



T.C.
ALANYA ALAADDİN KEYKUBAT ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLMİŞ HÜCRESEL BOŞLUKLU
SANDVIÇ YAPILARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

Siril YILDIZ

Danışman

Doç. Dr. Fatih DARICI

ALANYA

2024

T.C.
ALANYA ALAADDİN KEYKUBAT ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLMİŞ HÜCRESEL BOŞLUKLU SANDVIÇ
YAPILARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Yüksek Lisans Tezi

Siril YILDIZ
Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği

Danışman
Doç. Dr. Fatih DARICIK

ALANYA
(2024)

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilemeyen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programıyla tarandığını ve “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara razı olduğumu bildiririm.

Siril YILDIZ

05.01.2024

TEŞEKKÜR SAYFASI

Tez çalışma sürecimde desteğini esirgemeyen bilgi ve tecrübelerinden sürekli yararlandığım, tezin her aşamasında sabırla çalışmalarımı yönlendirip yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Fatih DARICIK' a teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca çalışmalarımnda her konuda sabırla yardımcı olan pozitif desteğini esirgemeyen eşime, çalışmama izin veren küçük kızlarım Eliz ve Doğa'ya teşekkürlerimi ve sevgilerimi sunarım.



ÖZET

EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLMİŞ HÜCRESEL BOŞLUKLU SANDVİÇ YAPILARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Siril YILDIZ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü,

Ocak, 2024 (54 Sayfa)

Eklemeli imalat yöntemleri kalıp tasarımı ve masraflarına gerek kalmadan prototip ve nihai ürün eldesi sağlamaktadır. Eklemeli imalat yöntemleri ile karmaşık geometriler yüksek boyutsal hassasiyet ile üretilebilmektedir. Diğer yandan hücreli boşluklu sandviç yapılar yüksek özgül dayanımları ile mühendislik uygulamalarında tercih edilmektedir. Hücreli boşlukların şekli ve her bir ayrıntının ölçüsü nihai ürün özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Bu noktada eklemeli imalat yöntemlerinin üretimdeki esnekliği, yüksek hassasiyeti ve tek adımda ürün elde edilebilirliği öne çıkmaktadır. Katı tasarım yazılımlar ile oluşturulmuş farklı geometriye sahip hücreli boşluklu yapılar 3D baskı yöntemi sayesinde tek seferde etkileyici kombinasyona sahip üretimler yapılabilmektedir.

Bu tez çalışmasında altıgen hücreli, silindirik hücreli ve öksetik hücreli geometriye sahip sandviç yapı tasarlanmıştır. Tasarımlarda hücre et kalınlığı ve hücre yüksekliği, toplam sandviç yüksekliği sabit kalmak şartıyla değiştirilmiştir. Bu sandviç yapı tasarımları kullanılmış ve Stereolitografi (SLA) eklemeli imalat yöntemiyle numuneler üretilmiştir. Üretilen numuneler ile çekme, üç nokta eğme ve basma deneyleri yapılmış ve dayanım değerleri bulunmuştur. Sonuçlar numune ağırlığına bölünerek özgül dayanım değerleri karşılaştırılmıştır.

Hücre geometrisinden bağımsız olarak sandviç yapının hücre yüksekliği arttıkça özgül çekme dayanımı azalmaktadır. Aynı zamanda et kalınlığı düşük olan numuneler daha yüksek özgül çekme dayanımına sahiptir. Altıgen ve silindirik geometrili sandviç yapılar en yüksek özgül eğme dayanımını göstermiştir. Et kalınlığı yüksek olan numunelerde daha yüksek özgül eğme dayanımı gözlemlenmiştir. Hücre yüksekliği arttıkça eğme dayanım değerleri artmıştır. Altıgen ve silindirik hücreli sandviç yapılarda et kalınlığı düşük olan numunelerde en yüksek basma dayanımı görülürken öksetik hücreli yapılarda et kalınlığı yüksek numunelerde daha yüksek basma dayanımı

gözlenmiştir. Hücre yüksekliği arttıkça tüm hücre geometrilerinde basma dayanım değerleri azalmaktadır.

Anahtar Sözcükler: Eklemeli İmalat, Stereolitografi, Bal Petegi, Sandviç Yapılar, Mekanik dayanım



ABSTRACT

INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF CELLULAR SANDWICH STRUCTURES PRODUCED BY ADDITIVE MANUFACTURING

Siril YILDIZ

Department of Mechanical Engineering

Graduate School of Alanya Alaaddin Keykubat University,

January, 2024 (54 pages)

Additive manufacturing methods provide prototypes and final products without the need for mold design and costs. Complex geometries can be produced with high dimensional precision with additive manufacturing methods. On the other hand, cellular hollow sandwich structures are preferred in engineering applications due to their high specific strength. The shape of the cellular spaces and the size of each detail directly affect the final product properties. At this point, the flexibility, high precision and single-step product availability of additive manufacturing methods in production come to the fore. Cellular hollow structures with different geometries created with solid design software can be produced with an impressive combination of 3D printing and production precision in one go.

In this thesis study, a sandwich structure with hexagonal cell, cylindrical cell and euxetic cell geometry was designed. Cell wall thickness and cell height were changed in the designs, provided that the total sandwich height remained constant. These cell designs were used and samples were produced using the Stereolithography (SLA) additive manufacturing method. Tensile, three-point bending and compression tests were carried out with the produced samples and strength values were found. Specific strength values were compared by dividing the results by the sample weight.

Regardless of the cell geometry, the specific tensile strength of the sandwich structure decreases as the cell height increases. At the same time, samples with low wall thickness have higher specific tensile strength. Sandwich structures with hexagonal and cylindrical geometry showed the highest specific bending strength. Higher specific bending strength was observed in samples with higher wall thickness. As the cell height increased, bending strength values increased. In sandwich structures with hexagonal and cylindrical cells, the highest compressive strength was observed in samples with low wall thickness, while in euxetic cell structures, higher compressive strength was

observed in samples with high wall thickness. As the cell height increases, compressive strength values decrease in all cell geometries.

Keywords: Additive Manufacturing, Stereolithography, Honeycomb, Sandwich Structures, Mechanical Strength



İÇİNDEKİLER

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	i
TEŞEKKÜR SAYFASI.....	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
TABLolar LİSTESİ.....	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	xi
5. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR	3
2.1. Sandviç Yapıların Statik Yük Altında Dayanımı.....	3
2.2. Eklemeli Üretilmiş Sandviç Yapıların Dayanımı	7
3. MATERYAL VE YÖNTEM	14
3.1. Materyal	14
3.1.1. Foto duyarlı epoksi reçine.....	14
3.1.2. Sandviç kompozit malzeme tasarımı	14
3.2. Üretim Yöntemi ve Deneyisel Yöntem.....	16
3.2.1. Numunelerin üretim yöntemi.....	16
3.2.2. Deneyisel yöntemler	18
3.2.2.1 Çekme deneyi.....	18
3.2.2.2 Üç nokta eğme deneyi	20
3.2.2.3 Basma deneyi	21
3.3. Parametreler	22
4. BULGULAR.....	26
4.1. Çekme Deneyi Sonuçları	26
4.2. Üç Nokta Eğme Deneyi Sonuçları	32
4.3. Basma Deneyi Sonuçları	41
5. TARTIŞMA, SONUÇ VE ÖNERİLER.....	47
KAYNAKLAR	48
ÖZGEÇMİŞ	54

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 3.1 Epoksi reçinenin fiziksel özellikleri	14
Tablo 3.2 Çekme deneyi numuneleri için hücre ölçüleri ve levha kalınlığı	23
Tablo 3.3 Üç nokta eğme ve basma numuneleri için hücre ölçüleri ve levha kalınlığı .	23
Tablo 3.4 Basma numunelerinin et kalınlıklarına göre yüzey alanları	24
Tablo 3.5 Deney numunelerin ağırlıkları	24



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1 Kafes malzemesi literatüründe dikkate alınan ortak hücre geometrileri (6)	2
Şekil 3.1 a) Altıgen hücresel yapı b) Silindirik hücresel yapı c) Öksetik hücresel yapı	15
Şekil 3.2 Sandviç yapının bölümleri.....	15
Şekil 3.3 a) Anycubic Mono SE 3 boyutlu yazıcı, b) Anycubic yıkama ve kürleme makinası	17
Şekil 3.4 SLA yöntemiyle numune üretimi	17
Şekil 3.5 Çekme numuneleri ve üst levha numuneleri	18
Şekil 3.6 ASTM D638-4 standardı çekme numune boyutları	19
Şekil 3.7. Besmak E-Serisi 10 kN üniversal test cihazı ve çekme testi.....	19
Şekil 3.8 Öksetik hücreli, altıgen hücreli, silindirik hücreli 3 nokta eğme numuneleri .	20
Şekil 3.9 Üç nokta eğme testi	20
Şekil 3.10 Silindirik hücreli, altıgen hücreli, öksetik hücreli basma numuneleri.....	21
Şekil 3.11 Basma testi uygulanma anı.....	22
Şekil 3.12 Sandviç yapı bileşenlerinin ebatlarını gösteren semboller	23
Şekil 4.1 Çekme testi yük-yerdeğiştirme grafiği	26
Şekil 4.2 Çekme deneyi sonrası numuneler.....	27
Şekil 4.3 Altıgen hücreli sandviç yapıda hücre yüksekliğine göre özgül çekme dayanımı değişimi.....	28
Şekil 4.4 Silindirik hücreli sandviç yapıda hücre yüksekliğine göre özgül çekme dayanımı değişimi.....	28
Şekil 4.5 Öksetik hücreli sandviç yapıda hücre yüksekliğine göre özgül çekme dayanımı değişimi.....	29
Şekil 4.6 Et kalınlığı 0,5 mm olan hücre geometrilerinin özgül çekme dayanım grafiği	30
Şekil 4.7 Et kalınlığı 0,75 mm olan hücre geometrilerinin özgül çekme dayanım grafiği	30
Şekil 4.8 Et kalınlığı 1 mm olan hücre geometrilerinin özgül çekme dayanım grafiği..	31
Şekil 4.9 Üç nokta eğme testi kuvvet-yerdeğiştirme grafiği	32
Şekil 4.10 Üç nokta eğme deneyi sonrası numuneler.....	33
Şekil 4.11 Altıgen hücreli sandviç yapıda hücre yüksekliğine göre özgül eğme dayanım grafiği.....	33

Şekil 4.12 Silindirik hücreli sandviç yapıda hücre yüksekliğine göre özgül eğme dayanım grafiği	34
Şekil 4.13 Öksetik hücreli sandviç yapıda hücre yüksekliğine göre özgül eğme dayanım grafiği.....	35
Şekil 4.14 Altıgen hücreli sandviç yapıda hücre yüksekliğine göre levhaların özgül eğme dayanımı	35
Şekil 4.15 Silindirik hücreli sandviç yapıda hücre yüksekliğine göre levhaların özgül eğme dayanımı	36
Şekil 4.16 Öksetik hücreli sandviç yapıda hücre yüksekliğine göre levhaların özgül eğme dayanımı	37
Şekil 4.17 Et kalınlığı 0,5 mm olan numunelerin özgül eğme dayanım grafiği.....	37
Şekil 4.18 Et kalınlığı 0,75 mm olan numunelerin özgül eğme dayanım grafiği.....	38
Şekil 4.19 Et kalınlığı 1 mm olan numunelerin özgül eğme dayanım grafiği.....	39
Şekil 4.20 Et kalınlığı 0,5 mm olan numunelerde levhaların özgül eğme dayanımı.....	39
Şekil 4.21 Et kalınlığı 0,75 mm olan numunelerde levhaların özgül eğme dayanımı....	40
Şekil 4.22 Et kalınlığı 1 mm olan numunelerde levhaların özgül eğme dayanımı.....	40
Şekil 4.23 Basma testi kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	42
Şekil 4.24 Basma yükü altında hücre duvarlarının mikro burkulması	42
Şekil 4.25 Basma deneyi sonrası numuneler	42
Şekil 4.26 Altıgen hücreli sandviç yapıda hücre yüksekliğine göre basma dayanımı değişimi.....	43
Şekil 4.27 Silindirik hücreli sandviç yapıda hücre yüksekliğine göre basma dayanımı değişimi.....	43
Şekil 4.28 Öksetik hücreli sandviç yapıda hücre yüksekliğine göre basma dayanımı değişimi.....	44
Şekil 4.29 Et kalınlığı 0,5 mm olan hücre geometrilerinin basma dayanım grafiği.....	44
Şekil 4.30 Et kalınlığı 0,75 mm olan hücre geometrilerinin basma dayanım grafiği.....	45
Şekil 4.31 Et kalınlığı 1 mm olan hücre geometrilerinin basma dayanım grafiği.....	46

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Simgeler

<i>H</i>	Dikey dikmelerin uzunluğu, mm
<i>L</i>	Yeniden giriş dikmelerinin uzunluğu, mm
<i>θ</i>	Yeniden giriş açısı
<i>S</i>	İki mesnet arası mesafe, cm
<i>R</i>	Hücre çapı, mm
<i>t</i>	Hücre et kalınlığı, mm
<i>d</i>	Sandviç panel kalınlığı, mm
<i>b</i>	Sandviç yapı genişliği, mm
<i>c</i>	Hücre yüksekliği, mm
<i>h</i>	Levha kalınlığı, mm
<i>P</i>	Kuvvet, N
<i>Δ</i>	Yerdeğiştirme, mm

Kısaltmalar

SLA	Stereolitografi
FEA	Sonlu Elemanlar Analizi
ABS	Akrilonitril Bütadiyen Stiren
PLA	Polilaktit
PUR	Poliüretan
FRP	Fiber Takviyeli Plastik
EYM	Eriyik Yığılma Modelleme
SLM	Seçici Lazer Ergitme
FDM	Fused Depositin Modelling

5. GİRİŞ

Hücresel malzemeler gözenekli veya içi boş malzemeler olarak kabul edilmektedir. Doğada birçok malzemenin hücresel bir yapısı vardır; mantar, tahta, sünger ve trabeküler kemik doğadaki hücresel katıların örnekleridir. Mühendislik ürünü hücresel boşluklu yapılar ve köpükler polimerlerden, metallere, seramiklerden ve camlardan yapılmaktadır. Hücresel yapıları onlara yüksek mukavemet ve düşük yoğunluk gerektiren uygulamalarda benzersiz özellikler kazandırmaktadır. Bundan dolayı hücresel kafesler yapılarına kasıtlı olarak entegre edilmiş boşluklara sahip malzemelerdir (1).

Sandviç malzemeler boşluklu dolgu malzemesinin alt ve üst levhalar ile birleştirilmesi ile üretilen hafif yapı bileşenleridir. Sandviç malzemeler genellikle levha formunda kullanılırken bazı uygulamalarda kiriş elemanı olarak da kullanılır. Sandviç malzemelerde dolgu katmanlarında düzgün altıgen bal peteği formundaki boşluklar en çok tercih edilen hücre tipidir. Bununla birlikte silindirik, kare, yıldız ve öksetik formda hücre içeren dolgu yapılar da kullanılmaktadır. Günümüzde sandviç malzemeler havacılık, deniz, otomobil, rüzgâr türbinleri ve inşaat sektörlerinde kullanılmaktadır. Sandviç yapılar kullanım alanına göre tasarımcılara yüksek esneklik modülü, ısı ve ses yalıtımı, darbe enerjisi absorbe kabiliyeti ve dinamik etkileri sönmeme kabiliyeti sunmaktadır(2,3).

Sandviç yapıların imalatında çeşitli hücre geometrileri ve farklı hücre malzemeleri kullanılmaktadır. Hücre kafesi kullanımı, yüksek basınç dayanımı, hasar toleransı ve düşük nem emilimi gibi özellikleriyle uygulamalarda sandviç yapılara büyük önem kazandırmaktadır(4). Hücresel kafes yapısı ve yüzey levhası malzemeleri uygulamalara ve istenilen performanslara bağlı olarak değiştirilerek istenilen özelliğe sahip sandviç yapılar elde etmek mümkündür (5).

Farklı geometriye sahip hücreler ile elde edilen gözenekli yapılar mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır. En yaygın kullanılan hücresel yapılar altıgen ve silindirik hücre geometrisine sahiptir. Özellikle bal peteği dolgu alüminyum sandviç yapılar yaygın kullanıma sahip ticari ürünlerdir (6).

2D Lattice Topologies								
Cell Geometry	Cell Name	Reference	Cell Geometry	Cell Name	Reference	Cell Geometry	Cell Name	Reference
	Square (Pack of cells)	Alethea, 2004; Côté, et.al., 2006		Optimized Ground Truss (Pack of cells)	Sigmund, 1994		Optimized Ground Truss (single cell)	Sigmund, 1994
	Rectangular (Pack of cells)	Alethea, 2004		Optimized Ground Truss (Pack of cells)	Sigmund, 1994		Negative Poisson's ratio (Pack of cells)	Sigmund, 1994
	Mixed (square-triangle) (Pack of cells)	Alethea, 2004		Optimized Ground Truss (Pack of cells)	Sigmund, 1994		Negative poisson ratio (single cell)	Sigmund, 1994
	Hexagonal (Pack of cells)	Christensen, 2000		Optimized Ground Truss (Pack of cells)	Sigmund, 1994		Triangular-Triangular (Pack of cells)	Hutchinson, 2004
	Kagome (Pack of cells)	Christensen, 2000		Star (Pack of cells)	Christensen, 2000		Triangular (Pack of cells)	Hutchinson, 2004
	Diamond lattice	Côté, et.al., 2006		Truss triangular plate	Evans, E.G., et.al., 2001		Truss triangular plate	Prud'homme, C., et.al., 2002

Şekil 0.1 Kafes malzemesi literatüründe dikkate alınan ortak hücre geometrileri (6)

Sandviç yapılarda hücre malzemesi, hücre geometrisi ve hücre ebatları, sandviç yapının mekanik özellikleri açısından önemli etkiye sahiptir ve sandviç yapının temelini oluşturmaktadır. Bundan dolayı sandviç yapılarda kullanılan hücre geometrisinin, hücre boyutları değişiminin, statik yükleme altında sandviç yapının mekanik özelliklerini nasıl etkilediğinin araştırılmasına ait çalışmalar son yıllarda giderek artmaktadır.

Bu tez kapsamında da eklemeli imalat yöntemlerinden stereolitografi (SLA) kullanılarak üretilen bal peteği hücre yapılı sandviç kompozitlerin mekanik davranışları üzerinde, hücre geometrisi, hücre et kalınlığı ve hücre yüksekliği etkisi araştırılmıştır. Bu değerlendirmeyi yapabilmek amacıyla 0.5 mm, 0.75 mm, 1 mm et kalınlığa sahip altıgen, silindirik, öksetik balpeteği yapılı hücreye ve 1 mm, 1.75 mm, 2.5 mm levhalara sahip sandviç numuneler Autocad programında tasarlanmıştır. Bu tasarım sırasında, çekme, basma, üç nokta eğme test standartları esas alınmış olup, Anycubic SLA 3D yazıcıda deney numunelerinin üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada hücre geometrisi ve hücre parametrelerinin sandviç yapının dayanımına ve hasar mekanizmasına etkileri araştırılmıştır.

2. LİTERATÜR

2.1. Sandviç Yapıların Statik Yük Altında Dayanımı

Gözenek yapısının belirli bir geometriye tabi olduğu hücreli boşluklu yapılar dayanım ve hafifliği aynı anda makine tasarımcılarına sunmaktadır. Hücreli boşluklu yapıların hücre geometrisi, hücre duvar kalınlığı, hücre yüksekliği, kullanılan malzemenin mekanik özellikleri hücreli boşluklu malzemelerle üretilen sandviç kompozitlerin mekanik özelliklerini belirlemektedir. Hücreli boşluklu sandviç kompozitlerin alt ve üst levhaları da sandviç kompozitin mekanik özelliklerine etki etmektedir. Hücreli sandviç yapıların mekanik özelliklerini modellemek için hem matematiksel modelleme hem sonlu elemanlar analizi (FEA) hem de deneysel yöntemler kullanarak birçok çalışma yapılmıştır.

Fiedler ve Öchsner, alüminyum malzemeden üretilmiş bal peteği hücreli, küresel hücreli, alüminyum köpük dolgu sandviç yapıların eğilme rijitliğini ve eğilme dayanımını araştırmışlardır. Araştırmacılar en yüksek özgül rijitliğin ve dayanımın bal peteği hücreli sandviç yapı tarafından sağlandığını tespit etmişlerdir (7). Paik vd., bu test çalışmasında alüminyum bal peteği hücreli sandviç yapılarının dayanımı için üç nokta eğme testi uygulamışlardır. Yapılan çalışmada bal peteği hücresinin yüksekliğinin artmasıyla plastik deformasyonun başlamasının gecikebileceği ve bunun sonucunda mukavemetin artabileceği gözlemlenmiştir (8). Wang vd., bu çalışmada alüminyum bal peteği hücreli sandviç yapının hücre et kalınlığının ve hücre yoğunluğunun değişiminin mekanik özelliklere etkisini incelenmişlerdir. Üç nokta eğme deneyi sonucunda yoğunluk veya kalınlık artırılarak malzeme mukavemeti arttığı ancak yoğunluk veya kalınlıktaki değişikliklerle birlikte sertliğin, mukavemetten daha fazla değiştiğini tespit etmişlerdir (9). Akkuş vd., altıgen geometrili bal peteği hücreli sandviç yapıların hücre genişliği ve hücre yüksekliğinin değiştirilmesinin mekanik özelliklere etkisini incelemişlerdir. Hücre genişliği değiştirilmeden hücre yüksekliği artırıldığında eğilme kuvvetinde bir artış meydana geldiği hücre yüksekliği azaldığında eğilme kuvvetinde azalma olduğu tespit etmişlerdir (10). Arbaoui vd., üç nokta eğme testi altında polipropilen petek malzemeli kompozit kaplamalı ve çok katmanlı sandviç yapının mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çoklu hücreler için kayma özelliklerinin hesaplanmasına olanak sağlayan teorik bir model geliştirilmiştir. Kompozit katmanlı yapıların mekanik özelliklerinin hücre ve ara katmanların kalınlığının artması ile arttığını gözlemlemişlerdir. Levha hücre ayrılması ve hücrelerin kayması ile oluşturulan

modelde meydana gelen başlıca sıkıntılar olduğunu tespit etmişlerdir. (11). Deshpande vd., sekizli-kafes yapıların mekanik özelliklerini deneysel ve sonlu elemanlar hesaplamaları yoluyla incelemişlerdir. Sekizli-kafes, kafes malzemesinin kübik simetrisi ile ilişkili üç bağımsız modül için analitik ifadeler türetmişlerdir. Kafes yapıların dayanımında ve sertliğinde esnemenin önemli kriter olduğunu tespit etmişler ve hafif tasarımlarda sekizli kafes yapının üretim kolaylığı ve mukavemet açısından tercih sebebi olacağı sonucuna varmışlardır (12). Belouettar vd., alüminyum ve aramid elyaf malzemeler kullanılarak üretilen bal peteği hücreli sandviç numunelerin statik ve yorulma özelliklerini belirlemek için dört nokta eğme testi uygulamışlardır. Çatlak oluşumunun numunelerin tüm uzunluğu boyunca yüksek kesme gerilmelerinin olduğu bölgede ve numunenin ortasında başladığını tespit etmişlerdir (13). Arbaoui vd., bu çalışmada iki adet yüksek sertlikte cam/polyester ince yüzey tabakasının, daha az mukavemet ve sertlik ile karakterize edilen düşük yoğunluklu bir polipropilen bal peteği çekirdeği ile yapıştırılması sonucu oluşturulan sandviç numunelerin mekanik özelliklerini dört nokta eğme testi ve sonlu elemanlar analizi ile incelemişlerdir. Tek katmanlı yapıya kıyasla çok katmanlı hücre kafesinin ön yüzey gerilimi, hücre kayması ve bükülme sertliği gibi parametrelerin mekanik özellikler üzerinde olumlu etkisi olduğunu tespit edilmişlerdir (14). Alavi vd., beş farklı hücre geometrisine sahip alüminyum bal peteği hücreli sandviç yapılarda köpük dolgusunun sandviç yapının deformasyon ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin yanı sıra hücre boyutu, hücre duvarı kalınlığı ve sandviç kalınlığının ortalama ezilme mukavemetine etkilerini incelemişlerdir. Sandviç yapılarda köpük dolgusunun, ortalama ezilme mukavemetini ve enerji emme kapasitesini %300'e kadar arttırdığı ve hücre boyutu büyük, hücre duvarı kalınlığı ince, dolgusuz sandviç yapıların ortalama ezilme mukavemetlerinin daha düşük olduğu tespit etmişlerdir (15). Gpoichand vd., bu tez çalışmasında paslanmaz çelik kaplamalı bakır malzemeli petek sandviç yapının üç farklı yük (2kN, 5kN, 7kN) altında ve üç farklı hücre yüksekliğinde (5mm, 10mm ve 15mm) mekanik özelliklerinin tespiti için üç nokta eğme testi uygulamışlardır. Deney sonuçlarına göre hücre yüksekliği arttıkça gerilim değerlerinin azaldığı ve stresin düşük olduğunu gözlemlemişlerdir (16). Akkuş vd., farklı hücre boyutları ve farklı yapıştırıcılar ile üretilen alüminyum petek malzemeli sandviç yapıların eğilme kuvvetlerine etki eden parametreleri, üç nokta eğme testi uygulayarak araştırmışlardır. Kuvvet faktörüne etki eden parametreleri etki derecesine göre hücre genişliği, hücre yüksekliği ve yapıştırıcı olarak sıralamışlardır (17). Prakash vd., hücre boyutunun, fiber takviyeli plastik (FRP)

malzemeli altıgen hücreli sandviç yapıların hücre kayma modülü ve kayma mukavemeti üzerindeki etkisini üç nokta eğme testi yaparak incelemişler ve hücre malzemesi farklı yoğunlukta poliüretan (PUR) köpükten üretilmiş altıgen hücreli sandviç yapılarla karşılaştırmışlardır. Deney sonuçlarına göre hücre boyutundaki artışa bağlı olarak hücre kafesinin kayma modülünde artış olduğu ve FRP petek sandviç yapının hücre kafesi kayma modülü PUR içeren sandviç yapılara karşılaştırıldığında çok daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir (18). Hou vd., farklı et kalınlıklarına, iç hücre açılara ve en-boy oranlarına sahip öksetik bal peteği sandviç yapılara üç nokta eğme testi uygulayarak mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Sabit hücre duvarı en-boy oranına sahip açı-gradyan konfigürasyonları içinde degrade dolgulu sandviç yapılar en yüksek spesifik kritik yüke, kayma modülüne ve bükülme sertliğine sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Hücre açısı, hücre geometrisi ve hücre malzemesinin seçimine dayalı olarak sandviç yapının mekanik özelliklerini ayarlamanın ve kontrol etmenin mümkün olduğu görülmüştür (19).

Petek hücre yapısının basınç kuvvetine karşı mukavemeti, sandviç panellerin birçok uygulamasında etkili bir faktördür. Buna göre peteklerin geometrik parametrelerinin ağırlığına ve basınç dayanımına etkisi tasarımda önemli bir yere sahiptir. Petek kompozit yapıların mekanik özelliklerini araştırmak ve etkin kullanımları için istenilen standartları sağlamak amacıyla literatürde deneysel ve sonlu elemanlar analizi ile birçok çalışmalar yapılmıştır. Dang vd., bu tez çalışmasında ince ve kalın et kalınlığında hücrelere sahip öksetik bal peteği sandviç numunelerin mekanik özelliklerini tespit etmek için basma deneyi uygulamışlardır. Uygulanan deneylerde hücre et kalınlığının incelmesinin deformasyonu arttırdığını gözlemlemişlerdir (20). Zang vd., alüminyum malzemeli altıgen bal peteği hücreli sandviç yapılarda altıgenin tepe açısını değiştirerek elde ettiği numunelerin ezilme davranışını araştırmışlardır. Tepe açısının değişiminin basma dayanımına kayda değer etkisi olmadığını tespit etmişlerdir (21). Khoshravan vd., alüminyum bal peteği sandviç yapıların hücre et kalınlığı ve hücre boyutu gibi geometrik parametrelerin etkisini basma deneyi ve sayısal analizlerle incelemişlerdir. Hücre boyutunun azalmasının ve hücre et kalınlığının artmasının peteklerin basma dayanımının artmasına neden olduğu belirlemişlerdir (22). Bang vd., alüminyum köpük ve alüminyum malzemeli bal peteği hücreli sandviç yapıların, malzemelerin mukavemet özelliklerine etkisini deneysel sonuçlarını sonlu elemanlar analiz sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Basma testi sonucunda numunelerin

özgül ağırlıklarını göz önüne alındığında alüminyum bal peteği hücreli sandviç yapıların mukavemetinin alüminyum köpük malzemeli sandviç yapılardan daha iyi olduğu sonucuna varmışlardır (23). Akkuş vd., nano partiküllerle güçlendirilmiş epoksi yapıştırıcı kullanılarak üretilen alüminyum bal peteği hücreli sandviç yapıların mekanik dayanımını araştırmışlardır. Basma testi sonucunda saf epoksi ile yapıştırılan sandviç yapılara göre %1 karbon nanotüp eklenmiş yapıştırıcı ile yapıştırılan bal peteği sandviç yapıların mukavemet dayanımının daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir (24). Aslan vd., beş farklı levha malzemesinden ve üç farklı hücre kafesi malzemelerinden oluşan sandviç kompozit yapıların mekanik özelliklerini eğme ve basma testi uygulayarak araştırmışlardır. Elde edilen deney verilerine göre eğilme ve basma deney sonuçları açısından hücre kafesi malzemelerinin levha malzemelerine göre sandviç yapının mekanik özelliklerini daha fazla etkilediğini tespit etmişlerdir (25). Akkuş, bu tez çalışmasında Alüminyum malzemeden dört farklı hücre genişliği, iki farklı hücre yüksekliği ve iki farklı yapıştırıcı kullanılarak üretilen sandviç numunelerin mekanik özelliklerini deneysel ve sonlu elemanlar analiz yöntemiyle incelemiştir. Basma testi sonucunda hücre genişliği arttırıldığında basma numunelerinde hücre levha ayrılması hasar mekanizması tespit edilmiştir. Hücre levha ayrılmasından kaynaklıda kuvvette düşüş meydana geldiği görülmüştür. Üç nokta eğme testi sonucunda hücre genişliği azalmasından dolayı boşluklarda meydana gelen basınçtan dolayı kuvvet değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir (26). Taşkesen, alüminyum malzemeli bal peteği geometrilili hücre kafesi ile karbon fiber yüzey malzemelerine sahip sandviç yapıların darbe testi sonrası basma davranışlarını deneysel olarak incelemiştir. Hasarsız numunelerin, darbe testi ile ön hasar verilmiş numunelere göre basma dayanımı daha yüksek olduğu ve hücre yüksekliğinin arttıkça basma hasar yükünün azaldığı görülmüştür (27). Shi vd., karbon fiber levha ve alüminyum bal peteği hücre geometrisine sahip sandviç yapılarda yapışmanın mukavemet performansına etkisini eğme ve basma deneyleriyle incelemiştir. Karbon fiber yüzey levhası ile alüminyum bal peteği hücre kafesi arasında kevlar fiber arayüzey reçine kullanılarak yapıştırılmış numuneler üretmişlerdir. Güçlendirilmiş reçine kullanılmayan numunelerde, levha hücre kafesi arayüzünde büyük ölçekli ayrılmalı bükülme meydana gelirken fiber takviyeli reçineli kullanılan numunelerde üst ve alt karbon fiber malzemeli levhalar ile hücre kafesi arasında ayrılma olmadan bükülme meydana gelmiştir. Bu nedenle, güçlendirilmiş reçine kullanılmış sandviç numunelerde yapısal performansındaki herhangi bir iyileşmenin yalnızca ara yüzey bağlantısındaki iyileşmeden kaynaklandığını tespit etmişlerdir (28). Gül, karbon

elyaf takviyeli bal peteği geometrili sandviç yapıların mekanik özelliklerine sıcaklığın, hücre malzemesi türünün ve hücre kalınlığının etkisini basma, darbe, üç nokta eğme deneyleri uygulayarak araştırmıştır. Sıcaklığın, hücre malzeme türünün ve hücre kalınlığının eğilme dayanımı üzerinde önemli parametreler olduğunu ve hücre kafes yüksekliğinin artışıyla deformasyon miktarının arttığını tespit etmiştir (29). Arslan ve Kaman, bu çalışmada kıvrırma yöntemi altıgen bal peteği hücre üretimi gerçekleştirmişlerdir. Farklı malzemeler kullanarak hücre ebatlarını ve hücre et kalınlıklarını değiştirerek sandviç yapıların mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Basma deneyi sonucunda elde edilen kuvvet yer değiştirme grafikleri incelenmiş ve basma yükü altında maksimum kuvvet değerleri tespit edilmiş, hücre boyunca hasarlar meydana geldiği görülmüştür. Alüminyum malzemeden üretilmiş sandviç numunelerde ise hücre çapı arttıkça çökme miktarı arttığı tespit edilmiştir.(30). Liu vd., nomex bal peteği hücre geometrisine sahip numuneleri enine yükleme altında malzeme ve mekanik özelliklerini incelemek için çekme ve basma deneylerine tabi tutmuşlardır. Sandviç yapının mukavemet değerlerinin çekme yüklemesinde basma yüklemesinden daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Bu durumun sebebinin ise ince hücre duvarlarından kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Bal peteği sandviç yapısında meydana gelen hasarın nedeni ise reçinenin gevrek kırılmasından kaynaklandığı tespit edilmiştir (31). Cote vd., gerçekleştirdikleri bu çalışmada prizmatik oluklu ve elmas hücreli kafes yapısını paslanmaz çelik levhalarla lehimleyerek oluşturdukları sandviç yapının kesme ve basma davranışlarını deneysel ve sayısal yöntemler ile araştırmışlardır (32). Kıyak vd., fiber kompozit malzemeden üretilen hücre boşluğu poliüretan köpük ile doldurulan ve doldurulmayan kare geometrili hücre yapısına sahip sandviç yapıların mekanik dayanımlarını, hasar davranışlarını araştırmak için basma ve üç nokta eğme testi uygulamışlardır. Basma testi sonucunda köpük ile doldurulmuş numunelerde çatlaklar meydana gelirken köpüksüz numunelerde bütün hücre boyunca kırılmalar oluştuğunu, eğme testi sonucunda ise yüzey levha ayrılması meydana gelmiş devamında kırılmalar oluştuğunu tespit etmişlerdir (33).

2.2. Eklemeli Üretilmiş Sandviç Yapıların Dayanımı

Sandviç yapıların üretiminde eklemeli üretim yöntemlerinin kullanılması birçok avantajlar sağlamaktadır. Bu avantajların en önemlisi, hücre ebatlarını ve geometri şekillerini değiştirerek, geniş kapsamda farklı tasarımlar oluşturulmasına imkân sağlayabilmesidir (34). Eklemeli üretimdeki son gelişmeler ile hassaslıkla karmaşık

geometriye sahip kompleks parçalar veya çok küçük boyutlarda parçalar bilgisayar tasarım programları kullanılarak tasarlanıp üretilmeye başlanmıştır (3). Bu tez kapsamının konusu ile alakalı olarak literatürdeki eklemeli imalat yöntemlerini içeren çalışmalarda farklı hücre tipleri, hücre ebatları ve yüzey özellikleri değiştirilerek tasarlanan sandviç yapıların mekanik özelliklerinin tespit edilmesi için birçok araştırma yapılmış ve bazı örnekler aşağıda sunulmuştur.

Solmaz ve Çelik, bu çalışmada farklı termoplastik malzeme kullanılarak eklemeli imalat yöntemi ile 3 farklı hücre boyutunda ve 3 farklı hücre yüksekliğinde üretilen bal peteği hücre geometrili kompozit levha tabakasına sahip sandviç yapılara basma deneyi uygulayarak mekanik dayanımlarını ve hasar mekanizmaları tiplerini incelenmiştir. Elde edilen deney sonuçlarına göre hücre yoğunluğu arttıkça hücrelerin kayma rijitliklerinin ve levhaların eğme dayanımının arttığı tespit etmişlerdir. Burkulma yükünün hücre yüksekliği ile ters orantılı olduğu hücre yüksekliği ile doğru orantılı olduğu sonucuna varmışlardır (35). Öztürk, bu tez çalışmasında FDM yöntemi kullanarak bal peteği, girintili, yıldız ve üçgen hücreli 4 farklı hücre geometrisine sahip sandviç yapı tasarlanmıştır. Basma, üç nokta eğme ve çarpışma testi ile en iyi mekanik özelliklere sahip sandviç yapı araştırmıştır. Deneyler sonucunda sandviç yapıların mekanik özelliklerinde hücre yapısının önemli bir parametre olduğu tespit edilmiş, girintili sandviç yapının tüm testler sonucunda en iyi model olduğu sonucuna varılmıştır (36). Choy vd., Seçici Lazer Ergitme (SLM) eklemeli üretim yöntemi ile bal peteği hücreli ve kübik hücreli kafes yapılarına sahip numuneler üretmişlerdir. Kafes yapılarının yoğunluğunu ve yapı yönünü değiştirerek deformasyon şekli ve mekanik özellikleri incelemişlerdir. Basma testi sonucunda yoğunluğun eşit dağıldığı numunelerde kafes numunesinin tamamının çatlamasıyla birlikte ani kesme kırılması meydana geldiği buna karşın yoğunluğun yukarıdan aşağıya doğru arttığı numunelerde en az yoğun katmandan en yoğun katmana doğru çatlama başladığını tespit etmişlerdir (37). Al-Ketan vd., eklemeli imalat yöntemlerinden toz yatağı füzyonu kullanılarak maraging çeliğinden üretilen; kelvin, octet-truss ve gibson-ashby hücre geometrilerine sahip numunelerin deformasyon tipleri araştırmışlardır. Basma testi sonucunda maksimum gerilmeden hemen sonra kayma bantlarının oluşması, yatay katmanların kırılması ve her katmanın deforme olduğu üç ana deformasyon mekanizması gözlemlenmiştir. Kelvin ve gibson-ashby dikme tabanlı geometrili numuneler karışık bir deformasyon modu sergilerken, octet-truss ise kayma bantlarının oluştuğu tek bir

deformasyon gösterdiği tespit edilmiştir (38). Ingrole vd., FDM eklemeli üretim yöntemi ile üretilmiş farklı hücre geometrilerine sahip numunelerin şekil değişimi, hata mekanizmaları ve mekanik performanslarını belirlemek için basma deneyi uygulamışlardır. Bütün sandviç numuneler hücre boyunca deformasyon göstermiştir. Öksetik hücreli numunelerde deformasyon şeklinde önce dikme hücreler sonra petek hücreler çökmüştür, petek hücrelerinde ise birbirine bağlı olmadığında hücre çöküşü en son olmuştur bu nedenle dayanımı daha yüksek tespit edilmiştir. Hücre geometrisinin mekanik özelliklerde en önemli parametre olduğunu tespit etmişlerdir (39). Kaur vd., FDM eklemeli imalat yöntemi ile polilaktit (PLA), naylon 618 ve karbon fiber takviyeli PLA malzemeleri kullanılarak üretilen oktet ve oktahedral geometriye sahip hücre kafes yapıların mekanik dayanımları belirlemek için basma deneyi uygulamışlardır. Dayanımı en yüksek hücre geometrisi oktahedral hücreli kafes yapısında tespit etmişlerdir. Stresin düğüm noktalarında yoğunlaştığı ve bu durumun düğüm noktalarını kırılmanın başladığı zayıf noktalar haline getirdiği görülmüş ve düğümlerdeki maksimum gerilim değeri oktahedral yapıda oktete göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir (40). Yang vd., eklemeli imalat yöntemiyle üretilen 3 boyutlu öksetik hücreli kafes yapıların mekanik özelliklerini tespit etmek için basma deneyi uygulamışlardır. Bu çalışmada birim hücre yapısının tasarıma etki eden dikey dikmelerin uzunluğu H yeniden giriş dikmelerinin uzunluğu L , yeniden giriş açısı θ ve hücre et kalınlığı t parametrelerinin yapının mekanik özelliklerini önemli düzeyde etkilediği tespit edilmiştir (41). Ercan, üç boyutlu eklemeli imalat yöntemiyle altı farklı hücre geometrili farklı izafi yoğunlukta hücre kafesleri üretmiştir. Karbon fiber levhaları hücre kafeslerine epoksi ile yapıştırılarak sandviç yapılar elde etmiştir. Üretilen bu sandviç yapıların mekanik özelliklerini incelemek için basma ve eğme testleri uygulamıştır. En yüksek basma dayanımı ve elastisite modülü hücre geometrisi dikey truss, dikey bal peteği ve kübik hücreli sandviç numunelerde, en yüksek maksimum eğme kuvveti de kübik hücreli sandviç numunede gözlemlenmiştir. Ayrıca izafi yoğunluğu arttırmanın mekanik özellikleri belirli ölçüde arttırdığını tespit etmiştir. Karbon fiber levhanın kullanılmasının eğme kuvvetini ciddi oranda arttırdığı sonucuna ulaşmıştır (42). Habib vd. eklemeli imalat yöntemi ile poliamid 12 malzemesi kullanılarak altı farklı hücre geometrisine sahip numunelere yarı statik basma testi uygulayarak elastikiyet modülünü, mekanik dayanımları ve enerji sönmüleme kabiliyetlerini araştırmışlardır (43). Güler, eklemeli imalat destekli dereceli hassas döküm yöntemi ile düz ve kaydırmalı altıgen geometrilere sahip balpeteği kafes yapılarının, hücre çapının ve kaydırma geometriye sahip bal peteği yapının mekanik

özelliklerini incelemiştir. Farklı hücre çaplarında 50 x 50 x 50 mm boyutlarında üretilen numunelere X, Y ve Z yönlerinde basma testleri uygulamışlardır. Basma testi verilerine göre her eksenel yönde hücre çapı küçük olan numunelerin basma gerilmesi daha yüksek olduğu tespit edilmiş ve hücre geometrilerinden ise en yüksek basma gerilmesi değeri kaydırmalı altıgen geometrilili balpeteği yapıda tespit etmişlerdir (44).

Bir kısım araştırmacılarda hücresel boşluklu sandviç kompozitlerin düzlemsel çekme özelliklerini deneysel araştırmışlardır. Yeşiloğlu vd., bu çalışmada eklemeli imalat yöntemlerinden eriyik yığma modelleme (EYM) yöntemi kullanılarak PLA malzemeden üretilen gyroid, cross, octet hücreli sandviç yapıların mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Hücre oranı arttıkça çekme elastikiyet modülünün arttığı, basma elastisite modülü ve akma dayanım değerlerinin azaldığını belirlemişlerdir. En yüksek çekme dayanım değeri octet hücre geometrilili sandviç yapı da elde edilirken, en fazla şekil değişimi cross hücre geometrilili sandviç yapısında tespit etmişlerdir (45). Bacak vd., üç boyutlu yazıcı kullanarak üretilen kübik hücreli, grid hücreli, tringle hücreli dolgulu kafes numunelerin farklı baskı hızı, farklı doluluk oranları ve farklı nozul sıcaklıklarını değiştirilerek mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Çekme testi sonucunda hücre geometrilerinin etkisi incelendiğinde en yüksek dayanım grid hücreli kafes yapısında tespit etmişlerdir (46). Karakoç ve Uzun, %20 doluluk oranında düz çizgili, dönel çizgili ve bal peteği geometrilili tasarlanan numuneleri yatay ve dikey olarak üç boyutlu yazıcıda üretmişlerdir. PLA malzemeden üretilen numunelerin mekanik özelliklerini incelemek için çekme testi uygulamışlardır. En yüksek çekme dayanımına sahip numuneler dikey dönel çizgili numunelerde görülürken en düşük çekme dayanımı ise yatay düz çizgili numunelerde tespit etmişlerdir (47). Panda vd., FDM teknolojisi kullanılarak üretilen farklı hücre boyutlarına ve duvar kalınlıklarına sahip altıgen petek sandviç numunelerin mekanik özelliklere etkisini deneysel olarak incelemişlerdir (48). Evlen vd., üç boyutlu yazıcıda PLA ve PET malzemelerden 4 farklı doluluk oranlarında hazırlanmış çizgi kafes dolgu geometrilerine sahip numunelere çekme deneyi uygulamışlardır. Deneysel çalışmanın sonucunda her iki malzeme ile üretilen numunelerde doluluk oranının çekme deneyi değerlerini etkilemediği sonucuna varmışlardır. PET malzemeli numunelerde sertlik, çekme ve pürüzlülük değerlerinin birbiriyle bağlantılı aynı yönde mekanik özellikler gösterdiği, PLA malzemeli numunelerde ise pürüzlülük ve sertliğin doğru orantılı olduğu çekme mukavemeti değerinin ise azaldığı tespit etmişlerdir (49).

Kamer vd., iki farklı malzeme kullanarak farklı yazdırma hızlarında üç boyutlu yazıcıda aynı parametrelerde üretilen numunelerin mekanik özelliklerini incelemek için çekme testi uygulamışlardır. Çekme testi verilerine göre oluşturulan grafikler incelendiğinde en yüksek çekme dayanımına sahip numunelerin PLA malzeme ile üretilen numunelerde, en yüksek kopma uzamasına sahip numunelerinde ABS malzeme ile üretilen numunelerde olduğunu tespit etmişlerdir (50). Karaman ve Çolak, eriyik biriktirme yöntemiyle oryantasyon açısı ve doluluk oranları değiştirilerek üretilen numunelerin mekanik özellikleri araştırmışlardır. Çekme testi sonucunda bu iki değişkenin mekanik özelliklerin belirlenmesinde önemli parametre olduğu görmüşlerdir. Doluluk oranı arttıkça çekme mukavemetinde ve elastisite modülünde artış meydana geldiğini tespit etmişlerdir (51). Fernandez-Vicente vd., bu çalışmada üç boyutlu yazıcı ile üretilen farklı dolgu yoğunluğuna ve farklı hücre geometrilerine sahip sandviç yapılara çekme testi uygulamışlardır. Yüksek yoğunlukta ve küçük gözenekli hücre yapısında yüksek çekme mukavemeti tespit etmişlerdir. Aynı yoğunluk altında, farklı desenler arasındaki çekme mukavemeti %5'ten az olmasına rağmen, en yüksek gerilme mukavemeti altıgen bal peteği yapısında olduğu görülmüştür.(52).

Günümüzde özellikle eğilme mukavemetinin önemli olduğu uygulamalarda farklı geometrilere sahip sandviç yapılar sıklıkla kullanılmaktadır (53). Yüzey levhaların temel amacı yüksek atalet momentini korumak olduğundan hafif yapılı hücre kafesiyle karşılaştırıldığında, yüzey levhaları hem çekme hem de basma açısından güçlü ve serttir. Eğilme yüklemesi altında, yüzey levhaları bir kuvvet çifti oluşturmak için birlikte hareket eder; burada sandviç yapıların üst kısmında basma gerilmesi meydana gelirken alt kısımda ise çekme gerilmesi meydana gelmektedir. Hem çekme gerilmesi hemde basma gerilmesi altındaki numuneler eğilme halindedir (54,55) Üç nokta eğme testi ile ilgili bazı çalışmalar aşağıda sunulmuştur.

Kaboğlu, üç boyutlu yazıcılardan birisi olan Fused Deposition Modelling (FDM) yöntemi ile hücre kalınlığı ve öksetik hücreler arası mesafe değiştirilerek üretilen öksetik bal peteği sandviç yapıların mekanik özelliklerinin tespiti için üç nokta eğme testi uygulamıştır. Bu tez çalışmasında sandviç numunelerde mekanik dayanım açısından öksetik hücrelerin tasarımında hücre mesafelerinin sandviç numunenin kalınlığından daha önemli kriter olduğu sonucuna varılmıştır (56). Li ve Wang, üç boyutlu yazıcıda üretilmiş truss hücreli, bal peteği hücreli ve öksetik hücreli petek yapılar ile dört farklı malzemedan üretilmiş yüzey levhaların epoksi ile yapıştırılarak

elde edilen sandviç yapıların mukavemeti ve eğilme rijitliği özelliklerinin tespiti için üç nokta eğme testi uygulamışlardır. Truss hücreli sandviç yapının en yüksek eğme dayanımına ve rijitliğe sahip olduğu tespit edilmiştir (57). Indreş vd., FDM yöntemi ile üretilen altıgen hücreli, öksetik hücreli ve kiral hücreli sandviç yapıların mekanik dayanımı, hasar etkisi, eğilme sertliği özelliklerinin tespit edilmesi için üç nokta eğme testi uygulamışlardır. Tüm numuneler için hücre geometrileri farklı olduğundan kütle/hücre alanı hesaplamışlardır. Başlangıç sertliği, maksimum kuvvet ve emilen enerji değerleri her bir sandviç türünün kütlesine bölünerek hesaplamışlardır. Bal peteği hücre yapısının 266 N/mm ile en yüksek sertliğe sahip olduğu tespit edilmiştir (58). Farooq vd., 3D baskı yöntemiyle üretilen petek sandviç numuneleri 100°C ile 130°C sıcaklıklarda iki saat kürledikten sonra üç noktalı eğme testi uygulamışlardır. Yük-yer değiştirme eğrilerinden, kürleme sıcaklığı arttıkça tepe yük değerinin arttığı ve kürleme parametrelerindeki herhangi bir değişikliğin, bal peteği sandviç yapıların mekanik performansını ciddi şekilde etkilediğini tespit etmişlerdir (59). Yazdani Sarvestani vd. gerçekleştirdikleri bu çalışmada 3D baskı yöntemiyle üretilen öksetik hücreli, kübik hücreli, oktet hücreli, izomaks hücreli sandviç yapıların mekanik davranışlarını araştırmak için üç nokta eğme, çekme ve düşük hızlı darbe testleri uygulamışlardır. Üç nokta eğme deneyi verilerine göre hücre geometrileri karşılaştırıldığında, oktet ve Isomax hücreli sandviç yapıların kübik veya öksetik hücreli sandviç yapılara göre daha iyi performans sergilediğini sonucuna ulaşmışlardır. Öksetik hücreli sandviç yapının darbe enerjisi ve mekanik özelliklerinin diğer hücreli sandviç yapılara kıyasla daha düşük olduğunu tespit etmişlerdir (34). Tatlı, bu tez çalışmasında PLA malzemeden üç boyutlu yazıcıda beş farklı iç dolgu geometrisinde üretilen numunelerde iç dolgu geometrisinin mekanik özelliklere etkisini incelemiştir. Dolgu geometrilerindeki farklılıkların çekme gerilmesi değerlerini ve eğme gerilme değerlerini ciddi şekilde etkilerken darbe enerjisi değerlerinde önemli bir etkisi bulunmadığını sonucuna ulaşmıştır (60). Kafkaslıoğlu Yıldız vd., SLA üretim tekniği kullanılarak üretilen kare, üçgen, dairesel hücre geometrilerine sahip Al₂O₃ malzemeden üretilen petek sandviç yapıların bağlayıcı atmosferin (hava veya nitrojen) etkisi de dahil olmak üzere yoğunlaşması ve mekanik özellikleri araştırmışlardır. Üç nokta eğme testi sonucu mukavemet değerleri kare ve üçgen hücre geometrileri için benzer olduğu, dairesel hücre geometrisinde ise en düşük dayanıma sahip olduğunu tespit etmişlerdir (61). Chacón vd., bu çalışmada FDM tekniği kullanılarak 3 boyutlu yazıcı ile üretilen PLA numunelerinin yapı şekli, katman kalınlığı ve ilerleme hızının mekanik özelliklere

etkisini değerlendirmek için çekme ve üç nokta eğme testleri uygulamışlardır. Dik üretilen numunelerin, daha düşük mukavemet ve sertlik performansıyla birlikte katmanlar arası hasar sergilediğini, düz üretilen numunelerin ise en yüksek mekanik özelliklere sahip olduğunu tespit etmişlerdir (62).

Literatürde bulunan çalışmalar incelendiğinde geleneksel imalat yöntemleri veya eklemeli imalat yöntemleri ile üretilmiş bal peteği sandviç yapıların, hücre geometrilerinin ve mekanik özelliklerinin araştırılmasıyla ilgili birçok deneysel çalışmalar yapıldığı görülmüştür. Literatür araştırması ile eklemeli imalat yöntemlerinden SLA (Stereolithography) yöntemi kullanılarak üretilmiş sandviç yapıların statik yük altında dayanımının araştırıldığı çalışma olmadığı görülmüştür. Bu tez kapsamında SLA yöntemiyle üretilen hücresel boşluklu sandviç yapıların hücre et kalınlığı, hücre yüksekliği, levha kalınlıkları ve hücre geometrileri değişken parametre olarak belirlenmiştir. Sandviç yapıların statik yük altında çekme, eğme ve basma dayanımları araştırılmıştır. Elde edilen veriler ile parametrelere göre yapı dayanımının değişimini gösteren grafikler oluşturulmuştur. Değişken olarak belirlenen parametrelerin mekanik dayanım üzerine etkisi araştırılmıştır. Sandviç yapıların statik yük altındaki hasarı gözlemlenmiş ve hasar mekanizmaları incelenmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Foto duyarlı epoksi reçine

Bu tez çalışmasında tasarlanan sandviç numuneler termoset epoksi reçineden imal edilmiştir. Termoset malzemeler erime sıcaklığı üzerine ısıtılıp soğutulduğunda kalıcı olarak sert hale gelen malzemelerdir ve tekrar kullanılamazlar. Termoset malzemeler termoplastiklere göre daha yüksek sıcaklıklara çıkmasıyla ve daha yüksek mukavemet göstermesiyle dikkat çekmektedir fakat geri dönüşümleri olmadığından ve ısıtma soğutma esnasında kimyasal değişimlere uğramadığından dolayı termoplastik malzemeler gelişen teknoloji karşısında termoset malzemelerin yerini almaktadır. Termoset grubuna ait bazı örnekler: Epoksiler, polyesterler, vinil ester ve fenolik reçine matrislerdir (63).

Günümüzde en çok kullanılan termoset reçineler arasında en iyi mukavemet gösteren reçine epoksilerdir (29). Epoksi reçineler üstün mekanik özelliklere, yüksek yapışma mukavemetine, kürlenme sırasında düşük büzülme oranına, yüksek ısı direncine sahip malzemeler olarak birçok avantajlar sunmaktadır. Kimyasal maddelere oldukça dayanıklı olan reçineler kullanıldığı yerlerde uzun süre bozulmadan dayanabilir bu nedenle aşınmalara karşı dirençli ve uzun ömürlüdür. (55)

Bu çalışmada tüm numuneler Dokuz Kimya A.Ş.'den tedarik edilen Alias Model Standart foto duyarlı epoksi reçine ile üretilmiştir. Epoksi reçinelerin fiziksel özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir (64).

Tablo 3.1 Epoksi reçinenin fiziksel özellikleri

Malzeme Özelliği	Birim	
Viskozite, 25 °C	cPs	-350
Gerilme Dayanımı	MPa	-50
Kopmadaki Uzama	%	-10
Yoğunluk	g/cm ³	1.1
Sertlik	Shore D	80

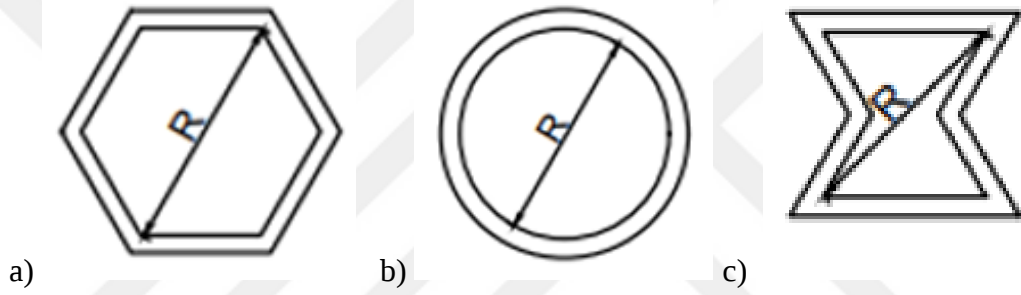
3.1.2. Sandviç kompozit malzeme tasarımı

Bu çalışmada üç farklı hücre geometrisi tasarlanmıştır. Tasarlanan hücre geometrileri altıgen, silindirik ve öksetik yapılardır. Hücre boşluğunda birbirine en uzak

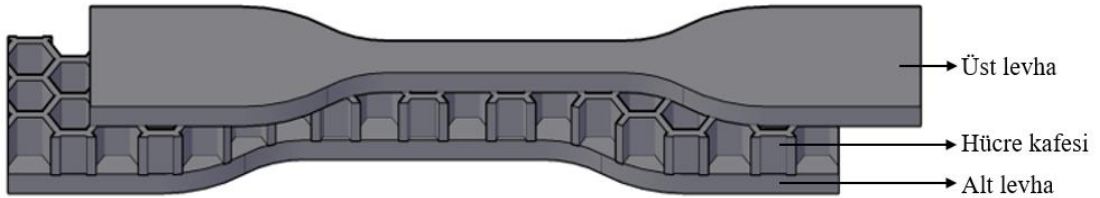
olan noktalar arası (R) üç geometride de 6 mm olarak sabit tutulmuş Şekil 3.1’de hücre geometrileri gösterilmiştir.

. Sandviç yapılar üç bölümden oluşmaktadır. Bu bölümler Şekil 3.2’de gösterildiği gibi yüksek mukavemetli alt ve üst levhalar ile hafif hücre kafesinden meydana gelir. Yüzey levhaları serttir, hücre kafesi ise zayıf ve esnektir. Ancak bir araya gelip sandviç yapı oluşturulduğunda sert güçlü ve hafif bir yapı meydana gelir (65).

Tasarlanan numunelerin hücre çapı (R) ve toplam yükseklik (d) sabit tutularak hücre yükseklikleri (c), et kalınlıkları (t) ve levha yükseklikleri (h) değiştirilerek sandviç kompozit numuneler tasarlanmıştır.



Şekil 3.1 a) Altıgen hücreli yapı b) Silindirik hücreli yapı c) Öksetik hücreli yapı



Şekil 3.2 Sandviç yapının bölümleri

Sandviç kompozit yapılarda yüzey levhaları eğme dayanımı gösterirken, hücre kafesi bölümü ise kesme kuvvetlerini iletir (66). Sandviç yapılarda eğilme durumunda alt ve üst yüzey levhaları çekme ve basma gerilmelerine maruz kalırken hücre kafesi ise kayma gerilmelerine maruz kalır bu durum sayesinde sandviç yapının kuvvet altında dayanımı artmaktadır (42).

Sandviç yapılarda levhalar zayıf ve esnek olan hücre kafesiyle birleşerek güçlü mukavemet, daha yüksek çekme eğme basma ve kesme dayanımları gibi mekanik özellikleri sandviç yapıya kazandırır (67).

3.2. Üretim Yöntemi ve Deneysel Yöntem

3.2.1. Numunelerin üretim yöntemi

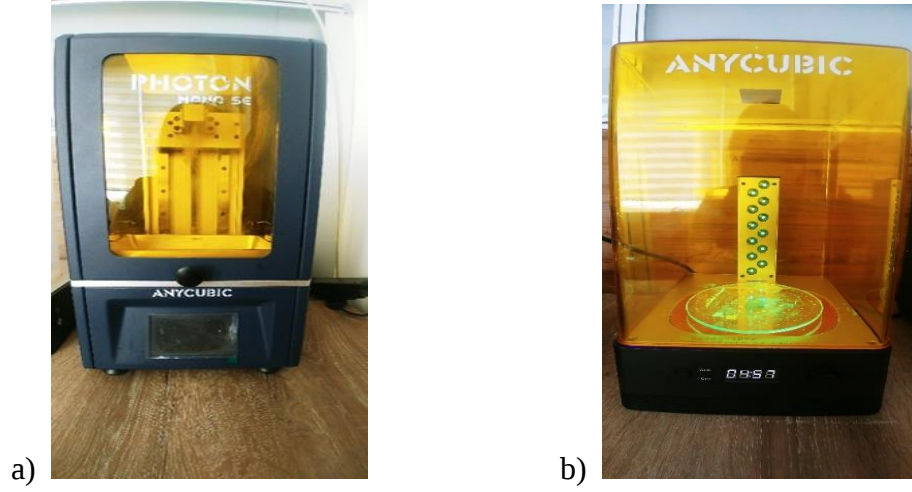
Stereolitografi (SLA) baskı, reçine (termoset) kullanılarak yüksek çözünürlüklü ve detaylı 3 boyutlu parçaların üretilmesine olanak sağlayan bir baskı yöntemidir. Yapı platformu, epoksi reçine dolu tankın içine, tankı film yüzeyinin hemen üstünde olacak şekilde konumlandırılmıştır. Daha sonra polimer reçinenin tabla üzerine yazılım programıyla aktarılan tasarımın ilk katmanı UV ışık lazeri ile sertleştirip katılaştırarak oluşturulur ve modelin tamamı ışıkla kürlenir. Bu şekilde üretilen katman tamamen katılır. Daha sonra platform yukarı çıkar ve aynı işlem diğer katmanlar için tekrarlanır. Katmanlar tamamlandıktan sonra parçanın bulunduğu tabla reçine yüzeyinden ayrılır yukarıya çıkar.

Yıkama işlemi sonrasında parçanın sertleşmesi gerekmektedir. Ayrıca polimerin, özelliklerini değiştiren ve sertleştiren ultraviyole ışınlarına maruz bırakılması da gereklidir. Kürleme işlemi güneş ışığı ile yapılabileceği gibi kürleme makinesi ile de yapılabilir. Kürleme ve yıkama işlemi aynı makinede gerçekleşir. Sadece aparatları birbirinden farklıdır. Kürleme makinesi, parçanın her tarafına ulaşacak şekilde çevirerek kurutur ve UV ışık çubuğu parçayı sanki bir fırınmış gibi sertleştirir.

Numunelerin üretimini gerçekleştirmek için Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi bünyesinde bulunan Anycubic Mono SE üç boyutlu yazıcı (Şekil 3.3.a) ve Anycubic yıkama ve kürleme cihazı (Şekil 3.3.b) kullanılmıştır.

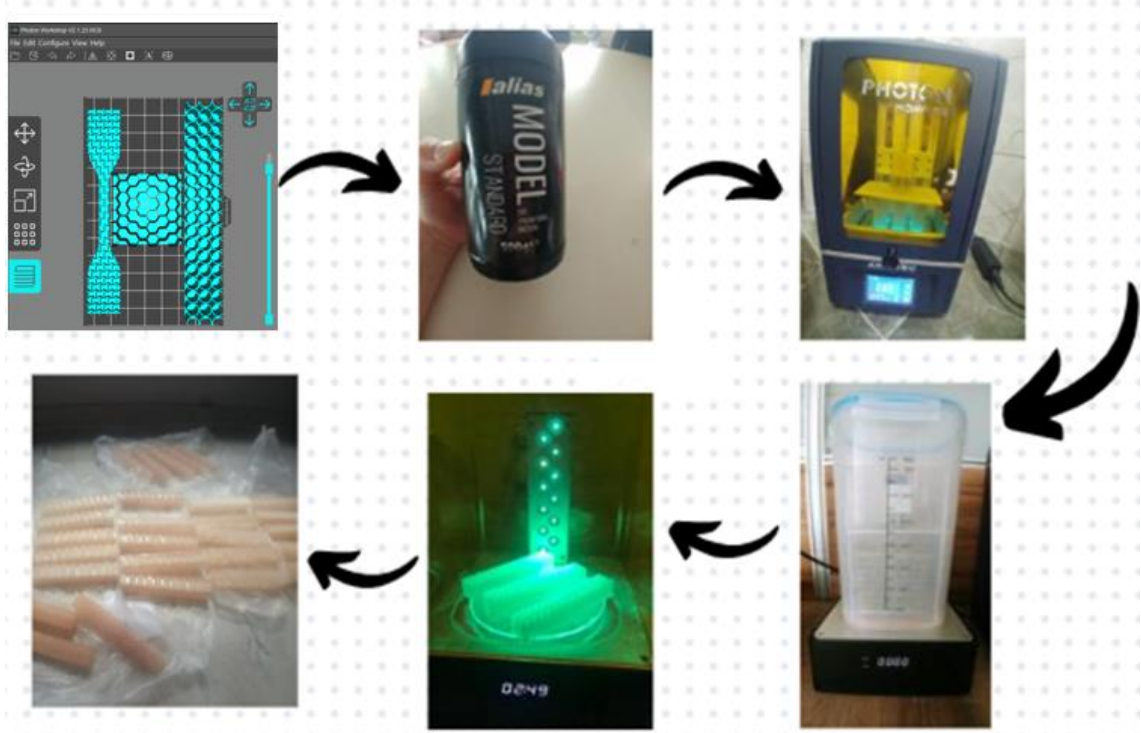
Sandviç yapıların tasarımı Autocad programında yapılmış olup üretime aktarmak için STL formatına dönüştürülmüştür. Dönüştürülen veriler 3 boyutlu yazıcıda imalat parametrelerinin ayarlanmasını sağlayan ara program Photon Workshop yazılımına aktarılmıştır. Yazılım kullanılarak üretilcek çekme basma ve üç nokta eğme numunelerinin tabla üzerine yerleşimi yapılmıştır.

İmalat parametreleri Photon Workshop programı üzerinden ayarlanmıştır. Katman kalınlığı 0.050 mm, ışınlanma süresi 1.75 s, taban katman kalınlığı 4 mm alt katman ışınlanma süresi 30 s, tabla ilerleme hızı 4 mm/s, tabla kaldırma mesafesi 6 mm/s olarak ayarlanmıştır. Basma, çekme ve üç nokta eğme numunelerinin hepsi aynı verilerle göre imal edilmiştir.



Şekil 3.3 a) Anycubic Mono SE 3 boyutlu yazıcı, **b)** Anycubic yıkama ve kürleme makinası

Baskı işlemi tamamlandıktan sonra numuneler spatula yardımıyla tabladan çıkarıldı. Anycubic yıkama ve kürleme makinasında önce izopropil alkol dolu yıkama makinesinde tüm numuneler eşit sürede üç dakika yıkandı. Yıkama işlemi sonrasında numuneler aynı cihazda aparatlar değiştirilerek beş dakika boyunca kürleme işlemi uygulandı. Şekil 3.4’te SLA yöntemiyle numune üretimi gösterilmiştir.



Şekil 3.4 SLA yöntemiyle numune üretimi



Şekil 3.5 Çekme numuneleri ve üst levha numuneleri

Üretim sırasında alt ve üst levhalar birlikte üretilmiş ancak kapalı sistem olduğundan hücre boşlukları arasında reçinelerin kalması nedeniyle tüm numune üretim işlemlerinde üst levha üretimleri ayrı olarak yapılmış olup Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Üst levha ile hücre kafesi arasına epoksi reçine sürüldükten sonra her numune iki dakika daha kürlenmiştir.

3.2.2. Deneysel yöntemler

Yapılan çalışmada farklı hücre geometrileri, farklı hücre yükseklikleri ve farklı et kalınlıklarında üretilen sandviç yapıların mekanik dayanımları tespit edilip karşılaştırılmıştır. Mekanik dayanım testleri Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi Makine Mühendisliği laboratuvarında bulunan Besmak E-Serisi 10 kN üniversal test cihazı ile yapılmıştır. Testler yer değiştirme kontrollü yapılmış, yük ve yer değiştirme verileri alınmıştır. Bu veriler ile sandviç yapıların geometrik özelliklerinin çekme, eğme ve basma dayanımlarına etkisi karşılaştırılmıştır.

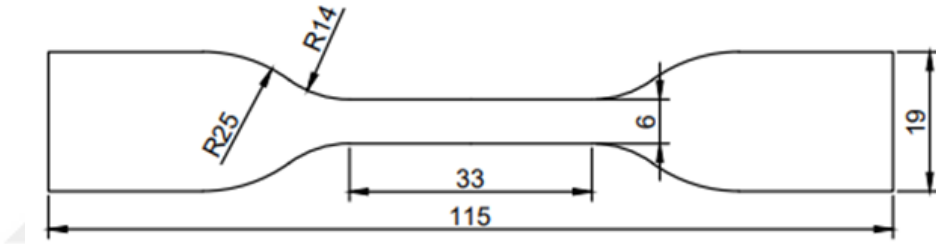
3.2.2.1 Çekme deneyi

Çekme deneyleri “ASTM D638 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics” standardı esas alınarak yapılmıştır. Standartta belirtilen tip IV geometrisine uygun numuneler üretilmiştir (Şekil 3.6). Çekme numunelerinin hücre kısmında, silindirik hücreli, altıgen hücreli, öksetik hücre geometrileri kullanılmış olup tasarlanan numuneler de toplam yükseklik sabit tutulmuştur. Hücrenin et kalınlığı, hücre yüksekliği ve levha yükseklikleri çekme dayanımı açısından araştırma parametresi kabul edilmiş ve 3.3 Parametreler başlığı altında verilmiştir.

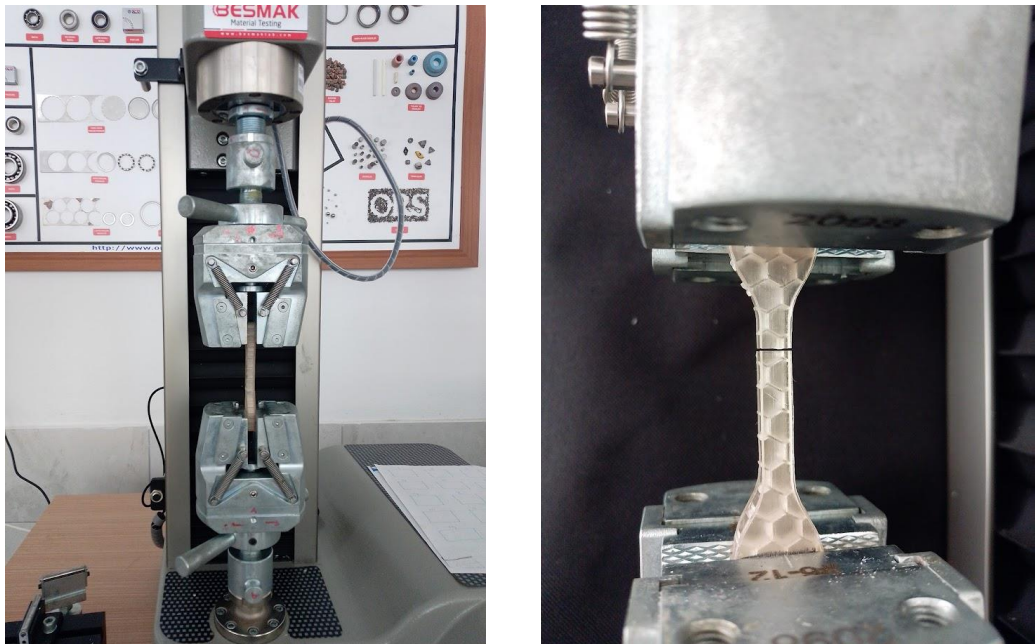
Çekme testleri 1 mm/dk yer değiştirme hızında gerçekleştirilmiştir. Yer değiştirme yönü hücre duvarlarına diktir. Şekil 3.7’da çekme deneyi esnasında test cihazı görülmektedir. Deney her bir numune için en az üç defa tekrarlanmıştır. Test edilen üç numune için elde edilen verilerin ortalaması alınarak değerlendirmeler yapılmıştır. Her bir test için numunenin kırıldığı yük değeri alınarak çekme dayanımı değerleri bulunmuştur. Hücreli yapının çekme dayanımı eşitlik 3.1 ile hesaplanmıştır.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3.1)$$

Tüm numunelerin hücre yapısı ve dolayısıyla boşluk miktarı farklı olduğundan dayanım karşılaştırması yapılırken salt çekme dayanım değerleri kullanılmamıştır. Çekme dayanımı değerleri numune ağırlığına bölünerek özgül çekme dayanım değerleri hesaplanmıştır. Bu sayede numunelerin hücre geometrisini değiştiren parametrelerin etkisi karşılaştırmaya dahil edilmiştir.



Şekil 3.6 ASTM D638-4 standardı çekme numune boyutları

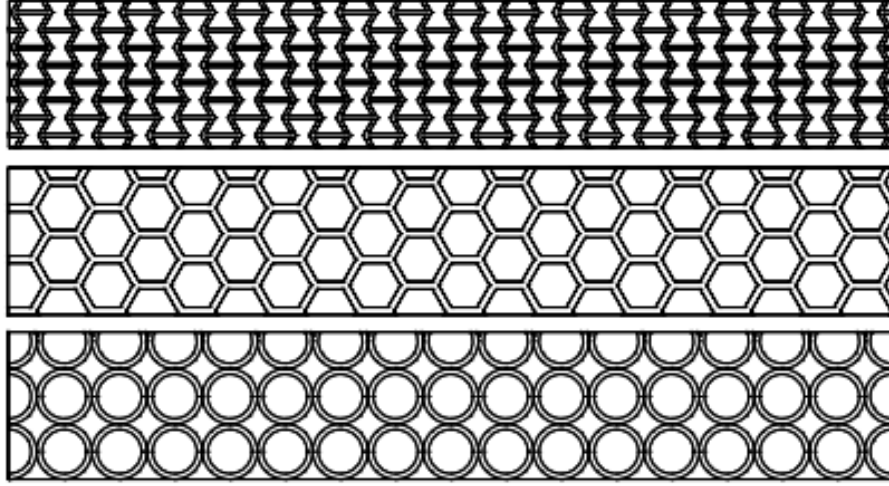


Şekil 3.7. Besmak E-Serisi 10 kN üniversal test cihazı ve çekme testi

3.2.2.2 Üç nokta eğme deneyi

Eğme numunelerinin uzunluğu 120 mm, genişliği 20 mm ve toplam yükseklik 20 mm seçilmiştir. Numuneler silindirik hücreli, altıgen hücreli ve öksetik hücreli olarak tasarlanmıştır. Hücre yapısının et kalınlığı, hücre yüksekliği ve levha kalınlığı araştırma parametreleri seçilmiş 3.3 Parametreler başlığı altında verilmiştir. Şekil 3.8’de üç farklı birim hücre geometrisine sahip sandviç eğme numunelerin Autocad tasarımları gösterilmektedir.

Eğme deneyleri “*ASTM 393 Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure*” standartına uygun olarak üç nokta eğme aparatıyla yapılmıştır. İki uç mesnet noktaları arası açıklık 100 mm, yer değiştirme hızı 1,5 mm/dk seçilmiştir. Numuneler hasara uğrayana kadar yükleme devam ettirilmiştir.



Şekil 3.8 Öksetik hücreli, altıgen hücreli, silindirik hücreli 3 nokta eğme numuneleri



Şekil 3.9 Üç nokta eğme testi

Test esnasında yük (P) ve yer değiştirme değerleri (Δ) kaydedilmiştir. Standart metoda göre hücreli yapının kesme dayanımı Eşitlik 3.2 ile hesaplanmıştır. Alt ve üst levha gerilmeleri Eşitlik 3.3 ile hesaplanmıştır. Burada ‘ d ’ sandviç panel kalınlığı, ‘ c ’ hücre kafesi yüksekliği, ‘ h ’ levha yüksekliği, ‘ b ’ numune genişliğidir.

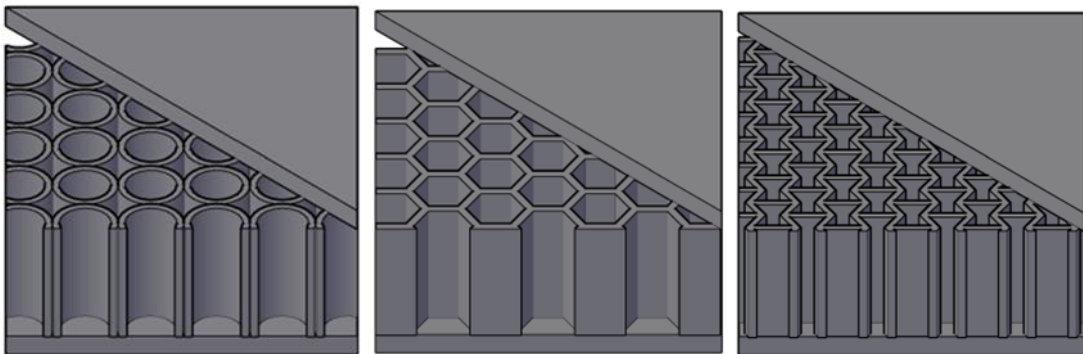
$$\tau = \frac{P_{max}}{(d+c)b} \quad (3.2)$$

$$\sigma = \frac{P_{maks}S}{2h(d+c)b} \quad (3.3)$$

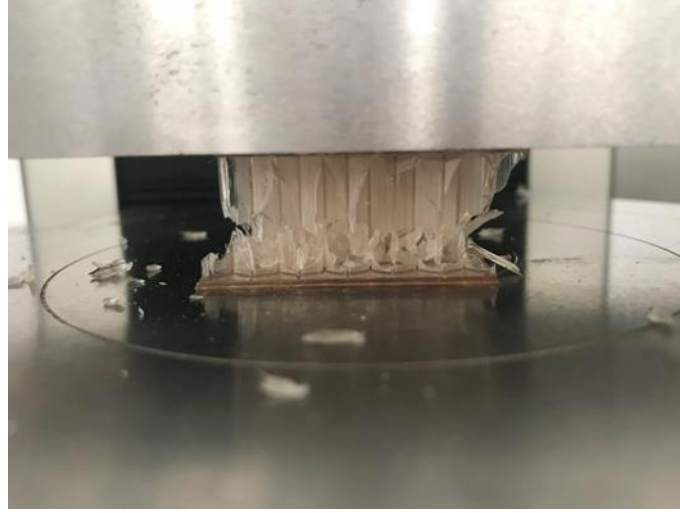
Standartın önerdiği eşitliklerde hücreli yapının et kalınlığı göz ardı edilmektedir. Eğme dayanımı değerleri numune ağırlığına bölünerek özgül eğme dayanım değerleri hesaplanmıştır. Bu sayede numunelerin hücre geometrisini değiştiren parametrelerin etkisi karşılaştırmaya dahil edilmiştir. Üç nokta eğme deneylerinin test esnasındaki fotoğrafları şekil 3.9’da gösterilmiştir. Deney her bir numune için en az üç defa tekrarlanmıştır. Test edilen üç numune için elde edilen verilerin ortalaması alınarak değerlendirmeler yapılmıştır.

3.2.2.3 Basma deneyi

Bu tez çalışmasında silindirik hücreli, altıgen hücreli ve öksetik hücreli sandviç yapıların basma dayanımlarını belirlemek için “ASTM D365 Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores” standartına uygun basma testleri yapılmıştır. Basma testinde sandviç numunelerin toplam yüksekliği sabit tutulmuş olup boyutları 40x40x20 mm olacak şekilde tasarlanmıştır. Hücrenin et kalınlığı, hücre yüksekliği ve levha kalınlığı araştırma parametreleri olarak seçilmiş ve 3.3 Parametreler başlığı altında verilmiştir. Şekil 3.10’da üç farklı geometrili hücrenin sandviç levhaların hücre kafesleriyle birleştirilmiş basma numuneleri gösterilmektedir.



Şekil 3.10 Silindirik hücreli, altıgen hücreli, öksetik hücreli basma numuneleri



Şekil 3.11 Basma testi uygulanma anı

Numunelerin basma test cihazında basma esnasındaki fotoğrafı Şekil 3.11’ de gösterilmiştir. Standart metoda göre hücreli yapının basma dayanımı eşitlik 3.4 ile hesaplanmıştır.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3.4)$$

Standartın önerdiği eşitliklerde hücreli yapının et kalınlığı göz ardı edilmektedir. Hücre et kalınlığının oluşturduğu yüzey alanları hesaplanarak (Tablo 3.4) basma kuvveti değerleri her numunenin toplam et kalınlığı yüzey alanına bölünerek hesaplanmıştır. Bu sayede numunelerin hücre geometrisini değiştiren parametrelerin etkisi karşılaştırmaya dahil edilmiştir. Basma testlerinde yük yer değiştirme hızı 2 mm/dk seçilmiştir. Tüm numunelerin hücre yapısı ve dolayısıyla boşluk miktarı farklı olduğundan dayanım karşılaştırması yapılırken salt basma dayanım değerleri kullanılmamıştır. Deney her bir numune için en az üç defa tekrarlanmıştır. Test edilen üç numune için elde edilen verilerin ortalaması alınarak değerlendirmeler yapılmıştır.

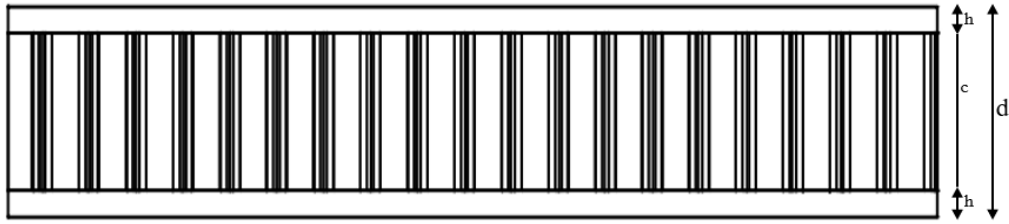
3.3. Parametreler

Sandviç yapılarda hücresel boşlukların geometrisi birçok ayrıtı içermektedir. Her bir ayrıtın ölçüsü sandviç yapının mekanik özelliklerini etkilemektedir. Bu tez çalışmasında hücre şekli ana parametre olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte hücre yüksekliği ve hücre et kalınlığı değişken parametre kabul edilerek toplam yükseklik sabit tutulmuştur. Hücre et kalınlığının artması hücreli yapının alt ve üst levhalar ile temas alanını arttırmaktadır. Hücre yüksekliğinin artması ise hücreleri daha narin hale getirmektedir. Sandviç yapıya avantaj ve dezavantaj sağlayan bu parametreleri

araştırmak için hücre ölçüleri Tablo 3.2 ve Tablo 3.3'te verildiği değerlere göre değiştirilmiştir.

Literatürde bulunan çalışmalarda genellikle sandviç yapıların yüzey alanı kullanılırken iç boşluklar ihmal edilmekte olup gerilme hesaplamalarında et kalınlığı değişimi ya da etkisi dikkate alınmamaktadır. Sandviç yapıların et kalınlığının ve levha kalınlığının, yapının ağırlığını etkilediği bilinmektedir. Sandviç yapılarla ilgili ASTM standartlarında da gerilme hesapları, sandviç yapının hücresel boşluk miktarı göz ardı edilerek ve sandviç yapının kesiti dolu kabul edilerek yapılmaktadır. Daha doğru dayanım değeri elde edebilmek için hesaplanan gerilme değeri numunenin ağırlığına bölünerek özgül dayanım değerleri bulunmuştur (58).

Üretilen numunelerin kodlamalarında altıgen numuneler için '*alt*', silindirik numuneler için '*sln*', öksetik numuneler için '*oks*', hücre et kalınlığı için '*t*' sandviç panel kalınlığı '*d*' hücre yüksekliği için '*c*' levha kalınlığı için '*h*' kısaltmaları kullanılmıştır.



Şekil 3.12 Sandviç yapı bileşenlerinin ebatlarını gösteren semboller

Tablo 3.2 Çekme deneyi numuneleri için hücre ölçüleri ve levha kalınlığı

Et Kalınlığı	Hücre yüksekliği	Levha Kalınlığı	Toplam Yükseklik
0.5	5	2,5	10
0,5	6,5	1.75	10
0,5	8	1	10
0.75	5	2.5	10
0.75	6,5	1.75	10
0.75	8	1	10
1	5	2.5	10
1	6,5	1.75	10
1	8	1	10

Tablo 3.3 Üç nokta eğme ve basma numuneleri için hücre ölçüleri ve levha kalınlığı

Et Kalınlığı	Hücre yüksekliği	Levha Kalınlığı	Toplam Yükseklik
0.5	15	2,5	20
0,5	16,5	1.75	20
0,5	18	1	20
0.75	15	2.5	20
0.75	16,5	1.75	20
0.75	18	1	20
1	15	2.5	20
1	16,5	1.75	20
1	18	1	20

Tablo 3.4 Basma numunelerinin et kalınlıklarına göre yüzey alanları

Alan (mm ²)	0,5	0,75	1
Altıgen	239,94	321,21	431,75
Silindirik	330,80	446,97	549,78
Öksetik	456,84	611,07	692,12

Tablo 3.5 Deney numunelerin ağırlıkları

Numune Kodlamaları	Eğme Numuneleri		Basma Numuneleri		Çekme Numuneleri	
	Hacim (ml)	Ağırlık (g)	Hacim (ml)	Ağırlık (g)	Hacim (ml)	Ağırlık (g)
Alt t 0.5 h 15	23,447	25,7917	15,49	17,039	12,431	13,6741
Alt t 0.5 h 16.5	18,759	20,6349	12,232	13,4552	9,375	10,3125
Alt t 0.5 h 18	13,923	15,3153	9,097	10,0067	6,299	6,9289
Alt t 0.75 h 15	25,494	28,0434	16,902	18,5922	12,959	14,2549
Alt t 0.75 h 16.5	20,85	22,935	14,007	15,4077	10,054	11,0594
Alt t 0.75 h 18	16,205	17,8255	10,839	11,9229	7,147	7,8617
Alt t 1 h 15	27,126	29,8386	18,176	19,9936	13,358	14,6938
Alt t 1 h 16.5	23,242	25,5662	15,208	16,7288	10,571	11,6281
Alt t 1 h 18	18,813	20,6943	11,991	13,1901	7,799	8,5789
Sln t 0.5 h 15	25,191	27,7101	16,895	18,5845	12,932	14,2252
Sln t 0.5 h 16.5	20,517	22,5687	13,793	15,1723	9,829	10,8119
Sln t 0.5 h 18	15,841	17,4251	10,682	11,7502	6,872	7,5592
Sln t 0.75 h 15	27,884	30,6724	18,441	20,2851	13,403	14,7433

Sln t 0.75 h 16.5	23,479	25,8269	15,522	17,0742	10,631	11,6941
Sln t 0.75 h 18	19,072	20,9792	12,612	13,8732	7,858	8,6438
Sln t 1 h 15	30,21	33,231	20,139	22,1529	13,793	15,1723
Sln t 1 h 16.5	26,038	28,6418	17,403	19,1433	11,138	12,2518
Sln t 1 h 18	21,864	24,0504	14,574	16,0314	8,482	9,3302
Oks t 0.5 h 15	28,021	30,8231	18,845	20,7295	13,437	14,7807
Oks t 0.5 h 16.5	23,634	25,9974	15,933	17,5263	10,686	11,7546
Oks t 0.5 h 18	19,237	21,1607	12,999	14,2989	7,942	8,7362
Oks t 0.75 h 15	31,746	34,9206	21,148	23,2628	14,143	15,5573
Oks t 0.75 h 16.5	27,726	30,4986	18,468	20,3148	11,497	12,6467
Oks t 0.75 h 18	23,706	26,0766	15,805	17,3855	9,037	9,9407
Oks t 1 h 15	33,792	37,1712	22,855	25,1405	14,76	16,236
Oks t 1 h 16.5	29,979	32,9769	20,344	22,3784	12,416	13,6576
Oks t 1 h 18	26,163	28,7793	17,834	19,6174	10	11

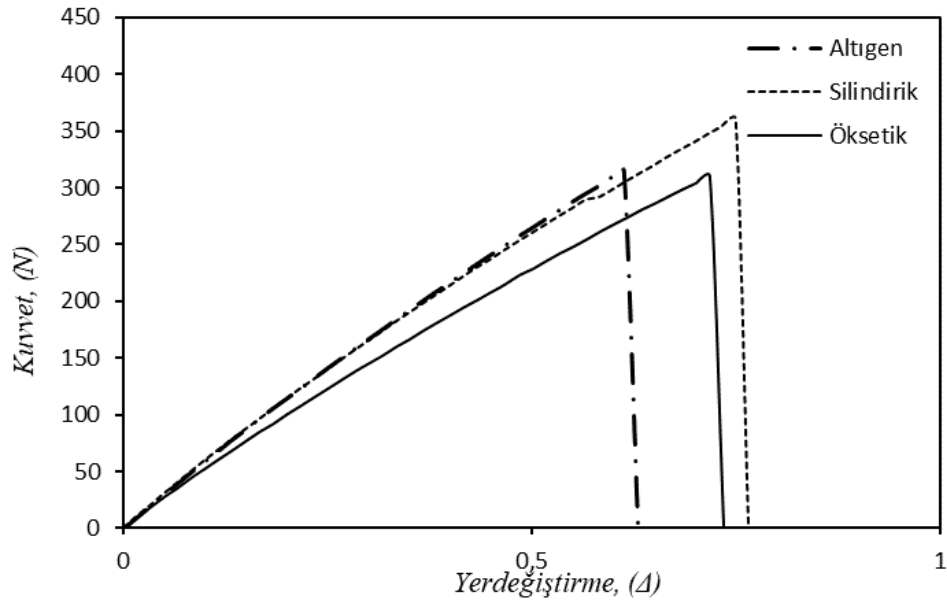
Yoğunluk 1.1 g/cm³

4. BULGULAR

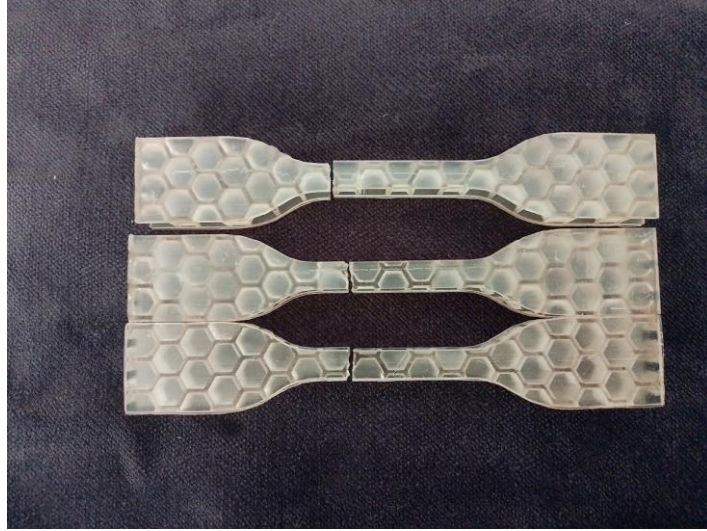
4.1. Çekme Deneyi Sonuçları

Bu bölümde çekme testi sonucunda elde edilen yük-yer değiştirme verileri ile yük-yer değiştirme grafikleri oluşturulmuştur. Çekme yükü altında malzemenin doğrusal şekil değiştirme gösterdiği tespit edilmiştir. Epoksi malzeme camsı kırılma yapıda olduğundan sandviç numuneler belirgin plastik deformasyon olmadan elastik şekil değiştirmeden sonra ani kopma ile hasara uğramıştır. Örnek yük-yer değiştirme eğrisi şekil 4.1’de verilmiştir.

Numunelerin çekme testinden sonraki görünüşlerine ait örnekler Şekil 4.2’de verilmiştir. Bu çalışmada, her hücre geometrisine sahip sandviç numunelerde kırılma numunelerin orta kısmında meydana gelmiştir. Kırılma düzlemi yük uygulama yönüne dik olduğu görülmüştür. Kırılmanın numunenin ortasında olması, kırılma düzleminin yük uygulama yönüne dik olması ve yük yer değiştirme grafiğinin tam doğrusal olması çekme numunelerinin üretiminin ve testlerinin doğru uygulandığını göstermiştir. Şekil 4.2’de görüldüğü üzere yapıştırma katmanının numune ile koptuğu yapıştırma işleminin kullanılabilir yöntem olduğu tespit edilmiştir.



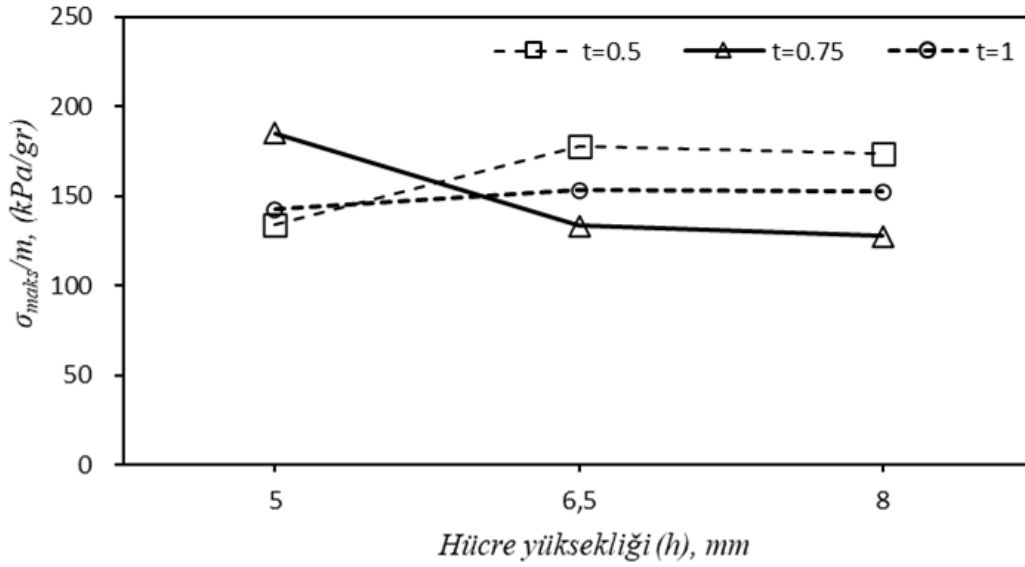
Şekil 4.1 Çekme testi yük-yerdeğiştirme grafiği



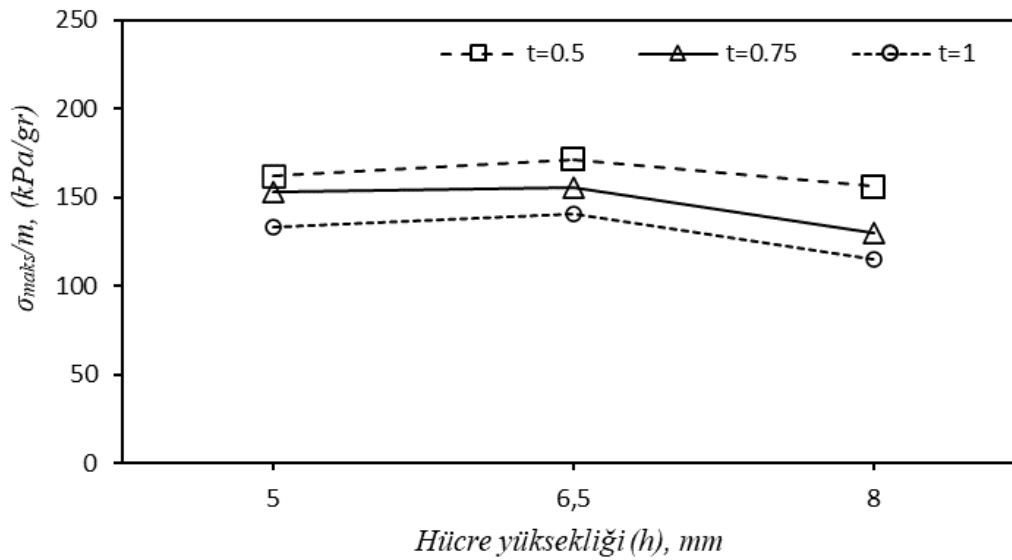
Şekil 4.2 Çekme deneyi sonrası numuneler

Altıgen hücreli sandviç yapının özgül çekme dayanımının, hücre yüksekliği ve hücre et kalınlığı ile değişimi Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Altıgen hücreli sandviç numunelerden hücre yüksekliği 5 mm olan numunelerde en yüksek özgül çekme dayanımı et kalınlığı 0,75 mm olan numunelerde görülürken en düşük değer et kalınlığı 0.5 mm olan numunelerde tespit edilmiştir. Hücre yüksekliği 8 mm olan numunelerde ise bu durumun aksine et kalınlığı 0,5 mm olan numunelerde %30 bir artış görülürken; 0,75 mm et kalınlığında olan numunelerde yaklaşık %30'luk bir azalma tespit edilmiştir. Et kalınlığı 1 mm olan numunelerde ise hücre yüksekliğinin artmasıyla yaklaşık %7 artış göstermiştir. Bu durumda et kalınlığı arttıkça sonuçların altıgen hücreli numunelerde daha stabil sonuçlar elde edileceği öngörülmüştür.

Hücre yüksekliği 5 mm olduğunda çekme dayanımında hücre et kalınlığı belirleyicidir. Hücre et kalınlığı yüksek olan numunenin özgül çekme dayanımı daha yüksektir. Hücre yüksekliği 6,5 mm olduğunda ise hücre et kalınlığının özgül dayanım üzerindeki etkisi azalmıştır. Hücre kafes yapısının düzlemdeki çekme dayanımı, sandviç yapının çekme dayanımı için belirleyici hale gelmektedir. Ağırlığı en az olan numunelerin özgül çekme dayanımı yüksek çıkmıştır. Hücre yüksekliğinin artmasıyla beraber levha kalınlığının levha genişliğine oranı %30'a yaklaştıkça çekme dayanımı belirgin olarak değişmektedir. Bu oran %30'un altına düştüğünde ise çekme dayanımı sabit kalmaktadır. Levha kesitinin sandviç yapı dayanımına etkisi azaldıkça daha hafif olan 0,5 mm et kalınlığına sahip numunelerin dayanımı artmıştır.



Şekil 4.3 Altıgen hücreli sandviç yapıda hücre yüksekliğine göre özgül çekme dayanımı değişimi

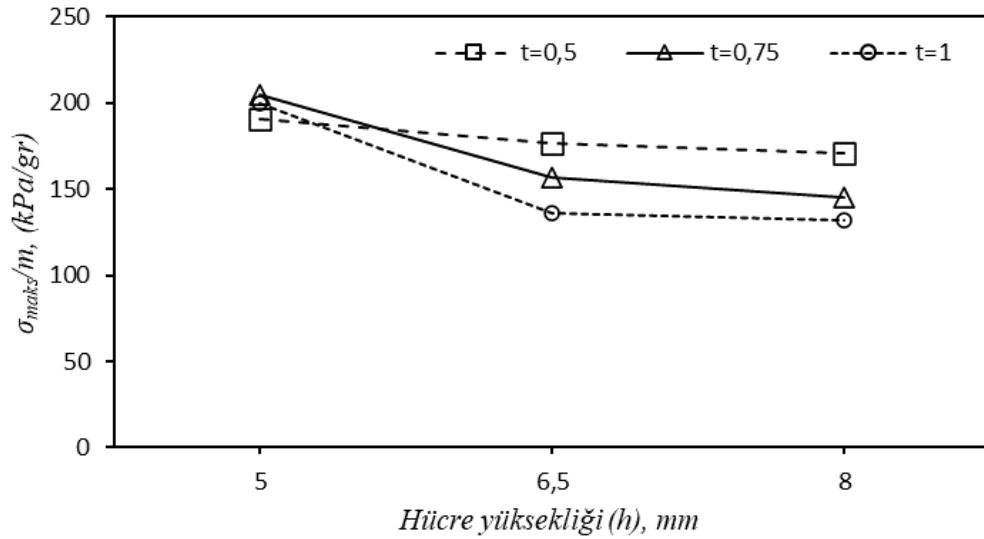


Şekil 4.4 Silindirik hücreli sandviç yapıda hücre yüksekliğine göre özgül çekme dayanımı değişimi

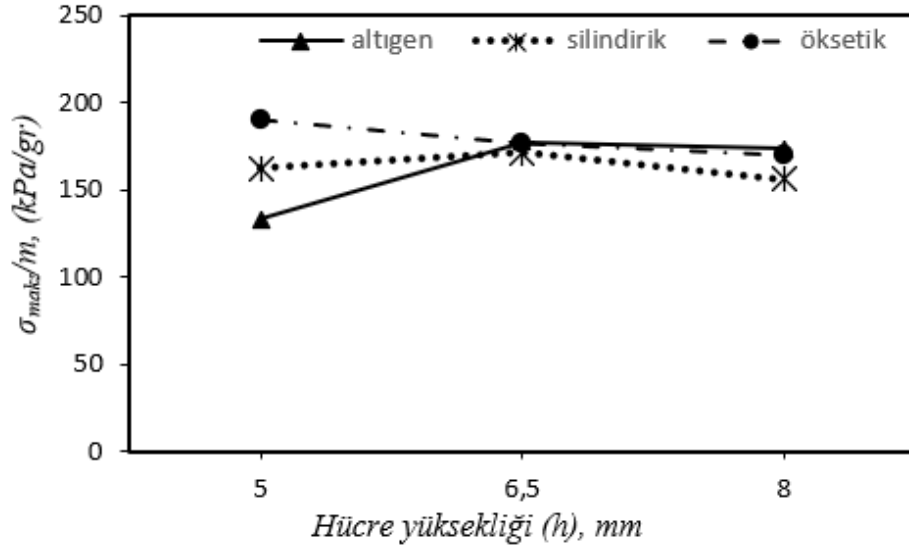
Silindirik hücreli sandviç yapıları numunelerde tüm hücre yüksekliklerinde en yüksek özgül çekme dayanımı 0,5 mm et kalınlığında numunelerde görülürken en düşük dayanım değeri et kalınlığı 1 mm olan numunelerde görülmüştür. Bu sonuca göre silindirik hücreli yapıda hücreler arasında çizgisel temas bulunduğu; yüksekliği aynı olan her bir numune için hücreler arası temas aynıdır. Silindirik hücreli sandviç yapılarda alt üst levhaların kalınlığını çekme dayanımını tayin ettiği görülmüştür. Hücre yüksekliği 5 mm'den 8 mm'e değerine ulaştığında özgül çekme dayanım değerlerinde et kalınlığı 0,5 mm olan numunelerde %4'lük bir azalma görülürken et kalınlığı 0,75 mm ve 1 mm olan numunelerde yaklaşık %14'lük bir azalma meydana gelmiştir. Silindirik

hücreli numunelerin özgül çekme dayanımının hücre yüksekliği ve hücre kalınlığına göre değişiminin altıgen hücreli ve öksetik hücreli numunelere göre daha az olduğu görülmüştür. Silindirik hücreli numunelerin çekme dayanımının hücre boyutlarının değişimine daha duyarsız olduğu değerlendirilmiştir. 0,5 mm et kalınlığında en yüksek özgül çekme dayanımına sahip olan sandviç numune öksetik hücre geometrisinde elde edilmiştir.

Öksetik hücreli numunelerden et kalınlığı 0,5 mm olanlarda; hücre yüksekliği 5 mm'den 8 mm değerine yükseldiğinde özgül çekme dayanımının %10 azaldığı görülmüştür (Şekil 4.5). Et kalınlığı 0,75 mm olanlarda ise bu azalma %30, et kalınlığı 1 mm olanlarda ise %25'tir. Bu durum öksetik hücreli sandviç yapılarda levha kalınlığının çekme dayanımına etkili olduğu görülmüştür. Hücre yüksekliği 5 mm olan sandviç numunelerde et kalınlığı arttıkça levha kalınlığının özgül çekme dayanımı üzerindeki etkisi artmaktadır. Yüksekliği 6,5 ve 8 mm olan numunelerde et kalınlığının özgül çekme dayanımına etkisi daha da belirgindir. Daha hafif numunelerin daha yüksek özgül dayanım gösterdiği değerlendirilmiştir. Her hücre geometrisinde en yüksek özgül dayanım değerlerine öksetik hücre geometrisinde tespit edilmiştir.

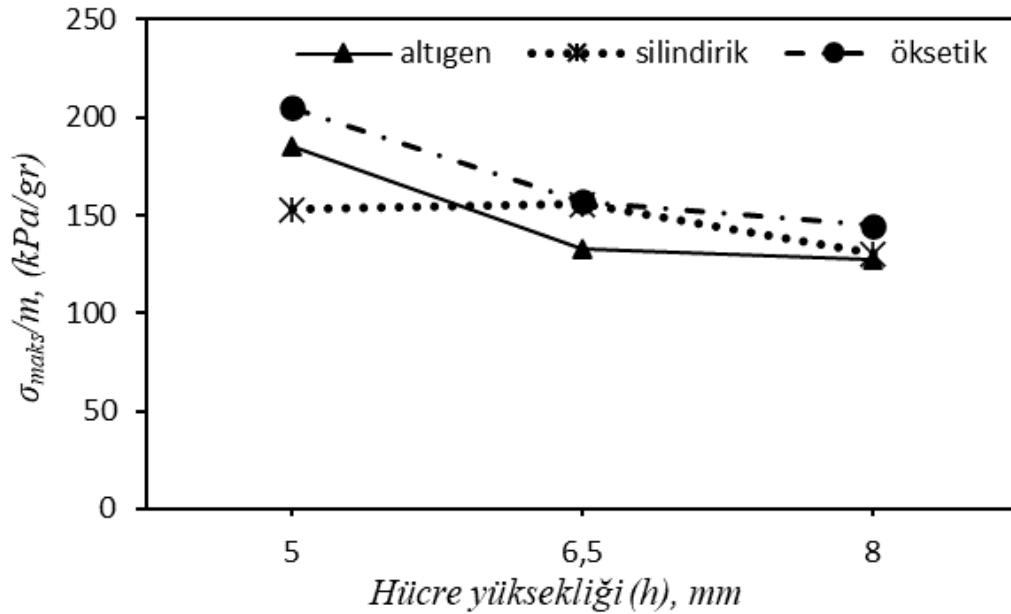


Şekil 4.5 Öksetik hücreli sandviç yapıda hücre yüksekliğine göre özgül çekme dayanımı değişimi

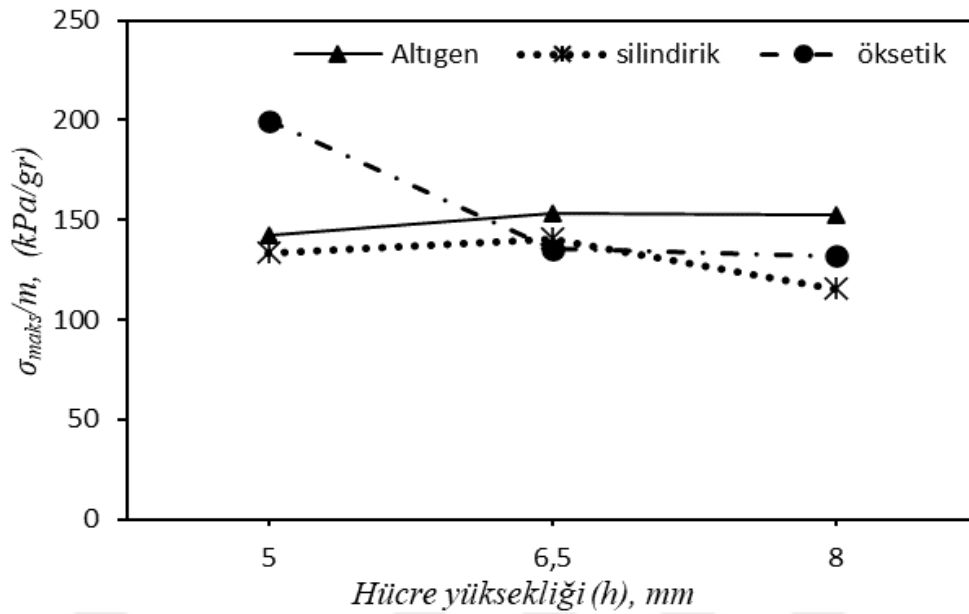


Şekil 4.6 Et kalınlığı 0,5 mm olan hücre geometrilerinin özgül çekme dayanım grafiği

Hücre et kalınlığı 0,5 mm olan farklı hücre geometrilerine sahip sandviç numunelerin özgül çekme dayanımın grafiği incelendiğinde hücre yüksekliği 5 mm olan numunelerde özgül dayanım değerleri arasında yaklaşık %40 fark görülürken; 6,5 hücre yüksekliğinde bu oran yaklaşık %3, 8 mm hücre yüksekliğinde %10 kadar azalmıştır. Bu durumda farklı hücre geometrilerine sahip aynı et kalınlığında sandviç numunelerin hücre yüksekliği arttıkça gösterdikleri özgül çekme dayanım değerleri birbirine yaklaşmaktadır. Bu durumda özgül çekme dayanımının hücre yüksekliğinden daha fazla etkilendiği, hücre geometrisinin kayda değer etkisi olmadığı görülmüştür.



Şekil 4.7 Et kalınlığı 0,75 mm olan hücre geometrilerinin özgül çekme dayanım grafiği



Şekil 4.8 Et kalınlığı 1 mm olan hücre geometrilerinin özgül çekme dayanım grafiği

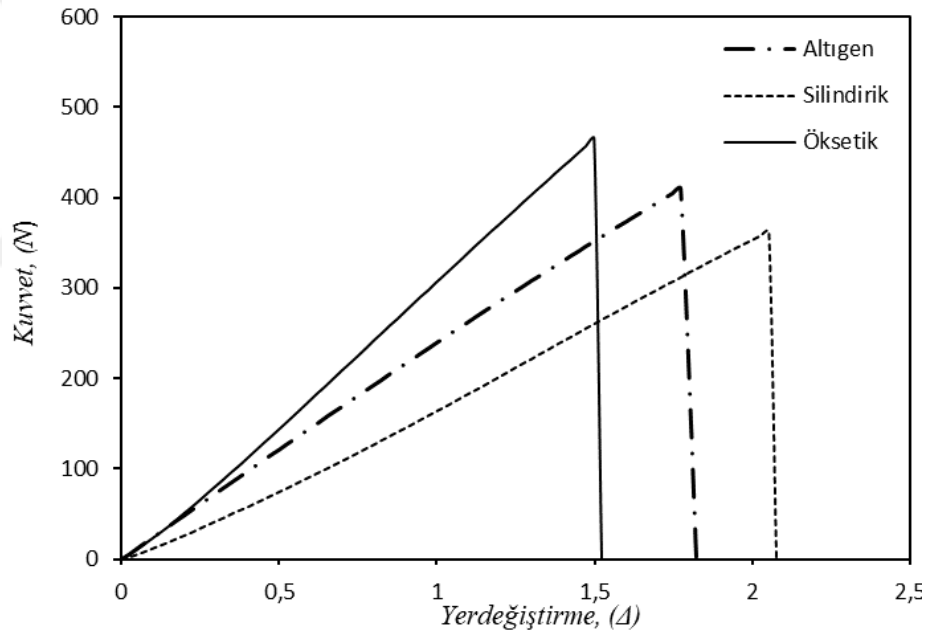
Şekil 4.7’de 0.75 mm et kalınlığına sahip farklı hücre geometrili sandviç numunelerde silindirik ve öksetik hücre geometrisinde 6,5 mm ve 8 mm hücre yüksekliğinde özgül çekme dayanımını en yüksek 0,5 mm et kalınlığına sahip sandviç numunelerde görülürken en düşük 1 mm et kalınlığında olan sandviç numunelerde tespit edilmiştir. Bu sonuca göre et kalınlığı azaldıkça özgül çekme dayanımı artmaktadır. Hücre yüksekliği 5 mm’den 8 mm’ye arttıkça altıgen hücreli numunelerde özgül çekme dayanım değerlerin %45, silindirik hücreli numunelerde %17, öksetik hücreli numunelerde %41 azalma gözlenmiştir. Ancak bu verilere göre hücre yüksekliği azalmasına rağmen farklı hücre geometrilerinin özgül çekme dayanım değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmüştür. Bu sonuç incelendiğinde hücre yüksekliği arttıkça farklı hücre geometrilerinin özgül çekme değerleri yaklaşmıştır, bu değerlere göre hücre yüksekliği arttıkça hücre geometri şeklinin önemini yitirdiği tespit edilmiştir.

Şekil 4.8 hücre et kalınlığı 1 mm olan farklı hücre geometrilerine sahip sandviç numunelerin özgül çekme dayanımın grafiği incelendiğinde öksetik hücre geometrilerine sahip sandviç numunelerin hücre yüksekliği 5 mm olduğunda en yüksek özgül çekme dayanımına sahiptir. Levha kalınlığı artmasıyla sandviç yapının ağırlığı arttıkça öksetik yapı daha yüksek özgül çekme dayanımı göstermektedir. Her üç geometri şeklinde de sandviç numuneler hücre yüksekliği değeri arttıkça özgül çekme dayanım değerinin birbirine yaklaştığı görülmüştür. Hücre yüksekliği 5 mm olduğunda öksetik ve silindirik hücre geometrileri arasındaki çekme dayanım değerleri arası fark %33 iken hücre yüksekliği 8 mm olduğunda %33’ten %12’ye düşmüştür. Levha

kalınlığı azaldıkça numunelerin ağırlığı azaldığı için silindirik geometrilerin özgül çekme dayanımı değeri öksetik hücreli numunelerin özgül çekme dayanımına yaklaşmıştır. Levha kalınlığı azaldıkça hücre geometrisinin çekme dayanımına etkisi azalmıştır.

4.2. Üç Nokta Eğme Deneyi Sonuçları

Bu bölümde üç nokta eğme testi sonucu elde edilen yük-yer değiştirme verileri ile yük-yer-değiştirme grafikleri oluşturulmuştur. Örnek yük-yer değiştirme eğrisi şekil 4.9’da verilmiştir. Numunelerin eğme testinden sonraki görünüşlerine ait örnekler Şekil 4.10’da verilmiştir. Eğme yükü altında malzemenin lineer şekil değiştirme gösterdiği tespit edilmiştir. Şekil 4.10 ‘da görüldüğü üzere numuneler herhangi bir plastik deformasyon olmadan ani kırılma ile hasara uğramıştır. Tüm numunelerde kırılma düzlemi yatay ile yaklaşık 45° açı oluşturarak gerçekleşmiştir.

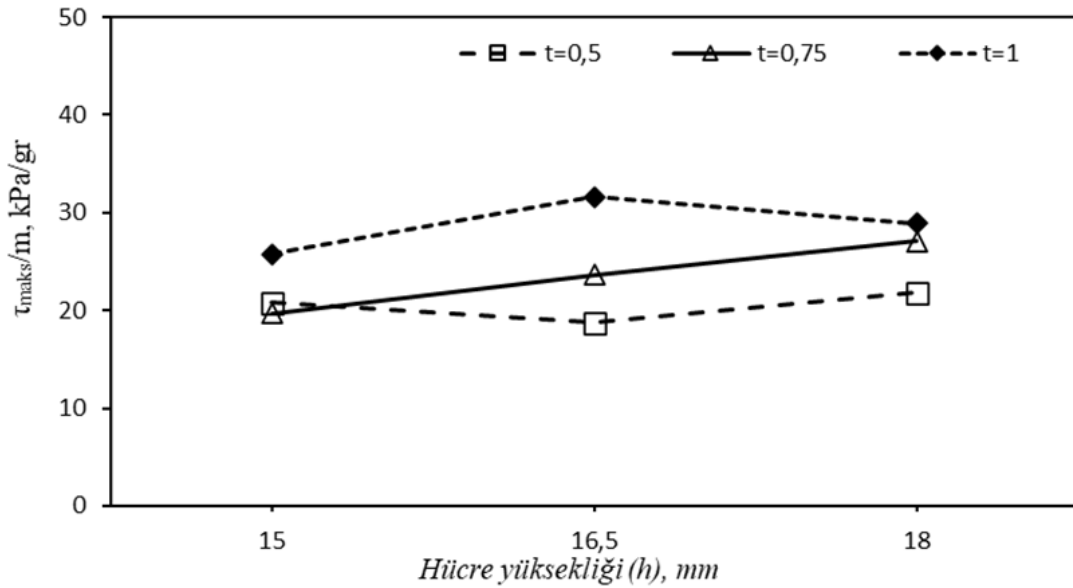


Şekil 4.9 Üç nokta eğme testi kuvvet-yerdeğiştirme grafiği

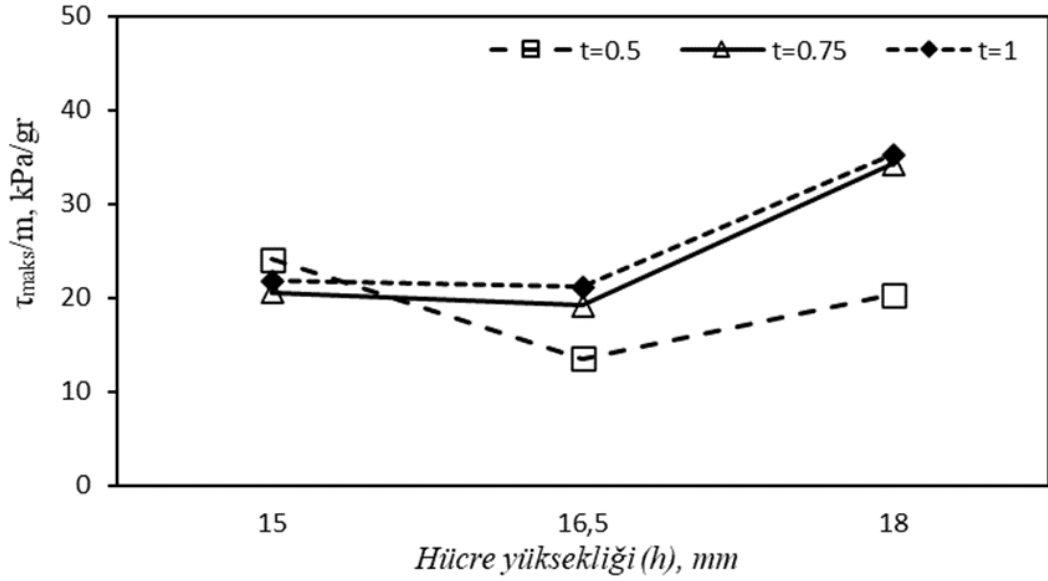


Şekil 4.10 Üç nokta eğme deneyi sonrası numuneler

Tüm numunelerin yüzey alanları eşit olduğundan standart test metoduna göre yapılan hesaplamalarda hücre et kalınlığı değişimi ve hücre geometrilerinden kaynaklı gözenek boşlukları göz ardı edilmiş olmaktadır. Bu nedenle hücre kesme gerilmesi ve levha gerilme değerleri kütleye bölünerek spesifik dayanım değerleri hesaplanmıştır. Numunelerin kütle değerleri parametreler başlığı altında verilmiştir. Elde edilen kuvvet – yer değiştirme eğrileri özgül eğme eğrilerine dönüştürülmüştür.



Şekil 4.11 Altıgen hücreli sandviç yapıda hücre yüksekliğine göre özgül eğme dayanım grafiği



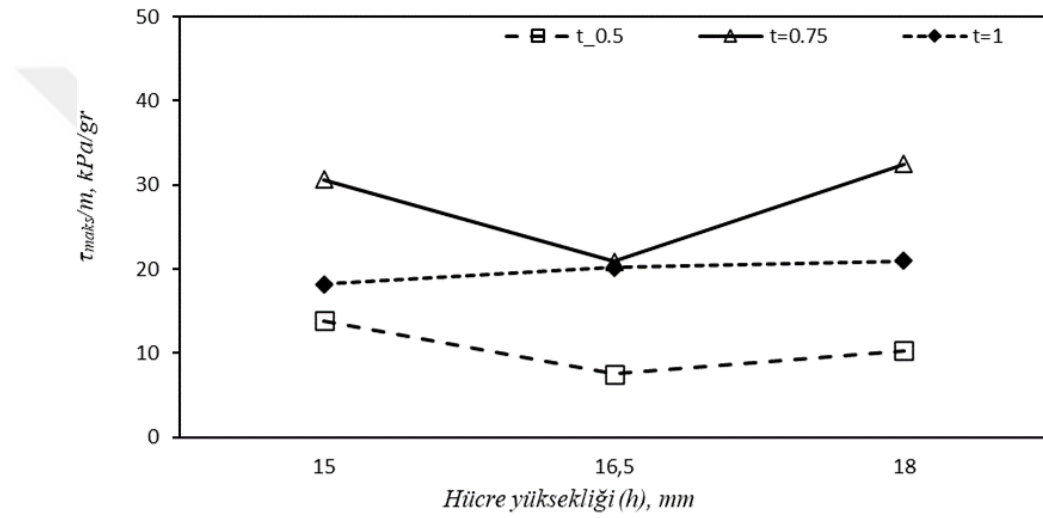
Şekil 4.12 Silindirik hücreli sandviç yapıda hücre yüksekliğine göre özgül eğme dayanım grafiği

Şekil 4.11’de altıgen hücreli sandviç numunelerde tüm hücre yüksekliklerinde en yüksek özgül eğme dayanımı 1 mm et kalınlığına sahip numunelerde tespit edilmiştir. Et kalınlığı fazla olan yapının levha ile temas yüzeyi daha fazla olduğu için gösterdiği eğme dayanımı artmıştır. Hücre yüksekliği 15 mm’den 18 mm arttırıldığında; et kalınlığı 0,5 mm olan numunelerde özgül eğme dayanımı %5, et kalınlığı 0,75 mm olan numunelerde %37, et kalınlığı 1 mm numunelerde %12 artış olduğu görülmüştür. Hücre yüksekliği artışı özgül eğme dayanımını arttırmaktadır. Levha kalınlığının azalmasıyla numunelerin ağırlıklarında düşme meydana geldiği göz önüne alındığından altıgen hücreli numunelerde daha hafif olan numunelerin özgül eğme dayanımının yüksek olduğu tespit edilmiştir.

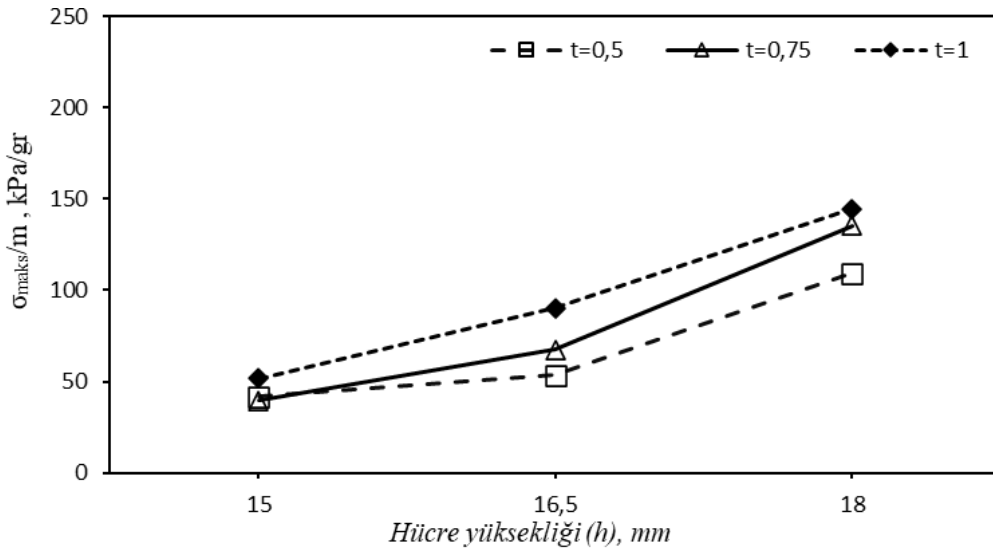
Şekil 4.12’de silindirik hücreli numunelerde hücre yüksekliği 15 mm’de 0.75 mm et kalınlığına sahip numunelerle 1 mm et kalınlığına sahip numuneler arasında özgül eğme dayanımı değerlerinde 15 mm yüksekliğinde %5, 16,5 mm hücre yüksekliğinde %9, 18 mm hücre yüksekliğinde %2’lik fark vardır. Silindirik hücreli numunelerde hücre yüksekliği değişsede et kalınlığı yüksek numuneler aynı dayanımı göstermiştir. Silindirik hücreli numunelerde et kalınlığının özgül eğme dayanımına etkisinin azaldığı görülmüştür. Hücre yüksekliği 15 mm olan silindirik hücreli yapılarda hücre et kalınlığının özgül eğme dayanımına etkisi olmadığı değerlendirilmiştir. Hücre yüksekliği arttıkça et kalınlığı 0,75 mm ve 1 mm olan yapıların özgül eğme dayanımı artmıştır. Hücre yüksekliği arttıkça et kalınlığı daha fazla olan silindirik hücreli

yapıların rijitliğini koruduğu, et kalınlığı düşük olan yapının ise narinliğinin arttığı değerlendirilmiştir.

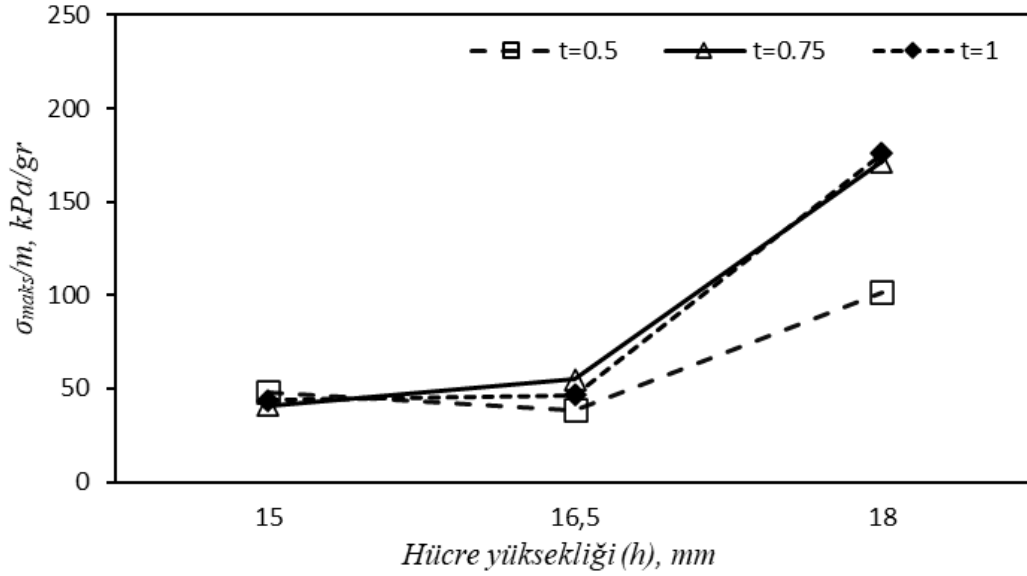
Şekil 4.13 'te öksetik hücreli numunelerde hücre yüksekliği 15 mm'den 18 mm'ye arttığında 0,5 mm et kalınlığına sahip numunelerde özgül eğme dayanımı değerlerinde %25 azalma meydana gelirken, et kalınlığı 0,75 olan numunelerde %6, et kalınlığı 1 mm olan numunelerde %15 artış meydana gelmiştir. Öksetik hücreli numuneler diğer geometrili numunelere göre daha düzensiz veriler elde edilmiştir. Her üç geometrisi içinde hücre et kalınlığı 0,5 mm olan numunelerin özgül eğme dayanımları et kalınlığı daha yüksek olan numunelere göre daha düşük çıkmıştır.



Şekil 4.13 Öksetik hücreli sandviç yapıda hücre yüksekliğine göre özgül eğme dayanım grafiği



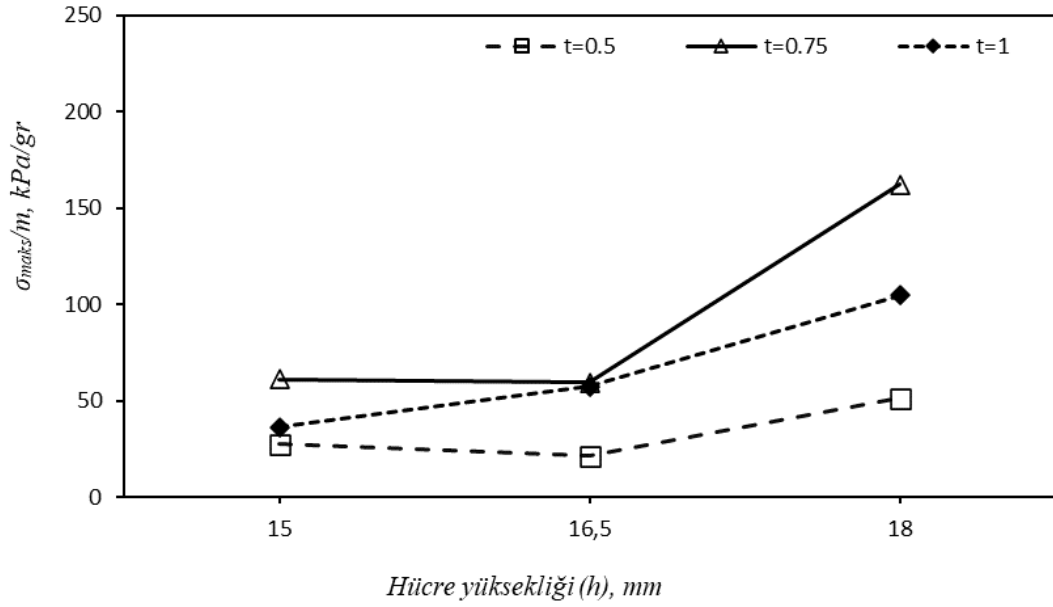
Şekil 4.14 Altıgen hücreli sandviç yapıda hücre yüksekliğine göre levhaların özgül eğme dayanımı



Şekil 4.15 Silindirik hücreli sandviç yapıda hücre yüksekliğine göre levhaların özgül eğme dayanımı

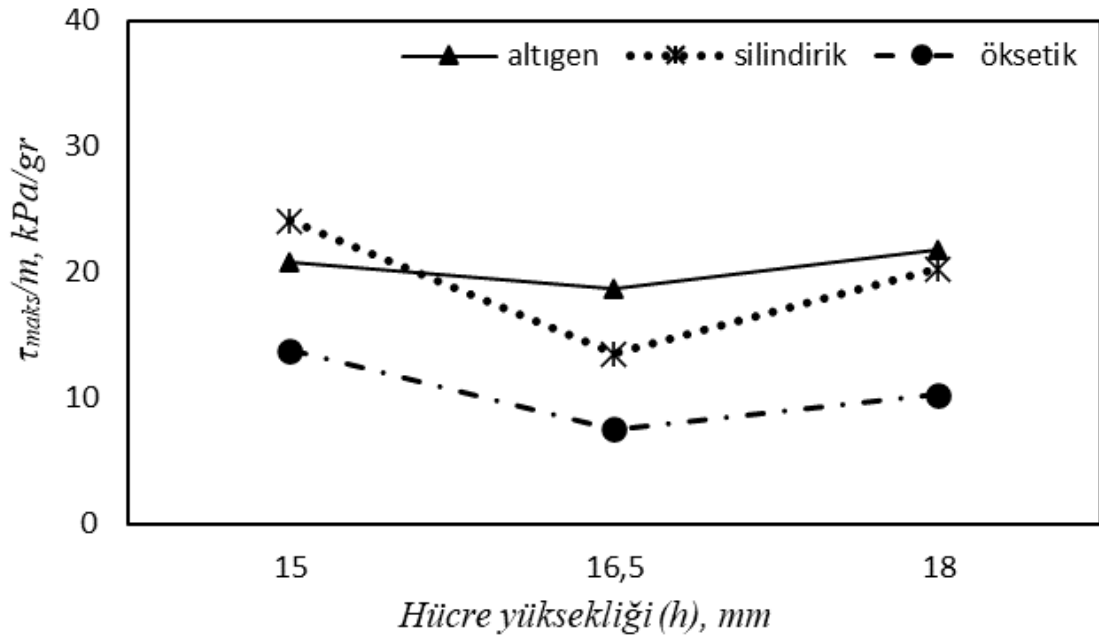
Şekil 4.14’de altıgen hücreli numunelerde hücre yüksekliği 15 mm’den 18 mm’ye yükseldikçe 0,5 mm et kalınlığında olan numunelerde %162, 0.75 mm et kalınlığında olan numunelerde %244, 1 mm et kalınlığında olan numunelerde ise %180 artış görülmüştür. Et kalınlığı fazla olan numunelerin levha ile temas yüzeyi fazla olduğu için eğme dayanım değeri daha yüksek çıkmıştır. Daha ince olan levha daha yüksek dayanım göstermektedir. En yüksek özgül levha eğme dayanımı 1 mm et kalınlığında olan numunelerde görülmüştür.

Şekil 4.15’te tüm et kalınlıklarında 15 mm hücre yüksekliğinde levhaların özgül eğme dayanım değerleri arasında %14 fark varken 16,5 mm hücre yükseldiğinde bu fark %29, 18 mm hücre yüksekliğinde ise fark %70’e çıkmıştır. 0.75 mm ve 1 mm et kalınlığında numuneler aynı mekanik özelliklerini göstermesine rağmen 0,5 mm et kalınlığı en düşük özgül levha eğme dayanımı göstermiştir. Hücre yüksekliğinin artmasıyla et kalınlığı ince olan numunelerin dayanımı azalmıştır. Hücre yüksekliği 18 mm olduğunda levha kalınlığının incilmesi ile en yüksek özgül levha eğme değerleri görülmüştür.

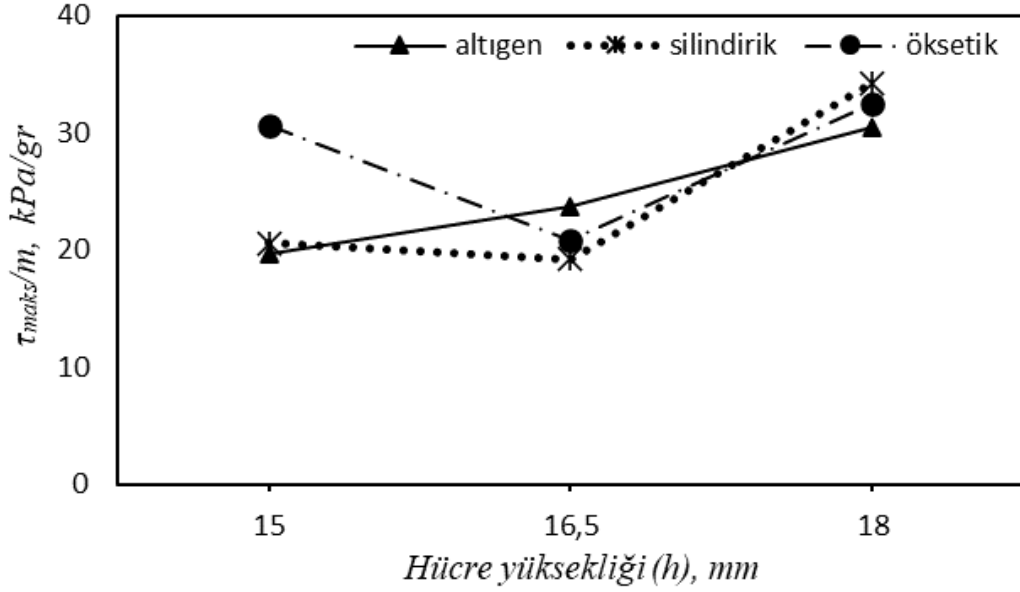


Şekil 4.16 Öksetik hücreli sandviç yapıda hücre yüksekliğine göre levhaların özgül eğme dayanımı

Şekil 4.16 'da öksetik hücreli sandviç yapıda en düşük özgül levha eğme dayanımı 0,5 mm et kalınlığında numunelerde tespit edilmiştir. Hücre yüksekliği 15 mm'den 18 mm'ye yükseldiğinde özgül levha eğme dayanımı değerlerinde et kalınlığı 0,5 mm olan numunelerde %86, et kalınlığı 0,75 mm olan numunelerde %165, et kalınlığı 1 mm olanlarda ise %187'lik bir artış görülmüştür. Bu değerlere göre hücre yüksekliği arttıkça et kalınlığı fazla olan numunelerin dayanımı daha çok artmıştır.



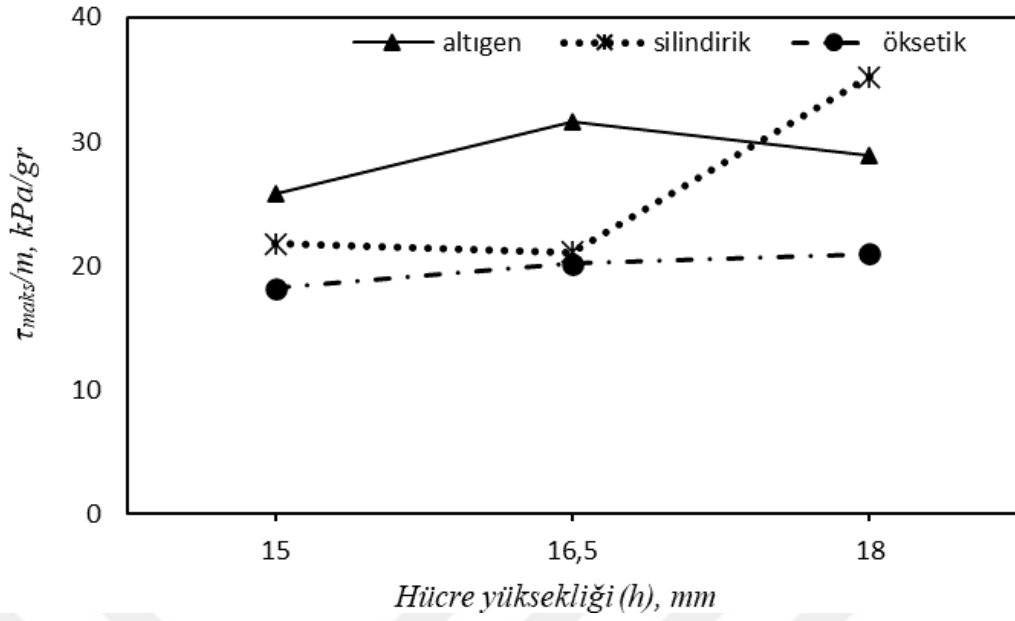
Şekil 4.17 Et kalınlığı 0,5 mm olan numunelerin özgül eğme dayanım grafiği



Şekil 4.18 Et kalınlığı 0,75 mm olan numunelerin özgül eğme dayanım grafiği

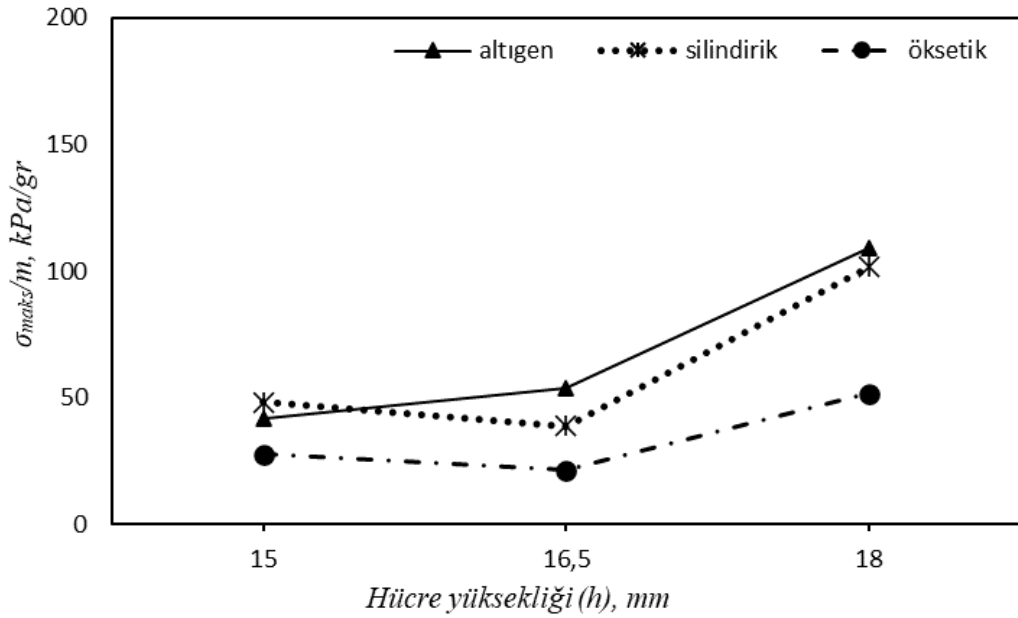
Şekil 4.17’de farklı hücre geometrileri numunelerin 0,5 mm et kalınlığında özgül eğme dayanım grafiği incelendiğinde en düşük dayanım öksetik hücreli numunelerde tespit edilmiştir. Öksetik hücreli numunelerin hücre boşluğunun daha az olmasına rağmen özgül eğme dayanımının daha düşük olduğu görülmüştür. Hücre yüksekliği 15 mm’den 18 mm’ye yükseldiğinde altıgen hücreli numunelerin özgül eğme dayanımında %4 artış meydana gelirken silindirik hücreli numunelerde %18 öksetik hücreli numunelerde %34 azalma meydana gelmiştir. Hücre yüksekliği arttıkça 0,5 mm et kalınlığına sahip numunelerde en yüksek özgül eğme dayanımı en hafif yapıya sahip altıgen hücreli numunelerde elde edilmiştir.

Hücre yüksekliği 15 mm olan silindirik ve altıgen hücreli numuneler yaklaşık aynı özgül eğme dayanıma sahipken öksetik hücreli numuneler en yüksek dayanımı göstermiştir (Şekil 4.18). Hücre yüksekliği 15 mm’den 16,5 mm’ye yükseldiğinde altıgen hücreli numunelerin özgül eğme dayanımı %16 artarken silindirik hücreli numunelerde %7 azalma, öksetik hücreli numunelerde %46 azalma meydana gelmiştir. Hücre yüksekliği 15 mm olan numunelere kıyasla 18 mm hücre yüksekliğine sahip altıgen hücreli numunelerin özgül eğme dayanımı %35, silindirik hücreli numunelerin özgül eğme dayanımı %40, öksetik hücreli numunelerin özgül eğme dayanımı %5 artış meydana gelmiştir. Hücre yüksekliği arttıkça 0,75 mm et kalınlığında 3 hücre geometrisi de yaklaşık olarak aynı özgül eğme dayanımı göstermiştir. Hücre yüksekliği arttıkça hücre geometrisi önemini yitirmektedir.



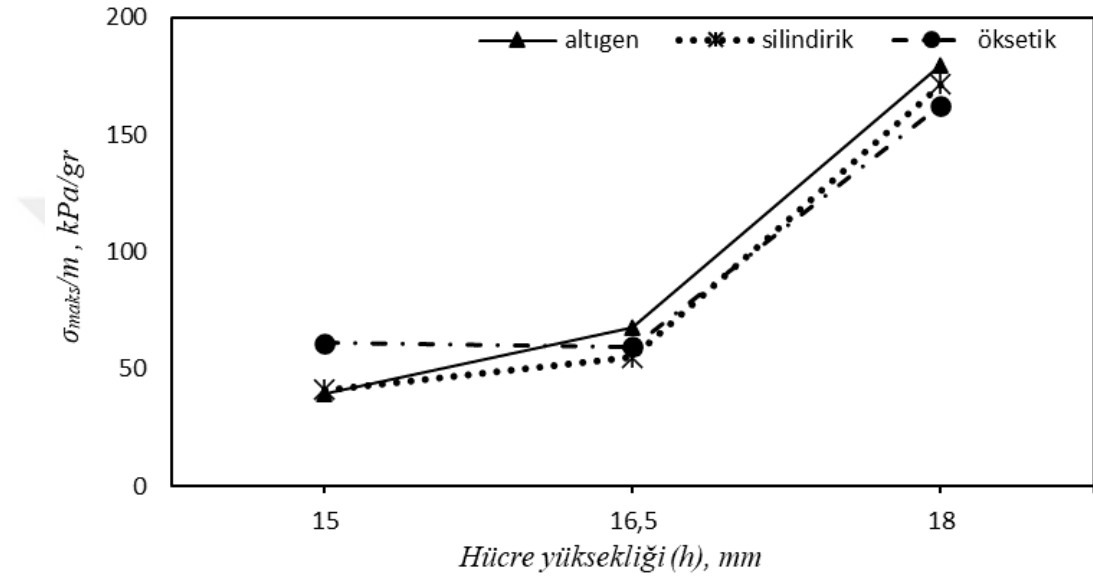
Şekil 4.19 Et kalınlığı 1 mm olan numunelerin özgül eğme dayanım grafiği

Et kalınlığı 1 mm olan hücre geometrilerinin özgül eğme dayanım grafiği incelendiğinde öksetik hücreli numuneler tüm hücre yüksekliklerinde en düşük özgül eğme dayanım değeri tespit edilmiştir (Şekil 4.19). Hücre boşluk miktarı azaldıkça özgül eğme dayanımı azalmıştır.

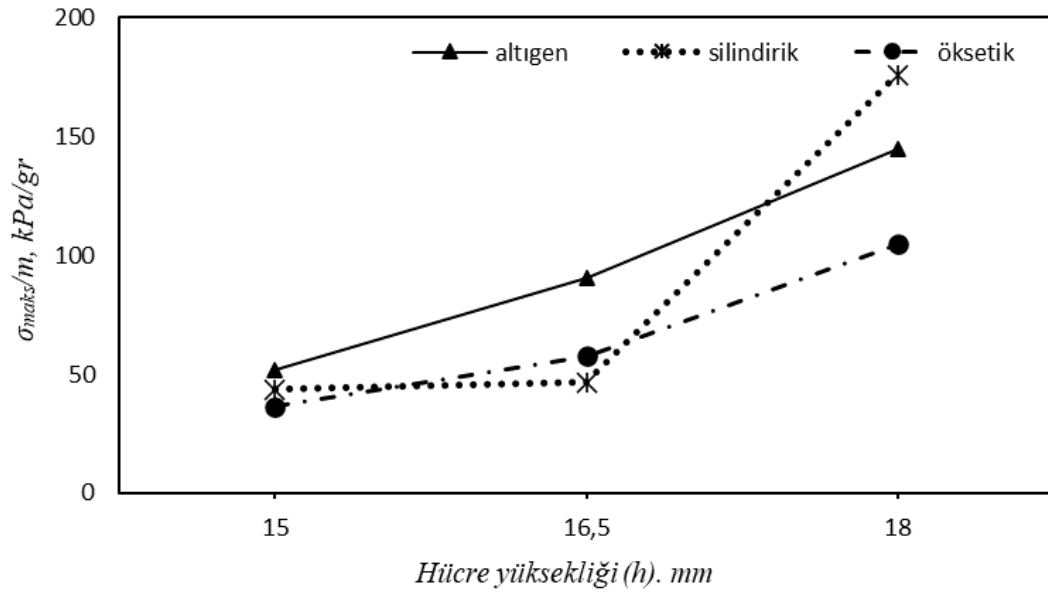


Şekil 4.20 Et kalınlığı 0,5 mm olan numunelerde levhaların özgül eğme dayanımı

Şekil 4.20’de et kalınlığı 0,5 mm olan sandviç numunelerde 15 mm hücre yüksekliğinden 18 mm hücre yüksekliğine geldiğinde özgül levha eğme dayanımlarında altıgen hücreli sandviç numunelerde %162, silindirik hücreli sandviç numunelerde %110, öksetik hücreli numunelerde %86 artış olmuştur. Bu değerlere göre 18 mm hücre yüksekliğinde her hücre geometrisi de en yüksek özgül levha eğme dayanımı değerlerine sahiptir. Bu durum sandviç numunelerde levha kalınlığının özgül levha eğme dayanımına etkili olduğunu göstermiştir.



Şekil 4.21 Et kalınlığı 0,75 mm olan numunelerde levhaların özgül eğme dayanımı



Şekil 4.22 Et kalınlığı 1 mm olan numunelerde levhaların özgül eğme dayanımı

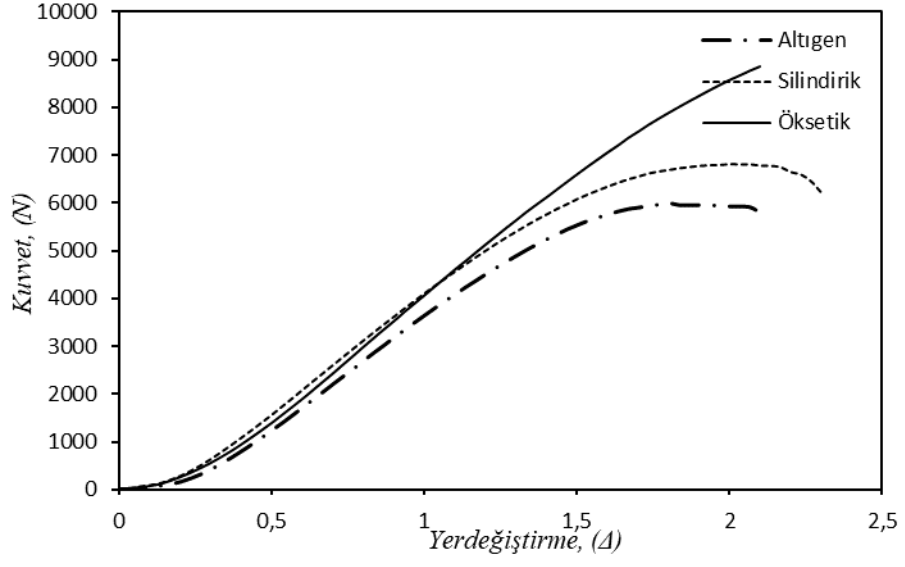
Et kalınlığı 0,75 mm olan sandviç numunelerde hücre yüksekliği 16,5 mm'den 18 mm'ye yükseltildiğinde eğme yükü altında özgül levha dayanımı doğrusal artış göstermiştir. Altıgen hücreli sandviç numunelerde bu artış %165, silindirik hücreli numunelerde %212 ve öksetik hücreli numunelerde %172'dir. Hücre yüksekliği 18 mm olduğunda alt ve üst levhaların özgül eğme dayanımı hücre geometrisinden bağımsız olarak belirgin artış göstermiştir. Hücre yüksekliği arttıkça hücre geometrisinin özgül levha eğme dayanım değerleri üzerinde etkisinin azaldığı tespit edilmiştir.

Et kalınlığı 1 mm olan altıgen ve öksetik hücre geometrili numunelerde doğrusal artış görülmüştür (Şekil 4.22). Altıgen hücre geometrisine sahip sandviç numunelerde 16,5 mm hücre yüksekliğinde %75, 18 mm hücre yüksekliğinde %60 iken öksetik hücreli numunelerde bu oran 16,5 mm hücre yüksekliğinde %58, 18 mm hücre yüksekliğinde %82 'dir. En yüksek özgül levha eğme dayanımı ise 176 kPa/gr ile silindirik hücre geometri göstermiştir.

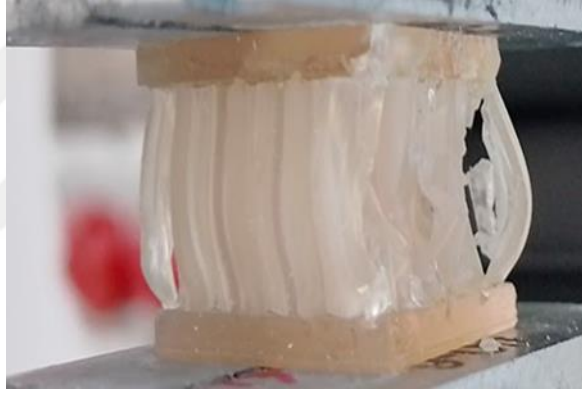
Eğme deneyi sonuçlarına göre öksetik hücreli numuneler özgül levha eğme dayanımında en düşük dayanıma sahip hücre geometrisidir. Altıgen ve silindirik hücre geometrisine sahip sandviç numuneler özgül levha eğme dayanımında yaklaşık aynı dayanımı göstermiştir. 18 mm hücre yüksekliğinde tüm hücre geometrileri en yüksek özgül levha eğme dayanımına sahiptir. Altıgen hücreli, öksetik hücreli ve silindirik hücreli sandviç yapılarda, hücre et kalınlığından bağımsız olarak, hücre yüksekliği arttıkça levhaların özgül eğme dayanımı artmıştır. Hücre yüksekliği 16,5 mm olan sandviç yapılarda hücre et kalınlığından bağımsız olarak altıgen hücreli yapıların özgül levha eğme dayanımı öksetik ve silindirik hücreli yapılara göre daha yüksek çıkmıştır.

4.3. Basma Deneyi Sonuçları

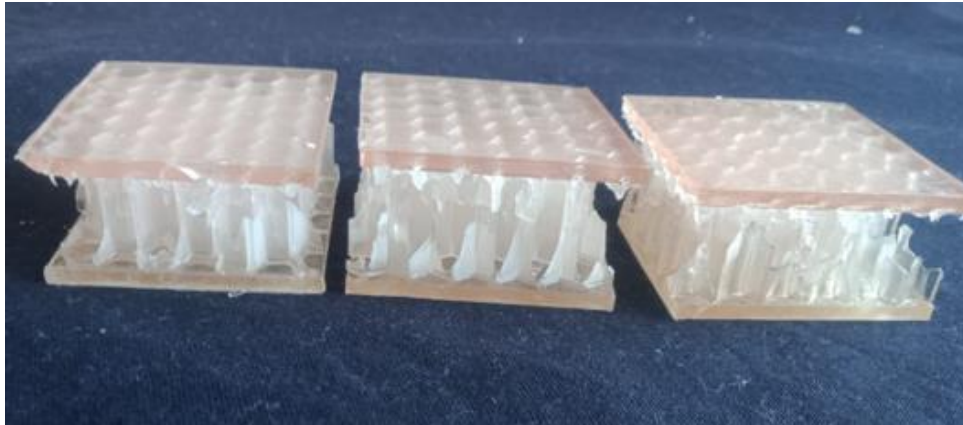
Bu bölümde basma testi sonucu yük-yer değiştirme verileri ile yük-yer değiştirme grafikleri oluşturulmuştur. Örnek yük-yer değiştirme eğrisi Şekil 4.23'te verilmiştir. Numunelerin basma testi uygulanmasına ait örnek Şekil 4.24'te basma testi sonrası numuneler ise Şekil 4.25 'te verilmiştir. Alt üst levhaların kırılmasından önce hücre duvarlarının kırılması beklenen sonuçtur. Levhalar hücre duvarlarına gerilme transferini sağlamaktadır. Numuneler incelendiğinde hücre duvarlarında gözle görülür mikro burkulma ile kırılmalar meydana gelmiştir.



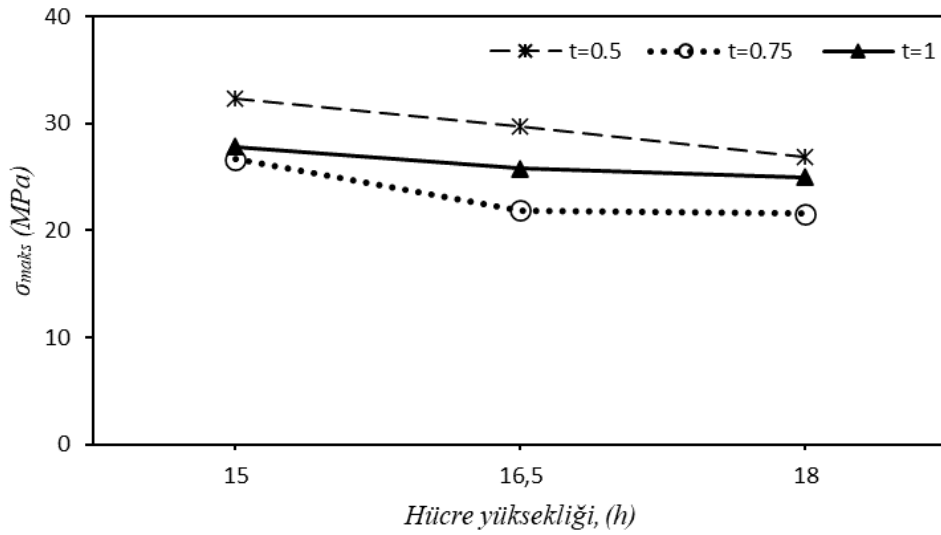
Şekil 4.23 Basma testi kuvvet-yer değiştirme grafiği



Şekil 4.24 Basma yükü altında hücre duvarlarının mikro burkulması

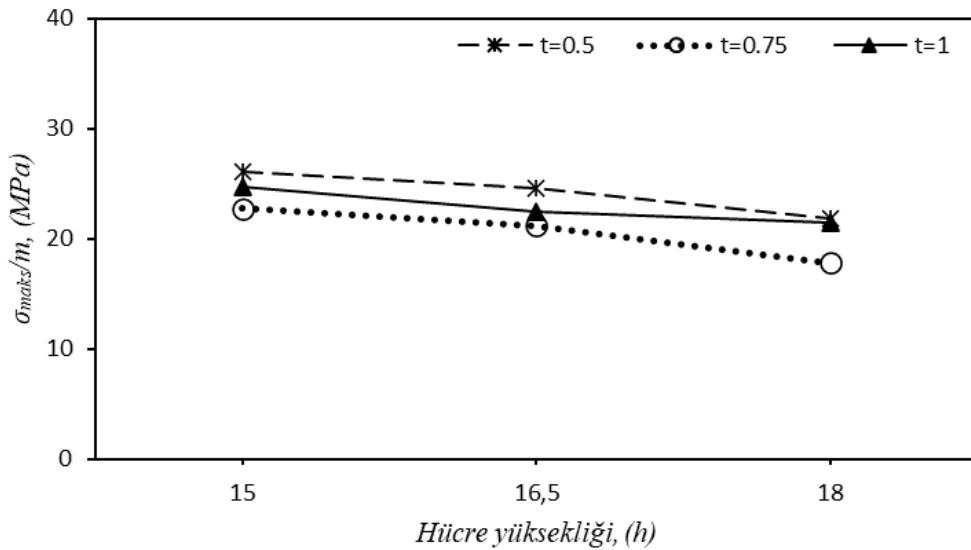


Şekil 4.25 Basma deneyi sonrası numuneler

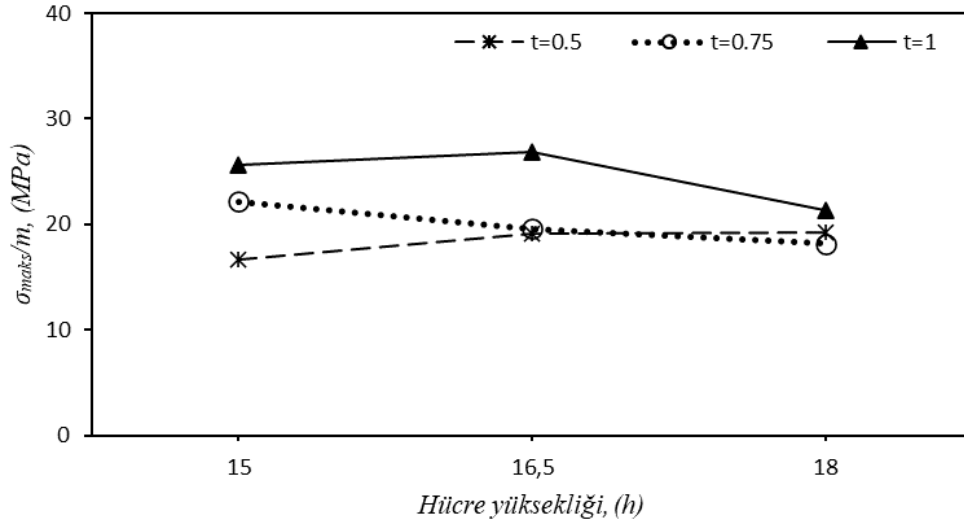


Şekil 4.26 Altıgen hücreli sandviç yapıda hücre yüksekliğine göre basma dayanımı değişimi

Altıgen hücre geometrisine sahip sandviç numunelerde hücre yüksekliği 15 mm'den 18 mm'e arttığında 0,5 mm et kalınlığında %20, 0,75 mm et kalınlığında %23, 1 mm et kalınlığında %11 azalma meydana gelmiştir. Hücre yüksekliği arttıkça yapının basma dayanımı düşmektedir. Hücre yüksekliği, sandviç yapının basma dayanımını hücre et kalınlığından daha fazla etkilediği görülmektedir. Tüm hücre yüksekliklerinde hücre basma dayanımı en yüksek olan sandviç numune 0,5 mm et kalınlığında görülmüştür. Basma dayanımı hesaplanırken hücre geometrisinin izdüşümünün alanı bulunmuş, yapıyı hasara uğratan kuvvet bu alana bölünmüştür. Hücre et kalınlığı ince olan numuneler daha yüksek basma dayanımı göstermiştir.



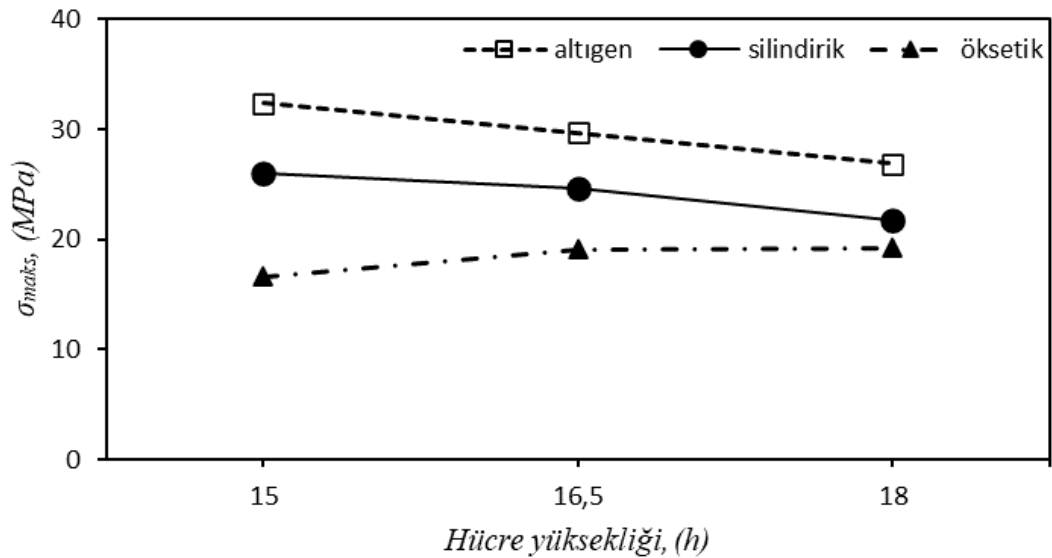
Şekil 4.27 Silindirik hücreli sandviç yapıda hücre yüksekliğine göre basma dayanımı değişimi



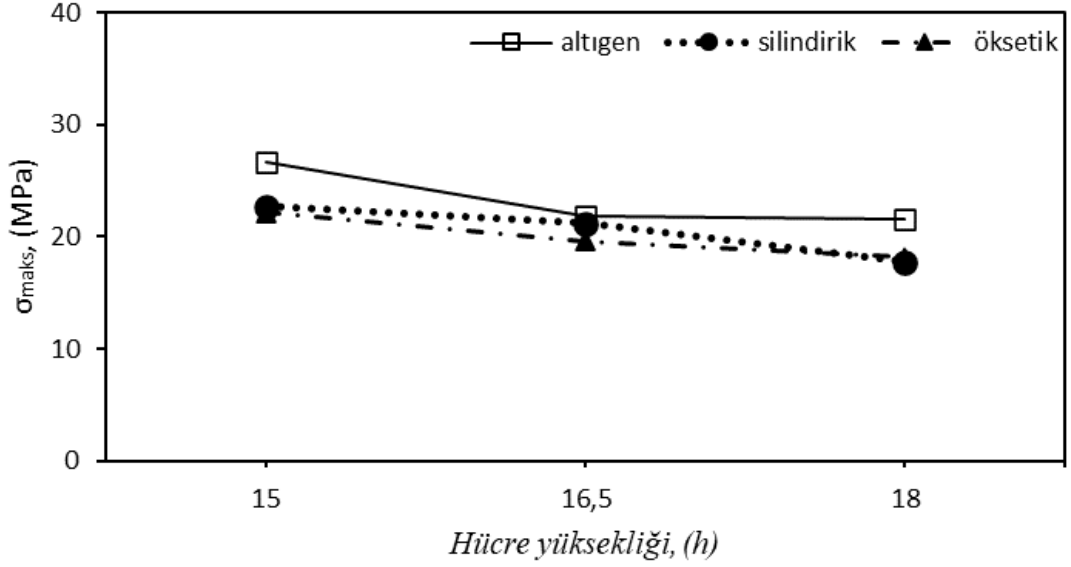
Şekil 4.28 Öksetik hücreli sandviç yapıda hücre yüksekliğine göre basma dayanımı değişimi

Silindirik hücre geometrisine sahip numunelerde hücre yüksekliği arttıkça 0,5 mm et kalınlığında %19, 0,75 mm et kalınlığında %27, 1 mm et kalınlığında %15 azalma meydana gelmiştir (Şekil 4.27). Tüm hücre et kalınlığına sahip numunelerde hücre yüksekliği arttıkça basma dayanımı azalma meydana gelmektedir. Levha kalınlığının basma dayanımı üzerindeki etkisini göstermektedir.

Hücre yüksekliği 15 mm olan sandviç numunelerde et kalınlığı arttıkça hücre basma dayanımı artmıştır (Şekil 4.28). Daha ağır numunelerde hücre basma dayanımının yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Öksetik hücreli numunelerde hücre geometrisinden kaynaklı yüzey alanı en fazla olan numuneler olmakla beraber et kalınlığının önemli olduğu görülmüştür.



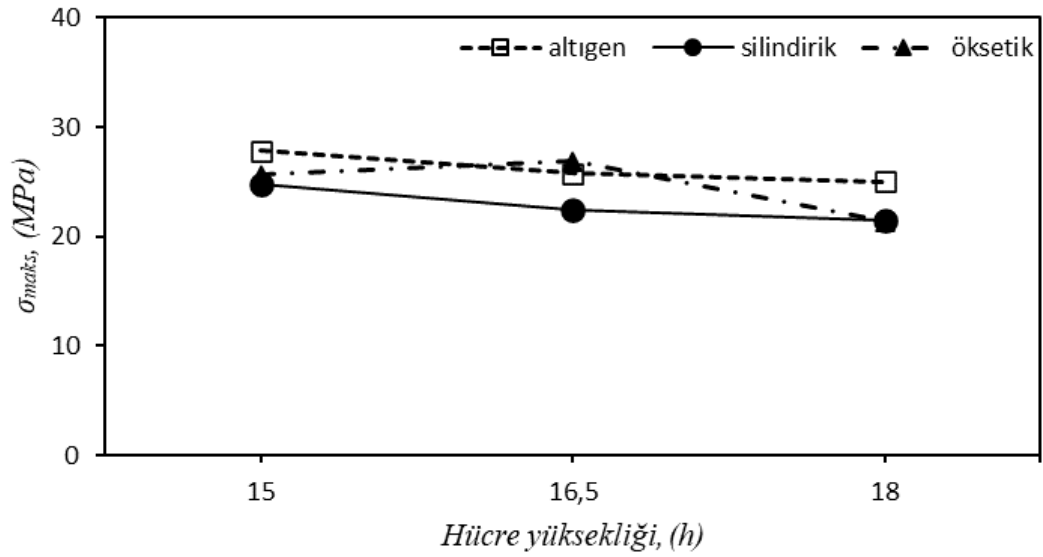
Şekil 4.29 Et kalınlığı 0,5 mm olan hücre geometrilerinin basma dayanım grafiği



Şekil 4.30 Et kalınlığı 0,75 mm olan hücre geometrilerinin basma dayanım grafiği

Hücre et kalınlığı 0,5 mm olan sandviç numunelerde en yüksek hücre basma dayanımı altıgen hücre geometrisinde görülmekte iken en düşük değer öksetik hücreli sandviç numunelerde görülmüştür (Şekil 4.29). Hücre boşluğu oranı fazla olan numunelerin basma dayanımının daha yüksek olduğu görülmüştür. Hücre yüksekliği arttıkça silindirik ve altıgen hücreli numunelerde meydana gelen hücre burkulmaları basma dayanım değerleri azaltmakta iken öksetik hücreli numunelerde burkulma görülmemiştir.

Şekil 4.30'da et kalınlığı $t = 0,75$ mm olan sandviç numunelerin özgül basma dayanım grafiği incelendiğinde; 0,75 mm et kalınlığına sahip numunelerde hücre yüksekliği 15 mm'den 18 mm değerine ulaştığında hücre basma dayanımının altıgen hücreli numunelerde %23, silindirik hücreli numunelerde %27, öksetik hücreli numunelerde %21 azalma meydana geldiği görülmektedir. Hücre yüksekliğinin artmasının hücre basma dayanımının azalmasında etkili parametre olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.31 Et kalınlığı 1 mm olan hücre geometrilerinin basma dayanım grafiği

Hücre et kalınlığı 1 mm olan sandviç numunelerde hücre yüksekliği 15 mm'den 18 mm'ye yükseldiğinde altıgen hücreli numunelerde %11, silindirik hücreli numunelerde %15, öksetik hücreli numunelerde %19 azalma tespit edilmiştir. Hücre et kalınlığı arttıkça hücre geometrisinin farklı hücre yüksekliklerinde basma dayanımına etkisi azalmıştır. Bu nedenle et kalınlığı geometri şeklinden daha önemli hale gelmiştir.

5. TARTIŞMA, SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, 3 boyutlu eklemeli imalat yöntemlerinden stereolitografi (SLA) ile üretilmiş üç farklı hücre geometrisine sahip hücresel kafes yapılı sandviç yapıların mekanik özelliklerine hücre et kalınlığının ve hücre yüksekliğinin etkisi araştırılmıştır. Yapılan çekme, üç nokta eğme, basma testleri neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Üretilen tüm numunelerde alt levha hücre kafesi ile beraber üretilmiş olup üst levha ayrı olarak üretilmiş epoksi ile yapıştırılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda yapıştırma katmanının numune ile koptuğu yapıştırma işleminin kullanılabilir yöntem olduğu tespit edilmiştir.
- Çekme deneyi sonucunda numuneler kırılma yüzeyi yük uygulama yönüne dik şekilde orta kısmından hasara uğramıştır. Eğme numunelerinde kesme gerilmesi altında 45° açı ile kırılmalar meydana gelmiştir. Basma yükü altında numunelerin hücre duvarında mikro burkulmalar direk görülmekte olup hücre duvarları yıkılmıştır.
- Hücre et kalınlığı daha ince olan sandviç yapıların hafifliklerine nazaran daha yüksek çekme, eğme, basma dayanımı gösterdiği tespit edilmiştir.
- Hücre yüksekliğinden bağımsız olarak altıgen hücreli sandviç yapıların özgül eğme dayanımının silindirik hücreli ve öksetik hücreli sandviç yapılardan daha düşük olduğu görülmüştür.
- Silindirik hücreli numunelerin hücreleri birbirine çizgisel temas ile bağlı olduğundan bu numuneler altıgen hücreli ve öksetik hücreli yapıya kıyasla eğme yükü altında daha esnek davranış göstermiştir. Bu nedenle silindirik hücreli sandviç yapılarının özgül eğme dayanımının beklenenden daha yüksek olduğu görülmüştür.
- Basma dayanımları karşılaştırıldığında her hücre geometrisinde hücre yüksekliğinin artmasıyla basma dayanımları düşmektedir.
- Basma dayanımı değerlerinde tüm et kalınlıklarında hücre boşluğu oranı fazla olan numunelerin hücre basma dayanımına daha dayanıklı olduğu tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

1. Gibson LJ. Cellular solids. MRS Bull. 2003;28(4):270-4.
2. Schaedler TA, Carter WB. Architected Cellular Materials. C. 46, Annual Review of Materials Research. Annual Reviews Inc.; 2016. s. 187-210.
3. Ercan N, Kanber B, Yunus DE. 3B Eklemeli Üretilmiş Farklı Hücresel Yapılı Sandviç Panellerin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Eğilme Davranışının İncelenmesi. C. 3, SETSCI Conference Indexing System. 2018.
4. Renji K, Nair PS, Narayanan S. Modal density of composite honeycomb sandwich panels. J Sound Vib. 1996;195(5).
5. Petras A, Sutcliffe MPF. Failure Mode Maps For Honeycomb Composite Structures Sandwich Panels. C. 44, Composite Structures. 1999.
6. Elsayed MSA. Multiscale Mechanics And Structural Design of Periodic Cellular Materials [Doktora tezi]. [Montreal]: McGill University; 2010.
7. Fiedler T, Öchsner A. Experimental Analysis of The Flexural Properties of Sandwich Panels With Cellular Core Materials. Materwiss Werksttech. Şubat 2008;39(2):121-4.
8. Paik JK, Thayamballi AK, Kim GS. The strength characteristics of aluminum honeycomb sandwich panels [Internet]. C. 35, Thin-Walled Structures. 1999. Erişim adresi: www.elsevier.com/locate/tws
9. Wang J, Shi C, Yang N, Sun H, Liu Y, Song B. Strength, stiffness, and panel peeling strength of carbon fiber-reinforced composite sandwich structures with aluminum honeycomb cores for vehicle body. Compos Struct. 15 Ocak 2018;184:1189-96.
10. Akkuş H, Düzcükoğlu H, Şahin ÖS. Alüminyum Bal Peteği Yapılarda Oluşan Eğilme Kuvvetlerinin Çoklu Regresyon İle İncelenmesi. Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi. 19 Aralık 2015;11(2).
11. Arbaoui J, Schmitt Y, Pierrot JL, Royer FX. Effect of core thickness and intermediate layers on mechanical properties of polypropylene honeycomb multi-layer sandwich structures. Archives of Metallurgy and Materials. 2014;59(1):11-6.
12. Deshpande VS, Fleck NA, Ashby MF. Effective properties of the octet-truss lattice material [Internet]. C. 49, Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2001. Erişim adresi: www.elsevier.com/locate/jmps
13. Belouettar S, Abbadi A, Azari Z, Belouettar R, Freres P. Experimental investigation of static and fatigue behaviour of composites honeycomb materials using four point bending tests. Compos Struct. Şubat 2009;87(3):265-73.
14. Arbaoui J, Moustabchir H, Pruncu CI, Schmitt Y. Modeling and experimental analysis of polypropylene honeycomb multi-layer sandwich composites under

- four-point bending. *Journal of Sandwich Structures and Materials*. 01 Mayıs 2018;20(4):493-511.
15. Alavi Nia A, Sadeghi MZ. The effects of foam filling on compressive response of hexagonal cell aluminum honeycombs under axial loading-experimental study. *Mater Des*. Mart 2010;31(3):1216-30.
 16. Gpoichand A, MR, SNVS, BGR, & KPS. Design and Analysis of Copper Honeycomb Sandwich Structure 636 [Internet]. 2013 Nis. Erişim adresi: <http://www.americanelements.com/copper-honeycomb.html>
 17. Akkuş H, Düzcükoğlu H, Sinan Şahin Ö. Experimental Design For Bending Strength Aluminum Honeycomb Structure. *C. 34, Nat Sci*. 2016.
 18. Antony Arul Prakash MD, Jagannatha Guptha VL, Sharma RS, Mohan B. Influence of cell size on the core shear properties of FRP honeycomb sandwich panels. *Materials and Manufacturing Processes*. 01 Şubat 2012;27(2):169-76.
 19. Hou Y, Tai YH, Lira C, Scarpa F, Yates JR, Gu B. The Bending and Failure Of Sandwich Structures With Auxetic Gradient Cellular Cores. *Compos Part A Appl Sci Manuf*. 2013;49:119-31.
 20. Dong Z, Li Y, Zhao T, Wu W, Xiao D, Liang J. Experimental and numerical studies on the compressive mechanical properties of the metallic auxetic reentrant honeycomb. *Mater Des*. 15 Kasım 2019;182.
 21. Zhang X, Zhang H, Wen Z. Experimental and numerical studies on the crush resistance of aluminum honeycombs with various cell configurations. *Int J Impact Eng*. Nisan 2014;66:48-59.
 22. Khoshravan MR, Najafi Pour M. Numerical and Experimental Analyses Of The Effect Of Different Geometrical Modelings on Predicting Compressive Strength Of Honeycomb Core. *Thin-Walled Structures*. 2014;84:423-31.
 23. Bang SO, Cho JU. A Study On The Compression Property of Sandwich Composite With Porous Core. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 10 Haziran 2015;16(6):1117-22.
 24. Akkuş H, Duzcukoglu H, Sahin ÖS. Experimental Research and Use Of Finite Elements Method on Mechanical Behaviors of Honeycomb Structures Assembled With Epoxy-Based Adhesives Reinforced With Nanoparticles. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 01 Ocak 2017;31(1):165-70.
 25. Aslan M, Güler O, Alver Ü. The Investigation of the Mechanical Properties of Sandwich Panel Composites with Different Surface and Core Materials. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*. 2018;24(6):1062-8.
 26. Akkuş H. Bal Peteği Yapıların Mekanik Davranışlarının Nano Parçacık Takviyeli Yapıştırıcı Kullanılarak Deneysel ve Teorik Olarak Araştırılması [Doktora Tezi]. [Konya]: Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü; 2016.

27. Taşkesen İH. Bal Peteği Sandviç Kompozitlerde Darbe Testi Sonrası Basma Davranışlarının İncelenmesi [Yüksek Lisans Tezi]. [Batman]: Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü; 2020.
28. Shi SS, Sun Z, Hu XZ, Chen HR. Carbon-fiber and aluminum-honeycomb sandwich composites with and without Kevlar-fiber interfacial toughening. *Compos Part A Appl Sci Manuf.* 2014;67:102-10.
29. Gül B. Karbon Elyaf Takviyeli Petek Yapılı Sandviç Kompozitlerin Mekanik Özelliklerine Çekirdek Malzemenin Türü ve Kalınlığının Etkisi [Yüksek Lisans Tezi]. [Bursa]: Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü; 2018.
30. Arslan N, Kaman MO. Alüminyum, Kağıt ve Cam Elyaf Petek Yapılı Kompozitlerin Üretim Teknikleri ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi.* 2002;4(3):113-23.
31. Liu L, Wang H, Guan Z. Experimental and numerical study on the mechanical response of Nomex honeycomb core under transverse loading. *Compos Struct.* 01 Mart 2015;121:304-14.
32. Côté F, Deshpande VS, Fleck NA, Evans AG. The compressive and shear responses of corrugated and diamond lattice materials. *Int J Solids Struct.* Ekim 2006;43(20):6220-42.
33. Kıyak B, Kaman MO. Hücre Boşlukları Köpük ile Doldurulmuş Kompozit Sandviç Levhaların Basma ve Eğilme Dayanımlarının İncelenmesi. *Fırat Üniversitesi Müh Bil Dergisi.* 2019;31(1):47-52.
34. Yazdani Sarvestani H, Akbarzadeh AH, Mirbolghasemi A, Hermenean K. 3D printed meta-sandwich structures: Failure mechanism, energy absorption and multi-hit capability. *Mater Des.* 15 Aralık 2018;160:179-93.
35. Solmaz MY, Çelik E. 3 Boyutlu Yazıcı Kullanılarak Üretilen Bal Peteği Sandviç Kompozitlerin Basma Yüğü Altındaki Performanslarının Araştırılması. C. 30, *Fırat Üniv. Müh. Bil. Dergisi Science and Eng. J of Fırat Univ.* 2018.
36. Öztürk B. 3 Boyutlu Yazıcı ile Üretilen Sandviç Yapıların Statik ve Dinamik Yüğü Altında Davranışlarının İncelenmesi [Yüksek lisans tezi]. [Bursa]: Bursa Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü; 2020.
37. Choy SY, Sun CN, Leong KF, Wei J. Compressive properties of functionally graded lattice structures manufactured by selective laser melting. *Mater Des.* 05 Ekim 2017;131:112-20.
38. Al-Ketan O, Rowshan R, Abu Al-Rub RK. Topology-mechanical property relationship of 3D printed strut, skeletal, and sheet based periodic metallic cellular materials. *Addit Manuf.* 01 Ocak 2018;19:167-83.
39. Ingrole A, Hao A, Liang R. Design and modeling of auxetic and hybrid honeycomb structures for in-plane property enhancement. *Mater Des.* 05 Mart 2017;117:72-83.

40. Kaur M, Yun TG, Han SM, Thomas EL, Kim WS. 3D printed stretching-dominated micro-trusses. *Mater Des.* 15 Kasım 2017;134:272-80.
41. Yang L, Harrysson O, West H, Cormier D. Mechanical properties of 3D re-entrant honeycomb auxetic structures realized via additive manufacturing. *Int J Solids Struct.* 2015;69-70:475-90.
42. Ercan N. 3B Eklemeli Üretim Yöntemiyle Üretilmiş Hücresel Kafes Yapılı Sandviç Panellerin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi [Yüksek Lisans Tezi]. [Bursa]: Bursa Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü; 2019.
43. Habib FN, Iovenitti P, Masood SH, Nikzad M. Fabrication of polymeric lattice structures for optimum energy absorption using Multi Jet Fusion technology. *Mater Des.* 2018;155.
44. Güler F. Eklemeli İmalat Destekli Dereceli Hassas Döküm Yöntemi ile Bal Peteği Yapıların Üretimi ve Karakterizasyonu [Yüksek lisans tezi]. [İstanbul]: İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü ; 2019.
45. Yeşiloğlu R, Özmen R, Günay M. The Effects of Infill Geometry and Porosity Ratio on Mechanical Properties of PLA Structures Produced by Additive Manufacturing. *Gazi Journal of Engineering Sciences.* 31 Ağustos 2023;9(2):291-303.
46. Bacak S, Varol Özkavak H, Tatlı M. Fdm Yöntemi ile Üretilen Pla Numunelerin Çekme Özelliklerine İşlem Parametrelerinin Etkisinin İncelenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi.* 30 Mart 2021;9(1):209-16.
47. Karakoç B, Uzun G. Ergiyik Yığılma Modelleme Yöntemi ile Üretilen Numunelerde Örme Yönteminin ve Baskı Yönünün Mukavemete Olan Etkisi. *Journal of Polytechnic.* 31 Mart 2023;
48. Panda B, Leite M, Biswal BB, Niu X, Garg A. Experimental and numerical modelling of mechanical properties of 3D printed honeycomb structures. *Measurement (Lond).* 01 Şubat 2018;116:495-506.
49. Evlen H, Özdemir MA, Çalışkan A. Doluluk Oranlarının PLA ve PET Malzemelerin Mekanik Özellikleri Üzerine Etkileri. *Politeknik Dergisi.* 01 Aralık 2019;22(4):1031-7.
50. Kamer MS, Temiz Ş, Yaykaşlı H, Kaya A, Akay OE. Comparison of mechanical properties of tensile test specimens produced with ABS and PLA material at different printing speeds in 3D printer. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University.* 2022;37(3):1197-211.
51. Karaman E, Çolak O. Eriyik Biriktirme Yönteminde Farklı Üretim Parametrelerinin Mekanik Özelliklere Etkisi. *ALKÜ Fen Bilimleri Dergisi.* 2019;90-9.
52. Fernandez-Vicente M, Calle W, Ferrandiz S, Conejero A. Effect of Infill Parameters on Tensile Mechanical Behavior in Desktop 3D Printing. *3D Print Addit Manuf.* 01 Eylül 2016;3(3):183-92.

53. Nguyen MQ, Jacombs SS, Thomson RS, Hachenberg D, Scott ML. Simulation of impact on sandwich structures. *Compos Struct.* 2005;67(2 SPEC. ISS.):217-27.
54. Glenn CE, Hyer MW. Bending behavior of low-cost sandwich plates. İçinde: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing.* Elsevier Ltd; 2005. s. 1449-65.
55. Baydemir T. Epoksi Reçine Teknolojileri. *Tübitak Bilim ve Teknik Dergisi.* Aralık 2020;24-33.
56. Kaboğlu C. Investigation of Sandwich Composites with Auxetic Core under Static Loading. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering.* 2022;9(1):350-9.
57. Li T, Wang L. Bending behavior of sandwich composite structures with tunable 3D-printed core materials. *Compos Struct.* 01 Eylül 2017;175:46-57.
58. Indreş AI, Constantinescu DM, Mocian OA. Bending behavior of 3D printed sandwich beams with different core topologies. *Material Design and Processing Communications.* 01 Ağustos 2021;3(4).
59. Farooq U, Ahmad MS, Rakha SA, Ali N, Khurram AA, Subhani T. Interfacial Mechanical Performance of Composite Honeycomb Sandwich Panels for Aerospace Applications. *Arab J Sci Eng.* 01 Mayıs 2017;42(5):1775-82.
60. Tatlı O. Üç Boyutlu Yazıcı Tasarımı, İmalatı ve Dolgu Geometrisinin Mekanik Özelliklere Etkisi [Yüksek Lisans Tezi]. [Bursa]: Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü; 2020.
61. Kafkashoğlu Yıldız B, Yıldız AS, Kul M, Tür YK, Işık E, Duran C, vd. Mechanical properties of 3D-printed Al₂O₃ honeycomb sandwich structures prepared using the SLA method with different core geometries. *Ceram Int.* 2023;
62. Chacón JM, Caminero MA, García-Plaza E, Núñez PJ. Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. *Mater Des.* 15 Haziran 2017;124:143-57.
63. Özer H. Sürekli Cam Elyaf Takviyeli Termoplastik Kompozit Malzemelerin Geliştirilmesi ve Mekanik Özelliklerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi [Yüksek Lisans Tezi]. [Bursa]: Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü; 2015.
64. www.dokuzkimya.com [Internet]. [Erişim tarihi 18 Aralık 2023]. Erişim adresi: www.dokuzkimya.com
65. Tuwair HR. Development, testing, and analytical modeling of fiber-reinforced Development, testing, and analytical modeling of fiber-reinforced polymer bridge deck panels [Internet]. 2015. Erişim adresi: https://scholarsmine.mst.edu/doctoral_dissertations/2421
66. Evans AG, Hutchinson JW, Fleck NA, Ashby MF, Wadley HNG. The topological design of multifunctional cellular metals [Internet]. C. 46, *Progress in Materials Science.* 2001. Erişim adresi: www.elsevier.com/locate/pmatsci

67. Hara D. Investigation Of The Use Of Sandwich Materials In Automotive Body Structures. 2012 Şub.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel bilgiler

Adı Soyadı

Siril YILDIZ

