek son ürünü oluştururlar [15]. Eklemeli imalat yöntemlerinden bazıları Şekil 1.4'te verilmiştir.



Şekil 1.4: Eklemeli İmalat yöntemleri [25].

1.2.1 Metal Eklemeli İmalat

Eklemeli imalat sürecinde ürün isterlerine bağlı olarak farklı eklemeli imalat yöntemleri ve buna bağlı olarak farklı malzemeler kullanılabilir [26]. Bu malzemeler polimer, metal, kompozit veya seramik olabilir [27-30]. Metal eklemeli İmalatta kullanılan bazı ham malzemelerin kullanıldığı alanlar ve karşılaştırmaları Çizelge 1.1'de verilmiştir.

Çizelge 1.1: Metal eklemeli İmalatta kullanılan bazı ham malzemelerin kullanıldığı alanlar [31].

Kullanım Alanı	Alüminyum	Maraging Çeliği	Paslanmaz Çelik	Titanyum	Kobalt Krom	Nikel Süper Alaşımları	Değerli Metaller
Havacılık Uzay	X		X	X	X	X	
Sağlık			X	X	X		X
Enerji ve Petrol			X				
Otomotiv	X		X	X			
Deniz Bilimleri			X	X		X	
Talaş							
Kaldırılabilirlik ve Kaynaklanabilme	X		X	X		X	
Korozyon direnci			X	X	X	X	
Yüksek Sıcaklık			X	X		X	
Alet Edevat		X	X				
Tüketici Ürünleri	X		X				X

Alüminyum, Maraging çeliği, paslanmaz çelik, titanyum, nikel süper alaşımları, altın gibi metal malzemeler ile üretilen üretim yöntemleri ve süreci metal eklemeli imalat olarak tanımlanır [32-37]. Bu malzemeler Birleştirme Jeti (BJ), Toz Yataklı Füzyon (TYF), Sac Lamineleme (SL) ve Doğrudan Enerji Dağıtımı (DED) gibi metotlar ile üretilir [38-41]. Metal Eİ sürecinde yaygın olarak kullanılan Eİ makinelerinden bazıları Çizelge 1.2’de verilmiştir.

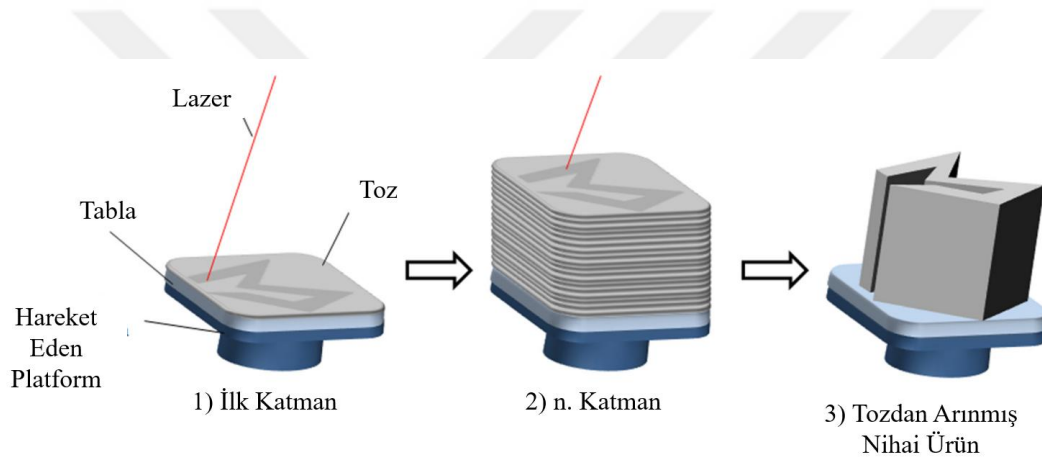
Çizelge 1.2 : Eklemeli İmalatta kullanılan bazı eklemeli imalat makineleri [31].

Yöntem	Üretici Örneği
Seçici Lazer Eritme	SLM solutions
Direkt Metal Lazer Sinterleme	EOS
Direkt Metal Çıktılama	3D Systems
LaserCusing	Concept Laser
Elektron Hüzme Eritmesi	Arcam AB
Lazerle Mühendislikle Ağ Şekillendirme	Optomec
Doğrudan Metal Dağıtımı	DM3D Technology LLC

1.2.1.1 Toz Yataklı Füzyon (TYF)

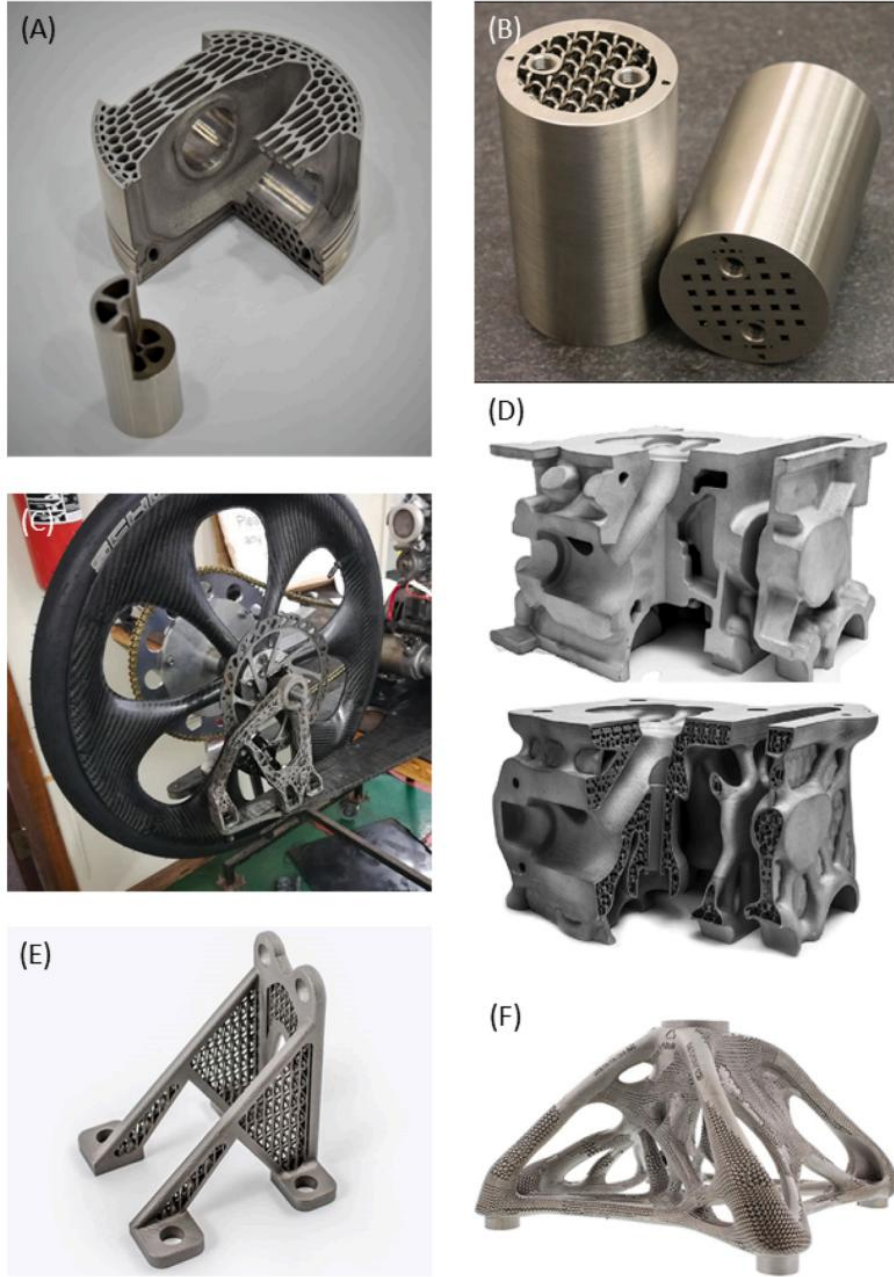
TYF yöntemi kendi içinde Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (DMLS), Seçici Lazer Sinterleme (SLS), Seçici Lazer Eritme (SLE), Elektron Hüzme Eritme (EHE) olmak üzere ayrılır [42-45].

SLE, metal tozlarından metal ürünler üretmek amacıyla F&S Stereolithographie GmbH şirketinden Dr. M. Fockele ve Dr. D. Schwarze ile Fraunhofer ILT Enstitüsünden Dr. W. Meiners, Dr. K. Wissenbach ve Dr. G. Andres tarafından geliştirilen bir eklemeli imalat sürecidir [46]. Bu süreçte ortam genellikle nitrojen gazı veya argon ile doldurulur, bunun sebebi ısınan metallerin atmosfer ortamı ile temasını keserek oksidasyon oluşmasını engellemektir [47,48]. Şekil 1.5'te süreç gösterilmektedir.



Şekil 1.5: SLE eklemeli imalat süreci [46].

Hareket eden bir platform üzerinde toz metal katmanı lazer ile ergitilerek birbirine tutunması sağlanır [49]. Ardından yeni bir katman ile süreç devam eder. Katman kalınlığı genellikle 20 ila 100 μm arasındadır, katman kalınlığı seçimi iyi yüzey kalitesine sahip çözünürlüğü yüksek bir ürün elde etmek ve iyi bir toz akışı için önemlidir [50]. Bu yöntem ile üretilmiş örnek birkaç parça Şekil 1.6'da gösterilmiştir.



Şekil 1.6: (A) İçten yanmalı bir motor pistonunun kesiti [51], (B) içinden yağ ve akaryakıt geçen bir otomotiv parçası [52], (C) bir deney aracı için yapılan bir braket [53], (D) bir yarış otomobilinin silindir kafasının kesiti [54], (E) bir hava aracı için tasarlanan braket [55], (F) Hibrit optimizasyon ile üretilmiş bir örümcek braket [56].

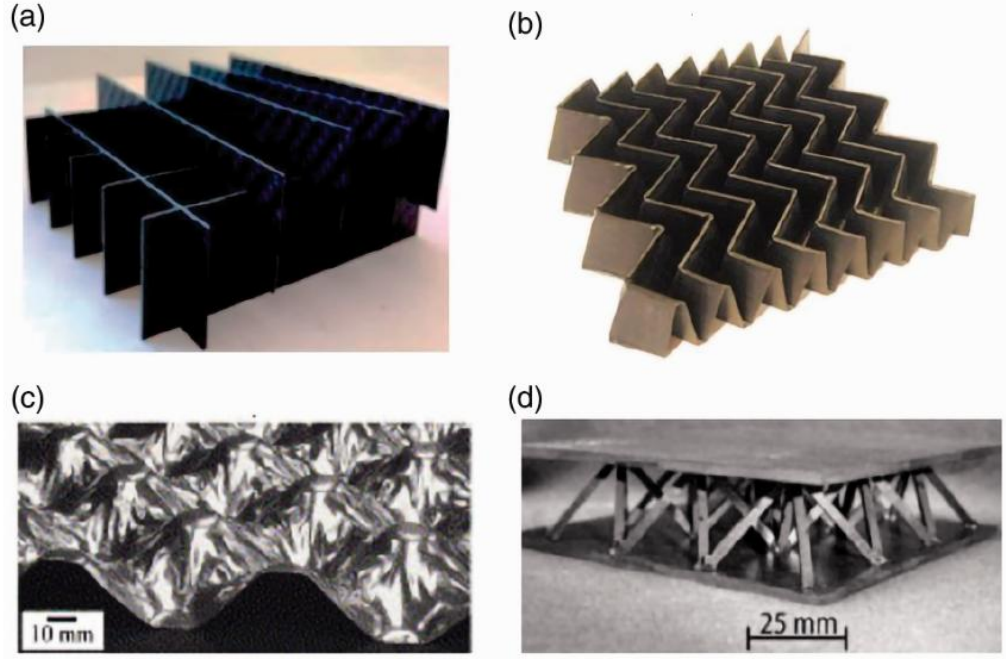
1.2 Sandviç Yapılar

Sandviç yapılar, üstün sertlik-ağırlık oranı sayesinde mükemmel özgül sertlik ve dayanım performansı sunar ve son yıllarda havacılık, otomotiv, denizcilik ve gemi inşa sektörlerindeki uygulamaları sürekli artmaktadır [57-60]. Genellikle sandviç panel, iki yüksek sertlikte yüzey ve aralarına yapıştırılmış düşük yoğunluklu bir çekirdek panelden oluşur [61]. Sandviç yapı şeması Şekil 1.7’de gösterilmiştir.



Şekil 1.7: Sandviç Yapı [62].

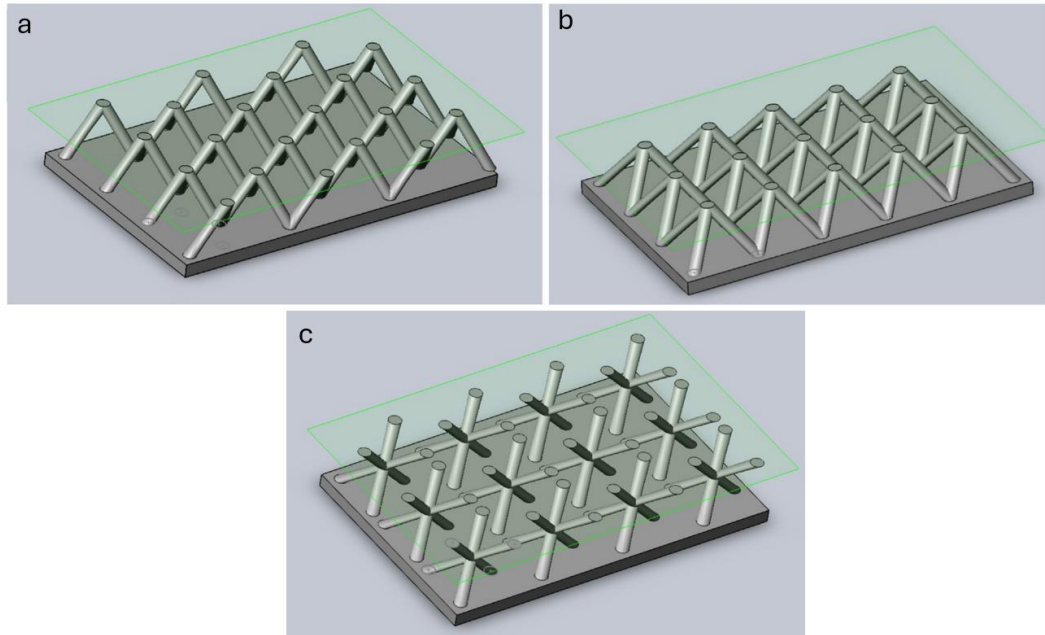
Sandviç yapının temel konsepti veya tanımı, 1849 yılında Fairbairn'e kadar uzanmakta olup, Noor, Burton ve Bert tarafından önerilmiştir [63]. Farklı çekirdek yapılarında değişen mukavemet-ağırlık oranı ve dayanım özellikleri nedeniyle sandviç panellere olan ilgi artmış, farklı yükleme koşulları altında yarı-statik ve dinamik özellikleri geliştirmek amacıyla farklı çekirdek tasarımları önerilmiştir [64]. Bu çekirdek tasarımlarına örnek olarak bal peteği, kıvrık şerit, yumurta kutusu ve kiriş yapılı çekirdekler Şekil 1.8’de verilmiştir [65-68].



Şekil 1.8: (a) Bal peteği, (b) kıvrımlı şerit, (c) yumurta kutusu, (d) kiriş yapı [63].

1.3.1 Kiriş Yapıda Çekirdekli Sandviç Yapılar

Kiriş yapıdaki malzemeler, periyodik hücreli yapılar sınıflandırması altında incelenir [69]. İsimlendirmeleri çekirdek yapısının geometrisinden gelir ve farklı kiriş çekirdekli sandviç yapılara örnekler Şekil 1.9’da gösterilmiştir.

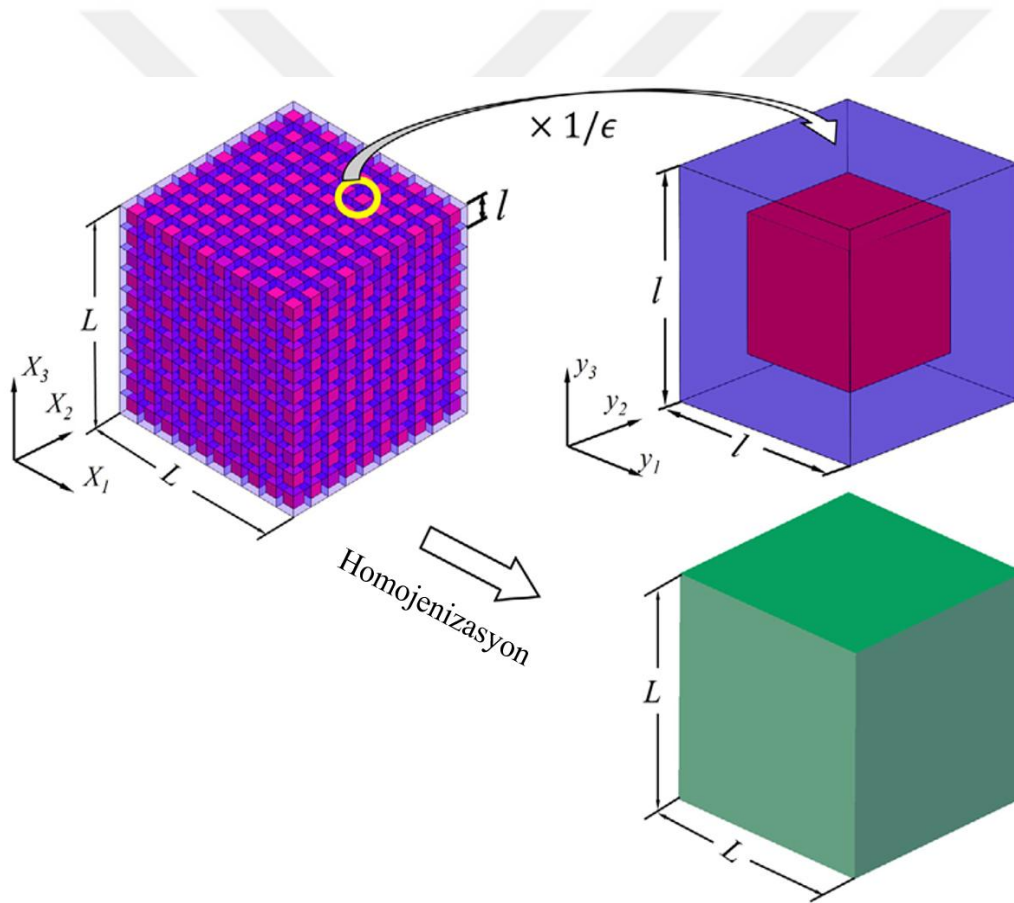


Şekil 1.9: (a) Tetrahedral yapı, (b) piramit yapı, (c) Kagome yapı [70].

1.4 Homojenizasyon

Homojenizasyon, heterojen yapıdaki malzemelerin mikro yapısını inceleyerek makroskobik ölçekteki efektif mekanik özelliklerini belirlemeye yarayan bir mühendislik hesaplama yöntemidir [71]. Genellikle kompozit malzemeler ve boşluklu malzemeler için kullanılır [72,73]. Metodun uygulanması açısından ise analitik homojenizasyon ve nümerik homojenizasyon olarak ikiye ayrılır: analitik homojenizasyon matematiksel denklemleri ve teorik modelleri kullanarak efektif mekanik özellikleri belirlemeye çalışırken nümerik yöntem ise bunu mikroyapı simülasyonları yaklaşık olarak hesaplamaya çalışır [74,75].

Bir homojenizasyon şeması Şekil 1.10'da verilmiştir.



Şekil 1.10: Heterojen yapının homojenize birim hücre olarak gösterimi [76].

1.4.1 Analitik Homojenizasyon

Analitik homojenizasyon için genel formül Eşitlik 1.1'deki gibidir [14].

$$\bar{A} = \frac{1}{V} \int_V A(x) dV \quad (1.1)$$

Burada:

- $\bar{A}$: Homojenize malzeme özelliği
- $A(x)$: Mikro yapı malzeme özelliği
- V : Tekrar eden birim hücre hacmi

Kafes malzemeler, ana üretilen malzeme ve boşluk olarak iki fazdan oluşan heterojen bir hücre gibi düşünülebilir. Bu nedenle makroskobik davranışı kompozit malzemeler için sıklıkla kullanılan aynı modelleme teknikleri ile belirlenebilir. Bunun için iki varsayım yapılmaktadır, kirişlerin bükülmesi ihmal edilmekte ve analiz küçük yer değiştirmeler ve gerinimler için uygulanmaktadır.

Kafes yapının makroskobik rijitlik matrisi C , ε_{aj}^0 gerinim tensörü uygulanarak belirlenir. Burada $j = 1,2,3$ (tensör gösterimi). Gerinim tensörünün altı bağımsız bileşeni, aşağıdaki periyodik sınır koşulları (PSK) kümesi aracılığıyla teker teker uygulanır ve Eşlenik 1.2 gösterimi yapılır [77]:

$$\begin{aligned} u_i(a_1, x_2, x_3) - u_i(-a_1, x_2, x_3) &= 2a_1\varepsilon_{i1}^0, -a_2 \leq x_2 \leq a_2, -a_3 \leq x_3 \leq a_3, \\ u_i(x_1, a_2, a_3) - u_i(x_1, -a_2, a_3) &= 2a_1\varepsilon_{i2}^0, -a_1 \leq x_1 \leq a_1, -a_3 \leq x_3 \leq a_3, \\ u_i(x_1, x_2, a_3) - u_i(x_1, x_2, -a_3) &= 2a_1\varepsilon_{i3}^0, -a_1 \leq x_1 \leq a_1, -a_2 \leq x_2 \leq a_2, \\ i &= 1,2,3, \end{aligned} \quad (1.2)$$

Burada:

- u_i : x_i eksenindeki i . yer değiştirme vektörü bileşeni

Eşdeğer homojen anizotropik ortamın Hooke yasası Eşlenik 1.3'teki şekilde ifade edilir [14]:

$$\sigma_a = C_{a\beta\epsilon_\beta^0}, \alpha, \beta = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (1.3)$$

Böylece, makroskobik rijitlik matrisi $\mathbf{C}$ 'nin bileşenleri, birim hücre üzerinde altı statik analiz çözülerek sütun bazında belirlenir. Her bir statik analiz için, gerilme alanının σ_a bileşenlerinin hacim ortalamalı değeri kolayca hesaplanabilir ve birim hücrenin rijitlik matrisi, her seferinde bir sütun olacak şekilde Eşlenik 1.4'teki gibi belirlenebilir [77]:

$$C_{a\beta} = \frac{\sigma_a}{\epsilon_\beta^0} = \frac{1}{\epsilon_\beta^0 V_{birim\ hücre}} \int_V \sigma_a(x_1, x_2, x_3) dV \quad (1.4)$$

$$\alpha, \beta = 1, \dots, 6, \epsilon_\gamma^0, \gamma = 1, \dots, 6, \gamma \neq \beta$$

Kafes yapıların bu genel formüllerine ek olarak, literatürde HMK hücre için homojenize elastik modül hesaplayan formüller de bulunmaktadır [78], bunlardan birisi Eşlenik 1.5'te verilmiştir.

$$E_c = \frac{3\pi E_s}{16} (d/L)^4 \frac{\cos\gamma_x}{\sin^2\gamma_x \cos\gamma_y \cos\gamma_z} \quad (1.5)$$

Burada:

- E_c : homojenize elastik modül
- E_s : ana malzeme elastik modülü
- d : kiriş çapı
- L : kiriş uzunluğu
- $\gamma_{x,y,z}$: kirişlerin sırasıyla x, y ve z eksenleri ile yaptığı açılar

Birim hücredeki simetrilere ötürü, makro malzeme ortotropik davranış göstermektedir [79]. Makro ölçekte eşdeğer homojen anizotropik bir malzeme olarak modellenenebilir, ana malzeme izotropik olmasına rağmen makro ölçekte davranışı anizotropik olabilir çünkü elastik davranış aslında birim hücre topolojisine bağlıdır ve bu topoloji üst ölçekte homojen malzemenin rijitlik tensörünü güçlü bir şekilde etkilemektedir [14]. Literatürde bu davranışın incelenmesi için anizotropi oranını gösteren bir eşitlik mevcuttur ve buna Zener denklemi denir [80]. Formül Eşitlik 1.2'de verilmiştir.

$$A = \frac{E}{2 \cdot G(1 + \nu)} \quad (1.2)$$

Burada:

- E : Elastisite modülü
- G : Kesme modülü
- ν : Poisson oranı

Bu oranın 1'e eşit olması tam izotropik olduğunu göstermektedir.

1.4.1 Nümerik Homojenizasyon

Nümerik homojenizasyon mikro yapıyı gerçekçi şekilde modelleyerek hassas sonuçlar üretir ve bu sayede analitik hesaplamalara göre daha doğru sonuçlar verir. Buna karşın yoğun hesaplama gerektirir ve büyük ölçekli sistemlere doğrudan uygulanması zordur. Birim hücre modellenir ve çözüm ağı oluşturulur. Ardından PSK uygulanarak sonlu elemanlar analizi ile sonuç alınır [81]. Simcenter ve ABAQUS gibi yaygın olarak kullanılan programlarda bunun için modüller bulunur. Bu tezde de Simcenter içerisinde yer alan Multimech modülü kullanılmıştır.

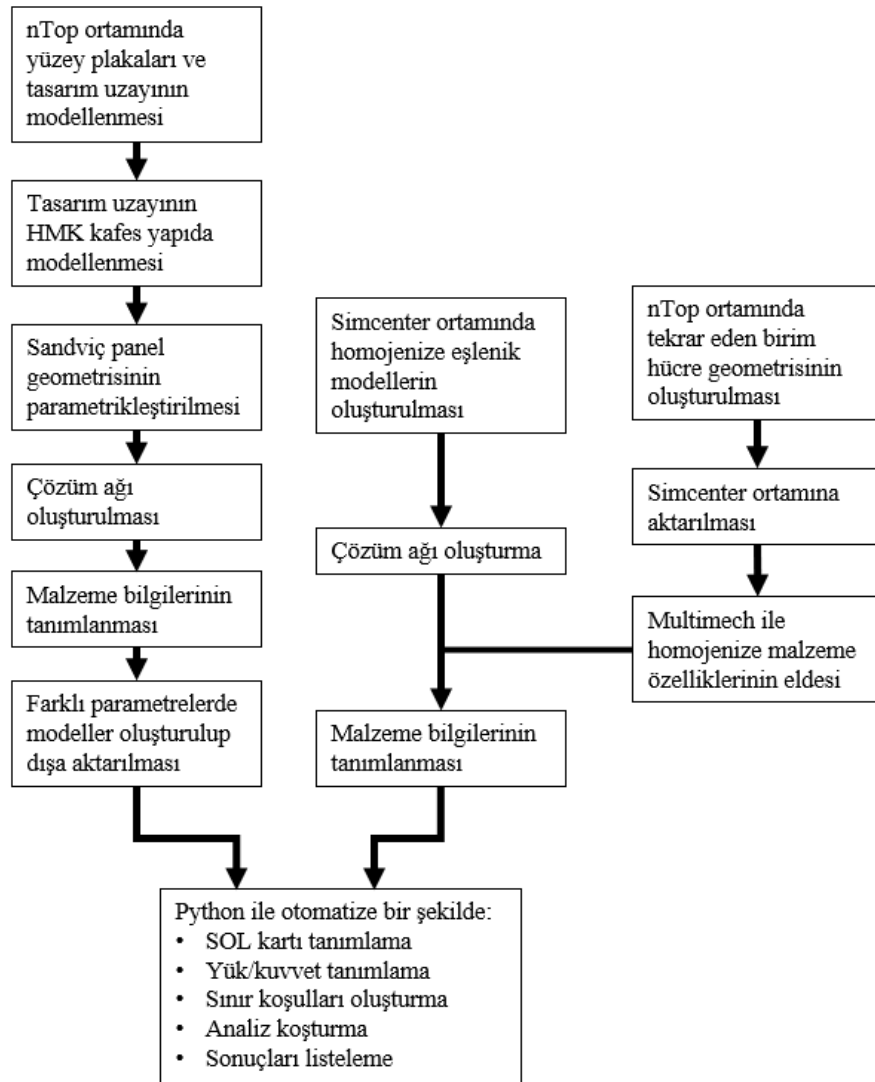
1.5 Amaç

Bu tez çalışmasında hücresel malzemeler, eklemeli imalat, sandviç yapılar ve homojenizasyon hakkında literatür taraması yapılmış olup bulgular paylaşılmıştır. Literatürde ve endüstride sıklıkla kullanılan hücre tipi olan HMK yapı ve metal eklemeli imalat odak noktası olmak üzere bu yapıların statik ve titreşim analizleri için yapılan çalışmalar ve homojenizasyon yöntemleri incelenmiştir. Bu tezde, literatür çalışmalarında olmayan yeni bir hücre tipi önerilmiş olup bu boşluğu doldurmak amacıyla bu yeni üretilen hücre ile oluşturulan sandviç yapılarda statik ve titreşim davranışları incelenerek geleneksel HMK hücre ile farkları detaylı bir şekilde açıklanmıştır.



2. YÖNTEM

Bu bölüm, bu tez çalışmasında incelenmesi amaçlanan kafes yapıların katı modellerinin nasıl oluşturulduğu, çözüm ağlarının nasıl oluşturulduğunu, sonlu elemanlar analizi için girdi dosyasının nasıl hazırlandığını, sonuçların elde edilmesi için geliştirilen Python algoritmasının çalışma prensibini açıklamaktadır. Giriş bölümünde açıklanan homojenizasyon işleminin hangi yazılım paketleri kullanılarak yapıldığı gösterilmektedir. İş akış şeması Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



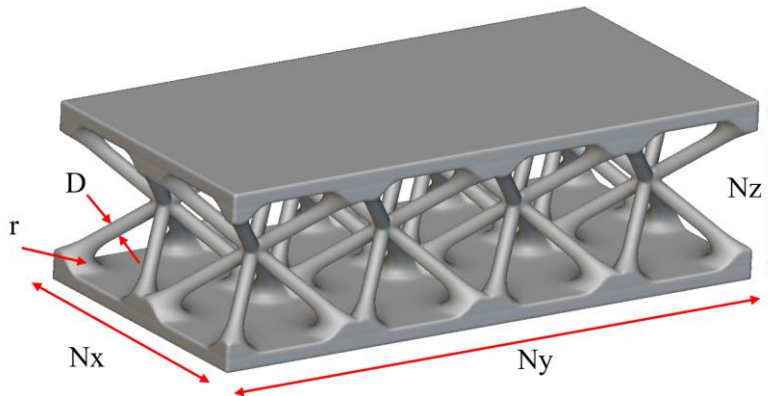
Şekil 2.1 : Sonlu elemanlar analiz sonuçlarının elde için izlenen iş akış şeması.

2.1 Kafes Yapıların ve Sandviç Panellerin Modellenmesi

Çalışma kapsamında sonlu elemanlar analizi için gereken katı modelin oluşturulması için nTop yazılımı kullanılmıştır. Bunun başlıca sebepleri; bu yazılımın parametrik modellemeye imkân sağlaması, kiriş yapılı kafes modeller için zengin bir kütüphaneye ve araçlara sahip olması, sonlu elemanlar analizi için gereken çözüm ağının oluşturulabilmesi ve modelin NASTRAN çözücü için gereken bdf dosyasının dışa aktarımını gerçekleştirebilmesidir.

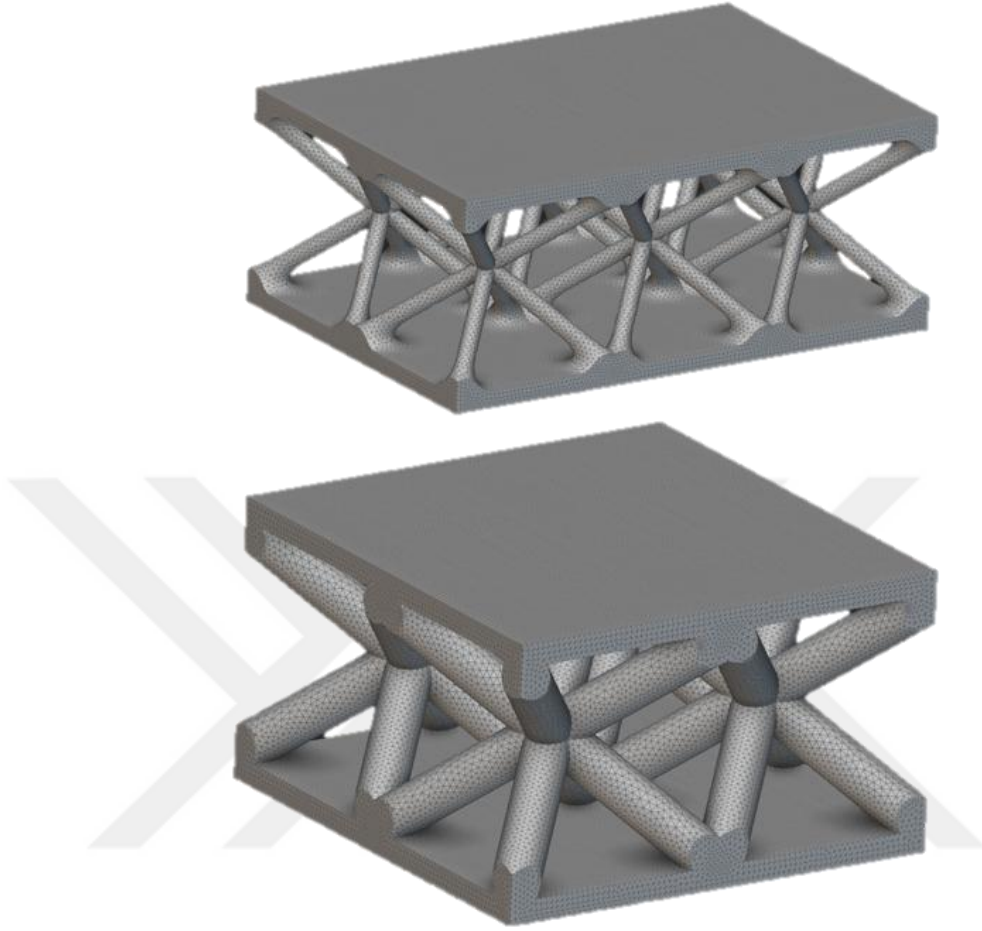
Sandviç yapının modellenmesi için karmaşık yapıdaki çekirdek bölgesi bir tasarım uzayı şeklinde tanımlanmıştır. Dolayısıyla parametrik model üç bölge oluşturmaktadır ve bunlar sırası ile üst yüz plakası, çekirdek bölge ve alt yüzey plakasıdır. Yüzey plakaları tasarım uzayı dışında kaldığı için burada bir işlem yapılmamakta ve katı model hali ile bırakılmaktadır. Tasarım uzayı olan çekirdek kısım için ise nTop içerisindeki araçlardan yararlanarak Hacim Merkezli Kübik yapıda kafes modeller oluşturulmuştur. Model aynı zamanda yüzey plakasına bağlanan kirişler için geçiş yarıçapını da manipüle etmektedir.

Farklı sandviç yapı varyasyonları incelenmek amaçlandığından dolayı farklı boyutlarda ve ölçülerde çok sayıda katı model oluşturulması gerekmektedir ve bundan ötürü sandviç yapılar parametrik biçimde modellenmiştir. Şekil 2.2’de görüldüğü üzere üç eksende hücre sayısı ve buna bağlı olarak yüzey plakası boyutları değişmektedir. Kiriş çapları ve yüzey plakası arasındaki geçiş yarıçapı da parametrik olarak ölçülendirilmiştir.



Şekil 2.2 : nTop ile modellenen parametrik sandviç model ve parametreler, (Nx: x eksenindeki hücre sayısı, Ny: y eksenindeki hücre sayısı, Nz: z eksenindeki hücre sayısı, r: geçiş yarıçapı, D: kiriş çapı).

Farklı parametreler ile oluşturulmuş iki farklı modelin karşılaştırılması Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



Şekil 2.3 : 2x3x1 boyutlarında, 1mm çap ve 1.5 mm geçiş yarıçapına sahip sandviç yapı (üstteki) ve 2x2x1 boyutlarında 2mm çap ve geçiş yarıçapı olmayan sandviç yapı (alttaki).

Sandviç panelin modelinin yanı sıra, Bölüm 2.3'te detaylı açıklanan homojenizasyon işlemi için tekrar eden birim hücrenin de modellenmesi yine nTop yazılımı tarafından gerçekleştirilmektedir. Bunun için tekrar eden bir hücre, yüzey plakası olmaksızın modellenmekte ve homojenizasyon için Bölüm 2.2'deki gibi sonlu elemanlar analizi için hazırlanıp bdf formatında dışa aktarılmaktadır.

2.2 Sonlu Elemanlar Analizi İçin Girdi Dosyası Hazırlanması

Oluşturulan sandviç panel katı modelin NASTRAN ortamında sonlu elemanlar analizi ile çözümlenmesi için çözüm ağı uygulanması gerekmektedir. nTop buna olanak sağlamaktadır ve katı modele “Volume Triangle” isminde birinci derece dört düğüm noktasına sahip üçgen tabanlı piramit elemanlar (tetrahedral) ile çözüm ağı oluşturulmuştur. Bu elemanlar, dışa aktarım sırasında NASTRAN çözücü için, kod yazılımına uygun olması için CTETRA elemanlarına dönüşmektedir. Eleman boyutu olarak kullanılan çapın 0,25 katı belirlenmiştir.

Oluşturulan modellerin hem SOL101 ile statik analizi hem de SOL103 ile titreşim analizinin incelenmesi planlanmaktadır. Dolayısıyla malzeme bilgisinde elastik modül, Poisson oranı ve yoğunluk yer almaktadır. Kullanılan malzeme (AlSi10Mg) izotropik tanımlanmış olup MAT1 kartı kullanılarak, elastik modülü 65 GPa, Poisson oranı 0.3 ve yoğunluğu ise 2670 kg/m³ olarak seçilmiştir.

Homojenize eşlenik model analizi için bütün işlemler Simcenter’da gerçekleştirilmektedir. Yüzey plakaları ve çekirdek ölçüleri parametrik olarak modellenmiş olup çözüm ağı için eleman boyutu olarak birim hücre boyutunda birinci derece 8 düğüm noktasına sahip olan CHEXA eleman uygulanmıştır. Yüzey plakalarının malzeme bilgisi katı kafes model ile aynı olup izometriktir. Çekirdek bölgenin malzeme bilgileri için Bölüm 2.3’te detaylı açıklanan homojenize özellikler ortotropik olarak MAT11 kartı kullanılarak tanımlanmıştır.

Analizler için gerekli yüklemeler ve sınır koşulları Bölüm 2.4’te detaylı açıklanan Python kodları ile tanımlanmaktadır.

2.3 Homojenizasyon

Şekil 2.1’de gösterildiği üzere homojenize eşlenik modelin analizi için çekirdek bölgede kullanılmak üzere homojenize malzeme özelliklerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Karmaşık ve tekrar eden bir yapıyı homojenize malzeme özellikleri ile modellemek hesaplama maliyetleri açısından büyük avantaj sağlamaktadır. Çizelge 2.1’de SOL101 kartı kullanarak yapılan bir statik analiz sonucunda katı kafes model ve homojenize model arasındaki hesaplama maliyeti farkları gösterilmiştir. Bu modelde her ekseninde 5 HMK yapı bulunan 5x5x5 boyutlarında, 10mm birim hücre uzunluğunda ve 1mm giriş çapı olan bir çekirdek bölge ile 1mm kalınlığında yüzey plakası bulunmaktadır.

Çizelge 2.1 : 2x2x2 ve 5x5x5 boyutlarındaki modeller için hesaplama maliyet karşılaştırması (i7-12700H 2,30GHz işlemci ile tek çekirdek kullanılarak hesaplanmıştır).

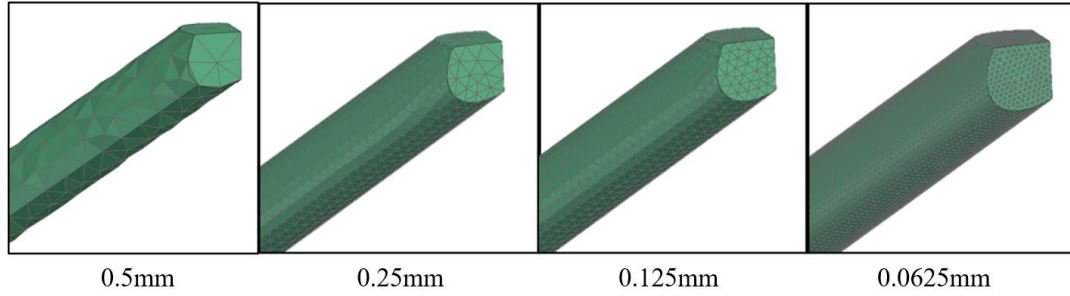
Model Tipi		Toplam Dosya Boyutu	Hesaplama Süresi
2x2x2	Katı Kafes Model	413 MB	4 dk
	Homojenize Model	9,24 MB	2s
5x5x5	Katı Kafes Model	4140 MB	41 dk
	Homojenize Model	9.43 MB	2 s

Görüldüğü üzere hem hesaplama süresi hem de dosya boyutu açısından homojenize model büyük avantaj sağlamaktadır. Katı kafes model için boyut büyüdükçe hesaplama süresi artmakta ve dosya boyutu büyümektedir. Dolayısıyla belli bir boyuttan itibaren pratik olarak katı kafes model kullanılması mümkün olmamakta ve bu durum da başka bir hesaplama yönteminin varlığına ihtiyaç yaratmaktadır. Katı kafes model ve homojenize model arasındaki sonuç farkları Bölüm 4'te detaylı olarak gösterilmiştir.

Şekil 2.1'de gösterildiği üzere homojenizasyon için ilk adım tekrar eden hücre geometrisinin modellenmesidir. Farklı ölçülerdeki tekrar eden hücreler farklı homojenize davranış göstermektedir. Dolayısıyla her farklı hücre için farklı elastik modül, Poisson oranı ve kesme modülü elde edilmektedir.

Tekrar eden hücre geometrisi nTop ortamında modellendikten sonra STEP formatında dışa aktarılmakta ve Simcenter ortamına alınmaktadır. Homojenizasyon için Simcenter içerisinde yer alan Multimech modülü kullanılmaktadır ve Multimech girdi olarak 1. derece çözüm ağı almaktadır. Dolayısıyla Simcenter ortamındaki katı model buna uygun olarak oluşturulmaktadır.

Seçilecek çözüm ağı eleman boyutu için bir çözüm ağı yakınsama çalışması yapılmıştır. Şekil 2.4'te farklı eleman boyutlarındaki çözüm ağı görselleri gösterilmiştir.



Şekil 2.4 : Farklı çözüm ağı eleman boyutlarında modellenen HMK hücrenin kiriş ucu yakın görselleri (kiriş çapı 1mm, birim hücre boyutu 10mm).

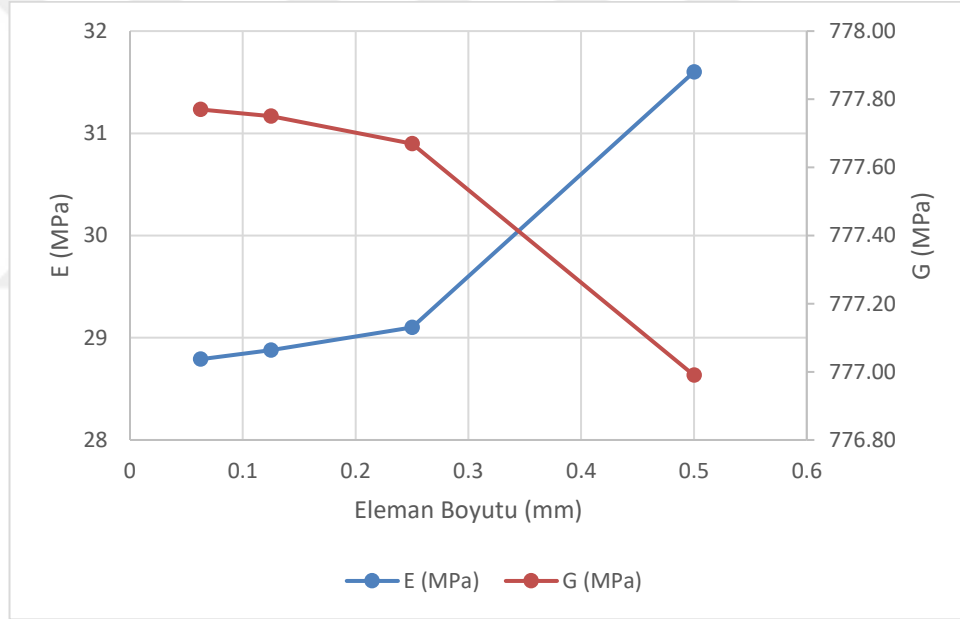
Eleman boyutu, modeldeki tetrahedral eleman kenarlarının ortalama uzunluğunu ifade etmektedir. Şekil 2.4'te gösterilen modellerin homojenize özellikleri ise Çizelge 2.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2 : Farklı çözüm ağı eleman boyutlarında modellenen HMK hücrenin homojenizasyon analizi sonuçları ve hesaplama süresi (i7-12700H 2,30GHz işlemci ile tek çekirdek kullanılarak hesaplanmıştır).

Ortalama Tetrahedral Eleman Kenar Uzunluğu	0.5mm	0.25mm	0.125mm	0.0625mm
E [MPa]	31.6	29.1	28.88	28.79
ν	0.49	0.49	0.49	0.49
G [MPa]	776.99	777.67	777.75	777.77
Zaman	10s	12s	19s	2dk 9s

Çizelge 2.2’de görüldüğü üzere çözüm ağı yakınsama çalışması farklı çözüm ağı eleman boyutlarının farklı homojenize malzeme özellikler verdiği ve eleman boyutu küçüldükçe hesaplama maliyetinin arttığını göstermektedir. Şekil 2.5’te homojenize malzeme özelliklerin yakınsama grafiği verilmiştir. Çözüm ağı sıklaştıkça elastik modül azalmakta ve kesme modülü artmaktadır.

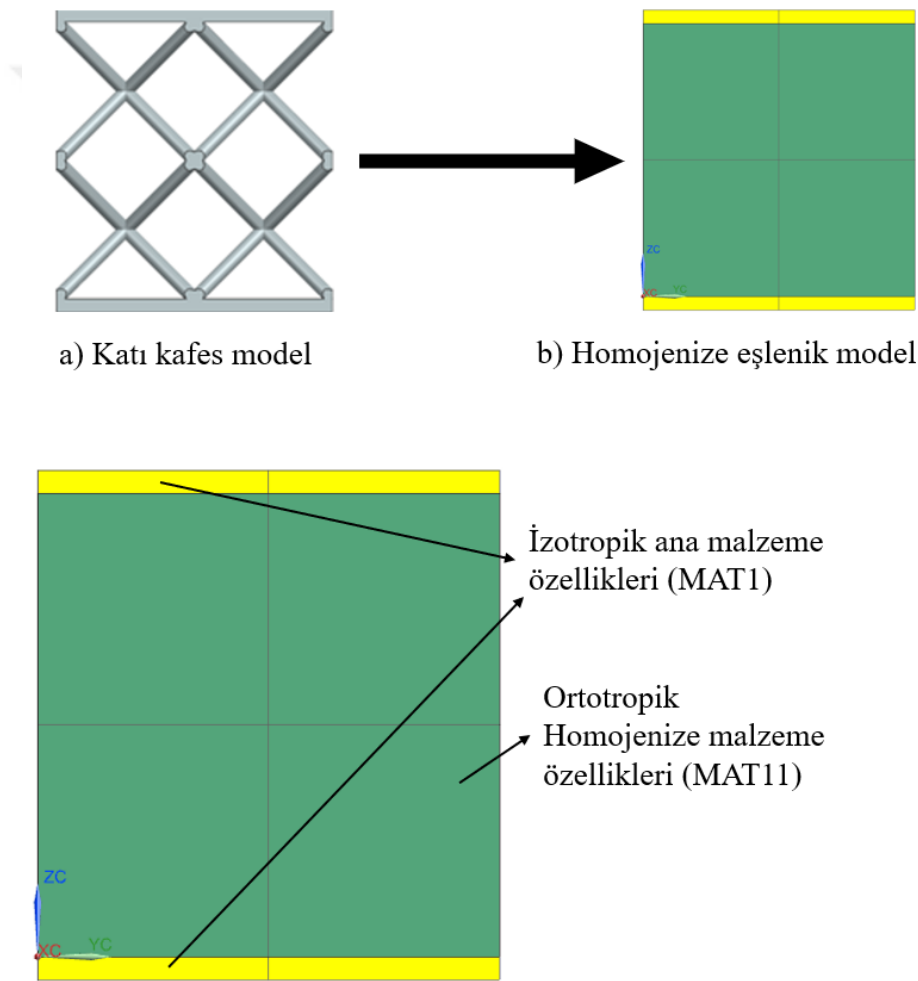
Eleman boyutunun en büyük olduğu durumda farkın diğer modellere göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Eleman boyutunun kiriş çapının 0,25 katı olduğu durumdan (0,25mm) itibaren hem elastik modül için hem de kesme modülü için bir yakınsama davranışı göstermiştir. Eleman boyutunun 0,125mm olduğu durumda yakınsama devam ederken hesaplama süresinin 12 saniyeden 19 saniyeye çıktığı görülmektedir. Hesaplama maliyetleri de göz önüne alındığında homojenizasyon için seçilen eleman boyutu kiriş çapının 0,25 katı olarak belirlenmiştir.



Şekil 2.5 : Farklı çözüm ağı eleman boyutlarında modellenen HMK hücrenin homojenize malzeme özelliklerinin yakınsaması.

Simcenter Multimech homojenizasyon için periyodik sınır koşulu kullanmakta ve buna bağlı olarak yer değiştirmelerin iletebilmesi için üç eksenindeki yüzeylerdeki düğüm noktalarının birbirine simetrik olması gerekmektedir. Bunun için sadece bir kiriş için çözüm ağı uygulanmakta ve daha sonra 3 eksen simetriği alınıp üst üste binen düğüm noktaları birleştirilmektedir.

Ana malzeme özelliği olarak elastik modül ve Poisson oranı girilmekte ve sonuç olarak homojenize özellikler 3 eksenli elastik modül, Poisson oranı ve kesme modülü olmak üzere toplam 9 değer verilmektedir. Multimech ile elde edilen veriler statik analiz sonuçları almak için yeterli olsa da titreşim analizi için gerekli olan yoğunluk için homojenize yoğunluk hesabı ana malzeme yoğunluğu ile birim hücrenin görece yoğunluğu çarpılarak elde edilmektedir. Görece yoğunluk hesabı ise tekrar eden birim yapı hacminin, onun hücre uzunluklarındaki prizmanın hacmine bölünmesi ile elde edilmektedir.



Şekil 2.6: Katı kafes modelin homojenize model gösterimi ve homojenize modelin malzeme özellikleri.

Malzeme özelliklerinin tanımlanmasının ardından model sınır koşulları ve yüklemeler için hazır duruma gelmektedir. Sınır koşulları ve yüklemelerin nasıl

uygulandığı Bölüm 2.4'te detaylı olarak anlatılan Python kodları ile gerçekleştirilmektedir. Katı kafes model için uygulanan koşullar aynı şekilde homojenize model için de uygulanmakta olup aynı algoritma çalıştırılmaktadır. Sonuçlar toplu şekilde bir Excel dosyasında toplanmakta ve incelenmektedir.

2.4 Python Algoritması ile Sonlu Elemanlar Analizleri ve Sonuçlar

Analiz edilmesi gereken model geometrilerinin çeşitliliği, farklı yüklemeler, sınır koşulları, oluşan sonuç veri setinin düzenlenmesi gibi faktörler, çalışmanın manuel olarak gerçekleştirilmesini zorlaştırmakta ve alternatif, otomize bir çözüme ihtiyaç duyulmaktadır.

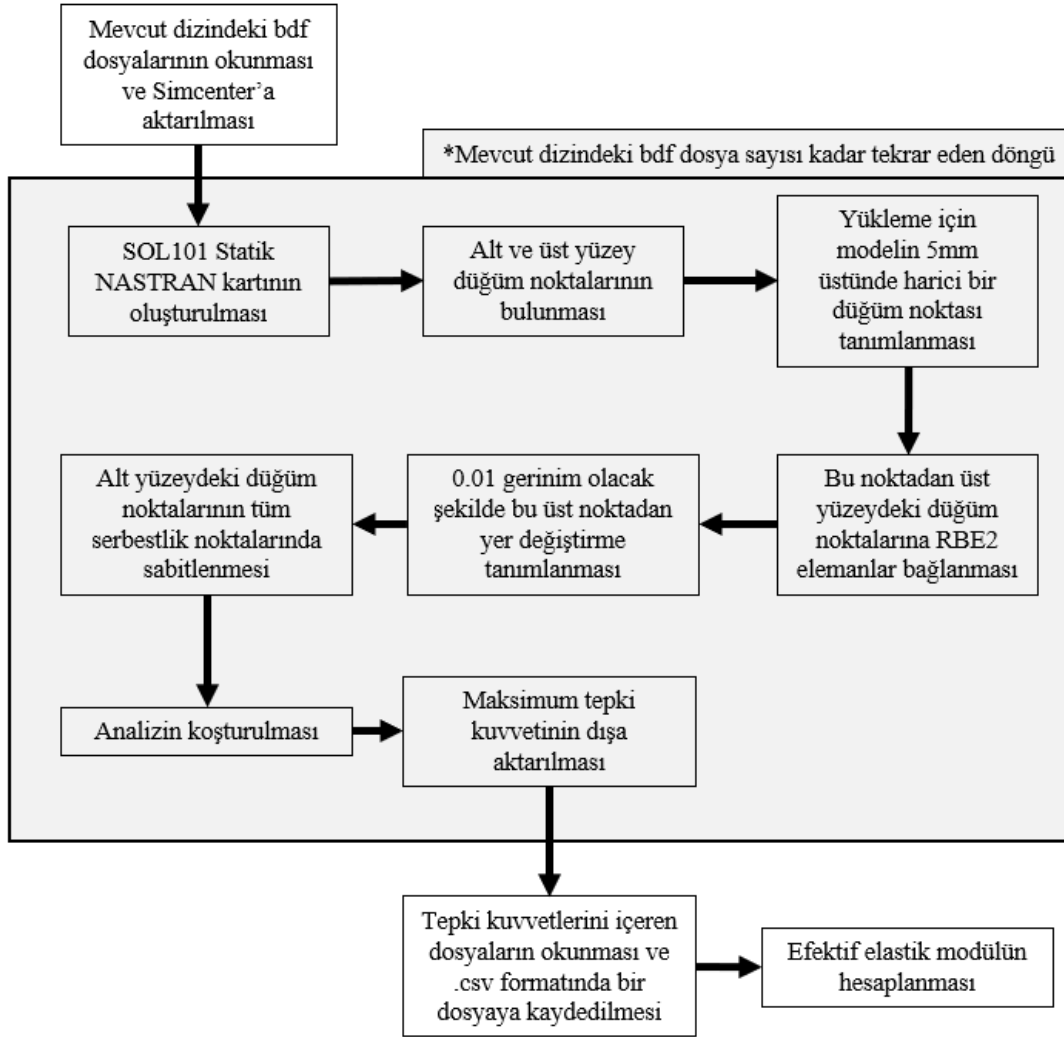
Şekil 2.1'de gösterildiği üzere, çözüm kartlarının oluşturulması, yüklemelerin tanımlanması, sınır koşullarının oluşturulması, analizin koşturulması ve sonuçların listelenmesi ve bunların bir döngü içinde yapılması, geliştirilen Python kodları sayesinde gerçekleştirilmektedir. Farklı tür analizler için farklı algoritmalar geliştirilmiş olup bunlar kombine bir şekilde kullanılmıştır.

2.4.1 Basma Yükü Altındaki Davranışın İncelenmesi

Sandviç panellerin temel olarak incelendiği deformasyon basma yükü altındaki davranışlarıdır. Bu yük altındaki deformasyonu üzerinden yapının efektif elastik modülü hesaplanmakta ve farklı parametrelerin buna nasıl etki ettiğinin incelenmesi amaçlanmaktadır.

Bu analiz için geliştirilen algoritmanın iş akışı Şekil 2.7'de gösterilmiştir. Bölüm 2.2'de oluşturulan bdf dosyaları bir klasör içinde toplanır ve Python dosyası da bu klasöre kopyalanır. Python algoritması kendi bulunduğu dosya dizinindeki dosyaları okur ve kaç bdf dosyası olduğunu hesaplar ve bunu bir değişkene kaydeder. Ardından sırası ile bu değişkende yer alan bdf dosyalarını çağırarak bdf dosyası kadar dönen bir döngü başlatır. Basma yükü altındaki davranışı incelemek için koşturulması gereken analiz statik olacağından NASTRAN SOL101 kartı oluşturulur. Bdf dosyası içerisinde yer alan düğüm noktaları numaraları, z eksenini (yükseklik) koordinatları ile birlikte okunur. Modelin yüksekliği algılandıktan sonra üst ve alt yüzey koordinatına sahip düğüm noktası numaraları üst yüzey ve alt yüzey ayrı ayrı olmak üzere birer değişkenlere kaydedilirler. Bu değişkenler daha sonra sınır koşulları uygulamak için kullanılacaktır. Tepki kuvvetini tek bir düğüm noktası üzerinden kolayca okuyabilmek adına tüm üst yüzeyin bir düğüm noktasında

toplanması için modelin 5mm üstünde bir nokta tanımlanmış ve bu noktanın numarası bir değişkene kaydedilir. Oluşturulan bu nokta, kendi numarası ve daha önce kaydedilen üst yüzey düğüm noktası numaraları değişkeni vasıtasıyla RBE2 rijit 1 boyutlu elemanlar ile bağlanır.



Şekil 2.7 : Basma analizi için geliştirilen Python algoritmasının iş akışı.

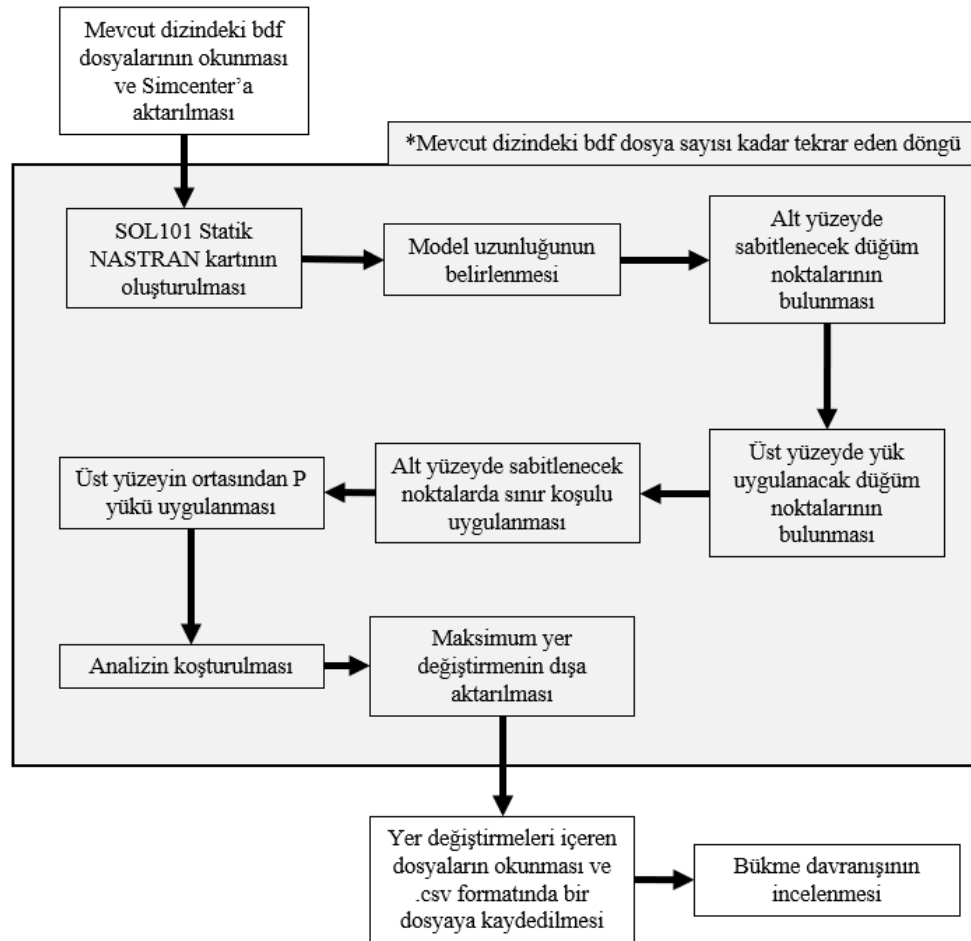
Modelde toplamda 0.01 gerinim olacak şekilde bir yer değiştirme hesaplanır ve oluşturulan bu üst düğüm noktasına tanımlanır. Daha önce kaydedilen al yüzey düğüm nokta numaraları değişkeni vasıtasıyla alt yüzeydeki bütün düğüm noktaları bütün serbestlik derecelerinde sabitlenir. Algoritma bu dosyayı NASTRAN çözücü ile koşturur ve analiz bitince o model için tepki kuvvetini daha önce oluşturulan üst düğüm noktası numarası vasıtasıyla okur ve bir CSV formatında dosyaya kaydeder.

Ardından döngü başa döner ve bir sonraki bdf dosyası için döngü yinelenir. Bütün bdf dosyaları için analiz bitince bütün CSV dosyaları okunup tek bir dosyaya kaydedilir ve 0.01 gerinim değeri kullanılarak efektif elastik modül hesaplanır.

2.4.2 Eğilme Yükü Altındaki Davranışın İncelenmesi

Oluşturulan modellerin hepsi basma yükü altında incelenmesine karşın eğilme yükü için yalnızca belirli varyasyonlar tercih edilmiştir. İnce uzun yapıda ve eğilme testi için uygun olması açısından ASTM C393/C393M-20 standardında belirtilen ölçülere uygun olması açısından 5x12x1 boyutlarında bir konfigürasyon belirlenmiş daha sonra boyutlar ve geçiş yarıçapları değiştirilerek etkileri gözlemlenmiştir.

Basma testindeki gibi yine bir Python algoritması geliştirilmiş ve analiz sonuçları bu şekilde elde edilmiştir. Eğilme analizi iş akışı Şekil 2.8’de gösterilmiştir.

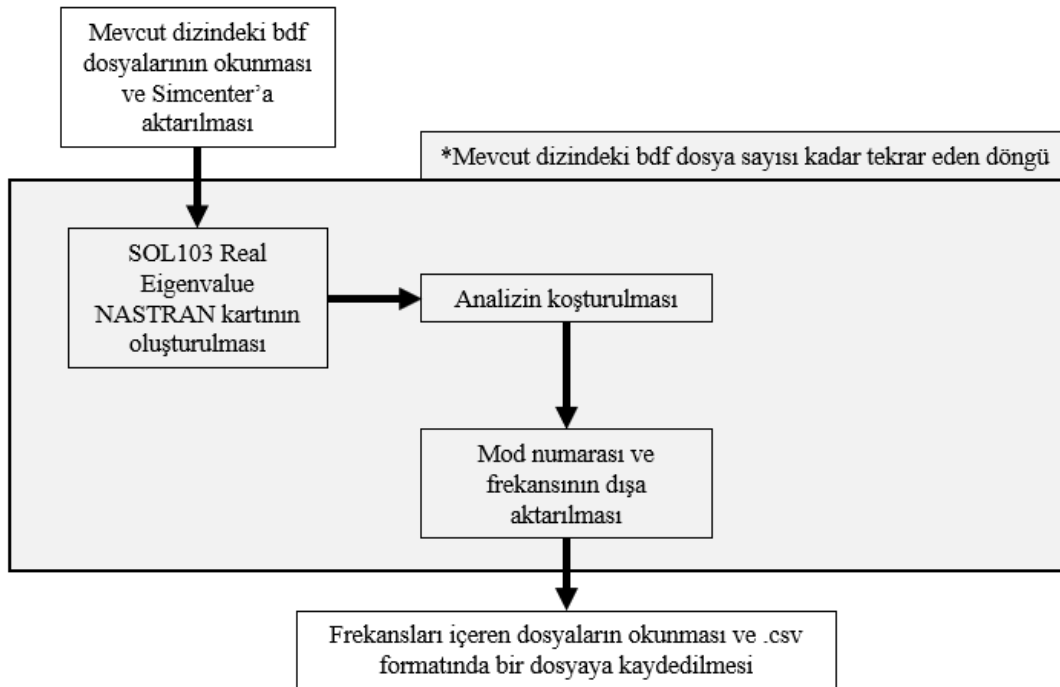


Şekil 2.8 : Eğilme analizi için geliştirilen Python algoritmasının iş akışı.

Yine basma analizinde olduğu gibi mevcut dizindeki bdf dosyaları okunmakta ve bir değişkene kaydedilmektedir. Bu değişkenin uzunluğu kadar, yani bdf dosyası sayısı kadar dönen bir döngü tanımlanır. Eğilme analizi bir 3 nokta eğilme testini simüle eder ve dolayısıyla modelin iki noktadan sabitlenmesi gerekir. Bunun için modelin uzunluğu okunur ve iki uçtan birer hücre boşta bırakılacak şekilde iki hücrenin birleşim yerinde, modelin alt yüzeyinden sabitlenir. Burada ilk 3 serbestlik derecesi sınırlandırılmış olup rotasyona izin verilmektedir. Üst yüzeyin ortasından ise düğüm noktaları bir değişkene kaydedilip bunlara bir P yükü uygulanmaktadır. Ardından analiz koşturulur ve çıktı olarak maksimum yer değiştirmeyi bir CSV formatında dosyaya dışarı aktarır. Ardından döngü son bdf dosyası analiz edilinceye kadar devam eder. Sonuçların hepsi bir dosyada toplanır ve bu sayede modelin eğilme yükü altındaki davranışı incelenir.

2.4.3 Titreşim (Modal) Davranışın İncelenmesi

Parametrelerin modellerin titreşim analizindeki davranışına etkisini incelemek amacıyla Modal analiz gerçekleştirilmiştir. Yine basma ve eğilme analizlerinde olduğu gibi bir Python algoritması geliştirilmiş olup iş akışı Şekil 2.9'da gösterilmiştir.



Şekil 2.9 : Titreşim (Modal) analiz için geliştirilen Python algoritmasının iş akışı.

Basma ve eğilme analizlerinden farklı olarak algoritma burada SOL103 NASTRAN kartını oluşturur. Burada yine basma ve eğilme testinden farklı olarak malzeme bilgisindeki yoğunluk değeri analize dahil olur. Herhangi bir sınır koşulu tanımlanmaz ve analiz koşturulur. Analiz sonucunda mod numaraları ve frekanslar elde edilir. Bir sınır koşulu uygulanmadığı için ilk 6 mod, 6 serbestlik derecesinden dolayı 0 değerine sahiptir ve incelenmeye 7. moddan başlanmaktadır.





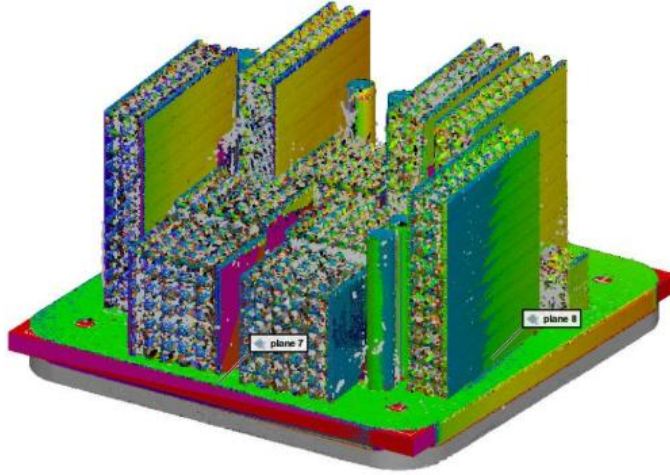
3. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ VE DENEYLER

Elde edilen analiz sonuçlarının doğruluğunun incelenmesi amacıyla farklı numuneler seçip bunlar üzerinde titreşim analizi, statik basma testi ve MicroCT tarama testi gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Tahribatsız olması nedeniyle önce tarama ve titreşim testleri yapılmış, ardından da tahribatlı olan basma testi uygulanmıştır. Numunelerinin yanı sıra malzemenin elastik modülünün ölçülmesi amacıyla çekme testi uygulanmak üzere kuponlar da üretilmiştir. Bu kupon testlerinin sonuçlarına göre sonlu elemanlar analizi için malzeme kartı oluşturulmaktadır.

3.1 Numune Geometrilerinin Seçimi ve Üretim

Testler için üretilecek numuneler için üretecek tedarikçi seçimi, bütçe, eklemeli imalat üretim kısıtlamaları gibi sınırlayıcı unsurlar bulunmaktadır. Bu hususlar değerlendirildiğinde 3 farklı geometride 5'er numune üretilmesine ve 5 adet de kupon üretimine karar verilmiştir. Sandviç panel geometrisinin ve homojenizasyon sonuçlarının farkların görülmesi açısından her ekseninde eşit sayıda olacak bir numuneye ihtiyaç duyulmaktadır. Bunlar arasında da görece olarak küçük ve büyük modeller arasındaki farklar incelenmek istenmektedir. Bunun için numunelerin birisinin boyutu 2x2x2 olarak belirlenmiş olup diğer numune için de 5x5x5 boyutlarında bir numune belirlenmiştir. Son olarak sadece yatay eksenlerde görece çok sayıda hücre içeren ve yüksekliği az olan, yani panel formasyonunu temsil etmesi açısından 10x10x2 boyutlarında bir numune belirlenmiştir. Bu üç numuneden beşer adet olmak üzere tek tabla üzerinde 15 numune ve 5 kupon üretilmiştir. Bu numunelerin tabladaki yerleşimini gösteren bir tarama görseli Şekil 3.1'de gösterilmektedir. Tarama işleminin detaylarına Bölüm 3.2'de yer verilmiştir.

Tedarikçi üreticinin yetenekleri kapsamında ve eklemeli imalat üretim kısıtlamaları göz önüne alınarak birim hücre uzunluğu 10mm olan ve giriş çapı 1mm olan HMK çekirdek yapıda ve 1mm yüzey plakası olan numuneler seçilmiştir. EKTAM'da bulunan Concept Laser M2 Cusing makinesi ile üretilmiştir.



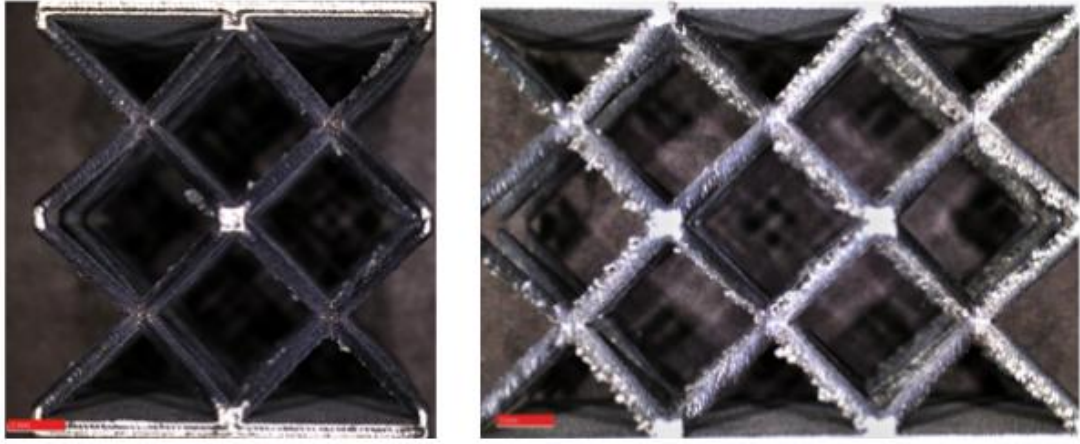
Şekil 3.1 : Üretilen numunelerin eklemeli imalat tablasındaki konumlarını gösteren, MicroCT tarama sonucunda elde edilmiş bir görsel.

3.2 MicroCT Tarama İşlemi ve Arşimet Testi

Türk Havacılık Uzay Sanayii (TUSAŞ) tesislerinde numuneler tabladaki konumlarıyla birlikte porozite incelemesi amacıyla MicroCT tarama işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlem ile ileriki aşamalarda ortaya çıkacak test sonucu ile sonlu elemanlar analizi arasındaki farklar için üretim kusurlarını gösterecek bir çalışma olması amaçlanmaktadır.

3.2.1 Tarama ve Arşimet Testi Sonuçları

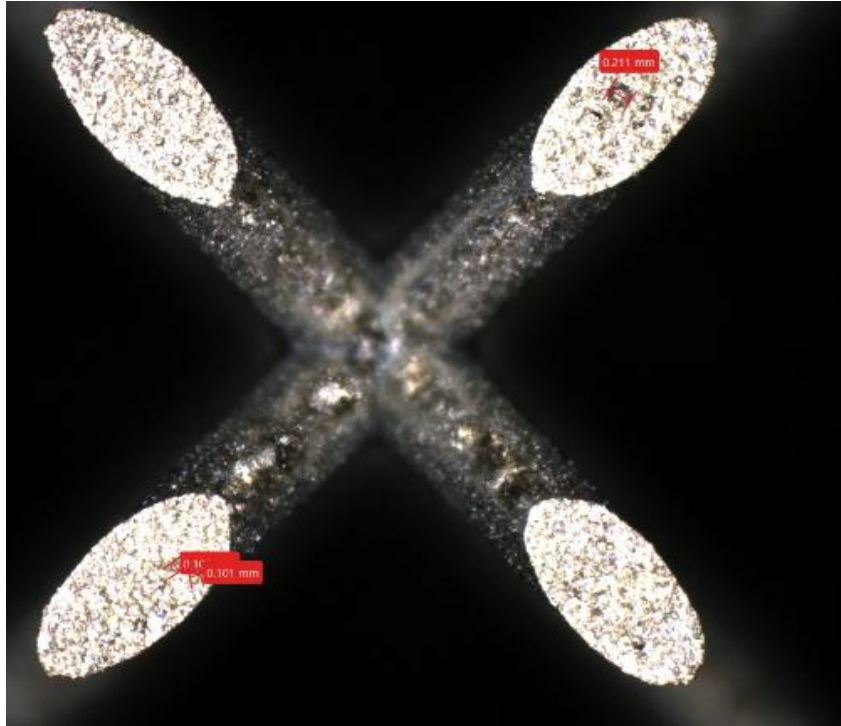
Şekil 3.2’de gösterilen 2x2x2 numuneye uygulanan Arşimet testi sonucunda 2.66 g/cm^3 yoğunluk elde edilmiştir. AlSi10Mg malzemesinin yoğunluğu 2.67 g/cm^3 kabul edilirse yaklaşık olarak %99,62 doluluk oranına ulaşılmıştır. Görüldüğü üzere 2x2x2 boyutlarında olmasına karşın üretimin gerçekleştiği ekseninde 3 adet hücre bulunmaktadır. Bunun sebebi tabladan çıkarılan numunelerde kopmalar olmaması için bir sıra hücre fazladan üretilmiş olup daha sonra ikincil bir işlemle fazlalık kısım kesilmektedir.



Şekil 3.2 : 2x2x2 numunelerinden birinin ön ve yandan görünüşü.

Dış yüzeydeki kirişler kumpas ile ölçülmüştür. Ortalama kiriş çapı 1.05 ± 0.07 mm olarak tespit edilmiştir. Kiriş çapının 1 mm'den fazla çıkmasının ve 0.07 mm miktarında sapmanın oluşmasının nedeni özellikle kafes yapısının yan tarafta bulunan kirişlerine yapışan tozlardır.

Detaylı inceleme için fazlalığı kesilen numunenin mikroskop altındaki görüntüsü Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Kesit incelendiğinde birkaç görece büyük boşluk hariç üretim kalitesinin yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 3.3 : 2x2x2 numunesinde kesilen yüzeyden alınan mikroskop görseli.

3.3 Titreşim Testi

Numunelerin tarama işlemlerinin ve Arşimet test sonuçlarının alınmasının ardından yine tahribatsız olan titreşim testi gerçekleştirilmiştir. Bu testte numunelerin serbest sınır koşulları altında doğal frekanslarının incelenmesi amaçlanmıştır.

Frekans Tepki Fonksiyonu (FTF) doğal frekans analizi testleri serbest sınır koşulları altında Orta Doğu Teknik Üniversitesi'nde (ODTÜ) gerçekleştirilmiştir. 3 farklı numune, 5'er adet olmak üzere ve her numuneye 5 farklı test yapılması suretiyle toplamda 45 veri seti elde edilmiştir. Testlerden elde edilen doğal frekans sonuçları ve simülasyonlarla elde edilen doğal frekans sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

3.3.1 Deney Düzenegi

Bu kısımda TUSAŞ tarafından sağlanan 15 adet numune için doğal frekansları belirlemeye yönelik olarak yapılan frekans tepki fonksiyonu ölçüm testleri çalışması açıklanmıştır.

Titreşim testi için kullanılan ekipmanlarla ilgili bilgiler Çizelge 3.1'de verilmiştir ve sistem bileşenlerinin görselleri Şekil 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Testte kullanılan ekipmanların listesi.

Ekipman Türü	Marka-Model
Veri Toplama Sistemi	Dewesoft Sirius 16 Channel Data Acquisition System– Dewesoft X software
Lazer Hız Ölçer (Vibrometer)	Polytec Vibroflex Neo Sensor Head – Polytec Vibroflex Connect Front End
Darbe Çekici	Dytran Mini İmpact Hammer – IEPE type



Şekil 3.4 : Titreşim testlerinde kullanılan ekipmanlar: (a) ve (b) Veri Toplama Sistemi); (c) ve (d) Lazer Hız Ölçer (Vibrometer); (e) Darbe Çekici; (f) Deney düzeneği.

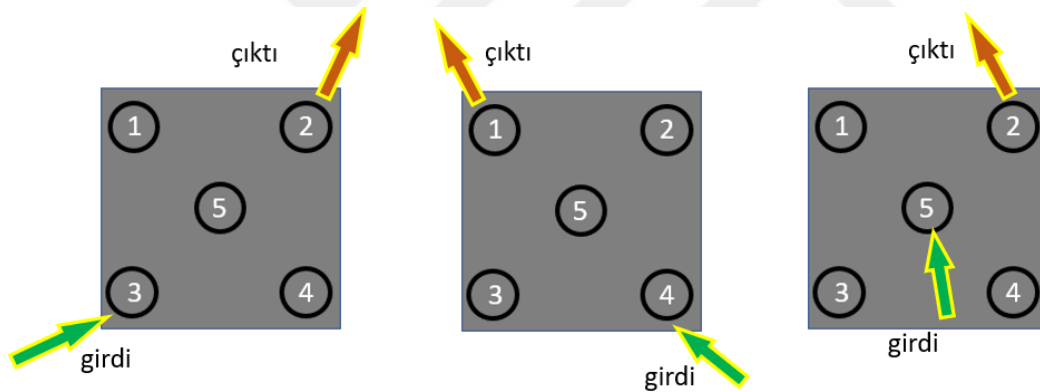
3.3.2 Deney Çalışma Prensibi

Her numune için 3 adet frekans tepki fonksiyonu ölçümü yapılmıştır. Bu frekans tepki fonksiyonlarında gözlemlenen rezonans tepelerine denk gelen frekanslar numunelerin doğal frekansları olarak belirlenebilir.

Ölçüm yapılan frekans tepki fonksiyonlarındaki girdi (yüzeye dik yönde kuvvet) ve tepki (yüzeye dik yönde hız) kombinasyonları aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

- 3 nolu noktadan darbe çekici ile yüzeye dik yönde kuvvet uygulanır, 2 nolu noktadan yüzeye dik yönde hız tepkisi ölçülür.
- 4 nolu noktadan darbe çekici ile yüzeye dik yönde kuvvet uygulanır, 1 nolu noktadan yüzeye dik yönde hız tepkisi ölçülür.
- 5 nolu noktadan darbe çekici ile yüzeye dik yönde kuvvet uygulanır, 2 nolu noktadan yüzeye dik yönde hız tepkisi ölçülür.

Darbe noktaları ve ölçüm noktaları Şekil 3.5’te görülmektedir.



Şekil 3.5 : 3 farklı ölçüm için girdi ve çıktı noktaları.

Herhangi bir sınır koşulu altında kalmaması için numuneler bir sünger üzerine oturtulmuş ve çekiç darbesi bu konumdayken uygulanmıştır. 3 farklı numune için bu durum Şekil 3.6’da gösterilmiştir.



Şekil 3.6 : Serbest sınır koşullarını temsil etmek için 4 noktadan yumuşak sünger üzerine oturtulmuş numune örnekleri.

3.3.3 Titreşim Deneyi Sonuçları ve Değerlendirme

Test sonucunda 3 farklı numune çeşidinde, 5'er numune sayısında toplam 15 sandviç yapıya test uygulanmıştır. Her bir yapı için 3 farklı noktadan ölçüm alındığından dolayı toplam 45 farklı çıktı değeri alınmıştır. 2x2x2, 5x5x5 ve 10x10x2 numune çeşitleri ayrı ayrı incelenmiştir.

Deney sonuçları ve sonlu elemanlar analiz karşılaştırması Çizelge 3.2'de yer almaktadır. Sonlu elemanlar analizi için yüzey plakalarında 70 GPa elastik modül, çekirdek kısmında 35 GPa elastik modül kullanılmıştır. Her iki bölge için 0.3 Poisson oranı ve 2670 kg/cm³ yoğunluk değeri kullanılmıştır. Homojenize özellikler ise elastik modül 13 MPa, Poisson oranı 0,46 ve kesme modülü 230 MPa şeklindedir.

Malzeme özelliklerinin belirlenmesinde literatür incelenmiş ve üretim kusurlarına bağlı olarak elastik modülün kirişler için ana malzemeye kıyasla yarı yarıya düştüğü gözlenmiştir [82].

Çizelge 3.2 : 2x2x2 numune için titreşim deneyi sonuçları ve sonlu elemanlar analizinin deney ortalaması ile karşılaştırması.

Numune	Girdi	Çıktı	Mod 1	Mod 2	Mod 3	Mod 4
1	3	2	5499	5743	6791	8120
	4	1	5499	5740	6792	8116
	5	2	5500	5738	6790	8121
2	3	2	4921	5274	6355	6807
	4	1	4926	5270	6351	7434
	5	2	4924	5272	6342	6808
3	3	2	4445	4713	5771	6812
	4	1	4445	4710	5774	6278
	5	2	4449	4710	5775	6813
4	3	2	5476	5710	6727	8175
	4	1	5479	5711	6719	8174
	5	2	5487	5709	6729	8174
5	3	2	4712	5051	6154	6339
	4	1	4715	5048	6145	6331
	5	2	4712	5042	6146	10487
Katı Kafes Model		Sonuçlar	4355	4355	5874	9996
		% Fark	13%	18%	8%	-33%
Homojenize Eşlenik Model		Sonuçlar	4121	4121	5231	8900
		% Fark	18%	22%	18%	-18%

Deney sonuçlarına bakıldığı zaman genel olarak numunelerin frekanslarının ölçüm yapılan noktaya pek bağlı olmadığı görülmektedir. Aynı numunelerde farklı ölçüm noktaları için yakın frekans değerleri gelmekte ve bu sebeple farklar da yakın gelmektedir. Genel olarak bakıldığında sonlu elemanlar modelleri deney sonuçlarına kıyasla daha düşük frekans değerleri vermiştir. İlk mod sonuçları arasındaki fark %10 civarındadır.

İmalat sırasında tablanın farklı bölgeleri farklı ısı çevrimlerine maruz kalmakta ve malzeme mikroyapısını etkilediği düşünülmektedir. Bu da numunelerin tabla konumuna bağlı olarak farklı mekanik davranışlar göstermelerine sebep olabilir.

Çizelge 3.3 : 5x5x5 numune için titreşim deneyi sonuçları ve sonlu elemanlar analizinin deney ortalaması ile karşılaştırması.

Numune	Girdi	Çıktı	Mod 1	Mod 2	Mod 3	Mod 4
1	3	2	2738	2791	2911	3866
	4	1	2760	2862	2917	3867
	5	2	2906	2935	3013	3868
2	3	2	2632	2759	2841	3611
	4	1	2632	2756	2842	3611
	5	2	2626	2759	2744	3612
3	3	2	2657	2666	2695	3633
	4	1	2526	2658	2697	3633
	5	2	2533	2658	2693	3634
4	3	2	2552	2560	2636	3516
	4	1	2548	2562	2637	3517
	5	2	2545	2562	2637	3516
5	3	2	2285	2642	3263	3605
	4	1	2606	2642	3267	3605
	5	2	2599	2642	3262	3604
Katı Kafes Model		Sonuçlar	2310	2490	2490	3468
		% Fark	11%	8%	13%	5%
Homojenize Eşlenik Model		Sonuçlar	2222	2310	2310	3008
		% Fark	15%	14%	20%	18%

Çizelge 3.3 ve Çizelge 3.4’te de diğer iki numunenin deney sonuçları ve sonlu elemanlar analiz sonuçları yer almaktadır.

Tüm bu sonuçlardan yola çıkarak katı kafes modelin ve homojenize modelin belirtilen malzeme özelliklerinde özellikle ilk mod frekansını, yani yapının en düşük doğal frekansını tahmin etmede nispeten düşük fark oranları sebebiyle başarılı olduğu sonucuna varılmaktadır. Mod numaraları arttıkça fark oranları genel olarak yükselmektedir. Homojenize eşlenik modelin hem deney sonuçlarına göre hem de katı kafes modele göre daha düşük frekansta sonuçlar verdiği görülmektedir fakat katı kafes model ile homojenize eşlenik model arasındaki fark oranının özellikle ilk modlar için %3’ün altında olduğu ve daha konservatif sonuçlar verdiği gerekçesiyle sandviç yapıların doğal frekanslarının belirlenmesinde uygun bir alternatif yöntem olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Çizelge 3.4 : 10x10x2 numune için titreşim deneyi sonuçları ve sonlu elemanlar analizinin deney ortalaması ile karşılaştırması.

Numune	Girdi	Çıktı	Mod 1	Mod 2	Mod 3	Mod 4
1	3	2	5636	7020	7324	7608
	4	1	5638	7030	7324	7612
	5	2	5646	7033	7117	7622
2	3	2	5668	7188	7444	7641
	4	1	5668	7181	7440	7637
	5	2	5670	6000	7181	7273
3	3	2	5515	6632	7024	7978
	4	1	5513	6656	6993	7163
	5	2	5513	6659	6707	7016
4	3	2	5639	7105	7485	7766
	4	1	5641	7104	7281	7776
	5	2	5644	7103	7213	7489
5	3	2	5636	7020	7324	7608
	4	1	5638	7030	7324	7612
	5	2	5646	7033	7117	7622
Katı Kafes Model		Sonuçlar	5077	6714	6714	7199
		% Fark	10%	3%	7%	5%
Homojenize Eşlenik Model		Sonuçlar	4940	6734	6734	6912
		% Fark	12%	3%	7%	9%

3.4 Basma Testi

Bu bölümde basma testi açıklanmıştır.

3.4.1 Test Prosedürü

Tahribatsız olan titreşim testlerinin tamamlanmasının ardından her modelden 3'er adet numunenin basma testi İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü (İYTE) laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. 10^{-3} s^{-1} gerinim hızında ve oda sıcaklığında, maksimumu 300kN olan INSTRON model cihazda quasi-statik basma testleri yapılmıştır.

Her numunenin test verileri alınıp bir MATLAB kodu yardımıyla gerilme-gerinme eğrileri çizdirilmiş olup elastik bölgeler belirlenmiş ve elastik modülleri hesaplanmıştır.

3.4.2 Sonuçlar

Sonuçlar Çizelge 3.5'te listelenmiştir. Sırasıyla incelendiği zaman, 2x2x2 numunelerinin katı kafes modeli ve homojenize eşlenik modeli arasında %25 fark olduğu görülmektedir. Aynı durum 5x5x5 model için incelendiği zaman fark %1'in

altına düşmektedir. Bu da basma testinde katı kafes model ve homojenize model arasındaki farkın düşmesi için model boyutlarının etkili olduğu göstermektedir. 5x5x5 model için deney sonuçları ve sonlu elemanlar analizleri arasında düşük farklar göstermekte ve sonlu elemanlar analizinin hem katı kafes model için hem de homojenize eşlenik model için konservatif olduğu sonucunu göstermiştir. 10x10x2 deney sonuçları ile sonlu elemanlar analiz sonuçları arasında büyük farklar çıkmış olup sonuçlar birbiri ile ilişkilendirilememektedir. Katı kafes model ve homojenize eşlenik model kendi aralarında tutarlı sonuçlar verse de deney sonuçlarının hem kendi içinde tutarsız olması hem de sonlu elemanlar analizleri ile tutarsız olması sebebiyle herhangi bir kanıya varılmadan önce tekrarlanması gerektiği sonucuna varılmıştır.

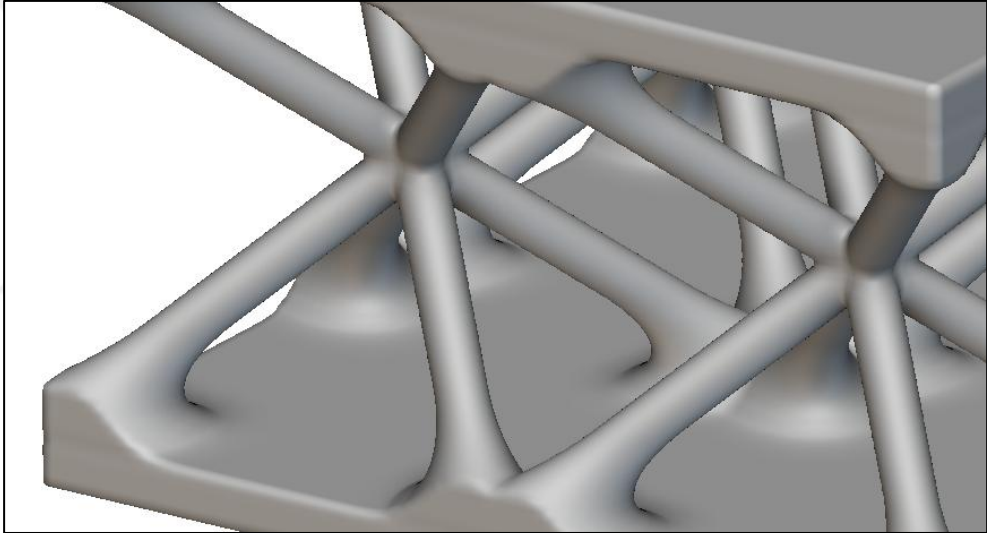
Çizelge 3.5 : Basma deneyi sonuçları ve sonlu elemanlar analizi karşılaştırması (MPa).

Numune	Deney E	Sonlu Elemanlar Analizi			% Fark	
		Katı Kafes Model	Homojenize Eşlenik Model	% Fark	Katı Kafes Model Fark	Homojenize Eşlenik Model Fark
2x2x2	70	65	81	%25	%-7	%16
	84				%-23	%-4
	70				%-7	%16
5x5x5	38	37	38	%3	%-3	%0
	41				-%10	%-7
	40				%-8	%-5
10x10x2	55	169	179	%6	%207	%225
	57				%196	%214
	88				%92	%103



4. GEÇİŞ YARIÇAPININ MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

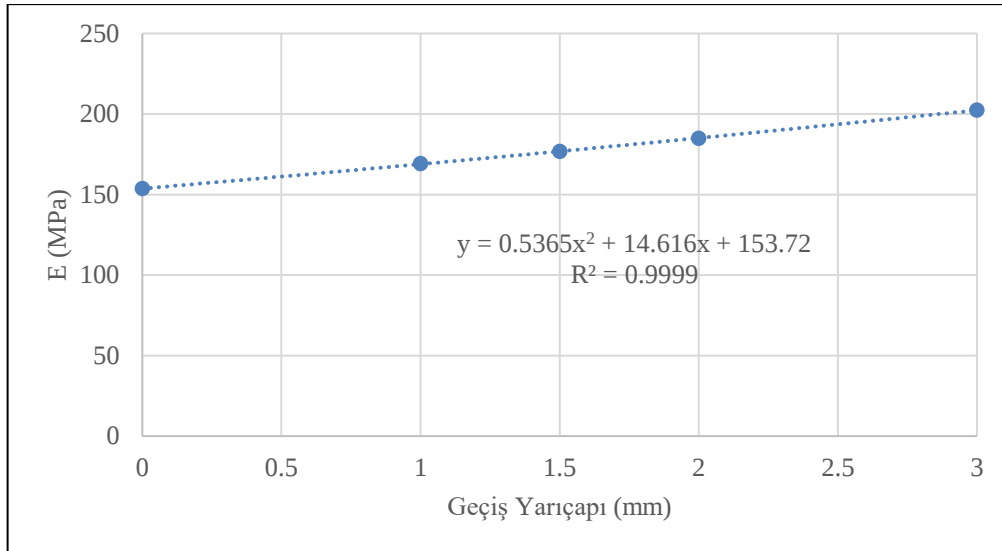
Yapılan çalışmalar sonucunda sandviç panellerde maksimum gerilimlerin kiriş ile yüzey plakası geçiş bölgelerinde olduğu gözlenmiştir. Bu bölgelerdeki gerilimleri azaltarak efektif mekanik özelliklerin iyileşmesi beklenmektedir. Bunun için bu bölgelerde bir geçiş yarıçapı uygulayarak geleneksel hacim merkezli kübik yapıdan farklı bir hücre sunulması amaçlanmaktadır. Geçiş yarıçapı için bir örnek Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Bu geçiş yarıçapının farklı varyasyondaki sandviç panellerde nasıl etki edeceği incelenecektir.



Şekil 4.1 : Kirişler ile yüzey plakası arasında uygulanan geçiş yarıçapı.

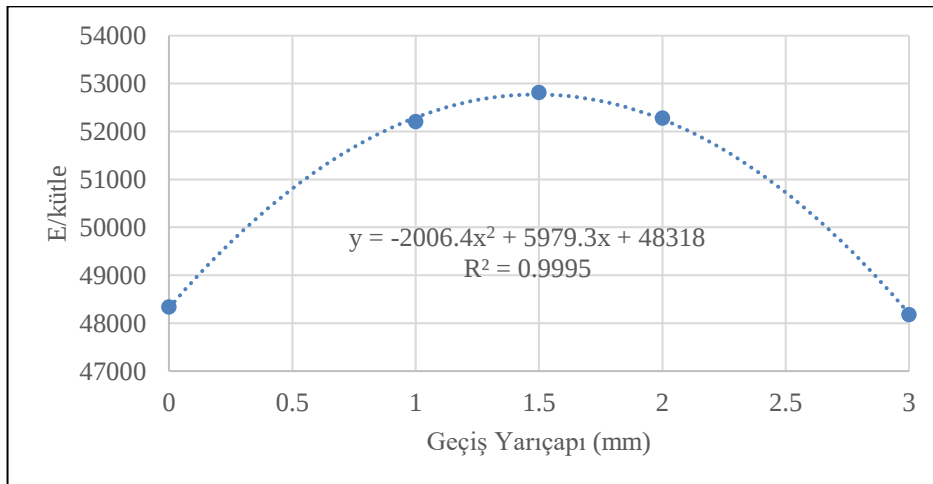
4.1 Geçiş Yarıçapının Mekanik Özelliklere Etkisinin Basma Yüğü Altında İncelenmesi

Sandviç yapıda geçiş yarıçapı farklı olduğu girdi dosyaları Bölüm 2.2’de açıklandığı gibi oluşturulmuş ve ardından basma yönündeki mekanik özellikleri Bölüm 2.4.1’deki gibi elde edilmiştir. Bunun için 2x2x2 boyutlarında kiriş çapı 1mm olan modelde farklı analizler yapılmış olup efektif elastik modüller Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2 : 2x2x2 numunesinde geçiş yarıçapının efektif elastik modüle etkisi.

Görüldüğü üzere geçiş yarıçaplarının 0mm, 1mm, 1.5mm, 2mm ve 3mm olduğundaki efektif elastik modülleri geçiş yarıçapı ile doğru orantılıdır. Fakat geçiş yarıçapının artması sandviç yapının ağırlığının da artmasına yol açmakta ve sandviç yapının asıl avantajlı olduğu ağırlığa oranla yüksek mukavemet ilişkisine etkisinin incelenmesi gerekmektedir. Dolayısıyla bunun incelenmesi için bir performans kriteri belirlenmiş olup her bir modelin efektif elastik modülü, o modelin ağırlığına bölünmüştür. Şekil 4.2'deki grafiğin ağırlıklara bölünmesi ile Şekil 4.3 elde edilmiştir.

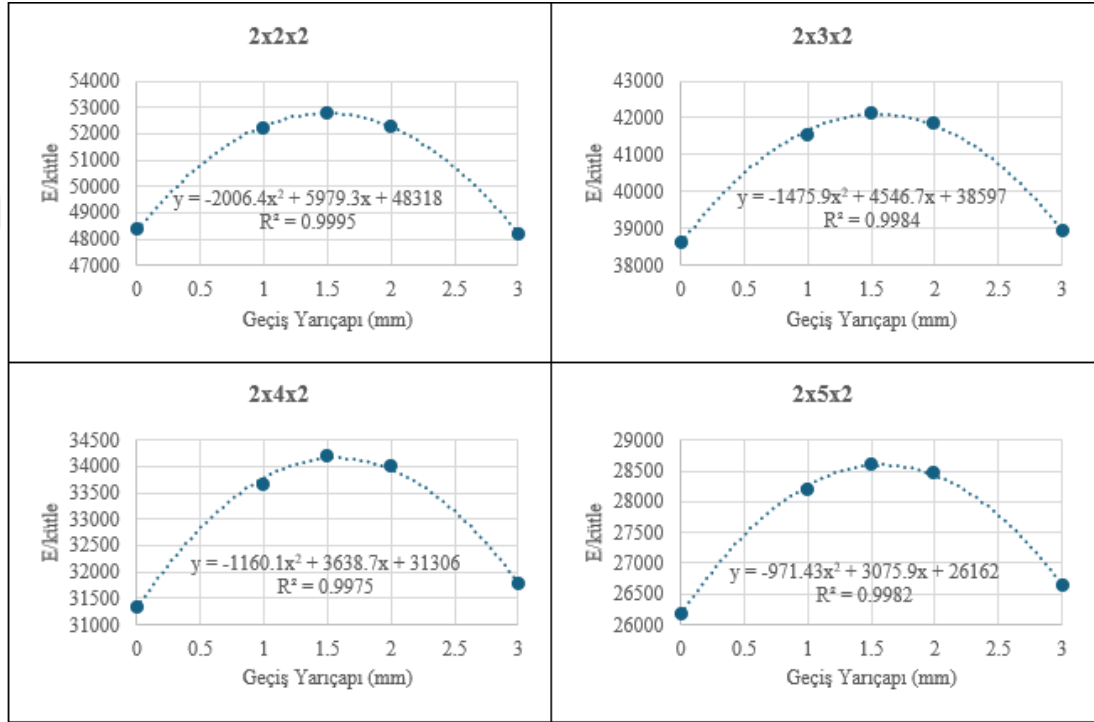


Şekil 4.3 : 2x2x2 modelinde geçiş yarıçapının basma yükü altındaki performansı.

En iyi performansın geçiş yarıçapının 1.5mm olduğu durumda görülmüştür. Optimal nokta grafiğin tepe yaptığı 1.5 mm değeridir.

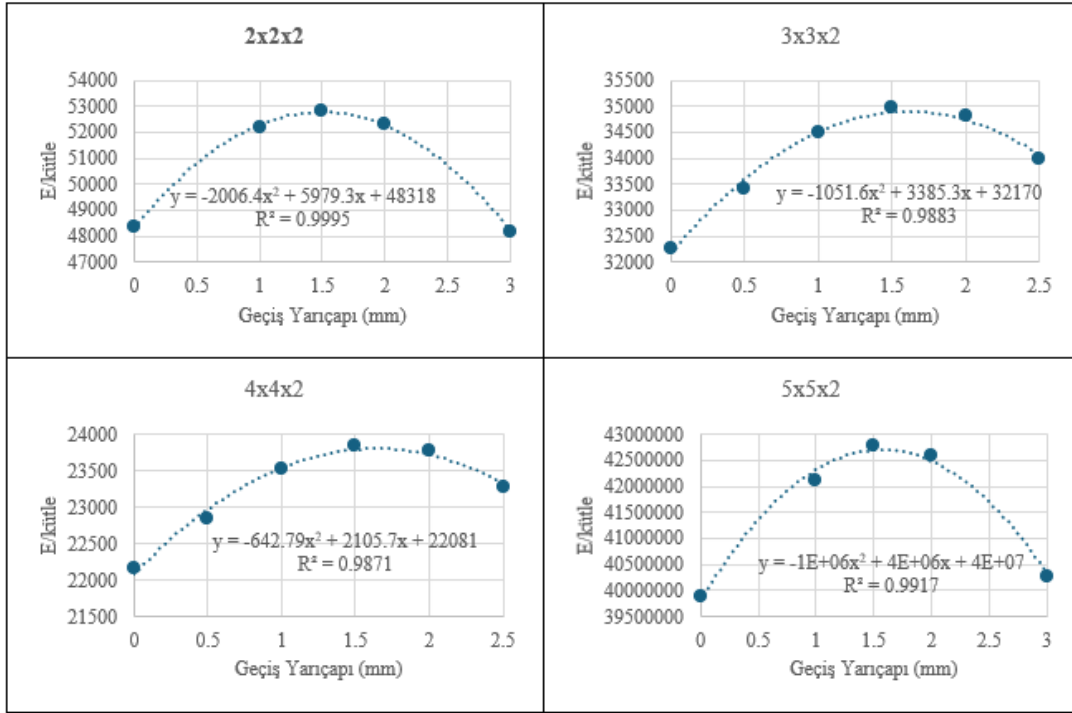
4.1.1 Hücre Sayısının Optimal Geçiş Yarıçapına Etkisi

Basma yükü altındaki sandviç yapıda optimal geçiş yarıçapının 2x2x2 boyutlarındaki modelde 1.5mm olduğunun görülmesinin ardından farklı boyutlardaki optimal geçiş değerleri incelenmiştir. Şekil 4.4'te iki eksendeki hücre sayısı sabit tutulmuşt olup diğer eksen de arttırılmıştır.



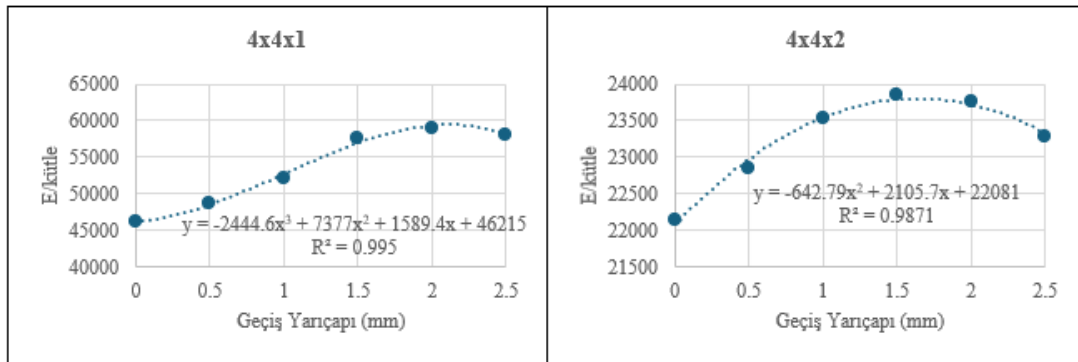
Şekil 4.4 : Farklı Ny değerlerinde geçiş yarıçapının basma yükü performansına etkisi.

Grafiklerde görüldüğü üzere hücre artışının optimal geçiş yarıçapı değerine etkisi ihmal edilebilir düzeydedir. Yine aynı çalışma bu sefer iki eksen de hücre sayıları değiştirilip tekrarlanmıştır. Sonuçlar Şekil 4.5'te detaylandırılmıştır.



Şekil 4.5 : Farklı N_y ve N_x değerlerinde geçiş yarıçapının basma yükü performansına etkisi.

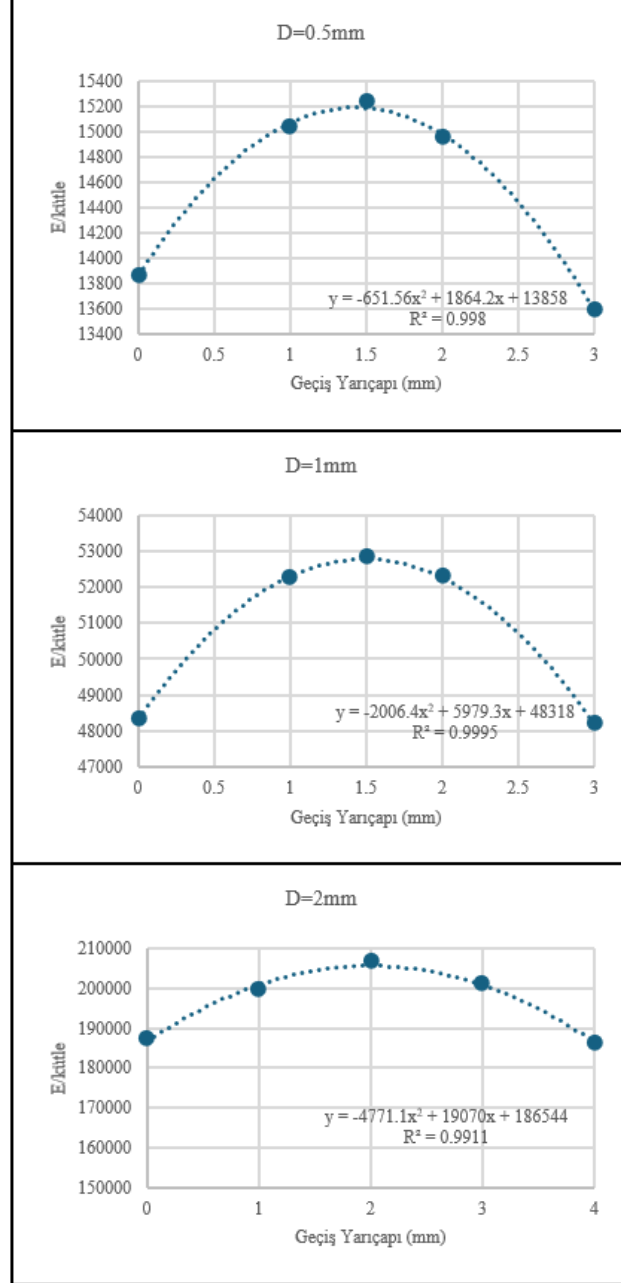
Yüksekliğin etkisinin incelenmesi amacıyla yatay eksenlerde 4'er hücre olan ve yükseklikte sırasıyla 1 ve 2 hücre olan modeller incelenmiştir ve sonuçlar Şekil 4.6'da yer almıştır. Optimal geçiş yarıçapının 4x4x1 modelinde 2mm civarında tepe yaptığı görülmektedir. Genel bir değerlendirme ile optimal geçiş yarıçapı aralığının 1.5mm ile 2mm arasında değiştiği görülmektedir.



Şekil 4.6 : Farklı N_z değerlerinde geçiş yarıçapının basma yükü performansına etkisi.

4.1.2 Kiriş Çapının Optimal Geçiş Yarıçapına Etkisi

Basma yükü altında yine aynı yöntem ile sandviç yapı performansı değişken kiriş çaplarında analiz edilmiştir. Sonuçlar Şekil 4.7’de gösterilmiştir.



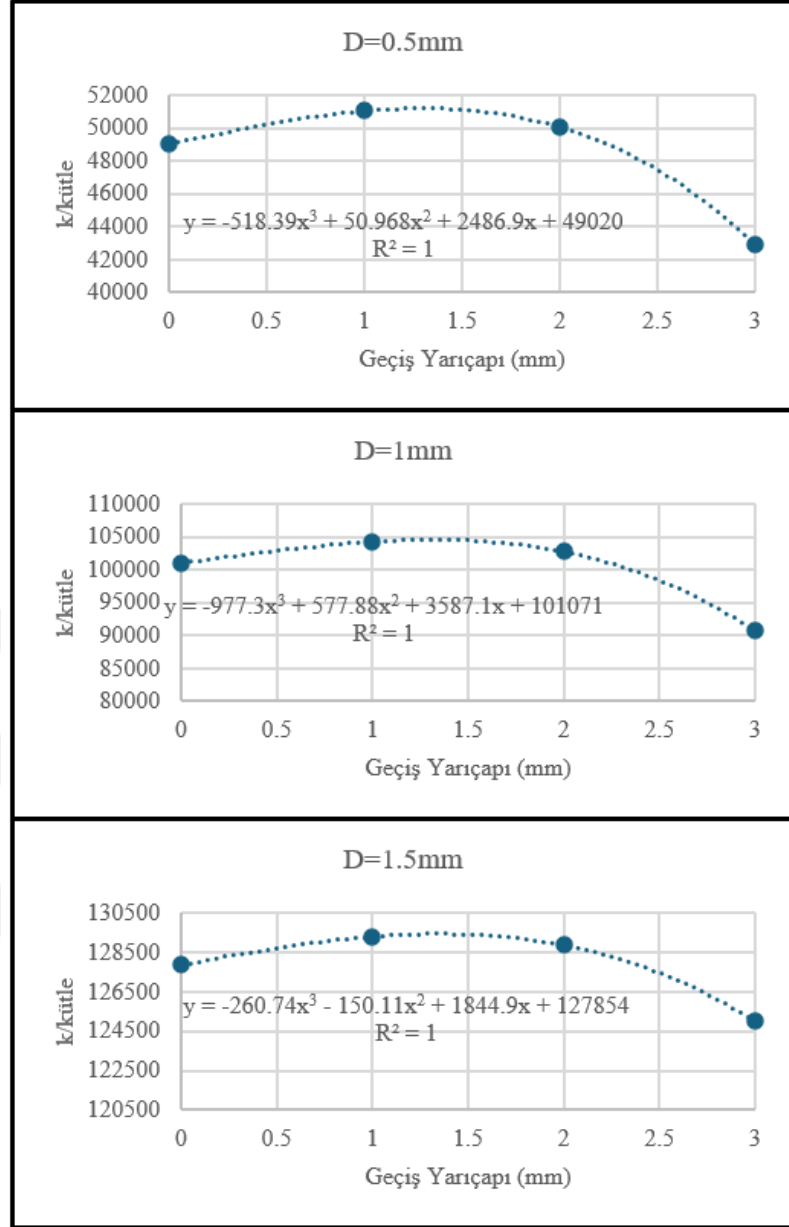
Şekil 4.7 : Farklı kiriş çap değerlerinde geçiş yarıçapının basma yükü performansına etkisi.

Sırasıyla 0.5mm, 1mm ve 2mm kiriş çap değerlerinde aynı şekilde analizler gerçekleştirilmiştir. Performansın tepe yaptığı noktalar geçiş yarıçapının ilk iki model için 1.5mm olduğu modelken, kiriş çapının 2mm olduğu durumda geçiş yarıçapının 2mm olduğu model en iyi performansı sergilemiştir. Bu sonuçlardan yola

ıkarak görece yoğunluğun nispeten az olduğu durumlarda geçiş yarıapı1.5 mm iken en iyi performans sergilenirken görece yoğunluk arttığı durumda optimal geçiş yarıçapı da artmaktadır.

4.2 Geçiş Yarıçapının Mekanik zelliklere Etkisinin Eğilme Altında İncelenmesi

Sandviç panel geometrisinin eğilme yükü altındaki performansı Bölüm 2.4.2’de açıklandığı üzere yapılmış olup sonuçlar model ağırlığına bölünerek bir performans kriteri yaratılmıştır. Yine aynı bölümde bertilen standart kapsamında numune boyutları belirlenmiş ve farklı çaplardaki performansları incelenmiştir. Sonuçlar şekil 4.8’de gösterilmiştir. ap değerleri değişmesine karşın optimal performans yine geçiş yarıçapının 1mm ve 2mm olduğu aralıkta gerçekleşmektedir. Dolayısıyla eğilme altındaki davranışı için optimal geçiş yarıçapı aralığının yaklaşık 1.5mm civarında olduğu düşünülmektedir.

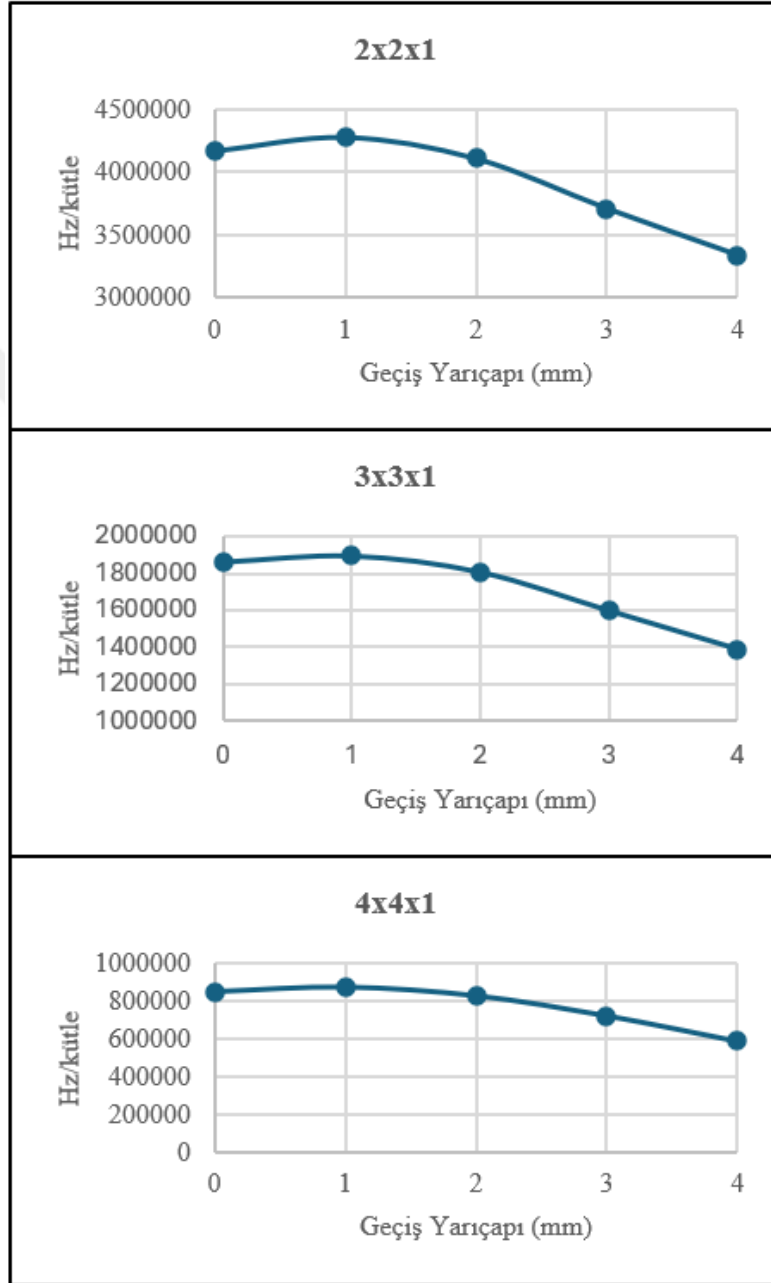


Şekil 4.8 : 5x12x1 boyutlarındaki modellerin farklı kiriş çap değerlerinde ve farklı geçiş yarıçapı değerlerinde eğilme performansına etkisi.

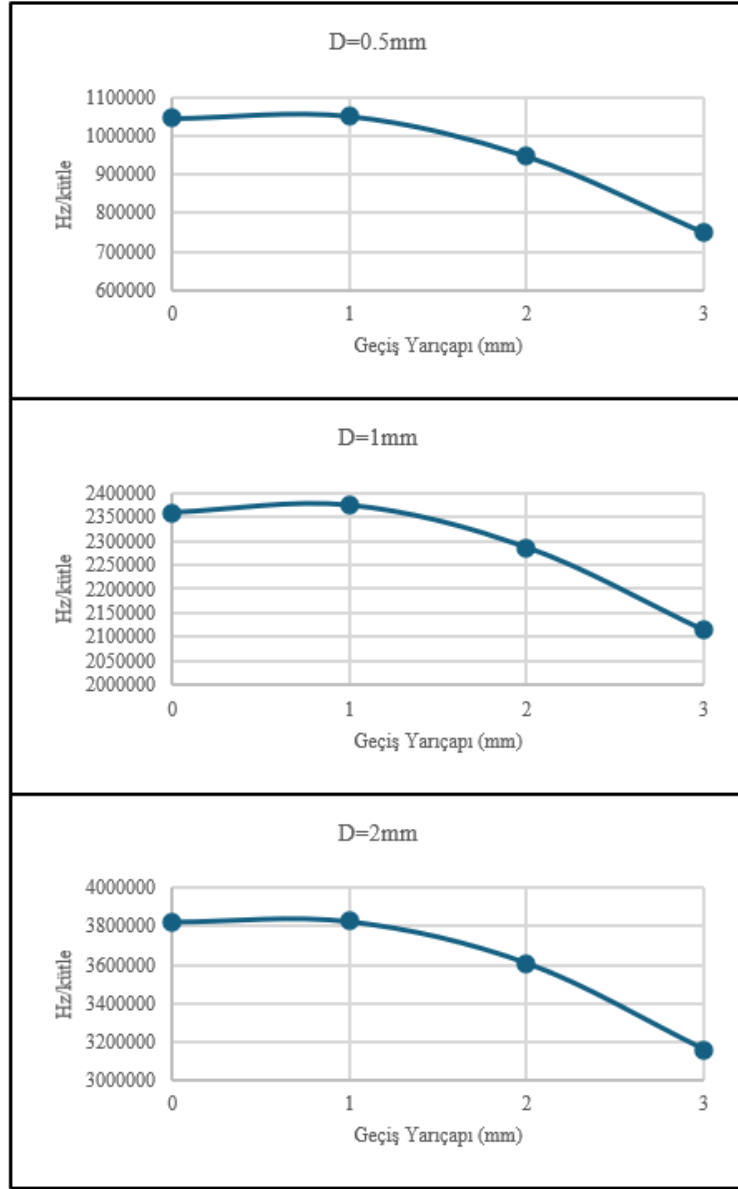
4.3 Geçiş Yarıçapının Titreşim Performansına Etkisi

Bir diğer incelenen koşul ise titreşim performansıdır. Bunun için farklı modeller herhangi bir sınır koşulu olmaksızın Bölüm 2.4.3'te açıklandığı gibi analiz edilmiştir. Yine basma ve eğilme altındaki gibi bir performans kriteri yaratılmıştır. Bunun için modelin en düşük doğal frekansını modelin ağırlığına bölerek bir performans kriteri oluşturulmuştur.

Şekil 4.9 'da görüldüğü üzere yükseklikte 1 hücrenin bulunduğu sandviç panellerde titreşim performansı benzer davranış göstermektedir. Geçiş yarıçapının 1mm olduğu durumda ne iyi performansı vermektedir. Bir diğer çalışmada ise farklı çap değerlerindeki performansı incelenmiş olup Şekil 4.10'da gösterilmektedir.



Şekil 4.9 : Farklı boyutlardaki modellerin farklı kiriş çap değerlerinde titreşim performansının incelenmesi.



Şekil 4.10 : 2x5x2 boyutlu numune için farklı kiriş çaplarında titreşim performansı.

Sonuçlar incelendiğinde kiriş çapının titreşim performansı analizinde optimal geçiş yarıçapı değerine bir etkisinin olmadığı görülmektedir. 3 farklı kiriş çapı değerine sahip model benzer performans eğrileri çizmiş ve yaklaşık 1mm geçiş yarıçapında en iyi performansı vermiştir.

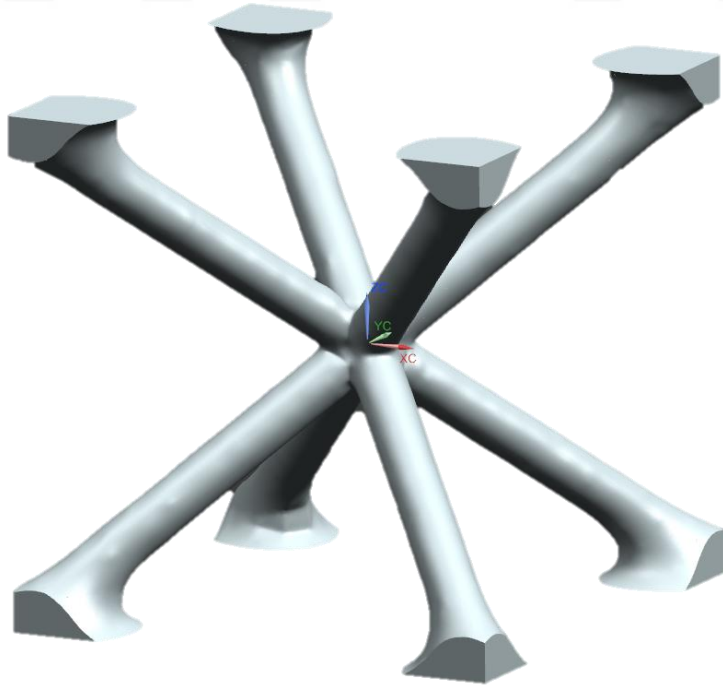


5. ÖNERİLEN GEÇİŞ YARIÇAPLI HMK HÜCRE İLE ANALİZ SONUÇLARI

Bölüm 4'teki incelemeler sonucunda geleneksel HMK hücre yerine geçiş yarıçapı olan bir birim hücre önerilmektedir. Bu birim hücre Bölüm 2.3'te açıklanan homojenizasyon işlemine tabi tutulup elde edilen homojenize mekanik özellikler sayesinde hesaplama maliyeti düşük sonuç veren bir yöntem tanımlanabilir.

5.1 Birim Hücre Geometrisinin Oluşturulması

Bölüm 4'teki sonuçlar ışığında geçiş yarıçapı değeri yaklaşık 1.5mm olan sandviç panellerin geleneksel HMK yapıdaki sandviç panellere kıyasla basma, eğilme ve titreşim altında daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Geçiş yarıçapının 1.5mm olduğu ve her ekseninde simetrik olan Geçişli Hacim Merkezli Kübik (GHMK) nTop ortamında modellenmiştir ve Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1 : GHMK birim hücre geometrisi ($L=10\text{mm}$, $D=1\text{mm}$, $r=1.5\text{mm}$).

5.2 GHMK Homojenizasyonu ve HMK Homojenize Özellikler ile Kıyaslaması

Önerilen bu GHMK hücre, Bölüm 2.3'te verilen yöntem ile homojenize edilmiş ve elastik modül 65GPa ve Poisson oranı 0.3 özelliğindeki malzeme kullanılarak Çizelge 5.1'deki sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 5.1 : 10mm hücre boyu ve 1mm kiriş çapı için homojenize edilen geleneksel HMK hücre ve yeni önerilen GHMK hücre homojenize malzeme özellikleri ($E=65\text{GPa}$, $\nu=0,3$, Gy: Görece Yoğunluk).

	HMK	GHMK
E	25	41
ν	0.49	0.46
G	410	520
Gy	5.0%	6.1%
E\Gy	505	672
G\Gy	8283	8525

GHMK homojenize malzeme özellikleri HMK homojenize malzeme özellikleri ile kıyaslandığında elastik modülde %64 artış meydana gelmiştir. Artan görece yoğunluk da hesaba katıldığında elastik modül performansı %33 artmıştır. Buna karşın kesme modülünün performansı %3 artmıştır.

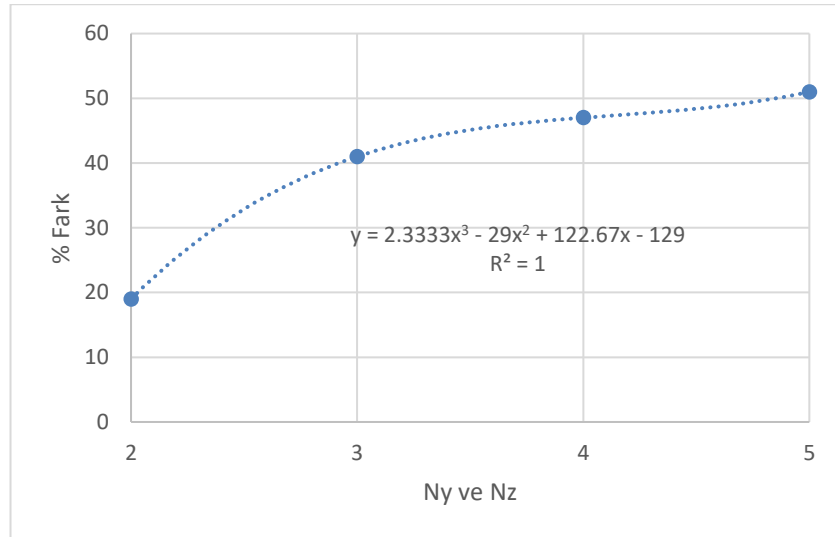
5.3 GHMK Çekirdekli Homojenize Eşlenik Modellerin Basma Yüğü Altında Katı Kafes Modele Göre Farklarının İncelenmesi

Katı Kafes Model ve Homojenize Eşlenik Model arasındaki basma yüğü altında farkların incelenmesi amacıyla 4 farklı model hem Katı Kafes Model olarak hem de Homojenize Eşlenik Model olarak modellenip analiz sonuçları ve farklar Çizelge 5.2'de yer almaktadır.

Çizelge 5.2 : GHMK çekirdekli yapılarda basma yükü altındaki Katı Kafes Model ile Homojenize Eşlenik Model Karşılaştırması.

		E (MPa)	Homojenize Eşlenik Model Fark
2x2x2	Katı Kafes Model	177	%19
	Homojenize Eşlenik Model	144	
3x3x2	Katı Kafes Model	264	%41
	Homojenize Eşlenik Model	157	
4x4x2	Katı Kafes Model	320	%47
	Homojenize Eşlenik Model	169	
5x5x2	Katı Kafes Model	358	%51
	Homojenize Eşlenik Model	176	
5x5x5	Katı Kafes Model	92	%11
	Homojenize Eşlenik Model	82	

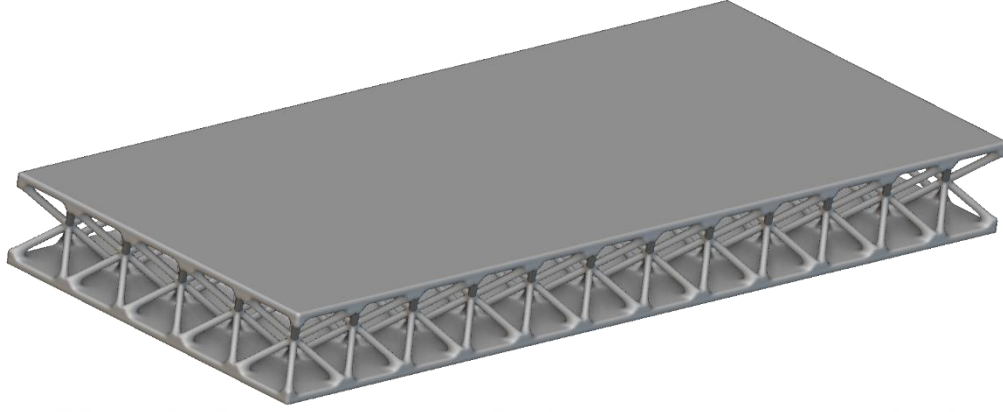
Basma yükü altındaki farklar model boyutu yatay eksenlerde büyüdükçe artmaktadır fakat giderek yakınsamaktadır. Bu yakınsama eğilimi Şekil 5.2’de yer almaktadır. Her ekseninde beşer hücre bulunduran 5x5x5 modelinde fark %11’e düşmektedir. Çizelge 5.3’te aynı boyutlarda HMK çekirdekli yapı incelenmiş olup fark %3 çıkmıştır. Bu da göstermektedir ki basma yükü altında homojenizasyon HMK çekirdek yapısına sahip modellerde daha hassas sonuç vermektedir.



Şekil 5.2 : GHMK çekirdekli yapılarda Katı Kafes Model ile Homojenize Eşlenik Model arasındaki farkların yatay eksenindeki hücre sayılarına göre değişimi.

5.4 GHMK Çekirdekli Homojenize Eşlenik Modellerin Eğilme Altında Katı Kafes Modele Göre Farklarının İncelenmesi

Eğilme analizleri için oluşturulan modellerden birisi Şekil 5.3'te gösterilmiştir.



Şekil 5.3 : 5x12x1 için oluşturulan model.

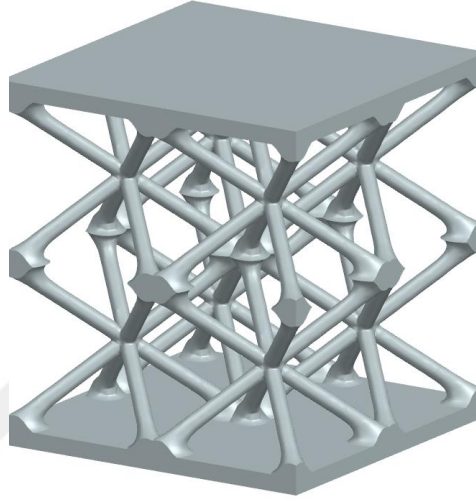
Basma yükü altındaki davranışına kıyasla homojenize eşlenik modelin doğruluk hassasiyeti eğilme altındaki deformasyon için daha yüksek. Farklar Çizelge 5.3'te yer almaktadır. Yükseklik ekseninde hücre sayısı arttıkça farklar artsa da yükseklikte bir hücre bulunan yapılarda fark oldukça düşük gelmekte ve bu da GHMK yapıdaki sandviç panellerin eğilme davranışının incelenmesinde homojenizasyonu önemli bir yöntem olarak göstermektedir.

Çizelge 5.3 : GHMK çekirdekli yapılarda eğilme altındaki Katı Kafes Model ile Homojenize Eşlenik Model Karşılaştırması.

		Maksimum Yer Değiştirme (mm)	Homojenize Eşlenik Model Fark
5x11x1	Katı Kafes Model	1.75E-03	%3
	Homojenize Eşlenik Model	1.70E-03	
5x12x1	Katı Kafes Model	2.25E-03	%4
	Homojenize Eşlenik Model	2.16E-03	
5x12x2	Katı Kafes Model	1.98E-03	%20
	Homojenize Eşlenik Model	2.47E-03	
5x12x3	Katı Kafes Model	2.81E-03	%13
	Homojenize Eşlenik Model	2.49E-03	

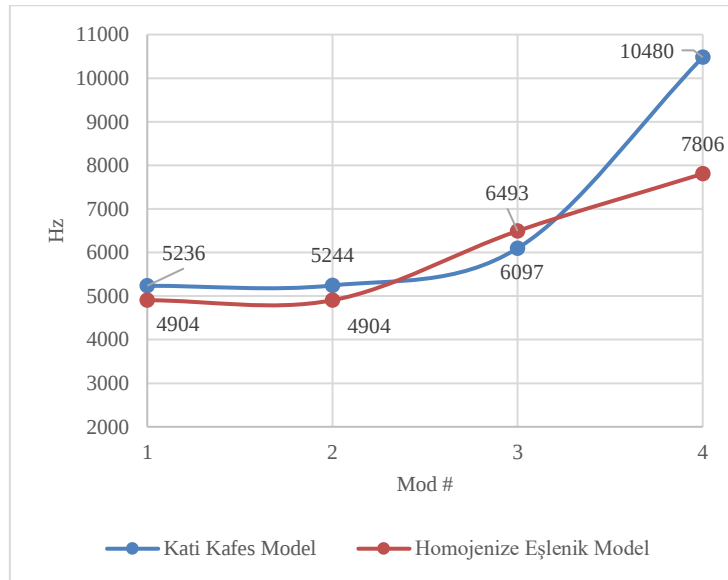
5.5 GHMK Çekirdekli Homojenize Eşlenik Modellerin Titreşim Performansının İncelenmesi

Titreşim performanslarının incelenmesi için daha önce HMK model için testte yapıldığı gibi 3 adet numune belirlenmiştir. Sonuçlar 2x2x2, 5x5x5 ve 10x10x2 için incelenmiş olup örnek bir model Şekil 5.4’te gösterilmiştir.

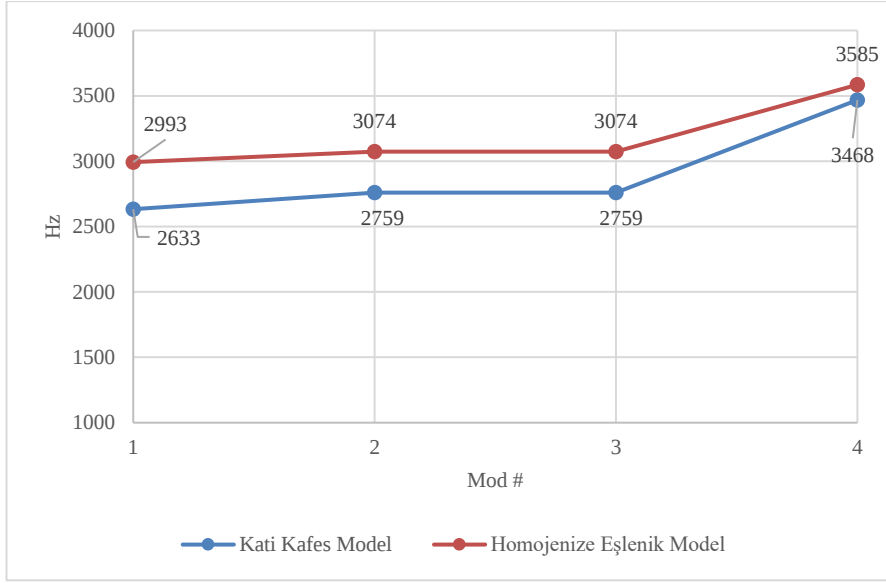


Şekil 5.4 : 2x2x2 boyutlarında GHMK yapıya sahip bir sandviç yapı.

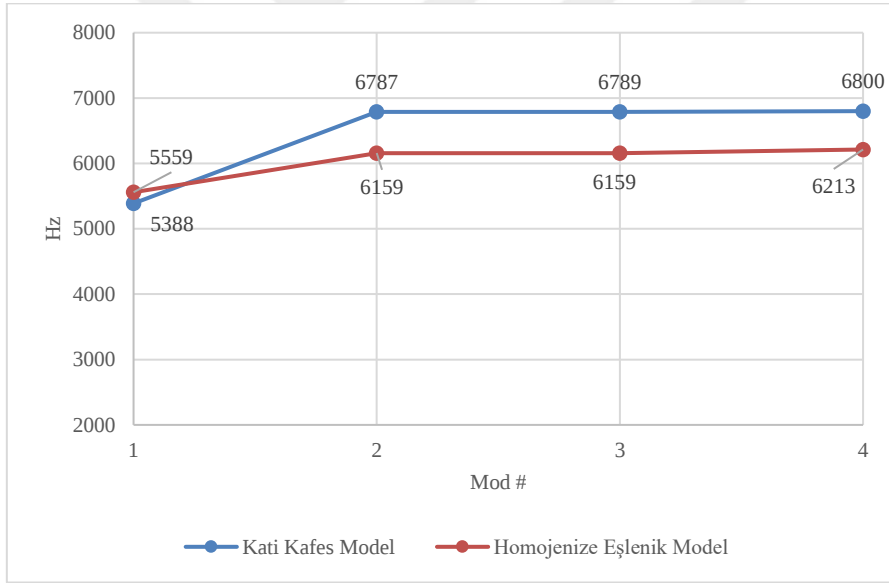
2x2x2, 5x5x5 ve 10x10x2 modelleri için titreşim analizi sonuçları sırasıyla Şekil 5.5, Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de verilmiştir.



Şekil 5.5 : 2x2x2 boyutlarında GHMK çekirdek yapıda sandviç panel için titreşim analizi sonuçları.



Şekil 5.6 : 5x5x5 boyutlarında GHMK çekirdek yapıda sandviç panel için titreşim analizi sonuçları.



Şekil 5.7 : 10x10x2 boyutlarında GHMK çekirdek yapıda sandviç panel için titreşim analizi sonuçları.

Sonuçlar ve yüzde farklar Çizelge 5.4'te listelenmiştir.

Çizelge 5.4 : 2x2x2, 5x5x5 ve 10x10x2 boyutlarında GHMK çekirdek yapıdaki sandviç yapıların titreşim analizi sonuçları.

Mod #	2x2x2			5x5x5			10x10x2		
	Kati Kafes Model	Homojenize Eşlenik Model	% Fark	Kati Kafes Model	Homojenize Eşlenik Model	% Fark	Kati Kafes Model	Homojenize Eşlenik Model	% Fark
1	5236	4904	%6	2633	2993	%-14	5388	5559	%-3
2	5244	4904	%6	2759	3074	%-11	6787	6159	%9
3	6097	6493	%-6	2759	3074	%-11	6789	6159	%9
4	10480	7806	%26	3468	3585	%-3	6800	6213	%9

Şekil 5.5, Şekil 5.6 ve Şekil 5.7 ve Çizelge 5.4 incelendiğinde homojenize eşlenik modelin farklı boyutlardaki sandviç yapılarda farklı davranışlar gösterdiği görülmektedir.

2x2x2 modelinde ilk 3 mod frekansları $\pm 6\%$ gibi düşük bir tolerans ile homojenize eşlenik model tarafından elde edilebilmiştir ve ilk iki mod için homojenize modelin daha konservatif olduğu görülmüştür. En düşük doğal frekans için fark 6% olduğundan dolayı bunun için homojenize eşlenik modelin kullanışlı alternatif bir yöntem olduğu kanısına varılmıştır.

5x5x5 modelinde diğer iki modele kıyasla ilk frekans için en büyük fark oranı gözlemlenmiş olsa da özellikle dördüncü mod frekansı için -3% fark ile oldukça yakın sonuçlar vermiştir.

10x10x2 boyutlu modelde homojenize model ile katı kafes model arasındaki farkın dört mod frekansı için de 10% altında geldiği görülmüştür. 2x2x2 boyutlu modeli referans alıp yatay eksenlerdeki hücre sayısı artırılarak elde edilen 10x10x2 modeli, model büyüdükçe genel olarak farkların azaldığını ve daha stabil bir davranış sergilediğini göstermektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, yapıların en düşük doğal frekansının belirlenmesinde, özellikle panel varyasyonlarda, yani yüksekliğin sabit kalıp yatay eksenlerde hücrelerin arttığı durumlarda, hatanın azaldığı gözlenmektedir.

6. DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER

Bu tezde HMK yapıdaki sandviç paneller statik ve titreşim analizleri ile farklı koşullarda incelenmiş, farklı sonlu elemanlar analizi yöntemleri ve deneyler ile karşılaştırmalar yapıp arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Ardından kirişlerin birbiri ile bağlandığı yerlerde bir geçiş yarıçapı oluşturup yeni bir hücre yapısı oluşturulmuş ve bu yapıya GHMK denmiştir. HMK için yapılan incelemeler GHMK için de yapılmış ve avantajlı olduğu noktalar açıklanmıştır.

6.1 HMK Yapının Titreşim ve Basma Altında İncelenmesi ve Deneyler ile Karşılaştırılması

- HMK yapıda çekirdeğe sahip sandviç yapılardan 3 farklı boyutta beşer adet numune üretilmiştir.
- Üretilen numunelerin mikro yapısının incelenmesi açısından tarama ve mikroskop altında inceleme gerçekleştirilmiştir ve numunelerin %5'ten daha az boşluk içerdiği görülmüş ve yüzey kalitesinin iyi olduğu gözlemlenmiştir.
- Bu numunelere Frekans Tepki Fonksiyonunu incelemek amaçlı çekiç-darbe titreşim testi yapılmıştır. Sonuçlar Katı Kafes Model ve Homojenize Eşlenik Model ile karşılaştırılmış ve farklar gösterilmiştir. Katı Kafes Model ile deney arasındaki farklar %10 civarında iken Homojenize Eşlenik Model için %15 dolaylarındadır.
- Numunelere basma testi uygulanmış ve elastik bölgedeki sonuçlar incelenmiştir. 2x2x2 ve 5x5x5 kendi aralarında tutarlı sonuçlar vermiş olup Katı Kafes Model ve Homojenize Eşlenik Model ile aralarındaki farklar genel itibari ile %10 civarlarındadır. 10x10x2 numunesinin sonuçları hem kendi arasında tutarsız olması hem de sonlu elemanlar sonuçları ile yüksek farklara sahip olması nedeniyle testin tekrar gerçekleştirilmesi gerektiğine karar verilmiştir.

6.2 Geçiş Yarıçapının Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi

- Kirişlerin yüzey plakası ile bağlandığı yerlerde bir geçiş yarıçapı uygulanmış ve farklı boyutlardaki modeller farklı geçiş yarıçapı değerleri ile incelenmiştir.
- Geçiş yarıçapı arttıkça mekanik özelliklerin arttığı fakat buna bağlı olarak ağırlığın da arttığı gözlenmiş olup bu yapıların performanslarını değerlendirebilmek için modellerin efektif özellikleri ağırlıklarına bölünerek bir performans kriteri elde edilmiştir.
- Bu çerçevede farklı boyutlarda modeller basma yükü altında incelenmiş ve genel olarak geçiş yarıçapının 1.5mm olduğu aralıkta en iyi performansı sergilemiştir.
- Aynı incelemeler üç nokta eğilme altında da incelenmiş ve optimal geçiş yarıçapının model boyutuna bağlı olarak 1 ila 1.5mm arasında değiştiği görülmüştür.
- Titreşim altında optimal geçiş yarıçapı incelenmiş ve genellikle 1mm civarında en iyi performansı verdiği saptanmıştır.

6.3 Önerilen Yeni GHMK Yapının Basma, Eğilme ve Titreşim Altında İncelenmesi

- Bu incelemeler ardından yeni bir kiriş bazlı kafes yapı hücresi önerilmiş ve HMK yapıdan türetildiği için geçişli HMK anlamında GHMK ismi verilmiştir.
- GHMK ile HMK hücre karşılaştırılıp homojenize özellikleri incelenmiştir. GHMK hücrenin ağırlığına kıyasla HMK hücreye göre %33 daha iyi homojenize elastik modüle sahip olduğu ve %3 daha iyi kesme modülüne sahip olduğu bulunmuştur.
- Oluşturulan bu yeni hücre ile modeller oluşturulup homojenize eşlenik modeller arasındaki farklar basma, eğilme ve titreşim yükleri altında incelenmiştir.
- Basma altında homojenize model yatay ekseninde hücrelerin arttığı durumda yüksek farklar verse de bu hataların %50 civarına yakınsadığı görülmüştür. Buna karşılık bütün eksenlerde hücrelerin arttığı durum da incelenmiş ve

farkın giderek azaldığı görülmüştür. 2x2x2 boyutunda fark %19 iken 5x5x5 boyutuna gelindiğinde %11'e kadar düşmüştür.

- ASTM C393/C393M-20 standardı baz alınarak eğilme davranışı için numuneler oluşturulmuş ve homojenize modelin yükseklikte bir hücre olduğu durumda %4 civarında farklar ile katı kafes modele yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.
- Titreşim analizi uygulanmış olup modellerin doğal frekansını bulmada homojenizasyonun ne kadar yakın sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Farklı boyutlardaki modellerde genellikle farkların %10 civarında olduğu görülmüştür.

6.4 Gelecek Çalışmaları ve Öneriler

- HMK hücrenin basma altındaki sonuçlarının değerlendirilmesi açısından 10x10x2 testinin yenilenmesi amaçlanmaktadır.
- HMK yapıdaki numunelere uygulanan testler GHMK yapıda sandviç yapıda numuneler üreterek tekrarlanmalıdır ve farklar incelenmelidir.
- Sandviç yapılar birçok alanda birçok farklı amaç için kullanılmaktadır ve bu tez çalışmasında bazı statik yükler ve titreşim altındaki davranışı incelenmiştir. Kesme, burulma davranışı, enerji emilimi, plastik deformasyon ve ısı transferi gibi birçok açıdan daha GHMK yapılar incelenebilir.



KAYNAKLAR

- [1] **Gibson, L. J., Ashby, M. F., & Harley, B. A.** (2010). *Cellular materials in nature and medicine* (1st ed.). Cambridge University Press.
- [2] **Schaedler, T. A., & Carter, W. B.** (2016). Architected Cellular Materials. In Annual Review of Materials Research (Vol. 46, Issue 1, pp. 187–210). Annual Reviews. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070115-031624>
- [3] **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. In Progress in Materials Science (Vol. 125, p. 100918). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2021.100918>
- [4] **Ma, Q., Rejab, M., Siregar, J., & Guan, Z.** (2021). A review of the recent trends on core structures and impact response of sandwich panels. In Journal of Composite Materials (Vol. 55, Issue 18, pp. 2513–2555). SAGE Publications. <https://doi.org/10.1177/0021998321990734>
- [5] **Jin, F.-L., Zhao, M., Park, M., & Park, S.-J.** (2019). Recent Trends of Foaming in Polymer Processing: A Review. In Polymers (Vol. 11, Issue 6, p. 953). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/polym11060953>
- [6] **Tarlochan, F.** (2021). Sandwich Structures for Energy Absorption Applications: A Review. In Materials (Vol. 14, Issue 16, p. 4731). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ma14164731>
- [7] **Lehmhus, D., Vesenjak, M., Schampheleire, S., & Fiedler, T.** (2017). From Stochastic Foam to Designed Structure: Balancing Cost and Performance of Cellular Metals. In Materials (Vol. 10, Issue 8, p. 922). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ma10080922>
- [8] **Pan, C., Han, Y., & Lu, J.** (2020). Design and Optimization of Lattice Structures: A Review. In Applied Sciences (Vol. 10, Issue 18, p. 6374). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/app10186374>
- [9] **Mazur, M., Leary, M., McMillan, M., Sun, S., Shidid, D., & Brandt, M.** (2017). Mechanical properties of Ti6Al4V and AlSi12Mg lattice structures manufactured by Selective Laser Melting (SLM). In Laser Additive Manufacturing (pp. 119–161). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100433-3.00005-1>
- [10] **Cao, X., Duan, S., Liang, J., Wen, W., & Fang, D.** (2018). Mechanical properties of an improved 3D-printed rhombic dodecahedron stainless steel lattice structure of variable cross section. In International Journal of Mechanical Sciences (Vol. 145, pp. 53–63). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.07.006>

- [11] **Xiao, D., Dong, Z., Li, Y., Wu, W., & Fang, D.** (2019). Compression behavior of the graded metallic auxetic reentrant honeycomb: Experiment and finite element analysis. In *Materials Science and Engineering: A* (Vol. 758, pp. 163–171). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.04.116>
- [12] **Pan, C., Han, Y., & Lu, J.** (2020). Design and Optimization of Lattice Structures: A Review. In *Applied Sciences* (Vol. 10, Issue 18, p. 6374). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/app10186374>
- [13] **Vasiliev, V. V., & Razin, A. F.** (2006). Anisogrid composite lattice structures for spacecraft and aircraft applications. In *Composite Structures* (Vol. 76, Issues 1–2, pp. 182–189). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2006.06.025>
- [14] **Panettieri, E., Boissin, E., Montemurro, M., Catapano, A., & Jalocha, D.** (2021). On the accuracy of a homogenized continuum model of lattice structures in modal analyses. In *Mechanics of Advanced Materials and Structures* (Vol. 29, Issue 27, pp. 6768–6785). Informa UK Limited. <https://doi.org/10.1080/15376494.2021.1985196>
- [15] **Park, K.-M., Min, K.-S., & Roh, Y.-S.** (2021). Design Optimization of Lattice Structures under Compression: Study of Unit Cell Types and Cell Arrangements. In *Materials* (Vol. 15, Issue 1, p. 97). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ma15010097>
- [16] **Tancogne-Dejean, T., & Mohr, D.** (2018). Elastically-isotropic truss lattice materials of reduced plastic anisotropy. In *International Journal of Solids and Structures* (Vol. 138, pp. 24–39). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2017.12.025>
- [17] **Wang, P., Bian, Y., Yang, F., Fan, H., & Zheng, B.** (2020). Mechanical properties and energy absorption of FCC lattice structures with different orientation angles. In *Acta Mechanica* (Vol. 231, Issue 8, pp. 3129–3144). Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1007/s00707-020-02710-x>
- [18] **Xiao, R., Li, X., Jia, H., Surjadi, J. U., Li, J., Lin, W., Gao, L., Chirarattananon, P., & Lu, Y.** (2021). 3D printing of dual phase-strengthened microlattices for lightweight micro aerial vehicles. In *Materials & Design* (Vol. 206, p. 109767). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109767>
- [19] **Frazier, W. E.** (2014). Metal Additive Manufacturing: A Review. In *Journal of Materials Engineering and Performance* (Vol. 23, Issue 6, pp. 1917–1928). Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z>
- [20] **DebRoy, T., Wei, H. L., Zuback, J. S., Mukherjee, T., Elmer, J. W., Milewski, J. O., Beese, A. M., Wilson-Heid, A., De, A., & Zhang, W.** (2018). Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. In *Progress in Materials Science* (Vol. 92, pp. 112–224). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>

- [21] **Yadroitsev, I., & Yadroitsava, I.** (2021). A step-by-step guide to the L-PBF process. In *Fundamentals of Laser Powder Bed Fusion of Metals* (pp. 39–77). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-824090-8.00026-3>
- [22] **Oliveira, J. P., LaLonde, A. D., & Ma, J.** (2020). Processing parameters in laser powder bed fusion metal additive manufacturing. In *Materials & Design* (Vol. 193, p. 108762). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108762>
- [23] **Gu, D., Shi, X., Poprawe, R., Bourell, D. L., Setchi, R., & Zhu, J.** (2021). Material-structure-performance integrated laser-metal additive manufacturing. In *Science* (Vol. 372, Issue 6545). American Association for the Advancement of Science (AAAS). <https://doi.org/10.1126/science.abg1487>
- [24] **Gu, D. D., Meiners, W., Wissenbach, K., & Poprawe, R.** (2012). Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms. In *International Materials Reviews* (Vol. 57, Issue 3, pp. 133–164). SAGE Publications. <https://doi.org/10.1179/1743280411y.0000000014>
- [25] **Kruth, J. P.** (1991). Material Increment Manufacturing by Rapid Prototyping Techniques. In *CIRP Annals* (Vol. 40, Issue 2, pp. 603–614). Elsevier BV. [https://doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)61136-6](https://doi.org/10.1016/s0007-8506(07)61136-6)
- [26] **Gibson, I., Stucker, B., & Rosen, D. W.** (2009). *Additive Manufacturing Technologies* [PDF]. doi:10.1007/978-1-4419-1120-9
- [27] **Samuel Clark Ligon, Robert Liska, Jürgen Stampfl, Matthias Gurr, and Rolf Mülhaupt** *Chemical Reviews* 2017 117 (15), 10212-10290 DOI: 10.1021/acs.chemrev.7b00074
- [28] **Das, S., Bourell, D. L., & Babu, S. S.** (2016). Metallic materials for 3D printing. In *MRS Bulletin* (Vol. 41, Issue 10, pp. 729–741). Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1557/mrs.2016.217>
- [29] **Blanco, I.** (2020). The Use of Composite Materials in 3D Printing. In *Journal of Composites Science* (Vol. 4, Issue 2, p. 42). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/jcs4020042>
- [30] **Chen, Z., Li, Z., Li, J., Liu, C., Lao, C., Fu, Y., Liu, C., Li, Y., Wang, P., & He, Y.** (2019). 3D printing of ceramics: A review. In *Journal of the European Ceramic Society* (Vol. 39, Issue 4, pp. 661–687). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.11.013>
- [31] **Milewski, J. O.** (2017). *Additive Manufacturing of Metals*. In Springer Series in Materials Science. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-58205-4>
- [32] **Zhang, Y., Li, S., Zhao, Y., Duan, W., Liu, B., Wang, T., & Wang, G.** (2021). Digital light processing 3D printing of AlSi10Mg powder modified by surface coating. In *Additive Manufacturing* (Vol. 39, p. 101897). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.101897>

- [33] **Turk, C., Zunko, H., Aumayr, C., Leitner, H., & Kapp, M.** (2019). Advances in Maraging Steels for Additive Manufacturing. In *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte* (Vol. 164, Issue 3, pp. 112–116). Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1007/s00501-019-0835-z>
- [34] **Ko, G., Kim, W., Kwon, K., & Lee, T.-K.** (2021). The Corrosion of Stainless Steel Made by Additive Manufacturing: A Review. In *Metals* (Vol. 11, Issue 3, p. 516). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/met11030516>
- [35] **Santecchia, E., Mengucci, P., Gatto, A., Bassoli, E., Defanti, S., & Barucca, G.** (2019). Cross-Contamination Quantification in Powders for Additive Manufacturing: A Study on Ti-6Al-4V and Maraging Steel. In *Materials* (Vol. 12, Issue 15, p. 2342). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ma12152342>
- [36] **Guo, L., Zhang, L., Andersson, J., & Ojo, O.** (2022). Additive manufacturing of 18% nickel maraging steels: Defect, structure and mechanical properties: A review. In *Journal of Materials Science & Technology* (Vol. 120, pp. 227–252). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.10.056>
- [37] **Guo, L., Zhang, L., Andersson, J., & Ojo, O.** (2022). Additive manufacturing of 18% nickel maraging steels: Defect, structure and mechanical properties: A review. In *Journal of Materials Science & Technology* (Vol. 120, pp. 227–252). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.10.056>
- [38] **Ziaee, M., & Crane, N. B.** (2019). Binder jetting: A review of process, materials, and methods. In *Additive Manufacturing* (Vol. 28, pp. 781–801). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.05.031>
- [39] **Sun, S., Brandt, M., & Easton, M.** (2017). Powder bed fusion processes. In *Laser Additive Manufacturing* (pp. 55–77). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100433-3.00002-6>
- [40] **Bhatt, P. M., Kabir, A. M., Peralta, M., Bruck, H. A., & Gupta, S. K.** (2019). A robotic cell for performing sheet lamination-based additive manufacturing. In *Additive Manufacturing* (Vol. 27, pp. 278–289). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.02.002>
- [41] **Ribeiro, K. S. B., Mariani, F. E., & Coelho, R. T.** (2020). A Study of Different Deposition Strategies in Direct Energy Deposition (DED) Processes. In *Procedia Manufacturing* (Vol. 48, pp. 663–670). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.05.158>
- [42] **Simchi, A., Petzoldt, F., & Pohl, H.** (2003). On the development of direct metal laser sintering for rapid tooling. In *Journal of Materials Processing Technology* (Vol. 141, Issue 3, pp. 319–328). Elsevier BV. [https://doi.org/10.1016/s0924-0136\(03\)00283-8](https://doi.org/10.1016/s0924-0136(03)00283-8)
- [43] **Agarwala, M., Bourell, D., Beaman, J., Marcus, H., & Barlow, J.** (1995). Direct selective laser sintering of metals. In *Rapid Prototyping Journal* (Vol. 1, Issue 1, pp. 26–36). Emerald. <https://doi.org/10.1108/13552549510078113>

- [44] **Kruth, J., Mercelis, P., Van Vaerenbergh, J., Froyen, L., & Rombouts, M.** (2005). Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. In *Rapid Prototyping Journal* (Vol. 11, Issue 1, pp. 26–36). Emerald. <https://doi.org/10.1108/13552540510573365>
- [45] **Zhang, L., Liu, Y., Li, S., & Hao, Y.** (2017). Additive Manufacturing of Titanium Alloys by Electron Beam Melting: A Review. In *Advanced Engineering Materials* (Vol. 20, Issue 5). Wiley. <https://doi.org/10.1002/adem.201700842>
- [46] **Yap, C. Y., Chua, C. K., Dong, Z. L., Liu, Z. H., Zhang, D. Q., Loh, L. E., & Sing, S. L.** (2015). Review of selective laser melting: Materials and applications. In *Applied Physics Reviews* (Vol. 2, Issue 4). AIP Publishing. <https://doi.org/10.1063/1.4935926>
- [47] **Alquaity, A. B. S., & Yilbas, B. S.** (2022). Investigation of Spatter Trajectories in an SLM Build Chamber under Argon Gas Flow. In *Metals* (Vol. 12, Issue 2, p. 343). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/met12020343>
- [48] **Liu, L., Chen, C., Zhao, R., Wang, X., Tao, H., Shuai, S., Wang, J., Liao, H., & Ren, Z.** (2021). In-situ nitrogen strengthening of selective laser melted Ti6Al4V with superior mechanical performance. In *Additive Manufacturing* (Vol. 46, p. 102142). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102142>
- [49] **Liverani, E., Toschi, S., Ceschini, L., & Fortunato, A.** (2017). Effect of selective laser melting (SLM) process parameters on microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel. In *Journal of Materials Processing Technology* (Vol. 249, pp. 255–263). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.05.042>
- [50] **Clare, A. T., Chalker, P. R., Davies, S., Sutcliffe, C. J., & Tsopanos, S.** (2007). Selective laser melting of high aspect ratio 3D nickel–titanium structures two way trained for MEMS applications. In *International Journal of Mechanics and Materials in Design* (Vol. 4, Issue 2, pp. 181–187). Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1007/s10999-007-9032-4>
- [51] **Duda, T., & Raghavan, L. V.** (2016). 3D Metal Printing Technology. In *IFAC-PapersOnLine* (Vol. 49, Issue 29, pp. 103–110). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.11.111>
- [52] **Kantareddy SNR, Roh BM, Simpson TW, Joshi S, Dickman C, Lehtihet EA.** (2016) Saving weight with metallic lattice structures: Design challenges with a real-world example. *Solid Free. Fabr. 2016 Proc. 27th Annu. Int. Solid Free. Fabr. Symp. - An Addit. Manuf. Conf. SFF 2016.* 2139–2154.
- [53] **Hands, C. H., du Plessis, A., Minnaar, N., Blakey-Milner, B. A., & Burger, E.** (2018). Can Additive Manufacturing Help Win the Race?. Preprints. <https://doi.org/10.20944/preprints201811.0040.v1>

- [54] **Murr, L. E., Martinez, E., Amato, K. N., Gaytan, S. M., Hernandez, J., Ramirez, D. A., Shindo, P. W., Medina, F., & Wicker, R. B.** (2012). Fabrication of Metal and Alloy Components by Additive Manufacturing: Examples of 3D Materials Science. In *Journal of Materials Research and Technology* (Vol. 1, Issue 1, pp. 42–54). Elsevier BV. [https://doi.org/10.1016/s2238-7854\(12\)70009-1](https://doi.org/10.1016/s2238-7854(12)70009-1)
- [55] **Rajan, K. M., Sahoo, A. K., Routara, B. C., Panda, A., & Kumar, R.** (2022). A review on various approaches of 3D printing of Ti-Alloy. In *Materials Today: Proceedings* (Vol. 62, pp. 3865–3868). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.532>
- [56] **Samal, S. K., Vishwanatha, H. M., Saxena, K. K., Behera, A., Nguyen, T. A., Behera, A., Prakash, C., Dixit, S., & Mohammed, K. A.** (2022). 3D-Printed Satellite Brackets: Materials, Manufacturing and Applications. In *Crystals* (Vol. 12, Issue 8, p. 1148). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/cryst12081148>
- [57] **Nunes, J. P., & Silva, J. F.** (2016). Sandwiched composites in aerospace engineering. In *Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering* (pp. 129–174). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100037-3.00005-5>
- [58] **Katunin, A., John, M., Jozsko, K., & Kajzer, A.** (2014). Characterization of quasi-static behavior of honeycomb core sandwich structures. *Modelowanie Inżynierskie*, 22(53), 78-84.
- [59] **Di Bella, G., Calabrese, L., & Borsellino, C.** (2012). Mechanical characterisation of a glass/polyester sandwich structure for marine applications. In *Materials & Design* (Vol. 42, pp. 486–494). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.06.023>
- [60] **Xiong, J., Ma, L., Wu, L., Wang, B., & Vaziri, A.** (2010). Fabrication and crushing behavior of low density carbon fiber composite pyramidal truss structures. In *Composite Structures* (Vol. 92, Issue 11, pp. 2695–2702). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2010.03.010>
- [61] **Ma, Q., Rejab, M., Siregar, J., & Guan, Z.** (2021). A review of the recent trends on core structures and impact response of sandwich panels. In *Journal of Composite Materials* (Vol. 55, Issue 18, pp. 2513–2555). SAGE Publications. <https://doi.org/10.1177/0021998321990734>
- [62] **Feng, Y., Qiu, H., Gao, Y., Zheng, H., & Tan, J.** (2020). Creative design for sandwich structures: A review. In *International Journal of Advanced Robotic Systems* (Vol. 17, Issue 3). SAGE Publications. <https://doi.org/10.1177/1729881420921327>
- [63] **Noor, A. K., Burton, W. S., & Bert, C. W.** (1996). Computational Models for Sandwich Panels and Shells. In *Applied Mechanics Reviews* (Vol. 49, Issue 3, pp. 155–199). ASME International. <https://doi.org/10.1115/1.3101923>

- [64] **Meo, M., Morris, A. J., Vignjevic, R., & Marengo, G.** (2003). Numerical simulations of low-velocity impact on an aircraft sandwich panel. In *Composite Structures* (Vol. 62, Issues 3–4, pp. 353–360). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2003.09.035>
- [65] **Abbadi, A., Koutsawa, Y., Carmasol, A., Belouettar, S., & Azari, Z.** (2009). Experimental and numerical characterization of honeycomb sandwich composite panels. In *Simulation Modelling Practice and Theory* (Vol. 17, Issue 10, pp. 1533–1547). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2009.05.008>
- [66] **Kintscher, M., Kärger, L., Wetzel, A., & Hartung, D.** (2007). Stiffness and failure behaviour of folded sandwich cores under combined transverse shear and compression. In *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* (Vol. 38, Issue 5, pp. 1288–1295). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2006.11.008>
- [67] **Haldar, A. K., Guan, Z. W., Cantwell, W. J., & Wang, Q. Y.** (2018). The compressive properties of sandwich structures based on an egg-box core design. In *Composites Part B: Engineering* (Vol. 144, pp. 143–152). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.03.007>
- [68] **Wang, B., Wu, L., Ma, L., Sun, Y., & Du, S.** (2010). Mechanical behavior of the sandwich structures with carbon fiber-reinforced pyramidal lattice truss core. In *Materials & Design* (1980-2015) (Vol. 31, Issue 5, pp. 2659–2663). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.11.061>
- [69] **Wadley, H.** (2003). Fabrication and structural performance of periodic cellular metal sandwich structures. In *Composites Science and Technology* (Vol. 63, Issue 16, pp. 2331–2343). Elsevier BV. [https://doi.org/10.1016/s0266-3538\(03\)00266-5](https://doi.org/10.1016/s0266-3538(03)00266-5)
- [70] **Bai, X., Liu, C., Zhang, C., Meng, X., Li, J., & Zhang, X.** (2022). A comprehensive study on the heat transfer characteristics of windward bend lattice frame structure. In *Propulsion and Power Research* (Vol. 11, Issue 3, pp. 376–390). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.jprr.2022.03.003>
- [71] **Cheng, G.-D., Cai, Y.-W., & Xu, L.** (2013). Novel implementation of homogenization method to predict effective properties of periodic materials. In *Acta Mechanica Sinica* (Vol. 29, Issue 4, pp. 550–556). Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1007/s10409-013-0043-0>
- [72] **Toledano, A., & Murakami, H.** (1987). A high-order mixture model for periodic particulate composites. In *International Journal of Solids and Structures* (Vol. 23, Issue 7, pp. 989–1002). Elsevier BV. [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(87\)90092-8](https://doi.org/10.1016/0020-7683(87)90092-8)
- [73] **Wu, M., Liu, J., Lv, X., Shi, D., & Zhu, Z.** (2018). A study on homogenization equations of fractal porous media. In *Journal of Geophysics and Engineering* (Vol. 15, Issue 6, pp. 2388–2398). Oxford University Press (OUP). <https://doi.org/10.1088/1742-2140/aac4c1>

- [74] **Torquato, S.** (2002). *Random heterogeneous materials: microstructure and macroscopic properties* (Vol. 16). New York: Springer.
- [75] **Geers, M. G. D., Kouznetsova, V. G., & Brekelmans, W. A. M.** (2010). "Multi-scale computational homogenization: Trends and challenges." *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 234(7), 2175-2182.
- [76] **Yang, H., Abali, B. E., Müller, W. H., Barboura, S., & Li, J.** (2022). Verification of asymptotic homogenization method developed for periodic architected materials in strain gradient continuum. In *International Journal of Solids and Structures* (Vol. 238, p. 111386). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2021.111386>
- [77] **Cappelli, L., Montemurro, M., Dau, F., & Guillaumat, L.** (2018). Characterisation of composite elastic properties by means of a multi-scale two-level inverse approach. In *Composite Structures* (Vol. 204, pp. 767–777). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.08.007>
- [78] **Kohsaka, K., Ushijima, K., & Cantwell, W. J.** (2021). Study on vibration characteristics of sandwich beam with BCC lattice core. In *Materials Science and Engineering: B* (Vol. 264, p. 114986). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2020.114986>
- [79] **Refai, K., Montemurro, M., Brugger, C., & Saintier, N.** (2019). Determination of the effective elastic properties of titanium lattice structures. In *Mechanics of Advanced Materials and Structures* (Vol. 27, Issue 23, pp. 1966–1982). Informa UK Limited. <https://doi.org/10.1080/15376494.2018.1536816>
- [80] **Marmier, A., Lethbridge, Z. A., Walton, R. I., Smith, C. W., Parker, S. C., & Evans, K. E.** (2010). ElAM: A computer program for the analysis and representation of anisotropic elastic properties. *Computer Physics Communications*, 181(12), 2102-2115.
- [81] **Zohdi, T. I., & Wriggers, P.** (2008). *An introduction to computational micromechanics*. Springer Science & Business Media.
- [82] **Hossain, U., Ghouse, S., Nai, K., & Jeffers, J. R. T.** (2021). Mechanical and morphological properties of additively manufactured SS316L and Ti6Al4V micro-struts as a function of build angle. In *Additive Manufacturing* (Vol. 46, p. 102050). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102050>