



**3B BASKIYLA ÜRETİLMİŞ BİYO-ESİNLİ BADEM ŞEKLİNDEKİ
GÖZENEKLİ YAPILARIN TASARIMI VE BASMA DAYANIMLARININ
ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nilkan GÖRAL

Danışman

**Dr. Öğr. Üyesi Nihal YUMAK
MAKİNE EĞİTİMİ ANA BİLİM DALI**

Ağustos 2024

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**3B BASKIYLA ÜRETİLMİŞ BİYO-ESİNLİ BADEM ŞEKLİNDEKİ
GÖZENEKLİ YAPILARIN TASARIMI VE BASMA
DAYANIMLARININ ARAŞTIRILMASI**

Nilkan GÖRAL

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Nihal YUMAK

MAKİNE EĞİTİMİ ANA BİLİM DALI

Ağustos 2024

TEZ ONAY SAYFASI

Nilkan GÖRAL tarafından hazırlanan “Tez Onay Sayfası” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 02/08/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Eğitimi Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Nihal YUMAK

Başkan : Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Üye : Doç. Dr. Ali ERÇETİN
Bandırma Onyediy Eylül Üniversitesi, Denizcilik Fakültesi

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
..... /..... /..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....

Prof. Dr. Bekir YALÇIN

Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

02/08/2024

Nilkan GÖRAL

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

3B BASKIYLA ÜRETİLMİŞ BİYO-ESİNLİ BADEM ŞEKLİNDEKİ GÖZENEKLİ YAPILARIN TASARIMI VE BASMA DAYANIMLARININ ARAŞTIRILMASI

Nilkan GÖRAL

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Eğitimi Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Nihal YUMAK

Bu araştırmada, badem meyvesi referans alınarak gözenekli malzeme üretimi için birim hücre tasarlanmıştır. Gözenekli malzemeler, birim hücre boyutu sabit tutularak farklı duvar kalınlıklarında (1, 1,4 ve 1,8 mm), duvar kalınlığının parça boyunca değişmediği sabit ve kademeli olarak değiştiği değişken gözenekli olmak üzere 6 farklı tipte tasarlanmıştır. Tasarlanan bu yapı tiplerinin birim hücre geometrisine yükleme yönünde bir dikme eklenerek yapı sayısı 12 adede çıkarılmıştır. Her yapıdan 3 adet olmak üzere toplamda 36 numune üretilmiştir. Üretilen numunelere 100 kN kapasiteli basma test cihazında 2 mm/dakika yükleme hızında basma testleri uygulanmıştır. Yapılan testlerde değişken duvar kalınlığının ve dikey yönde eklenen dikmenin malzemenin basma dayanımına ve basma testi sırasındaki deformasyon davranışlarına etkisi araştırılmıştır. Badem meyvesinin kavisli ve kendine özgü yapısı referans alınarak tasarlanan birim geometri malzemenin basma özellikleri ve deformasyon davranışları üzerinde belirleyici olmuştur. Değişken gözenek yapısına sahip numunelerde sabit gözenekli numunelerden farklı olarak deformasyonun hücrelerin birleşme noktalarında olduğu ve kademeli olarak ilerlediği gözlemlenmiştir. Birim hücre geometrisine yükleme yönünde eklenen bir dikmeyle ise tüm numunelerde basma dayanımı artmıştır.

2024, xvi + 154 sayfa

Anahtar Kelimeler: 3B baskı, biyo-esinli geometri, badem gözenek şekli, gözenekli malzeme, basma dayanımı



ABSTRACT

M.Sc. Thesis

DESIGN AND INVESTIGATION OF COMPRESSIVE STRENGTH OF 3D-PRINTED BIO-INSPIRED ALMOND-SHAPED POROUS STRUCTURES

Nilkan GÖRAL

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Education

Supervisor: Asst. Prof. Nihal YUMAK

In this research, a unit cell was designed for the production of porous materials, taking the almond fruit as a reference. Porous materials are designed in a total of 6 types with the same unit cell size and different wall thicknesses (1, 1.4, and 1.8 mm) as constant and variable porous. A strut was added to the unit cell geometry of these designed structure types in the loading direction, increasing the number of structures to 12. A total of 36 samples were produced, 3 from each structure. Compression tests were applied to the produced samples in a 100 kN capacity compression test device at a loading rate of 2 mm/min. In the tests carried out, the effect of variable wall thickness and vertical struts on the compressive strength of the material and deformation behavior during the compression test was investigated. The unit geometry, designed with reference to the curved and unique structure of the almond fruit, has been decisive on the compression properties and deformation behavior of the material. It has been observed that in samples with variable pore structure, unlike samples with constant pores, deformation occurs at the junctions of the cells and progresses gradually. With a strut added to the unit cell geometry in the loading direction, the compressive strength increased in all samples.

2024, xvi + 154 pages

Keywords: 3D printing, bio-inspired geometry, almond pore shape, porous material, compression strength



TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Nihal YUMAK, araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca manevi desteklerinden dolayı eşime ve aileme teşekkür ederim.

Nilkan GÖRAL
Afyonkarahisar 2024

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
RESİMLER DİZİNİ.....	xvi
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	5
2.1. Doğadan Esinlenme Yöntemleri	5
2.1.1. Biyonik Tasarım Yaklaşımları.....	8
2.1.2. Biyomimetik Tasarım Yaklaşımları.....	9
2.1.3. Biyomimikri Tasarım Yaklaşımları	9
2.1.4. Doğadaki Tasarım Yaklaşımları; Fibonacci Serisi ve Altın Oran	13
2.2. Hücresel Gözenekli Yapılar	17
2.2.1. Birim Hücre Gözenek Yapısı.....	18
2.2.2. Hücresel Gözenekli Yapı Sınıfları	21
2.2.3. Hücresel Kafes Yapılar.....	26
2.2.4. Kafes Yapıların Mekanik Özellikleri	27
2.3. Eklemeli İmalat	33
2.3.1. Eklemeli İmalat Gelişim Süreci	34
2.3.2. Eklemeli İmalat Çeşitleri.....	37
2.3.3. Eriyik Yığılma Modelleme (EYM)	39
2.3.4. EYM İmalat Yönteminde İşlem Parametreleri	40

2.4. Literatürdeki Biyo-Esinle Tasarlanmış Gözenekli Benzer Yapı Tasarım Çalışmaların Araştırılması Ve İncelenmesi	42
3. YÖNTEM VE MATERYAL.....	48
3.1. Biyomimikri Tabanlı Model Önerisinin Gelişim Süreci	48
3.1.1. Problem Tanımı:	49
3.1.2. Biyomimetik Problem Tanımı:	51
3.1.3. Analoji Kaynağını Belirleme:	51
3.1.4. Soyutlama-soyut tasarım çözümleri:	54
3.1.5. Çözüm Aktarımı:.....	58
3.1.6. Değerlendirme ve Tekrarlama:	58
3.2. Biyomimikrinin Tasarım Problemine Uygulanması	58
3.2.1. Önerilen Badem Kabuğu Modelin Pomolojik Özellikleri.....	59
3.3. Önerilen Modelin Tasarım Parametreleri ve Tasarım Süreci	61
3.3.1. Birim Hücre Yapı Tasarımı	62
3.3.2. Birim Hücre Kafes Örüntü Konumu ve Yönünün Belirlenmesi.....	68
3.3.3. Kafes Oluşum Tasarımı.....	70
3.3.4. Kolon Kalınlığının Oluşturulması.....	73
3.4. Numune Yapı Tasarımları	74
3.4.1. Ön İmalat Üretimi ve Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesi	78
3.4.2. Tasarlanan Katı Model Çeşitleri	82
3.4.2.1. Sabit (Periyodik) Gözenekli Yapı Tasarımı.....	83
3.4.2.2. Değişken Gözenekli Yapı Tasarımı	84
3.4.2.3. Sabit Gözenekli Y Eksenî Yönünde Bir Dikmenin Eklendiği Yapı Tasarımı	86
3.4.2.4. Değişken Gözenekli Y Eksenî Yönünde Bir Dikmenin Eklendiği Yapı Tasarımı.....	88
3.5. Eklemeli İmalat ile Üretim	89

3.5.1. Malzeme Seçimi ve Özellikleri.....	89
3.5.2. Üretim Değişkenleri	90
3.5.3. Önerilen Modelin Üretimi	90
3.6. Deneysel Çalışmalar	92
3.6.1. Deney Düzenegi.....	92
3.6.2. Numunelerin Hazırlanması	93
4. BULGULAR.....	95
4.1. Sabit Gözenekli Yapıların (SG) Basma Durumunda Mekanik Performansları	97
4.2. Değişken Gözenekli (DG) Yapıların Basma Durumunda Mekanik Performansları.....	102
4.3. Sabit Gözenekli Y Eksenli Takviyeli (SG_Y) Yapıların Basma Durumunda Mekanik Performansları	108
4.4. Değişken Gözenekli Y Eksenli Takviyeli (DG_Y) Yapıların Basma Durumunda Mekanik Performansları	114
5. TARTIŞMA.....	121
5.1. Deneysel Sonuçların Tartışılması	121
5.2. Deformasyon Davranışları Sonuçlarının Tartışılması.....	131
6. SONUÇ	139
7. KAYNAKLAR.....	143

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

a	Badem kabuğunun boyu
b	Badem kabuğunun genişliği
c	Badem kabuğunun kalınlığı
P	Badem kabuğunun kırılması için uygulanan yük ve yönü
EE	Yer değiştirmeye bağlı depolanan enerji
ε	Birim şekil değiştirme
σ	Gerilme
SEE	Spesifik enerji Emilimi
m	Kütle

Kısaltmalar

3D	Üç boyutlu yazıcılar
BFHY	Badem Formlu Hücresel Yapı
DG_	Değişken gözenekli yapı
DG_Y	Değişken gözenekli Y eksen yönünde bir dikmenin eklendiği yapı
Eİ	Eklemeli İmalat
EİT	Eklemeli İmalat Teknolojisi
EYM	Eriyik Yığılma Modelleme
SG_	Sabit gözenekli yapı
SG_Y	Sabit gözenekli Y eksen yönünde bir dikmenin eklendiği yapı
STL	Standard Triangle Language

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Biyo-terimler.....	10
Şekil 2.2 Problemden Biyolojiye Tasarım Süreci	12
Şekil 2.3 Biyolojiden Uygulamaya Tasarım Süreci	12
Şekil 2.4 Altın oran üzerine yapılmış çalışmaların tarih çizelgesi	14
Şekil 2.5 Altın oranın çizgisel gösterimi.....	15
Şekil 2.6 Altın dikdörtgenin çizilmesi	16
Şekil 2.7 Altın dikdörtgenden elde edilen altın spiralın çizimi	16
Şekil 2.8 Yaygın olarak kullanılan bazı birim hücre yapılarına ait görseller.....	20
Şekil 2.9 Hücresel yapıların genel sınıflandırılması.....	22
Şekil 2.10 Hücre topolojisine göre hücresel yapılar, a) Açık gözenekli hücresel yapı, b) Kapalı gözenekli hücresel yapı, c) Hibrit hücresel yapı	23
Şekil 2.11 Hücresel yapıların genel sınıflandırılması.....	24
Şekil 2.12 Birim hücre türlerine ait görseller a) basit kübik hücre b) gövde merkezli kübik hücre, c) katkılı gövde merkezli kübik hücre, d) sekizli kafes hücresi, e) Gibson-Ashby hücresi, f) Wallach-Gibson hücresi.	25
Şekil 2.13 Geçişli yapı örnekleri; A) gözenekleri dereceleme yönünde boyut olarak kademeli olarak değişen heterojen yapı. B) kafes yapısının kalınlığı yukarıdan aşağıya doğru kademeli olarak geçiş yapan yapı	25
Şekil 2.14 Heterojen kafes ile homojen kafes arasındaki fark.	26
Şekil 2.15 Hücresel kafes yapıların elastik, plastik ve yoğunlaşma aşamalarındaki basma davranışları	29
Şekil 2.16 Yapıya yük uygulanması durumunda hücre duvarlarının gösterdiği davranış şekilleri a) Eğilme-baskın yapılar, b) uzama baskın yapılar	30
Şekil 2.17 Bükülme ve gerilmenin hakim olduğu yapıların deformasyon özelliklerini karşılaştıran gerilim ve gerinim eğrileri	31
Şekil 2.18 Eİ ile üretilen çeşitli medikal ve endüstriyel parçalar	35
Şekil 2.19 Eİ süreci aşamaları	36
Şekil 2.20 Eklemeli imalatın ASTM F42 standardına göre sınıflandırılması	38
Şekil 2.21 Eriyik yığılma yöntemi çalışma prensibi.....	40
Şekil 3.1 Hücresel yapı birim geometrisi yöntem süreci akış şeması.....	48
Şekil 3.2 Problemden Biyolojiye Tasarım Süreci	49
Şekil 3.3 Kemer şekillerindeki yükler ve gerilmeler	50
Şekil 3.4 asknature.org sitesi arama sonuçlarından bazılarının açıklama sayfası	52
Şekil 3.5 Badem kabuk katmanlarının gösterimi.	53

Şekil 3.6 Badem kabuğunun kırılma işlemi esnasında en fazla güce (P) gereksinim duyulan yön gösterimi.....	54
Şekil 3.7 Bademin pomolojik verilerine göre oluşturulan temel ABCD dikdörtgeni	55
Şekil 3.8 Badem meyvesinin dikiş yönündeki eğrisel geometrik şekli ve Spiral benzeşmesi.....	56
Şekil 3.9 Bademin kendine özgü eğrisel dikiş çizgisi ve spiral benzeşmesi a) Altın orana göre oluşturulan “Fibonacci Spirali” ve badem eğriselliği b) Altın orana göre oluşturulan karelerin spirallerinin, bademin kendine özgü eğrisel ana hatlarının üzerine konumlanma durumları	57
Şekil 3.10 Bademin iki boyutlu profil görüntüsü ve boyutların isimlendirilmesi.....	62
Şekil 3.11 BFHY birim geometrisi çizim aşamaları.....	65
Şekil 3.12 BFHY birim geometrisi nihai tasarım görselleri a) ölçülü tasarım görseli b) ölçüsüz tasarım görseli	66
Şekil 3.13 BFHY birim geometrisi ile badem çeşitleri uyumluluk kontrolü.	67
Şekil 3.14 Altuntaş vd. (2010) tarafından yapılan çalışmada sıkıştırma eksen ve hızın badem kabuğunun kopma kuvvetine (N) etkisi grafiği.	68
Şekil 3.15 Altuntaş vd. (2010) tarafından yapılan çalışmada sıkıştırma eksenleri ve yönleri	69
Şekil 3.16 Aydın (2003) tarafından yapılan çalışmada sıkıştırma eksen ve hızın badem kabuğunun kopma kuvvetine (N) etkisi.	69
Şekil 3.17 Tasarlanan BFHY geometrisinin örüntü oluşturma konumlanma yönü	70
Şekil 3.18 Hacimsiz bölüm dairesi gösterimi.....	70
Şekil 3.19 a) Birim hücre yerleşimi, b) Yardımcı eksen çizgisinin yönü ve oluşumu, c) Yardımcı eksen çizgisi üzerinde birim hücrenin çoğaltılması	71
Şekil 3.20 a) İkinci yardımcı eksen çizgisinin yönü ve oluşumu, b) İkinci yardımcı eksen çizgisi üzerinde birim hücrenin çoğaltılması	72
Şekil 3.21 Müstakil her bir hücre yapısının bölüm daireleri tutunma noktası esas alınarak a) Y yönlü çoğaltılması b) X yönlü çoğaltılması c) X ve Y yönlü çoğaltılmaların izometrik görünüşü	73
Şekil 3.22 Hücre duvarı kalınlığı verilerek hacim kazandırılmış hücre geometrisi	74
Şekil 3.23 ASTM D695 standarda ait basma testi numune ölçüleri.....	75
Şekil 3.24 Hacimli tüp yapısının gösterimi.....	76
Şekil 3.25 X ve Y koordinat eksenleri boyunca homojen bir şekilde düzenli olarak çoğaltılan yapı gösterimi	76
Şekil 3.26 Numune boyutları dışına taşan kısımları kesilerek düzeltilmiş yapı.	77
Şekil 3.27 Modelin alt ve üst kısmına plaka şeklinde kabuklar eklenmiş halinin gösterimi.	77
Şekil 3.28 Tasarlanan ilk numune gösterimi a) Birim hücre ve ölçüleri b) Birim hücreye göre oluşturulan katı model detayı c) Katı modelin ön görünüşü	78

Şekil 3.29 ASTM D695 standartlarında dıştan dışa ölçüleri 25,4x12,7x12,7 mm ve hücre duvarı (kolon) kalınlığı 0,4 mm olarak Eİ metodu ile üretilen ilk numune görüntüleri.....	79
Şekil 3.30 ASTM D695 standart ölçülerinde 3:1 ölçülerinde büyütme yapılmış basma testi numune ölçüleri.....	79
Şekil 3.31 Ön imalat sonrasında değerlendirilerek belirlenen revize edilmiş birim hücre ölçüleri.....	80
Şekil 3.32 Üç farklı hücre duvarı kalınlığı değeri verilerek hacim kazandırılmış hücre geometrisi gösterimi; a) 1 mm hücre duvarına sahip geometri, b) 1,4 mm hücre duvarına sahip geometri c) 1,6 mm hücre duvarına sahip geometri, ...	81
Şekil 3.33 Oluşan tam hücre, yarım hücre ya da kısmi hücre yapıların gösterimi.....	81
Şekil 3.34 Tasarımlar için kullanılan kodlama sistemi örnek açıklaması.....	83
Şekil 3.35 Önerilen modelin sabit (periyodik) gözenekli yapı tasarım çeşitleri ve oluşturulan katı modelleri.....	84
Şekil 3.36 Değişken gözenekli yapının kafes tasarımı görüntüsü.....	85
Şekil 3.37 Oluşturulan değişken ve geçişli gözenekli yapı çeşitleri toplu gösterimi	85
Şekil 3.38 İlave kolon eklemesi gösterimi a) Basma kuvveti eksenine dik olacak şekilde eklenen ilave kolonunu gösterimi b) Kolon ilavesinin oluşturulduğu eksenin gösterimi.....	86
Şekil 3.39 Yapılan yuvarlatma işleminin gösterimi	87
Şekil 3.40 Oluşturulan sabit gözenekli ve Y eksenı yönünde bir dikmenin eklendiğı yapı çeşitleri toplu gösterimi.....	87
Şekil 3.41 Oluşturulan değişken gözenekli ve Y eksenı yönünde bir dikmenin eklendiğı yapı çeşitleri toplu gösterimi	88
Şekil 3.42 Ultimaker Cura yazılımı ara yüz görüntüleri.....	89
Şekil 3.43 Üretilen numunelerin imalat sırasındaki görüntüleri	91
Şekil 3.44 Üretim işlemi sonucunda elde edilen parçaların resimleri	91
Şekil 3.45 Basma test düzeneğı ve basma testleri sırasında oluşan hasarın görüntülenme düzeneğı, a) MTS 370.10 marka çekme-basma test cihazı, b) Nikon D90 marka fotoğraf makinası.....	92
Şekil 3.46 Değişken Gözenekli Model Yapısı yerleştirilme şekli.....	93
Şekil 4.1 SG yapıların basma testi sonuçlarına göre gerilme-birim şekil değıştirme grafiğı	98
Şekil 4.2 SG Yapıların elastik bölgedeki yer değıştirmeye bağılı depolanan enerji (EE) grafiğı	99
Şekil 4.3 SG yapıların basma testi sonucunda birim şekil değışimlerine göre deformasyon süreçleri	101
Şekil 4.4 DG yapıların basma testi sonuçlarına göre gerilme-birim şekil değıştirme grafiğı	103

Şekil 4.5 DG Yapıların elastik bölgedeki enerji Emilimi (EE) grafiği	105
Şekil 4.6 DG yapıların basma testi sonucunda birim şekil değişimlerine göre deformasyon süreçleri	107
Şekil 4.7 SG_Y yapıların basma testi sonuçlarına göre gerilme-birim şekil değiştirme grafiği,	109
Şekil 4.8 SG_Y Yapıların elastik bölgedeki enerji Emilimi (EE) grafiği	111
Şekil 4.9 SG_Y yapıların basma testi sonucunda birim şekil değişimlerine göre deformasyon süreçleri	113
Şekil 4.10 DG_Y yapıların basma testi sonuçlarına göre gerilme-birim şekil değiştirme grafiği,	115
Şekil 4.11 DG_Y Yapıların elastik bölgedeki enerji Emilimi (EE) grafiği.....	117
Şekil 4.12 DG_Y yapıların basma testi sonucunda birim şekil değişimlerine göre deformasyon süreçleri	118
Şekil 5.1 En düşük ve en yüksek akma gerilimine sahip numunelerin gerilme-birim şekil değiştirme grafiği.....	121
Şekil 5.2 Tüm yapıların akma dayanım değerleri grafiği	122
Şekil 5.3 Tüm yapıların ortalama elastisite modül değerleri grafiği	123
Şekil 5.4 Tüm yapıların ortalama gerilme değerlerine göre gerilme-birim şekil değiştirme grafiği	124
Şekil 5.5 Aynı hücre duvarı kalınlıklarına sahip, ancak farklı kafes yapılarında üretilen numunelerin grafikleri.....	126
Şekil 5.6 Yapılarda lokal kırılma sonucunda hücre formunun içinde mikro düzeyde oluşan üçgen kafes yapıların gösterimi	128
Şekil 5.7 Tüm yapıların, elastik bölgedeki kütleye bağlı spesifik enerji Emilimi grafiği	128
Şekil 5.8 SG yapılar ile SG_Y yapıların elastik bölgedeki kütleye bağlı spesifik enerji Emilimi karşılaştırılma grafiği	129
Şekil 5.9 DG yapılar ile DG_Y yapıların elastik bölgedeki kütleye bağlı spesifik enerji Emilimi karşılaştırılma grafiği	130
Şekil 5.10 Basma dayanımının kütleye oranı.....	130
Şekil 5.11 Parçaların basma etkisi altında görüntülenen deformasyon süreci ve deformasyon tiplerine ait görüntüler a) SG_1 numunesindeki deformasyon süreci ve tipi, b) SG_1,8 numunesindeki deformasyon süreci ve tipi, c) SG_Y_1,4 numunesindeki deformasyon süreci ve tipi, d) DG_Y_1-1,4 numunesindeki deformasyon süreci ve tipi,	132
Şekil 5.12 Badem geometrisinin gözenekli malzemenin deformasyon yapısına etkisi, a) Deformasyonun ilk aşamaları, b) Birbiri üzerine yığılarak deforme olan gözenekler.....	133

Şekil 5.13 SG_Y ve DG_Y yapılarda iç takviyelerde yaşanan kırılmanın yapıların ilerleyen deformasyon sürecindeki durum görüntüleri, a) SG_Y yapısındaki deformasyonun 0,10'luk aşama görüntüsü, b) SG_Y yapısındaki deformasyonun 0,50'lik aşama görüntüsü, c) DG_Y yapısındaki deformasyonun 0,10'luk aşama görüntüsü, d) SG_Y yapısındaki deformasyonun 0,50'lik aşama görüntüsü,..... 134

Şekil 5.14 Yapıların deformasyon yönlerinin çizgisel gösterimi 136



ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2-1 Literatürlerde ele alınan bazı yaygın birim hücre topolojileri.....	21
Çizelge 3-1 Bazı badem çeşitlerinin kabuklu meyve boyutları.....	60
Çizelge 3-2 Bazı badem çeşitlerinin kabuklu meyve boyutları.....	61
Çizelge 3-3 Çalışmada üretilen numune tipleri ve numuneler için kullanılan kodlama sistemi	82
Çizelge 3-4 Çalışma kapsamında kullanılan tüm işlem parametreleri	90
Çizelge 3-5 Üretilen numunelerin ağırlık yönünden kıyaslanması	94
Çizelge 4-1 SG Numunelerin mekanik performanslarına ait sayısal veriler	97
Çizelge 4-2 DG Numunelerin mekanik performanslarına ait sayısal veriler	103
Çizelge 4-3 SG_Y Numunelerin mekanik performanslarına ait sayısal veriler	109
Çizelge 4-4 DG_Y Numunelerin mekanik performanslarına ait sayısal veriler	114

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 2.1 Doğada Fibonacci spiriline uyan örnek gösterimler	17
Resim 2.2 Tasarım tarihinde fibonacci spiriline uyan örnek gösterimler	17
Resim 2.3 Doğada bulunan bazı hücresel malzemeler; a) mantar, b) balsa odunu, c) sünger, d) trabeküler kemik	18



1. GİRİŞ

İnsanoğlu var olduğundan bu yana doğadan öğrenme ve ders çıkarma geleneğini sürdürmektedir. İnsanlar zaman içerisinde doğayla uyum içinde yaşarken, aynı zamanda doğayı gözlemlemiş ve doğanın sorunlar karşısında ürettiği çözümlerin, kendisi için de işe yarayabilir olduğu öğrenmişlerdir. İnsanlar tasarım kavramının henüz oluşmadığı zamanlarda bu öğrendikleri ile günlük hayatta kullanabilecekleri nesneleri taklit etme yoluna giderek yaşamlarını kolaylaştırmışlardır. Bu nedenle her şeyin özünde olduğu gibi tasarımın da özünde de doğanın bulunduğu söylenebilir.

Mikroskobun teknolojik gelişimi ve biyoloji biliminin ortaya çıkışıyla birlikte tasarımda doğadan esinlenme farklı bir boyut kazanmıştır. 1957 yılında Otto Schmitt'in ortaya koyduğu biyomimetik, 1958 yılında Jack E. Steele'in ortaya koyduğu biyonik, 1997 yılında ise Janine Benyus'un tasarım ve mühendislik sorularına yanıt olması amacıyla ortaya koyduğu biyomimikri kavramları doğa ve tasarım ilişkisinin felsefesini irdeleyen, sistematik öneriler geliştiren bilim dalları olmuştur (Yıldız 2012).

İmalat sektöründeki artan rekabet koşulları mühendislik ve tasarım alanlarını etkilemekte ve imalatla kullanılan malzemelerin daha güçlü, daha sert, daha dayanıklı ve daha hafif malzemelerden olması talep edilmektedir. İmalat sektöründe kullanılacak bir malzemenin tasarımında özellikle yüksek mukavemet durumlarına karşı özel tasarımlar gerekmektedir. Bu ihtiyacı karşılamak için mühendisler ve tasarımcılar yeni çözüm yolları bulma arayışındadır. Bu bağlamda, son yıllarda yenilikçi çözüm yollarından birisi olarak biyomimikri tasarım yaklaşımı ile oluşturulan, hücresel geometri tabanlı kafes yapılar ön plana çıkmıştır.

Gibson ve Ashby (1997) yaptıkları çalışma ile hücresel malzemelerin, ahşap, mantar, sünger, bal petekleri, kemikler ve mercan gibi örnekler vererek doğada pek çok şekilde yaygın halde bulunduklarını bildirmişlerdir. Doğadaki bu hücresel malzemelerin sahip oldukları enerji sönmeme, mukavemet ve rijitlik gibi süper mekanik özelliklerinin sebebini de malzemelerin içlerinde bulunan hücresel yapılar olarak belirtmişlerdir. Ayrıca bu malzemelerin içerisindeki hücresel mikro yapıları incelemiş ve

detaylandırarak anlatmışlardır. Bu yapıların mühendislik alanında kullanılmasıyla mekanik özelliklerde verimlilik artışına katkıda bulunabileceğini bildirilerek örneklerle açıklanmaya çalışmışlardır. Tasarımcılara ışık tutan bu çalışma doğrultusunda, hücresel yapılar daha çok ilgi çekmeye başlamış ve son senelerde yapılan araştırmalar sayesinde hızla yükselişe geçmiştir. Ancak kompleks gözenek geometrileri nedeniyle bu tasarımların geleneksel imalat yöntemleriyle üretilmeleri uzun süre mümkün olmamıştır.

Bu çalışmalarda hem hafif hem de mekanik dayanım yönünden üstün bir yapı olması ve aynı zamanda özellikle geleneksel imalat metotlarıyla üretilebilmesi nedeniyle klasik balpeteği (honeycomb) olarak isimlendirilen hücresel yapı ön plana çıkmıştır. Bu hücresel yapı sahip olduğu hafiflik ve yüksek termal, akustik ve enerji sönümleme kabiliyeti gibi özelliklerinden dolayı başta mimari, ulaşım, kimya, inşaat ve makine mühendisliği olmak üzere çok farklı alanlarında sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır.

Yapılan araştırmalarda hücresel malzemelerin çok geniş uygulama alanlarında kullanılabileceğinin anlaşılması ile bu yapıların geleneksel imalat metotlarından farklı yöntemlerle üretilip üretilmeyeceğinin araştırılmasına neden olmuştur. Yapılan araştırmalar neticesinde son yıllarda hızlı bir gelişim gösteren Eklemeli İmalat (Eİ) yöntemlerinin karmaşık geometriye sahip hücresel yapı parçaları üretmek için elverişli olduğu gözlemlenmiştir.

Hücresel yapı malzemelere olan ilgi ve ihtiyacın her geçen gün artması ve karmaşık geometriye sahip parçaların üç boyutlu yazıcılar (3D) sayesinde kolaylıkla üretilebilecek olması araştırmacıları yenilikçi çalışmalar yapmaya teşvik etmektedir. Eklemeli imalat (Eİ) yöntemlerinin sağlamış olduğu bu tasarım özgürlüğü sayesinde çok çeşitli hücresel şekiller, hücresel malzemelerde gözenek geometrisi olarak kullanılabilmekte ve hücre şeklinin değiştirilmesiyle istenilen işlevsel özelliklerde önemli kazanımlar sağlanabilmektedir. Son yıllarda birçok araştırmacı tarafından farklı hücresel geometriler tasarlanıp hücresel malzemeler üretilerek mekanik özellikleri deneysel olarak incelenmektedir (Ergene 2020, Kaş 2019).

Bu alanda yapılan çalışmalar incelendiğinde, biyomimikri tabanlı kafes yapı geometrisi çalışmalarının daha çok balpeteği formlu hüresel yapı geometrisi ve bu geometriden türetilen geometriler üzerine olduğu görülmektedir. Yapılan çalışmalarda genellikle klasik balpeteği formlu hüresel yapıların dayanımı incelenmiş olup, biyolojik esinli farklı yapıdaki geometrilerin incelendiği çalışmalar çok sınırlı sayıdadır.

Yapılan bu tez çalışması kapsamında; biyolojik esinli, hafif ve yeni bir birim hücre geometrisi tasarlanması ve tasarlanan bu geometri ile Eİ yöntemi kullanılarak üretilen PLA esaslı numunelerin, basma kuvveti altındaki mekanik davranışlarının deneysel olarak incelenmesi ve elde edilen sonuçların karşılaştırılması amaçlanmıştır. Tasarlanacak birim hücre geometrisine bağlı olarak üretilecek numunelerin mekanik dayanım yönünden dayanıklı ve aynı zamanda hafif bir yapı şeklinde olması hedeflenmiştir.

Bu amaç ve hedef doğrultusunda öncelikle mühendislik ve biyomimetik alanlarında incelemeler yapılmıştır. Yapılan incelemeler neticesinde; doğada bulunan ve güçlü meyve kabukları olarak adlandırılan bitkilerden badem kabuğunun kendine özgü kavisli, eğrisel şekil ve yapısını temel alan yeni bir hücre geometrisi tasarımı oluşturulmasının istenilen amaç ve hedefe uygun olabileceği ve yenilikçi bir çözüm getirebileceği fikrine varılmıştır. Bu fikirden hareketle biyolojik esin kaynağı olan badem kabuğunun pomolojik özellikleri doğrultusunda Altın Oran ve Fibonacci Spirali prensipleri kullanılarak badem formlu birim hücre geometrisi tasarımı yapılmıştır.

Yapılan bu tasarım sonrasında birim hücre boyutu ve şekli sabit tutulup, sadece hücre duvarı kalınlığı değiştirilerek, üç farklı duvar kalınlığında, toplam 12 farklı tipte basma numunesi bilgisayar destekli çizim programı ile tasarlanmıştır. Bu numuneler PLA+ malzemeden, eriyik yığma yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Tasarlanarak üretilen bu numunelere deneysel olarak basma kuvveti uygulanmış ve yapılan basma testi sonucunda veriler elde edilmiştir. Deneysel sonuçlardan elde edilen veriler ışığında numunelerin gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri oluşturulmuştur. Tasarlanan birim hücre ile sabit ve değişken hücre dağılımının mekanik özellikler üzerindeki etkisi ve ilişkisini incelenerek sonuçları karşılaştırılmıştır.

Tasarlanan yenilikçi Badem Formlu Hücresel Yapı (BFHY) geometrisinin, malzemelerin iç gözenek geometrisi şeklinde kullanılması ile imalat sektöründeki sorunların çözümü için yeni bir alternatif sunulması ve imalat sektöründe kullanılarak sürdürülebilir, yenilikçi, daha dayanıklı, daha hafif ve özellikle basma dayanımı durumundaki mekanik performansları bakımından fırsat sunabileceği öngörülmüştür. Tasarlanan birim hücre geometrisi biyo-esinli olmakla birlikte, buna bağlı olarak oluşturulan yapı bu çalışma alanı kapsamında daha önce oluşturulmamış orijinal bir tasarımdır.

Bu tez çalışması 6 bölümden oluşmaktadır. Giriş bölümünde, tez kapsamında yapılan olan çalışmalar hakkında özet bilgiler sunulmuştur. Literatür Bilgileri bölümünde, çalışmanın önemli bir kısmını oluşturan doğadan esinlenme yöntem ve yaklaşımları, hücresel yapılar, Eİ yöntemleri ve daha önce biyolojik esinli olarak tasarlanmış geometriler üzerine yapılan araştırmalar hakkında ilgili akademik çalışmalar incelenmiş olup, ilgili literatürün bir özeti verilmiştir. Materyal ve Yöntem bölümünde, çalışma kapsamında önerilen birim hücre geometrisinin gelişim ve tasarım süreci ile tasarım parametreleri, oluşturulan numunelerin tasarım ve üretim aşamaları, Eİ sürecinde kullanılan malzeme ve parametreler ile deney düzeneği ve kullanılan cihazlar hakkında açıklamalar yapılmıştır. Bulgular bölümünde, yapılan deneyler sonrasında yapılan basma testi sonucunda elde edilen veriler ışığında numunelerin gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri oluşturulmuş. Numunelerin mekanik davranışları sayısal veriler üzerinden incelenmiş ve birbirleri ile kıyaslanarak değerlendirilmiştir. Ayrıca yapıların basma testi sırasında kaydedilen videolarından yakalanan birim şekil değişim değerlerindeki görüntüler eşliğinde hücre topolojisinin basma durumu altındaki deformasyon davranışlarının incelenme ve değerlendirmelerini kapsamaktadır. Tartışma bölümünde, deneysel sonuçlardan çıkarılan bulgular ve deformasyon davranışlarından elde edilen sonuçlar doğrultusunda tasarımlar arasındaki karşılaştırmalar verilmiştir. Sonuç bölümünde, tez kapsamında yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlar maddeler halinde özet bir biçimde verilmiştir. Ayrıca gelecek çalışmalara ışık tutması amacıyla öneriler sunulmuştur.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

Tezin bu bölümünde tasarım ve üretim sürecinde doğadan esinlenirken kullanılan tasarım yöntemleri, hücresel yapıların tasarım yöntemleri ve Eİ yöntemleri hakkında ulusal ve uluslararası alanda yapılmış olan ilgili tez ve makaleler araştırılmış ve edinilen literatür bilgilerine dört ana başlık altında yer verilmiştir.

2.1 Numaralı başlık altında, doğadan esinlenirken kullanılan tasarım yöntemleri ile ilgili tez ve makaleler; Türkçe olarak “biyomimikri”, “biyonik”, “biyomimetik”, “biyotasarım”, “biyolojik olarak ilham alınmış” anahtar kelimeleri kullanılarak, İngilizce olarak da “biomimicry”, “bionic”, “biomimetic”, “bio-inspired”, “biologically inspired” ve “biodesign” kullanılarak araştırılmıştır. Doğadaki örnekleri tasarıma aktarma yöntemlerinden birisi olan ve bu tez çalışmasındaki hücresel yapı geometrisi tasarımında yöntem olarak benimsenen biyomimikri tasarım metodu hakkında bilgilere yer verilmiştir.

2.2 Numaralı başlık altında, hücresel yapıların tasarım yöntemleri ile ilgili tez ve makaleler araştırılmış ve bu tez çalışmasındaki hücresel yapı geometrisi tasarımında benimsenen yöntem hakkında bilgilere yer verilmiştir.

2.3 Numaralı başlık altında, kafes yapılar ilgili tez ve makaleler araştırılmış ve bu tez çalışmasındaki hücresel yapı geometrisi tasarımında benimsenen yöntem hakkında bilgilere yer verilmiştir.

2.4 Numaralı başlık altında, bu tez çalışmasındaki tasarımın üretim sürecinde kullanılan Eİ yöntemi ile ilgili tez ve makaleler araştırılmış ve edinilen bilgilere yer verilmiştir.

2.1. Doğadan Esinlenme Yöntemleri

Doğadan öğrenmek insanoğlunun var oluşundan beri sürdürdüğü bir gelenektir. İnsanoğlu doğa ile birlikte yaşarken zaman içerisinde doğayı gözlemlemiş ve doğada işe yarayanın, kendisi için de işe yarayabilir olduğu keşfetmiştir. Bu gelenek zaman

ilerledikçe gelişmiş ve insanoğlu ihtiyacına göre doğadan öğrendiklerini yaşamını kolaylaştırmak adına doğayı taklit ederek günlük hayatta kullanabilecekleri aletler tasarlamış ve icatlar yapmıştır. Dolayısıyla her şeyin temelinde olduğu gibi tasarımın da temelinde de doğa vardır.

Tasarımcılar ve yaratıcı insanlar doğayı sonsuz esin kaynağı olarak kullanmaktadır. Karabetça (2016)'ya göre, tasarımlar genellikle doğadan bir şekil veya organizmanın mekanik sistemi veya yaşam döngüsüne dayanır. Bu da sürdürülebilir ekolojik malzemeler, mekânlar, teknolojik cihazlar gibi sistemlerin ortaya çıkmasına yol açar. Öztoprak (2020) sanayi devriminden sonra, yeni teknolojiler ve gözlem araçlarının gelişmesi doğayı atom seviyesinde inceleme imkânı sağladığını söyler. Ancak daha sonra, doğayı taklit etmek yerine bilimsel bilgi ve doğayı açıklayan kanunların araştırılması ön plana çıktığını, doğadan elde edilemeyen bilgilerin edinilmesi ve bu bilginin insan problemlerine uygulanması için yeni yaklaşımlar arandığını ve bu yaklaşımlara biyoteknik, biyomorfizm, biyofilia, bio-etkileşim, biyomimesis, biyomimetik ve biyomimikri gibi farklı isimler verildiğini bildirmektedir.

Biyolojik tabanlı disiplinlerin pratik bilgileri oluşmaya başladıktan sonra teorik çerçevelerine çok az zaman ayrılmıştır. Bunun nedenleri arasında bu disiplinleri uygulamaya kazandırmak, bu yaklaşımları teorik olarak bilime kazandıran insanların öğretimden ziyade uygulamaya yönelmesi sayılabilir. Bir süre sonra araştırmacılar arasında düşünce karmaşıklığına yol açmıştır. Yıllar geçtikçe bu alanlar kendine has bir takım ilkeler ve uygulama stratejileri geliştirmişlerdir. Araştırmacılar bu farklılıkları ortaya çıkarmaktansa çeşitli alt kategoriler tanımlamayı seçmişlerdir. Bugün geline nokta ise üretim bazen ekonomik, bazen kaynak yetersizliği, bazen de pazarlama nedenleri ile biyoloji tabanlı araştırmalara yönelmek zorunda kalmıştır. Bu süreçte hem mükemmelliği, hem de kaynak kullanımında sürdürülebilirliği devam ettirme konusunda biyoloji tabanlı çalışmalara ağırlık verilmiş, buradan çıkarılan veriler işlenmiş, bilgi olarak tasarım disiplininde kullanılmıştır (Özdoğan 2015).

Yıllar içerisinde gelişen teori çeşitli alt kategorilere ayrılmıştır. Bugün, üretimin bazen ekonomik, bazen kaynak yetersizliği ve bazen de pazarlama nedenleriyle biyoloji

tabanlı araştırmalara yönelmek zorunda kaldığını bildirir. Bu süreçte, mükemmelliği ve kaynak kullanımında sürdürülebilirliği sağlamak amacıyla biyoloji tabanlı çalışmalara ağırlık verildiğini ve bu çalışmalardan elde edilen verilerin işlenerek tasarım disiplininde bilgi olarak kullanıldığını belirtir. Biyomimikri, biyomimetik, biyonik gibi kavramların endüstriyel tasarım yöntemleri içinde yer aldığını ve zamanla uygulamalarıyla kendini kanıtladığıklarını bildirmektedir.

Du Plessis vd. (2019), eklemeli imalatla biomimikri alanındaki mevcut en son teknolojileri özetleyen ve farklı biomimik mühendislik formlarını açığa çıkartabilecek ve özellikle son kullanım parçaları için fonksiyonel mekanik mühendisliğine odaklanan bir çalışma yapmıştır. Yapmış oldukları bu çalışmada, Biomimikrinin doğadan öğrenme ve doğayı taklit etme pratiği olduğunu, bu pratiğin eklemeli imalatla ilgili ilerlemeler sayesinde mühendislik uygulamalarında giderek daha fazla gerçekleştirilebilir hale geldiğini belirtmektedir. Eİ teknolojisinde son yıllarda yaşanan gelişmeler sayesinde, geleneksel üretim süreçleriyle üretilen benzer parçalardan daha özellikli parçaların üretilmesine imkân tanındığını bildirmektedir. Eİ ile üretilen bu parçalarının özellikle havacılık, otomotiv ve tıbbi uygulamalarda endüstriyel kullanımını mümkün kıldığını belirtmektedir.

Bu yöntemle plastikler ve metaller de dahil olmak üzere çeşitli malzemelerden karmaşık geometrilere sahip nesnelerin retilbilmesinin, bu teknolojinin en önemli avantajlarından biri olduğunu belirtmektedir. Eİ tarafından sunulan bu üretim yönteminin, karmaşık geometrilerin üretiminde kullanılması, bu teknolojinin gerçek endüstriyel uygulamalar için büyük potansiyelinin açığa çıkmasında kilit rol oynayabileceğini ve biomimikrinin bu konuda önemli katkıları olabileceğini bildirmektedir. Biomimikriden farklı şekillerde yararlanılabileceğini, özelleştirilmiş parçaların (rneğin, tıbbi protezler, implantlar veya özel spor ekipmanları) veya sertlik ve hafifletme gibi belirli özelliklerin optimize edilmesinin (rneğin, havacılık veya otomotiv uygulamalarında hafif parçalar) sağlayabileceğini belirtmektedir. Biomimikri ve Eİ uygulamalarının birlikte kullanımı sayesinde, gelecek yıllar için umut verici fırsatlar sunduğunu vurgulanmaktadır.

2.1.1. Biyonik Tasarım Yaklaşımları

Biyonik kelimesi etimolojik olarak incelendiğinde, biyoloji ve teknik kelimelerinin birleşiminden oluştuğu görülmektedir. Vincent (2001) doğadan kopyalamayı, öykünmeyi ve öğrenmeyi içeren çalışma alanında kullanılan bir terim olan Biyoniğin, 1960 yılında Birleşik Devletler Hava Kuvvetlerinden Jack Steele tarafından Dayton'daki Wright-Pettersen Hava Kuvvetleri Üssü'ndeki toplantıda türetildiğini bildirmiştir. Özdoğan (2015)'na göre de biyomekanik, yaşayan sistemlerin yeteneklerini tasarım problemleri için çözümlere dönüştürmeyi amaçlar. Bu disiplin, biyolojiden esinlenerek elektronik bileşenlerin ve sistemlerin tasarımıyla ilgilenir. İnsan vücudunun parçalarını sistemlere dönüştürmek ve ömürlerini artırmak üzerine odaklanır. Biyonik yıllar geçtikçe Avrupa'da iyi tanınan bir alan olarak yoğunlaşmıştır (Wahl 2006).

Birkeland (2002) gelişim sürecinin sonraki adımını şu şekilde özetler; Alman biyolog Werner Nachtigall, bu alanı 1960'ların ortalarında bağımsız olarak kurmuştur. Daha sonra Carmelo di Bartolo, Jurgen Hennicke ve Gabriel Songel bu alana katkıda bulunmuş ve sürekliliğini sağlamışlardır. Nachtigall, biyomekanik uygulayıcılarını işbirliği süreci boyunca yönlendirmek için prensipleri bir dizi olarak formüle etmiştir. Ayrıca, İtalyan tasarım eğitimcisi Carmelo di Bartolo, bu prensiplerin uygulanabilirliğini mühendislikten endüstriyel tasarıma kadar genişletmiştir. Ardından 1970'lerde, "Doğadan esinlenen tasarım ve biyomekanik" başlıklı gereklilikler, bir dizi kavram olarak formüle edilmiştir.

Bunun ardından Wahl, yaklaşımını doğa-kültür ilişkisi açısından biyomekanik terimiyle yeniden tanımlamıştır. Biyomekanik tasarım örnekleri arasında tropikal bir kutu balığı formuna dayanan Mercedes Benz Biome Konsept Arabası ve bir filin hortum yapısına dayanan Festo adlı Alman mühendislik firmasının tasarladığı biyomekanik dağıtım yardımcısı yer alır. Biyonik tasarım örnekleri biyo kavramını biyo+teknik içeriğinde mükemmel tanımlayan örneklerdir. Bu mükemmellik canlı organizmanın işlevsel özelliğini öne çıkarmakta, buna paralel olarak doğrudan benzeme özelliğini de asla ihmal etmemektedir (Özdoğan 2015).

2.1.2. Biyomimetik Tasarım Yaklaşımları

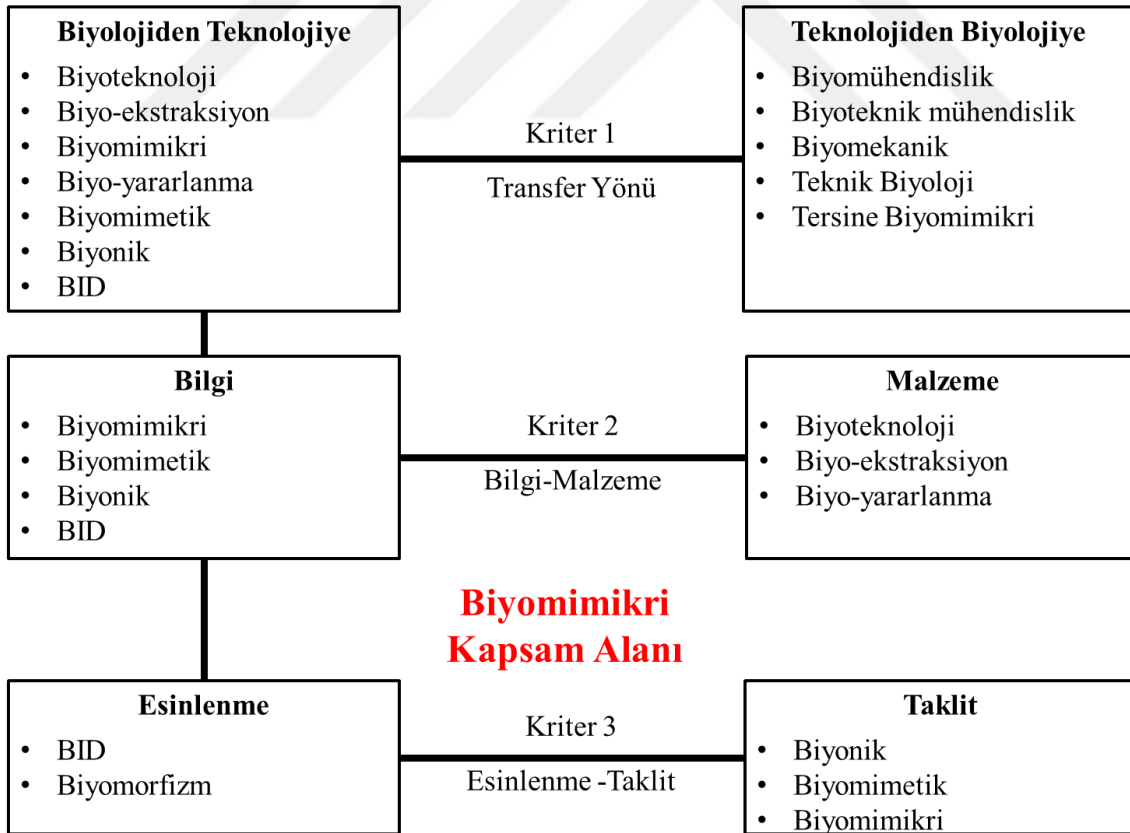
“Oxford İngilizce Sözlüğü biyomimetik terimini bilim dalı olarak biyomimetik malzeme, metotların kullanımı ve gelişimi olarak tanımlarken, biyomimetik kelimesini ise kimya orijinli biyokimyasal süreçlerin taklidini yapan sentetik metot olarak sunmaktadır” (Özdoğan 2015). Biyomimetik terimi 1969’da Otto Schmitt tarafından önerilmiştir. Biyomimetik, biyolojik olarak üretilen maddelerin, malzemelerin ve biyolojik mekanizmaların ve işlemlerin, özellikle de benzer mekanizmalarla benzer ürünlerin sentezlenmesi amacıyla, oluşumunun, yapısının ya da fonksiyonunun çalışması olarak tanımlanmıştır. Burada ayrıca sadece fonksiyonlara değil, yapılara, mekanizmalara ve işlemlere de değinilmektedir (Cohen ve Reich 2016).

Speck ve Speck (2008) tarafından bugüne kadar biyomimetik araştırmaların; optimizasyon, mimarlık ve tasarım, hafif alaşımlı yapılar ve malzemeler, kesişen yüzeyler, akışkan dinamiği, biyomekatronik ve robot teknolojisi, iletişim ve sensor olmak üzere yedi alt kategoride tanımlandığı ve genişleyerek devam ettiği söylenmektedir. Dahl ve Moreau (2002) tarafından yapılan çalışmada biyoloji ve tasarım arasındaki aktarım sürecinde başarılı bir çıktı almak için; renk ve şekil gibi yüzeysel seviyede katkının taklidi olan yerel benzetimlerden yapı ve işlevin taklidi olan daha uzaktakinin öneminin altı çizilmiştir. Kelebek kanadı yapısına dayanarak tasarlanan Dijital Ekran, Pak Kitae sis böceklerinden taklit edilerek tasarlanan çiğ bankası şişesi bu alanda bilinen en tipik örneklerdir.

2.1.3. Biyomimikri Tasarım Yaklaşımları

Biyomimikri terimi, 1982 yılında ortaya çıkmış olup 1997’de Janine Benyus’un “Biomimicry: Innovation Inspired by Nature (Biyomimikri: Doğadan İlham Alan İnovasyon)” adlı kitabından geniş kitleler tarafından öğrenilmiştir (Desha, Kenny, Kumar ve Hargroves 2012). Benyus biyomimikriyi tanımlarken şu ifadeleri kullanmıştır: “Biyomimikri, daha sürdürülebilir tasarımlar yaratmak için doğal formlardan, süreçlerden, ekosistemlerden öğrenmek ve daha sonra bunlardan öykünmektir” (Benyus 1997).

Benyus, 1998 yılında, yayınladığı “Biomimicry” kitabıyla bu kavramları tekrar gündeme getirmiş ve doğadaki olası çözümleri veya çözüm potansiyellerini en iyi öğrenme ve kavrama olarak özetlenebilecek görüşleriyle, dile getirmiştir. Birçok farklı alanda ve aslında alanları da bir araya getiren bu etkileşimlerin, kendi sistematığının ve metodlarının her disiplinde ortaya konması gerekliliğini belirterek biyomimikri’yi yeni bir bilim dalı adayı olarak tanımlamıştır. Daha önceleri doğayı gözlemleyerek deneyimler elde eden insanoğlu artık doğayı bir model olarak görmenin ötesinde, ondan bir karşılaştırma ölçütü ve bir akıl hocası olarak dersler almaktadır. Benyus’a göre bu öğrenme süreci farklı disiplinlerde yaygınlaşarak devam ederse önümüzdeki yıllarda “biyomimetik bir devrim” yaşanacaktır (Selçuk ve Sorguç 2007). Biyomimikri tam olarak biyoloji veya teknoloji değildir: biyolojinin teknolojisidir. 2005 yılında Bryony Schwan ve Janine Benyus, Biyomimikri enstitüsünü kurmuştur. 2006’da ise doğal çözümlerin listesini içeren bir dijital kütüphane olan "AskNature" sitesi kurulmuştur (Radwan ve Osama 2016).



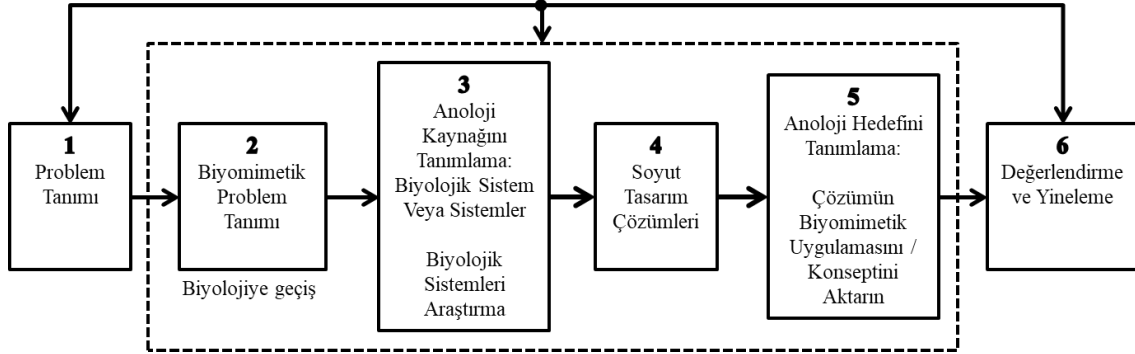
Şekil 2.1 Biyo-terimler (Cohen ve Reich 2016).

Biyomimikri, biyomimetik ve biyo-esinlenmeli tasarım kavramlarıyla birlikte anılan biyoloji ve mühendislik alanlarının kesişim noktalarından biridir. Bu terimlerin eş anlamlı olduğu düşünülse de, aslında farklı anlamlara sahiptirler. Bu biyo-terimleri birbirinden ayırmak için üç farklı kriter bulunmaktadır: transfer yönü, bilgi-malzeme ve taklit-esinlenme kriterleri. Bu kriterler, farklı terimler arasındaki alanı daha belirgin hale getirir (Şekil 2.1). Biyomimikri terimi, taklit-esinlenme kriteriyle tanımlanan bir alanı ifade eder (Cohen ve Reich 2016).

Zari (2007) ise tasarım probleminin çözümü noktasında doğanın üç seviyede taklit edildiğini bildirmektedir. Bunları; organizma seviyesi, davranış seviyesi, ekosistem seviyesi olarak isimlendirmiştir. Seviye doğanın hangi yönünün taklit edildiği anlamında kullanılmaktadır. Organizma seviyesinde; bitki ya da hayvan gibi belirli bir organizmanın tamamı ya da bir kısmı taklit edildiğini, davranış seviyesinde; organizmanın davranışının bir yönünün ve içinde bulunduğu çevreyle etkileşiminin taklit edildiğini bildirmektedir. Ekosistem seviyesinde ise; tüm ekosistemin ve ona başarılı bir şekilde işlemlerini sağlayan fonksiyonlar kazandıran ana ilkelerin taklit edildiğini bildirmektedir.

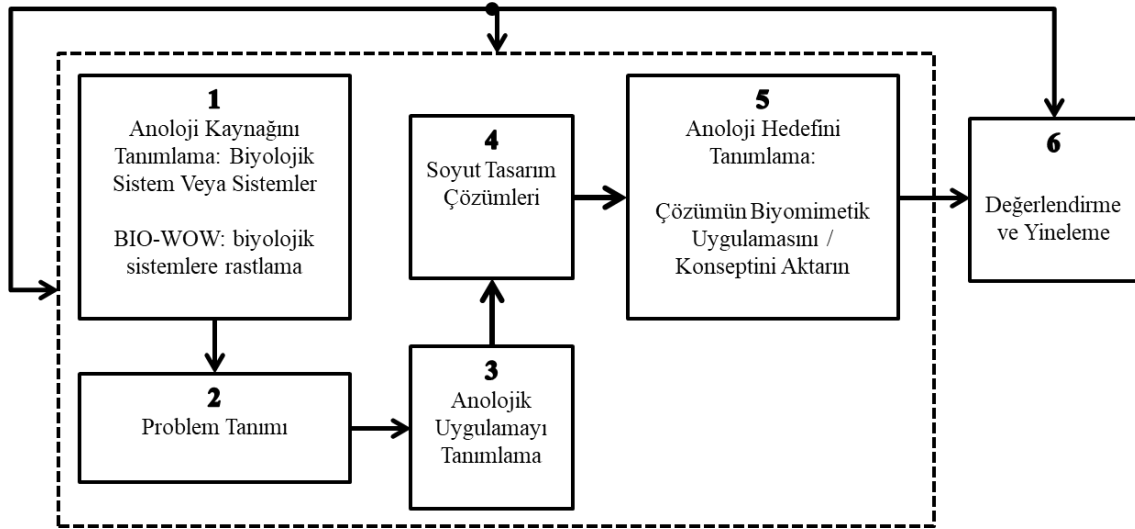
“Biyomimikri tasarım sürecinde iki önemli yaklaşım öne çıkmaktadır: Birincisi biyolojiyi sorgulayan tasarım, diğeri ise tasarımı etkileyen biyolojidir” (Zari 2007). Farklı araştırmacılar tarafından biyolojiyi sorgulayan, biyolojiye bakan, sorun odaklı yaklaşım veya yukarıdan aşağıya yaklaşım olarak da isimlendirilen bu tasarım sürecinde; mevcut bir mühendislik problemine yönelik çözümleri bulmak için biyoloji kullanılmaktadır. Doğadaki canlılar/organizmalar tarafından benzer problemlerin nasıl çözüldüğünün biyoloji ile irdelenmektedir. Tasarımcı ilk olarak tasarım ile ilgili problemi tanımlar, çözümü için, biyoloji ile iş birliği içinde doğadaki canlılar arasından araştırmasını yapar, tasarım için en uygun ilham kaynağı canlıyı/organizmayı bulup, bulduğu bu canlı yada organizmanın biçimsel ve davranışsal özelliklerin taklit ederek ürünü geliştirir (Şekil 2.2). Örneğin; Japonya’daki trenlerin tünellerden çıkarken basınç değişikliği nedeniyle gürültü yapması problemi, yalıçapkını kuşunun gaga formundan ilham alınarak yapılan yeni tasarımla çözülmüştür. Farklı araştırmacılar tarafından, biyoloji ilhamlı tasarım, çözüm odaklı tasarım, aşağıdan yukarıya yaklaşım veya

tasarımı etkileyen biyoloji olarak tanımlanan bu yaklaşımda ise; durum bir önceki yaklaşımın tersidir.



Şekil 2.2 Problemden Biyolojiye Tasarım Süreci (Cohen ve Reich 2016).

Tasarımcı ve biyolog iş birliği içinde, farklı bir mekanizma veya karakteristiği olan, biyolojik bir ekosistemi ve/veya organizmayı araştırır. Araştırmalar sonucunda ekosistem ve/veya organizmanın davranışlarını, fonksiyonlarını veya diğer özelliklerinin yer aldığı bir veri havuzu oluşturur. Oluşturulan veri havuzundan belirlenen biyolojik veriler ve/veya özellikleri ışığında, önceden var olan bir tasarım problemi belirlenerek, elde edilen veriler tasarıma entegre edilir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 Biyolojiden Uygulamaya Tasarım Süreci (Cohen ve Reich 2016).

Lotus çiçekleri ile ilgili yapılan araştırmalarda kirli ortam koşullarında lotus çiçeklerinin kendilerini temiz tuttukları gözlemlenmiştir. Lotus çiçeklerinin kendi kendini temizleme

özelliklerinin üzerlerindeki küçük epidermal çıkıntıları sayesinde yapabildikleri verisi tanımlanmıştır. Sonraki aşamada, bu ilgi çeken biyolojik sistem ile olası mühendislik uygulamaları arasındaki bağ araştırılmıştır. Son aşamada bu özelliğin kirlenmeyen boya, cam, kumaş gibi ürünlerin geliştirilmesinde çözüm kaynağı olacağı düşüncesiyle biyolojik çözüm uygulanmıştır.

Doğanın taklidine dayanan biyomimikri tasarımında, probleminin çözümü için doğa organizma düzeyi, davranış düzeyi ve ekosistem düzeyi olmak üzere 3 düzeyde taklit edilmektedir (Zari 2007). Organizma düzeyinde belirli bir organizmanın taklit edilmesi, davranış düzeyinde organizmanın nasıl davrandığının taklit edilmesi ve ekosistem düzeyinde ise tüm ekosistemin ve ona başarılı fonksiyonlar kazandıran genel prensiplerin taklit edilmesi söz konusudur. Tasarım probleminin çözümü için tanımlanan bu her bir düzeyde ise taklidin yapılabileceği biçim, işlev, malzeme, yapı ve süreç olmak üzere 5 olası boyut vardır (Zari 2007).

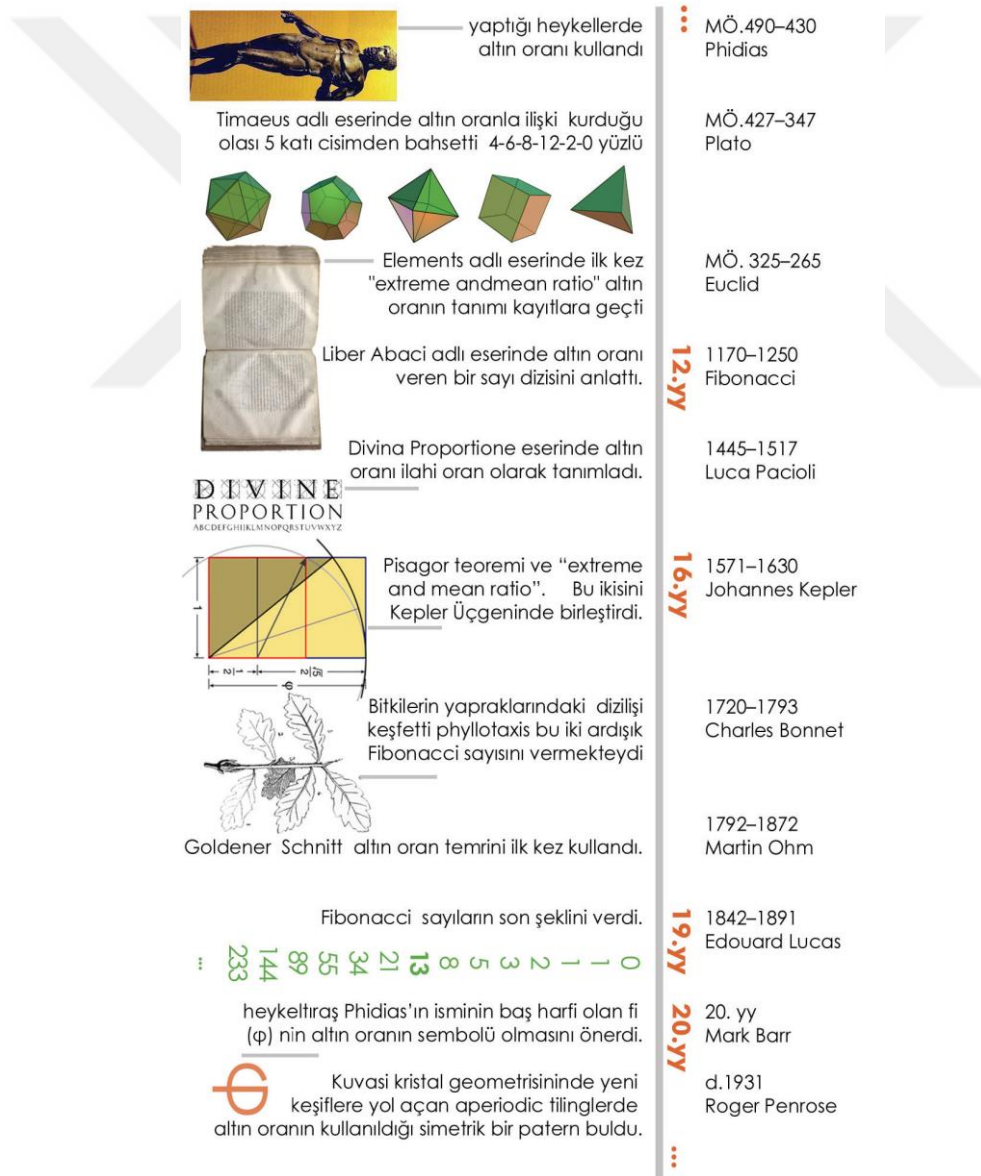
2.1.4. Doğadaki Tasarım Yaklaşımları; Fibonacci Serisi ve Altın Oran

Doğada var olan nesnelerin hepsinin kendine özgü biçimleri ve bu biçimlere bağlı geometrik yapıları vardır. Doğadaki muhteşem öğretilerden biri de her şeyin kendine özgü bir geometrisinin olmasıdır. Doğa tasarım için hala tüketilemeyen bir kaynak gibidir (Ertaş 2007). Doğanın hemen hemen her yerinde ve yapısında var olan bu geometrinin doğal olarak doğada bulunan canlıların tasarımında ve yapısal özelliklerinin belirlenmesinde etkili kuralların yada oranların da bulunduğu bilinmektedir. Doğadaki bu geometrik tasarımlardan alınan veriler incelendiğinde de bu kural ve oranlar çarpıcı şekilde karşımıza çıkmaktadır. Bu oranlardan birisi, kutsal oran, altın sayı gibi benzeri birçok farklı isimle ifade edilen ve doğanın hemen hemen her yerinde ve yapısında buluna altın orandır.

Altın oranın kâşifi bilinmese de, birçok çalışmada oranın kökeni İ.Ö. ilk 500 yıl içinde yaşamış Yunanlı düşünür ve bilim adamlarına (Phidas, Platon, Pythagoras, Euclid vd.) dayandırılmaktadır. Bu çağda oran üzerine çalışmalar yapıldığı ve oranın büyük bir yakınlıkla uygulandığı kesin olarak bilinmektedir. Euclid'in (İ.Ö 365-300), Elementler

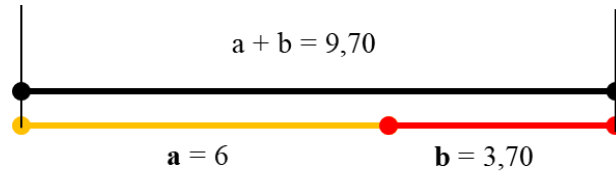
isimli eserinin 6. kitabında altın oranın tam bir tanımını yapmış olması, birçok araştırmacının kendisini altın oranın ilk tanımlayıcısı saymasına neden olsa da; Markowsky'nin (1992) saptamasına göre altın oranla ilgili ilk yazılı kayda, Euclid'ten önce Proclus'un İ.Ö. 370 yılında, Eudoxus'un Plato'nun "bölüm"e ilişkin oluşturduğu teoremleri geliştirmesine yönelik yaptığı göndermede rastlanmaktadır (Ankaralıgil 2013). (Selçuk, Sorguç ve Akan 2009) tarafından yapılan çalışmada altın oran üzerine yapılmış kilometre taşları niteliğindeki çalışmaların tarih çizelgesi vermiştir (Şekil 2.4).

fi kodu tarih çizelgesi



Şekil 2.4 Altın oran üzerine yapılmış çalışmaların tarih çizelgesi (Selçuk ve diğerleri 2009).

Sanat ve bilimde bu denli önemli olan altın oranın tanımı ise Doczi (1981) tarafından şu şekilde yapılmıştır; bütünün büyük parçaya oranı; büyüğün küçük parçaya oranına eşittir. Başka bir ifadeyle, çizgisel gösteriminde de görüldüğü üzere bir doğru ikiye bölündüğünde, kısa olan parçanın uzun olan parçaya oranı ile uzun olan parçanın bütüne oranı aynı olmalıdır (Şekil 2.5).



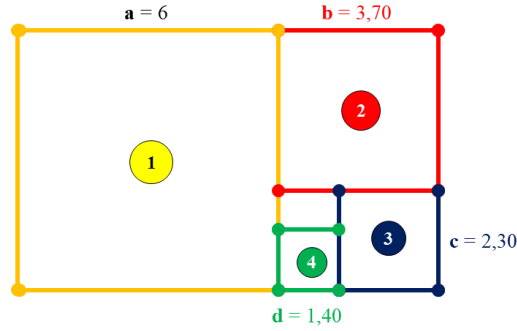
Şekil 2.5 Altın oranın çizgisel gösterimi.

Altın oran ile ilgili kilometre taşları niteliğindeki çalışmaların en önemlilerinden birisinin, İtalyan Matematikçi Filius Bonacci M.Ö.1250 (Fibonacci) bulduğu sayılar serisi olduğu bilinmektedir. Fibonacci'nin tavşanların üreme sayılarını inceleyerek ortaya çıkardığı sayı diziliminde (Fibonacci sayı dizisi; 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144, 233, 377...) yer alan sayılardan her biri, kendisinden önce gelen iki sayının toplamından oluşmaktadır.

Bu sayıların altın oranla ilişkisi dikkat çekici bir noktadır. Bu dizideki ardışık sayıların oranı birbirine çok yakındır. Bu dizideki sekizinci sayıdan itibaren art arda gelen iki sayıdan büyük olanın küçük olana bölümü sonucu elde edilen sayı 1,618'e yaklaşan bir oran vermektedir. Onüçüncü sayıdan sonra gelen tüm oranlarda altın oranı sayısı olan 1,618034 standardı yaklaşık olarak yakalamaktadır. Bu ilişki sadece hayvanlarda değil birçok bitkinin geometrik yapısında da bire bir uyum göstermektedir.

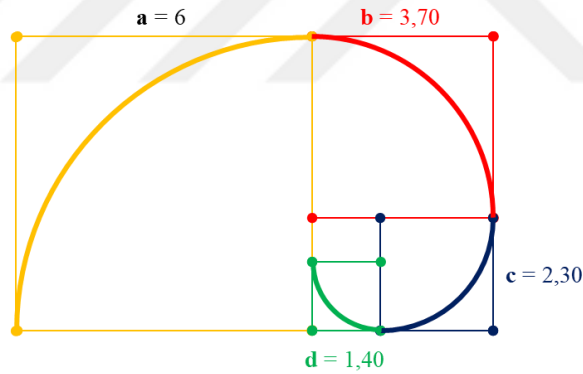
Altın Oran ve Fibonacci Serisi mimari, sanat ve tasarım alanında sıkça kullanılmaktadır. Tasarımcıların üründe estetik kaygılarla bu oranı kullanmasının yanı sıra, form, fonksiyon ve strüktürdeki en iyilenme durumunun da bir aracı olduğu görülmektedir (Selçuk ve diğerleri 2009). Luca Pacioli tarafından yazılan ve Leonardo da Vinci tarafından resimlenen ve ilk olarak 1509'da basılan Divina Proportione isimli matematik kitabında, altın oran kuralına uygun olarak altın dikdörtgen çiziminden

bahsedilmektedir. Bahsedilen uzun kenarının kısa kenarına oranı 1,618 olan bir altın dikdörtgen çizimi yapılarak gösterilmiştir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6 Altın dikdörtgenin çizilmesi.

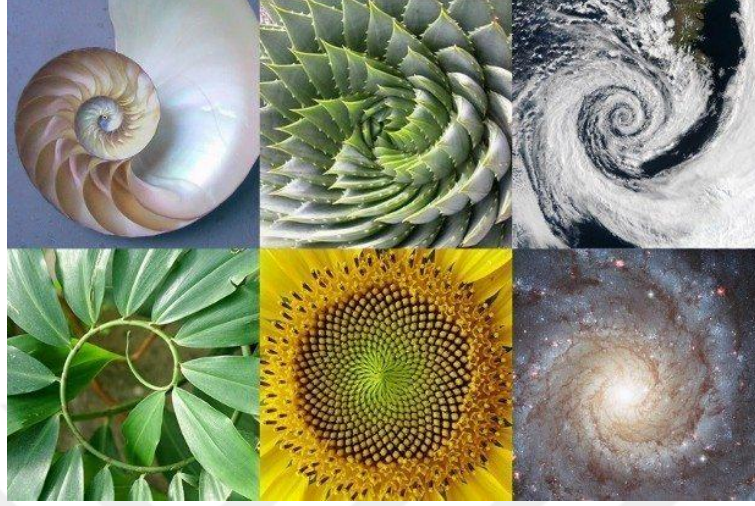
Altın oran kurallarına uygun olarak çizilen bu dikdörtgenin karelerinin kenar uzunluklarını yarıçap alan bir çember parçası, her karenin içine çizilirse, bir altın spiral elde edilir (Şekil 2.7).



Şekil 2.7 Altın dikdörtgenden elde edilen altın spiral çizimi.

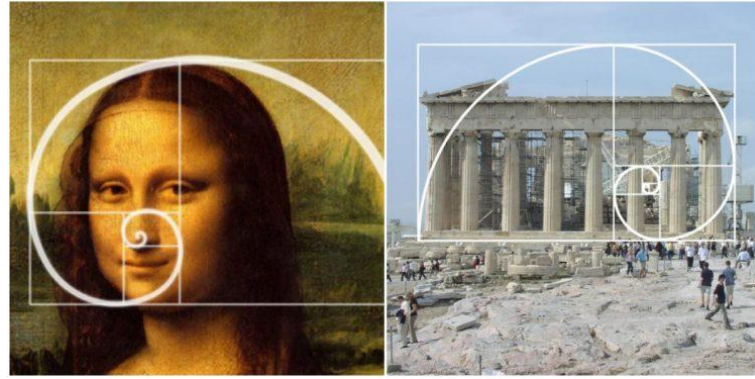
Üretilen bu altın spiral, İtalyan Matematikçi Filius Bonacci M.Ö.1250 (Fibonacci) tarafından bulunan sayılar serisine uyumlu olması nedeniyle, aynı zamanda Fibonacci Spirali olarak da bilinmektedir. Her biri tam olarak Fibonacci Spiralinin değerlerine eşit olmasa da, doğada Fibonacci spiriline uyan birçok spiral yapıya rastlamak mümkündür. Doğadaki basit strüktürlerin en bilinenleri, Fibonacci numaraları ve altın orandır. Fibonacci numaraları Resim 2.1’de görüldüğü gibi çiçeğin taçyaprakları, çam kozalağı, yaprak dizilişi ve bunun gibi işlevlere örnek olarak tekrar eder (İnt.Kyn.1). Fibonacci

numaraları gizemli bir öge olarak düşünülmüştür, fakat bunun için gizeme veya bir sihre gerek yoktur. Bu sadece işlevsellik ve evrimin sonucudur (Yıldız 2012).



Resim 2.1 Doğada Fibonacci spiriline uyan örnek gösterimler (İnt.Kyn.1).

Birçok tasarımcı tasarımlarında altın oran bilinçli olarak kullanıldığı gibi, Resim 2.2’de görüldüğü üzere tasarım tarihinin önemli birçok ürünlerinde de Fibonacci Spiriline rastlamak mümkündür (İnt.Kyn.2).



Resim 2.2 Tasarım tarihinde fibonacci spiriline uyan örnek gösterimler (İnt.Kyn.2).

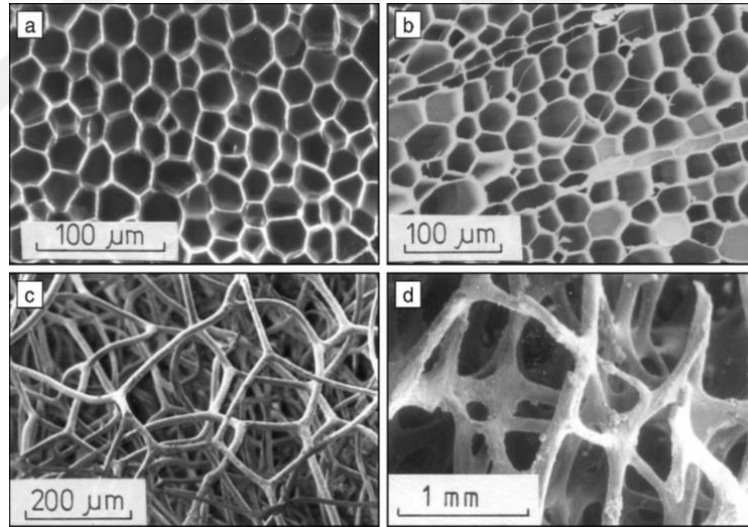
2.2. Hücresel Gözenekli Yapılar

Tezin bu bölümünde hücresel gözenekli yapılar hakkında ulusal ve uluslararası alanda yapılmış olan ilgili çalışmalar araştırılmış ve hücresel gözenekli yapıların genel

hatlarıyla ilgili bilgilere yer verilmiştir. Bu çalışmanın konusunu oluşturan periyodik ve geçişli hücresel gözenekli yapıların genel özellikleri üzerinde durulmuştur.

2.2.1. Birim Hücre Gözenek Yapısı

Bu alanda çalışma yapan bilim insanları tarafından hücresel gözenekli yapılar farklı şekillerde gruplandırıp sınıflandırılmaktadır. Hücresel yapılar, Gibson ve Ashby (1997) tarafından doğal veya insan yapımı olarak sınıflandırılmaktadır. Doğada yüksek mukavemet ve düşük yoğunluğa ihtiyaç duyulan yerlerde hücresel malzemelere sıkça rastlanılmaktadır. Örneğin; yorulmadan çok uzun mesafelere uçabilmeleri için kuşların olabildiğince hafif olmaları gerekmektedir, bunu sağlamak için kuşların kemikleri, hava ceplerine sahip içi boş hücresel gözenekli yapılar şeklinde oluşmuştur. Çeşitli hücresel malzemelere doğada sıklıkla rastlanılmaktadır. Resim 2.3'deki yapılar doğal hücresel malzemelere örnek olarak gösterilebilir.



Resim 2.3 Doğada bulunan bazı hücresel malzemeler; a) mantar, b) balsa odunu, c) sünger, d) trabeküler kemik (Gibson ve Ashby 1997).

Mantar, ahşap, insan kemikleri, bitki sapları ve deniz süngerleri doğal hücresel gözenekli yapıların örnekleridir ve bunlardan bazıları mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu doğal malzemeler hafiftir ancak aynı zamanda esas olarak hücresel gözenekli yapıları nedeniyle sıra dışı mühendislik özellikleri de sergiler. Doğal malzemelerin bu özelliklerini keşfeden insanoğlu, bu doğal malzemelerden ilham

olarak, insan yapımı hücresel gözenekli malzemeler olarak adlandırılan polimer, metal ve seramikten yapılmış benzer alternatifler geliştirmeye başlamıştır.

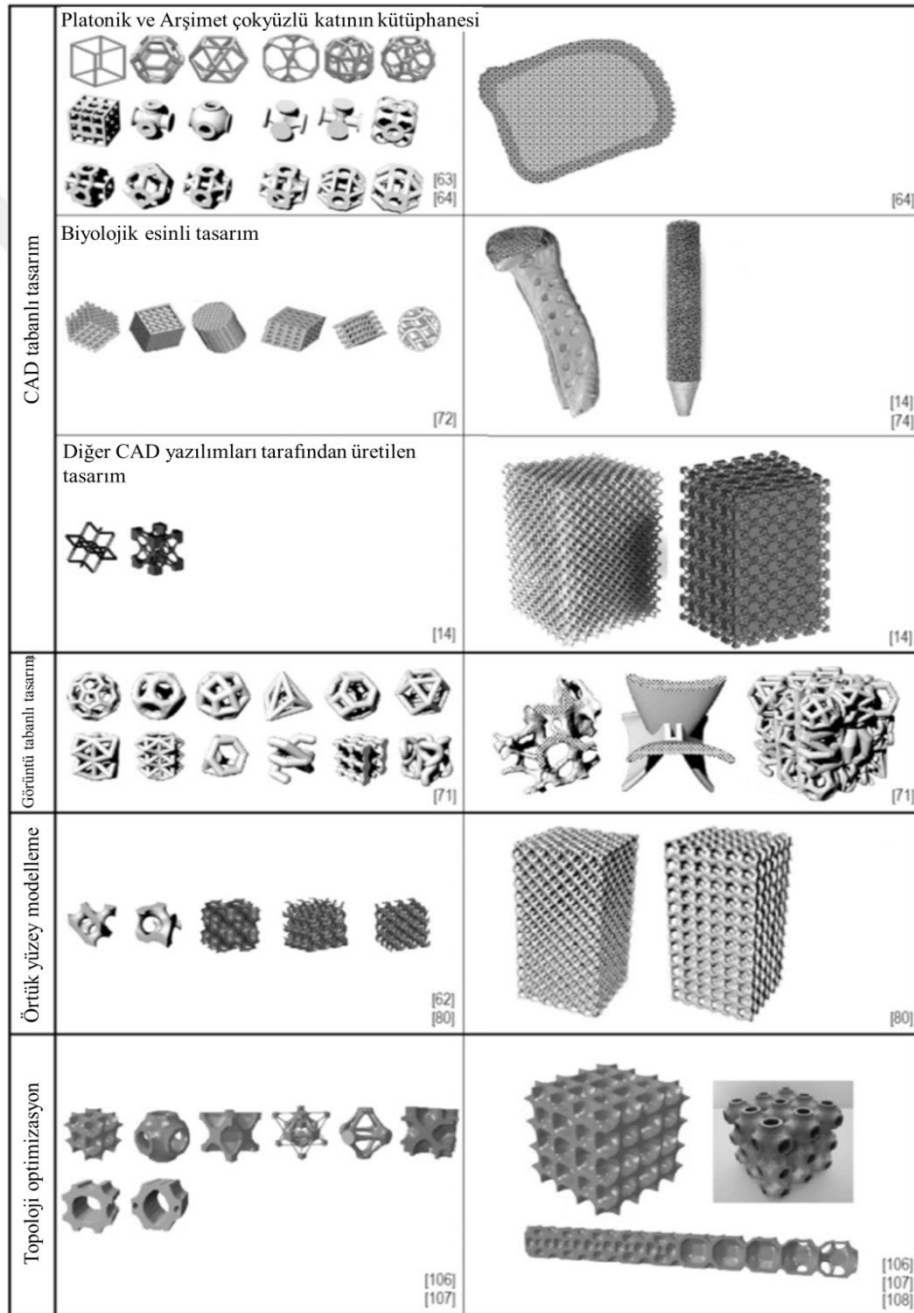
İmalat sektöründeki parçalar için çoğu durumda, hücresel boşluğun ortaya çıkması istenmeyen bir olaydır ve en aza indirgenmesi istenir. Çünkü istenmeyen bu hücresel boşluk imal edilen parçanın dayanım, sertlik ve yüzey kalitesi gibi özelliklerini olumsuz etkileyebilir. Ancak imalat sektöründe, hücresel boşluğun parça içerisinde belirli oranda boşluk oluşturulmasının istenildiği durumlar da olabilmektedir. Bu isteğin sebebi düşük bir kütle, iyi enerji emilimi, termal ve akustik yalıtım özellikleri ile birlikte yüksek dayanım gibi yüksek performans özellikleri ihtiyacının gerektiği durumlar olabilmektedir. İstemli bir şekilde ve belirli oranda boşluklu olarak imal edilen hücresel yapılar bu ihtiyacı giderecek çözümler sunabilmektedir.

Bu ihtiyaç doğrultusunda yapılan çalışmalarda, tasarlanarak imal edilen birçok hücresel yapının, akustik yalıtım, termal yalıtım, titreşim sönümleme, enerji yutma kabiliyeti ve yüksek darbe dayanımı gibi özelliklere sahip oldukları ortaya çıkartılmıştır. Bu özellikleri ile birlikte, düşük ağırlıklara sahip olmalarından dolayı da; otomotiv, havacılık, ulaştırma ve biyomedikal gibi birçok farklı endüstride geniş uygulama alanında kullanılmaya başlanmıştır.

Literatürde hücresel gözenekli yapıların isimleri ve tanımlarının farklı şekillerde yapıldığı görülmektedir. Wauthle (2015) tarafından yapılan çalışmada, kafes yapılar, hücresel metaller, hücresel köpük yapılar, kafes dizisi yapılar, gözenekli yapılar ya da iskele yapılar şeklinde de farklı isimlerle isimlendirildikleri bildirilmektedir.

Gibson ve Ashby hücresel yapıları “hücrelerin kenarlarını ve yüzlerini oluşturan birbirine bağlı katı kirişler veya plakalar ağından oluşan malzeme” olarak tanımlamışlardır (Gibson 2003). Tao ve Leu (2016) tarafından yapılan başka bir çalışmada ise dolgu geometrisini, hacimsel bir bölge üzerinde belirli bir yinelenen düzenlemeyle kesişen payandalar ve düğümler oluşturan tekrar eden bir birim hücreye sahip kafes kiriş benzeri bir yapılar olarak tanımlamaktadır.

Literatürde birim hücre tasarımlarının çok farklı şekillerde yapıldığı görülmektedir. Bu konuda Wang ve diğerleri (2016) tarafından yapılan bir çalışmada hücresel yapılarla ilgili olarak yapılan çeşitli araştırmalarda yaygın olarak kullanılan birim hücrelere ait görseller derlenerek verilmiştir (Şekil 2.8). Bir diğer çalışmada ise Tang ve Zhao (2016), tarafından literatürlerde ele alınan bazı yaygın birim hücre topolojileri Çizelge 2-1'deki gibi özetlenmiştir.



Şekil 2.8 Yaygın olarak kullanılan bazı birim hücre yapılarına ait görseller (Wang ve diğerleri, 2016).

Çizelge 2-1 Literatürlerde ele alınan bazı yaygın birim hücre topolojileri (Tang ve Zhao 2016).

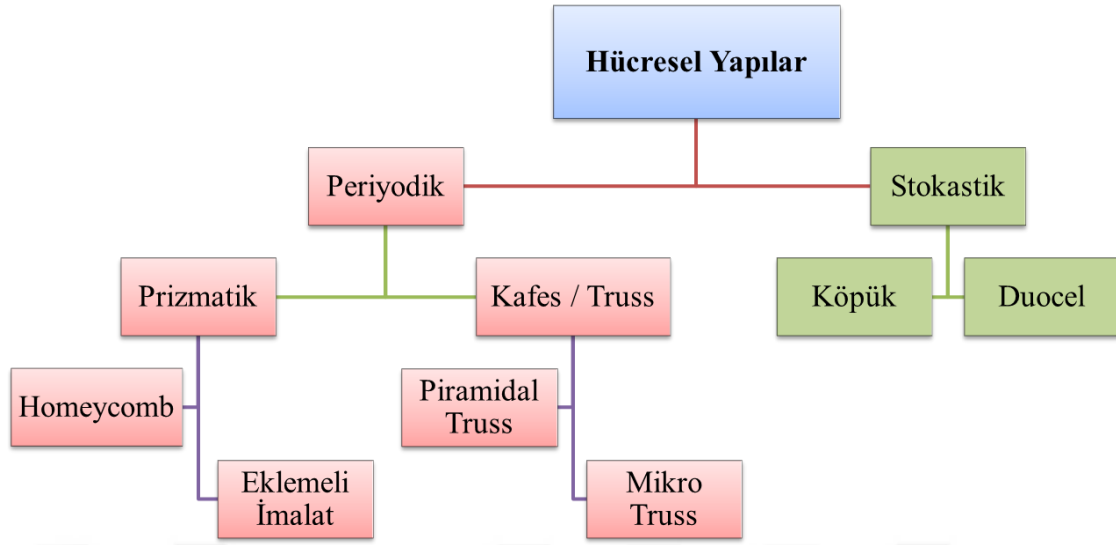
2 Boyutlu Kafes		3 Boyutlu Kafes	
İsim	Hücre Topolojisi	İsim	Hücre Topolojisi
Kare Hücre		Izgara Hücre	
Dikdörtgen Hücre		Octed Hücre	
Altıgen Hücre		X Şeklinde Hücre	
Üçgen Hücre (Hücre Paketi)		Yüz Merkezli Kübik Hücre	
Karışım Hücre (Hücre Paketi)		Vücut Merkezli Kübik Hücre	
Kagome Hücre (Hücre Paketi)		Basit Köpük Model Hücresi	

2.2.2. Hücresel Gözenekli Yapı Sınıfları

Birim hücre şekil ve yapısının, oluşturduğu hücreli yapının mekanik özellikleri üzerinde doğrudan etkisi vardır. Bu nedenle hücreli yapının mekanik davranışlarının anlaşılması için birim hücre şekli, hücre büyüklüğü, hücre duvarlarının ve boşluklarının diğer komşu hücreleriyle olan ilişkilerinin belirlenmesini ve bunların hangi geometrik şekil sınıfında olduğunun tanımlaması gereklidir. Literatürde hücresel yapıların sınıflandırılmalarının da farklı şekillerde yapıldığı görülmektedir.

Ashby vd. (2000) doğal hücresel gözenekli yapıların mekanik özellikleri hakkında kapsamlı bir inceleme yapmış olup bu incelemede hücresel yapıları kafes elemanların dağılımına ve şekline göre periyodik yapılar (belirli aralıklarla yinelenen) ve stokastik yapılar (değişken / raslantısal) olarak genel iki alt sınıfa ayrılmaktadırlar (Şekil 2.9).

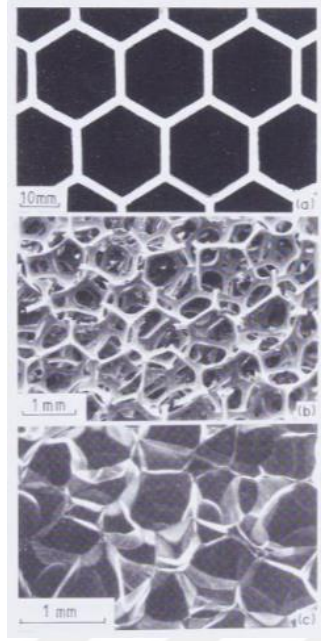
Stokastik hücresel yapılar, köpük malzeme gibi rasgele bir dizilime sahipken; kafes yapılar olarak da tanımlanan periyodik hücresel yapılar ise birbirine bağlı çubuk veya plaka şeklindeki düzenli eleman ağına sahip birim hücrelerden oluşur (Nazir, Mekonen, Kumar ve Jeng 2019).



Şekil 2.9 Hücresel yapıların genel sınıflandırılması (Ashby vd. 2000).

Periyodik hücresel yapılar, tüm tasarım alanında bal peteği gibi, altıgen şeklindeki çokgenlerden oluşan birim hücrenin, 2 boyutlu sıralanacak şeklindeki tekrarından oluşturan yapılar olarak tanımlanabilir. Bu nedenle bu en basit tipteki 2-boyutlu birim hücrelerden oluşan yapılara prizmatik yapılar yada genel adı ile bal peteği (honeycomb) yapılar adı verilmektedir. Genellikle periyodik gözenekli yapılar, mekanik özellikleri kolayca tasarlanabilen düzenli ve tekrarlanabilir kafes yapılarından oluşmaktadır.

Gibson ve Ashby (1997) tarafından yapılan çalışmada; hücresel yapıları hücre topolojilerine göre de açık, hibrit ya da kapalı olarak üç alt sınıfa ayırmaktadırlar. Açık hücresel yapının, sadece açık gözeneklere sahip bir yapı olduğu ve bu özelliği sayesinde hem gaz hem de sıvı ortamlara karşı geçirgen bir yapıda olduğu, kapalı hücresel yapının ise sadece kapalı gözeneklere sahip olduğu ve geçirgen özelliğe sahip olmadığını bildirmektedir. Eğer bir hücresel yapı, bünyesinde hem açık hem de kapalı gözenekler içeriyorsa bu yapının da hibrit yapı olarak tanımlanması gerektiğini bildirmektedir (Şekil 2.10).



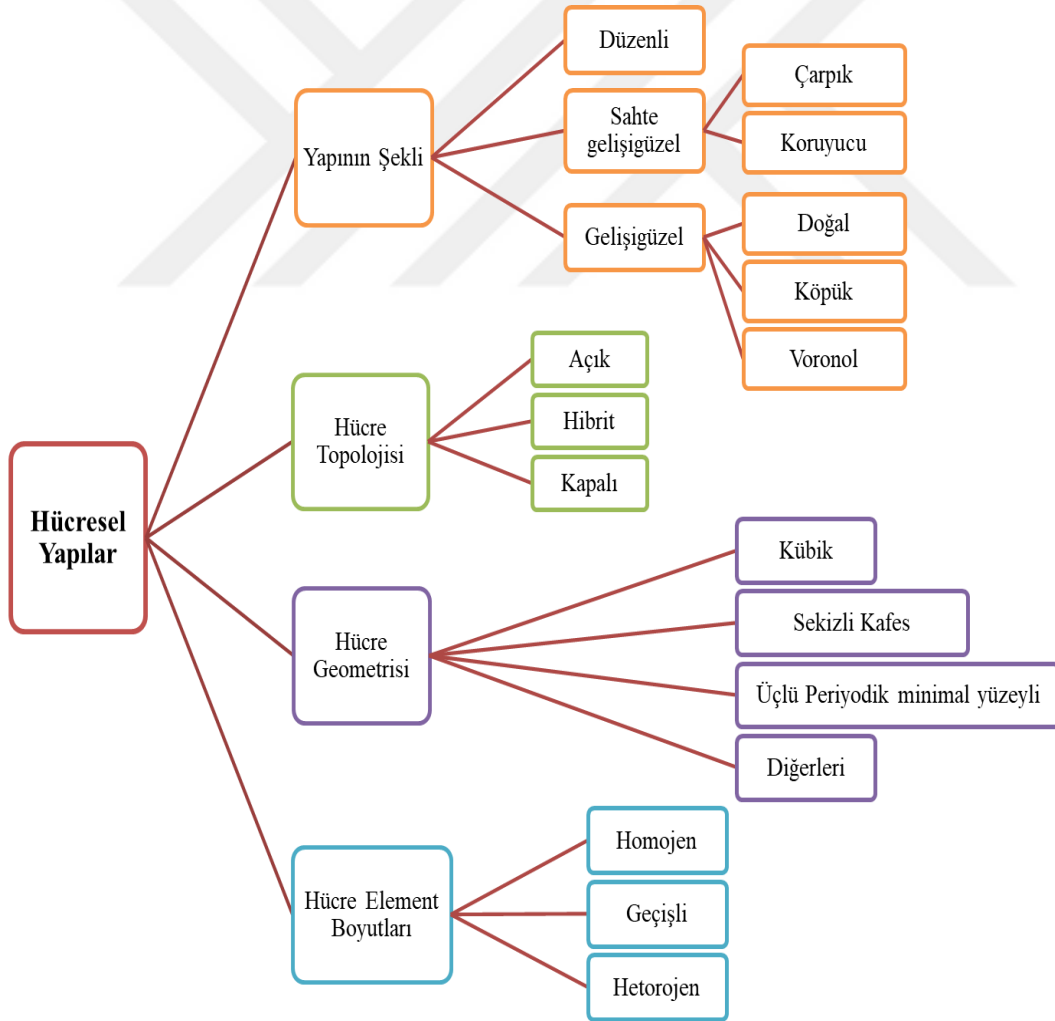
Şekil 2.10 Hücre topolojisine göre hücresel yapılar, a) Açık gözenekli hücresel yapı, b) Kapalı gözenekli hücresel yapı, c) Hibrit hücresel yapı (Gibson ve Ashby 1997).

Talaşlı imalat ile yapılan üretim süreçlerindeki kısıtlı imkânlar kapalı ve hibrit hücresel yapıların üretilmesine izin vermediğinden, mevcut ilk yapay hücresel yapılar açık birim hücresel şekillere sahip olarak üretilmiştir. Zaman içerisinde gelişen eklemeli üretim teknolojilerindeki imalat metotları bu alanda yeni uygulamaları da başlatmış ve kapalı ve hibrit yapıların düzenli imalatı bu sayede mümkün olmuştur. Eklemeli üretim teknolojilerindeki hızlı gelişmelerle birlikte, periyodik hücresel yapılar olarak adlandırılan yeni düzenli hücresel yapılar ortaya çıkmaya başlamıştır. Bu teknikler, düzenli yapılar (karşık topolojiler ve kademeli malzemeler dahil) üreterek bir parçayı katman katman oluşturmayı içerir. Böylece bir bileşenin özellikleri, topolojilerinin hassas kontrolüyle kolayca uyarlanabilir. Bu son gelişmelere dayanarak, bu malzemeler iki grupta sınıflandırılır: stokastik ve periyodik hücresel yapılar (Duarte, Peixinho, Andrade-Campos ve Valente 2018).

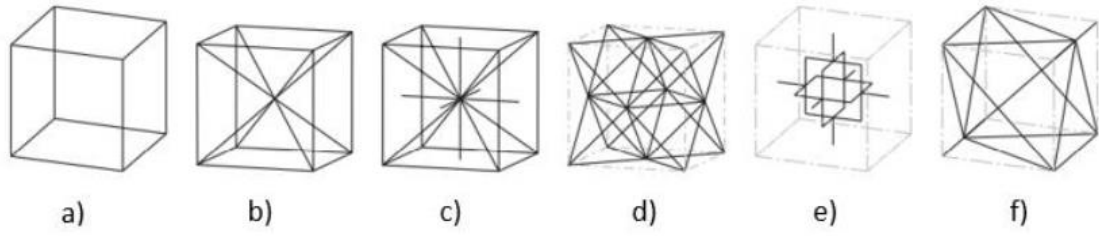
Daha genel olarak, 3-D boyutta kümelenen bu çok yüzeyli prizmatik hücrelerin oluşturduğu 3-D boyutlu hücreli katılar ise stokastik hücresel yapılar veya köpük olarak isimlendirilir. Eğer köpüğün yapıldığı ana malzeme sadece hücre kenarlarında toplanmışsa yani hücreler birbirine açık yüzeylerle bağlıysa bu tip köpüklere açık hücreli köpükler denir. Eğer katı hücre kenarlarına ek olarak hücre yüzeylerinde de katı

malzeme varsa yani hücreler arasındaki bağlantı kapalıysa bu tip köpüklere de kapalı hücreli köpükler denir. Bazı köpükler kısmen açık hücreliyken kısmen kapalı hücreli olabilir (Gibson ve Ashby 1997). Stokastik (değişken / raslantısal) yapılar, genellikle biyolojik yapıların taklit edildiği ya da yerine geçtiği çalışmalar ve üretimlerinde kullanılmaktadır.

Başka bir çalışmada ise Savio vd. (2018) hücresel yapıları şekli, hücre topolojisi, hücre geometrisi ve hücre element boyutları olarak dört ana sınıfa ayrılmıştır (Şekil 2.11). Savio ve diğerleri (2018) tarafından yapılan çalışmada birim hücrelerinin geometrilerine göre 4 alt sınıfa ayrılan hücresel yapılarda, çeşitli araştırmacılar tarafından tasarlanmış ve sık kullanılan birim hücre türleri görsel olarak verilmiştir (Şekil 2.12).

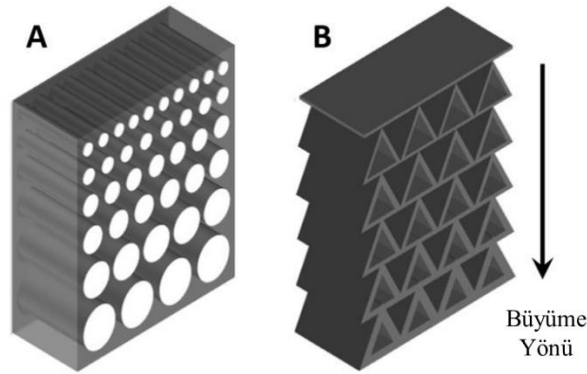


Şekil 2.11 Hücresel yapıların genel sınıflandırılması (Salvio vd., 2018).



Şekil 2.12 Birim hücre türlerine ait görseller a) basit kübik hücre b) gövde merkezi kübik hücre, c) katkılı gövde merkezli kübik hücre, d) sekizli kafes hücresi, e) Gibson-Ashby hücresi, f) Wallach-Gibson hücresi (Savio vd. 2018).

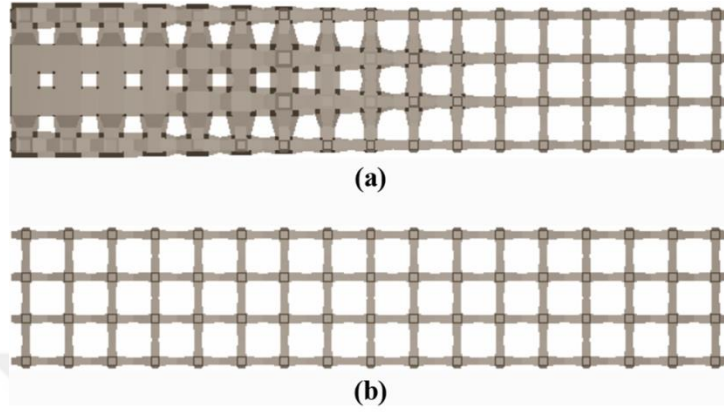
Geçişli yapılar birim hücre büyüklüğü, şekli, strut çapı ve kafes yapıların parça içerisinde dağılımı değiştirilerek oluşturulur. Özellikleri ve yapıları ile kademeli veya sürekli olarak değişebilen geçişli yapılar farklı alanlardan araştırmacıların ilgisini çekmiştir. Chen ve Liou (2019) tarafından yapılan bir çalışmada da hücresel yapıların hücre element boyutlarına göre, homojen, heterojen ve geçişli yapılar olmak üzere üç sınıfa ayrılmıştır. Hücredeki tüm elemanlar aynı boyuta (kiriş boyu, çapı vs.) sahip ise homojen, farklı boyutlar içeriyorsa heterojen, bir sıra boyunca değişiklik gösteriyorsa da geçişli olarak belirtilmektedir (Şekil 2.13).



Şekil 2.13 Geçişli yapı örnekleri; A) gözenekleri dereceleme yönünde boyut olarak kademeli olarak değişen heterojen yapı. B) kafes yapısının kalınlığı yukarıdan aşağıya doğru kademeli olarak geçiş yapan yapı (Chen ve Liou 2019).

Bir diğer çalışmada ise Tang ve Zhao (2016a), tarafından periyodik hücresel yapıyı iki türe ayırmıştır. Eğer yapıdaki tüm birim hücreler aynı geometriyi paylaşıyorsa, bu tür periyodik hücresel yapıya homojen periyodik hücresel yapı denilebileceğini, aksi takdirde, hücreleri yalnızca aynı topolojiyi ve boyutu paylaşan ve farklı kalınlıkta

dikmelere sahip olan yapılara ise heterojen periyodik hücreli yapı adı verilmesi gerektiğini bildirmiştir. Bu iki tür periyodik hücreli yapı arasındaki fark, aşağıdaki gibi gösterilmiştir (Şekil 2.14).



Şekil 2.14 Heterojen kafes ile homojen kafes arasındaki fark (Tang ve Zhao 2016a).

2.2.3. Hücreli Kafes Yapılar

Kafes (lattice) yapılar, bir veya daha fazla tekrar eden birim hücreden oluşan, üç boyutlu yapılardır. Her bir hücre, içerisinde düğüm noktalarından birbirine bağlanan dikmelerden oluşur. Kafes yapılar strut ve düğümlerin birleşerek ve tekrarlayarak oluşturduğu gözenekli yapıların en küçük grubudur. Ashby'e göre kafes yapı, monolitik (şekilsiz) malzeme ve boşluğun birleşimiyle, yeni bir monolitik malzeme mimarisi ve eşdeğer mekanik özelliklere sahip yapıda malzeme türüdür. Yani kafes yapılar içerisinde belirli oranda boşluk bulunduran temel elemanlardır (Kaş 2019).

Kafes yapılar mekanik davranışlarına göre uzama-baskın (stretch dominated, daha çok eksenel yüklere maruz kalan) ve eğilme-baskın (bending dominated, daha çok eğilme yüklerine maruz kalan) kafes yapılar olarak ikiye ayrılır. Çoğu durumda, açık hücreli ya da stokastik kafes yapılar eğilme-baskın davranış gösterirken, kapalı hücreli ya da bazen açık hücreli kafes yapılar uzama-baskın davranış gösterir (Gülcan 2021). Maconachie vd. (2019) tarafından yapılan çalışmada kafes yapılar sahip oldukları şekillere göre; dikme-tabanlı kafes yapılar, üçlü periyodik minimum yüzey kafes yapılar ve kabuk kafes yapılar olmak üzere üç farklı kategoride çeşitlendirilmiştir.

Helou ve Kara (2018) dikme tabanlı (strut-based) kafes yapısı alanında, çok çeşitli araştırma alanlarında yaygın olmaları nedeniyle bugüne kadar herhangi bir literatür derlemesi veya en son teknolojiye sahip incelemelerin bulunmadığını bildirmişler ve bu nedenle kafes yapı tasarımı ve uygulamalarının geniş kapsamının belirlenmesine yardımcı olacak kafes yapısı literatürünün bir özetini belirlemek amacıyla bir çalışma yapmışlardır. Yapmış oldukları bu çalışmada literatürde yaklaşık 40 civarında farklı kafes yapıların kullanıldığı ama bunların birçoğunun diğerlerinden türetilen yapılar olduğunu bildirmektedirler.

2.2.4. Kafes Yapıların Mekanik Özellikleri

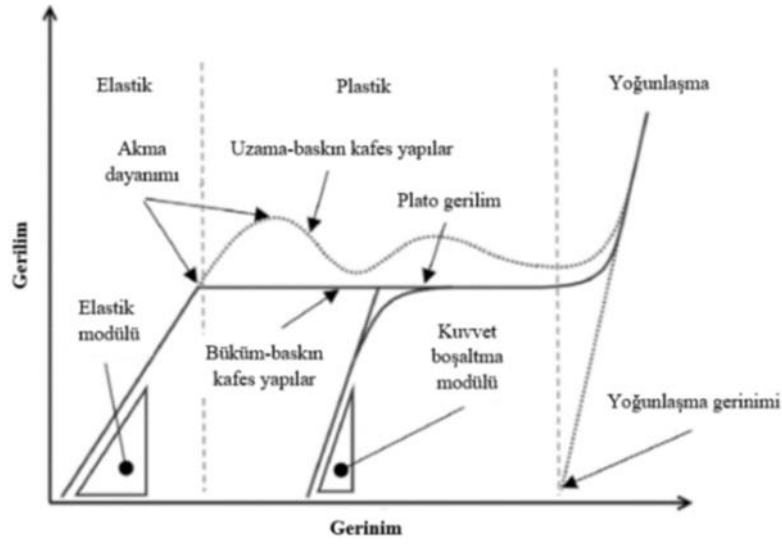
Literatürde hücresel yapıların mekanik özellikleri konusunda analitik ve deneysel olarak farklı araştırmaların yapıldığı görülmektedir. Eklemeli imalatla üretilen kafes yapıların mekanik özelliklerinin belirlenmesinde Gibson-Ashby modeli, analitik yöntemler ve deneyler / testler kullanılmaktadır. Deneysel ve testsel çalışmalar yapılmadan belirlenmesinde en çok kullanılan yöntem, Gibson-Ashby modelidir (Gülcan 2021).

Gibson ve Ashby (1997) tarafından yapılan çalışmada hücresel yapıların, enerji absorbe etme kabiliyetlerinin yüksek olduğu, kütleli olarak hafif olmakla birlikte özgül dayanımlarının yüksek olduğu ve elastisite modül değerlerinin hücresel yapı şekillerine göre değiştiğini ortaya koymuşlardır. Literatürde, kafes yapıların, periyodik dizilimden dolayı, diğer hücreli yapılara göre daha iyi mekanik özellikler gösterdikleri bildirilmektedir.

Duan vd. (2018) deneysel analiz yoluyla yaptıkları çalışmada, değişken kalınlıkta hücre kırılganlığına sahip bal peteği yapıların basma özelliklerini araştırmışlardır. Yaptıkları bu çalışmada geleneksel (homojen) bal peteği yapılar ile değişken kalınlıkta hücre kırılganlığına sahip geçişli bal peteği yapıları kıyaslamışlardır. Değişken kalınlıkta hücre kırılganlığına sahip geçişli bal peteği yapıların, geleneksel (homojen) bal peteği yapılara göre daha gelişmiş basma mekanik özellikleri sergilediği sonucuna ulaşmışlardır.

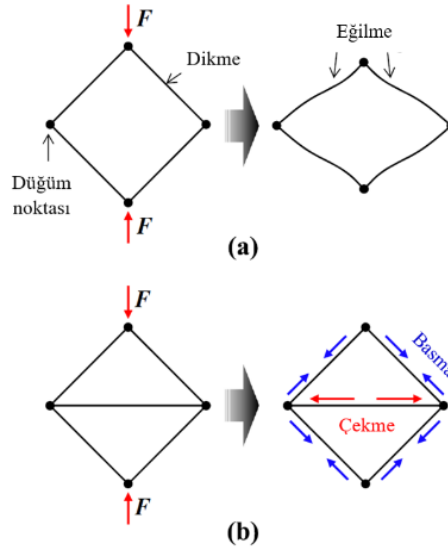
Wang vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada, stereolitografi cihazı süreciyle üretilen kafes yapıların sıkışma davranışı ve enerji emilimi deneysel ve sayısal yöntemlerle incelenmiştir. Dört tür kafes yapı ele alınmıştır: (i) düzgün kafesli kübik; (ii) derecelendirilmiş kademeli kafesli kübik; (iii) z-ekseni takviyeli düzgün kafesli kübik ve (iv) z-ekseni takviyeli derecelendirilmiş kademeli kafesli kübik. Bu dört kafes üzerinde basma testleri yapılmış ve sonlu elemanlar yöntemiyle basma süreci sayısal olarak simüle edilmiştir. Analiz sonuçları, derecelendirilmiş kafesli kübik yapının, düzgün kafesli kübik yapıya göre daha yüksek modül ve dayanıma sahip olduğunu gösterdiği sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca, düzgün kafesler küçük sıkışma mesafelerinde daha iyi enerji soğurma kapasitesi gösterirken, dereceli kafesler büyük sıkışma mesafelerinde daha fazla enerji soğurduklarını bildirmişlerdir.

Maconachie vd. (2019) yapmış oldukları çalışmada, literatürde yapılan deneysel çalışmaların hemen hemen tamamında, kafes yapıların basma yükleri altındaki davranışlarının incelendiğini, bunun sebebinin ise kafes yapılara uygulanacak çekme testlerinin zorluğu olduğunu bildirmektedir. Aynı çalışmada hücresel yapıların büküm-baskın ve uzama-baskın kafes yapılar olarak iki sınıfta incelenmiştir. Her iki sınıfa ait basma yüklemesi durumunda, basma davranışlarını elastik, plastik ve yoğunlaşma şeklinde isimlendirerek 3 temel süreçte incelemişler ve meydana gelen gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi grafiğini çizmişlerdir (Şekil 2.15). Büküm-baskın kafes yapıların basma durumunda genel olarak elastik, plastik ve yoğunlaşma şeklinde süreçlerden geçtiği bildirilmektedir. Büküm-baskın kafes yapıların Şekil 2.15’de görüleceği üzere elastik süreçte, kafes yapının davranışının elastik olduğu, akma dayanımı aşıldığında yapı plastik olarak deforme olmaktadır. Plastik deformasyon sürecinde ise gerilmenin sabit kaldığı süre boyunca malzemenin deforme olmaya devam ettiği bildirilmektedir. Plastik deformasyon sürecinde, uzama-baskın kafes yapılarda ise deformasyonun devam etmesi için gerekli olan gerilmenin sabit kalmayıp salınım gösterdiğini bildirmişlerdir. Her bir hücrenin diğer hücrelerle temas ederek şekil değişiminin yaşandığı plastik deformasyon sürecinin sonlarına doğru yoğunlaşma aşamasına geçilmiş olduğunu ifade edilmektedirler. Son aşama olan yoğunlaşma aşamasında daha fazla deformasyon için gerekli olan gerilim miktarında ciddi artış gösterdiği görülmektedir.



Şekil 2.15 Hücresel kafes yapıların elastik, plastik ve yoğunlaşma aşamalarındaki basma davranışları (Maconachie vd. 2019).

Deshpande vd. (2001) tarafından yapılan çalışmada hücresel malzemelerdeki hücre duvarlarının yapıya yük uygulanması durumunda, eğilme baskın veya çekme baskın deformasyon davranışı gösterdiklerini bildirilmiştir. Yapının göstereceği bu deformasyon tipinin hücre şekli ve topolojisiyle bağlantılı olduğu ifade edilmiştir. Her iki davranış durumu Şekil 2.16'daki gibi gösterilmiştir. F basma yükü alttan ve üstten dikey gelecek bir şekilde uygulandığında, çekme baskın davranışı gösteren durum Şekil 2.16-a'da gösterildiği gibi ortaya çıkmaktadır. Çekme baskın davranış gösteren hücresel yapılarda malzemenin dayanım değeri aşıldığında, hücre duvarlarının ani bir biçimde kırılma ya da burulma ile çöktüklerini belirtmişlerdir. F basma yükünün aynı şekilde uygulandığında, eğilme baskın davranış gösteren yapıda ise durum Şekil 2.16-b'de gösterildiği gibi ortaya çıktığı, yapının hücre duvarında eğme gerilmesi ve eksenel gerilmenin oluştuğu ve sonucunda eğilme momentinin meydana geldiği ifade edilmektedir. Bu eğme gerilmelerine maruz kalan birim hücreye ait deformasyon, Şekil 2.16-a'da gösterildiği gibi, hücresel yapının yıkımının aşamalı olarak diğer hücrelere yayılması ile olduğu, sonrasında kırılma meydana gelerek hücresel yapının çöktüğü bildirilmiştir.

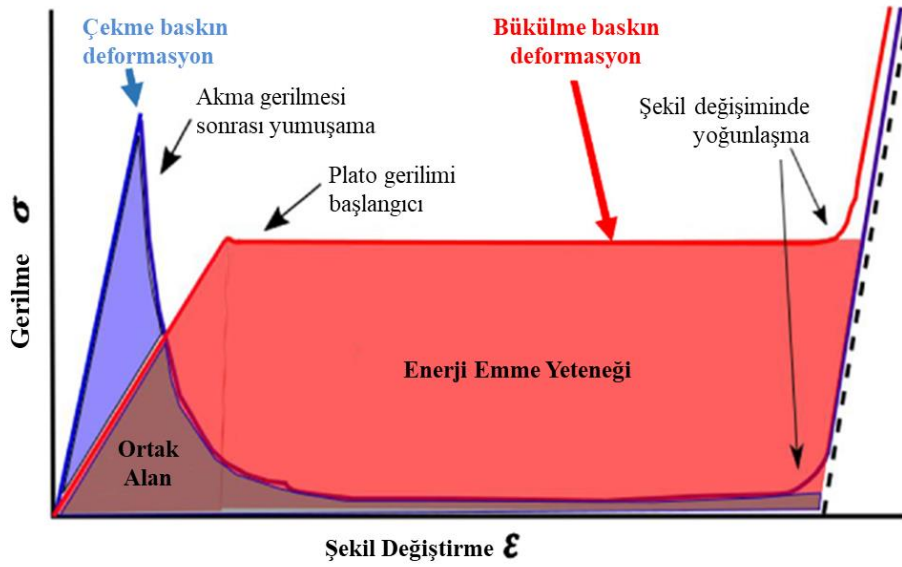


Şekil 2.16 Yapıya yük uygulanması durumunda hücre duvarlarının gösterdiği davranış şekilleri
a) Eğilme-baskın yapılar, b) uzama baskın yapılar (Gülcan 2021).

Farklı kafes yapıların basma davranışları literatürde yapılan deneysel çalışmalar sonucunda belirlenmiştir. Örneğin, hacim merkezli kübik ve dikmeli yüzey merkezli kübik yapılar büküm-baskın davranışlar gösterir. Yani akma dayanımından sonra sabit gerilimde yapı deforme olmaya devam eder. Bu yapılara dikmeler eklenerek elde edilen hacim merkezli kübik ve ilave dikmeli yüzey merkezli kübik yapılar ise uzama-baskın davranış gösterir, yani akma dayanımından sonra daha fazla deformasyon için daha fazla gerilime ihtiyaç duyulur (Gülcan 2021).

Dikme-tabanlı kafes yapılarda dış yükleri dengeleyecek miktarda dikme olmadığı için dikmelerde bükme gerilmeleri oluşur. Bu yapılar eğilme-baskın davranış gösterir. Dikmeler, üzerlerinde oluşan basma ve çekme yükleri sayesinde dış yükleri dengeleyebildikleri için, düğüm noktalarında eğilme oluşmaz. Bu yapılar ise uzama baskın davranış gösterir (Gülcan 2021).

Neff, Hopkinson ve Crane (2018) tarafından yapılan çalışmada Şekil 2.17’de, hücresel yapıların eğilme ve çekme baskın davranışları için gerilme-birim şekil değiştirme grafiği ve eğrisi verilmiştir. Verilen grafikte kırmızı alanın eğilme baskın davranış, mavi alanın ise çekme baskın davranış gösterdiği bildirilmektedir.



Şekil 2.17 Bükülme ve gerilmenin hakim olduğu yapıların deformasyon özelliklerini karşılaştıran gerilim ve gerinim eğrileri (Neff vd. 2018).

Tan ve Qu (2010) tarafından yapılan çalışmada, hücresel malzemelerin özellikle patlama ve çarpışmadan etkilenecek uygulama alanlarında, yüksek darbe ve enerji sönümlenme özelliklerinden dolayı tercih edilebileceklerini bildirmişlerdir. Bunun nedenini ise plastik sıkıştırma sırasında plato bölgesi diye adlandırılan bölgede gerilmenin sabit kaldığı süre boyunca yoğunlaşmış şekil değişiminin gerçekleşmesinden kaynaklı olduğunu bildirmişlerdir.

Hedayati vd. (2016) yapmış olduğu çalışmada hücresel yapının mekanik özelliklerinin 4 değişkene bağlı olduğunu bildirmektedir. Bunları; birim hücre boyutu, kolon kalınlığı, malzeme ve hacimsel boşluk oranı şeklinde tanımlamaktadır. Tang ve Zhao (2016) yapmış olduğu çalışmada hücresel yapıları birim hücrelerinin boyutlarına göre mikro boyut, orta boyut (mesoscale) ve makro boyut olarak sınıflandırmaktadır. Orta boyuttaki birim hücreleri 0,1 mm ile 10 mm arasında değişirken, birim hücrenin boyutları bu değerlerden küçük ise mikro boyut, büyük ise makro boyut olarak ifade etmektedirler. Kolon kalınlığı ise, birim hücreyi oluşturan her bir çizgi yada eğriye verilen kalınlık değeri olarak ifade edilebilir. Kolon kalınlığı seçiminde birçok araştırmacı tarafından 0,1-1 mm değer aralığında çalışılarak sonuçlar değerlendirilmiştir.

Gülcan (2021c) Eİ ile üretilen kafes yapıların mekanik özelliklerin üzerinde etkili olan parametrelerden bahseden ve geniş bir literatür taraması yaptığı çalışmada; kafes yapıların mekanik özelliklerinin, ana malzemenin mekanik özellikleri, birim hücre ve dikme şekli ve boyutu, birim hücrenin kafes yapı içindeki dizilim şekli, dikme ve düğüm noktalarının birleşimi, dikmenin katı veya içi boş olması, ısıtıl işlem, dikme / birim hücre oryantasyonu, inşa yönü ve gözenek boyutu gibi birçok parametreden etkilendiğini belirtmiştir. Eİ ile üretilen kafes yapıların mekanik özellikleri üzerinde en etkili parametrelerden birisinin dikme boyutları olduğunu vurgulamıştır. Kafes yapıların mekanik özellikleri üzerinde dikme uzunluğunun çapa oranı, dikme açısı ve birim hücre sayısının etkili olduğu yapılan deneysel çalışmalar sonucunda gösterildiğini bildirmektedir. Literatürde Eİ ile üretilen kafes yapılarda, ilave dikme eklenmesinin de mekanik özellikler üzerinde olumlu etkisinin olduğu söylemektedir. Aynı zamanda, kafes yapılarda birim hücre boyutlarının, basma dayanımı üzerinde çok etkili olduğunu bildirmekte ve özellikle düşük gerinimlerde, lokal olarak meydana gelen kırılmalar ve çatlak ilerlemelerinden dolayı oluşan deformasyonlardan kaçınmak için, eklemeli imalatın kabiliyetlerine uygun en düşük birim hücre seçilmesi gerektiğini ifade etmektedir.

Literatürde, Eİ ile üretilen yapıların kafes yapılarında, ekstra dikmelerin eklenmesinin mekanik özellikler üzerinde olumlu bir etkisi olduğu belirtilmektedir. Smith ve ekibi, 316L paslanmaz çelikten yapılan kafes yapıların basma dayanımlarını inceleyerek, dikmelerin yüklenme yönünde eklenmesinin mekanik özellikleri önemli ölçüde artırdığını göstermiştir (Smith vd. 2011). Contuzzi vd. (2013), SLE yöntemi ve 18Ni Marage 300 çelik kullanarak ürettikleri kafes yapılarında, yüklenme yönünde dikmelerin parçanın yük taşıma kapasitesini artırdığını ve örneğin 8 adet dikme eklenmesiyle yük taşıma kapasitesinin iki katına çıktığını bildirmiştir. Ayrıca, dikmelerin yük taşıma kapasitesindeki artışın, göreceli yoğunluk artışından daha fazla olduğu belirtilmiştir. Kafes yapılarında, dikme yönünde katman oluşturma basma dayanımını %63,4 oranında artırdığı ve işlem süresini ise %18,7 oranında azalttığı Liu ve ekibi tarafından yapılan testlerde gösterilmiştir. Bu testler, PolyJet ve FDM yöntemleriyle üretilen kafes yapılarla gerçekleştirilmiştir (Liu vd. 2019). Wally vd. (2019) SLE yöntemi ve Ti6Al4V alaşım tozlarını kullanarak ürettikleri elmas kafes

olarak isimlendirdikleri yapıda, merkeze yerleştirilen dikmelerin hem elastik modülü hem de akma dayanımını artırdığını belirtmiştir.

Harshit vd. (2019) yaptıkları çalışmada baskı parametresinin baskılı iskenenin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Kafes sisteminin mekanik özellikleri büyük ölçüde baskı parametrelerine bağlı olduğunu gözlemlemiştir. Bu nedenle, bu çalışmada üç önemli işlem parametresi, yani katman yüksekliği, dolgu yoğunluğu ve baskı hızı, bir basma testi gerçekleştirerek mekanik dayanım üzerindeki etkilerini incelemiştir.

Literatürde yapılan çok sayıda çalışmadan da anlaşıldığı üzere biyo-ilhamlı hücresel yapı geometrisi tasarımlarında seçeneklerin çok olmasının yanı sıra hangilerinin tercih edileceğinin tasarımcının isteğine bırakıldığı, ancak yapının mekanik özellikleri üzerinde farklı parametrelerin etkili olduğu gözler önüne serilmiştir. Bu parametrelerden birim hücre topolojisi, birim hücre boyutu, kolon kalınlığı ve kafes yapısının tipi ile birim hücrenin kafes yapı içindeki dizilim şeklinin, literatürde daha önceki yapılan deneysel çalışmalarla uyumlu olarak belirlenmesi gerektiği görülmektedir.

Bu nedenle, tez kapsamında öngörülen BFHY geometrisi kullanarak tasarlanacak yapının basma kuvveti altındaki davranışlarının daha kolay gözlenmesi amacıyla literatürde yer alan; birim hücrenin açık topolojide ve orta boyut (mesoscale) hücre tipine sahip olacak şekilde çalışılması sonucuna ulaşılmıştır. Kafes yapısı oluşturma tasarımında ise; periyodik (düzenli) tekrar eden birim hücreye sahip homojen ve geçişli olmak üzere iki farklı kafes yapısı şeklinde çalışılması gerektiği kanaatine varılmıştır.

2.3. Eklemeli İmalat

Tezin bu bölümünde Eİ yöntemleri hakkında ulusal ve uluslararası alanda yapılmış olan ilgili çalışmalar araştırılmış ve Eİ yöntemlerinin genel hatlarıyla ilgili bilgilere yer verilmiştir. Bu çalışmanın konusunu oluşturan EYM eklemeli imalat yöntem ve özellikleri üzerinde durulmuştur.

2.3.1. Eklemeli İmalat Gelişim Süreci

Eklemeli İmalat Teknolojisi (EİT) son yıllarda özellikle tıp, uzay, otomotiv ve havacılık gibi birçok farklı alanda ve farklı amaçlarla yaygın olarak kullanılan yeni bir üretim yöntemidir. Amerikan Test ve Malzeme Derneği (ASTM International) Eİ'yi eksiltici imalat yöntemlerinin aksine, 3 boyutlu model verilerinden nesneler oluşturmak için malzeme birleştirme süreci olarak tanımlamaktadır (ASTM International, 2013).

Yöntemin temeli, dijital üç boyutlu verinin, katmanlar halinde nesneye dönüşme sürecine dayandığı için “katmanlı üretim” şeklinde de isimlendirilmektedir. Bunun haricinde “3D yazıcı teknolojisi”, “3 boyutlu baskı”, “hızlı prototipleme” veya “serbest şekillendirme” imalatı olarak da isimlendirilebilmektedir. Bu imalatı gerçekleştiren makineler ise “3B yazıcı” veya “çok boyutlu yazıcı” olarak isimlendirilmektedir.

Bu imalat metodu, geleneksel imalat yöntemlerinden farklı olarak üretilmek istenen parça, blok ham malzemeden talaş koparma veya kütsel şekillendirme yerine, ham malzemenin yöneme bağı olarak lazer kaynağı ile eritilerek veya akmaya elverişli durumunda katmanlar halinde birbirine eklenmesi ile üç boyutlu parça imalat prensibine dayanır. Eİ yönteminin diğer imalat yöntemlerine oranla daha az malzeme kullanımına, karmaşık geometrideki ürünlerin üretimine olanak tanımasından dolayı Eİ birçok uygulama alanına sahiptir. Şekil 2.18’de sağlık sektöründen endüstriyel alana dek birçok Eİ uygulamaları gösterilmiştir (Ergene 2020).

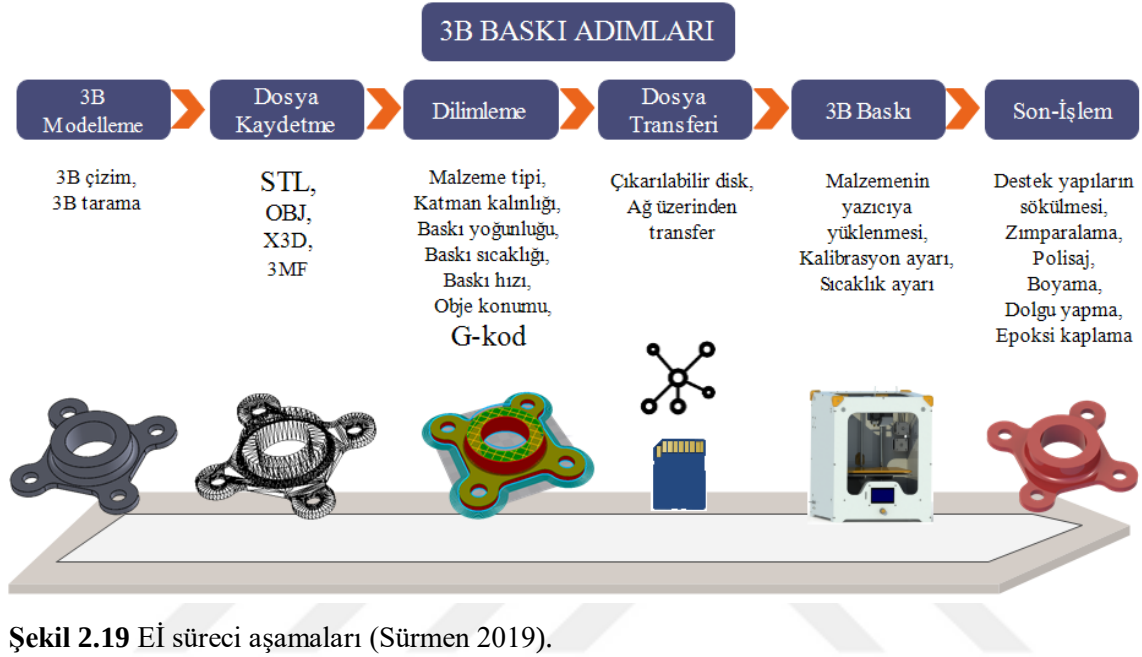
EİT endüstrinin yanı sıra, ürünlerin kişiselleştirilmesi ve yeni tasarımların ilk örnek denemelerinin hızlı sonuçlandırılmasına imkân vermesi nedeniyle araştırma ve akademik çalışmalar içinde sıklıkla kullanılmaktadır. Geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında; geleneksel üretim tekniklerinde yoğun olarak kullanılan iş gücü ve zamandan tasarruf, kesici takım gibi yardımcı aparatlara ihtiyaç duymadıklarından dolayı maliyet tasarrufu ve atık malzeme tasarrufu sağlamaktadır.



Şekil 2.18 Eİ ile üretilen çeşitli medikal ve endüstriyel parçalar (Ergene 2020).

Bununla birlikte tasarım esnekliğini nedeniyle geleneksel tekniklerle üretilmesi çok zor veya imkânsız olan karmaşık şekilli parça üretimi, üretilen parçaların mekanik özelliklerinin daha iyi olması gibi üstün özelliklere sahiptir. Ancak, EİT tüm bu üstün özelliklerine rağmen; yavaş üretim hızı, henüz seri üretime uygun olmaması, üretimin 3D yazıcının boyutları ile sınırlı olması, üretimde kullanılan malzeme çeşitliliğinin az olması gibi bazı sınırlılıkları ve sorunları mevcuttur.

Geleneksel üretim metotlarından farklılık gösteren Eİ üretim sistemi, bir bakıma dijital verinin, nesneye dönüştürülme sürecidir. Bu süreç neredeyse tüm yöntemler için genel olarak standart hale gelmiş ve Sürmen (2019) tarafından şematik olarak Şekil 2.19’da gösterildiği üzere altı aşamada tanımlanmıştır.



Şekil 2.19 Eİ süreci aşamaları (Sürmen 2019).

Sürecin ilk aşamasında; üretilcek parça bilgisayar destekli tasarım programları (CAD) aracılığı ile 3 boyutlu çizim yapılarak modellenir. Bazı durumlarda üç boyutlu tarama yöntemi kullanılarak da dijital bir model oluşturulabilmektedir. Sürecin ikinci aşamasında; oluşturulan model, 3D’nin programlama diline uygun dosya formatına dönüştürülerek aktarılmak üzere kaydedilmektedir. Bu alanda en çok kullanılan dosya formatı, bir nesnenin yüzeylerini tanımlamak için çokgenlere ayırma metodunu kullanan Standard Triangle Language (STL) dosya formatıdır. Sürecin üçüncü aşamasında; 3D baskı makinesinin programlama diline uygun STL dosya formatına dönüştürülerek kaydedilen model bir dilimleme yazılım programına alınır. Bu dilimleme yazılım programının amacı, STL dosyasını sayısal bir kontrol (NC) programlama dili olan G koduna dönüştürerek, 3B parça üretimini katman katman olacak şekilde programlamaktır. Dilimleme yazılım programı aynı zamanda tasarımcının imalat esnasında kullanılacak malzeme türünü, katman kalınlığını, doluluk oranını, tarama açısını, nozul sıcaklığını, tabla sıcaklığını, baskı hızı gibi parametreleri

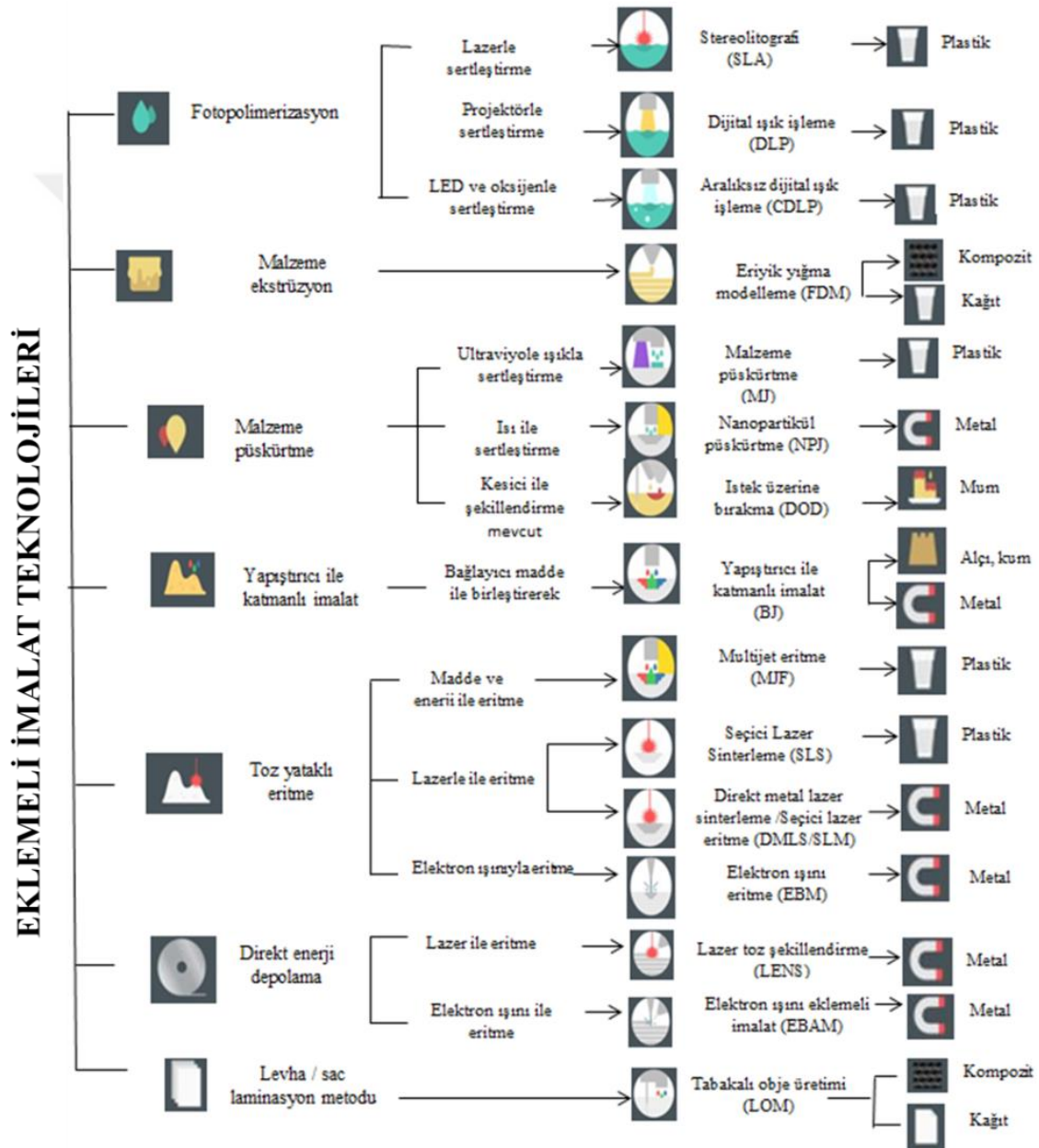
kontrol etmesini ve 3D tezgâhında nesnenin konum ve yönünün ayarlanabilmesini sağlar. Bu dilimleme yazılım programları tasarlanan modelin imalat öncesindeki üretim aşamalarının kademe kademe ön izlemesinin yapılmasına ve dolayısıyla hataların önüne geçilmesine imkan sağlamaktadır. Farklı çeşitlerde dilimle programlar bulunmaktadır. Bunlardan en bilinenleri Cura ve Repetier'dir. Sürecin dördüncü aşamasında; üçüncü adımdaki dilimleme yazılım programı ile G koduna dönüştürerek düzenlenen ve imalat esnasında kullanılacak parametreleri ilave edilen dosya taşınabilir bellek veya kablolu/kablosuz ağlar üzerinden 3D'ye transfer edilir. Sürecin beşinci aşamasında; imalat esnasında kullanılacak baskı malzemesi makineye yüklenir. Başlatma komutuyla birlikte yazıcıya daha önceden transfer edilen dosyadaki parametrelere uyum olarak yazdırma işlemi 3D tarafından yazdırma işlemi otomatik olarak gerçekleştirilir. Basım aşamasında, bir önceki katmanın üzerine bir sonraki katman eklenerek, katmanlı bir yapı oluşturulur. Sürecin altıncı ve son aşamasında; basım sonrası işlemler yazıcı teknolojisine, kullanılan yöntem ve malzemeye bağlı olarak değişim göstermekle birlikte genellikle varsa parça üzerindeki destekler temizlenmekte, yüzey işlemleri gibi bitirme işlemleri uygulanmaktadır.

Kafes yapıların karmaşık geometrilere sahip olması bu yapıların üretilebilirliğini zorlaştırmaktadır, ancak günümüzde Eİ teknolojisinde sağlanan gelişmeler, farklı kafes yapıların üretilmesine olanak sağlamıştır. Eİ, tasarımcılara ve araştırmacılara, farklı kafes yapılar tasarımları ve bunları farklı endüstriyel uygulamalarda kullanabilme olanağı sağlar (Gülcan 2021a).

2.3.2. Eklemeli İmalat Çeşitleri

Eİ teknolojisi genellikle tek bir ortak isimle ifade edilse de, tek bir teknoloji olmayıp çeşitli yöntem ve üretim süreçlerine sahip birden çok alt teknolojiler kullanılmaktadır. Alt teknolojik yöntemler arasındaki farklılıklar genellikle katmanların nasıl oluşturulduğu ile ilgilidir. Her imalat yönteminin tercih edilme sebepleri vardır. Bu yöntemler, üretimi yapılacak malzeme türüne, tasarıma, üretilecek ürünün kullanım alanına ve maliyete göre tercih edilebilmektedir.

Esas olarak, ASTM eklemeli imalat grubu, bu dinamik yapıya ve yüksek teknolojiye sahip imalat metodunu, ASTM F42 standardı altında yedi kategoriye ayırmıştır (ASTM International, 2013). Sistematik olarak bu yöntemler Yalçın ve Ergene (2017) tarafından Şekil 2.20’de verilmiştir. Bu kategoriler; fotopolimerizasyon, malzeme ekstrüzyon, malzeme püskürtme, yapıştırıcı ile katmanlı imalat, toz yataklı eritme, direkt enerji depolama, levha/saç laminasyon olarak isimlendirilmektedir.



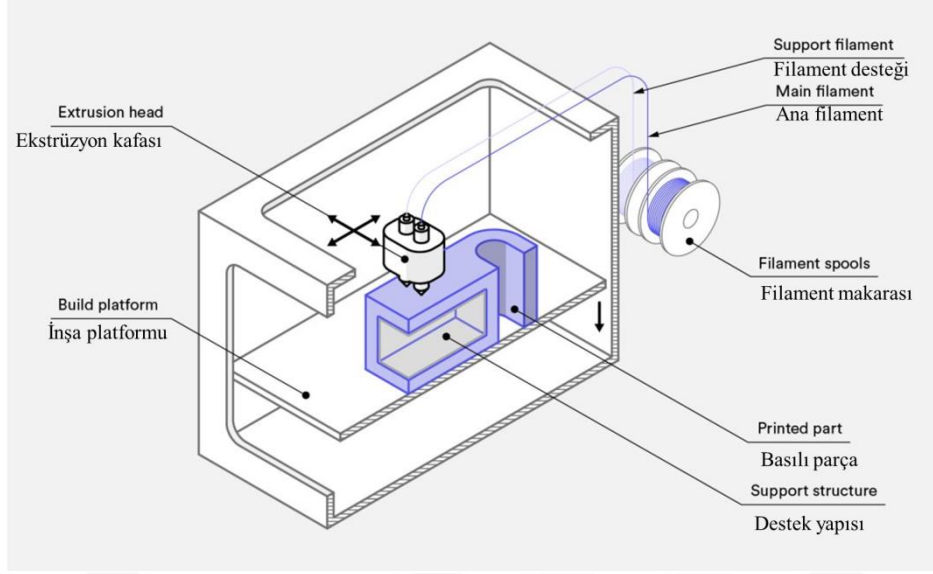
Şekil 2.20 Eklemeli imalatın ASTM F42 standardına göre sınıflandırılması (Yalçın ve Ergene 2017).

Bu yöntemler malzemelerin birikerek katmanların oluşturulması, parça oluşturma ve çalışma prensibi bakımından farklılık göstermektedir. Bazı metotlar, örneğin seçici lazer eritme, seçici lazer sinterleme ve eriyik biriktirme gibi katmanları üretmek için malzemeleri eritir veya yumuşatır, diğerleri ise stereolitografi gibi sıvı malzemeleri birleştirir. Her yöntemin kendine özgü avantajları ve dezavantajları vardır ve bazı imalatçılar sonuç olarak parçanın oluşturulacağı malzeme için toz ve polimer arasında bir seçim sunmaktadır (Özsolak 2019).

2.3.3. Eriyik Yığma Modelleme

3D baskı teknolojilerinde en yaygın olarak kullanılan yöntem katmanlı üretim yöntemleri olarak göze çarpmaktadır. Bu yöntemlerden en çok kullanılanı ise plastik malzemenin eritilerek katı nesneler oluşturulmasını sağlayan Eriyik Yığma Modelleme (EYM) yöntemidir. Eİ teknolojisi ucuz olmasının yanı sıra yazılım ve donanımının açık kaynak kodlu olması gelişimini hızlandırmış ve ulaşılabilirliğini arttırmıştır (Levy vd. 2003).

Bu teknoloji kapsamında çalışan 3D makinaları ve EYM süreci oldukça basit bir işleyişe sahip olup şu şekilde çalışmaktadır; tel şeklindeki filament diye adlandırılan malzeme zıt doğrultularda dönen iki merdane arasından geçirilerek belirli itme kuvveti ile nozul olarak isimlendirilen püskürtme ucu içerisine hareket (ekstrüde) ettirilir. Nozul içerisinde malzemeyi ergime noktasının üzerindeki bir sıcaklıkta tutacak bir ısıtıcı vardır. Bu ısıtıcı vasıtasıyla eriyen malzeme itme kuvvetinin etkisi ile nozul denilen parçadan çapı küçültülerek çıkan malzeme yazıcının baskı tablası üzerine akıtılır. Eriyerek dışarı akan bu malzeme yazıcının x-y ekseninde hareketleri ile istenilen doğrultuda aktıktan sonra sertleşmekte ve altındaki tabla yada katmana yapışması sağlanarak bir katman oluşturulmuş olur. Bu şekilde oluşturulan bir katman bittiğinde nozul yukarı doğru z ekseninde hareket eder. Bu işlem, parça tamamlanana kadar tekrar edilir. Katmanların z ekseni boyunca, üst üste birikmesi ile istenilen üç boyutlu nesne oluşturulur. EYM ile çalışan bir yazıcının ana bileşenleri Şekil 2.21’de gösterilmiştir (İnt.Kyn.3).



Şekil 2.21 Eriyik yığıma yöntemi çalışma prensibi (İnt.Kyn.3).

2.3.4.EYM İmalat Yönteminde İşlem Parametreleri

Eİ teknolojilerinde filament olarak yoğun şekilde, ısı ile şekil alabilen termoplastik malzemeler kullanılmaktadır. EYM’de en çok kullanılan termoplastik polimerlerden bazıları; Akrilonitril Butadin Stiren (ABS), PLA Polilaktik Asit (PLA), PETG Polietilen tereftalat (PET), TPE Termoplastik elastomerler, TPU Termoplastik poliüreten (TPU), TPC Termoplastik kopolyester (TPC), Polikarbonat (PC), Karbon fiber, Polipropilen (PP), Polioksimetilen (POM) ve Naylon olarak bilinmektedir.

Bunlardan en çok kullanılanları Akrilonitril Butadin Stiren (ABS) ve PLA Polilaktik Asit (PLA) olarak isimlendirilenleridir. Bir petrol ürünü olan Akrilonitril Butadin Stiren (ABS), sert bir termoplastik polimerdir. ABS yüksek dayanım ve darbe direncine sahiptir. ABS malzemesinin negatif özelliği yazdırma işlemi sırasında zehirli hidrojen siyanür (HCN) gazı çıkarmasıdır.

PLA Polilaktik Asit (PLA) ise daha çok tercih edilen malzemedir. PLA, ABS’den farklı olarak nişasta içeren malzemelerden elde edilen organik bir üründür. PLA malzemesinin negatif özelliği ise ABS’den daha düşük sıcaklık dayanıma sahip olmasıdır. Buna karşılık yazdırma süreci en kolay filamentlerden biridir. Hem organik olması hem de

sürecinin kolaylığı nedeni ile 3D’lerde filament olarak kullanımı tercih nedenidir (Tatlı 2020).

Termoplastik malzemelerin davranışları sıcaklığa bağlı olduğu için ısı değişkenler bu tip baskıda önem arz eder. Çünkü her bir termoplastik türü için erime ve camlaşma sıcaklığı birbirinden farklıdır. Dolayısıyla, bu teknoloji ile çalışan yazıcıların baskısı yapılmak istenen ürüne uygun seçilmiş bir termoplastiğin erime sıcaklığına göre ve yine bu erime sıcaklığına bağlı olacak şekilde tabla ayarının yapılarak çalıştırılması önemlidir (Jain ve Kuthe 2013).

EYM yönteminde kullanılan işleme parametreleri; dilimleme parametreleri, inşa yönü ve sıcaklık koşulları olarak üç temel gruba ayrılabilir (Popescu vd. 2018).

- Dilimleme parametreleri: Katman (tabaka) kalınlığı, nozzle çapı, akış hızı, işleme hızı, doluluk oranı, tarama yönü, tarama açısı, tarama genişliği, tarama deseni, kontur genişliği, üst kalınlık, alt kalınlık gibi parametrelerdir ve üretilecek parçanın mekanik davranışına etki etmektedir.

- İnşa yönü: EYM yöntemi ile üretilen parçalar, tarama deseni, tarama yönü ya da inşa yönüne bağlı olarak anizotropik özellikler göstermektedirler. Üretilecek parçaların dikey, yatay ya da yanal inşa yönünde üretilmesi, yapının farklı mekanik özellikler göstermesine neden olur.

- Sıcaklık koşulları: EYM yönteminde kullanılan termoplastik malzemeler, çevre sıcaklığı, işleme sıcaklığı (ekstrüzyon sıcaklığı) ve tabla sıcaklığının değişimine bağlı olarak farklı mekanik özellikler gösterirler.

Literatür incelendiğinde, EYM yöntemiyle üretilen endüstriyel ürünlerin mekanik özellikleri için diğer önemli parametrelerin; tarama açısı, baskı hızı, katman kalınlığı, ve doluluk oranının olduğu görülmektedir. EYM yönteminde yazdırma genişliğinin katman kalınlığına oranının artmasının mekanik performansı arttırdığı bildirilmekte ve bu oranın 2 ve üzerinde olması tavsiye edilmektedir (Kuznetsov vd. 2018).

Uygun malzeme parametrelerinin seçimi, yapılacak çalışmanın performansını önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Bu sebeple literatür araştırması sonucunda tespit edilen önermeler dikkate alınarak, gerçekleştirilecek olan tasarımın mekanik performans beklentisinin yüksek olması sebebi ile EYM yöntemiyle 3D’de, PLA malzeme kullanılarak üretilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Çalışmada kullanılacak diğer üretim parametrelerine bu çalışmanın üçüncü bölümünde yer verilmiştir.

2.4. Literatürdeki Biyo-Esinle Tasarlanmış Gözenekli Benzer Yapı Tasarım Çalışmaların Araştırılması ve İncelenmesi

Biyomimikri alanında genellikle hayvanlar, bitkiler ve meyvelerde bulunan şekiller de dahil olmak üzere bambu, balık pulu, sedef kabuğu, kelebek, lotus çiçeği gibi çeşitli doğal formlardan esinlenilmiş pek çok araştırma bulunmaktadır (Karabetça 2016, Yıldız 2012). Literatürde gözenekli malzemelerin tasarımı ve imalatı üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde, bu çalışmaların büyük bir çoğunluğunun doğadan esinlenilmiş (süngerimsi kemik, hayvan iskelet sistemleri, mercanlar, süngerler, çeşitli hayvan derileri, bal peteği geometrisi gibi) birim hücre tasarımına odaklandığı görülmektedir.

Bunlardan süngerimsi kemik gözenek yapısı dikkate alınarak tasarlanan implantta kemik ile uyumlu elastisite modülü elde edilerek kemikte gerilme kalkını oluşumu engellenmiş ve kemik iyileşmesi kemiğin implanta gözenekler aracılığıyla daha iyi tutunabilmesiyle hızlanmıştır (Taniguchi vd. 2016). Bir diğer çalışmada ise yapay mercanların üretilebilmesi için Eİ ile mercan yüzeyi ve gözenekli dokusundan esinlenilerek bir yüzey tasarlanmış ve Chromis Viridis balığının 3B baskıyla oluşturulmuş ve doğal habitatlarla etkileşimleri incelenmiştir (Ruhl ve Dixon 2019). Çalışma sonucunda Chromis Viridis balığının her iki ortamda da benzer etkileşimler gösterdiği ve yapay modellerin, mercan resif balıkları veya doğal habitat türleri için zararlı olmadığı gözlemlenmiştir. Yapılan bu çalışmalar 3B baskı tekniklerinin doğadan esinlenilmiş ve doğayla uyumlu gözenekli malzeme tasarımı için oldukça yüksek potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

Doğadan esinlenilmiş gözenekli malzemelerin tasarımı ve imalatı yanında incelenmesi gereken bir diğer önemli husus ise mekanik özellikleridir. Bu doğrultuda Du et al., tarafından yapılan çalışmada böcek ön kanadında bulunan tüp geometrisinden esinlenerek tasarlanan birim hücre, Seçici Lazer Ergitme Eİ tekniği kullanılarak üretilmiş ve malzemenin basma dayanımına üretim parametreleri ve hücre geometrisinin etkisi incelenmiştir (Du vd. 2019). Basma dayanımının gözenekli malzemenin birim hücre tasarımıyla ve üretim parametreleriyle yakından alakalı olduğu ve dikmelerde meydana gelen kırılmalar sonucunda gerilme değerlerinde belirgin bir düşüşün meydana geldiği görülmüştür. Birim hücre geometrisi yanında, gözeneklilik oranı ve birim hücrenin geometri boyunca homojen veya heterojen dağılımı gözenekli malzemelerin mekanik dayanımına etki eden diğer önemli parametrelerdir. Bu konuyla alakalı Yang vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada, gözeneklilik oranının %60'tan %80'e çıkmasıyla birlikte basma dayanımı $59,5 \pm 0,2$ MPa'dan $14,2 \pm 1$ MPa'a azalırken, basma modülü $3,3 \pm 0,3$ GPa'dan $1,5 \pm 0,4$ GPa'a azaldığı bildirilmiştir.

Bir diğer çalışmada ise homojen ve değişken gözenek yapısına sahip malzemeler tasarlanarak her iki grubun mekanik özellikleri kıyaslanmıştır (Wang vd. 2020) Homojen gözenek yapısına sahip numuneler küçük sıkıştırma mesafelerinde daha iyi enerji soğurma yetenekleri gösterirken, değişken gözenek yapısına sahip numuneler büyük sıkıştırma mesafelerinde daha fazla enerjiyi absorbe etmiştir. Ayrıca her iki gruba da eklenen ilave bir yükleme yönündeki dikme malzemenin basma dayanımını arttırmıştır.

Sanchez vd. (2005) tarafından yapılan çalışmada bitki ve hayvan karakteristiklerinden yapılmış uygulamalar ve örneklerle yer vermiştir. Hidrodinamik ve aerodinamik yapı, için suya dayanım ve yapışkanlık gibi özellikler için bitki ve hayvan özelliklerinden yararlanıldığını söylemektedir. Su tutmayan veya su seven kaplamalar konusunda nilüfer yaprağının mikro yapısının çok yararlı bir kaynak oluşturduğundan bahsetmektedir. Köpekbalığı ve yunus derilerinin analizi ile üretilen, mikroskobik yivlerle kaplanmış plastik filmlerin uçak kanatlarında kullanılarak sürtünmeyi azaltıp yakıt tasarrufu sağlamasının öneminden söz etmektedir.

Tüm bu literatür araştırması doğrultusunda, incelenen literatürde hiç çalışılmamış badem meyvesinden biyo-esinli gözenekli malzeme, duvar kalınlığı, birim hücrelerin malzeme boyunca dağılımı ve hücre geometrisi gibi parametreler dikkate alınarak oniki farklı tipte tasarlanmıştır. Tasarlanan malzemelere basma testleri uygulanarak tasarlanan malzemelerin basma dayanımı ve basma testleri esnasındaki deformasyon davranışları incelenmiştir.

Biyomimikri tabanlı kafes yapı geometrisi çalışmalarının literatürde daha çok geleneksel balpeteği (honeycomb) formlu hücresel yapı geometrisi için kapsamlı bir şekilde yapıldığı görülmektedir. Yapılan çalışmalarda genellikle klasik balpeteği geometrileri ve bu geometrinin türevleri sayılabilecek yenilikçi geometrilere sahip yardımcı topolojik yapıların dayanımı incelenmiştir.

Bu teze konu olan badem şekillerinin belirli geometrik özellikleri ile mühendislik veya biyomimikrideki uygulamalarıyla ilgili olabilecek benzer çalışmaları bulmak için, "biyomimikri", "doğal şekiller", "bitkilerden ilham alan tasarım", "mühendislikte geometrik şekiller" veya "doğadan ilham alan malzemeler", "badem geometrisi" veya "badem şekli" gibi anahtar kelimeler kullanarak akademik veri tabanlarında araştırma yapılmıştır. Ancak şu ana kadar literatürde badem meyvesinin kendine özgü karakteristik geometrisinin birim hücre olarak kullanıldığı, tasarlanmış bir yapının mekanik performansını ölçen, bu meyve kabuğu geometrisinin gerçekten basınca dayanıklı olduğunu kanıtlayacak veya çürütecek hiçbir akademik araştırma ve bilimsel çalışma bulunamamıştır. Yapılan araştırma sonucunda, daha çok bademin genel yapısal özellikleri ile kimyasal, fenolojik, biyolojik, pomolojik ve morfolojik özelliklerine dayalı çalışmalar ile karşılaşmıştır.

Altuntas vd. (2010) farklı eksen ve hızlardaki sıkıştırmanın badem çeşitlerinin mekanik özelliklerine ve seçilmiş geometrik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Bademlerde her çeşit için en büyük kopma kuvvetinin X ve en az kopma kuvvetinin ise Z eksenlerinde elde edildiği sonucuna ulaşmışlardır.

Hız (2019) tarafından 2018-2019 yılları arasında Antalya koşullarında yetiştirilen bazı badem *Prunus dulcis* çeşitlerinin fenolojik, biyolojik ve pomolojik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla çalışmalar yürütülmüştür. Çalışmada kullanılan badem çeşitlerine ait ağaçların farklı yönlerinden tesadüfi olarak toplanan meyve örneklerinde pomolojik ölçümler yapılarak kayıt altına alınmıştır.

Parlakçı (2008) tarafından yapılan çalışmada, Şanlıurfa İlinin Bozova ilçesinde badem bahçesinde bulunan Ferragnes, Ferraduel, Lauranne, Bertina ve Felisia çeşitlerindeki her ağaçtan pomolojik ve kimyasal analizler için meyve örnekleri alınmıştır. Alınan bu örneklerde; yapraklarda olduğu gibi meyvelerin dış kabuğunda, sert kabuğunda ve iç meyvelerde besin maddeleri analizleri ile bazı kimyasal analizler yapılmıştır. Elde edilen bulgulara göre; genel olarak pomolojik bakımdan farklılıklar olduğu gibi gerek yapraklarda gerekse meyvenin değişik kısımlarında (dış yeşil kabuk, sert kabuk, iç meyve) makro ve mikro besin elementleri bakımından çeşitler arasında farklılıklar bulunduğu belirlenmiştir.

Küçükdevlet (2006) tarafından yapılan araştırmada, badem çekirdeklerinin kırılmasını sağlayan prototip bir kırma makinasının tasarımı ve imalatı yapılmıştır. Çalışma konusunu teşkil eden badem çekirdeklerine etki eden basma ve çevresel kuvvetlerin tespiti için laboratuvarında yapılan deney sonuçlarına göre gerekli kırma kuvvetinin 50 daN tespit edilmiştir.

Arslan ve Vursavuş (2006) tarafından yapılan çalışmada, üç badem çeşidinin (Ferragnes, Ferradual ve Guara) bazı fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Üç badem çeşidinde de; uzunluk, genişlik, kalınlık, geometrik ortalama çap, küresellik, yüzey alanı, hacim ve kütle değerleri arasında istatistiksel olarak önemli farklılıklar olduğu belirlenmiştir. Badem kabuklarının kırılması için gereksinim duyulan gücün üç yükleme ekseninde de farklılıklar gösterdiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca, iç bademlerin kırılması için gereksinim duyulan güç miktarları da Ferragnes, Ferradual ve Guara çeşitleri için sırasıyla; 0,0081 W, 0,0054 W ve 0,0065 W olarak hesaplanmıştır.

Li vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada, badem kabuklarının anatomik ve kimyasal özellikleri, bu kabukların daha iyi değerlendirilmesine katkıda bulunmak amacıyla araştırılmıştır. Badem kabuklarının mikromorfolojisi, yüzey elemanları, termal stabilitesi, kristalizasyonu, kimyasal bileşimi ve göreceli özellikleri analiz edilmiştir.

Yalnızca badem geometrisini esas alan çalışmalar olmasa da, biyomimikri veya malzeme mühendisliği kapsamında, sert kabuklu meyveler olarak gruplandırılan ve bademe yapısal olarak benzer sayılabilecek, ancak farklı geometrili bazı bitkilerin kabukları üzerine araştırmaların yapıldığı görülmüştür.

Bunlardan birisi olan Du ve Tan (2021) tarafından yapılan çalışmada badem, Brezilya cevizi, kestane, fındık, macadamia, ceviz, antep fıstığı ve ceviz gibi seçilmiş sert kabuklu tohumlar üzerinde kabuk ve içlerinin geometrik, mekanik ve mikroyapısal özellikleri açısından tarama çalışması yapılmıştır. Farklı kabuk ve çekirdek geometrilerinin ve kırılma dayanımlarını karşılaştırmak için Ashby grafikleri oluşturulmuştur. Yaptıkları bu çalışmada cevizler ve badem geometrilerinin en düşük küreselliği sergilediğini belirtmişlerdir.

Aydın (2003) yapmış olduğu çalışmada bademin kabuk ve iç kısmının geometrik ölçülerini ve kabuk kısmının mekanik özelliklerini incelemiştir. En yüksek kırılma mukavemetinin bademin dik eksen boyunca yüklendiğinde meydana geldiğini bildirmiştir. Yine aynı araştırmacı tarafından yapılan farklı çalışmalarda yer fıstığı ve çekirdeğinin, fındık, mahlep, nohut, mersin gibi bitkiler ve meyvelerinin bazı biyolojik ve mühendislik özellikleri incelemiştir.

Flores-Johnson vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada, Meksika'nın Yucatan yarımadasında yetişen ve kırılmasının çok zor olduğu bilinen Cocoyol palmye ağacının (*Acrocomia mexicana*) meyvesi kabuğunun mekanik özelliklerini, mikro yapısını ve sertliğini ölçmüştür. Cocoyol kabuğunun radyal yönler boyunca farklı katmanlara sahip işlevsel olarak derecelendirilmiş bir malzeme olduğunu gösteren karmaşık bir hiyerarşik yapıyı ortaya koyan bulgular elde ettiklerini ve bu bulguların, yapı-özellik ilişkilerinin bu malzemeyi sert ve dayanıklı hale getirdiğini bildirmişlerdir. Bulunan bu mekanik

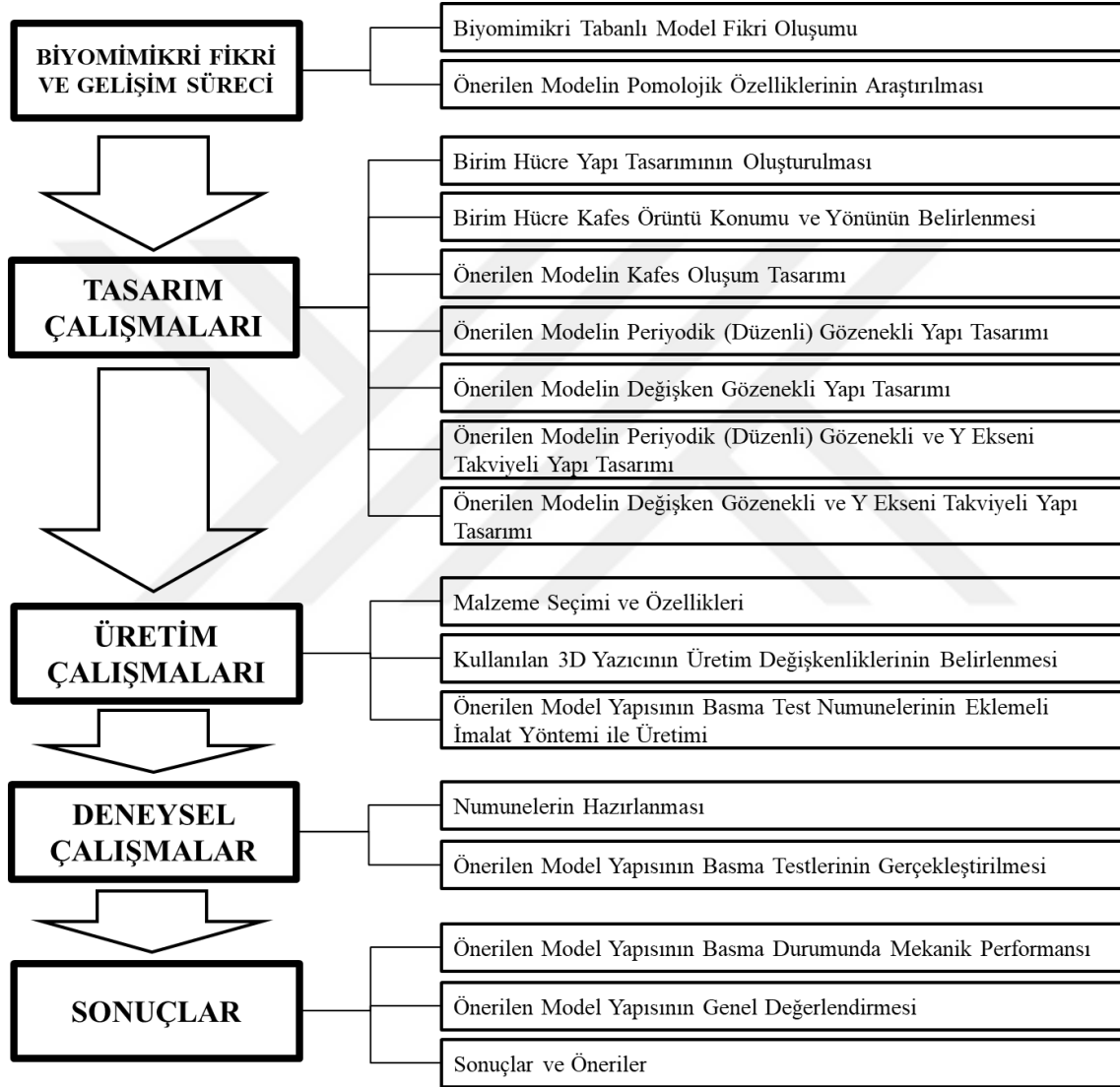
sonuçlar ve mikro yapının, biyoilhamlı üstün sentetik malzemelerin yeni türlerinin tasarlanmasını teşvik edeceğini belirtmektedirler.

Sonego vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada brezilya cevizinin ağacından yüksek bir düşüşte hayatta kalma yeteneği ilham kaynağı olmuş ve brezilya cevizinin mekanik özelliklerini ve hiyerarşik yapısını araştırmışlardır. Brezilya cevizi kabuğundaki lif özelliklerinin iyileştirilmiş mekanik davranışa sahip yeni hücresel kompozitlerin geliştirilmesine ilham verebileceği sonucuna ulaşmışlardır.



3. YÖNTEM VE MATERYAL

Tez çalışmasında yapılan fikir oluşumu, tasarım ve analiz çalışmaları, üretim çalışmaları ve yapılan test çalışmalarına ait işlem basamakları ile yapılma sırası akış şeması olarak Şekil 3.1’de verildiği şekilde gerçekleştirilmiştir.

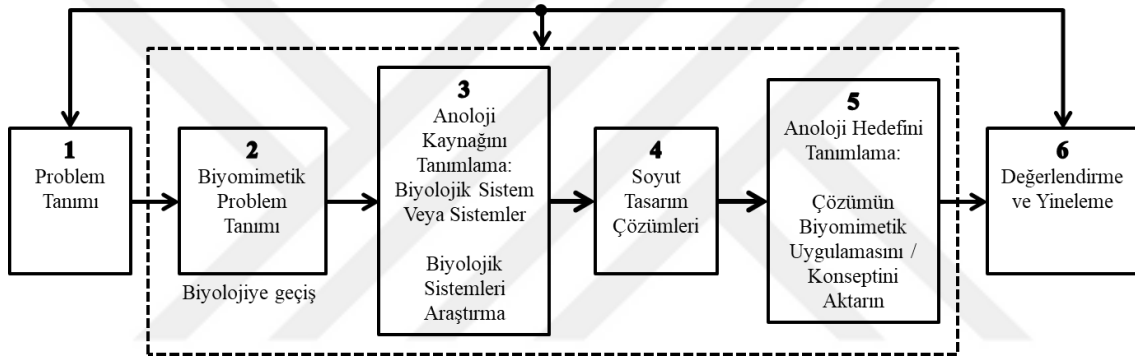


Şekil 3.1 Hücresel yapı birim geometrisi yöntem süreci akış şeması.

3.1. Biyomimikri Tabanlı Model Önerisinin Gelişim Süreci

Çalışma kapsamında literatür taramasından sonra araştırma sorusu; imalat sektöründeki malzemelerin iç gözenek tasarımı şeklinde kullanılabilecek ve aynı zamanda doğada

bulunan bir prensibi baz alacak yeni bir hücresel yapı geometrisi tasarımı şeklinde tanımlanmıştır. Önerilecek hücresel yapı geometrisi modelinin mekanik dayanım yönünden dayanıklı ve aynı zamanda hafif bir yapı şeklinde olması hedeflenmiştir. Önceki bölümde doğadan esinlenme-öğrenme yaklaşımları ile ilgili bilgilere yer verilmiş ve biyomimetik-mühendislik uygulamalarının örnekleri açıklanmıştır. Tez çalışması kapsamında çözüme yönelik model tasarımında, doğadan esinlenme-öğrenme yaklaşımlarından olan ve sistematik bir yöntem önermesi nedeniyle Problemden Biyolojiye yaklaşımı kullanılmasına karar verilmiştir. Biyomimetik tasarım metodolojisinin önerdiği şekilde biyomimikrinin beş temel aşaması problem üzerinde yorumlanmış ve önerilen model bu süreç doğrultusunda geliştirilmiştir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 Problemden Biyolojiye Tasarım Süreci (Cohen ve Reich 2016).

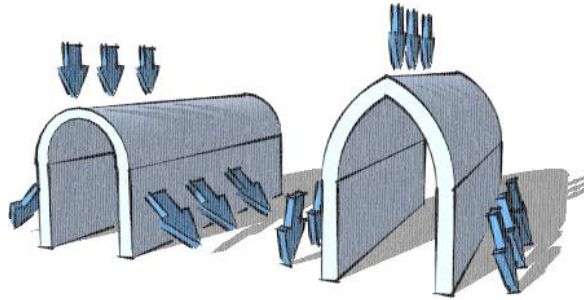
3.1.1. Problem Tanımı:

İmalat sektöründeki artan rekabet koşulları mühendislik ve tasarım alanlarını etkilemekte ve imalatla kullanılan malzemelerin daha güçlü, daha sert, daha dayanıklı ve daha hafif malzemelerden olması talep edilmektedir. Kullanılacak bir malzemenin tasarımında özellikle mekanik dayanım durumlarına karşı özel tasarımlar gerekmektedir.

Eğrisel yüzeyler düz yüzeylere göre daha rijittir ve bu nedenle doğa daha savunmasız, korunması gereken şeyleri aynen iç organları koruyan omurgalar ya da beynimizi koruyan kafatası gibi eğrisel ve rijit formların içine saklamaktadır (Senosiain 2013).

Kabuklar, iki boyutlu eğrisel taşıyıcılar olarak, önemli eğilme gerilmelerine dayanamayacak kadar ince, ancak basınç, kayma ve çekme gibi yükleri taşıyabilecek kadar kalın olan yapı elemanlarıdır. Bu kabuklar, kubbeler veya diğer eğrisel çatı biçimlerinde yapılar oluşturmayı mümkün kılarak farklı şekil ve estetikte yüksek dayanıklılık ve ekonomiklik sağlar. Bu tür sistemler, modern yapı projelerinde en gelişmiş örneklerden biridir. Kabuklar, yapılarının sağlamlığı ile açıklanabilir. Gerilmeler, kabukların ince plaklarında oluşur ve eğrisel yüzeyleri tarafından desteklenen elemanlara aktarılır.

Tarihi süreçte, insanoğlunun mekanik dayanım ve yük taşıma sorunları karşısında zaman içerisinde ürettiği yapı tasarımları ve çözümler incelenmiştir. Bu incelemeler neticesinde, Şekil 3.3’de görüldüğü üzere mimaride kullanılan kemer ve kubbe şeklindeki yapıların şekilsel formları sayesinde maksimum yük taşıma kapasiteleri olduğu ve sorunların bu yapılar sayesinde çözüme kavuşturulduğu görülmüştür (İnt.Kyn.4). İmalat sektöründe de mühendisler tarafından basınç dayanımı gerektiren uygulamalarda kavisli yüzeylerin köşeli yüzeylere göre daha çok basınç dayanımına imkân sağladıkları ve bu nedenle yuvarlak ve küresel yüzeylerin kullanımları yaygın olarak tercih edilmektedir.



Şekil 3.3 Kemer şekillerindeki yükler ve gerilmeler (İnt.Kyn.4).

Bu amaç doğrultusunda, problem tanımı; imalat sektöründeki malzemelerin iç dolgu tasarımlarında kullanılabilecek basma dayanımı yüksek ve aynı zamanda biyo-esinli, hafif, yenilikçi ve sürdürülebilir yuvarlak ve eğrisel forma sahip yeni bir hücresel yapı geometrisi tasarımı olarak tanımlandı.

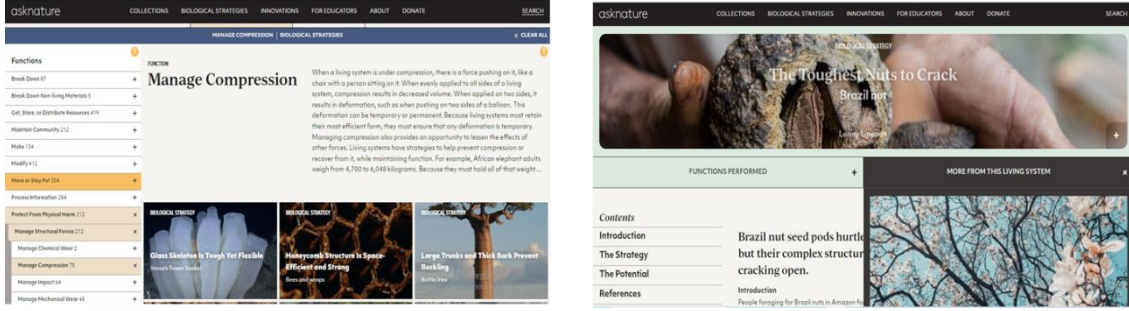
3.1.2. Biyomimetik Problem Tanımı:

Son yıllarda otomotiv, havacılık ve biomedikal sanayide daha güçlü, daha sert, daha dayanıklı ve daha hafif malzemelerin kullanılma zorunluluğu, mühendis ve tasarımcıları eklemeli imalatla üretilen, hücresel kafes yapılı malzemeler için yeni çözüm yolları bulma arayışına yöneltmiştir. Bu yenilikçi çözüm yollarından biri de biyomimetik tasarım yaklaşımıdır. İmalat sektöründe kullanılan malzemeler için sürekli artan gereksinimlerin çoğu, doğadaki hayranlık uyandıran potansiyel mekanizma ve tasarımlar tarafından sunulmaktadır.

Bu amaç ve hedef doğrultusunda “Doğa basınç, basma, baskı, sıkışma ve ezilme sorunlarını hangi çözümle sağlar?”, “Doğada hangi canlılar baskı, sıkışma ve ezilmeye maruz kalır?”, “Doğada baskı, sıkışma ve ezilmeye maruz kalan canlılar bu problemlerini nasıl çözerler?”, “Doğada baskı, sıkışma ve ezilmeye maruz kalan canlıların biçimsel ve görsel şekilleri hangi formdadır?”, “Doğada baskı, sıkışma ve ezilmeye maruz kalan canlılardan hangileri biçimsel ve görsel olarak eğrisel formdadır?” gibi sorular sorulmuş ve beyin fırtınası sonucunda alınan cevaplardan araştırma için anahtar kelimeler belirlenmiştir.

3.1.3. Analoji Kaynağını Belirleme:

Bu aşamada doğada bulunan canlılar ve organizmalar biyoloji bilimi kaynaklı veriler ışığında incelenerek, canlılardan hangilerinin şekilsel formları sayesinde, mekanik dayanım ve yük taşıma kapasiteleri yönünden daha fazla avantajlara sahip oldukları belirlenmeye çalışılmıştır. Bir önceki adımda belirlenen anahtar kavramlar kullanılarak doğada bulunan canlılar ve organizmalar hakkında “asknature.org”, “biomimicry.net” gibi doğal analoji ile ilgili veri tabanlarının bulunduğu araştırma kaynaklarından çözümler taranmıştır. Araştırma için seçilen anahtar kelimeler sorgulandığında çıkan sonuçlarla ilgili görsel ve yazılı bilgiler Şekil 3.4’de görülmektedir (İnt.Kyn.5).



Şekil 3.4 asknature.org sitesi arama sonuçlarından bazılarının açıklama sayfası (İnt.Kyn.5).

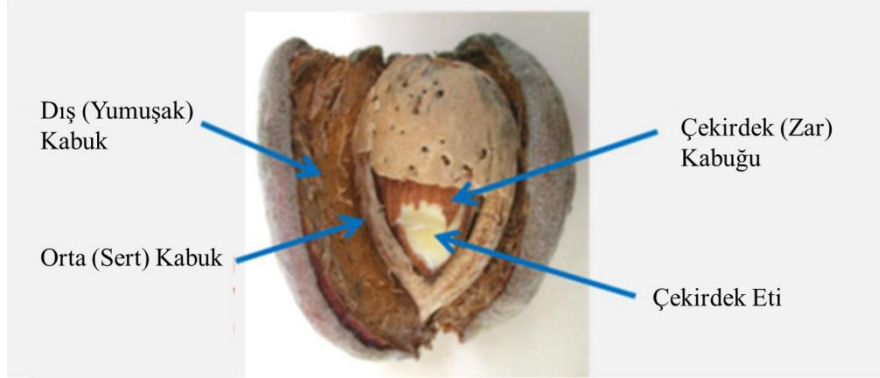
Yapılan tarama neticesinde, doğada kemer ve kubbe şekil formatına uyan doğadaki canlıların kabuk fonksiyonları özelinde bir değerlendirme yapılmıştır. Bazı canlıların kafatası yapıları, bazı böcek ve hayvanları dış kabuğu, kuş yumurtaları ve bazı bitkilerde bulunan dış meyve kabukları ile iç tohum kabukları gibi oluşumlar alternatif çözümler olarak belirlenmiştir.

Bu belirlemeler sonucunda doğadaki canlıların kabuk yapılarının basınç ve ezilme durumunda dayanımları ile mühendislik alanındaki kemer ve kubbe şekil formatına uyan yapıların basma kuvveti karşısında yerine getirdikleri fonksiyonların büyük ölçüde benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir. Bu benzerlik sayesinde canlıların kabukları aracılığıyla basınç dayanımı sağlayan şekilsel formlarının, mühendislik tasarımlarına aktarıldığında, canlıda gerçekleştirdiği işlevleri yapılarda da sağlayacağı düşünülmektedir. Biyoloji bilimi kaynaklı verilerin incelenmesi ile elde edilen bilgi neticesinde doğadaki kemer ve kubbe şekil formatına uyan en klasik yapılardan birinin de bazı bitkilerde bulunan dış meyve kabukları ile iç tohum kabukları olduğu fikrine varılmıştır.

İster hayvan ister bitki olsun, organizmanın yavrularının çoğu, embriyolarının koruyucu bir kabuk içinde gelişmesiyle ortaya çıkar. Bitkilerde bu sert koruyucu kabuklar tohumları besleme ve dış mekanik hasarlardan koruma işlevi görürler. Evrim boyunca bitkilerin kabukları, içinde sakladıkları tohumları dış tehditlerden korumak için çeşitli yapısal stratejiler geliştirmiştir ve bu stratejiler, belirli bir bitkinin habitatına veya yaşam tarzına göre değişiklik gösterebilir.

Bu fikrin seçilmesinin temel nedeni, güçlü meyve kabuklarının ciddi yükler taşıyabilme yapısına sahip olduğu düşüncesidir. Güçlü meyve kabukları olarak adlandırabileceğimiz ve doğada fındık, ceviz, badem vb. kabuğu gibi örneklendirebileceğimiz bu kendine özgü yapıların iki önemli özelliği dikkate değer bulunmuştur; problem tanımındaki kemer ve kubbe şekil formatına uyan kavisli, eğrisel şekilleri ve sağlamlığı. Böyle ilgi çekici sert bitki kabuklarından biri de badem ağacı meyvesinin sert orta kabuğudur. Badem çeşitlerinin çoğu zor kırılan sert kabuklara sahiptir. Sert bir kabuğa sahip olmak, bademin içinde yer alan iç çekirdeği kuşların ve kemirgenlerin saldırısına ve çekirdeğe zarar veren böcek larvalarının içeriye girmesine karşı koruyabildiği gibi, dalından düşme ve yere çarpma anındaki etkilerden de korumaktadır.

Bu sert kabuk yapısı dış hasarlardan korusa da bademin ticari olarak işlenebilirliğini etkiler. Bu nedenle bademin ticari kısmı olan iç çekirdeğine zarar vermeden Şekil 3.5’de gösterilen orta sert kabuğunun kırılarak ticari endüstriye kazandırılması konusunda da birçok kabuk kırma ve işleme ekipmanı tasarımları yapılmıştır (İnt.Kyn.6).



Şekil 3.5 Badem kabuk katmanlarının gösterimi (İnt.Kyn.6).

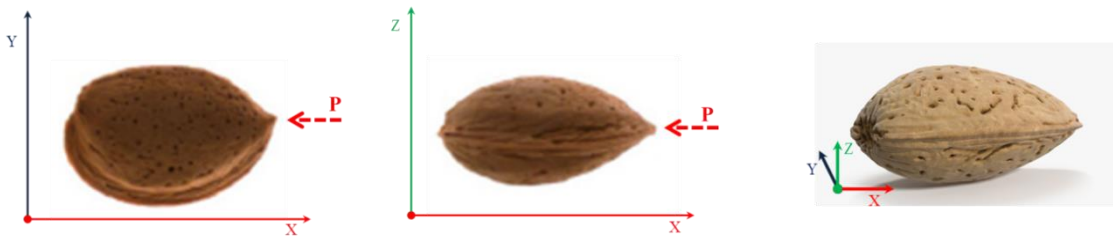
Bademin gerek ülkemizde gerekse diğer ülkelerde ekonomik değeri yüksek olan sert kabuklu bir meyve olduğu bilinmektedir. Bademin ekonomik değeri yüksek olan iç çekirdeğine zarar vermeden sert dış kabuğunun kırılma işlemleri için uygulanan baskı veya ezme kuvvetinde gereksinim duyulan en fazla gücün, dikey eksen boyunca yapılan yüklemede olduğu yapılan araştırmalarla ortaya konulmuştur (Altuntas vd. 2010, Arslan ve Vursavuş 2006).

Badem kabuğunun bu sert kabuk yapı özelliği ve kabuklarının kırılma işlemleri için uygulanan baskı veya ezme kuvvetinde gereksinim duyulan en fazla gücün yuvarlak ve eğrisel formun en belirgin şekilde olduğu dikey eksen boyunca oluşumu ticari endüstri için olumsuz bir durum oluştursa da, tez kapsamında öngörülen hücresel yapı geometrisinin tasarımında daha dayanıklı ve aynı zamanda daha hafif bir yapı oluşturulması yönünde olumlu katkı sunabileceği ve yenilikçi bir çözüm getirebileceği öngörülmüştür.

Yapılan araştırma sonucu diğer güçlü meyve kabuklarına göre; kemer ve kubbe şekil formatına biçimsel ve görsel olarak benzeşen kavisli, eğrisel formun diğerlerine göre en belirgin şekilde olduğu, düzgün ve rijit bir yüzey yapısına sahip olduğu ve kabuğun zor kırılma performansının altında yatan özelliğin bu şekilsel yapıdan kaynaklandığı düşünüldükçe, biyolojik esin kaynağı olarak badem meyvesi seçilmiştir.

3.1.4. Soyutlama-soyut tasarım çözümleri:

Badem kabuğu, Şekil 3.6'da görüldüğü üzere hem XY eksenini, hem de XZ eksenini yönlerinde problem tanımında belirtilen kavisli, eğrisel form şekline sahiptir. Çalışmanın bu aşamasında, badem kabuğunun kırılma işlemi esnasında en fazla kuvvete (P) gereksinim duyulan ve eğrisel formun en belirgin şekilde olduğu Şekil 3.6'da gösterilen XY eksenindeki iki boyutlu profil görüntüsü ele alınarak soyutlama çözümlemesi yapılmaya çalışılmıştır.



Şekil 3.6 Badem kabuğunun kırılma işlemi esnasında en fazla yüke (P) gereksinim duyulan yön gösterimi.

Biyolojik esin kaynağı olarak belirlenen badem meyvesinin biçimsel ve görsel şekli, ona hem estetik, hem de işlevsel özellikler kazandırır. Estetik olarak, kendine özgü bir güzellik verir. Bademin kendine özgü kavisli ve biçimsel formu, işlevsel olarak da, dış etkiler altında deformasyona uğramayan ve şekil değiştirmeyen bir yüzey alanı ile birlikte daha güçlü ve dayanıklı bir yapıda olmasını sağlar.

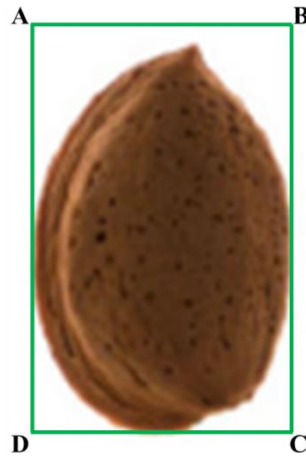
Badem meyvesinin kendine özgü bir görsel estetikliğini sağlayan boyut oranları endüstriyel işlenebilirlik açısından çeşitli araştırmalara konu olmuştur. Bu araştırmalarda çeşitli badem türlerinin pomolojik ölçümleri yapılarak kayıt altına alınmıştır. Bu kapsamda yapılan araştırmalara ait detay bilgileri tezin üçüncü bölümünde verilmiştir.

Çözüme katkı sağlaması açısından, badem çeşitlerinin pomolojik özellikleri dikkate alınarak toplanan veriler doğrultusunda bademin şekilsel özelliklerinden olan en, boy ve kalınlık ölçümleri incelenmiştir. Bu inceleme sonrasında, en ve boy ölçülerinin ortalama değerlerine göre Şekil 3.7’de gösterilen temel bir ABCD dikdörtgeni oluşturulmuştur.

Oluşturulan bu ABCD dikdörtgeninde;

[AB] kenarı = Bademin eni

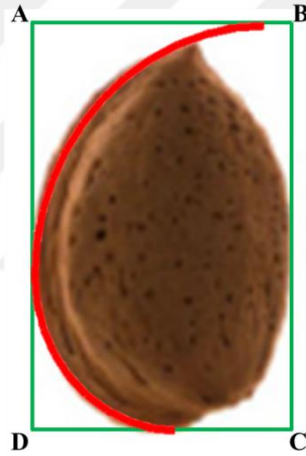
[AD] kenarı = Bademin boyu olarak kabul edilmiştir.



Şekil 3.7 Bademin pomolojik verilerine göre oluşturulan temel ABCD dikdörtgeni.

Badem meyvesinin en ve boy ölçütlerine göre oluşturulan dikdörtgenin estetik görselliği doğanın hemen her noktasında karşılaşılan kural ve/veya düzenlerden birisi olan, “Altın Oran” kuralına göre düzenlenmiş dikdörtgene benzerlik göstermektedir. Bu nedenle oluşturulan bu dikdörtgende [AD] kenarının [AB] kenarına oranına bakıldığında çıkan sonuçlar, “Altın Oran” sayısına yaklaşık değerlerde olduğu tespit edilmiştir. En ve boy ölçülerinin ortalama değerleri ve kenar oranlarına ait detay bilgilerine tezin üçüncü bölümünde yer verilmiştir.

Bununla birlikte, badem meyvesinin [AD] kenarında yer alan ve dikiş yönü olarak isimlendirilen geometrik biçimin ana hattı, Şekil 3.8’de görüldüğü üzere biçimsel olarak spirale benzer şekilde ilerleyen bir eğriye sahiptir.



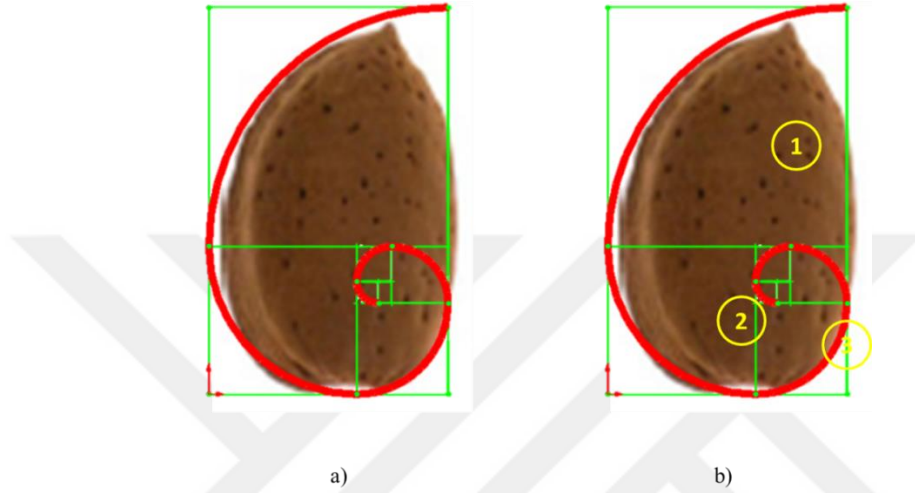
Şekil 3.8 Badem meyvesinin dikiş yönündeki eğrisel geometrik şekli ve spiral benzeşmesi.

Badem meyvesinin [AD] kenarında yer alan ve dikiş çizgisi olarak isimlendirilen bu eğrinin, Şekil 3.9-a’daki resimde görüldüğü gibi yine doğanın hemen her noktasında karşılaşılan kural ve/veya düzenlerden bir diğeri olan, “Fibonacci Spirali” ne benzer şekilde ilerleyen bir şekil ana hattına sahiptir.

Her ne kadar altın orana göre oluşturulan spiralle, bu ana hat çizgisel olarak birebir uymasa da, Şekil 3.9-b’de oluşturulan resimde görüldüğü gibi, başlangıç çerçevesi, eğrinin yönü ve bitiş çerçevesindeki kompozisyon bu kurala mümkün olduğunca uygun biçimde düzenlendiğini göstermektedir. Altın orana göre oluşturulan birinci, ikinci ve

üçüncü karelerdeki spirallerin, bademin eğrisel ana hatlarının üzerinde ve aynı doğrultuda konumlandığı görülmektedir.

Bu durum bize, doğanın badem meyvesinde de Altın Oran ve Fibonacci Spirali kuralını uyguladığını göstermektedir.



Şekil 3.9 Bademin kendine özgü eğrisel dikiş çizgisi ve spiral benzeşmesi a) Altın orana göre oluşturulan “Fibonacci Spirali” ve badem eğriselliği b) Altın orana göre oluşturulan karelerin spirallerinin, bademin kendine özgü eğrisel ana hatlarının üzerine konumlanma durumları.

Doğadan esinlenerek yapılan tasarımların her ne kadar kurallara bağlanması mümkün olamayacağı düşünülse de, yerçekimi kuvveti başta olmak üzere daha birçok doğa kurallarıyla birlikte yaşadığımız da bir gerçektir. Dolayısıyla, her ne kadar kesin bir kural olmasa da, birçok tasarımcı, fibonacci spirali ve altın oranın genel geçerliğini dikkate alarak tasarımlarında kullandığı gibi, tasarım tarihinin önemli birçok ürünlerinde de bu oranlara rastlamak mümkündür.

Bu nedenle bu aşamada, biyolojik esin kaynağı olarak belirlenen badem meyvesinin Şekil 3.9’da gösterilen XY eksenindeki iki boyutlu biçimsel ve görsel şeklinin altın oran değerlerine göre oluşturulan fibonacci spiriline büyük benzerlik gösterdiği sonucuna ulaşmıştır. Bu sonuçtan hareketle, soyutlama çalışmasında ve bir sonraki aşama olan birim hücre yapı tasarımında Altın Oran ve Fibonacci Spirali kuralları bağlamında tasarım yapılması gerektiği kararına varılmıştır.

3.1.5.Çözüm Aktarımı:

Bir önceki adımda belirlenen birim hücre yapı tasarımında Altın Oran ve Fibonacci Spirali kuralları bağlamında tasarım yapılması gerektiği kararı doğrultusunda; biyolojik esin kaynağı olarak belirlenen badem meyvesinin, kendine özgü kavisli ve biçimsel formunun, altın orana göre oluşturulan Fibonacci Spirali kuralları bağlamında yorumlanarak, BFHY tasarımı ve çizimi yapılmıştır. İlgili çizim aşamalarına ait detaylara tezin üçüncü bölümünde yer verilmiştir.

Sonuç ürünü olarak ortaya konan biyo-esinli hücresel yapı birim geometrisi tasarımının yuvarlak ve eğrisel forma sahip olmasından dolayı, basma dayanımı sorununu karşılayabileceği ve aynı zamanda daha hafif ve daha dayanıklı malzeme oluşumuna katkıda bulunacağı düşünülmüştür.

3.1.6.Değerlendirme ve Tekrarlama:

Sonuç olarak, basma dayanımı esas alınarak, doğada bulunan çeşitli çözümler incelenmiş ve uygun çözümün badem meyvesinin, kendine özgü kavisli ve biçimsel formunda olduğu tespit edilmiştir. Bu bağlamda, biyomimetik tasarım metodolojisinde yer alan, problemten biyolojiye tasarım ilkesi esas alınarak, biyomimikrinin temel aşamaları problem üzerinde yorumlanmış ve önerilen model bu süreç doğrultusunda geliştirilmiştir.

3.2. Biyomimikrinin Tasarım Problemine Uygulanması

Tez kapsamında önerilen yenilikçi BFHY geometrisinin biyomimikrik yaklaşımla tasarlanan bir model olması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda badem meyvesinin kendine özgü olan boyut ölçüleri endüstriyel işlenebilirlik açısından çeşitli araştırmalara konu olmuştur. Bu araştırmalarda çeşitli badem türlerinin pomolojik ölçümleri yapılarak kayıt altına alınmıştır. Tezin bu bölümünde badem meyvesinin pomolojik özellikleri incelenmiştir.

3.2.1.Önerilen Badem Kabuğu Modelin Pomolojik Özellikleri

Biyomimikrinin probleminden biyolojiye yaklaşımı ilkesi esas alınarak, biyomimikrinin temel aşamalarının problem üzerinde yorumlanması sonucunda sonuç ürünü olarak ortaya konan biyo-esinli BFHY geometrisinin tasarımın yapılabilmesi için tasarım problemine katkı sağlaması açısından bazı badem çeşitlerinin pomolojik özellikleri araştırılmaya başlanmıştır. Bu kapsamda tezin bu bölümünde badem çeşitleri ile yetiştiriciliğini inceleyen mevcut kaynak tarama ve araştırmaları yapılmış olup, araştırma esnasında bulunan tezler, makaleler, süreli yayınlardan veriler toplanmıştır. Toplanan veriler doğrultusunda bademin şekilsel özelliklerinden olan en, boy ve kalınlık ölçüleri incelenmiştir.

Parlakçı (2008) yaptığı çalışmada, Şanlıurfa ilinin Bozova ilçesinde bulunan özel bir şirkete ait 150 dekarlık alana sahip badem bahçesinde bulunan Ferragnes, Ferraduel, Lauranne, Bertina ve Felisia çeşitlerinde 2006- 2007 yıllarındaki hasat döneminde her ağaçtan pomolojik ve kimyasal analizler için araştırma çalışmaları yürütmüştür. Elde edilen bulgulara göre; genel olarak badem çeşitleri arasında pomolojik bakımdan farklılıklar olduğu sonucuna ulaşmıştır. Ayrıca yapmış olduğu çalışmada 2006- 2007 yıllarına ait kabuklu badem meyvesi çeşitlerinin boy, en ve kalınlık ölçümlerini Çizelge 3-1’de gösterildiği üzere gerçekleştirmiştir.

Benzer bir çalışmada Arslan (2014) tarafından Şanlıurfa ili Ceylanpınar ilçesinde TİGEM’e ait Beyazkule işletme sınırları içerisinde yer alan CEYTAM Araştırma İstasyonunda bulunan 22 badem (A-15/1, Ayles, D-3/2, Drake, False Barese, Felisia, Ferragnes, Garibaldina, Glorieta, Guara, Lauranne, Masbovera, Moncayo, NK-110, NK-111, NK-112, NK-113, NK-114, NK-115, Nonpareil, Süper Nova ve Teksas) çeşidinin fenolojik ve pomolojik özelliklerini belirlemek amacıyla 2014-2015 yıllarında yürütmüştür.

Çizelge 3-1 Bazı badem çeşitlerinin kabuklu meyve boyutları (Parlakçı 2008).

YILLAR	ÇEŞİTLER	Boy (mm)	Eni (mm)	Kalınlık (mm)
2006	Ferragnes	33,537	22,374	14,779
	Ferraduel	35,082	23,632	16,253
	Lauranne	32,925	22,3	16,724
	Bertina	40,689	27,939	15,431
	Felisia	30,492	19,288	15,275
	ORTALAMA	34,54	23,1	15,68
2007	Ferragnes	31,59	22,61	15,73
	Ferraduel	31,78	22,66	15,77
	Lauranne	29,01	22,13	16,55
	Bertina	37,13	28,07	17,53
	Felisia	26,29	19,56	13,46
	ORTALAMA	31,16	23	15,8
2 Yıllık Ortalama	Ferragnes	32,56	22,49	15,25
	Ferraduel	33,43	23,14	16,01
	Lauranne	30,96	22,21	16,63
	Bertina	38,9	27,99	16,48
	Felisia	28,39	19,42	14,36
	ORTALAMA	32,84	23,05	15,94

Araştırmada alınan kabuklu meyve örnekleri üzerinde; rastgele seçilen 20’şer meyvede 3 tekerrürlü olarak çeşitli pomolojik analizler yapılmıştır. Yapılan analizler esnasında kabuklu badem meyvesi çeşitlerinin boy, en ve kalınlık ölçümlerini kumpas yardımıyla ölçülerek Çizelge 3-2’de gösterildiği şekilde saptamıştır.

Çizelge 3-2 Bazı badem çeşitlerinin kabuklu meyve boyutları (Arslan 2014).

ÇEŞİT ADI	KABUKLU MEYVE		
	Boy (mm)	Genişliği (mm)	Kalınlığı (mm)
AYLES	32,52	25,12	15,67
DRAKE	24,06	18,91	12,49
FELİSİA	23,5	19,76	12,89
FERRAGNES	31,64	27,76	17,16
GARİBALDİNA	35,31	24,72	15,12
GLORIETA	30,01	20,83	12,96
GUARA	35,98	25,68	15,04
LAURANNE	35,98	24,88	13,84
MASBOVERA	33,28	25,48	16,34
MONCAYO	33,47	23,9	14,13
NK-110	34,44	25,45	15,25
NK-111	22,75	18,75	12,11
NK-112	33,2	24,17	13,66
NONPAREİL	37,97	25,28	15,8
TEKSAS	33,78	24,43	14,52
ORTALAMA	31,86	23,67	14,47

3.3. Önerilen Modelin Tasarım Parametreleri ve Tasarım Süreci

Tezin bu bölümünde tasarımda kullanılacak badem meyvesinin pomolojik ölçüleri esas alınarak BFHY birim geometrisi tasarımı için anahtar ölçüler ve parametreler belirlenmeye çalışılmıştır.

3.3.1. Birim Hücre Yapı Tasarımı

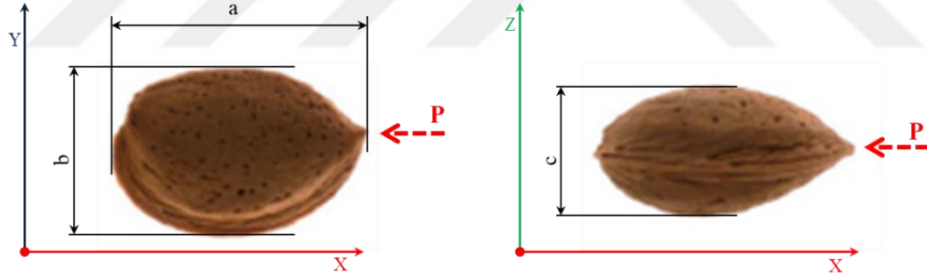
Bu kapsamda hücresel yapı geometrisi tasarım çalışması, çizim ve kontrol olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Çizim aşamasında öncelikle badem meyvesinin pomolojik ölçüleri dikkate alınarak boyutsal değişkenleri tanımlanmış ve bu değişkenler geometrik modelin oluşturulmasında kullanılmıştır. Badem meyvesinin kendine özgü eğrisel formunun en belirgin şekilde olduğu Şekil 3.10’da gösterilen XY eksenindeki iki boyutlu profil görüntüsü ele alınarak hücresel yapı geometrisi tasarım yapılmaya çalışılmıştır.

a = Badem kabuğunun boyu

b = Badem kabuğunun genişliği

c = Badem kabuğunun kalınlığı

P = Badem kabuğunun kırılması için uygulanan yük ve yönü



Şekil 3.10 Bademin iki boyutlu profil görüntüsü ve boyutların isimlendirilmesi.

Badem meyvesinin pomolojik özelliklerinde yapılan incelemede bademin en ve boy oranlarının, doğanın hemen her noktasında karşılaşılan kural ve/veya düzenlerden birisi olan, “Altın Oran” uyumlu olduğu, bu nedenle de badem kabuğunun kendine özgü kavisli, eğrisel form şeklindeki hücresel yapı birim geometrisi tasarımında “Altın Oran” ve “Fibonacci Spirali” prensibinin kullanılmasına karar verilmiştir. Hücresel yapının tasarımında ana bileşen olan birim hücre boyutu ile ilgili bazı sınırlılıklar bulunmaktadır. Yapılan çeşitli araştırmalarda hücre birim boyutlarının genellikle mikro boyutla seçildiği görülmektedir.

Bu nedenle öncelikle mikro boyutla kısa kenarı = 1 mm ve uzun kenarı = 1,60 mm uzunluğunda birim dikdörtgen içerisine birim hücre yerleştirilerek tasarım yapılmıştır. Ancak tezin 3.4.1. Ön İmalat Üretimi ve Tasarım Parametrelerinin Değerlendirilmesi bölümünde açıklandığı üzere belirlenen bu ölçülerde tasarlanarak üretilen ön imalat numunesinde hücresel geometrinin istenilen şekilde oluşmadığını gözlemlendi.

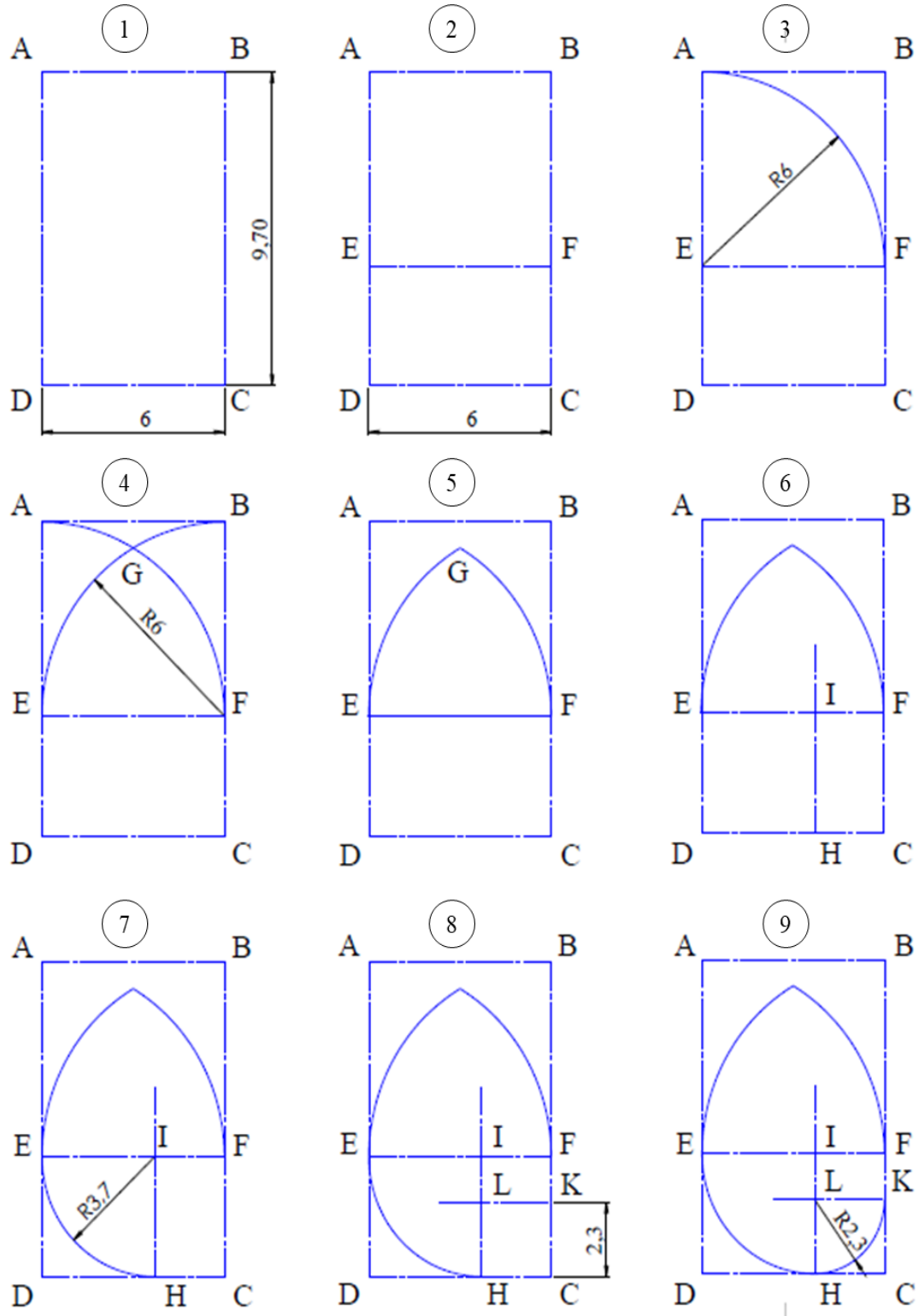
Bu nedenle tezin bu aşamasında tasarlanan yapı ve birim hücrelerde gerçekleşecek deformeye bağlı davranışların daha iyi gözlenmesi amacıyla Tang ve Zhao (2016) yapmış olduğu çalışmada belirttikleri orta boyutta (mesoscale) sayılacak bir birim hücre ölçüsüyle çalışılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu nedenle kısa kenarı = 6 mm ve uzun kenarı = 9,70 mm uzunluğunda birim dikdörtgen içerisine birim hücre yerleştirilerek çalışılması sonucuna ulaşılmıştır. BFHY birim geometrisi çizim aşamalarına ait açıklamalar aşağıda verilmiş ve çizim aşamalarına ait görseller de Şekil 3.11’de gösterilmiştir.

Birinci adımda, ana hareket noktası bademin eğrisel formunun oluştuğu kenar olmak üzere altın oran kuralına uygun (uzun kenarının kısa kenarına oranı 1,618 olan) şekilde, dikey yönlü [AD] ve [BC] = 9,70 mm uzunluğunda, [AB] ve [CD] = 6 mm uzunluğunda birim ABCD dikdörtgeni (altın dikdörtgen) oluşturulmuştur (Şekil 3.11-1). İkinci adımda, dikdörtgenin uzun kenarı [AD] üzerinde içe doğru paralel ve Fibonacci Spirali kurallarına uygun olacak şekilde (9,70 / 1,618) kısa kenar uzunluğu (6 mm) kadar bir EF çizgisi çizilerek, birinci kare oluşturulmuştur (Şekil 3.11-2). Üçüncü adımda, oluşturulan EF çizgisinin uzun kenarı kestiği E noktası merkez olacak şekilde ve yarıçapı kısa kenar uzunluğunda (6 mm) olan, A ve F noktaları arasında bir yay parçası çizilmiştir. Bu yay parçası bademin dikiş çizgisi olarak isimlendirilen kavisli kenar formunun üst taraftaki ilk kısmını oluşturmaktadır (Şekil 3.11-3). Dördüncü adımda, EF çizgisinin uzun kenarı kestiği diğer F noktası merkez olacak şekilde ve yine yarıçapı kısa kenar uzunluğunda (6 mm) B ve E noktaları arasında bir yay parçası çizilmiştir. Bu yay parçası bademin dikiş çizgisi olarak isimlendirilen kavisli kenar formunun üst taraftaki ikinci kısmını oluşturmaktadır (Şekil 3.11-4).

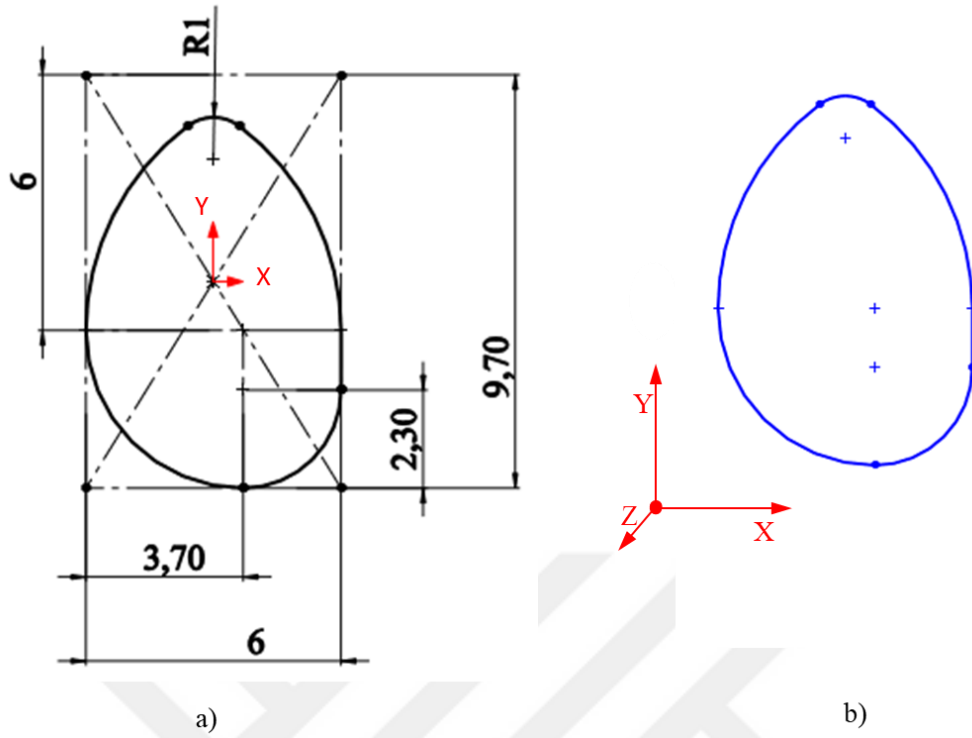
Beşinci adımda, her iki yayın kesişme noktası olan G noktası işaretlenerek yayın uzantıları olan GA ve GB paçaları silinmiştir. Böylece bademin dikiş çizgisi olarak isimlendirilen ve simetrik kavisli kenarın üst formu oluşturulmuştur (Şekil 3.11-5). Altıncı adımda, Fibonacci Spirali kurallarına uygun olacak şekilde ikinci karenin oluşturulması için dikdörtgenin uzun kenarı olan [AD] kenarından içe doğru ve dikey yönlü 3,70 mm uzaklıkta paralel bir referans çizgisi oluşturulmuştur. Oluşturulan çizginin DC doğru parçasını kestiği nokta H noktası ve EF doğru parçasını kestiği nokta I noktası olarak belirlenmiştir (Şekil 3.11-6). Yedinci adımda, I noktası merkez olacak şekilde, yarıçapı oluşan ikinci karenin kenar uzunluğunda (3,70 mm) olacak şekilde E ve H noktaları arasında bir yay parçası çizilmiştir. Çizilen bu yay parçası bademin dikiş çizgisi olarak isimlendirilen kavisli kenar formunun alt taraftaki ilk kısmını oluşturmaktadır (Şekil 3.11-7).

Sekizinci adımda, yine Fibonacci Spirali kurallarına uygun olacak şekilde üçüncü karenin oluşturulması için dikdörtgenin kısa kenarı olan [DC] kenarından içe doğru ve yatay yönlü 2,30 mm uzaklıkta paralel bir referans çizgisi oluşturulmuştur. Oluşturulan çizginin BC doğru parçasını kestiği nokta K noktası ve altıncı adımda oluşturulan referans çizgisini kestiği nokta L noktası olarak belirlenmiştir (Şekil 3.11-8). Dokuzuncu adımda, L noktası merkez olacak şekilde, yarıçapı oluşan üçüncü karenin kenar uzunluğunda (2,30 mm) olacak şekilde H ve K noktaları arasında bir yay parçası çizilmiştir. Çizilen bu yay parçası bademin kavisli kenar formunun alt taraftaki ikinci kısmını oluşturmaktadır (Şekil 3.11-9). Son olarak dikdörtgenin [BC] uzun kenarı üzerinde bulunan ve diğer adımlarda oluşturulan F ve K noktaları dikey olarak birleştirilerek bademin düz kenar formunun üst taraftaki ikinci kısmını oluşturulmuştur.

Ayrıca dikiş çizgisi olarak isimlendirilen ve bademin üst tarafındaki kavisli kenar formunu oluşturmak amacıyla birbirine simetrik çizilen iki kavisli yayın kesişme yeri olan G noktasında oluşan keskin köşe 1 mm'lik radyus yay ile yuvarlatılarak birleştirilmiştir (Şekil 3.12). Nihai tasarım fikrine ait görsel Şekil 3.12'de gösterilmiştir.

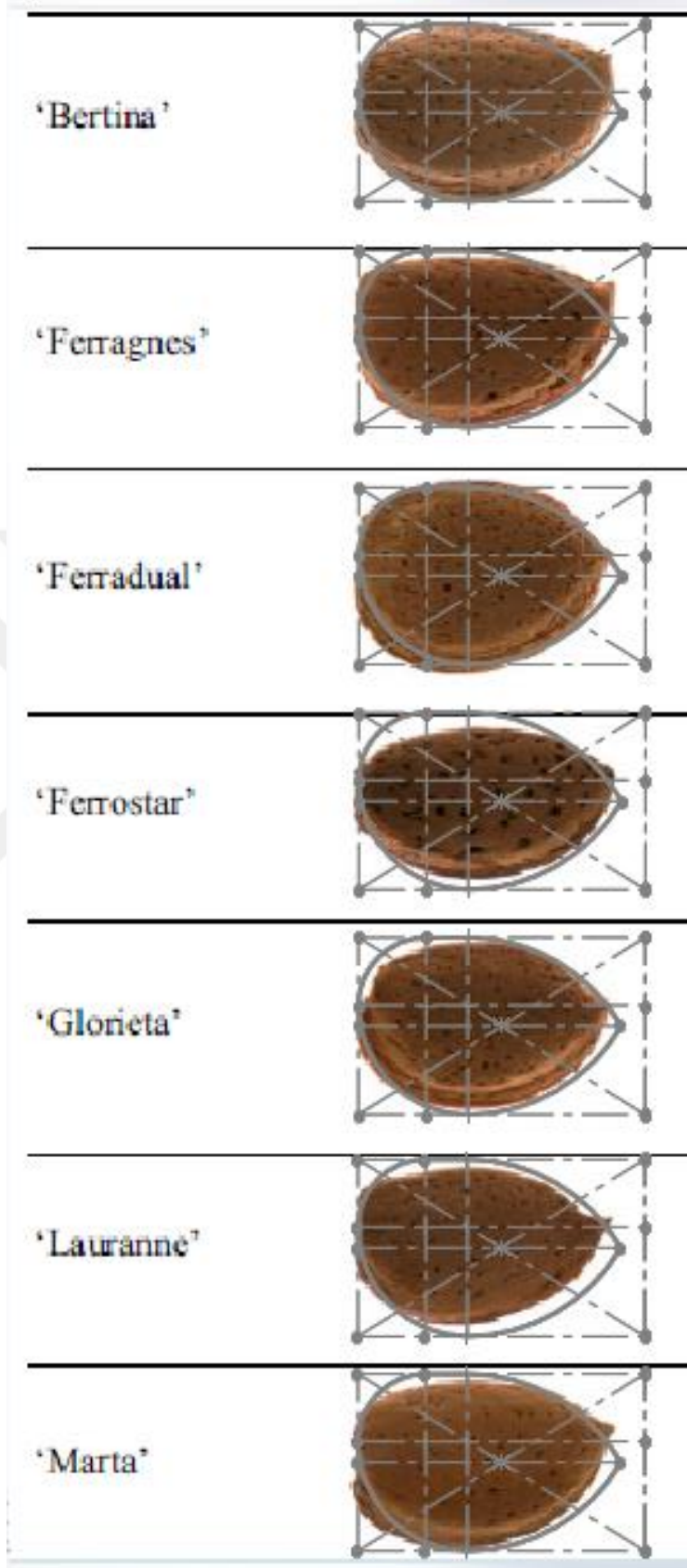


Şekil 3.11 BFHY birim geometrisi çizim aşamaları.



Şekil 3.12 BFHY birim geometrisi nihai tasarım görselleri a) ölçülü tasarım görseli b) ölçüsüz tasarım görseli.

“Altın Oran” ve “Fibonacci Spirali” prensibi kullanılarak tasarlanan bu BFHY birim geometrisi çiziminin uyumluluğunu kontrol etmek amacı ile Demir vd. (2019)’den alınan ve Şekil 3.13’de gösterilen badem çeşitlerinin resimleri ile BFHY birim geometrisi çizimi ölçeklendirilerek birbirine üzerine bindirilmiş görüntüleri karşılaştırılmış ve Bertina, Ferragnes, Ferradual, Glorieta ve Marta cinsi bademlerin şekline uyumluluk gösterdiği tespit edilmiştir. Ulaşılan bu sonuç doğrultusunda tez kapsamında tasarlanan şekilsel formun BFHY hücreli birim geometri olarak kullanılmasına karar verilmiştir.

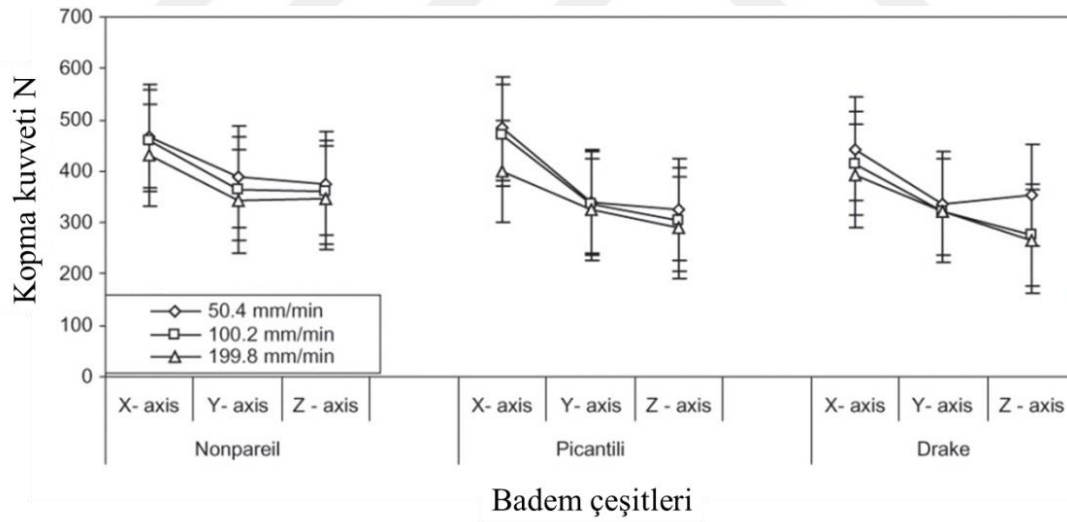


Şekil 3.13 BFHY birim geometrisi ile badem çeşitleri uyumluluk kontrolü.

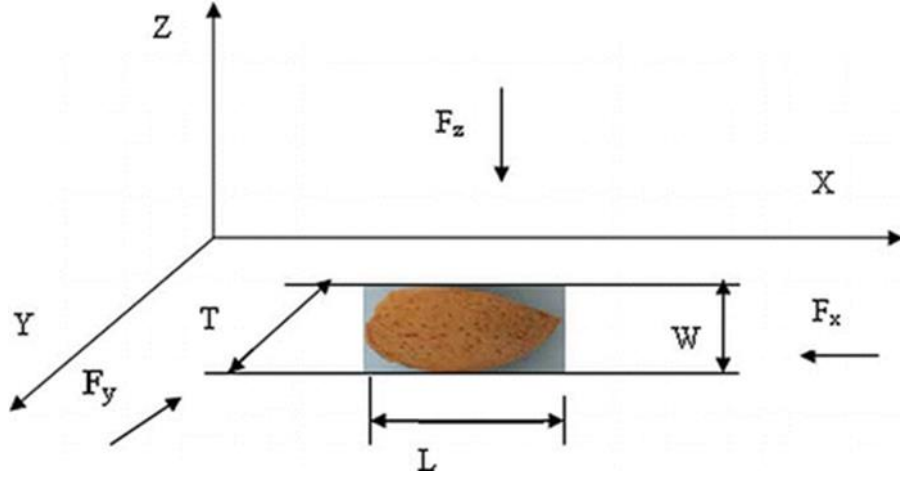
3.3.2. Birim Hücre Kafes Örüntü Konumu ve Yönünün Belirlenmesi

Tezin bu bölümünde tasarım problemine katkı sağlaması açısından kullanılmasına karar verilen BFHY geometrisinin basma dayanımı durumundaki mekanik performansının hangi yönde daha fazla olacağı araştırılmaya başlanmıştır. Bu kapsamda bademin sert kabuğunun kırılarak işlenmesini ele alan tez ve makaleler araştırılarak incelenmiştir.

Bademin mekanik özellikleri üzerine sınırlı sayıda araştırma yapılmıştır. Bunlardan Altuntas vd. (2010) yaptıkları çalışmada farklı eksen ve hızlarda sıkıştırmanın badem çeşitlerinin mekanik özelliklerine ve seçilen geometrik özelliklerine etkileri incelenmiştir. Bademin üç farklı sıkıştırma eksenini boyunca uygulanan kuvvet sonrasında en büyük kırılma kuvvetinin X eksenini yönünde elde edildiğini bildirmişlerdir (Şekil 3.14). Yapılan çalışmada uygulanan kuvvet yönlerine ait görsel Şekil 3.15'te gösterilmiştir.

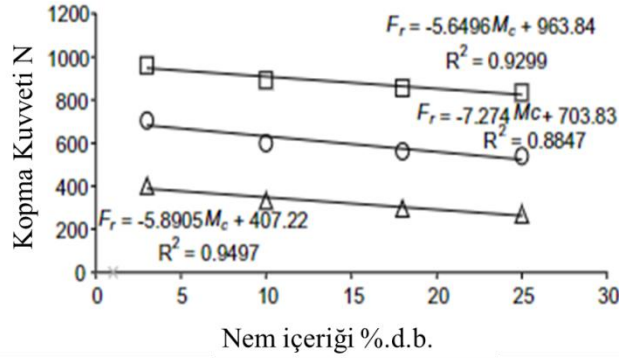


Şekil 3.14 Altuntaş vd. (2010) tarafından yapılan çalışmada sıkıştırma eksenini ve hızının badem kabuğunun kopma kuvvetine (N) etkisi grafiği.



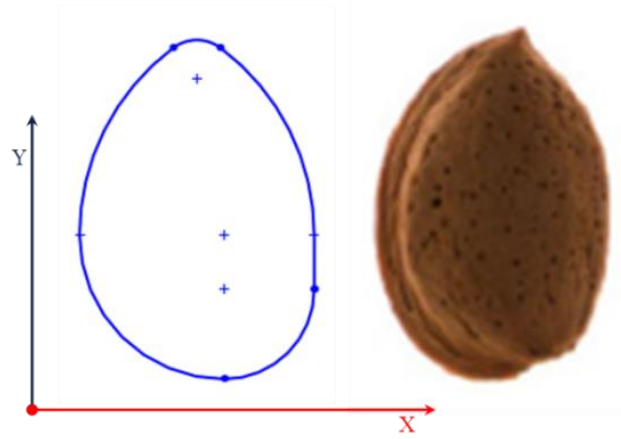
Şekil 3.15 Altuntaş vd. (2010) tarafından yapılan çalışmada sıkıştırma eksenleri ve yönleri.

Benzer bir çalışmada Aydın (2003) tarafından yapılmış ve bademleri kırmak için gerekli olan maksimum kırma kuvvetlerinin uzunlamasına eksen (X) boyunca meydana geldiğini bildirmiştir (Şekil 3.16). İncelenen araştırmalardan alınan veriler doğrultusunda bademin kırılmaya karşı dayanımının dik yönlü olduğu durumlarda daha fazla olduğu sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 3.16 Aydın (2003) tarafından yapılan çalışmada sıkıştırma eksen ve hızın badem kabuğunun kopma kuvvetine (N) etkisi.

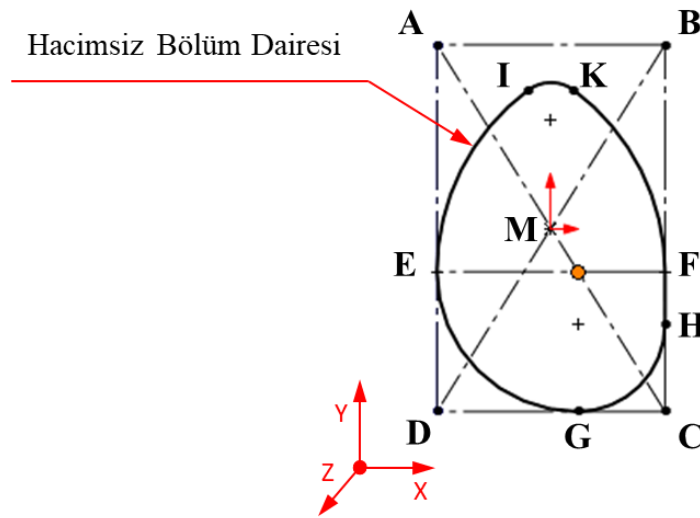
Bademin bu özelliği, kabuk kırma, işleme ekipmanı tasarımı için ve ticari endüstri için olumsuz bir durum oluştursa da, tez kapsamında öngörülen BFHY geometrisinin tasarımında daha dayanıklı ve mekanik performansının daha verimli olması yönünde olumlu katkı sunabileceği öngörülmüştür. Bu nedenle BFHY geometrisinin örüntü yönünün Şekil 3.17'de gösterildiği üzere Y yönlü konumlandırılmasına karar verilmiştir.



Şekil 3.17 Tasarlanan BFHY geometrisinin örüntü oluşturma konumlanma yönü.

3.3.3. Kafes Oluşum Tasarımı

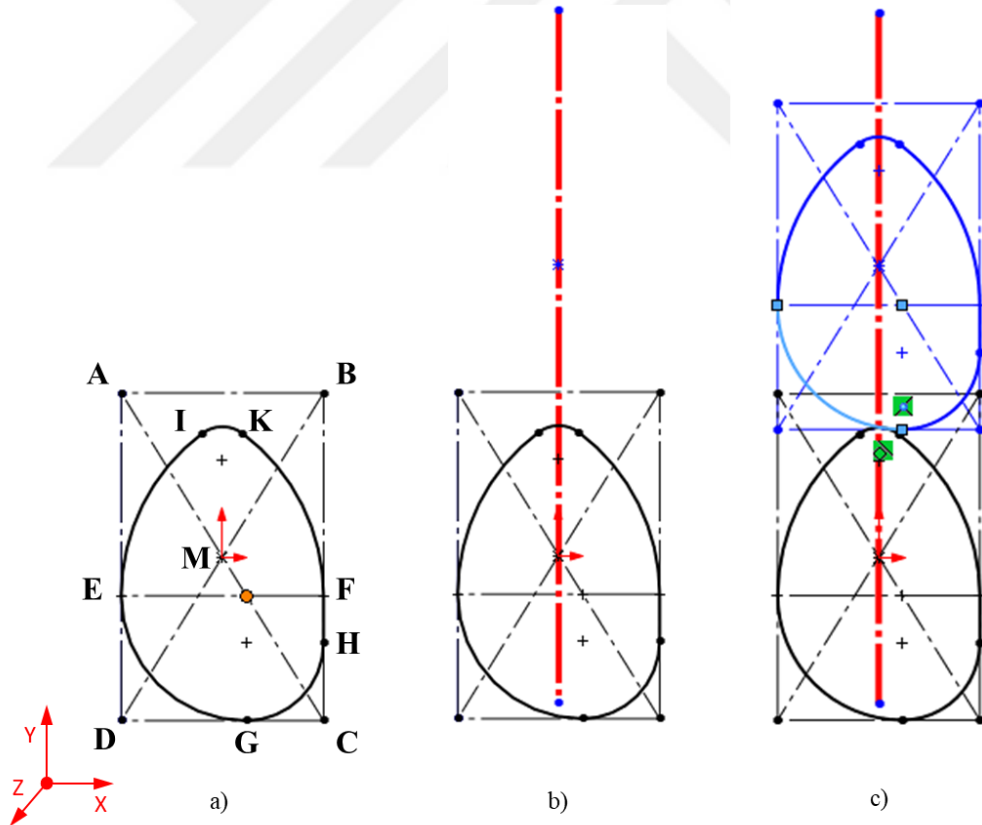
Tezin bu bölümünde tasarım problemine katkı sağlaması açısından kullanılmasına karar verilen BFHY geometrisinin kafes örüntüsünün nasıl olması gerektiği anlatılmaktadır. Daha önce açıklandığı üzere “Fibonacci Spirali” prensibinden yararlanılarak oluşturulan BFHY geometrisinin, kafes yapı şeklinde periyodik (düzenli) tekrarını sağlamak amacıyla dişli düzeneklerinde olduğu şekilde bölüm dairesi şeklinde kullanılmasına karar verilmiştir (Şekil 3.18).



Şekil 3.18 Hacimsiz bölüm dairesi gösterimi.

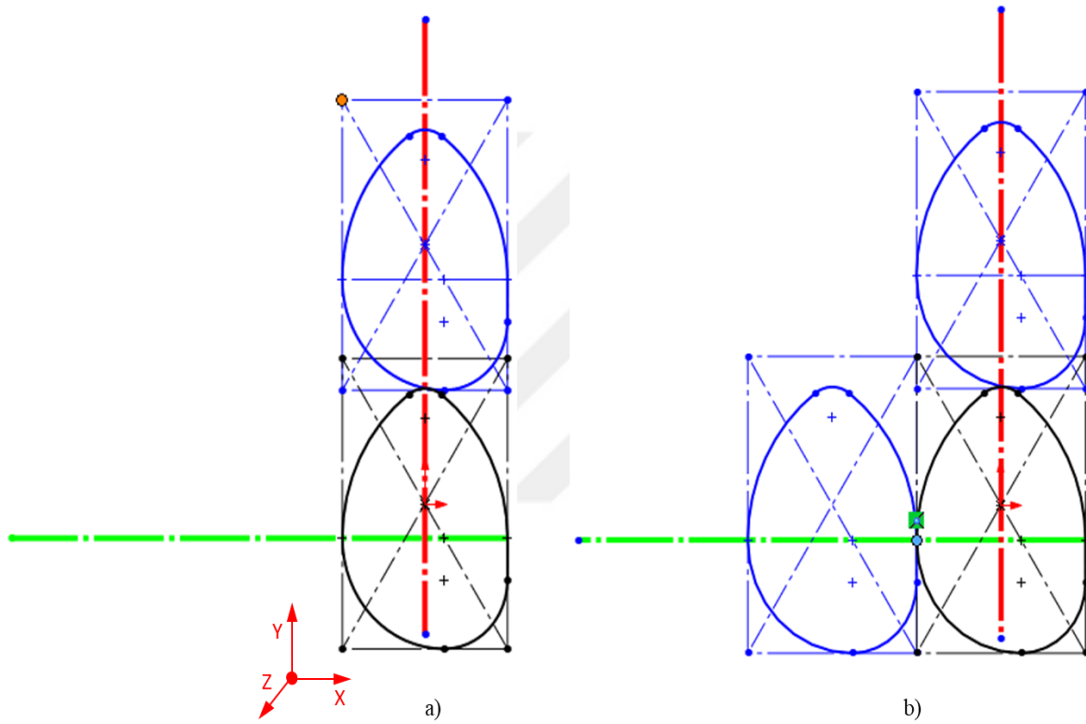
Bu kapsamda örüntü ve kafes sistemlerini ele alan tez ve makalelerden edinilen bilgiler doğrultusunda kafes oluşumu aşağıdaki şekilde belirlenmiştir. Birinci adımda; bir adet birim hücre daha önceki bölümde belirlenen kırılmaya karşı dayanımının en fazla olduğu dik yönde birim dikdörtgenin merkezinde yer alacak şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 3.19-a).

İkinci adımda; Y koordinat eksenini yönünde birim dikdörtgenin Merkez noktasın (M) ile noktası ile IK noktaları arasındaki yayın merkezinden geçecek şekilde birinci yardımcı eksen çizgisi oluşturulmuştur (Şekil 3.19-b). Üçüncü adımda; birim hücre elemanları seçilerek kopyalanmış ve bu yardımcı eksen çizgisi üzerinde çoğaltılmıştır. Çoğaltma işleminde IK ve EG noktaları arasındaki yay parçalarının birbirine teğet olacak şekilde çakışmaları sağlanmıştır (Şekil 3.19-c). Bu çakışma noktası müstakil her bir hücre yapısının Y koordinat eksenindeki birbiri ile tutunma noktası olarak belirlenmiştir.



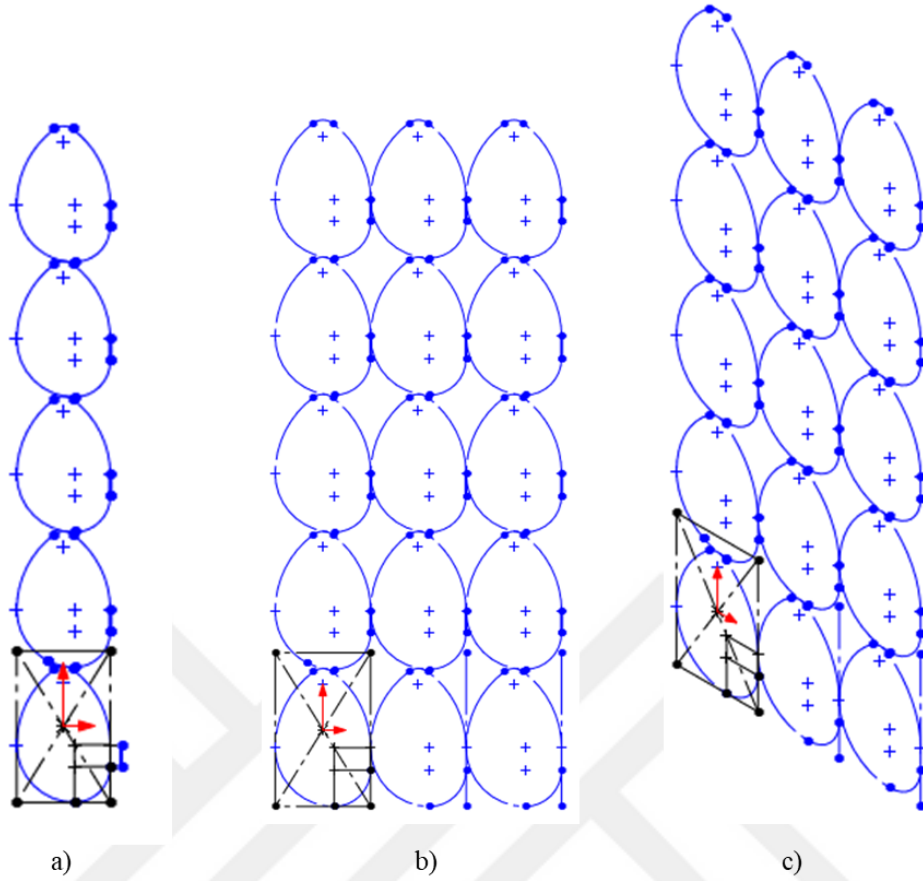
Şekil 3.19 a) Birim hücre yerleşimi, b) Yardımcı eksen çizgisinin yönü ve oluşumu, c) Yardımcı eksen çizgisi üzerinde birim hücrenin çoğaltılması.

Dördüncü adımda; X koordinat eksenı yönünde birim dikdörtgenin E ve F noktaları ile aynı doğrultuda ve çakışık olacak şekilde ikinci yardımcı eksen çizgisi oluşturulmuştur (Şekil 3.20-a). Beşin adımda; birim hücre elemanları seçilerek kopyalanmış ve oluşturulan ikinci yardımcı eksen çizgisi üzerinde çoğaltılmıştır. Çoğaltma işleminde ilk hücrenin E noktası ile çoğaltılan hücrenin F noktaları birbirine çakışacak şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 3.20-b). Bu çakışma noktası müstakil her bir hücre yapısının X koordinat eksenı üzerindeki birbiri ile tutunma noktası olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.20 a) İkinci yardımcı eksen çizgisinin yönü ve oluşumu, b) İkinci yardımcı eksen çizgisi üzerinde birim hücrenin çoğaltılması.

Bu temelde X ve Y koordinat eksenleri boyunca düzenli çoğaltma yapılacak şekilde hücre tabanlı kafes yapısı tasarlandı. Bir sonraki aşamada oluşturulacak yapının numune ölçüleri boyunca X ve Y eksenleri için kaç adet birim hücre gerekli olduğu hesaplanarak çoğaltma işlemi Şekil 3.21'deki gibi yapılmıştır.



Şekil 3.21 Müstakil her bir hücre yapısının bölüm daireleri tutunma noktası esas alınarak a) Y yönlü çoğaltılması b) X yönlü çoğaltılması c) X ve Y yönlü çoğaltılmaların izometrik görünüşü.

3.3.4. Kolon Kalınlığının Oluşturulması

Hücresel yapıların mekanik özellikleri 4 ana değişkene bağlanmaktadır. Bunlar; yapı da kullanılan birim hücre boyutu, kolon kalınlığı, kullanılan malzeme ve hacimsel boşluk oranıdır. Bu değişkenlerin tasarım ve üretimde dikkat edilmesi gereken temel unsurlar olduğunu bildirilmektedir (Hedayati vd. 2016).

Bunun yanı sıra numunelerin kafes oluşumu ve katı model tasarımlarında; yapının hücre duvarı (kolon) kalınlığı ve birim hücre boyutu da kritik önem taşımaktadır. Hücre duvarı (kolon) kalınlığı değerinin seçimini etkileyen bir diğer husus ise kullanılacak üç boyutlu yazıcının üretim değişkenlerinden kaynaklanan sorunlardır.

Literatürde hücre duvarı (kolon) kalınlığı, birim hücre yapısını oluşturan her bir eğriye atanan kalınlık değeri olarak belirtilmektedir. Bu tezde bildirilen hücre duvarı (kolon) kalınlığı, hacimsiz bir şekilde oluşturulan birim hücre yapısı çizgilerine verilen et kalınlığı değeridir. Bir önceki bölümde oluşturulan hacimsiz bölüm dairesi şeklindeki çizgisel geometrinin her iki yanına hücre duvarı kalınlığı eşit şekilde dağıtılarak Şekil 3.22’deki hacim kazandırılmıştır.



Şekil 3.22 Hücre duvarı kalınlığı verilerek hacim kazandırılmış hücre geometrisi.

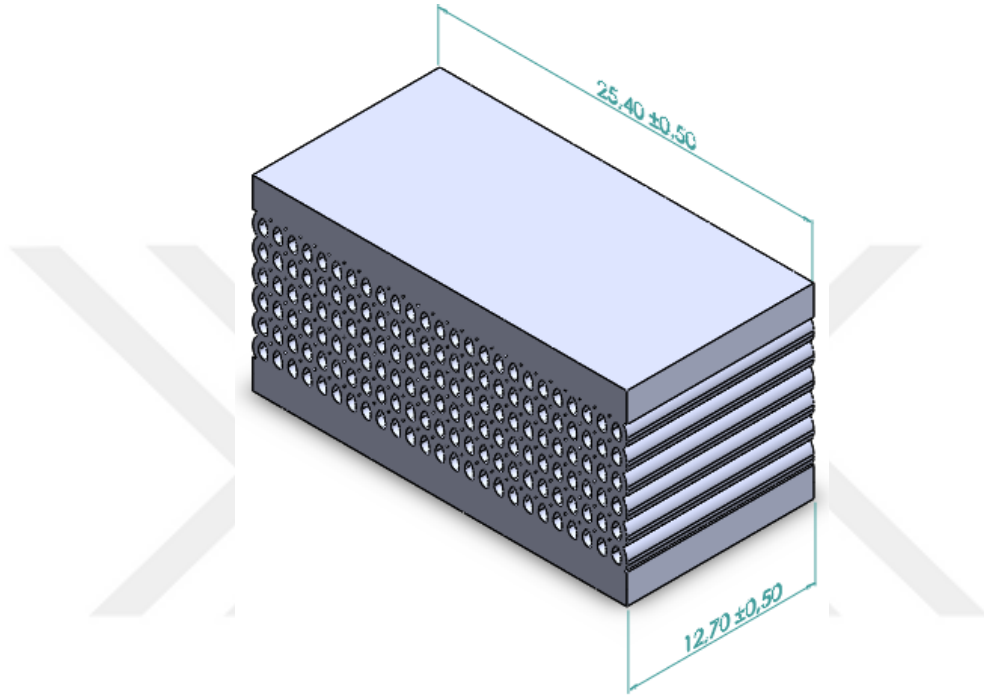
Literatür araştırmaları sonucunda hücre duvarı (kolon) kalınlığı ile ilgili belirli bir ASTM standardı mevcut olmadığı anlaşılmıştır. Yapının mekanik özellikleri üzerinde doğrudan etkili olan hücre duvarı (kolon) kalınlığı değeri birçok araştırmacı tarafından 0,1-1 mm değer aralığında alınarak çalışılmıştır.

Gibson-Ashby modelinden yola çıkarak hücre duvarı kalınlığı değişiminin mekanik özelliklere etkisini görmek amacıyla aynı birim hücre yapısı ile oluşturulan çizgi şeklindeki hacimsiz bölüm dairesinin her birine 3 farklı kolon kalınlığı değeri verilerek çalışılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Gözenek yapısı farklılaşsa dahi bütün tasarımlarda belirlenen 3 farklı kolon kalınlığı değiştirilmeden uygulanması kararlaştırılmıştır. Verilen kolon kalınlığı değerlerine sonraki bölümlerde değinilmiştir.

3.4. Numune Yapı Tasarımları

Hücresel yapıların oluşturulmasında da boyutsal kısıtlamalar bulunmaktadır. Bunlardan en önde geleni deney numuneleri hazırlama standartlarıdır. Bu kapsamda dolgu geometrili yapıların basma davranışlarını incelemek amacıyla oluşturulması gereken numuneleri hazırlama standartları araştırılarak incelenmiştir. Sert plastiklerin basma

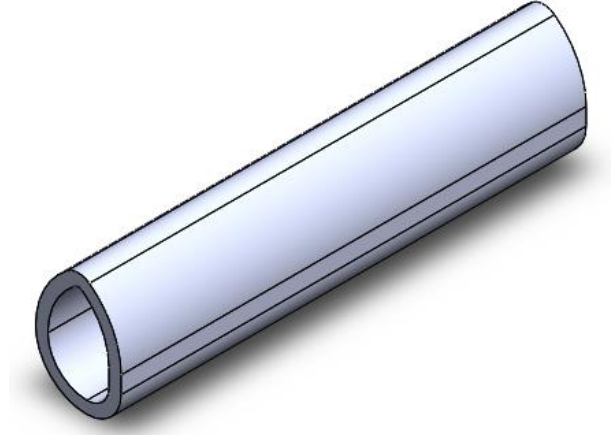
numunelerin ölçüleri için ASTM D695 standart test metodunun uygun olduğu belirlenmiştir. Bu standarda ait katı model numuneleri ölçüleri 25,4 mm x 12,7 mm x 12,7 mm olarak verilmiştir. Bu standartlara göre oluşturulan ön imalat modeli Şekil 3.23’de verilmiştir.



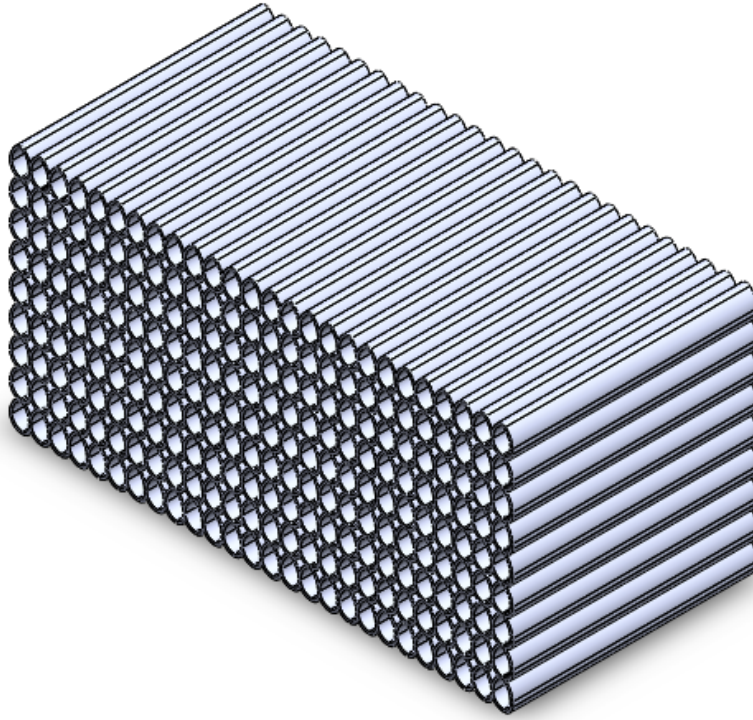
Şekil 3.23 ASTM D695 standarda ait basma testi numune ölçüleri.

Carneiro vd. (2018) tarafından yapılan bir çalışmada kafes yapılardaki hücre miktarının genel iç yapısal davranış üzerinde bir etkiye sahip olduğu, bu tür bir yapının dahili statik toplu özellikler sunması için minimum hücre sayısını belirleyen bir veri eksikliği olduğu, dahili elastik davranışa sahip genel bir kafes elde etmek için hücre sayısının temel olarak satır başına minimum 13 hücre olması gerektiğini belirtmektedir.

Oluşturulan hacimsiz bölüm dairesine kolon kalınlığı verme işlemi yapılarak birim hücre Şekil 3.24’de görüldüğü gibi hacim kazandırılarak tüp şeklinde bir yapı haline getirilmiştir. Tüp şeklindeki bu yapı dikdörtgen numune ölçülerine sığacak şekilde X ve Y koordinat eksenleri boyunca Şekil 3.25’de görüldüğü gibi homojen bir şekilde düzenli olarak çoğaltılmıştır.



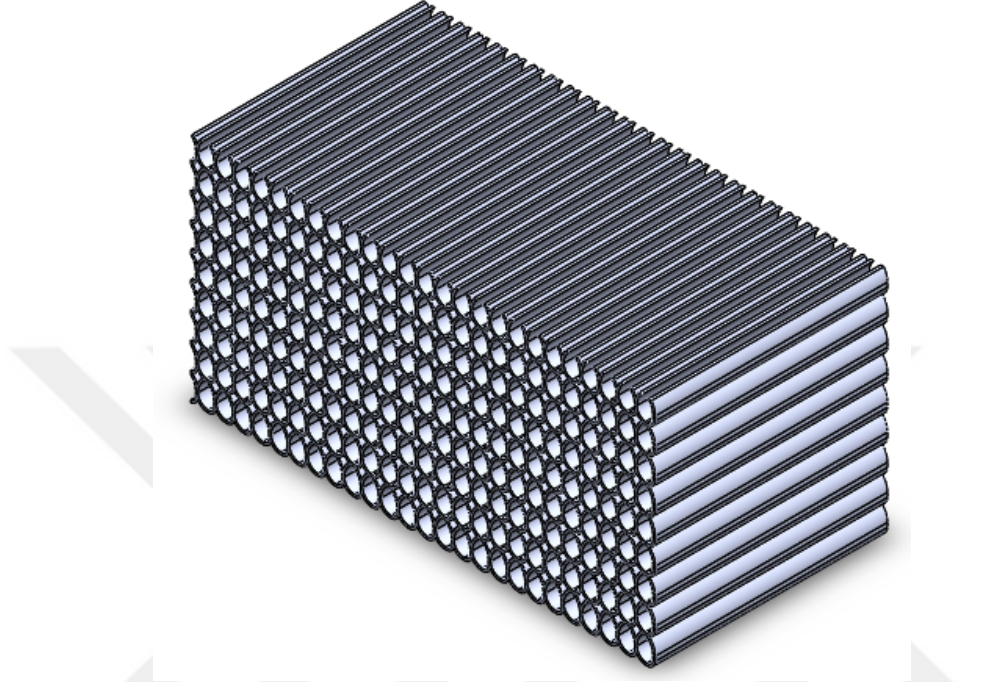
Şekil 3.24 Hacimli tüp yapısının gösterimi.



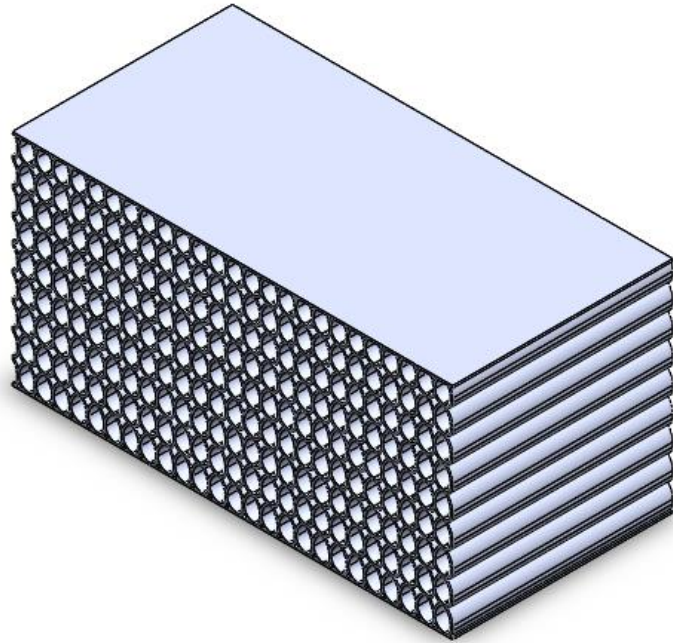
Şekil 3.25 X ve Y koordinat eksenleri boyunca homojen bir şekilde düzenli olarak çoğaltılan yapı gösterimi.

Çoğaltma işlemi sonrasında numune boyutları dışına taşan kısımlar Şekil 3.26’da görüldüğü gibi kesilerek düzeltilmiştir. Ayrıca yapılacak olan basma testleri esnasında basma çenelerinden numuneye homojen olarak yük aktarılabilmesini sağlamak

amacıyla tasarlanan kafes modelin alt ve üst kısmına hücre duvarı (kolon) kalınlığı ile aynı kalınlıkta, plaka şeklinde kabuklar eklenmiştir (Şekil 3.27).



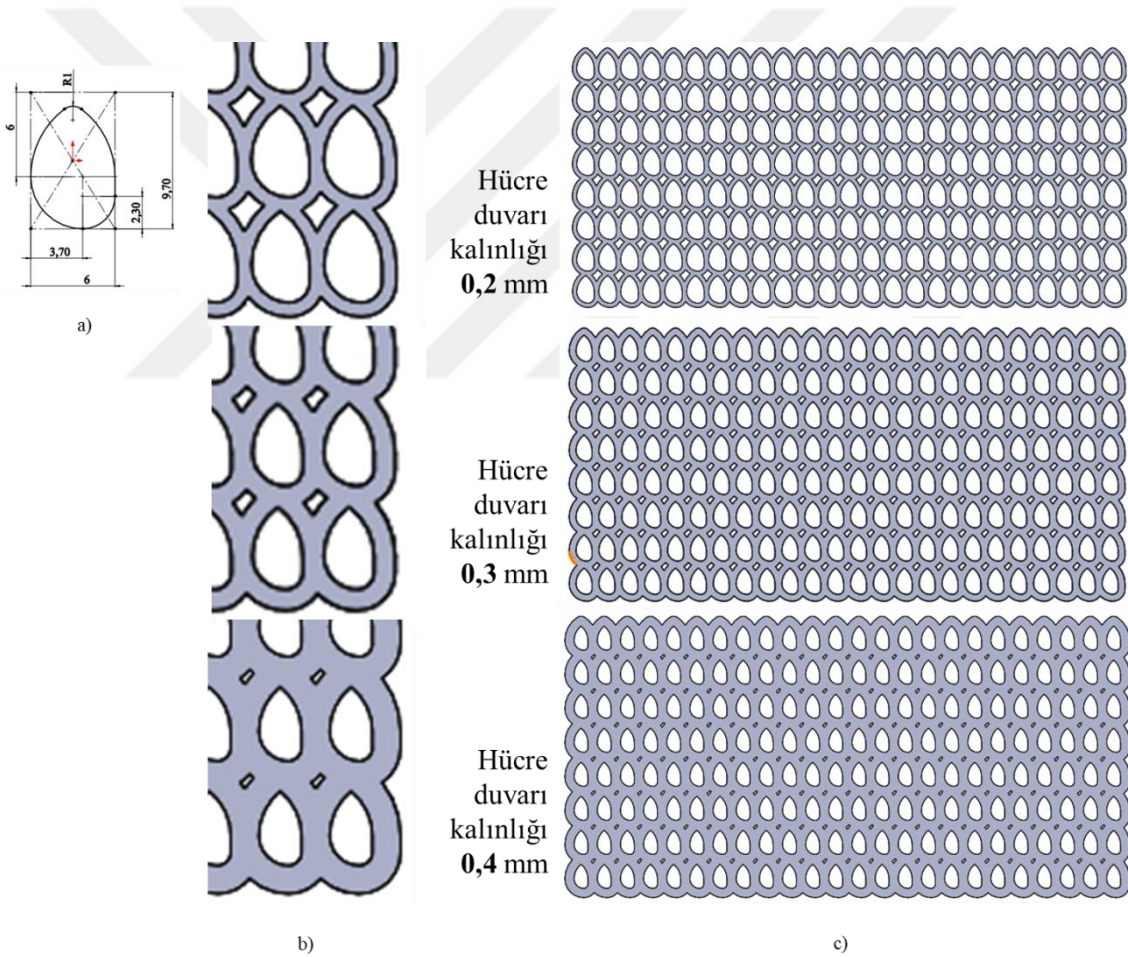
Şekil 3.26 Numune boyutları dışına taşan kısımları kesilerek düzeltilmiş yapı.



Şekil 3.27 Modelin alt ve üst kısmına plaka şeklinde kabuklar eklenmiş halinin gösterimi.

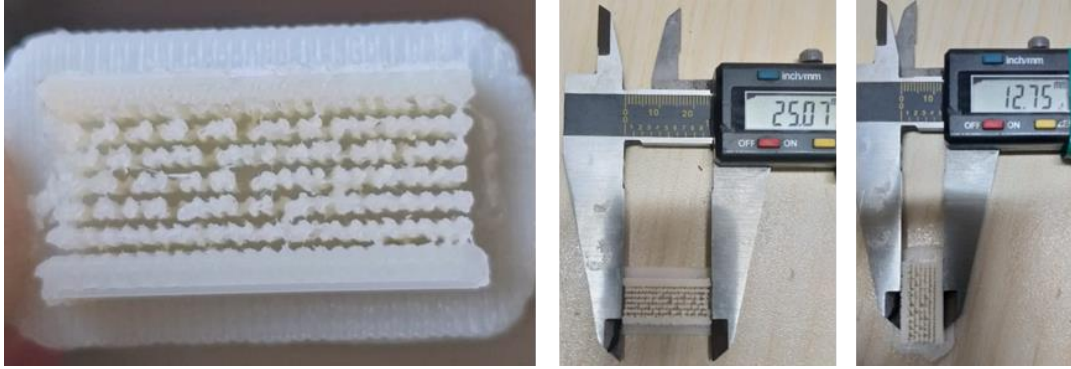
3.4.1. Ön İmalat Üretimi ve Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesi

Bütün bu boyutsal standartlar ve sınırlılıklar dikkate alınarak, ASTM D695 standartları dâhilinde dıştan dışa ölçüleri 25,4x12,7x12,7 mm dikdörtgenler prizması şeklindeki numune ve birim hücre boyutları 1 mm x 1,62 mm olan birim hücreye sırasıyla 0,2 mm, 0,3 mm ve 0,4 mm şeklinde, 3 farklı hücre duvarı kalınlığı değeri verilerek hacim kazandırıldı. Belirtilen değerlerdeki yapı SolidWorks® programı kullanılarak Şekil 3.28’de gösterildiği gibi tasarlandı ve Eİ metodu kullanılarak ön imalat ile üretilirliği kontrol edildi.



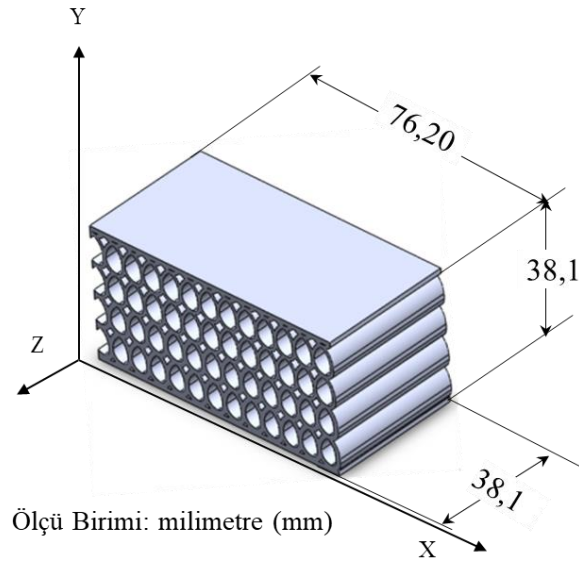
Şekil 3.28 Tasarlanan ilk numune gösterimi a) Birim hücre ve ölçüleri b) Birim hücreye göre oluşturulan katı model detayı c) Katı modelin ön görünüşü.

Belirlenen bu ölçülerde tasarlanarak üretilen ön imalat numunelerinde hücresel geometrinin istenilen şekilde oluşmadığını gözlemlendi (Şekil 3.29).



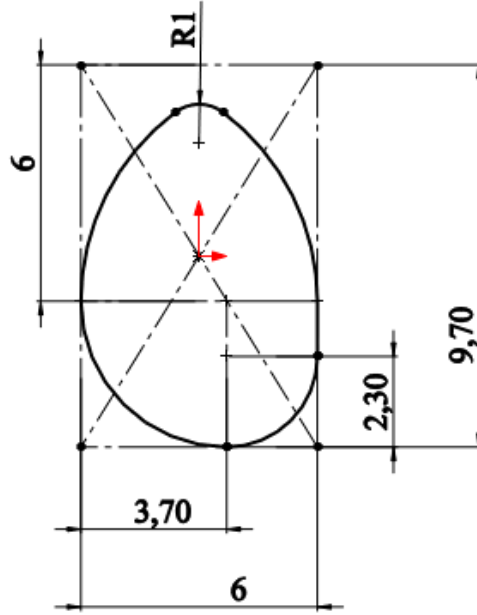
Şekil 3.29 ASTM D695 standartlarında dıştan dışa ölçüleri 25,4x12,7x12,7 mm ve hücre duvarı (kolon) kalınlığı 0,4 mm olarak Eİ metodu ile üretilen ilk numune görüntüleri.

Bu nedenle hücresel geometrinin Eİ yöntemi ile istenilen şekilde üretilebilmesi için tasarlanan ilk numunenin dıştan dışa ölçülerinin, birim hücre boyutlarının ve hücre kolon kalınlıklarının revize edilmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır. Dikdörtgenler prizması şeklindeki numune ölçülerinde ASTM D695 standartları göz önünde bulundurularak 3:1 ölçeğinde büyütme yapılarak, dıştan dışa ölçüleri 76,2x38,1x38,1 mm olacak şekilde revize edilmiştir (Şekil 3.30).



Şekil 3.30 ASTM D695 standart ölçülerinde 3:1 ölçülerinde büyütme yapılmış basma testi numune ölçüleri.

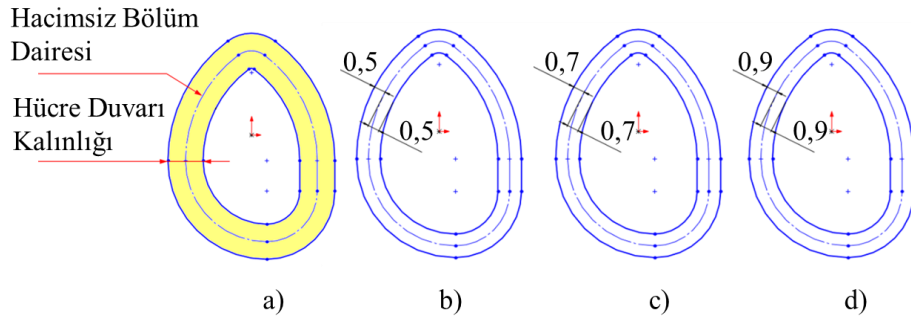
Gerçekleştirilen ön imalat işlemi sonrasında, hücresel yapı geometrisi birim hücre ölçüsünün minimum hangi boyutlarda üretilebileceği değerlendirilmiştir. Yapılan değerlendirme sonrasında hücresel yapı geometrisi birim hücre ölçüsü de 6 mm x 9,70 mm olacak şekilde revize edilmesine karar verilmiştir (Şekil 3.31).



Şekil 3.31 Ön imalat sonrasında değerlendirilerek belirlenen revize edilmiş birim hücre ölçüleri. Ölçülerin birimi milimetredir.

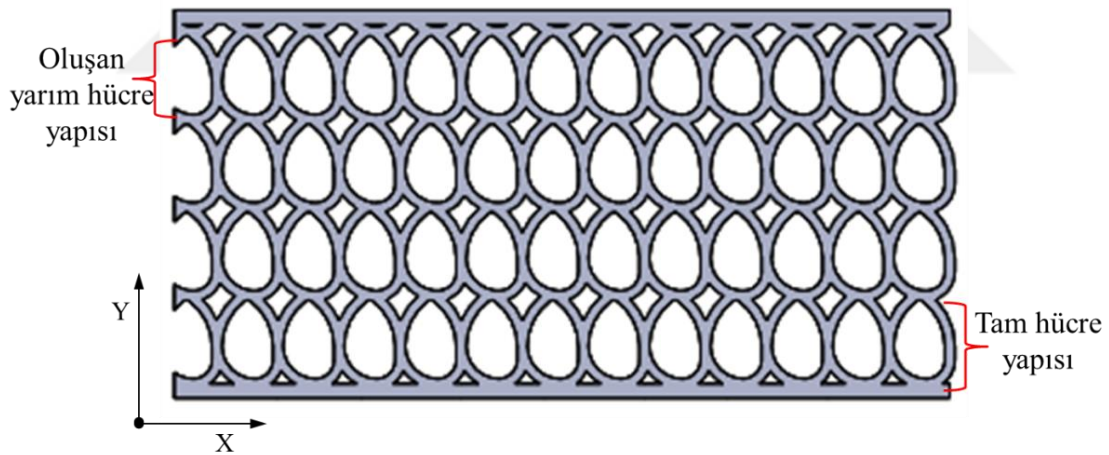
İlk deneme numunesinden edinilen tecrübe ile kullanılacak numune boyutları ve birim hücre boyutu tayin edildikten sonra, hücre duvarı (kolon) kalınlığı belirleme çalışması yapılmıştır. BFHY geometrisi birim hücre duvarı (kolon) kalınlığı üç boyutlu yazıcının üretim değişkenlerinden kaynaklanabilecek sorunlar da dikkate alınarak, sırasıyla 1 mm, 1,4 mm ve 1,8 mm şeklinde, 3 farklı hücre duvarı kalınlığı değeri belirlenmiş olup, tasarımlar revize edilerek son şekli verilmiştir. Yapılan tasarımların şematik gösterimi ise Şekil 3.32’de verilmiştir.

Numunelerinin genel boyutları tüm test numunelerinde revize edilen son ölçülerde sabit tutulmuş (76,2x38,1x38,1 mm) ve hücre duvarı (kolon) kalınlığı değiştirilerek belirlenen üç farklı değer esas alınarak çalışılmıştır.



Şekil 3.32 a) Hücre duvarı kalınlığı değeri verilerek hacim kazandırılmış hücre geometrisi gösterimi, b) 1 mm hücre duvarına sahip geometri, c) 1,4 mm hücre duvarına sahip geometri d) 1,6 mm hücre duvarına sahip geometri.

Dikdörtgenler prizması şeklinde oluşturulan her numune birim hücre boyları sabit tutularak Y yönünde 4 adet, X yönünde ise 12 adet olmak üzere toplamda 48 adet tam BFHY geometrisini içermektedir. Z yönünde geometrik özellikler sabit tutulmuştur. Bunun yanı sıra Şekil 3.33'de görüldüğü üzere numunelerin genel boyutlarını tamamlamak amacıyla yarım ya da kısmi şekilde BFHY geometrisi oluşmaktadır.



Şekil 3.33 Oluşan tam hücre, yarım hücre ya da kısmi hücre yapıların gösterimi.

Ayrıca yapılacak olan basma testleri esnasında basma çenelerinden numuneye homojen olarak yük aktarılabilmesi için gözenekli numunenin alt ve üst kısımlarına hücre duvarı kalınlığında katı plaka yapı eklenmiştir. Test numunelerinin tüm katı model tasarımları SolidWorks® isimli bilgisayar destekli çizim programı kullanılarak oluşturulmuştur.

3.4.2. Tasarlanan Katı Model Çeşitleri

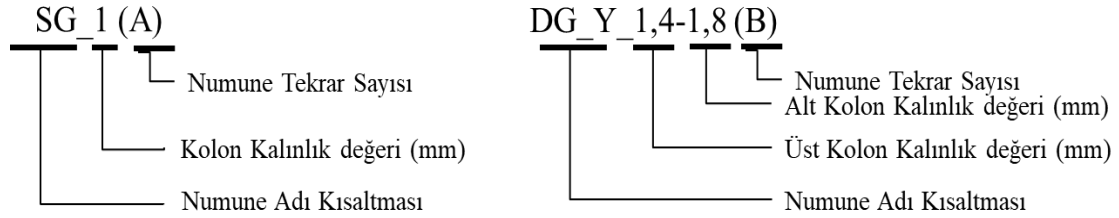
Oluşturulan BFHY geometrili hücresel tasarım ile ilk olarak aynı gözenek tipinin kalınlık boyunca devam ettiği sabit gözenek yapısına sahip numuneler tasarlanmıştır. Sabit numunelere ilave olarak hücre duvarı kalınlığının numune kalınlığı boyunca değiştiği ikinci grup değişken gözenekli numuneler tasarlanmıştır. BFHY geometrili hücresel tasarımına Y yönünde bir dikmenin eklenmesiyle oluşturulan periyodik ve değişken gözenek yapısına sahip numunelerle birlikte çalışmada toplam dört farklı tipte numune tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Toplamda aynı dış boyuta (76,2x38,1x38,1 mm) ve birim hücre geometrisine sahip, ancak üç farklı hücre duvarı kalınlığı kullanılarak, her bir numuneden üç adet olmak üzere toplam 36 adet katı model tasarımı oluşturulmuştur. Oluşturulan tasarımların birbirleri ile karışmaması ve elde edilen sonuçların karşılaştırılması için parçalar Çizelge 3-3’de gösterildiği şekilde isimlendirilmiştir.

Çizelge 3-3 Çalışmada üretilen numune tipleri ve numuneler için kullanılan kodlama sistemi.

S. No	Numune Adı	Numune Kodu	Hücre Duvarı Kalınlık Değeri
1	Sabit gözenekli yapı	SG_1	1 mm
2	Sabit gözenekli yapı	SG_1,4	1,4 mm
3	Sabit gözenekli yapı	SG_1,8	1,8 mm
4	Değişken gözenekli yapı	DG_1-1,4	1 - 1,4 mm
5	Değişken gözenekli yapı	DG_1-1,8	1 - 1,8 mm
6	Değişken gözenekli yapı	DG_1,4-1,8	1,4 - 1,8 mm
7	Sabit gözenekli Y eksen yönünde bir dikmenin eklendiği yapı	SG_Y_1	1 mm
8	Sabit gözenekli Y eksen yönünde bir dikmenin eklendiği yapı	SG_Y_1,4	1,4 mm
9	Sabit gözenekli Y eksen yönünde bir dikmenin eklendiği yapı	SG_Y_1,8	1,8 mm
10	Değişken gözenekli Y eksen yönünde bir dikmenin eklendiği yapı	DG_Y_1-1,4	1 - 1,4 mm
11	Değişken gözenekli Y eksen yönünde bir dikmenin eklendiği yapı	DG_Y_1-1,8	1 - 1,8 mm
12	Değişken gözenekli Y eksen yönünde bir dikmenin eklendiği yapı	DG_Y_1,4-1,8	1,4 - 1,8 mm

Ayrıca Şekil 3.34’de açıklandığı üzere her parça harf ve rakamdan oluşan bir yapı ile kodlanacak şekilde kodlama sistemi geliştirilmiştir. Numunelerin isimlendirme ve kodlanmasından da anlaşılabilceği gibi tasarım aşamasında 4 adet farklı yapı çeşidi kullanılmıştır.



Şekil 3.34 Tasarımlar için kullanılan kodlama sistemi örnek açıklaması.

3.4.2.1. Sabit (Periyodik) Gözenekli Yapı Tasarımı

Oluşturulan BFHY geometrili hücrel tasarım ile ilk olarak aynı duvar kalınlığının numune boyunca devam ettiği sabit gözenek yapısına sahip numuneler üretilmesi hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda tasarlanan bu yapının, tez kapsamında tasarımı yapılan diğer kafes yapılarına karşı basma yüklemesi durumunda deformasyon şekline ve mekanik özelliklere etkisinin karşılaştırılarak incelenmesi amaçlanmıştır.

Bu hedeften hareketle hücre duvarı kalınlığının tüm yapı boyunca aynı kaldığı kafes sistemi oluşturulmuştur. Birim hücre içerisinde yer alan çizgi şeklindeki bölüm dairesine sırasıyla 1 mm, 1,4 mm ve 1,8 mm kalınlık değerleri verilerek hacim kazandırılmıştır. Bu şekilde 3 farklı katı model elde edilmiştir. Bu kapsamda oluşturulan kafes yapısı örneği Şekil 3.35’de gösterilmektedir.

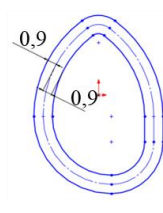
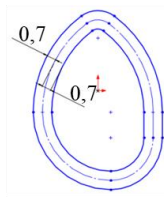
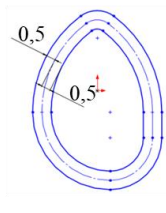
Hücre Duvarı
(kolon)
kalınlığı

1 mm

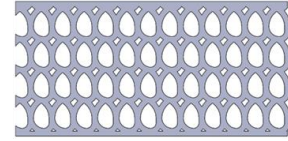
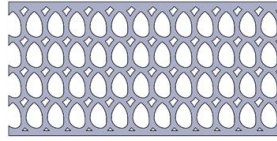
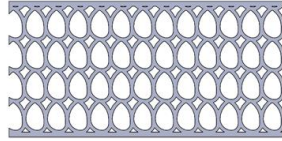
1,4 mm

1,8 mm

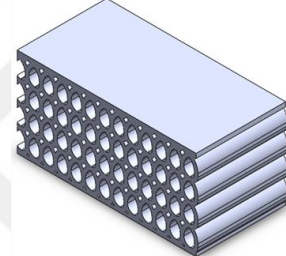
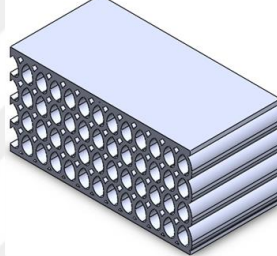
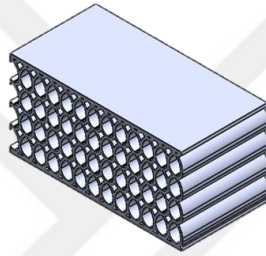
Birim Hücre
boyutların
gösterimi



Birim Hücre
Kafes
Yapısı



SolidWorks
Proramında
Çizimi
3D Model



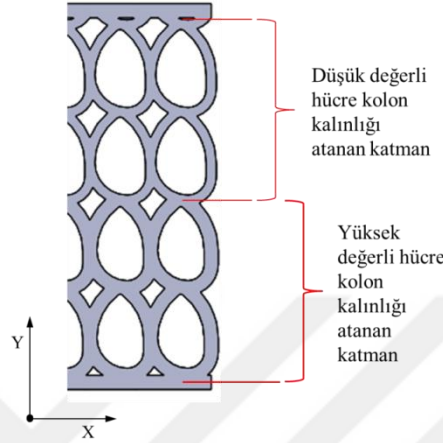
Şekil 3.35 Önerilen modelin sabit (periyodik) gözenekli yapı tasarım çeşitleri ve oluşturulan katı modelleri.

3.4.2.2. Değişken Gözenekli Yapı Tasarımı

Tezin bu bölümünde, BFHY geometrisi modelinin geçişli gözenekli yapı şeklinde tasarımı yapılarak daha hafif bir yapı şekline getirilmesi hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda tasarlanan bu yapının, tez kapsamında tasarımı yapılan diğer kafes yapılarına karşı basma yüklemesi durumunda deformasyon şekline ve mekanik özelliklere etkisinin karşılaştırılarak incelenmesi amaçlanmıştır.

Bu hedef ve amaçtan hareketle hücre duvarı kalınlığının numune kalınlığı boyunca iki kademede değiştiği ve Y eksenini boyunca aşağıdan yukarıya doğru kademeli artacak şekilde değişken gözenek geçişli kafes sistemi oluşturulmuştur. Yapının alt tarafından (X eksenini üzerinde kalan taraf) başlayarak yukarıya doğru çıkan ilk 1 ve 2. satırdaki hücrelere yüksek değer, onların üstünde kalan alan 3 ve 4. satırlardaki hücrelere de düşük değerdeki kolon kalınlıkları verilerek kademelendirilmiştir. Verilen kolon

kalınlığı değerleri sırasıyla; 1 mm-1,4 mm, 1 mm-1,8 mm, ve 1,4 mm-1,8 mm şeklindedir. Bu şekilde 3 farklı katı model elde edilmiştir. Bu kapsamda oluşturulan kafes yapısı örneği Şekil 3.36’da gösterilmektedir. Oluşturulan değişken ve geçişli gözenekli yapı çeşitleri toplu olarak gösterilmiştir (Şekil 3.37).



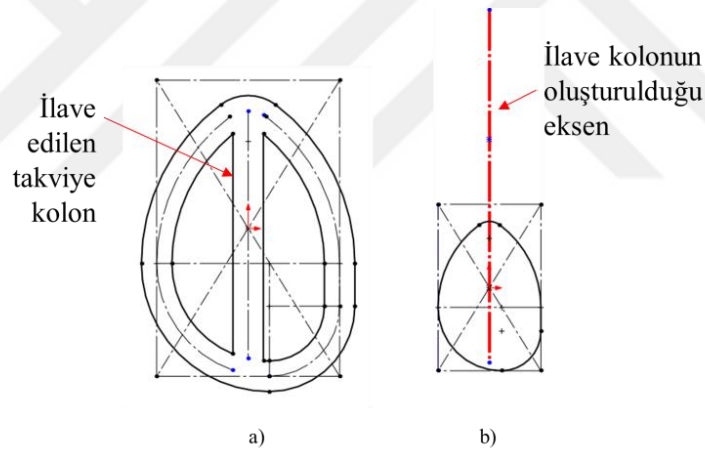
Şekil 3.36 Değişken gözenekli yapının kafes tasarımı görüntüsü.

Hücre Duvarı (kolon) kalınlığı	1 mm – 1,4 mm	1 mm – 1,8 mm	1,4 mm - 1,8 mm
Birim Hücre boyutların gösterimi			
Birim Hücre Kafes Yapısı			
SolidWorks Proramında Çizimi 3D Model			

Şekil 3.37 Oluşturulan değişken ve geçişli gözenekli yapı çeşitleri toplu gösterimi.

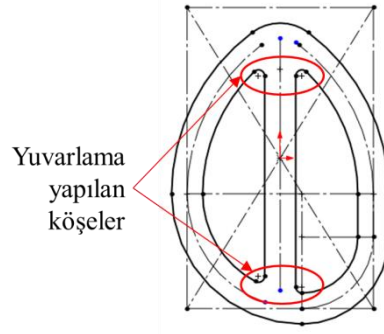
3.4.2.3. Sabit Gözenekli Y Eksenine Yönünde Bir Dikmenin Eklendiği Yapı Tasarımı

Tezin bu bölümünde, BFHY geometrisi modelinin basma kuvveti eksenine dik olacak şekilde ilave kolon eklenmesi yapılarak daha dayanıklı bir yapı şekline getirilmesi hedeflenmiştir. Literatürde Eİ ile üretilen kafes yapılarda, ilave dikme eklenmesinin de mekanik özellikler üzerinde olumlu etkisinin olduğu belirtilmiştir. İlk defa tasarlanarak mekanik özellikleri araştırılan BFHY geometrisi modelinde, ilave dikme eklenmesi ile oluşturulan kafes sisteminin tez kapsamında tasarımı yapılan diğer kafes yapılarına karşı basma yüklemesi durumunda deformasyon şekline ve mekanik özelliklere etkisinin karşılaştırılarak incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda birim hücre geometrisine Şekil 3.38’de gösterilen şekilde basma kuvveti eksenine dik olacak şekilde ilave kolon eklenmesi yapılmıştır.



Şekil 3.38 İlave kolon eklenmesi gösterimi a) Basma kuvveti eksenine dik olacak şekilde eklenen ilave kolonunu gösterimi b) Kolon ilavesinin oluşturulduğu eksenin gösterimi.

Yapılan kolon ilavesi Y koordinat eksenine paralel şekilde ve daha önce kafes sistemi tasarlanırken oluşturulan eksenin üzerinde oluşturulmuştur. Kolon kalınlığı eksenin her iki yanına eşit şekilde paylaştırılarak verilmiştir. Kolon kalınlığı tüm yapılarda eşit olacak şekilde en küçük kolon kalınlığı olan 1 mm ölçüsünde verilmiştir. Birim hücre üzerine ilave edilen kolon çiziminden sonra oluşan keskin köşelerin yapıyı etkilemesini önlemek maksadıyla 0,2 mm ölçüsünde yuvarlatma yapılmıştır. Yapılan yuvarlatma işlemi Şekil 3.39’da gösterilmiştir.



Şekil 3.39 Yapılan yuvarlatma işleminin gösterimi.

Sabit gözenekli yapı tasarımlarında uygulanan adımlar bu yapıda da tekrar edilerek 3 farklı katı model elde edilmiştir. Daha önce literatürde çalışmamış olan bu yapıya ilave edilen kolonun, bu tez kapsamında tasarlanan diğer sabit ve geçişli kafes yapılara göre yapının dayanımını arttırması beklenmektedir. Oluşturulan sabit gözenekli ve Y eksenî yönünde bir dikmenin eklendiği yapı çeşitleri toplu olarak Şekil 3.40’da gösterilmiştir.

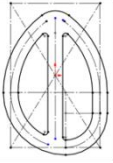
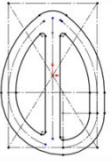
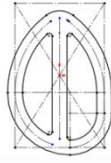
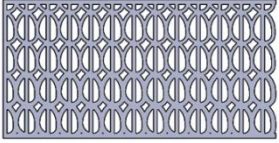
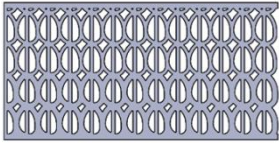
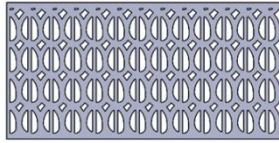
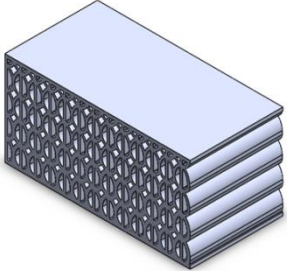
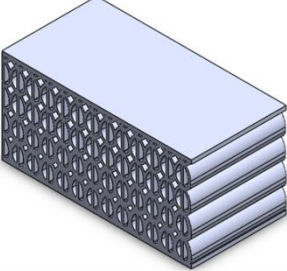
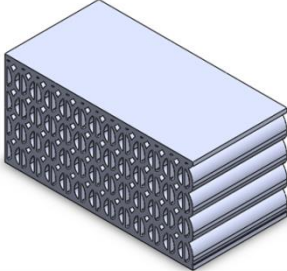
Hücre Duvarı (kolon) kalınlığı	1 mm	1,4 mm	1,8 mm
Birim Hücre boyutların gösterimi			
Birim Hücre Kafes Yapısı			
SolidWorks Proramında Çizimi 3D Model			

Şekil 3.40 Oluşturulan sabit gözenekli ve Y eksenî yönünde bir dikmenin eklendiği yapı çeşitleri toplu gösterimi.

3.4.2.4. Değişken Gözenekli Y Eksenli Yönünde Bir Dikmenin Eklendiği Yapı Tasarımı

Tezin bu bölümünde, BFHY geometrisi modelinin daha önce tasarlanan geçişli gözenekli yapı şekline basma kuvveti eksenine dik olacak şekilde ilave kolon eklenmesi yapılarak tasarımın hem daha hafif hem de daha dayanıklı bir yapı şekline getirilmesi hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda tasarlanan bu yapının, tez kapsamında tasarımı yapılan diğer kafes yapılarına karşı basma yüklemesi durumunda deformasyon şekline ve mekanik özelliklere etkisinin karşılaştırılarak incelenmesi amaçlanmıştır.

Önceki bölümlerde değişken gözenekli ve Y eksenli yönünde bir dikmenin eklendiği yapıların tasarımlarında uygulanan adımlar bu yapıda da tekrar edilerek 3 farklı katı model elde edilmiştir. Oluşturulan değişken gözenekli y eksenli yönünde bir dikmenin eklendiği yapı çeşitleri toplu olarak Şekil 3.41’de gösterilmiştir.

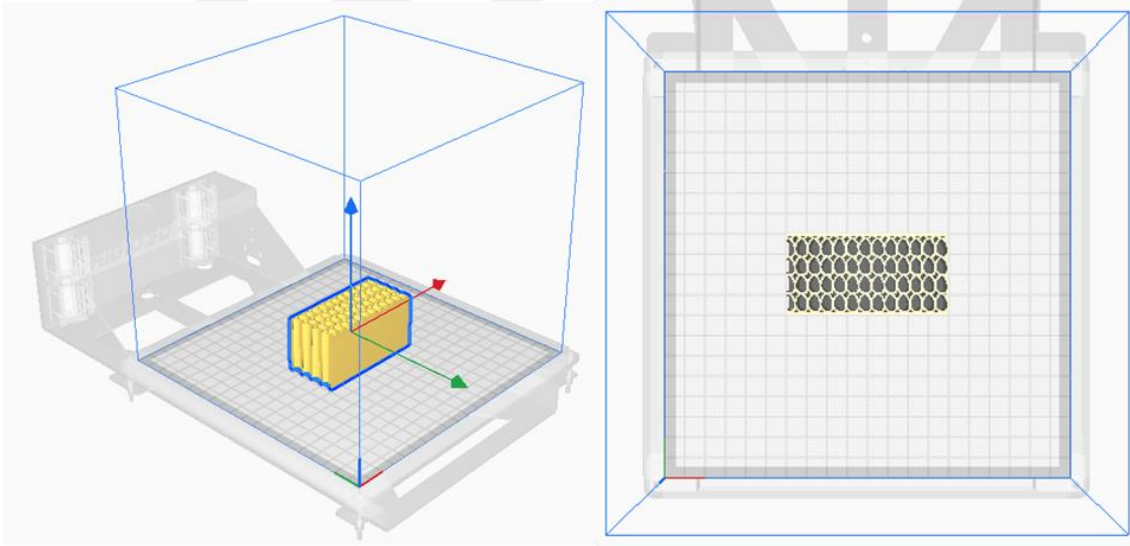
Hücre Duvarı (kolon) kalınlığı	1 mm – 1,4 mm	1 mm – 1,8 mm	1,4 mm - 1,8 mm
Birim Hücre boyutların gösterimi			
Birim Hücre Kafes Yapısı			
SolidWorks Proramında Çizimi 3D Model			

Şekil 3.41 Oluşturulan değişken gözenekli ve Y eksenli yönünde bir dikmenin eklendiği yapı çeşitleri toplu gösterimi.

3.5. Eklemeli İmalat ile Üretim

İlk aşama olan tasarım aşamasında SolidWorks® programında katı modelleri oluşturulan BFHY sonraki aşamada ise STL formatında kaydedilerek, dışarı aktarılması sağlanmıştır. Dışarıya aktarılan bu katı model verileri üretim öncesinde üretim parametrelerinin belirlendiği ve dilimleme işleminin yapıldığı Ultimaker Cura ara dilimleyici programında açılmıştır. Ultimaker Cura programının sanal imalat tablasına konumlandırılan modeller katmanlar halinde dilimlenerek uygun imalat parametrelerinin girilmesiyle birlikte imalata hazır parametrik tasarımları yapılmıştır.

Şekil 3.42’de Ultimaker Cura yazılımı kullanılarak, STL dönüşümü yapılmış modelin üç boyutlu yazıcı için baskı ayarlamalarının yapıldığı ara yüz görülmektedir.



Şekil 3.42 Ultimaker Cura yazılımı ara yüz görüntüleri.

3.5.1. Malzeme Seçimi ve Özellikleri

Yapılan çalışmada tasarlanan numuneler Polilaktik Asit (PLA) malzemeden 3D vasıtasıyla EYM eklemeli imalat metodu kullanılarak üretilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan PLA filament DENİF ticari markası tarafından üretilerek piyasaya sürülen ve PLA+ ticari ürün adı altında bulunabilen 1,75 mm çapındaki üründür.

3.5.2. Üretim Değişkenleri

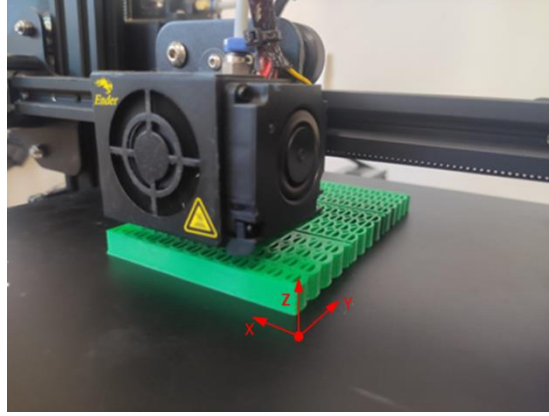
Eklemeli İmalat yönteminde üretilen parçaların mekanik özellikleri işleme parametreleriyle doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle yeterli dayanıma sahip ve malzemedan beklenen mekanik özellikleri sağlayacak şekilde imalat parametrelerin belirlenmesi oldukça önemlidir. Bu çalışma kapsamında kullanılan tüm işlem parametreleri Çizelge 3-4’de verilmiştir. Yapılan bu çalışmada, tüm numunelerin yazdırılmasında yazdırma parametreleri sabit tutulmuştur.

Çizelge 3-4 Çalışma kapsamında kullanılan tüm işlem parametreleri.

Parametre	Değer
Ekstruder sıcaklığı, °C	200
Yatak sıcaklığı, °C	60
Meme (nozül) çapı, mm	0,2
Baskı hızı, mm/s	50
Katman yüksekliği, mm	0,2
Dolgu, %	100

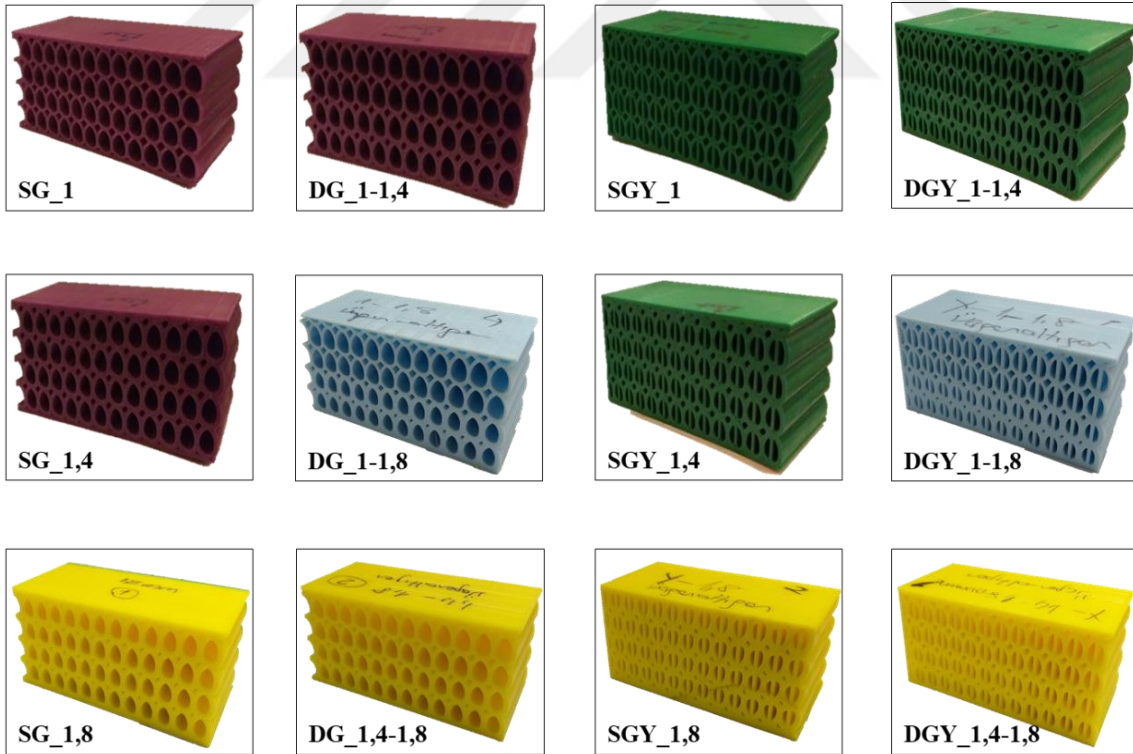
3.5.3. Önerilen Modelin Üretimi

Modeller kendimizin temin ettiği Ender Pro marka 3D baskı cihazıyla üretilmiştir. Parçanın 3D ile üretimi sürecindeki baskıya ait anlık bilgileri Şekil 3.43’de göstermektedir. Numuneler, 3D’de tasarımda belirlenen Z ekseni yönü boyunca imal edilmiştir.



Şekil 3.43 Üretilen numunelerin imalat sırasındaki görüntüleri.

Üretim sürecinde, numunelerin mekanik özelliğine ciddi oranda etki edecek şartlar ortadan kaldırılmaya çalışılarak yazdırma işlemi kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. Üretim işlemi sonucunda 12 farklı tipteki yapının her birinden 3'er adet parça üretilmiş olup, elde edilen toplam 36 numuneden örnek olarak 12 parçanın resimleri Şekil 3.44'de gösterilmiştir.



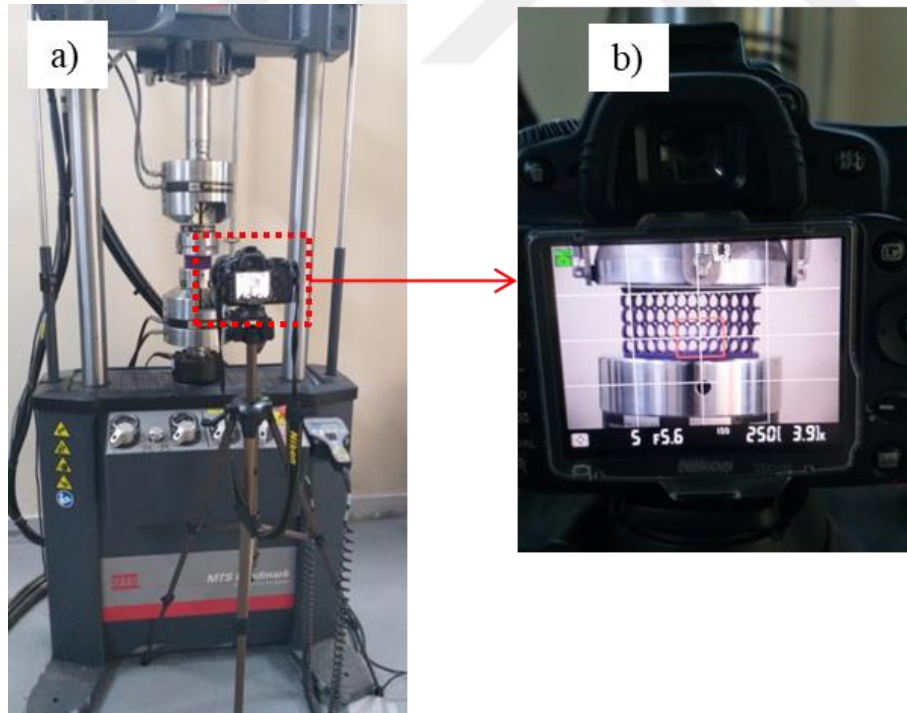
Şekil 3.44 Üretim işlemi sonucunda elde edilen parçaların resimleri.

3.6. Deneysel Çalışmalar

Üretilen numunelerin mekanik özelliklerin deneysel olarak belirlenebilmesi için basma testleri Süleyman Demirel Üniversitesi bünyesinde bulunan YETEM'deki mekanik test laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Test sonuçlarının doğruluğunu ve tekrarlanabilirliğini sağlamak amacıyla 12 farklı yapıdan her bir yapı için 3 adet olmak üzere 36 adet numune test edilmiştir.

3.6.1. Deney Düzeneği

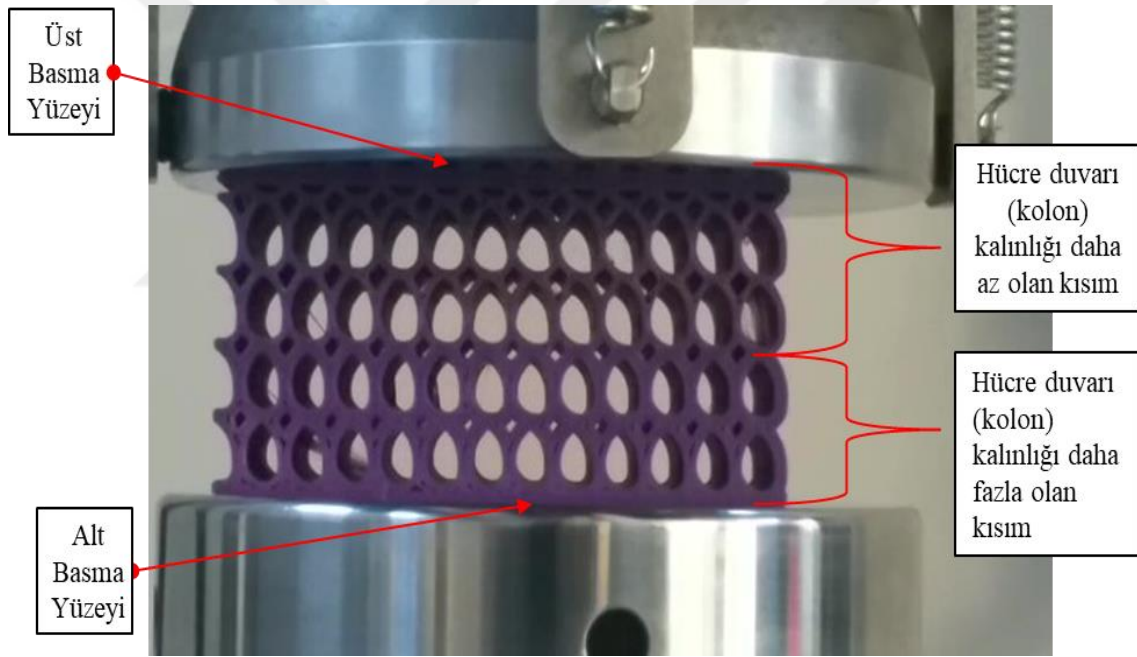
Basma testleri 100 kN kapasiteli MTS 370.10 marka çekme-basma test cihazında 2 mm/dakika basma hızında ve çevre sıcaklığında yapılmıştır. Numuneler 0,50 birim şekil değişimi (gerinim) gerçekleşene kadar teste tabi tutulmuştur. Basma testleri 4288x2848 çözünürlüğe sahip Nikon D90 marka fotoğraf makinası ile görüntülenerek yapının deformasyon sürecini belirlenmesi sağlanmıştır (Şekil 3.45).



Şekil 3.45 Basma test düzeneği ve basma testleri sırasında oluşan hasarın görüntülenme düzeneği, a) MTS 370.10 marka çekme-basma test cihazı, b) Nikon D90 marka fotoğraf makinası.

3.6.2. Numunelerin Hazırlanması

Yapılan testler sonucunda test cihazından sonuçlar; basma yükü değeri Kilo Newton, numunede oluşan yer değiştirme değeri ise milimetre olarak alınmıştır. Numunede meydana gelen gerilmeyi hesaplamak için numunenin (malzemeden oluşan kısım ve boşluk dahil olmak üzere) $14.516,10 \text{ mm}^2$ kesit alanı dikkate alınmıştır. Numunelerin test cihazının karşılıklı basma yüzeyleri arasında ilk yerleşimini sağlamak ve yüzeyler arasında kaymasını önlemek amacıyla, ölçümler ön bir yüklemeden sonra test cihazı tarafından kaydedilmiştir. Basma testi, Y eksenı yönünde gerçekleştirilmiştir. Değişken gözenekli model yapılarında hücre duvarı kalınlığı daha az olan kısım üst tarafa bakacak şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 3.46).



Şekil 3.46 Değişken Gözenekli Model Yapısı yerleştirilme şekli.

Kütle ölçümleri her bir numune için oda sıcaklığında hassas terazi ile (0,003 mg hassasiyete sahip) ile yapılmış ve ölçümler her bir numune için 3 defa tekrarlanmış ve her bir yapı için üç adet numunenin ortalama ağırlık değerleri Çizelge 3-5’de verilmiştir.

Çizelge 3-5 Üretilen numunelerin ağırlık yönünden kıyaslanması.

Numune Kodu	Duvar kalınlıkları (mm)	Ortalama Ağırlık (gr)
SG_1	1	48,64
SG_1,4	1,4	67,68
SG_1,8	1,8	73,23
DG_1-1,4	1 - 1,4	56,98
DG_1-1,8	1 - 1,8	62,15
DG_1,4-1,8	1,4 - 1,8	69,36
SG_Y_1	1	64,63
SG_Y_1,4	1,4	82,67
SG_Y_1,8	1,8	87,86
DG_Y_1-1,4	1 - 1,4	76,21
DG_Y_1-1,8	1 - 1,8	79,93
DG_Y_1,4-1,8	1,4 - 1,8	85,72

4. BULGULAR

Tezin bu bölümünde, üretilen numunelere yapılan basma testleri sonucunda elde edilen sayısal veriler doğrultusunda tasarımların mekanik davranışları incelenmiş ve numunelerin gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri oluşturulmuştur. Elde edilen sayısal veriler ve oluşturulan bu grafikler üzerinden, yapının kalıcı şekil değişimine uğramadan dayanabileceği akma gerilmesi ile maksimum gerilme değeri ve elastisite modülleri değerleri belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar incelenmiş ve numuneler birbirleri ile kıyaslanarak değerlendirilmiştir. Yapılan bu değerlendirmelerde esas alınan akma gerilmesi değeri yapıların gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerindeki ilk pik değeri alınarak hesaplanmıştır. Maksimum gerilme değeri ise yapıların gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerindeki son pik değeri alınarak hesaplanmıştır. Yapılara ait elastisite modülü değerleri ise gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin lineer bölgesinin eğimi hesaplanarak bulunmuştur.

Ayrıca her bir yapı için test edilen üç adet numunenin ortalama değerleri hesap edilerek, her bir numune için akma gerilmesi, ortalama maksimum gerilme değeri, ortalama elastisite modül değeri belirlenmiştir. Yapıların birbirleri ile kıyaslanmasında ise bu ortalama değerler esas alınarak, sonuçlar incelenmiş ve yapılar birbirleri ile kıyaslanarak değerlendirilmiştir.

Hücresel yapıların ve malzemelerin basma testlerinden elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme diyagramlarında yaygın olarak üç deformasyon bölgesi olduğu ifade edilmektedir. Bu üç bölge; akma öncesi aşama olarak adlandırılan elastik bölge, akma sonrası oluşan plato bölgesi ve sıkışma bölgesi olarak adlandırılmaktadır (Neff, Hopkinson ve Crane 2018). Bu doğrultuda numunelerin gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri üzerindeki bu üç bölgede sergiledikleri mekanik davranışları dikkate alınarak incelenmiş ve yorumlanmıştır.

Ayrıca yapıların basma testi sırasında kaydedilen videolarından yakalanan birim şekil değişim değerlerindeki görüntüler eşliğinde hücre topolojisinin basma durumu altındaki deformasyon davranışları ve tasarlanan birim hücre şekline bağlı değişimleri

incelenerek değerlendirilmiştir. Bu görüntü değerlendirmesinde numunelerin birbirleri ile kıyaslanmasında esas alınan ortalama değerler yakın sayısal sonuçlar veren numunelerin görüntüleri kullanılarak değerlendirme yapılmıştır. Yine bu görüntü değerlendirmesinde tüm numunelerde başlangıç durumu ve sonrasında, 0,05 – 0,10 – 0,20 – 0,30 – 0,40 – 0,50’lik birim şekil değişim değerlerindeki sergiledikleri görüntüler dikkate alınarak yorumlama yapılmıştır. Hücre duvarları kalınlığının en yüksek olduğu SG_1,8 numunesi üzerinden yapılan ön deneysel test çalışmasında birim şekil değişiminin 0,50 seviyesine ulaştığında, yapının yüke direnmeye başladığı, yüklenme değerinin test cihazı kapasitesi sınırlarına ulaşılmış olması nedeniyle cihazın güvenlik uyarısı verdiği görülmüştür. Bu nedenle bütün numunelerde elde edilen verileri aynı oranda karşılaştırmak için optimum deformasyon oranı 0,50 olarak belirlenmiştir.

Ayrıca testler sonucunda elde edilen sayısal veriler ve oluşturulan bu grafikler üzerinden, numunelerin enerji emilimi kabiliyetleri belirlenmiş ve numuneler birbirleri ile kıyaslanarak değerlendirilmiştir. Basma testlerinde malzeme tarafından yer değiştirmeye bağlı depolanan enerji Denklem (4.1),’de verilen formül ile gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin altında kalan alanın hesaplanmasıyla elde edilmiştir.

$$EE = \int_0^{\epsilon} \sigma(\epsilon) . d\epsilon \quad (4.1)$$

Kütleyle bağlı spesifik enerji emilimi ise Denklem (4.2)’de verildiği gibi EE değerinin kütleyle (m) bölünmesiyle elde edilmiştir.

$$SEE = EE/m \quad (4.2)$$

Bazı numunelerin yapılan deneyleri esnasında belirlenen optimum deformasyon oranı 0,50 birim şekil değişimine ulaşmadan cihazın güvenlik uyarısı vermesi nedeniyle deneyler sonlandırılmıştır. Bu nedenle de bazı yapıların gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri de optimum deformasyon oranı olan 0,50 birim şekil değişim değerine ulaşmamaktadır. Bundan dolayı elde edilen verileri aynı düzeyde karşılaştırmak amacıyla, SEE hesaplamasında kullanılan gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin

altında kalan alanın hesaplanmasında sadece elastik bölgeyi de içine alan 0,10 birim şekil değişim değerlerine kadar olan EE dikkate alınarak hesaplama yapılmıştır.

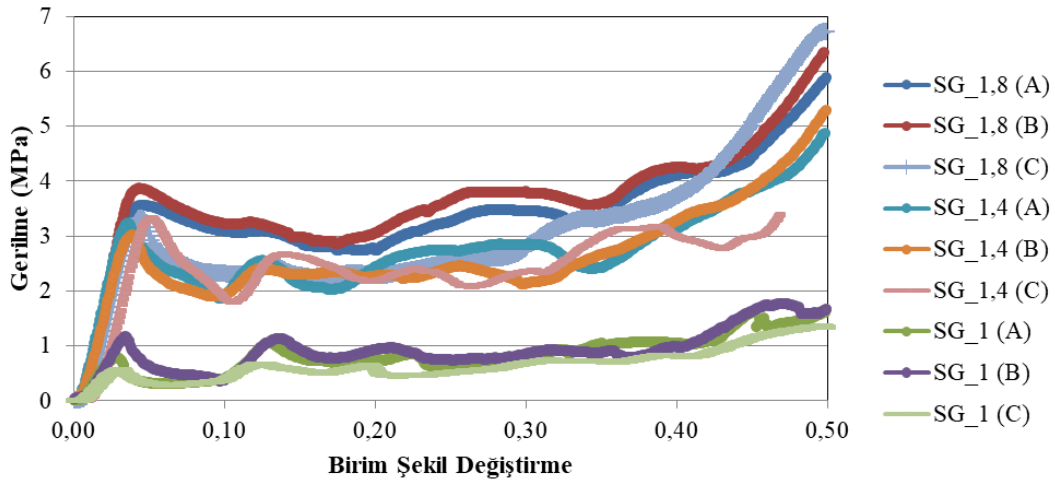
4.1. Sabit Gözenekli Yapıların (SG) Basma Durumunda Mekanik Performansları

Numunelerin yapılan basma testi sonucunda hesaplanan mekanik performanslarına ait sayısal verilerinin ortalamaları Çizelge 4-1’de verilmiştir.

Çizelge 4-1 SG numunelerin mekanik performanslarına ait sayısal veriler.

Numune Kodu	Ağırlık (gr)	Akma Gerilmesi (MPa)	Max. Gerilme (MPa)	Elastite Modülü (MPa)
SG_1 (A)	47,97	0,78	1,84	33,36
SG_1 (B)	52,38	1,16	1,84	38,08
SG_1 (C)	45,56	0,57	1,46	23,43
SG_1 Ortalama	48,64	0,84	1,72	31,62
SG_1,4 (A)	66,25	3,23	4,87	106,49
SG_1,4 (B)	66,86	3,01	6,05	93,25
SG_1,4 (C)	69,92	3,33	3,39	84,23
SG_1,4 Ortalama	67,68	3,19	4,77	94,65
SG_1,8 (A)	70,72	3,55	6,75	95,15
SG_1,8 (B)	72,40	3,86	6,34	109,89
SG_1,8 (C)	76,56	3,31	6,73	91,68
SG_1,8 Ortalama	73,23	3,57	6,61	98,91

Tüm SG numunelerin yapılan basma testi sonucunda elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri Şekil 4.1’de verilmiştir. Gerilme-birim şekil değiştirme grafiğinde görüldüğü üzere, hücresel yapıların genelinde yaygın olarak elde edilen üç deformasyon bölgesinin (elastik, plato ve nihai sıkışma bölgeleri) burada da oluştuğu gözlenmektedir. Aynı BFHY geometrisine sahip, ancak farklı hücre duvarı kalınlığında tasarlanarak üretilen SG yapıların birbirleriyle benzer mekanik basma davranışı sergiledikleri söylenebilir.



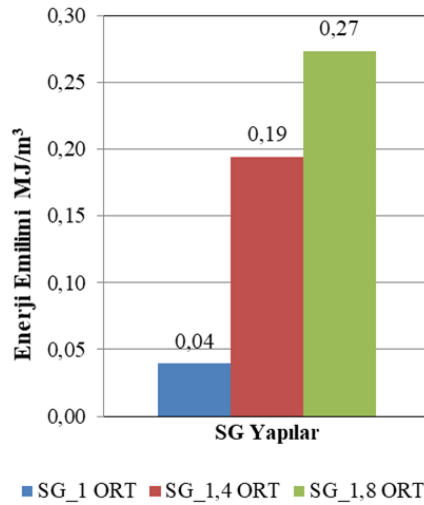
Şekil 4.1 SG yapıların basma testi sonuçlarına göre gerilme-birim şekil değiştirme grafiği.

Gerilme-birim şekil değiştirme grafiğinin elastik bölgesinde; yapılar arasında SG_1,4 ve SG_1,8 yapılarının, gerilme ve birim şekil değiştirmesinin doğrusal ve benzer bir ilişkiye sahip olduğu görülmektedir. SG_1 yapısında benzer ilişki görülse de, diğerlerine göre daha düşük değerlerde olduğu ve daha stabil bir eğri oluştuğu gözlenmiştir. Elde edilen verilere göre SG_1, SG_1,4 ve SG_1,8 yapılarında akma gerilmesi ortalamaları sırasıyla 0,84 - 3,19 ve 3,57 MPa olarak elde edilmiştir. En yüksek dayanıma sahip yapı SG_1,8 ve en düşük ise SG_1 olarak isimlendirilen numuneler olarak belirlenmiştir. Elastisite modülleri ortalamaları ise sırasıyla 31,62 - 94,65 ve 98,91 MPa olarak elde edilmiştir. En yüksek elastisite modülüne sahip yapı SG_1,8 ve en düşük ise SG_1 olarak isimlendirilen yapılar olarak belirlenmiştir.

Gerilme-birim şekil değiştirme grafiğinin plato bölgesinde; elastik bölgeden sonra birim hücrelerde gerçekleşen deformasyona bağlı gerilimde de büyük oranda düşme gerçekleştiği gözlenmektedir. Her üç numune türünde elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinde değişken genlikle dalgalanmalar gözlenmiştir. Bu bölgede yapıların gözeneklerinde meydana gelen çökmeler nedeniyle, grafikte pikler veya ikincil yükseltmeler şeklinde eğrilerin oluştuğu gözlenmektedir. SG_1 ve SG_1,8 yapılarında daha stabil bir eğri oluşurken, SG_1,4 yapısında ani bir çukurlaşma görülmektedir.

Her üç yapıda da gerilim değerinin, 0,40 birim şekil değiştirme değerine kadar yatay seyir izlediği, daha sonra sıkışma bölgesinin oluşmaya başladığı görülmektedir. Sıkışma bölgesinin sonlarına doğru ise eğimli ve doğrusal bir yükselme eğrisinin olduğu görülmekte olup, her üç yapıda da maksimum yük bu bölgede görülmektedir. SG_1, SG_1,4 ve SG_1,8 numunelerinde maksimum gerilme değerleri ortalamaları sırasıyla 1,72 - 4,77 ve 6,61 MPa olarak elde edilmiştir.

SG_1,4 ve SG_1,8 yapılarında ki enerji Emilimi kabiliyetinin SG_1 yapısına oranla daha yüksek olduğu görülmektedir. Enerji Emilimi kabiliyetleri her üç numune kıyaslandığında ise SG_1,8 numunesinin enerji Emilimi kabiliyetinin diğer iki numuneden daha yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 4.2). Elastik bölgedeki enerji emilimleri ortalaması SG_1,8 numunesinde $0,27 \text{ MJ/m}^3$ olarak elde edilirken, SG_1,4 numunesinde $0,19 \text{ MJ/m}^3$ ve SG_1 numunesinde $0,04 \text{ MJ/m}^3$ olarak elde edilmiştir. Enerji grafiğinde görüldüğü üzere hücre duvarı kalınlığındaki artışa bağlı olarak absorbe edilen enerji miktarı da artmıştır.



Şekil 4.2 SG Yapıların elastik bölgedeki yer değiştirmeye bağlı depolanan enerji (EE) grafiği.

Başlangıç durumundan hemen sonra her üç yapıda da elastik deformasyonun yaklaşık 0,03'lük birim şekil değişimine kadar devam ettiği 0,04'lük dilimde elastik bölgenin sona erdiği görülmektedir. Elastik bölgenin sonlanması ile birlikte yapılardaki ilk deformasyonun, birim hücrelerden bir ya da bir kaçının fiçilaşma şeklindeki genişleme ile başladığı görülmektedir.

Şekil 4.3’de sabit gözenekli yapıların birim şekil değişimlerine göre deformasyon durumları verilmiştir.

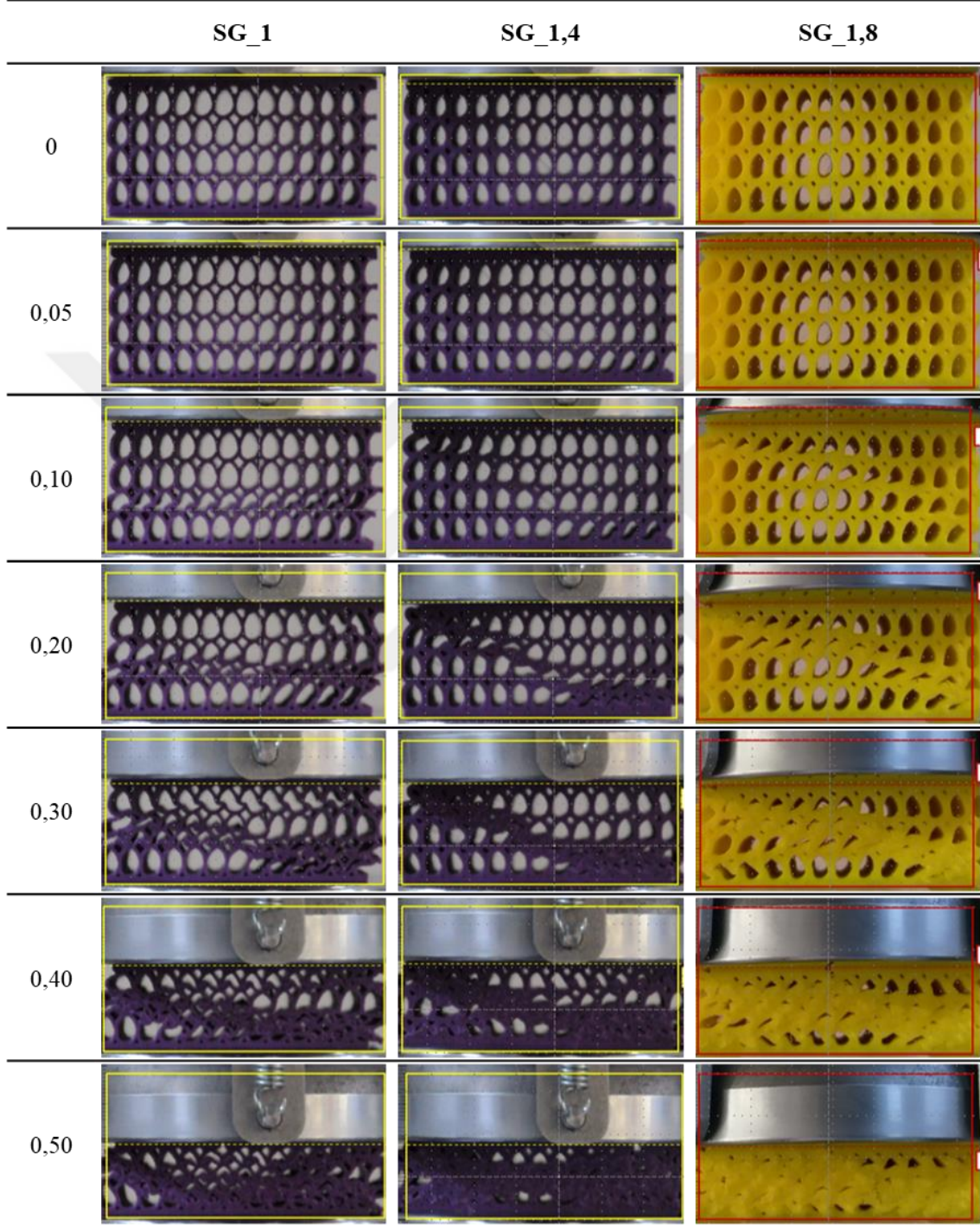
0,05’lik birim şekil değişimine ulaşıldığında; tüm yapıların birim hücrelerinde benzer şekilde fiçılama şeklinde deformasyonun daha da genişlediği görülmektedir.

0,10’luk birim şekil değişimine ulaşıldığında ise; SG _1 yapısında ilk değişimlerin alttan ikinci sıradaki birim hücrelerde ve hücrelerin birleşme noktalarından başladığı gözlemlenmiştir. SG_1,4 yapısında ise; yapının orta kısmında kalan hücrelerde fiçılama şeklinde bir deformasyonun başladığı ve aynı zamanda yapının sol üst ve sağ alt köşesinde yer alan hücrelerde deformasyonun başladığı gözlemlenmiştir. SG_1,8 yapısında da SG_1,4 yapısına benzer şekilde yapının orta kısmında kalan hücrelerde fiçılama ile birlikte yapının sol üst ve sağ alt köşesinde yer alan hücrelerde deformasyonun başladığı gözlemlenmiştir.

0,20’lik birim şekil değişimine ulaşıldığında ise; SG_1 yapısında daha önce başlayan deformasyonun kademeli olarak devam ederek, alttan ikinci sıradaki birim hücrelerin bir biri üzerine yığılarak katlanmalar oluşturduğu ve aynı zamanda alttan üçüncü sıradaki hücrelere de bu deformasyonun yansıdığı gözlemlenmiştir. SG_1,4 ve SG_1,8 yapılarında ise benzer şekilde; yapının sol üst köşesinde yer alan hücrelerde başlayan deformasyonun, yapının sağ alt köşesine doğru bir çizgi boyunca ilerleyen hücrelerde deformasyon olduğu gözlemlenmiştir.

0,30’luk birim şekil değişimine ulaşıldığında; SG_1 yapısında daha önce başlayan deformasyonun devam ederek daha önce katlanma yaşanan hücrelerdeki durumun ezilme şeklinde devam ettiği ve yapının sol alt köşesinde yer alan yedi adet hücre dışındaki tüm hücrelere benzer durumun yaşandığı görülmüştür. Yapının sol alt köşesinde yer alan yedi adet hücrenin ise fiçılama şeklinde bir deformasyonun başladığı görülmektedir. SG_1,4 ve SG_1,8 yapılarında ise benzer şekilde; daha önce sağ üst köşeden, sol alt köşeye doğru başlayan deformasyonun çapraz çizgi arasında kalan birim hücrelerin de katlanarak deforme olmasıyla devam etmiştir. Yapıların sol alt

köşe ile sağ alt köşesinde yer alan hücrelerde ise yine fiçilaşma şeklinde bir deformasyonun başladığı görülmektedir.



Şekil 4.3 SG yapıların basma testi sonucunda birim şekil değişimlerine göre deformasyon süreçleri.

0,40'lık birim şekil değişimine ulaşıldığında; SG_1 yapısında daha önce katlanma yaşanan hücrelerin tamamının ezilme ile deforme oldukları, fiçılama şeklinde genişleme yaşanan hücrelerin ise çoğunluğunun katlanmaya başladığı görülmüştür. SG_1,4 ve SG_1,8 yapılarında ise; daha önce sağ üst köşeden, sol alt köşeye doğru başlayan çapraz çizgi içerisinde kalan birim hücrelerin çoğunluğunun ezilme şeklinde yoğun bir deformasyona uğradığı gözlemlenmiştir.

0,50'lik birim şekil değişimine ulaşıldığında ise; SG_1 yapısında hücrelerin neredeyse tamamının katlanarak ezilmiş olduğu sadece sol alt köşede yer alan iki hücrenin fiçılama şeklinde genişleme ile deforme oldukları görülmüştür. SG_1,4 ve SG_1,8 yapılarının bu aşamada hücre formlarının tamamen bozulduğu ve yapı şeklinin tamamıyla kaybedildiği söylenebilir.

4.2. Değişken Gözenekli (DG) Yapıların Basma Durumunda Mekanik Performansları

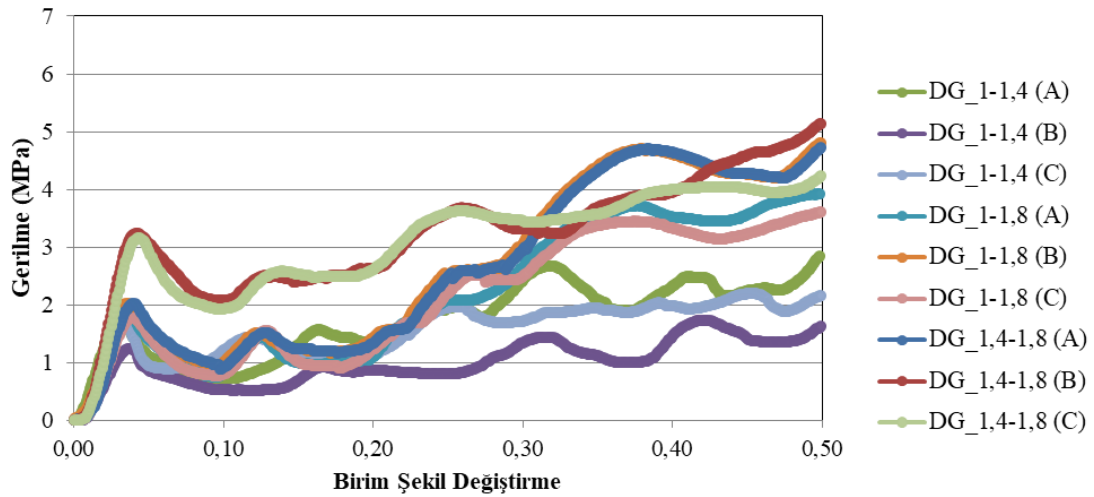
Aynı hücresel yapı geometrisine sahip, ancak değişken kalınlıkta hücre duvarına sahip olarak üretilen DG yapıların yapılan basma testi sonucunda hesaplanan mekanik performanslarına ait sayısal verileri ve ortalamaları Çizelge 4-2'de verilmiştir.

Tüm DG numunelerin yapılan basma testi sonucunda elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri de Şekil 4.4'de verilmiştir. Gerilme-birim şekil değiştirme grafiğinde görüldüğü üzere, hücresel yapıların genelinde yaygın olarak elde edilen üç deformasyon bölgesinin (elastik, plato ve nihai sıkışma bölgeleri) bu yapılarda da oluştuğu ve benzer mekanik basma davranışı sergiledikleri gözlenmektedir.

Gerilme-birim şekil değiştirme grafiğinin elastik bölgesinde; DG_1-1,4 ve DG_1-1,8 yapılarının, gerilme ve birim şekil değiştirmesinin doğrusal ve benzer bir ilişkiye sahip olduğu görülmektedir. DG_1,4-1,8 yapısında benzer ilişki görülse de, diğerlerine göre daha büyük değerlerde olduğu gözlenmiştir.

Çizelge 4-2 DG Numunelerin mekanik performanslarına ait sayısal veriler.

Numune Kodu	Ağırlık (gr)	Akma Gerilmesi (MPa)	Max. Gerilme (MPa)	Elastite Modülü (MPa)
DG_1-1,4 (A)	57,58	1,83	2,85	67,72
DG_1-1,4 (B)	53,98	1,24	1,91	41,47
DG_1-1,4 (C)	59,39	1,67	2,39	58,48
DG_1 Ortalama	56,98	1,58	2,38	55,89
DG_1-1,8 (A)	60,76	1,81	3,91	61,64
DG_1-1,8 (B)	63,35	2,02	4,90	68,40
DG_1-1,8 (C)	62,34	1,77	3,88	55,81
DG_1,4 Ortalama	62,15	1,87	4,23	61,95
DG_1,4-1,8 (A)	69,47	2,02	6,65	62,13
DG_1,4-1,8 (B)	68,21	3,23	6,70	96,75
DG_1,4-1,8 (C)	70,40	3,15	4,79	90,12
DG_1,8 Ortalama	69,36	2,80	6,05	83,00



Şekil 4.4 DG yapıların basma testi sonuçlarına göre gerilme-birim şekil değiştirme grafiği.

Elde edilen verilere göre DG_1-1,4, DG_1-1,8 ve DG_1,4-1,8 yapılarında akma gerilmesi ortalamaları sırasıyla 1,58 - 1,87 ve 2,80 MPa olarak elde edilmiştir. En yüksek dayanıma sahip yapı DG_1,4-1,8 ve en düşük ise DG_1-1,4 olarak isimlendirilen yapılar olarak belirlenmiştir. Elastisite modülleri ortalamaları ise sırasıyla 55,89 - 61,95 ve 83,00 MPa olarak elde edilmiştir. En yüksek elastisite modülüne sahip yapı DG_1,4-1,8 ve en düşük ise DG_1-1,4 olarak isimlendirilen yapılar olarak belirlenmiştir. Gerilme-birim şekil değiştirme grafiğinin plato bölgesinde; her üç yapıda da öncelikle daha ince duvar yapısına sahip hücrelerin deforme olarak çöktüğü, sonrasında da kalın duvar yapısına sahip hücrelerin çöktüğü gözlenmektedir.

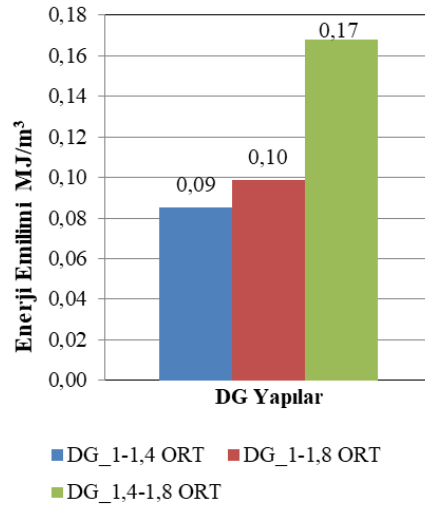
0,10 birim şekil değiştirme değerinden sonra sıkışma bölgesinin oluşmaya başladığı ve 0,30 birim şekil değiştirme değerine kadar ince duvar yapısına sahip hücrelerin çöküşünün devam ettiği, bu esnada ise kalın duvar yapısına sahip hücrelerin ise fiçilaşma şeklinde deforme olduğu gözlenmektedir. Bu nedenle zamanla yatay seyir izleyen gerilim, şekil değişiminin, 0,30 birim şekil değiştirme değerine kadar azar azar doğrusal bir artış gösterdiği görülmektedir. Bu bölgede ezilme deformasyonuna bağlı olarak, birim hücre boyutları küçüldükçe düşük gerilmelerde tepe değerleri oluşmuş ve hemen ardından diğer tepe değer başlangıcına kadar azalma göstermiştir. 0,30 birim şekil değiştirme değerinden sonra ince duvar yapısına sahip hücrelerin duvarlarının neredeyse tamamen çökmesiyle gerilmede tekrar artışa neden olarak yoğunlaşma bölgesine geçiş gözlemlenmektedir.

Her üç yapıda da gerilim değerinin, 0,40 birim şekil değiştirme değerine kadar yatay seyir izlediği, daha sonra sıkışma bölgesinin oluşmaya başladığı görülmektedir. Sıkışma bölgesinin sonlarına doğru ise eğimli ve doğrusal bir yükselme eğrisinin oluştuğu görülmekte olup, her üç yapıda da maksimum yük bu bölgede görülmektedir. DG_1-1,4, DG_1-1,8 ve DG_1,4-1,8 numunelerinde maksimum gerilme değerlerinin ortalamaları sırasıyla 2,38 - 4,23 ve 6,05 MPa olarak elde edilmiştir.

DG_1,4-1,8 yapısında ki enerji Emilimi kabiliyetinin DG_1-1,4 ve DG_1-1,8 yapılarına oranla daha yüksek olduğu görülmektedir. Enerji Emilimi kabiliyetleri her üç numunede kıyaslandığında ise DG_1,4-1,8 numunesinin enerji Emilimi kabiliyetinin diğer iki

numuneden daha yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 4.5). Elastik bölgedeki enerji emilimleri DG_1-1,4 numunesinde $0,09 \text{ MJ/m}^3$ olarak elde edilirken, DG_1-1,8 numunesinde $0,10 \text{ MJ/m}^3$ ve DG_1,4-1,8 numunesinde $0,17 \text{ MJ/m}^3$ olarak elde edilmiştir.

DG_1-1,4 ve DG_1-1,8 yapılarında değerlerin birbirine yakın çıkmıştır. Bu numunelerin her ikisinde de basma testinde üst kısımda yer alan hücrelerin duvar kalınlıklarının 1 mm olmasının enerji emilimi değerlerinin birbirine yakın çıkmasında etkili olduğu söylenebilir. Basma testinde üst kısımda yer alan hücrelerin duvar kalınlıklarının arttığı DG_1,4-1,8 numunesinde görüldüğü üzere hücre duvarı kalınlığındaki artışa bağlı olarak absorbe edilen enerji miktarı da artmıştır.



Şekil 4.5 DG Yapıların elastik bölgedeki enerji emilimi (EE) grafiği.

Şekil 4.6’da değişken gözenekli yapıların birim şekil değişimlerine göre deformasyon durumları verilmiştir. Başlangıçtan hemen sonra her üç yapıda da yaklaşık $0,03$ ’lük birim şekil değişimi yakınlarında elastik bölgenin sona erdiği görülmektedir. Yapılardaki ilk deformasyonun, birim hücrelerden bir kaçında hücrelerin birleşme noktalarından başlayarak fiçilaşma şeklinde deforme olmaya başladıkları görülmektedir.

$0,05$ ’lik birim şekil değişimine ulaşıldığında; DG_1-1,4 yapısında burkularak ezilme şeklindeki deformasyonun üstteki ikinci satırda yer alan ve hücre duvar kalınlığının daha düşük olduğu (1 mm) hücrelerin birleşme noktalarından başladığı ve alt tablaya

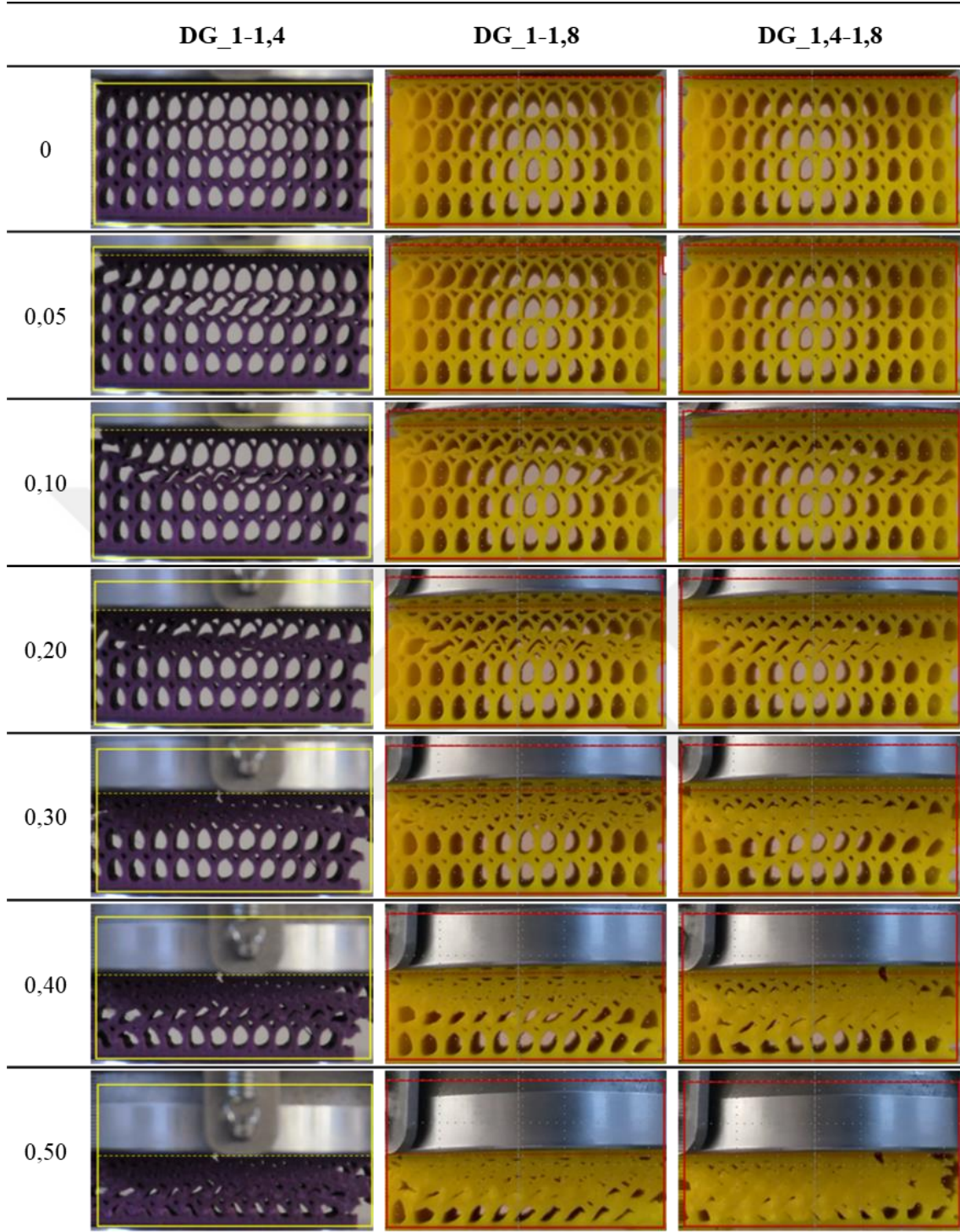
paralel yönde doğru bir çizgi boyunca olduğu görülmektedir. DG_1-1,8 ve DG_1,4-1,8 yapılarında ise benzer şekilde üstteki birinci satırda yer alan ve hücre duvar kalınlığının daha düşük olduğu (1 mm) hücrelerin hücrelerde fiçılama şeklinde bir deformasyonun başladığı görülmektedir.

0,10'luk birim şekil değişimine ulaşıldığında; DG_1-1,4 yapısında burkularak ezilme şeklindeki deformasyonun, ikinci satırdaki hücrelerde neredeyse tamamının bir biri üzerine yığılarak ezilme hasarının olduğu, ilk satırdaki bazı hücrelerde ise fiçılama şeklindeki deformasyonunun daha da büyüdüğü ancak ezilme şeklindeki deformasyonun henüz başlamadığı görülmüştür. Hücre duvar kalınlığının daha büyük olduğu altta yer alan iki satırdaki hücrelerde ise hafif düzeyde fiçılama şeklinde deformasyonun başladığı gözlemlenmiştir.

DG_1-1,8 ve DG_1,4-1,8 yapılarında ise; daha önce başlayan deformasyonun devam ederek alttan ikinci sıradaki hücrelerin bir biri üzerine yığılarak katlanmalar şeklinde devam ettiği, alttaki birinci satırda yer alan hücrelerin bazılarında burkulma şeklinde deformasyonun başladığı görülmektedir. Hücre duvar kalınlığının daha küçük olduğu üstte yer alan iki satırdaki hücrelerde ise fiçılama şeklinde deformasyonun ilerlediği gözlemlenmiştir.

0,20'lik birim şekil değişimine ulaşıldığında ise; DG_1-1,4 yapısında ikinci satırdaki tüm hücrelerde deformasyonun bir biri üzerine yığılarak ezilme şeklinde tamamlandığı, birinci satırdaki hücrelerde ise bir biri üzerine yığılarak katlanmalar şeklinde devam ettiği, hücre duvar kalınlığının daha büyük olduğu altta yer alan iki satırdaki hücrelerde ise fiçılama şeklindeki deformasyonun düzeyinin artarak devam ettiği gözlemlenmiştir.

DG_1-1,8 ve DG_1,4-1,8 yapılarında ise; ikinci satırdaki hücrelerde neredeyse tamamının bir biri üzerine yığılarak ezilme hasarının olduğu, ilk satırdaki bazı hücrelerde ise fiçılama şeklindeki deformasyonunun daha da büyüdüğü ancak ezilme şeklindeki deformasyonun henüz başlamadığı görülmüştür.



Şekil 4.6 DG yapıların basma testi sonucunda birim şekil değişimlerine göre deformasyon süreçleri.

0,30'luk birim şekil değişimine ulaşıldığında; DG_1-1,4 yapısında daha önce başlayan hücre duvar kalınlığının daha düşük olduğu ilk iki satırdaki hücrelerde, hücre formlarının tamamen bozulduğu ve kapalı duruma geldiği gözlenmiştir. Hücre duvar

kalınlığının daha büyük olduğu altta yer alan iki satırdaki hücrelerde ise yoğun bir fıçılama sürecinin devam ettiği gözlenmiştir. DG_1-1,8 ve DG_1,4-1,8 yapısında ise; ikinci satırdaki tüm hücrelerde deformasyonun bir biri üzerine yığılarak ezilme şeklinde tamamlandığı, birinci satırdaki hücrelerde ise bir biri üzerine yığılarak katlanmalar şeklinde devam ettiği gözlenmiştir.

0,40'lık birim şekil değişimine ulaşıldığında; DG_1-1,4 yapısında üst iki sıradaki hücrelerde oluşan deformasyon sonucu hücre formlarının tamamen bozulduğu ve kapalı duruma geldiği, hücre duvar kalınlığının daha yüksek olduğu alt iki satırdaki hücrelerde de daha önce fıçılama şeklinde genişleme yaşanan hücrelerin çoğunluğunun katlanmaya başladığı gözlenmektedir. DG_1-1,8 ve DG_1,4-1,8 yapılarında ise alt iki satırdaki hücrelerde daha önce başlayan fıçılama şeklinde genişlemenin katlanma şeklindeki deformasyona dönüştüğü görülmüştür.

0,50'lik birim şekil değişimine ulaşıldığında ise; her üç yapıda da hücrelerin neredeyse tamamının katlanarak ezilmiş olduğu, hücre formlarının tamamen bozulduğu ve yapı şeklinin ezilmeler nedeniyle tamamıyla kaybedildiği söylenebilir.

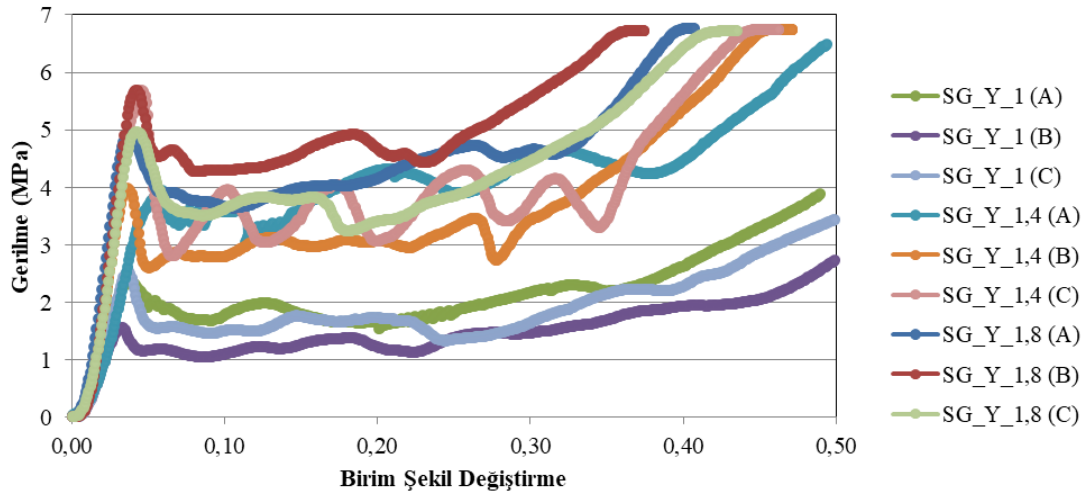
4.3. Sabit Gözenekli Y Eksenli Takviyeli (SG_Y) Yapıların Basma Durumunda Mekanik Performansları

SG yapıya benzer hücresel yapı geometrisine sahip, ancak iç duvarların dayanımını artırmak için yükleme yönünde (Y) iç takviyelere sahip olarak üretilen SG_Y yapıların yapılan basma testi sonucunda hesaplanan mekanik performanslarına ait sayısal verileri ve ortalamaları Çizelge 4-3'de verilmiştir.

Tüm SG_Y numunelerin yapılan basma testi sonucunda elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri de Şekil 4.7'de verilmiştir. Gerilme-birim şekil değiştirme grafiğinde görüldüğü üzere, hücresel yapıların genelinde yaygın olarak elde edilen üç deformasyon bölgesinin (elastik, plato ve nihai sıkışma bölgeleri) bu yapılarda da oluştuğu ve benzer mekanik basma davranışı sergiledikleri gözlenmektedir.

Çizelge 4-3 SG_Y Numunelerin mekanik performanslarına ait sayısal veriler.

Numune Kodu	Ağırlık (gr)	Akma Gerilmesi (MPa)	Max. Gerilme (MPa)	Elastite Modülü (MPa)
SG_Y_1 (A)	66,09	2,36	3,88	74,84
SG_Y_1 (B)	60,89	1,56	3,20	57,95
SG_Y_1 (C)	66,90	2,52	3,72	81,36
SG_Y_1 Ortalama	64,63	2,15	3,60	71,38
SG_Y_1,4 (A)	81,87	3,93	6,48	81,21
SG_Y_1,4 (B)	80,47	3,97	6,74	130,36
SG_Y_1,4 (C)	85,67	5,68	6,74	147,88
SG_Y_1,4 Ortalama	82,67	4,53	6,66	119,82
SG_Y_1,8 (A)	85,85	4,91	6,76	159,29
SG_Y_1,8 (B)	89,26	5,68	6,72	164,33
SG_Y_1,8 (C)	88,47	4,95	6,71	141,92
SG_Y_1,8 Ortalama	87,86	5,18	6,73	155,18



Şekil 4.7 SG_Y yapıların basma testi sonuçlarına göre gerilme-birim şekil değiştirme grafiği.

Gerilme-birim şekil değiştirme grafiğinin elastik bölgesinde; yapıların benzer bir ilişkiye sahip olduğu görülmektedir. SG_Y_1 yapısında benzer ilişki görülse de, diğerlerine göre daha düşük değerlerde olduğu ve daha stabil bir eğri olduğu

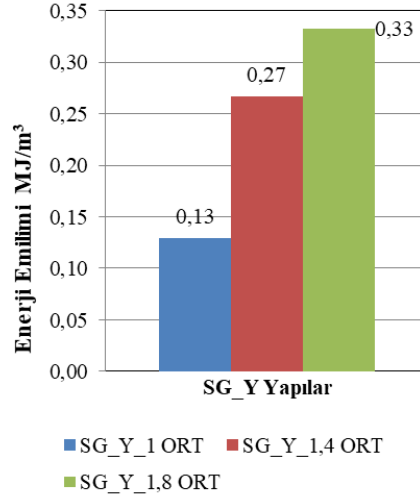
gözlenmiştir. Elde edilen verilere göre SG_Y_1, SG_Y_1,4 ve SG_Y_1,8 yapılarında akma gerilmesi ortalamaları sırasıyla 2,15 – 4,53 ve 5,18 MPa olarak elde edilmiştir. En yüksek dayanıma sahip yapı SG_Y_1,8 ve en düşük ise SG_Y_1 olarak isimlendirilen yapılar olarak belirlenmiştir. Elastisite modülleri ortalamaları ise sırasıyla 71,38 – 119,82 ve 155,18 MPa olarak elde edilmiştir. En yüksek elastisite modülüne sahip yapı SG_Y_1,8 ve en düşük ise SG_Y_1 olarak isimlendirilen yapılar olarak belirlenmiştir.

Gerilme-birim şekil değiştirme grafiğinin plato bölgesinde; elastik bölgeden sonra birim hücrelerde gerçekleşen deformasyona bağlı gerilimde de düşme gerçekleştiği gözlenmektedir. Her üç numune türünde elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinde değişken genlikle dalgalanmalar gözlenmiştir. Bu bölgede yapıların gözeneklerinde meydana gelen çökmeler nedeniyle, grafikte pikler veya ikincil yükseltiler şeklinde eğrilerin oluştuğu gözlenmektedir. Tüm yapılarda daha stabil bir eğri oluşurken, SG_Y_1,4 yapısında eğri üzerinde ani dalgalanmalar görülmektedir. Bu durumun hücrelerde iç takviye olarak atılan kolonların lokal kırılması sonucunda oluştuğu düşünülmektedir.

Her üç yapıda da gerilim değerinin 0,3 birim şekil değiştirme değerine kadar yatay seyir izlediği, daha sonra sıkışma bölgesinin oluşmaya başladığı görülmektedir. Sıkışma bölgesinin başlangıcında eğimli ve doğrusal bir yükselme eğrisinin oluştuğu görülmektedir. Sıkışma bölgesinin sonlarına doğru ise SG_Y_1,4 ve SG_Y_1,8 yapılarında hücre duvarlarının birbiri üstüne yığılması nedeniyle dolu alan oluşturduğu ve yapının uygulanan yüke direnmeye başladığı, bu nedenle de eğrinin doğrusal şekilde devam ettiği görülmektedir. Her üç yapıda da maksimum gerilme bu bölgede görülmektedir. Elde edilen verilere göre SG_Y_1, SG_Y_1,4 ve SG_Y_1,8 numunelerinde maksimum gerilme değerlerinin ortalamaları sırasıyla 3,60 - 6,66 ve 6,73 MPa olarak elde edilmiştir.

SG_Y_1,4 ve SG_Y_1,8 yapılarında ki enerji Emilimi kabiliyetinin SG_Y_1 yapısına oranla daha yüksek olduğu görülmektedir. Enerji Emilimi kabiliyetleri her üç numunede kıyaslandığında ise SG_Y_1,8 numunesinin enerji Emilimi kabiliyetinin diğer iki numuneden daha yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 4.8). Elastik bölgedeki enerji

emilimleri ortalaması SG_Y_1,8 numunesinde $0,33 \text{ MJ/m}^3$ olarak elde edilirken, SG_Y_1,4 numunesinde $0,27 \text{ MJ/m}^3$ ve SG_Y_1 numunesinde $0,13 \text{ MJ/m}^3$ olarak elde edilmiştir. Benzer hücresel yapı geometrisine sahip SG yapılara oranla, SG_Y yapıların elastik bölgedeki enerji emilimi özelliklerinin artış gösterdiği görülmektedir. Yükleme yönünde (Y) iç takviyelerin depolanan enerji miktarı artırdığı söylenebilir



Şekil 4.8 SG_Y Yapıların elastik bölgedeki enerji emilimi (EE) grafiği.

SG_Y yapıların birim şekil değişimlerine göre deformasyon durumları

Şekil 4.9’da verilmiştir. Başlangıçtan hemen sonra her üç yapıda da yaklaşık 0,03’lük birim şekil değişimi yakınlarında elastik bölgenin sona erdiği görülmektedir. Yapılardaki ilk deformasyonun, dayanımını artırmak için yükleme yönünde (Y) oluşturulan iç takviye kolonlarından başladıkları görülmektedir.

0,05’lik birim şekil değişimine ulaşıldığında; tüm yapılarda gözle görünür bir değişim meydana gelmiş olup, birim hücrelerde fiçilaşma durumu görülmeden iç takviye kolonlarında bir anda ani kırılmalar gerçekleşmiştir.

0,10’luk birim şekil değişimine ulaşıldığında ise; SG_Y_1 ve SG_Y_1,4 yapılarında daha önce iç takviye kolonlarında kırılmalar ile birlikte fiçilaşma durumu görülmeden hücrelerin birleşme noktalarından başlayan ve bir biri üzerine yığılarak ezilme hasarının olduğu görülmektedir. SG_Y_1 ve SG_Y_1,4 yapılarında bir önceki aşamada oluşmaya başlayan deformasyon çizgilerinin daha belirgin hale geldiği gözlenmektedir.

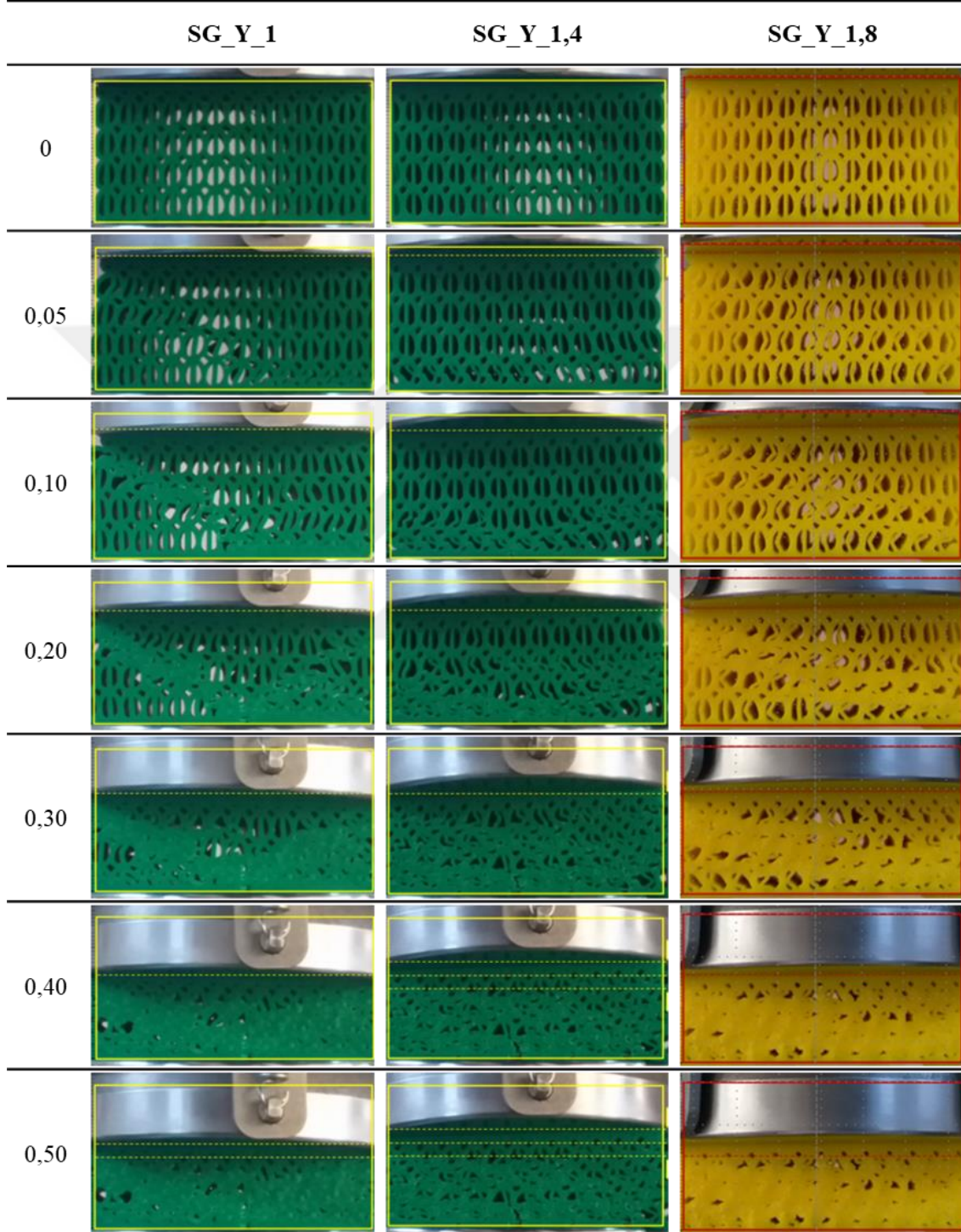
SG_Y_1 yapısının üst sağ köşeden başlayan deformasyonun yapının ortasına ve en alt satıra doğru sağ yönde eğilmeye başladığı, SG_Y_1,4 yapısının ise alt yüzeyinde koni şeklinde bir çıkıntı oluşturacak şekilde aşağıdan yukarıya doğru eğilmeye başladığı, gözlenmektedir. SG_Y_1,8 yapısının ise iç takviye kolonlarında kırılmaların yapının neredeyse tüm hücrelerine yayılarak devam ettiği ancak deformasyon çizgilerinin henüz oluşmadığı gözlenmektedir.

0,20'lik birim şekil değişimine ulaşıldığında ise; SG_Y_1 ve SG_Y_1,4 yapılarında daha önce başlayan deformasyon çizgisi içerisinde kalan birim hücrelerin çoğunluğunun birbiri üzerine yığılarak ezilme şeklinde yoğun bir deformasyona uğradığı gözlemlenmiştir. SG_Y_1,4 yapısında en üst sıradaki satırda yer alan hücrelerin formlarının henüz bozulmadığı gözlenmektedir. Her iki yapıda da daha önceki aşamalarda oluşan deformasyon yönünün değişmeden kademeli olarak devam ettiği söylenebilir. SG_Y_1,8 yapısında ise deformasyon çizgisinin yapının sağ üst köşesinden başlayarak en alt satıra doğru sağ yönde eğilme şeklinde olduğu görülmektedir. Deformasyon çizgisi içerisinde kalan hücrelerin bir biri üzerine yığılarak ezilme hasarının olduğu görülmektedir.

0,30'luk birim şekil değişimine ulaşıldığında; bu aşamada SG_Y_1 ve SG_Y_1,4 yapılarında deformasyon çizgisi içerisinde kalan hücre formlarının tamamen bozulduğu ve yapı şeklinin yığılma ve ezilmeler nedeniyle kaybedilmeye başladığı söylenebilir. SG_Y_1,8 yapısında ise daha önceki aşamada oluşan deformasyon yönünün değişmeden devam ettiği ve deformasyon çizgisi içerisinde kalan birim hücrelerin çoğunluğunun birbiri üzerine yığılarak ezilme şeklinde yoğun bir deformasyona uğradığı söylenebilir.

0,40'lık birim şekil değişimine ulaşıldığında; her üç yapıda da hücre formlarının tamamen bozulduğu yapının tamamıyla kaybedildiği söylenebilir. Ancak bu aşamada hücre içerisinde yer alan iç takviye kolonların kırılması nedeniyle, hücre formunun içinde mikro düzeyde istenmeyen üçgen kafes yapıların olduğu gözlenmektedir. İstenmeden oluşan bu mikro kafes yapıların, ana yapının uygulanan yüke karşı direnç göstermesine neden olduğu görülmektedir. Bu nedenle de gerilim değerinin, test cihazı

kapasitesi sınırlarına ulaşılmış olması nedeniyle, birim şekil değişiminin 0,50 seviyesine ulaşmadan cihaz güvenlik amacıyla kapatılarak deney sonlandırılmıştır.



Şekil 4.9 SG_Y yapıların basma testi sonucunda birim şekil değişimlerine göre deformasyon süreçleri.

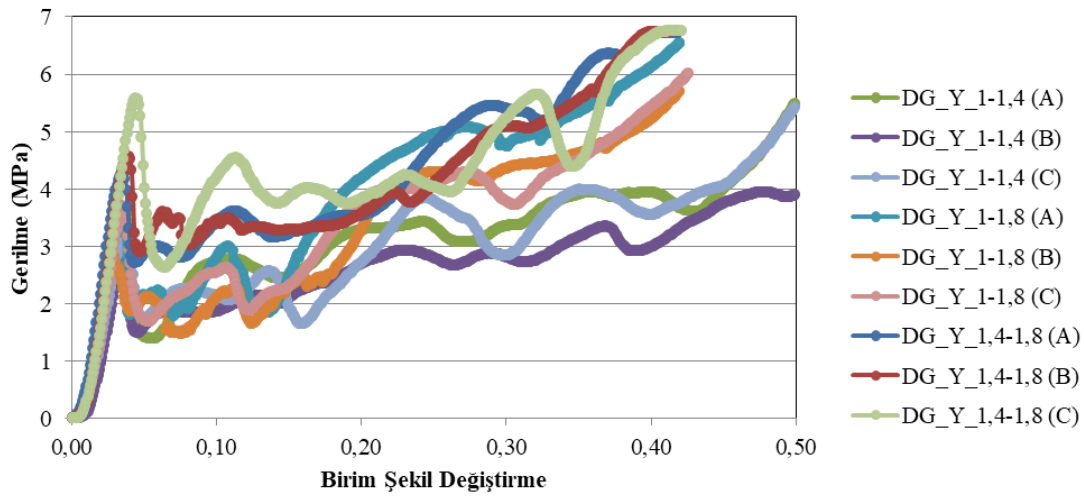
4.4. Değişken Gözenekli Y Eksenli Takviyeli (DG_Y) Yapıların Basma Durumunda Mekanik Performansları

DG yapıya benzer hücreli yapı geometrisine sahip, ancak iç duvarların dayanımını artırmak için yükleme yönünde (Y) iç takviyelere sahip olarak üretilen DG_Y yapıların yapılan basma testi sonucunda hesaplanan mekanik performanslarına ait sayısal verileri ve ortalamaları Çizelge 4-4’de verilmiştir.

Çizelge 4-4 DG_Y Numunelerin mekanik performanslarına ait sayısal veriler.

Numune Kodu	Ağırlık (gr)	Akma Gerilmesi (MPa)	Max. Gerilme (MPa)	Elastite Modülü (MPa)
DG_Y_1-1,4 (A)	78,49	3,64	6,33	105,24
DG_Y_1-1,4 (B)	73,35	2,81	6,33	91,43
DG_Y_1-1,4 (C)	76,79	3,24	6,27	102,85
DG_Y_1-1,4 Ortalama	76,21	3,23	6,31	99,84
DG_Y_1-1,8 (A)	80,54	3,70	6,53	132,81
DG_Y_1-1,8 (B)	76,77	2,82	5,69	111,56
DG_Y_1-1,8 (C)	82,48	3,70	6,02	121,49
DG_Y_1-1,8 Ortalama	79,93	3,41	6,08	121,95
DG_Y_1,4-1,8 (A)	85,03	4,27	6,72	147,32
DG_Y_1,4-1,8 (B)	83,83	4,57	6,74	142,83
DG_Y_1,4-1,8 (C)	88,30	5,58	6,76	149,75
DG_Y_1,4-1,8 Ortalama	85,72	4,80	6,74	146,63

Tüm DG_Y numunelerin yapılan basma testi sonucunda elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri de Şekil 4.10’da verilmiştir. Gerilme-birim şekil değiştirme grafiğinde görüldüğü üzere, hücreli yapıların genelinde yaygın olarak elde edilen üç deformasyon bölgesinin (elastik, plato ve nihai sıkışma bölgeleri) bu yapılarda da olduğu ve benzer mekanik basma davranışı sergiledikleri gözlenmektedir.



Şekil 4.10 DG_Y yapıların basma testi sonuçlarına göre gerilme-birim şekil değiştirme grafiği.

Gerilme-birim şekil değiştirme grafiğinin elastik bölgesinde; her üç yapının da, gerilme ve birim şekil değiştirmesinin benzer bir ilişkiye sahip olduğu görülmektedir. Elde edilen verilere göre DG_Y_1-1,4, DG_Y_1-1,8 ve DG_Y_1,4-1,8 yapılarında akma gerilmesi ortalamaları sırasıyla 3,23 – 3,41 ve 4,80 MPa olarak elde edilmiştir. En yüksek dayanıma sahip yapı DG_Y_1,4-1,8 ve en düşük ise DG_Y_1-1,4 olarak isimlendirilen yapılar olarak belirlenmiştir. Elastisite modülleri ortalamaları ise sırasıyla 99,84 - 121,95 ve 146,63 MPa olarak elde edilmiştir. En yüksek elastisite modülüne sahip yapı DG_Y_1,4-1,8 ve en düşük ise DG_Y_1-1,4 olarak isimlendirilen yapılar olarak belirlenmiştir.

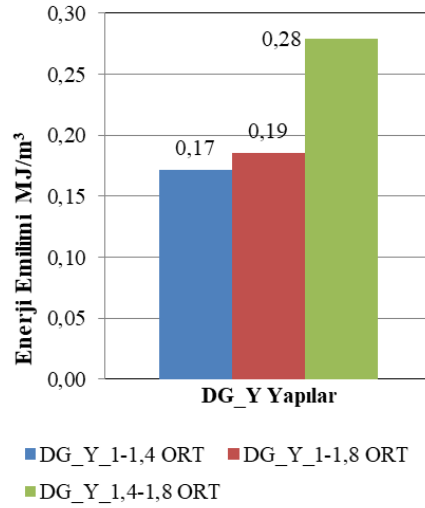
Gerilme-birim şekil değiştirme grafiğinin plato bölgesinde; elastik bölgeden sonra birim hücrelerde gerçekleşen deformasyona bağlı gerilimde de düşme gerçekleştiği gözlenmektedir. Bu bölgede kırılma ve ezilme deformasyonlarına bağlı olarak, birim hücre boyutları küçüldükçe diğer yapılara oranla daha büyük gerilmelerde alt tepe değerleri oluşmakta ve hemen ardından diğer üst tepe değerinin başlangıcına kadar artma görülmektedir. Her üç numune türünde elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinde değişken genlikle dalgalanmalar gözlenmiştir. Tüm yapılarda daha stabil bir eğri oluşurken, SG_Y_1,4 yapısında eğri üzerinde ani ve büyük dalgalanmalar görülmektedir.

Bu durumun hücrelerde iç takviye olarak atılan kolonların lokal kırılması sonucunda oluştuğu düşünülmektedir. Her üç yapıda da gerilim değerinin, yaklaşık olarak 0,25 birim şekil değiştirme değerine kadar yatay seyir izlediği, daha sonra sıkışma bölgesinin oluşmaya başladığı görülmektedir.

Sıkışma bölgesinin başlangıcında eğimli ve doğrusal bir yükselme eğrisinin oluştuğu görülmektedir. Sıkışma bölgesinin sonlarına doğru ise DG_Y_1,4-1,8 yapısında hücre duvarlarının birbiri üstüne yığılması nedeniyle dolu alan oluşturduğu ve yapının uygulanan yüke direnmeye başladığı, bu nedenle de eğrinin doğrusal şekilde devam ettiği görülmektedir. Her üç yapıda da maksimum gerilme bu bölgede görülmektedir. Elde edilen verilere göre DG_Y_1-1,4 DG_Y_1-1,8 ve DG_Y_1,4-1,8 numunelerinde maksimum gerilme değerlerinin ortalamaları sırasıyla 6,08 - 6,31 ve 6,74 MPa olarak elde edilmiştir.

Enerji Emilimi kabiliyetleri her üç numunede kıyaslandığında ise DG_Y_1,4-1,8 numunesinin enerji emilimi kabiliyetinin diğer iki numuneden daha yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 4.11). Elastik bölgedeki enerji emilimleri DG_Y_1-1,4 numunesinde $0,17 \text{ MJ/m}^3$ olarak elde edilirken, DG_Y_1-1,8 numunesinde $0,19 \text{ MJ/m}^3$ ve DG_Y_1,4-1,8 numunesinde $0,28 \text{ MJ/m}^3$ olarak elde edilmiştir.

DG_Y_1-1,4 ve DG_Y_1-1,8 yapılarında değerlerin birbirine yakın çıkmıştır. Bu numunelerin her ikisinde de basma testinde üst kısımda yer alan hücrelerin duvar kalınlıklarının 1 mm olmasının enerji emilimi değerlerinin birbirine yakın çıkmasında etkili olduğu söylenebilir. Basma testinde üst kısımda yer alan hücrelerin duvar kalınlıklarının arttığı DG_Y_1,4-1,8 numunesinde görüldüğü üzere hücre duvarı kalınlığındaki artışa bağlı olarak absorbe edilen enerji miktarı da artmıştır. DG_Y yapıların birim şekil değişimlerine göre deformasyon durumları Şekil 4.12’de verilmiştir.



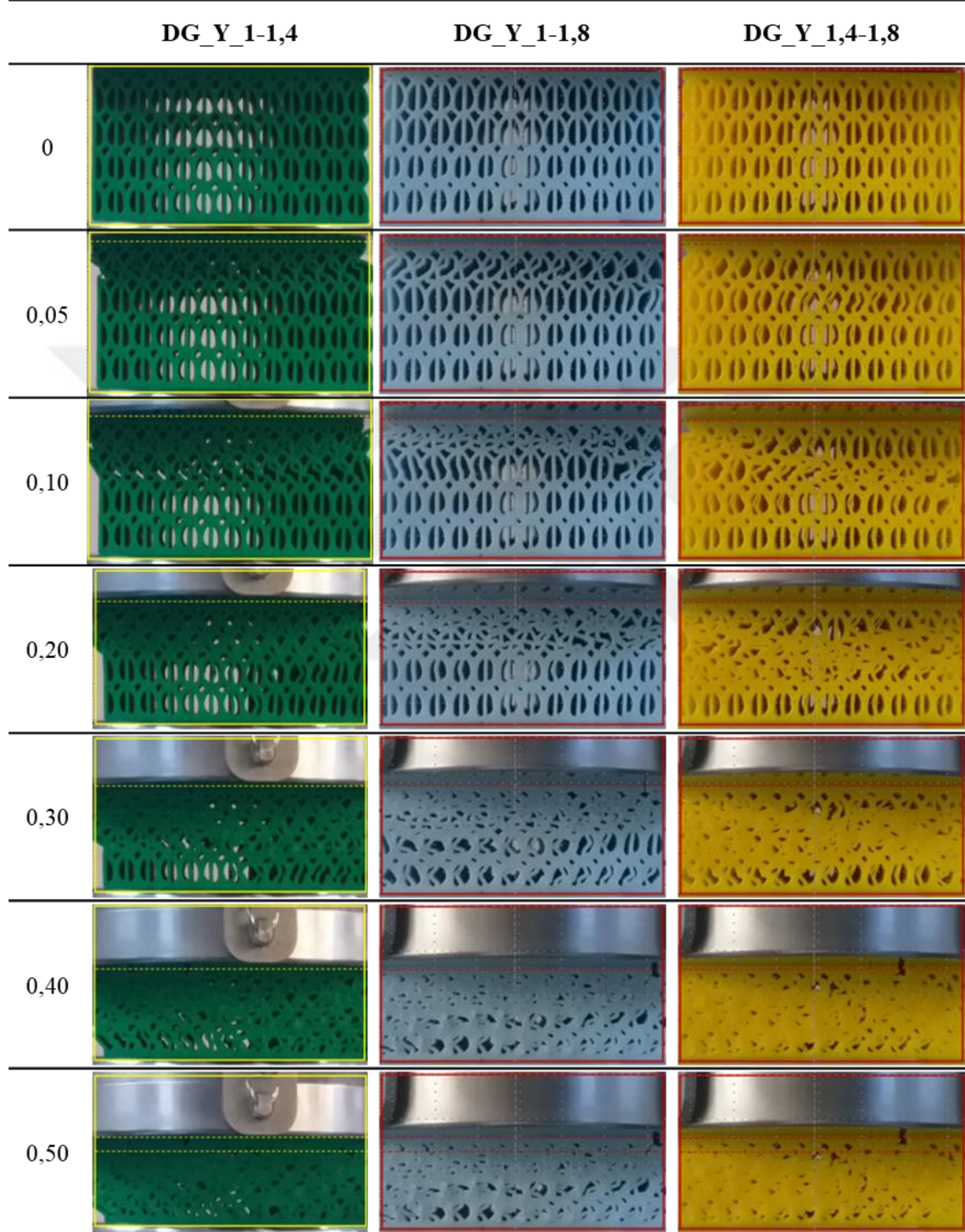
Şekil 4.11 DG_Y Yapıların elastik bölgedeki enerji Emilimi (EE) grafiği.

Başlangıçtan hemen sonra her üç yapıda da yaklaşık 0,03'lük birim şekil değişimi yakınlarında elastik bölgenin sona erdiği görülmektedir. Yapılardaki ilk deformasyonun, dayanımını artırmak için yükleme yönünde (Y) oluşturulan iç takviye kolonlarından başladıkları görülmektedir.

0,05'lik birim şekil değişimine ulaşıldığında; tüm yapılarda gözle görünür bir değişim meydana gelmiş olup, DG_Y_1-1,4 ve DG_Y_1-1,8 yapılarında üstten birinci satırdaki tüm hücrelerde fiçilaşma durumu görülmeden iç takviye kolonlarında burkularak bir anda ani kırılma şeklindeki gözle görünür bir deformasyon gözlenmiştir. DG_Y_1-1,8 yapısında ise iç takviye kolonlarındaki anda ani kırılmalar üstten ikinci satırda başlamış olup tüm hücrelerde değil, bazı hücrelerde görülmüştür. Tüm yapılarda deformasyonun hücre duvar kalınlığının daha düşük olduğu üst satırdaki hücrelerden başladığı gözlenmiştir. Aynı zamanda tüm yapılarda deformasyon çizgilerinin oluşmaya başladığı gözlenmiştir.

0,10'luk birim şekil değişimine ulaşıldığında ise; DG_Y_1-1,4 ve DG_Y_1-1,8 yapılarındaki burkularak kırılma şeklindeki deformasyonun, hücre duvar kalınlığının daha düşük olan ilk iki satırdaki hücrelerde bir biri üzerine yığılarak katlanmalar şeklinde devam ettiği, bazı hücrelerin ise fiçilaşma şeklindeki deformasyonunun daha

da büyüdüğü, ancak ezilme şeklindeki deformasyonun yeni oluşmaya başladığı görülmüştür.



Şekil 4.12 DG_Y yapıların basma testi sonucunda birim şekil değişimlerine göre deformasyon süreçleri.

DG_Y_1,4-1,8 yapısında ise; daha önce başlayan deformasyonun devam ederek üstten ikinci sıradaki hücrelerin bir biri üzerine yığılarak katlanmalar şeklinde devam ettiği, alttaki satırda yer alan hücrelerin bazılarında burkulma şeklinde deformasyonun başladığı görülmektedir. Tüm yapılarda hücre duvar kalınlığının daha büyük olduğu altta yer alan iki satırdaki hücrelerde ise hafif düzeyde fiçilaşma ve iç takviyelerde burkulma şeklinde deformasyonun başladığı gözlemlenmiştir. Yine tüm yapılarda üst satırdaki hücrelerden başlayan deformasyon çizgilerinin tablalara paralel yönde ve yine üst satırdaki hücreler içerisinde ilerlediği görülmektedir.

0,20'lik birim şekil değişimine ulaşıldığında ise; DG_Y_1-1,4 ve DG_Y_1-1,8 yapılarında daha önce başlayan deformasyonun hücrelerin bir biri üzerine yığılarak katlanmalar şeklinde deformasyon çizgileri boyunca devam ettiği, altta yer alan iki satırdaki hücrelerde ise fiçilaşma şeklinde deformasyonun düzeyinin artarak devam ettiği gözlemlenmiştir. Ancak DG_Y_1,4-1,6 yapısında ise; daha önce başlayan deformasyon çizgisi içerisinde kalan birim hücrelerin çoğunluğunun birbiri üzerine yığılarak ezilme şeklinde yoğun bir deformasyona uğradığı gözlemlenmiştir. Deformasyonun alttan ikinci satırda kalan hücrelere geçtiği gözlemlenmiştir. Buna neden olan etkenin ise; ilk iki satırda ezilen hücrelerin kolon kalınlıklarının (1,4 mm) diğer iki yapıya (1 mm) oranla daha büyük olması ve dolayısıyla kolonların ezilme kaynaklı dolu alan oluşturduğu, oluşan bu dolu alanın daha fazla hacim kapladığı, bu nedenle de uygulanan kuvvetin alt satıra daha erken tesir ettiği düşünülmektedir. Bu aşamada aynı zamanda hücre içerisinde yer alan iç takviye kolonların kırılması nedeniyle, hücre formunun içinde mikro düzeyde üçgen kafes yapıların oluştuğu gözlenmektedir.

0,30'luk birim şekil değişimine ulaşıldığında; DG_Y_1-1,4 ve DG_Y_1-1,8 yapılarında benzer şekilde, daha önce başlayan deformasyon çizgisi içerisinde kalan birim hücrelerin çoğunluğunun hücre formlarının tamamen bozulduğu ve kapalı duruma geldiği gözlenmiştir. DG_Y_1-1,4 yapısındaki altta birinci satırda yer alan hücrelerde burkularak ezilme şeklindeki sürecinin başladığı gözlenmiştir. DG_Y_1-1,8 yapısında ise altta birinci satırda yer alan hücrelerde fiçilaşma şeklindeki deformasyonun devam ettiği gözlenmiştir. DG_Y_1,4-1,8 yapısında ise; daha önce başlayan deformasyon

sonucu hücre formlarının tamamen bozulduğu ve kapalı duruma geldiği gözlenmektedir.

0,40'lık birim şekil değişimine ulaşıldığında; DG_Y_1-1,4 ve DG_Y_1-1,8 yapılarında daha önce oluşan katlanma ve ezilme şeklindeki deformasyon sürecinin yukarıdan aşağıya doğru devam ettiği görülmektedir. DG_Y_1,4-1,8 yapısında ise; daha önce başlayan deformasyon sürecinin hücre formlarını tamamen bozduğu ve yapı şeklinin ezilmeler nedeniyle tamamıyla kaybedildiği söylenebilir.

0,50'lik birim şekil değişimine ulaşıldığında ise; her üç yapıda da hücrelerin neredeyse tamamının katlanarak ezilmiş olduğu, hücre formlarını tamamen bozulduğu ve yapı şekillerinin ezilmeler nedeniyle tamamıyla kaybedildiği söylenebilir. DG_Y_1-1,8 ve DG_Y_1,4-1,8 yapılarının tamamıyla kaybedildiği ve hücre duvarlarının birbiri üstüne yığılması nedeniyle dolu alan oluşturduğu ve yapının uygulanan yüke direnmeye başladığı görülmektedir. Bu nedenle de gerilim değerinin, test cihazı kapasitesi sınırlarına ulaşılmış olması nedeniyle, birim şekil değişiminin 0,50 seviyesine ulaşmadan cihaz güvenlik amacıyla kapatılarak deney sonlandırılmıştır. Sadece DG_Y_1-1,4 yapısında 0,50 seviyesine kadar sıkıştırma işlemi devam etmiştir.

5. TARTIŞMA

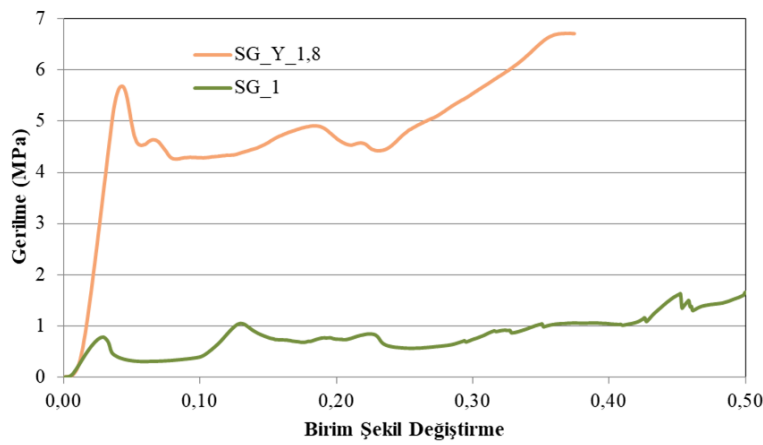
Tezin bu bölümde deneysel sonuçlardan çıkarılan bulgular ve deformasyon davranışlarından elde edilen sonuçlar doğrultusunda tasarımlar arasındaki karşılaştırmaların yapılması amaçlanmıştır.

Bu amaçla;

- Aynı birim hücre şekline sahip, farklı kolon kalınlıkları kullanılarak oluşturulmuş numuneler için basma özellikleri ve deformasyon tiplerinin incelenmesi ve değerlendirilmesi,
- Aynı birim hücre şekline sahip, değişken gözenekli yapı kullanılarak farklı kütleli numuneler için basma özellikleri ve deformasyon tiplerinin incelenmesi ve değerlendirilmesine yer verilmiştir.

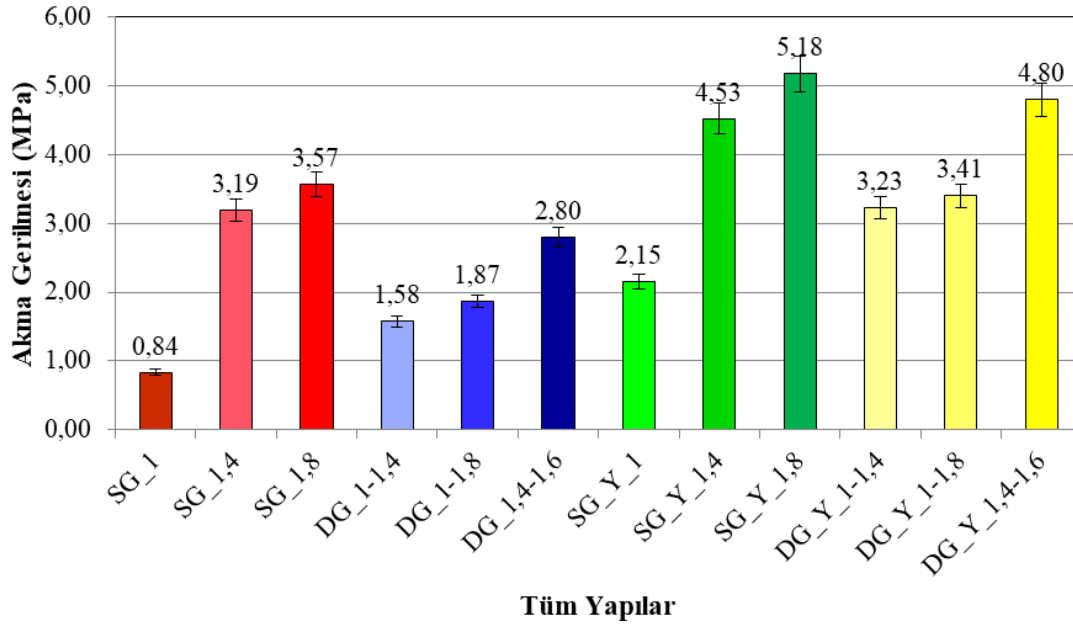
5.1. Deneysel Sonuçların Tartışılması

Elde edilen verilere göre tüm numuneler içerisinde; en yüksek akma dayanımı SG_Y_1,8 numunelerinde 5,684 MPa olarak tespit edilmiştir. Buna karşılık, en düşük dayanım ise SG_1 numunelerinde 0,78 MPa olarak belirlenmiştir (Şekil 5.1).



Şekil 5.1 En düşük ve en yüksek akma gerilimine sahip numunelerin gerilme-birim şekil değiştirme grafiği.

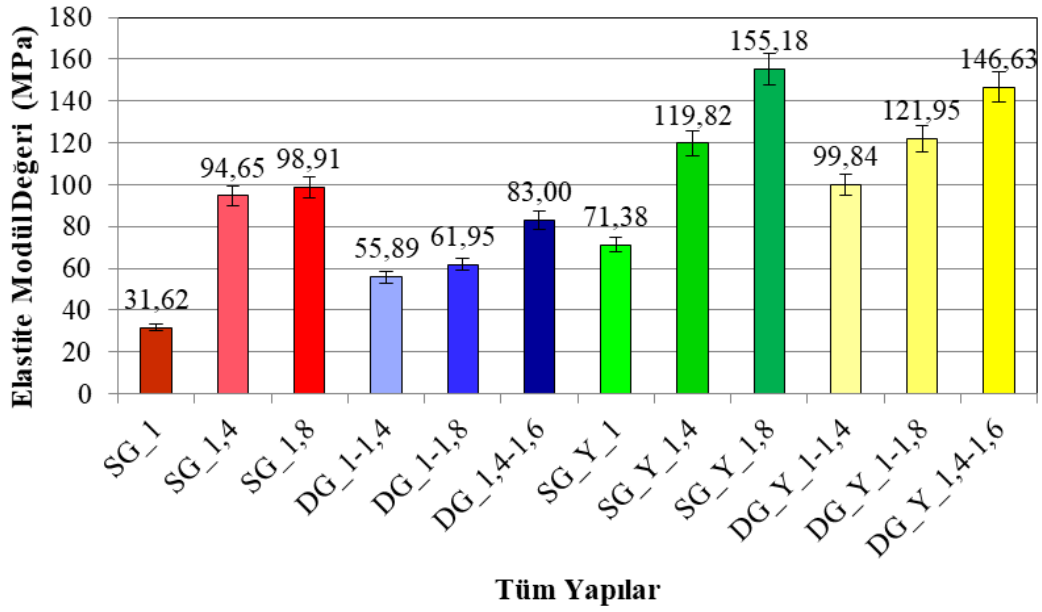
Yapılar kendi aralarında ortalama akma dayanım değerleri açısından kıyas edildiğinde; elde edilen verilere gore en yuksek ortalama akma dayanıma sahip yapı 5,18 MPa değerini sağlayan SG_Y_1,8 isimli yapı olarak tespit edilmiştir. En duşuk ortalama akma dayanıma sahip yapılar ise 0,84 MPa değerini sağlayan SG_1 isimli yapılar olarak tespit edilmiştir (şekil 5.2).



şekil 5.2 Tüm yapıların ortalama akma dayanım değerleri grafiği.

Yapılar kendi aralarında ortalama elastisite modül değerleri açısından kıyas edildiğinde; en yuksek elastisite modül ortalamasına sahip yapı 155,18 MPa ortalama değerini sağlayan SG_Y_1,8 isimli yapı olarak tespit edilmiştir. En duşuk elastisite modül ortalamasına sahip yapı ise 31,62 MPa değerini sağlayan SG_1 isimli yapı olarak tespit edilmiştir (şekil 5.3).

Hücre duvarı kalınlığının, akma dayanımına etkisini karşılaştırmak istediğimiz zaman en yuksek gerilimin buykten kuğe sırasıyla; SG kafes yapısına sahip numunelerde; SG_1,8 > SG_1,4 > SG_1 olarak, DG kafes yapısına sahip numunelerde; DG_1,4-1,8 > DG_1-1,8 > DG_1-1,4 olarak, SG_Y kafes yapısına sahip numunelerde; SG_Y_1,8 > SG_Y_1,4 > SG_Y_1 olarak, DG_Y kafes yapısına sahip numunelerde ise; DG_Y_1,4-1,8 > DG_Y_1-1,8 > DG_Y_1-1,4 olarak sıralandığı görülmüştür.



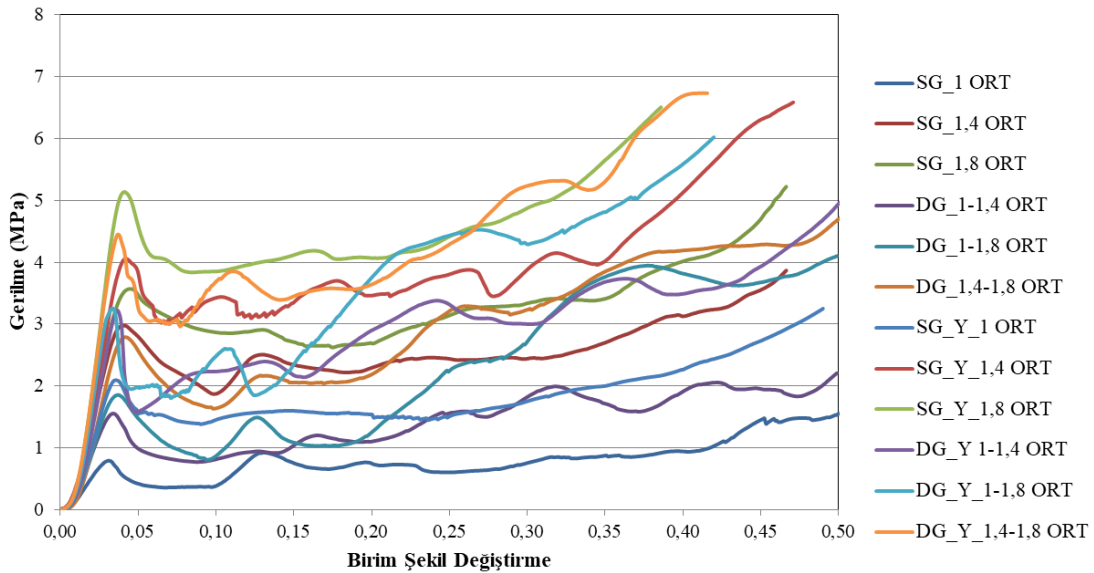
Şekil 5.3 Tüm yapıların ortalama elastisite modül değerleri grafiği.

Benzer şekilde hücre duvarı kalınlığının, elastisite modülüne etkisini karşılaştırmak istediğimiz zaman ise en yüksek değerlerin büyükten küçüğe sırasıyla; SG kafes yapısına sahip numunelerde; $SG_{1,8} > SG_{1,6} > SG_1$ olarak, DG kafes yapısına sahip numunelerde; $DG_{1,4-1,8} > DG_{1-1,8} > DG_{1-1,64}$ olarak, SG_Y kafes yapısına sahip numunelerde; $SG_{Y,1,8} > SG_{Y,1,4} > SG_{Y,1}$ olarak, DG_Y kafes yapısına sahip numunelerde ise; $DG_{Y,1,4-1,8} > DG_{Y,1-1,8} > DG_{Y,1-1,4}$ olarak sıralandığı görülmüştür.

SG yapılarında hücre duvarı kalınlığı 1 mm'den, 1,4 mm'ye çıkarıldığında akma dayanımı 0,84 MPa'dan 3,19 MPa'ya çıkmıştır. Akma dayanım değerleri arasındaki fark yaklaşık 3,8 kat kadar artmıştır. Hücre duvarı kalınlığı 1,4 mm'den, 1,8 mm'ye çıkarıldığında ise akma dayanımı 3,19 MPa'dan 3,57 MPa'ya çıkmıştır. Akma dayanım değerleri arasındaki fark yaklaşık 1,1 kat kadar artmıştır. Hücre duvarı kalınlığı 1 mm'den, 1,8 mm'ye çıkarıldığında ise akma dayanım değerleri arasındaki fark yaklaşık 4,2 kat kadar artmaktadır. Görüldüğü üzere, yapıların hücre duvarı kalınlığının artması SG yapılarında akma dayanım değerlerini önemli ölçüde etkilemektedir.

Benzer durum aynı hücre duvarı kalınlıklarına sahip, ancak Y eksenli takviyeli kafes yapılarında üretilen SG_Y yapılarında da görülmektedir. SG_Y yapılarında hücre duvarı kalınlığı 1 mm'den, 1,4 mm'ye çıkarıldığında akma dayanımı 2,15 MPa'dan 4,53 MPa'ya çıkmıştır. Akma dayanım değerleri arasındaki fark yaklaşık 2,1 kat kadar artmıştır. Hücre duvarı kalınlığı 1,4 mm'den, 1,8 mm'ye çıkarıldığında ise akma dayanımı 4,53 MPa'dan 5,18 MPa'ya çıkmıştır. Akma dayanım değerleri arasındaki fark yaklaşık 1,1 kat kadar artmıştır. Hücre duvarı kalınlığı 1 mm'den, 1,8 mm'ye çıkarıldığında ise akma dayanım değerleri arasındaki fark yaklaşık 2,4 kat kadar artmaktadır. Burada da görüldüğü üzere, yapıların hücre duvarı kalınlığının artması SG_Y yapılarında da akma dayanım değerlerini önemli ölçüde etkilemektedir.

Üretilen yapıların, basma testi sonucunda elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri ile ilgili olarak genel bir değerlendirme yapılacak olursa; hücresel yapıların gerilme-birim şekil değiştirme grafiklerinin genelinde yaygın olarak elde edilen üç deformasyon bölgesinin (elastik, plato ve nihai sıkışma bölgeleri), tüm numunelerde de oluştuğu gözlenmektedir. Parçaların yapılan basma testi sonucunda elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri Şekil 5.4'de görüldüğü üzere farklı genlikle stres dalgalanmaları şeklinde gerçekleşmiştir.



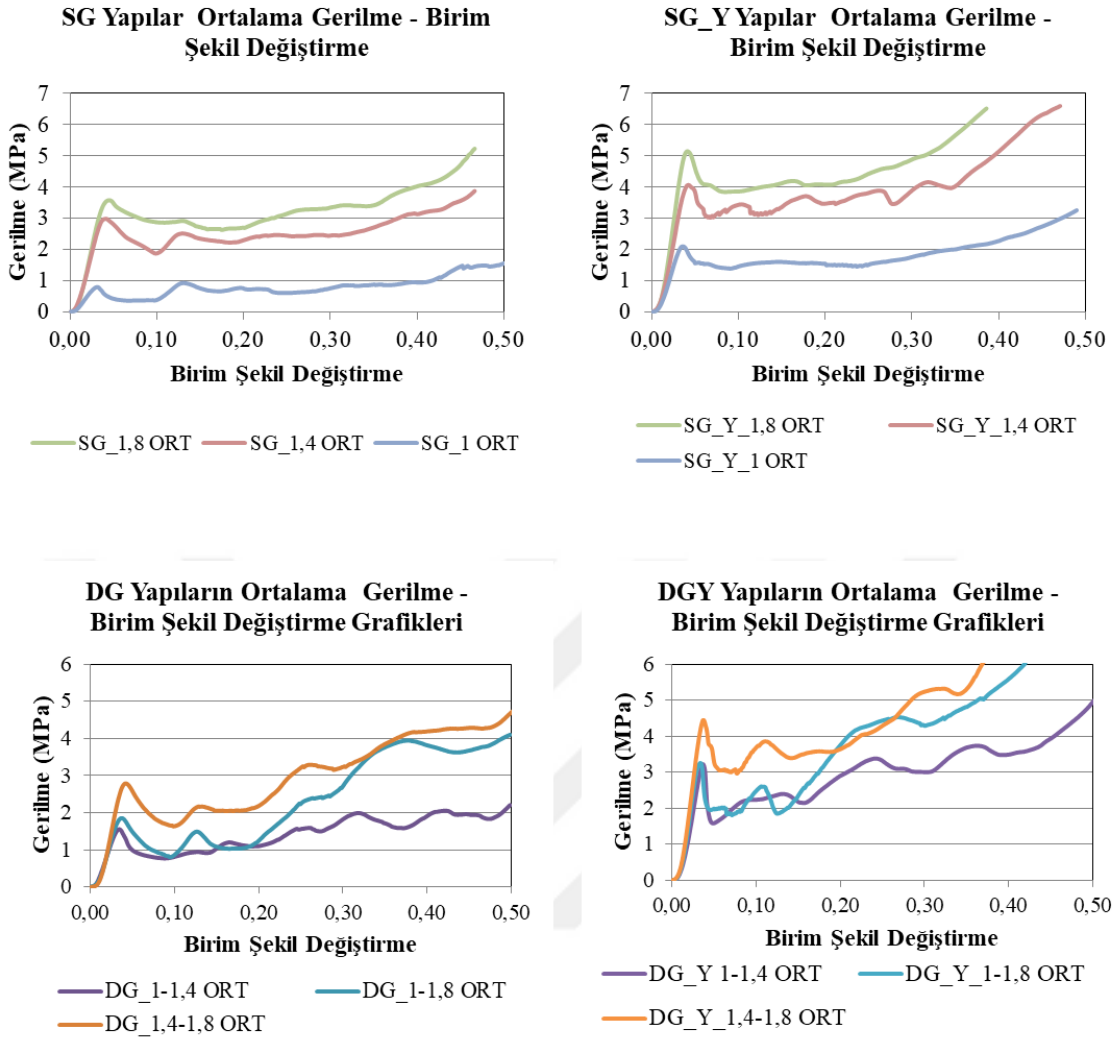
Şekil 5.4 Tüm yapıların ortalama gerilme değerlerine göre gerilme-birim şekil değiştirme grafiği.

Hemen hemen tüm yapılarda birinci deformasyon bölgesi olan elastik bölgenin, yüklenme başladıktan sonra yaklaşık 0,03'lük birim şekil değişimine kadar olan bölgede sona erdiği görülmektedir. Yapılarda akma dayanımı sınırı geçildikten sonra, birim hücrelerde gerçekleşen deformeye bağlı gerilimde düşüş eğrileri gerçekleştiği gözlenmektedir. Bu düşüş ile birlikte birim hücrelerde gerçekleşen deformasyona bağlı gerilimde de düşme gerçekleştiği gözlenmektedir. Bu düşmelerin SG_Y ve DG_Y yapılarda daha sert ve eğimli olduğu, SG ve DG yapılarda ise daha yumuşak ve daha az eğimli olduğu görülmektedir.

Aynı kafes yapılarına sahip, ancak hücre duvarı kalınlıkları farklı olarak üretilen numunelerin grafik eğrilerinin doğrusal ve benzer bir ilişkiye sahip olduğu, yani deformasyon tiplerinin benzerlik gösterdiği Şekil 5.4'da görülmektedir.

Tüm yapıların gerilme-birim şekil değiştirme grafiğinde plato bölgesinin belirgin olarak oluştuğu görülmektedir. Elastik bölgenin sonlanması ile birlikte sıkışma bölgesine kadar olan dönemde alt ve üst tepe değerinin yer aldığı değişken genlikte stres dalgalanmaları şeklinde eğriler görülmektedir. Bu bölgede görülen stres dalgalanma eğrileri, burularak çökme ve gevrek kırılmanın bir özelliği olan 2 farklı formda karşımıza çıkmaktadır. Bu dalgalanmaların SG ve DG yapılarda, SG_Y ve DG_Y yapılara oranla daha düşük gerilme değerinde ve daha stabil bir eğriler şeklinde oluştuğu, SG_Y ve DG_Y yapılarda ise daha sert ve daha yüksek gerilme değerinde oluştuğu görülmektedir. SG_Y ve DG_Y yapılarda oluşan sert ve yüksek gerilme değerindeki bu dalgalanmaların yükleme yönünde (Y) konulan iç takviye kolonların kırılması nedeniyle oluştuğu düşünülmektedir.

Burularak çökme davranışı sergileyen parçaların; SG ve DG yapılar olduğu, kırılma davranışı sergileyen yapıların ise; SG_Y ve DG_Y yapılar olduğu söylenebilir (Şekil 5.5). Bu dalgalanmaların SG yapılarda daha stabil olarak yaklaşık 0,40 birim şekil değişimine kadar devam ettiği, SG_Y yapılarda ise yaklaşık 0,30 birim şekil değişimine kadar devam ettiği daha sonra sıkışma bölgesinin başladığı görülmektedir.



Şekil 5.5 Aynı hücre duvarı kalınlıklarına sahip, ancak farklı kafes yapılarında üretilen numunelerin grafikleri.

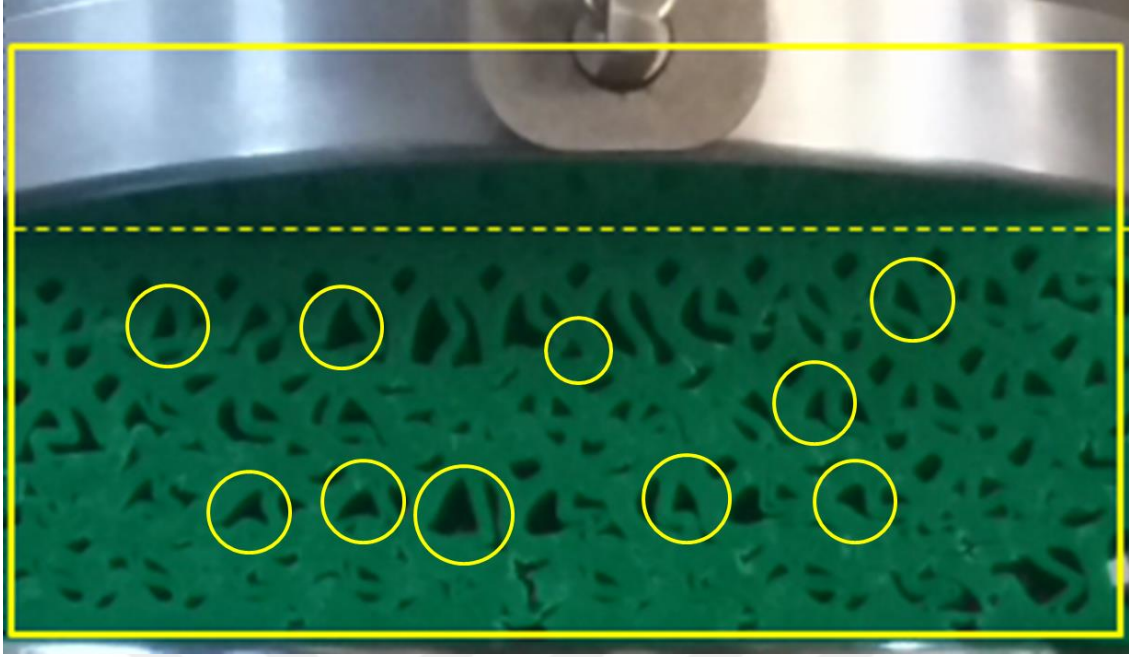
Ancak DG ve DG_Y yapılar da daha erken dönemde sona erdiği görülmektedir. Buna neden olan etkenin ise; bu yapıların ilk iki satırında yer alan ve uygulanan basma kuvvetini ilk karşılayan hücrelerin duvar kalınlıklarının diğer satırdaki hücrelerin duvar kalınlıklarına göre daha düşük olmasından kaynaklı olduğu söylenebilir. İlk iki satırda yer alan bu hücreler, aynı hücre duvarı kalınlıklarına sahip SG yapıların elastik bölge ve plato bölgesi başlangıcındaki eğrilerine benzer davranış sergilemektedirler. Daha sonra bu hücrelerin ezilme ve katlanma deformasyonlarına bağlı olarak dolu alan ve hacim oluştuğu, oluşan bu dolu alan nedeniyle de basma kuvvetinin alta yer alan satırlara tesir ettiği görülmektedir. Alt iki satırda yer alan bu hücrelere tesir eden bu kuvvet

sonucunda aynı hücre duvarı kalınlıklarına sahip SG yapıların plato bölgesi sonu ve sıkışma bölgesindeki eğrilerine benzer davranış sergiledikleri söylenebilir.

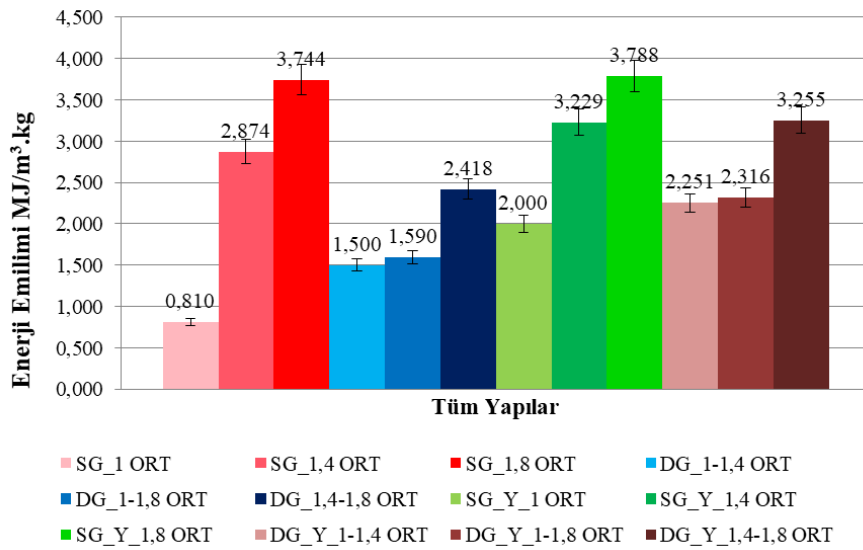
Bu bölgede çökme ve katlanma deformasyonları sonrasında tüm hücre formlarının tamamen çökerek bozulduğu ve kapalı duruma geldiği ve gerçekleşen bu deformeye bağlı gerilimde de artış gerçekleştiği görülmektedir. Tüm yapılarda maksimum gerilme bu bölgede görülmektedir.

Şekil 5.5’de sıkışma bölgesinin başlangıcındaki dalgalanmaların SG ve DG yapılarda, SG_Y ve DG_Y yapılara oranla daha stabil bir eğriler şeklinde oluştuğu, SG_Y ve DG_Y yapılarda ise daha eğimli ve doğrusal bir yükselme şeklinde oluştuğu görülmektedir. Bu dalgalanmaların SG ve DG yapılarda 0,50 birim şekil değişimine kadar devam ettiği, ancak SG_Y ve DG_Y yapılarda 0,50 birim şekil değişimine kadar ulaşmadan sonlandığı görülmektedir. SG_Y ve DG_Y yapılarda buna neden olan etkenin ise; sıkışma bölgesinin sonlarına doğru hücre duvarlarının birbiri üstüne yığılmasına bağlı olarak oluşan dolu alan ve aynı zamanda hücre içerisinde yer alan iç takviye kolonların kırılması kaynaklı olduğu söylenebilir. Hücre içerisinde yer alan iç takviye kolonların lokal kırılması sonucunda hücre formunun içinde mikro düzeyde istenmeyen üçgen kafes yapıların oluştuğu görülmektedir (Şekil 5.6). İstenmeden oluşan bu mikro kafes yapıların, ana yapının oluşturduğu dolu alandan kaynaklanan dayanımı ile birlikte uygulanan yüke karşı daha fazla direnç göstermesine neden olduğu söylenebilir.

Hücrel yapıların gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin altında kalan alanın yapının enerji depolama kabiliyetini gösterdiği bildirilmektedir (Al-Ketan vd. 2018). Bu durum hücrel malzemelerin sahip oldukları enerji emilimi özelliğini açıklamaktadır. Elde edilen bu bulgulara göre, üretilen yapıların, enerji emilimi değerleri ile ilgili olarak genel bir değerlendirme yapılacak olursa; parçaların basma etkisi altında elastik bölgedeki spesifik enerji emilimi değerleri Şekil 5.7’de görüldüğü üzere farklı değerlerde gerçekleşmiştir.



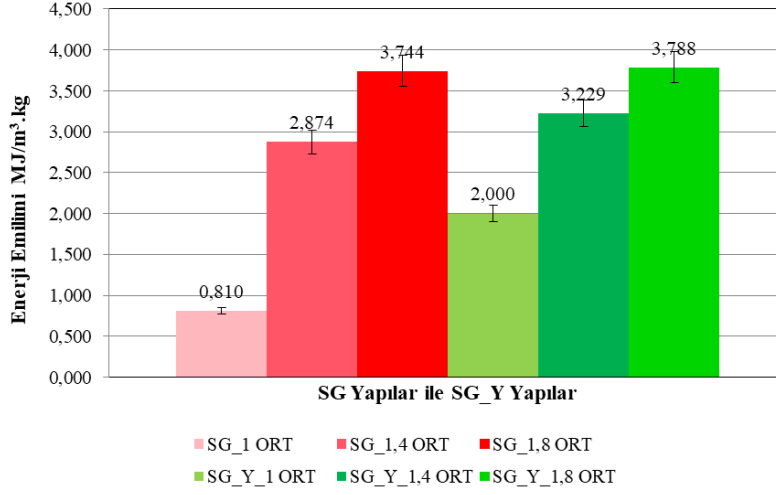
Şekil 5.6 Yapılarda lokal kırılma sonucunda hücre formunun içinde mikro düzeyde oluşan üçgen kafes yapıların gösterimi.



Şekil 5.7 Tüm yapıların, elastik bölgedeki kütleyle bağlı spesifik enerji emilimi grafiği.

Elde edilen verilere göre tüm numuneler içerisinde; elastik bölgede en yüksek spesifik enerji emilimi değerine sahip yapının 3,788 MJ/m³.kg değerini sağlayan SG_Y_1,8 yapısı olduğu tespit edilmiştir. En düşük enerji emilimi değerine sahip yapının ise 0,810 MJ/m³.kg değerini sağlayan SG_1 olarak belirlenmiştir. SG_Y_1,8 yapısının elastik

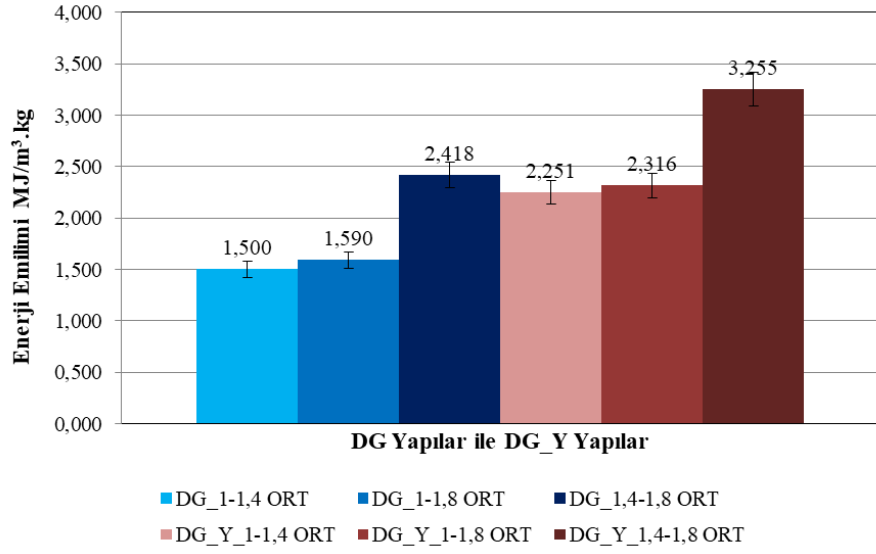
bölgedeki enerji Emilimi SG_1 yapısının yaklaşık 4,5 katıdır. Bu sonuca göre SG_Y yapılarının SG yapılarına oranla 4,5 kat daha dayanıklı olduğu söylenebilir (Şekil 5.8).



Şekil 5.8 SG yapılar ile SG_Y yapıların elastik bölgedeki kütleyle bağlı spesifik enerji Emilimi karşılaştırılma grafiği.

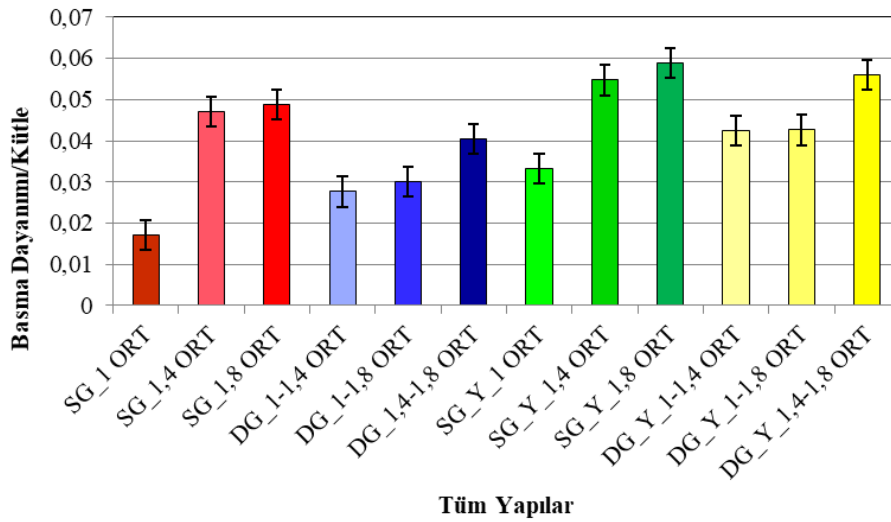
Değişken gözenek yapısına sahip numunelerin test sonuçları incelendiğinde DG yapılarına oranla, DG_Y yapıların elastik bölgedeki spesifik enerji Emilimi özelliklerinde artış gösterdiği görülmektedir (Şekil 5.9). Elastik bölgede en yüksek spesifik enerji Emilimi değerine sahip yapının 3,255 MJ/m³.kg değerini sağlayan DG_Y_1,4-1,8 numunesi olduğu, en düşük spesifik enerji Emilimi değerine sahip yapının ise 1,500 MJ/m³.kg değerini sağlayan DG_1-1,4 olarak belirlenmiştir. DG_Y_1,4-1,8 yapısının elastik bölgedeki spesifik enerji Emilimi DG_1-1,4 yapısının yaklaşık 2 katıdır. Bu sonuca göre DG_Y yapılarının DG yapılarına oranla 2 kat daha dayanıklı olduğu söylenebilir. DG_1-1,4 ve DG_1-1,8 yapılarında değerlerin birbirine yakın çıkmasının sebebinin basma testinde üst kısımda yer alan hücrelerin duvar kalınlıklarının 1 mm olması nedeniyle oluştuğunu düşünülmektedir.

Hücre duvarı kalınlıklarındaki artışın ve Y eksen yönünde yapılan takviyenin numunelerin kütlelerinde bir miktar artışına sebep olması kaçınılmazdır. Kütle miktarındaki bu artış ve malzemelerin basma dayanımları arasında bir ilişki değerlendirilecek olursa; sabit gözenekli yapılarda, hücre duvarı kalınlığının artmasıyla kütle değerlerindeki artış ile basma dayanımının da arttığı Şekil 5.10'da görülmektedir.



Şekil 5.9 DG yapılar ile DG_Y yapıların elastik bölgedeki kütleyle bağlı spesifik enerji emilimi karşılaştırılma grafiği.

SG_1 ve SG_1,4 yapılarında %39 kütle artışına oranla, basma dayanımının %282 arttığı görülmektedir. DG_1-1,8 ve DG_1,4-1,8 yapılarında ise %9 kütle artışına oranla, basma dayanımı %180 arttığı görülmektedir. Y eksenı yönünde takviye yapılan yapılarda ise, kütle değerlerindeki artış ile basma dayanımında da benzer artışların olduğu görülmektedir. SG_1 ve SG_Y_1 numunelerinde %33 kütle artışına oranla, basma dayanımının %157 arttığı görülmektedir (Şekil 5.10).



Şekil 5.10 Basma dayanımının kütleyle oranı.

Elde edilen tüm bu sonuçlara göre; hücre duvarı kalınlığındaki artışın, hücrelerin birleşim noktalarındaki duvarın kalınlaşmasına ve yapının toplam kesit yüzey alanının artmasına neden olduğu, dolayısıyla artan kesit alanının elastik limit ve akma noktasındaki artışlara sebep olduğu söylenebilir. Hücre duvarı kalınlığındaki artışın, bütün yapılarda elastik modül, akma gerilmesi ve enerji Emilimi değerleri üzerine etkili olduğu ve artışa neden olduğu rapor edilebilir.

Elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinde de görüldüğü üzere hücre duvarı kalınlığındaki artışın, yaşanan deformasyona bağlı olarak hücre duvarlarının birbiri üstüne yığılması sonucunda oluşan dolu alanın yapının daha erken dönemde (plato bölgesinde) katı cisim gibi davranış sergilemesine neden olduğu söylenebilir. Hücre duvarı kalınlığının artmasıyla yapılardaki gerilme değerinin arttığı, birim şekil değişiminin ise azaldığı rapor edilebilir.

Hücre içerisinde yer alan iç takviye kolonların lokal kırılması sonucunda hücre formunun içinde mikro düzeyde oluşan üçgen kafes oluşumlarının, ana yapının uygulanan yüke karşı daha fazla direnç göstermesine ve diğerlerine göre maksimum gerilme dayanımı göstermesine katkı sağladığı söylenebilir. Benzer hücresel yapı geometrisine sahip, ancak yükleme yönünde (Y) konulan iç takviye kolonlarının bütün yapılarda elastik modül, akma gerilmesi ve enerji Emilimi değerleri üzerine etkili olduğu ve artışa neden olduğu rapor edilebilir.

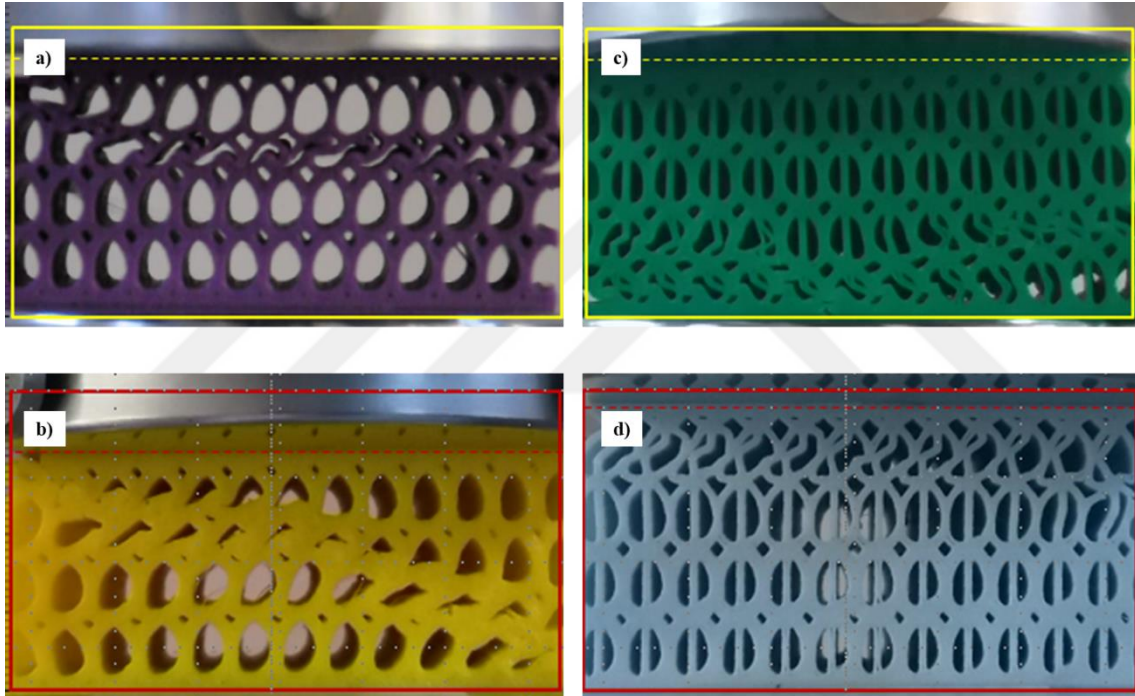
Yapıların hücre duvarı kalınlığının artması ve bunun yanı sıra hücre içerisine yükleme yönünde (Y) konulan iç takviye kolonlarının bütün yapılarda elastik modül, akma gerilmesi ve enerji Emilimi değerleri üzerine etkili olduğu söylenebilir. Dolayısıyla her iki yöntemin birlikte uygulanmasıyla daha iyi mekanik dayanıma sahip hücresel yapıların imal edilebileceği rapor edilebilir

5.2. Deformasyon Davranışları Sonuçlarının Tartışılması

Badem kabuğunun kendine özgü kavisli ve eğrisel şekil yapısını temel alarak tasarlanan hücresel yapı geometrisi ile üretilen yapıların basma durumu altındaki deformasyon

davranışları ile ilgili olarak genel bir değerlendirme yapılacak olursa; parçaların basma etkisi altında görüntülenen deformasyonları farklı şekillerde gerçekleştirmiştir.

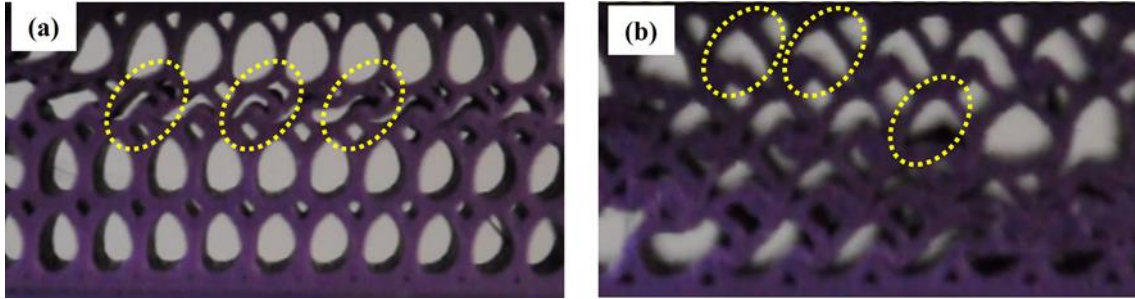
Aynı hücresel birim geometrisine sahip, ancak farklı kafes topolojisinde üretilen tasarımların, deformasyon tipleri farklılık göstermektedir. SG ve DG yapılar hücresel yapı geometrisindeki deformasyon süreci, hücrelerin birbirleri ile birleşme noktalarında, burkulma şeklinde başlayıp, yığılarak ezilme şekilde yayılarak devam etmiştir (Şekil 5.11-a,b). SG_Y ve DG_Y yapılar ise deformasyon süreci iç takviyelerde kırılma şeklinde başlayıp, katlanarak ezilme şekilde yayılarak devam etmiştir (Şekil 5.11-c,d).



Şekil 5.11 Parçaların basma etkisi altında görüntülenen deformasyon süreci ve deformasyon tiplerine ait görüntüler a) SG_1 numunesindeki deformasyon süreci ve tipi, b) SG_1,8 numunesindeki deformasyon süreci ve tipi, c) SG_Y_1,4 numunesindeki deformasyon süreci ve tipi, d) DG_Y_1-1,4 numunesindeki deformasyon süreci ve tipi.

SG ve DG yapılar deformasyon hücrelerin birbirleri ile birleşme noktalarında başlamış ve hücrelerin üst kısmında yer alan hücre geometrisine temel şeklini veren üst kısımlardaki kendine özgü kavisli ve eğrisel şekil yapısının bir biri üzerinde katlanması ile sonlanmıştır. Bu kendine özgü kavisli ve eğrisel yüzeyin SG ve DG yapılar en son deformasyona uğrayan kısımda yer aldığı Şekil 5.12-a’da görülmektedir.

SG ve DG yapılarda görülen bu durumun, deformasyon sürecinde, hücrelerin birbirleri üstüne katlanarak birleştiği düzenli bir davranış sergilemesine neden olduğu ve yapının daha homojen şekilde deforme olmasını sağladığı söylenebilir (Şekil 5.12-b).

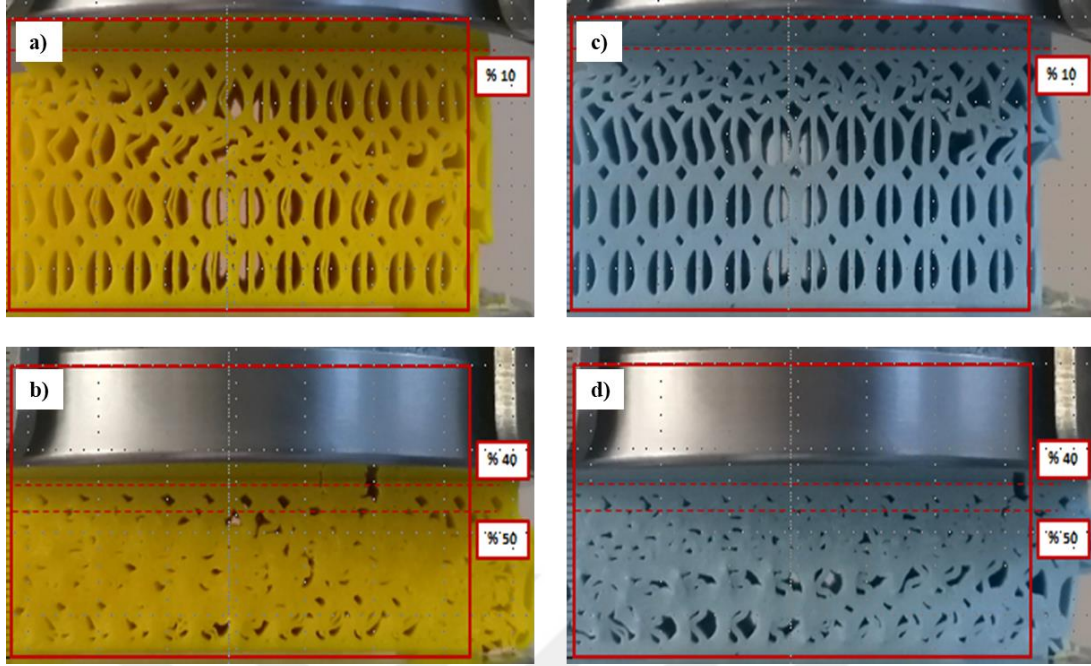


Şekil 5.12 Badem geometrisinin gözenekli malzemenin deformasyon yapısına etkisi, a) Deformasyonun ilk aşamaları, b) Birbiri üzerine yığılarak deforme olan gözenekler.

Ancak SG_Y ve DG_Y yapılarda ise iç takviyelerdeki kırılma ve sonrasında yaşanan ezilmelerin hücre içerisinde kalması nedeniyle, deformasyon sürecinde hücre gözenek yapısını tamamıyla doldurduğu ve hücre geometrisine temel şeklini veren üst kısımlardaki kendine özgü kavisli ve eğrisel şekil yapısının görünmez hale geldiği söylenebilir. Ayrıca iç takviyelerde yaşanan kırılma durumunun, yapıların ilerleyen deformasyon sürecinde dağınık bir davranış sergilemesine neden olduğu ve yapının daha heterojen şekilde deforme olmasını sağladığı söylenebilir (Şekil 5.13).

Başlangıçtan 0,05'lik birim şekil değişimine kadar olan süreçte; SG ve DG yapılarda hücrelerde fiçilaşma durumu şeklinde tabir edilebilecek gözle görünür bir değişim meydana gelmektedir. SG_Y ve DG_Y yapılarda ise hücrelerde fiçilaşma durumu görülmeden iç takviye kolonlarında burkularak bir anda ani kırılma şeklindeki gözle görünür bir deformasyon gözlenmektedir.

0,10'luk birim şekil değişimine kadar olan süreçte; SG yapılarda birim hücrelerden bazılarında hücrelerin birleşme noktalarından başlayarak burkulma şeklinde deforme olmaya başladıkları görülmektedir. DG yapılarda benzer durumun hücre duvar kalınlığının daha düşük olduğu üstteki satırda yer alan hücrelerde meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 5.13 SG_Y ve DG_Y yapılarda iç takviyelerde yaşanan kırılmanın yapıların ilerleyen deformasyon sürecindeki durum görüntüleri, a) SG_Y yapısındaki deformasyonun 0,10'lık aşama görüntüsü, b) SG_Y yapısındaki deformasyonun 0,50'lik aşama görüntüsü, c) DG_Y yapısındaki deformasyonun 0,10'lık aşama görüntüsü, d) SG_Y yapısındaki deformasyonun 0,50'lik aşama görüntüsü.

SG_Y yapılarda daha önce başlayan iç takviye kolonlarında burkularak kırılmaların yoğunlaştığı ve hücrelerin birleşme noktalarından başlayarak kırılmaların olduğu yönde burkulma şeklinde deforme oldukları görülmektedir. DG_Y yapılarda ise hem DG hem de SG_Y yapıların sergiledikleri davranışlara benzer deformasyon meydana gelmektedir. Hem hücre duvar kalınlığının daha düşük olduğu üst satırdaki hücrelerde, hem de iç takviye kolonlarındaki kırılmaların olduğu hücrelerin birleşme noktalarından başlayarak, kırılmaların olduğu yönde deforme oldukları görülmektedir. Bu aşamada tüm yapılarda deformasyon çizgilerinin ve yönünün olduğu söylenebilir.

0,20'lik birim şekil değişimine kadar olan süreçte; tüm yapılarda daha önce başlayan deformasyon çizgilerinin daha da belirgin hale geldiği ve deformasyonun bu çizgi üzerindeki hücrelerde bozularak deforme olmasıyla devam ettiği görülmektedir. Tüm yapılarda bu çizgi üzerindeki daha önce deforme olmaya başlayan birim hücrelerin bir biri üzerine yığılarak katlanmaların olduğu, fiçilaşma şeklinde genişleme yaşanan hücrelerin ise çoğunluğunun katlanmaya başladığı görülmüştür. Deformasyon çizgisi dışında kalan hücrelerin bazılarında ise fiçilaşma şeklinde genişlemenin başladığı

görülmüştür. Ancak DG ve DG_Y yapılarda alt satırda yer alan kalın hücre duvarına sahip hücrelerde gözle görünür bir değişimin henüz oluşmadığı görülmektedir.

0,30'luk birim şekil değişimine kadar olan süreçte; tüm yapılarda deformasyon çizgisi üzerindeki daha önce katlanma yaşanan hücrelerin tamamının ezilme ile deforme oldukları, deformasyon çizgisi dışında kalan hücrelerde ise daha önce başlayan deformasyonun kademeli olarak yayıldığı, yığılarak katlanmaların oluştuğu, ancak ezilme şeklindeki deformasyonun henüz başlamadığı görülmüştür. Fıçılama şeklinde genişleme yaşanan hücrelerin ise çoğunluğunun katlanmaya başladığı görülmüştür. DG ve DG_Y yapılarda ince duvar yapısına sahip hücrelerin duvarlarının neredeyse tamamen çöktüğü ve hücre formlarının tamamen bozulduğu, alt satırda yer alan kalın hücre duvarına sahip hücrelerde gözle görünür bir değişimin oluşmaya başladığı ve ikinci bir deformasyon çizgisinin ve yönünün oluştuğu söylenebilir.

0,40'lık birim şekil değişimine kadar olan süreçte; SG_Y ve DG_Y yapıların hücrelerinde neredeyse tamamının bir biri üzerine yığılarak ezilme hasarının oluştuğu, hücre formlarının tamamen bozulduğu ve kapalı duruma geldiği, yapı şeklinin ezilmeler nedeniyle tamamıyla kaybedildiği söylenebilir. Ancak SG ve DG yapılarda ise hücre duvar kalınlığının ince olduğu (1 mm) numunelerde bazı hücrelerde, hücre geometrisine temel şeklini veren üst kısımlardaki kendine özgü kavisli ve eğrisel şekil yapısının henüz bozulmadığı ve sağlam kaldığı, diğer hücre formlarının tamamen bozulduğu söylenebilir

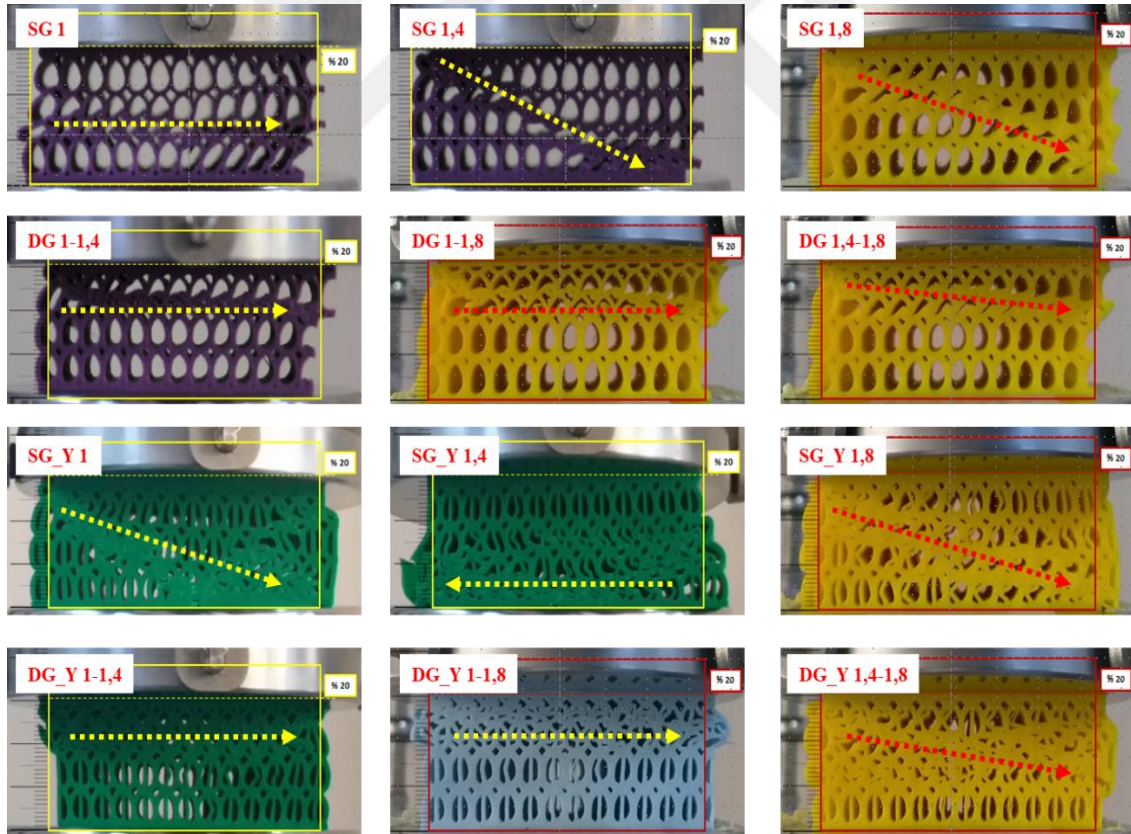
0,50'lik birim şekil değişimine kadar olan süreçte; tüm yapılarda hücre formlarının tamamen bozulduğu ve yapı şeklinin tamamıyla kaybedildiği söylenebilir.

Yapıların deformasyon yönlerinin çizgisel gösterimi Şekil 5.14'de verilmiştir. SG_1,4 ve SG_1,8 yapılarda deformasyon çizgileri üst tabladan başlayıp alt tablaya doğru çapraz bir yönde bir yol izlerken SG_1 yapısında tablalara paralel yönde bir yol izlemiştir.

SG ve DG yapılar da ise deformasyon çizgileri öncelikle hücre duvar kalınlığının daha düşük olduğu üst satırlardan başlamış ve SG yapılarıdaki aynı hücre duvarı kalınlığına sahip yapının sergilediği benzer davranışı sergiler şekilde yol izlemiştir.

SG_Y yapılar da, SG_Y_1 ve SG_Y_1,8 yapıları benzer davranış sergileyerek üst tabladan başlayıp alt tablaya doğru çapraz bir yönde bir yol izlerken SG_Y_1,4 yapısında tablalara paralel yönde bir yol izlemiştir. SG_Y_1,4 yapısındaki bu durumun iç takviye kolonlarındaki kırılma yönlerinin deformasyon çizgisinin oluşumunda etkili olması nedeniyle olduğu düşünülmektedir.

DG_Y yapılar da deformasyon çizgileri DG yapıların sergilediği benzer davranışı sergiler şekilde öncelikle hücre duvar kalınlığının daha düşük olduğu üst satırlardan başlamış ve tablalara paralel yönde bir yol izlemiştir.



Şekil 5.14 Yapıların deformasyon yönlerinin çizgisel gösterimi.

Elde edilen tüm bu sonuçlara göre; SG ve DG yapılar da deformasyonun hücrelerin birleşme noktalarından burkulma şeklinde başlayıp, yığılar ak ezilme şekilde yayılarak devam ettiği, SG_Y ve DG_Y yapılar da ise deformasyonun iç takviye kolonlarında kırılma şeklinde başlayıp katlanarak ezilme şekilde yayılarak devam ettiği rapor edilebilir.

Tasarlanan hücresel yapı geometrisinin basma durumu altında, SG ve DG kafes yapılarında yığılar ak ezilme şekilde baskın davranış göstermelerinden dolayı sünek malzeme davranışı sergiledikleri, SG_Y ve DG_Y yapılar da ise kırılma ve katlanarak ezilme şeklinde baskın davranış göstermelerinden dolayı rijit malzeme davranışı sergiledikleri rapor edilebilir.

Birim hücrelerin üst kısmında yer alan ve hücre geometrisine temel şeklini veren üst kısımlardaki kendine özgü kavisli ve eğrisel yüzeyin SG ve DG yapıların deformasyon sürecinde, hücrelerin birbirleri üstüne katlanarak birleştiği düzenli bir davranış sergilemesine neden olduğu ve yapının daha homojen şekilde deforme olmasını sağladığı rapor edilebilir.

Yükleme yönünde (Y) konulan iç takviye kolonlara sahip SG_Y ve DG_Y yapılar da ise iç takviye kolonlarındaki kırılma yönlerinin deformasyon çizgisinin oluşumunda etkili olduğu ve yapının daha heterojen şekilde deforme olmasını sağladığı rapor edilebilir.

Tüm yapılar da 0,05'lik birim şekil değişiminde gözle görünür bir değişim meydana geldiği, 0,10'luk birim şekil değişiminde deformasyon çizgilerinin belirginleştiği ve yönünün oluştuğu, ilerleyen süreçlerde deformasyonun öncelikle bu çizgi üzerindeki hücrelerde devam ettiği ve kademeli olarak diğ er hücrelere yayıldığı, 0,50'lik birim şekil değişimine ulaşıldığında ise hücre formlarının tamamen bozulduğu ve yapı şeklinin tamamıyla kaybedildiği rapor edilebilir.

Aynı hücresel birim geometrisi ve aynı kafes topolojisine sahip, ancak farklı hücre duvarı kalınlığına sahip tasarımların, deformasyon tipleri benzerlikler gösterdiği rapor edilebilir.

DG ve DG_Y yapılar da öncelikle daha ince duvar yapısına sahip hücrelerin deforme olduğu, sonrasında da kalın duvar yapısına sahip hücrelerin deforme olduğu rapor edilebilir.



6. SONUÇ

Bu çalışmada, badem kabuğunun kendine özgü kavisli ve eğrisel şekil yapısını temel olarak tasarlanan hücresel yapı geometrisinin basma durumu altındaki sergilediği mekanik ve deformasyon özellikleri incelenmiştir. Hücresel yapının basma özelliklerinin daha iyi mukayese edilebilmesi için dört farklı kafes yapısı içerisinde kullanılarak tasarlanmış ve üretilmiştir. Tüm testler boyunca, birim hücre geometrisinin farklı kafes yapısı içerisindeki deformasyon süreci ve yapıların sergiledikleri mekanik özellikleri ana parametreler olarak değerlendirilmiştir.

Çalışmada, elde edilen sonuçlar liste halinde verilmiştir.

- Badem meyvesinin kavisli ve kendine özgü yapısı referans alınarak tasarlanan birim geometri sabit gözenekli ve değişken gözenekli yapıların deformasyon davranışları üzerinde belirleyici olmuştur.
- Tüm numuneler içerisinde; en yüksek akma dayanıma sahip yapının SG_Y_1,8 yapısı olduğu, en düşük dayanıma sahip yapının ise SG_1 yapısı olduğu belirlenmiştir. En yüksek elastisite modül değerlerine sahip yapının SG_Y_1,8 yapısı olduğu, en düşük elastisite modül değerlerine sahip yapının ise SG_1 yapısı olduğu belirlenmiştir. Elastik bölgede en yüksek enerji emilimi kabiliyetine sahip yapının SG_Y_1,8 yapısı olduğu, en düşük enerji emilimi kabiliyetine sahip yapının ise SG_1 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre SG_Y yapıları SG yapılarına oranla daha dayanıklıdır.
- Hücre geometrisine yükleme yönünde (Y) bir iç takviye kolon eklenmesiyle birlikte mekanik dayanım ve deformasyon tipi önemli ölçüde değişmiştir. Eklenen iç takviye kolonların lokal kırılması sonucunda hücre formunun içinde üçgen kafes yapılar oluşmuş ve bu sayede ana yapının uygulanan yüke karşı daha fazla direnç göstermesine ve diğerlerine göre maksimum gerilme dayanımı göstermesine katkı sağlamıştır. Bu durum benzer hücresel yapı geometrisine sahip bütün yapılarda elastik modül, akma gerilmesi ve enerji emilimi değerleri üzerinde etkili olmuş ve artışa neden olmuştur.

- Yapıların hücre duvarı kalınlığının artması ve bunun yanı sıra hücre içerisine yükleme yönünde (Y) konulan iç takviye kolonları, bütün yapılarda elastik modül, akma gerilmesi ve enerji emilimi değerleri üzerine etkili olmuştur. Dolayısıyla her iki yöntemin birlikte uygulanmasıyla daha iyi mekanik dayanıma sahip hücresel yapılar imal edilebilir.

- Hücre duvarı kalınlıklarındaki artış ve yükleme yönünde yapılan takviye numunelerin kütlelerinde bir miktar artışa sebep olmuştur. Kütle değerlerindeki bu artış ile yapılarda basma dayanımının da artmıştır.

- Tüm yapıların gerilme-birim şekil değiştirme grafiğinde, hücresel yapıların genelinde yaygın olarak elde edilen üç deformasyon bölgesi (elastik, plato ve nihai sıkışma bölgeleri) oluşmaktadır. Ancak hücre içerisine yükleme yönünde takviye konulan yapılarda ve hücre duvarı kalın olan yapılarda plato ve nihai sıkışma bölgeleri diğerlerine oranla daralmaktadır.

- Hücre duvarı kalınlığındaki artış nedeniyle hücre duvarlarının bir biri üstüne yığılması sonucunda oluşan dolu alan, yapının daha erken dönemde (plato bölgesinde) katı cisim gibi davranış sergilemesine neden olmuştur. Hücre duvarı kalınlığının artmasıyla yapılardaki gerilme değeri artmış, birim şekil değişimi değeri ise azalmıştır.

- Hücre duvarı kalınlığındaki artış, hücrelerin birleşim noktalarındaki duvarın kalınlaşmasına ve yapının toplam kesit yüzey alanının artmasına neden olmuş, dolayısıyla artan kesit alanı bütün yapılarda elastik modül ve akma gerilmesi ve enerji emilimi değerleri üzerine etkili olmuştur.

- Tasarlanan birim hücrenin üst kısmında yer alan ve hücre geometrisine temel şeklini veren kendine özgü kavisli ve eğrisel yüzey sabit gözenekli ve değişken gözenekli yapıların deformasyon sürecinde, en son deformasyona uğrayan kısımda yer almıştır. Bu durum hücrelerin birbirleri üstüne yığılarak birleştiği düzenli bir

deformasyon davranışı sergilemesine neden olmuş ve yapının daha homojen şekilde deforme olmasını sağlamıştır. Bu durum olumlu bir özellik olarak görülebilir.

- SG ve DG yapılarda deformasyon hücrelerin birleşme noktalarından burkulma şeklinde başlamış ve yığılarak ezilme şekilde devam etmiştir. SG_Y ve DG_Y yapılarda ise deformasyon iç takviye kolonlarında kırılma şeklinde başlamış katlanarak ezilme şekilde devam etmiştir.

- Tasarlanan hücresel yapı geometrisi basma durumu altında, SG ve DG kafes yapılarında yığılarak ezilme şekilde baskın davranış göstermiş dolayısıyla sünek malzeme davranışı sergilemiştir. SG_Y ve DG_Y yapılarda ise kırılma ve katlanarak ezilme şeklinde baskın davranış göstermiş dolayısıyla rijit malzeme davranışı sergilemiştir.

- Yükleme yönünde (Y) konulan iç takviye kolonlara sahip SG_Y ve DG_Y yapılarda iç takviye kolonlarındaki kırılma yönleri deformasyon çizgisinin oluşumunda etkili olmuş ve yapının daha heterojen şekilde deforme olmasını sağlamıştır.

- Tüm yapılarda 0,05'lik birim şekil değişiminde gözle görünür bir değişim meydana gelmiş, 0,10'luk birim şekil değişiminde deformasyon çizgileri belirginleşmiş ve yön oluşmuştur. İlerleyen süreçlerde deformasyon öncelikle bu çizgi üzerindeki hücrelerde devam etmiş ve kademeli olarak diğer hücrelere yayılmıştır. 0,50'lik birim şekil değişimine ulaşıldığında ise hücre formları tamamen bozulmuş ve yapı şekli tamamıyla kaybedilmiştir.

- DG ve DG_Y yapılarda öncelikle daha ince duvar yapısına sahip hücreler deforme olmuş, sonrasında da kalın duvar yapısına sahip hücrelerin deforme olmuştur.

Bu çalışmada bio-esinli ve literatürde kullanılmayan yeni bir hücre formu geliştirilmiştir. Geliştirilen hücre formunun başlangıç seviyesinde ve geleneksel olarak kullanılan PLA malzeme ile yine klasik olarak kullanılan kafes yapılar şeklinde üretimi yapılarak, ne kadar mekanik performansına sahip olduğu ve nasıl bir deformasyona

uğradığını görmek açısından faydalı bir çalışma olduğu düşünülmektedir. Bu çalışmada oluşturduğumuz hücre geometrisinin geleneksel petek yapılarda olduğu gibi hafif ve güçlü malzemelere ihtiyaç duyulan rolleri doldurabilecek kapasitede olduğunu göstermektedir.

Dolayısıyla bu çalışmada elde edilen sonuçlar; daha sonraki yapılacak çalışmalar için referans niteliğinde olup, olumlu ve olumsuz özellikleri belirlenerek, imalat esnasında kullanılacak parametreler açısından fikir vermektedir. Daha sonraki yapılacak çalışmalarda imalatı yapılacak parçalardan istenen farklı mekanik dayanım değerlerine göre, hücre duvarı kalınlığı, kafes yapısı ve imalat parametreleri değiştirilerek, yeni ve özgün bir yapının üretimi sağlanıp mevcut yapı ile arasındaki farklar araştırılabilir.

7. KAYNAKLAR

- Al-Ketan, O., Rowshan, R. ve Abu Al-Rub, R. K. (2018). Topology-mechanical property relationship of 3D printed strut, skeletal, and sheet based periodic metallic cellular materials. *Additive Manufacturing*, 19, 167-183. doi:10.1016/j.addma.2017.12.006
- Altuntas, E., Gerçekcioglu, R. ve Kaya, C. (2010). Selected Mechanical and Geometric Properties of Different Almond Cultivars. *International Journal of Food Properties*, 13(2), 282-293. doi:10.1080/10942910802331504
- Ankaralıgil, N. (2013). Fotoğraf ve Sinemada Kompozisyon: Altın Oran Ve Fibonacci Spirali Bağlamında Spielberg Filmleri Üzerine Görsel Çözümleme. *Erciyes İletişim Dergisi*, 3(1), 70-92.
- Arslan, S. ve Vursavuş, K. K. (2006). Bir Badem İşleme Makinası Tasarımı İçin Gerekli Bazı Fiziksel Ve Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 2(3), 245-254.
- Ashby, M. F., Evans, T., Fleck, N. A., Hutchinson, J. W., Wadley, H. N. G. ve Gibson, L. J. (2000). *Metal Foams: A Design Guide*. Elsevier.
- ASTM International. (2013). F2792 – 12a Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies,. Philadelphia.: ASTM International. doi:10.1520/F2792-12A
- Aydin, C. (2003). Physical properties of almond nut and kernel. *Journal of Food Engineering*, 60(3), 315-320. doi:10.1016/S0260-8774(03)00053-0
- Benyus, J. M. (1997). *Biomimicry: Innovation inspired by nature* (1st ed.). New York: Morrow.

- Birkeland, J. (2002). *Design for Sustainability—A Sourcebook of Integrated Ecological Solutions*. United Kingdom, London: Earthscan Publications Ltd. <http://www.earthscan.co.uk/?tabid=774> adresinden erişildi.
- Carneiro, V. H., Peixinho, N. ve Meireles, J. (2018). Significance of cell number on the bulk elastic properties of auxetic reentrant lattices. *Science and Tecnology of Materials*, 30(1), 8-12. doi:10.1016/j.stmat.2018.01.003
- Chen, Y. ve Liou, F. (2018). Additive Manufacturing of Metal Functionally Graded Materials: A Review. *Solid Freeform Fabrication 2018* içinde (ss. 1215-1231). Proceedings of the 29th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, sunulmuş bildiri.
- Cohen, H. ve Reich, Y. (2016). *Biomimetic Design Method for Innovation and Sustainability*. Cham: Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-33997-9
- Contuzzi, N., Campanelli, S. L., Casavola, C. ve Lamberti, L. (2013). Manufacturing and Characterization of 18Ni Marage 300 Lattice Components by Selective Laser Melting. *Materials*, 6(8), 3451-3468. doi:10.3390/ma6083451
- Dahl, D. ve Moreau, P. (2002). The Influence and Value of Analogical Thinking During New Product Ideation. *Journal of Marketing Research—J MARKET RES-CHICAGO*, 39, 47-60. doi:10.1509/jmkr.39.1.47.18930
- Demir, B., Sayinci, B., Çetin, N., Yaman, M. ve Çömlek, R. (2019). Shape Discrimination of Almond Cultivars by Elliptic Fourier Descriptors. *Erwerbs-Obstbau*, 61(3), 245-256. doi:10.1007/s10341-019-00423-7
- Desha, C., Kenny, J., Kumar, A. ve Hargroves, K. (2012). Using biomimicry to inform urban infrastructure design that addresses 21st century needs. Conference: 1st

International Conference on Urban Sustainability and Resilience, sunulmuş bildiri.

Deshpande, V. S., Ashby, M. F. ve Fleck, N. A. (2001). Foam topology: Bending versus stretching dominated architectures. *Acta Materialia*, 49(6), 1035-1040. doi:10.1016/S1359-6454(00)00379-7

Doczi, G. (1981). *The Power of Limits: Proportional Harmonies in Nature, Art, and Architecture*. Shambhala Publications.

Du, F. ve Tan, T. (2021). Recent Studies in Mechanical Properties of Selected Hard-Shelled Seeds: A Review. *JOM*, 73(6), 1723-1735. doi:10.1007/s11837-021-04688-w

Du Plessis, A., Broeckhoven, C., Yadroitsava, I., Yadroitsev, I., Hands, C. H., Kunju, R. ve Bhate, D. (2019). Beautiful and Functional: A Review of Biomimetic Design in Additive Manufacturing. *Additive Manufacturing*, 27, 408-427. doi:10.1016/j.addma.2019.03.033

Du, Y., Gu, D., Xi, L., Dai, D., Gao, T., Zhu, J. ve Ma, C. (2019). Laser additive manufacturing of bio-inspired lattice structure: Forming quality, microstructure and energy absorption behavior. *Materials Science and Engineering: A*, 773, 138857. doi:10.1016/j.msea.2019.138857

Duan, S., Tao, Y., Lei, H., Wen, W., Liang, J. ve Fang, D. (2018). Enhanced out-of-plane compressive strength and energy absorption of 3D printed square and hexagonal honeycombs with variable-thickness cell edges. *Extreme Mechanics Letters*, 18, 9-18. doi:10.1016/j.eml.2017.09.016

- Duarte, I., Peixinho, N., Andrade-Campos, A. ve Valente, R. (2018). Special Issue on Cellular Materials. *Science and Tecnology of Materials*, 30(1), 1-3. doi:10.1016/j.stmat.2018.05.001
- Ergene, B. (2020). *Eklemeli İmalat İle Titanyum Ve Polimer Esaslı Malzemelerden Üretilen Hücresel Yapıların Mekanik Davranışlarının DeneySEL Olarak Araştırılması*. (Yayımlanmamış doktora tezi). Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Isparta.
- Ertaş, D. G. (2007). *Yapısal Özelliklerin Endüstri Ürünleri Tasarımına Etkileri*. (Yayımlanmamış doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Flores-Johnson, E. A., Carrillo, J. G., Zhai, C., Gamboa, R. A., Gan, Y. ve Shen, L. (2018). Microstructure and mechanical properties of hard *Acrocomia mexicana* fruit shell. *Scientific Reports*, 8, 9668. doi:10.1038/s41598-018-27282-8
- Gibson, L. J. (2003). Cellular Solids. *MRS Bulletin*, 28(4), 270-274. doi:10.1557/mrs2003.79
- Gibson, Lorna J. ve Ashby, M. F. (1997). *Cellular Solids: Structure and Properties*. Cambridge University Press.
- Gülcan, O. (2021a). Eklemeli İmalatla Üretilen Kafes Yapılar. *Makina Tasarım Ve İmalat Dergisi*, 19(2), 53.
- Gülcan, O. (2021b). Eklemeli İmalatla Üretilen Kafes Yapıların Mekanik Özellikleri. *Makina Tasarım Ve İmalat Dergisi*, 19(1), 17.
- Gülcan, O. (2021c). Eklemeli İmalatla Üretilen Kafes Yapıların Mekanik Özellikleri Üzerine Etki Eden Faktörler. *Makina Tasarım Ve İmalat Dergisi*, 19(2), 64.

- Harshit K., D., Shilpesh, R. R., Naushil, H. P., Shalin, J. D., Kumar S., S., Siddharth, S. T., ... Khyati, V. S. (2019). Compressive Strength of Pla Based Scaffolds: Effect of Layer Height, Infill Density and Print Speed. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, XI(1), 21-27.
- Hedayati, R., Sadighi, M., Mohammadi-Aghdam, M. ve Zadpoor, A. A. (2016). Effect of mass multiple counting on the elastic properties of open-cell regular porous biomaterials. *Materials & Design*, 89, 9-20. doi:10.1016/j.matdes.2015.09.052
- Helou, M. ve Kara, S. (2018). Design, analysis and manufacturing of lattice structures: An overview. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 31(3), 243-261. doi:10.1080/0951192X.2017.1407456
- Hız, A. (2019). *Antalya Koşullarında Özel Ağaçlandırma Arazisinde Yetiştirilen Bazı Badem Çeşitlerinin Fenolojik, Biyolojik Ve Pomolojik Özelliklerinin Belirlenmesi*. (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Antalya.
- Jain, P. ve Kuthe, A. M. (2013). Feasibility Study of Manufacturing Using Rapid Prototyping: FDM Approach. *Procedia Engineering*, The Manufacturing Engineering Society International Conference, MESIC 2013, 63, 4-11. doi:10.1016/j.proeng.2013.08.275
- Karabetça, A. R. (2016, Mayıs). *Biyomimikri destekli mekan tasarım ölçütleri ve bu ölçütlerin örnekler üzerinde incelenmesi*. Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, İstanbul.
- Kaş, M. (2019, Nisan). *Geçişli Gözenekli Yapılar İçin Seçici Lazerle Ergitme Yöntemine Yönelik Geometri Tasarımı, Üretimi Ve Karakterizasyonu*. (Yayımlanmamış yüksek lisans tezisi). Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

- Kuznetsov, V. E., Solonin, A. N., Urzhumtsev, O. D., Schilling, R. ve Tavitov, A. G. (2018). Strength of PLA Components Fabricated with Fused Deposition Technology Using a Desktop 3D Printer as a Function of Geometrical Parameters of the Process. *Polymers*, 10(3), 313. doi:10.3390/polym10030313
- Küçükdevlet, E. (2006). *Prototip Badem Kirma Makinesinin Tasarımı, İmalatı Ve Kirma Verimliliğinin Araştırılması*. (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Levy, G. N., Schindel, R. ve Kruth, J. P. (2003). Rapid Manufacturing and Rapid Tooling with Layer Manufacturing (lm) Technologies, State of the Art and Future Perspectives. *CIRP Annals*, 52(2), 589-609. doi:10.1016/S0007-8506(07)60206-6
- Li, X., Liu, Y., Hao, J. ve Wang, W. (2018). Study of Almond Shell Characteristics. *Materials*, 11(9), 1782. doi:10.3390/ma11091782
- Liu, W., Song, H., Wang, Z., Wang, J. ve Huang, C. (2019). Improving mechanical performance of fused deposition modeling lattice structures by a snap-fitting method. *Materials & Design*, 181, 108065. doi:10.1016/j.matdes.2019.108065
- Maconachie, T., Leary, M., Lozanovski, B., Zhang, X., Qian, M., Faruque, O. ve Brandt, M. (2019). SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges. *Materials & Design*, 183, 108137. doi:10.1016/j.matdes.2019.108137
- Nazir, A., Mekonen, K., Kumar, A. ve Jeng, J.-Y. (2019). A state-of-the-art review on types, design, optimization, and additive manufacturing of cellular structures. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104. doi:10.1007/s00170-019-04085-3

- Neff, C., Hopkinson, N. ve Crane, N. B. (2018). Experimental and analytical investigation of mechanical behavior of laser-sintered diamond-lattice structures. *Additive Manufacturing*, 22, 807-816. doi:10.1016/j.addma.2018.07.005
- Özdoğan, M. (2015, Aralık). *Biyosüreç: Doğadan İlham Alan Tasarım Süreçleri İçin Sistematik Bir Yöntem Önerisi Ve Uygulaması*. (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Özsolak, O. (2019). Eklemeli İmalat Yöntemleri Ve Kullanılan Malzemeler.
- Öztoprak, Z. (2020). Yaşamın İlkeleri ile Kenti Yeniden Düşünmek: Biyomimikri Temelli Bir Yaklaşım. *İdealkent Kent Araştırmaları Dergisi*, 11(Kentleşme ve Ekonomi Özel Sayısı), 1180-1204.
- Parlakç1, H. (2008). *Yabancı Kökenli Değişik Badem Çeşitlerinin Bazi Pomolojik Ve Kimyasal Özellikleri İle Bitki Besin Maddesi Kapsamlarının Belirlenmesi*. (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa.
- Popescu, D., Zapciu, A., Amza, C., Baci, F. ve Marinescu, R. (2018). FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review. *Polymer Testing*, 69, 157-166. doi:10.1016/j.polymertesting.2018.05.020
- Radwan, Gehan. A. N. ve Osama, N. (2016). Biomimicry, an Approach, for Energy Efficient Building Skin Design. *Procedia Environmental Sciences*, Improving Sustainability Concept in Developing Countries (ISCDC), 34, 178-189. doi:10.1016/j.proenv.2016.04.017

- Ruhl, E. ve Dixon, D. (2019). 3D printed objects do not impact the behavior of a coral-associated damselfish or survival of a settling stony coral. *PLOS ONE*, 14, e0221157. doi:10.1371/journal.pone.0221157
- Savio, G., Rosso, S., Meneghello, R. ve Concheri, G. (2018). Geometric Modeling of Cellular Materials for Additive Manufacturing in Biomedical Field: A Review. *Applied Bionics and Biomechanics*, 2018, 1654782. doi:10.1155/2018/1654782
- Selçuk, S. ve Sorguç, A. (2007). Mimarlik Tasarimi Paradigmasında Biomimesis'in Etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22(2), 451-459.
- Selçuk, S., Sorguç, A. ve Akan, A. (2009). Altın Oranla Tasarlamak: Doğada, Mimarlıkta Ve Yapısal Tasarımda Φ Dizini. *Trakya University Journal of Natural Sciences*, 10(2), 149-157.
- Senosiain, J. (2013). *Bio-Architecture*. Routledge.
- Smith, M., Cantwell, W., Guan, Z., Tsopanos, S., Theobald, M., Nurick, G. ve Langdon, G. (2011). The quasi-static and blast response of steel lattice structures. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 13, 479-501. doi:10.1177/1099636210388983
- Sonego, M., Fleck, C. ve Pessan, L. A. (2020). Hierarchical levels of organization of the Brazil nut mesocarp. *Scientific Reports*, 10(1). doi:10.1038/s41598-020-62245-y
- Speck, T. ve Speck, O. (2008). *Process sequences in biomimetic research*. *WIT Transactions on Ecology and the Environment* (C. 114, s. 11). doi:10.2495/DN080011

- Sürmen, H. K. (2019). Eklemeli İmalat (3b Baskı): Teknolojiler Ve Uygulamalar. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 24(2), 373-392. doi:10.17482/uumfd.519147
- Tan, H. ve Qu, S. (2010). Impact of Cellular Materials. H. Altenbach ve A. Öchsner (Ed.), *Cellular and Porous Materials in Structures and Processes* içinde , CISM Uluslararası Mekanik Bilimler Merkezi (ss. 309-334). Vienna: Springer. doi:10.1007/978-3-7091-0297-8_6
- Tang, Y. ve Zhao, Y. F. (2016a). Effect of mass multiple. *Rapid Prototyping Journal*, 22(3), 569-590. doi:10.1108/RPJ-01-2015-0011
- Tang, Y. ve Zhao, Y. F. (2016b). A survey of the design methods for additive manufacturing to improve functional performance. *Rapid Prototyping Journal*, 22(3), 569-590. doi:10.1108/RPJ-01-2015-0011
- Taniguchi, N., Fujibayashi, S., Takemoto, M., Sasaki, K., Otsuki, B., Nakamura, T., ... Matsuda, S. (2016). Effect of pore size on bone ingrowth into porous titanium implants fabricated by additive manufacturing: An in vivo experiment. *Materials Science and Engineering: C*, 59, 690-701. doi:10.1016/j.msec.2015.10.069
- Tao, W. ve Leu, M. (2016). *Design of lattice structure for additive manufacturing* (s. 332). doi:10.1109/ISFA.2016.7790182
- Tath, O. (2020). *ÜÇ BOYUTLU YAZICI TASARIMI, İMALATI VE DOLGU GEOMETRİSİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ*. (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Vincent, J. (2001). Stealing Ideas from Nature, 51-58. doi:10.1007/978-3-7091-2584-7_3

- Wahl, D. (2006). *Bionics vs. biomimicry: From control of nature to sustainable participation in nature* (s. 298). doi:10.2495/DN060281
- Wally, Z. J., Haque, A. M., Feteira, A., Claeysens, F., Goodall, R. ve Reilly, G. C. (2019). Selective laser melting processed Ti6Al4V lattices with graded porosities for dental applications. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 90, 20-29. doi:10.1016/j.jmbbm.2018.08.047
- Wang, S., Wang, J., Xu, Y., Zhang, W. ve Zhu, J. (2020). Compressive behavior and energy absorption of polymeric lattice structures made by additive manufacturing. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 15(2), 319-327. doi:10.1007/s11465-019-0549-7
- Wang, X., Xu, S., Zhou, S., Xu, W., Leary, M., Choong, P., ... Xie, Y. M. (2016). Topological design and additive manufacturing of porous metals for bone scaffolds and orthopaedic implants: A review. *Biomaterials*, 83, 127-141. doi:10.1016/j.biomaterials.2016.01.012
- Wauthle, R., Vrancken, B., Beynaerts, B., Jorissen, K., Schrooten, J., Kruth, J.-P. ve Van Humbeeck, J. (2015). Effects of build orientation and heat treatment on the microstructure and mechanical properties of selective laser melted Ti6Al4V lattice structures. *Additive Manufacturing*, 5, 77-84. doi:10.1016/j.addma.2014.12.008
- Yalçın, B. ve Ergene, B. (2017). Endüstride Yeni Eğilim Olan 3-B Eklemeli İmalat Yöntemi Ve Metalurjisi. *SDU International Journal of Technological Science*, 9(3).
- Yang, J., Jin, X., Gao, H., Zhang, D., Chen, H., Zhang, S. ve Li, X. (2020). Additive manufacturing of trabecular tantalum scaffolds by laser powder bed fusion:

Mechanical property evaluation and porous structure characterization. *Materials Characterization*, 170, 110694. doi:10.1016/j.matchar.2020.110694

Yıldız, H. (2012). *Endüstri Ürünleri Tasarımı Kapsamında Biyomimetik Tasarımın Yeri Ve Metodolojisi*. İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ, İSTANBUL.

Zari, M. P. (2007). Biomimetic approaches to architectural design for increased sustainability. *Sustainable Building Conference (SB07), Auckland, New Zealand*, (33), 1-10.

İnternet Kaynakları

- 1- <https://listelist.com/altin-oran-nedir/>, Erişim Tarihi (04.01.2023)
- 2- <https://listelist.com/altin-oran-nedir/>, Erişim Tarihi (04.01.2023)
- 3- <https://www.hubs.com/knowledge-base/types-of-3d-printing/>, Erişim Tarihi (04.01.2023)
- 4- <https://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/ecoblog/ilopmon/files/2017/10/pe-landintecno-2eso-t3-estructuras.pdf>, Erişim Tarihi (22.10.2023)
- 5- https://asknature.org/?s=&page=1&hFR%5Bpost_type_label%5D%5B0%5D=Biological%20Strategies&hFR%5Btaxonomies_hierarchical.function.lvl0%5D%5B0%5D=Protect%20From%20Physical%20Harm%20%3E%20Manage%20Structural%20Forces%20%3E%20Manage%20Compression&is_v=1, Erişim Tarihi (22.10.2023)
- 6- https://www.almonds.com/sites/default/files/what_to_consider_almond_varieties__1_1.pdf, Erişim Tarihi (22.10.2023)