



**HAVA ARACI PARÇALARININ EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİ İLE
TASARIMI, OPTİMİZASYONU VE DENEYSEL KARŞILAŞTIRILMASI**

Bekir KARAKOÇ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2023

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Bekir KARAKOÇ

13/06/2023

HAVA ARACI PARÇALARININ EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİ İLE TASARIMI, OPTİMİZASYONU VE DENEYSEL KARŞILAŞTIRILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Bekir KARAKOÇ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2023

ÖZET

Eklemeli imalat, dayanıklı ve hafif parçaların üretilmesini sağlayan geleneksel olmayan bir üretim yöntemidir. Üretim yöntemi açısından topoloji çalışmalarına büyük ölçüde olanak sağlayan eklemeli imalat, geleneksel imalat yöntemlerine göre üretilen parçalardan daha hafif ve daha dayanıklı olabilmektedir. Eklemeli imalatta üretilen malzemelerde istenilen özelliklerin oluşturulması için malzeme üretim parametreleri büyük öneme sahiptir. Örme yöntemi ve baskı yönü bu parametrelerin başında gelmektedir. Bu çalışmada, ergiyik yığılma modelleme (FDM - Fused Deposition Modelling) esaslı üç boyutlu yazıcı kullanılarak PLA (polilaktik asit) filamentten üretilen 14 adet parçadan oluşan bir montaja topoloji optimizasyonu yapılmıştır. Ayrıca eklemeli imalat ile yekpare olarak, parçanın işlevi değiştirilmeden, ideal forma ve ağırlığa ulaşması amaçlanmıştır. Çalışmada öncelikle çekme test numuneleri üretilmiş ve çıkan sonuçlar özelinde statik test numuneleri üretilerek test edilmiştir. Test numuneleri düz çizgili (rectilinear), dönel çizgili (gyroid) ve bal peteği (honeycomb) olmak üzere üç farklı örme yöntemi tercih edilmiş olup yatay ve dikey baskı yönü haricindeki diğer tüm parametreler sabit tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar deformasyon, uzama oranı, maksimum yük, akma dayanımı, çekme dayanımı ve kopma dayanımı açısından incelenmiştir. Çekme testleri sonucunda elde edilen sonuçlara göre topoloji optimizasyonu yapılan parça %50 oranında hacimsel olarak azaltılmış ve üç boyutlu yazıcıda üretildikten sonra statik teste maruz bırakılmıştır. Çekme test sonuçlarına göre en fazla çekme dayanımı değerinin dönel çizgili (gyroid) örme yöntemli dikey yerleşimli numunelere ait olduğu, en düşük çekme dayanımı değerinin ise düz çizgili (rectilinear) örme yöntemli yatay, test numunelerine ait olduğu gözlemlenmiştir. Statik test sonuçlarına göre ise en dayanımlı yapının dönel çizgili (gyroid) dikey olarak üretilen test numunesi olduğu gözlemlenmiştir.

Bilim Kodu : 91428

Anahtar Kelimeler : Topoloji optimizasyonu, eklemeli imalat, 3B baskı, akma dayanımı, örme yöntemi, EYM, PLA

Sayfa Adedi : 75

Danışman : Doç. Dr. Gültekin UZUN

DESIGN, OPTIMIZATION AND EXPERIMENTAL COMPARISON OF
AIRCRAFT PARTS BY THE ADDITIVE MANUFACTURING METHOD

(M. Sc. Thesis)

Bekir KARAKOÇ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2023

ABSTRACT

Additive manufacturing is a non-traditional manufacturing method that allows the production of durable and lightweight parts. Additive manufacturing, which greatly allows topology studies in terms of production method, can be lighter and more durable than the parts produced according to traditional manufacturing methods. Material production parameters are of great importance in order to create the desired properties in the materials produced in additive manufacturing. Knitting method and printing direction are at the beginning of these parameters. In this study, topology optimization was performed on an assembly consisting of 14 pieces produced from PLA (Polylactic Acid) filament using a three-dimensional printer based on FDM (Fused Deposition Modeling). In addition, with additive manufacturing, it is aimed to achieve the ideal shape and weight uniformly, without changing the function of the part. Firstly, tensile test samples were produced in the study and static test samples were produced and tested according to the results. Three different knitting methods were preferred as rectilinear, gyroid and honeycomb knitting test samples, and all other parameters except horizontal and vertical printing direction were kept constant. The obtained results were examined in terms of deformation, elongation rate, maximum load, yield strength, tensile strength and tensile strength. according to the results obtained as a result of tensile tests, the topology-optimized part was volumetrically reduced by 50% and subjected to static testing after being produced on a three-dimensional printer. According to the tensile test results, it was observed that the highest tensile strength value belongs to vertically placed samples with rotational striped (gyroid) knitting method, while the lowest tensile strength value belongs to horizontal test samples with straight linear (rectilinear) knitting method. According to the static test results, it has been observed that the most durable structure is the test sample produced vertically with a rotational line (gyroid).

Science Code : 91428

Key Words : Topology optimization, additive manufacturing, 3D printing, yield strength, knitting method, FDM, PLA

Page Number : 75

Supervisor : Assoc. Dr. Gültekin UZUN

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim boyunca değerli tecrübeleri ve bilgi birikimiyle beni yönlendiren, hiç bir sorumu yanıtızsız bırakmayan saygıdeğer hocam Doç. Dr. Gültekin UZUN’a desteklerinden dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

TUSAŞ’ta beraber çalışma fırsatı bulduğum değerli yöneticim Sayın Bora KARALLI’ya desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Üretim sürecime ve test çalışmalarına katkılarından dolayı, Burak ÇETİN “TUSAŞ” ve Türk Havacılık ve Uzay Sanayii Helikopter Sistem Test Bölümü’ne teşekkür ederim.

Hayatının her anında bana ve kardeşime daha iyi bir gelecek sunabilmek için çabalayan, maddi ve manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen kıymetli annem Meryem KARAKOÇ ve kıymetli babam Hasan KARAKOÇ’a; ayrıca kardeşim olmanın tüm zorluklarına sabreden Melda GEMİCİ’ye teşekkür ederim.

Son olarak, tanıştığımız günden beri her an yanımda olan, hayattaki en büyük şansım, sevgili eşim Gonca KARAKOÇ’a bu zorlu süreçte bana sonsuz sabır gösterdiği, zorlandığım ve umutsuzluğa kapıldığım tüm anlarda manevi desteğiyle yanımda olduğu için teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	3
2.1. Genel Literatür Taraması	3
2.2. Topoloji Literatür Taraması.....	4
2.3. Örgü Yöntemi ve Doluluk Oranı Literatür Taraması	5
2.4. Literatür Değerlendirmesi	9
3. EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİ VE TOPOLOJİ.....	11
3.1. Ergiyik Yığma Modelleme Yöntemi.....	11
3.2. Optimizasyon Kavramı	12
3.3. Eklemeli İmalatta Topoloji Optimizasyonu	15
4. MATERYAL VE METOD	17
4.1. Kullanılan Cihaz ve Ekipman Bilgileri	18
4.1.1. Üretimin yapıldığı üç boyutlu yazıcı ve filament bilgileri	18
4.1.2. Çekme test cihazı	19

	Sayfa
4.1.3. Statik test düzeneği ve kullanılan ekipmanlar	21
4.2. Numunelerde Kullanılan Örme Yöntemleri	26
4.3. Numunelerde Kullanılan Baskı Yönleri	26
4.4. Tasarım ve Analiz Süreci	27
4.5. Topoloji Uygulaması	29
4.6. Statik Analiz Süreci	30
5. DENEYSEL FAALİYETLER	31
5.1. Çekme Testleri	31
5.2. Statik Testler	35
5.2.1. Yerleşim yönü	36
5.2.2. Örme yöntemlerine göre üretim	37
6. SONUÇ VE TARTIŞMA	39
6.1. Montajlı Parçanın Statik Analiz Sonuçları	39
6.2. Topoloji Sonrası Statik Analiz Sonuçları	40
6.3. Çekme Testi Sonuçları	41
6.4. Çekme Testi Kıyaslama Sonuçları	45
6.5. Kopma Yüzeylerinin İncelenmesi	49
6.6. Numunelerin Fiziksel Özellikleri	52
6.7. Statik Test Deneyi Sonuçları	53
7. SONUÇLAR	61
KAYNAKLAR	63
EKLER	67
ÖZGEÇMİŞ	75

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Literatür değerlendirme özet tablosu	9
Çizelge 4.1. Çalışmanın aşamalarının özetlenmesi.....	18
Çizelge 4.2. Çalışmada kullanılan yazıcıya ait özellikler	19
Çizelge 4.3. Çalışmada kullanılan malzemeye ait özellikler	19
Çizelge 6.1. Test edilen çekme numunelerinin test sonuçları ortalaması	46
Çizelge 6.2. Çekme test numunelerinin fiziksel özellikleri	52
Çizelge 6.3. Statik test numunelerinin fiziksel özellikleri	53

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Ergiyik yığma modelleme yöntemi diyagramı	12
Şekil 3.2. Boyut, şekil ve topoloji optimizasyonu grafiksel gösterimi	13
Şekil 3.3. Sırasıyla boyut, şekil ve topoloji optimizasyonu	14
Şekil 3.4. Topoloji optimizasyon süreci	14
Şekil 4.1. Çalışmanın genel süreç yönetimi	17
Şekil 4.2. Çalışmada kullanılan örme yöntemleri a) düz çizgi (rectilinear), b) dönel çizgi (gyroid), c) bal peteği (honeycomb)	26
Şekil 4.3. Numunelerin 3D yazıcıya yerleşimi	26
Şekil 4.4. Deney numunesinin montajı ve CAD modeli	27
Şekil 4.5. Parçaya ilk mesh atılması işlemi	27
Şekil 4.6. Paçadan hassas mesh yüzeyinin oluşturulması	28
Şekil 4.7. Analiz ve topoloji optimizasyonu sınır koşullarının belirlenmesi	28
Şekil 4.8. Topoloji optimizasyonu hacim azaltma çalışmaları	29
Şekil 4.9. Topoloji optimizasyonu %50 hacim azaltma çalışması	29
Şekil 4.10. Parça üzerindeki topoloji uygulamasının genel görünümü	30
Şekil 4.11. Sınır koşullarının tanımlanması	30
Şekil 5.1. ASTM D638 Type I numune ölçüleri	31
Şekil 5.2. Çekme numunesi CAD modeli	32
Şekil 5.3. Düz çizgi (rectilinear) örme yöntemine göre test numunelerinin yazıcıya yerleşimi	33
Şekil 5.4. Dönel çizgili (gyroid) örme yöntemine göre test numunelerinin yazıcıya yerleşimi	34
Şekil 5.5. Bal peteği (honeycomb) örme yöntemine göre test numunelerinin yazıcıya yerleşimi	35
Şekil 5.6. Numunenin tablaya yerleşimi; dikey yerleşim (a), yatay yerleşim (b)	36

Şekil	Sayfa
Şekil 5.7. Gyroid örme tipi ile dikey yerleşimli üretim	37
Şekil 5.8. Gyroid örme tipi ile yatay yerleşimli üretim	37
Şekil 5.9. Rectilinear örme tipli yatay yerleşimli üretim	38
Şekil 6.1. Statiik analiz eş değer gerilme sonucu.....	39
Şekil 6.2. Y eksenindeki deformasyon (1) ve Ansys güvenlik faktörü (2).....	39
Şekil 6.3. STR uygulaması yapılacak yerlerin tespiti	40
Şekil 6.4. Topoloji uygulaması yapılan parçanın deformasyon (a), eşdeğer gerilme (b) ve güvenlik faktörü (c)	41
Şekil 6.5. Düz çizgili (rectilinear) örme tipine sahip yatay ve dikey yerleşimli test numunelerinin yük-deformasyon grafikleri.....	43
Şekil 6.6. Dönel çizgili (gyroid) örme tipine sahip yatay ve dikey yerleşimli test numunelerinin yük-deformasyon grafikleri.....	44
Şekil 6.7. Bal peteği (honeycomb) örme tipine sahip yatay ve dikey yerleşimli test numunelerinin yük-deformasyon grafikleri.....	45
Şekil 6.8. Test numunelerinin deformasyon ve uzama oranı değerlerinin kıyaslanması.	46
Şekil 6.9. Test numunelerinin maksimum yük ve akma dayanımı değerlerinin kıyaslanması.	47
Şekil 6.10. Test numunelerinin çekme dayanımı ve kopma dayanımı değerlerinin kıyaslanması.....	48
Şekil 6.11. Düz çizgili (rectilinear) örme yöntemli dikey numune kesiti	51
Şekil 6.12. Düz çizgili (rectilinear) örme yöntemli yatay numune kesiti	51
Şekil 6.13. Bal peteği (honeycomb) örme yöntemli dikey numune kesiti.....	51
Şekil 6.14. Bal peteği (honeycomb) örme yöntemli yatay numune kesiti	51
Şekil 6.15. Dönel çizgili (gyroid) örme yöntemli dikey numune kesiti.....	52
Şekil 6.16. Dönel çizgili (gyroid) örme yöntemli yatay numune kesiti.....	52
Şekil 6.17. Çekme test numunelerinin fiziksel özellikleri	53
Şekil 6.18. Her bir numune için ayak bölgesi yatay (x) yönlü gerinim ölçer verisi	58

Şekil	Sayfa
Şekil 6.19. Her bir numune için üst duvar bölgesi dikey (y) yönlü gerinim ölçer verisi.....	58
Şekil 6.20. Düz çizgili (rectilinear) yatay numune için kuvvet ölçer (loadcell) verisi ...	59
Şekil 6.21. Dönel çizgili (gyroid) yatay numune için kuvvet ölçer (loadcell) verisi.....	59
Şekil 6.22. Dönel çizgili (gyroid) dikey numune için kuvvet ölçer (loadcell) verisi.....	60

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Raise 3D Pro2 Plus 3D yazıcı.....	18
Resim 4.2. UTEST PROFI X6 çekme test cihazı	20
Resim 4.3. Test numunesinin çekme cihazına bağlanmış görseli.....	20
Resim 4.4. Statik test düzeneği genel görünümü	21
Resim 4.5. Test numunesi içerisine yerleştirilen içi boş kancalı tahta yapı	22
Resim 4.6. Gyroid yatay test numunesine gerinim ölçer markalaması (a) ve uygulaması (b).....	22
Resim 4.7. Gyroid yatay test numunesi uygulanan gerinim ölçerlerin yakın görünümü	23
Resim 4.8. Gyroid dikey test numunesine gerinim ölçer uygulaması	24
Resim 4.9. Rectilinear yatay test numunesine gerinim ölçer uygulaması	24
Resim 4.10. Data toplama ekranı (a), data haritası (b)	25
Resim 4.11. NI STR modülü (a), STR modülü iç yapısı (b)	25
Resim 5.1. Üretilen çekme test numuneleri	32
Resim 5.2. Düz çizgi (rectilinear) örme yöntemine göre üretilen yatay ve dikey test numuneleri	33
Resim 5.3. Dönel çizgili (gyroid) örme yöntemine göre üretilen yatay ve dikey test numuneleri	34
Resim 5.4. Bal peteği (honeycomb) örme yöntemine göre üretilen yatay ve dikey test numuneleri	35
Resim 5.5. Üretilen test numuneleri; dikey yerleşimli (a), yatay yerleşimli (b).....	36
Resim 5.6. Dönel çizgili (gyroid) örme tipi ile dikey yerleşimli üretim.....	37
Resim 5.7. Dönel çizgili (gyroid) örme tipi ile yatay yerleşimli üretilen test numunesi	38
Resim 5.8. Düz çizgili (rectilinear) örme tipi ile yatay yerleşimli üretilen test numunesi	38
Resim 6.1. Test edilen tüm çekme numuneleri.....	42

Resim	Sayfa
Resim 6.2. Rectilinear çekme test numunesinin yüzeylerinin detaylı incelenmesi	49
Resim 6.3. Honeycomb çekme test numunesinin yüzeylerinin detaylı incelenmesi	50
Resim 6.4. Gyroid çekme test numunesinin yüzeylerinin detaylı incelenmesi	50
Resim 6.5. Statik test numuneler üzerindeki gerninim ölçerlerin markalanması	54
Resim 6.6. Gyroid yatay test numunenin statik test düzeneği (a), gyroid yatay test numunesinin son hali (b).....	55
Resim 6.7. Gyroid yatay test numunesinin kırılma yüzeyinin yakın çekimi	55
Resim 6.8. Gyroid dikey test numunenin statik test düzeneği (a), gyroid dikey test numunesinin son hali (b).....	56
Resim 6.9. Gyroid dikey test numunesinin kırılma yüzeyinin yakın çekimi test anı (a), test sonrası (b)	56
Resim 6.10. Rectilinear yatay test numunenin statik test düzeneği (a), rectilinear yatay test numunesinin son hali (b)	57
Resim 6.11. Rectilinear yatay test numunesinin kırılma yüzeyinin yakın çekimi.....	57

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

dk	Dakika
m	Metre
mm	Milimetre
mm²	Milimetre kare
MPa	Megapaskal
N	Newton
sn	Saniye

Kısaltmalar

Açıklamalar

3D	Üç Boyut
ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım
DiK	Dikey
FDM	Ergiyik Yığma Modelleme
GYR	Gyorid (Dönel Çizgi)
HON	Honeycomb (Bal Peteği)
PLA	Polilaktik Asit (Filament)
REC	Rectilinear (Düz Çizgi)
STL	Standard Tessellation Language
YAT	Yatay

1. GİRİŞ

Üç boyutlu baskı teknolojisi olarak da bilinin eklemeli imalat; daha güçlü, daha hafif parçaların veya sistemlerin üretilmesini sağlayan geleneksel olmayan bir üretim yöntemi olarak tanımlanır. Eklemeli imalatta kullanılan malzemeyi katman katman üzerine sererek, belirli geometrik şekillerde üst üste biriktirmeye yönlendirmek için bilgisayar destekli tasarım yani CAD yazılımı veya 3D nesne tarayıcılar kullanılır. Amerikan Test ve Malzeme Kurumu (ASTM-American Society for Testing and Materials) Eklemeli Üretim Teknolojileri Komitesi F42 tarafından yayınlanan ASTM F2792-12a'ya göre eklemeli imalat toplam yedi başlık altında sınıflandırılmaktadır. Bunlar sırasıyla; malzeme püskürtme (material jetting), bağlayıcı püskürtme (binder jetting), toz yatağı füzyon (powder bed fusion), sac laminasyon (sheet lamination), yönlendirilmiş enerji yığıma (directed energy deposition), vat fotopolimerizasyon (vat photopolymerisation) ve malzeme ekstrüzyon (material extrusion) metotlarıdır [1-3]. Bu tez kapsamında malzeme ekstrüzyon metotlarından birisi olan ergiyik yığıma modelleme yöntemi kullanılmıştır.

Ergiyik yığıma modelleme metodu toplam sekiz basamakta sınıflandırılabilir. İlk aşama, üretilcek nesnenin 3B modelini oluşturmaktır. Bu model, bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımı ile veya bir lazer tarayıcı kullanılarak tersine mühendislik yöntemleri ile tasarlanabilir. Birinci aşamada, Oluşturulan CAD dosyası daha sonra standart bir eklemeli imalat dosya formatına, genellikle bir standart mozaik dili (STL- Standard Tessellation Language) dosyasına dönüştürülür. STL dosya formatına dönüştürme işlemi, şekilleri mozaikleştirmektedir. ve bunu yapmak için gereken süre, bilgisayarın gücüne ve modelin karmaşıklığına bağlı olarak değişiklik gösterebilir. İkinci aşamada ise dosya dijital formda katmanlara bölünür. Üçüncü aşamada, STL dosyasının yazıcıya aktarılması işlemidir. Malzeme, zaman ve maliyetten kazanç sağlamak için ve üretilcek nesnenin yazıcı platformundaki konumu ve boyutlandırılması kontrol edilmelidir. Böylece tek seferde birden fazla parça gurubu yazdırılmış olur. Dördüncü aşamada, cihaz ilgili modeli katman katman dilimlere ayırır. Katman kalınlığı nihai kaliteyi belirler ve bu özellik makineye doğrudan bağlıdır. Bir modelin boyutu, makine boyutuna bağlıdır ve çoklu parça üretimini direkt olarak etkiler. Parçayı oluşturup, soğutma ve kürleme aşamaları uyguladıktan sonra model yazıcıdan çıkarılabilir. Yüzeyin parlatılması, temizlenmesi ve boyanması gibi ek işlemler tasarımsal olarak istenebilir. Bu aşama, geleneksel imalat yöntemlerine ait olan makinelerin ve aletlerin kullanımını içerebilir [4-5].

Ergiyik yığma modelleme (FDM- Fused Deposition Modeling) yönteminde, mekanik özellikler parçalar üzerinde oldukça önemli etkilere sahiptir. Seçilen parametrelerin mekanik performans üzerindeki etkilerinin incelenmesi büyük önem arz etmektedir. Ergiyik yığma modelleme yönteminde malzemenin dayanım vb. özelliklerini etkileyen çok sayıda parametre mevcuttur [6-9]. Ergiyik yığma modelleme yönteminde parçaların performansları ve kaliteleri üzerinde işlem parametrelerinin (örme yöntemi, baskı yönü, katman kalınlığı, dolgu yoğunluğu ve üretim hızı) önemli bir etkisi vardır [10-11]. Bu tez kapsamında örme tipi ve baskı yönü parametreleri üzerinde durulmuş ve diğer tüm parametreler (tabla sıcaklığı, katman kalınlığı vb.) sabit tutulmuştur.

Topoloji optimizasyonu, tasarımcı belirlenen sınır şartları altında ürünün mekanik özelliklerinin en uygun dağılımının öğrenilmesi amacı ile kullanılan bir optimizasyon çeşididir. Eklemeli imalat yönteminde topoloji optimizasyonunun kullanılması ile yapılan optimizasyon sonucu elde edilen parçanın yada sistemin deneme amaçlı üretimleri yapılarak yapısal özelliklerinin değerlendirilmesi kolaylaşmakta böylece tasarım döngüsü belirgin bir şekilde kısaltılabilmektedir. Geleneksel imalat yöntemleri ile model basitleştirilmeden üretimin gerçekleştirilmesi mümkün olmamaktadır. Bu sebeple eklemeli imalat yöntemlerinin ortaya çıkışı topoloji optimizasyonu sonuçlarının aktif olarak uygulanabilirliğini arttırmıştır [12].

Bu çalışma kapsamında, bir montajda belirlenen sınır şartları altında topoloji optimizasyonu uygulanarak analiz ve deney çalışmaları yapılmıştır. Bu tez çalışmasının diğer çalışmalardan temel farkı 14 adet parçanın bir araya getirilerek oluşturulan bir montajın eklemeli imalat ile yekpare olacak şekilde, parçanın işlevi değiştirilmeden, ideal forma ve ağırlığa ulaşması amaçlanmıştır. Topolojik açıdan uygun formu tespit edilen numunelerin üretimi için çekme testleri yapılmış ve ideal örme yöntemi ve örme yönü belirlenmiştir. İdeal örme yöntemi ve örme yönüne göre topoloji optimizasyonu uygulanan parça üç boyutlu yazıcıda üretildikten sonra statik test düzeneğinde testlere maruz bırakılmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Yapılan literatür taraması üç başlık altında incelenmiştir. Eklemeli imalat ile ilgili genel araştırmalar 2.1 başlığı altında, topoloji optimizasyonu ile ilgili araştırmalar 2.2 başlığı altında, örgü yöntemi ve doluluk oranları ile ilgili literatür araştırmaları ise 2.3 başlığı altında sunulmuştur.

2.1. Genel Literatür Taraması

Bu başlık altında eklemeli imalat yöntemleri hakkında genel çalışmalar incelenmiş olup aşağıda sunulmuştur.

Elmas (2021), modern imalat yöntemlerinden birisi olan olan FDM tipi bir üç boyutlu yazıcı ve polilaktik asit (PLA) filament kullanılarak ve üretim parametre değerlerini sabit tutarak, altı adet farklı konumlandırmada numuneler üretmiştir. Üretilen numunelerin mekanik özelliklerini kıyaslamak amacıyla çekme, üç nokta eğme, yüzey pürüzlülüğü, aşınma deneyleri ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmada, çekme dayanımının en düşük olduğu ZXY ile ZYX ikilisine kıyasla XYZ ile YXZ ikilisinin çekme dayanımının yaklaşık %90 ve XZY ile YZX ikilisinin çekme dayanımının ise yaklaşık %205 daha yüksek olduğuna ulaşılmıştır [13].

Çelik ve Çetinkaya (2018), yaptıkları çalışmada, geleneksel imalat yöntemiyle üretilen bir üç boyutlu yazıcıyı referans alarak yeni bir üç boyutlu yazıcı prototip geliştirilmiştir. Referans olarak alınan üç boyutlu yazıcı bağlantı parçalarının ölçüleri baz alınarak yeni bağlantı arayüzleri tasarlanmıştır. Tasarlanan bağlantı arayüzleri prototip üç boyutlu yazıcının üretiminde kullanılmıştır. Ayrıca çalışmada referans ve prototip yazıcıda ABS ve PLA malzemelerinden yazdırılan gözlük numunelerinin çekme mukavemetleri karşılaştırılmıştır [14].

Çelik ve Özkan (2017), yaptıkları çalışmada, eklemeli imalatın kullanım alanları, imalattaki önemi, uygulama biçimleri ve bu imalat yönteminin avantaj-dezavantajları araştırmışlardır. Hangi uygulamada hangi metodun tercih edilmesi gerektiği yönünde araştırmalar yapmışlardır. Çalışmada, farklı geometri, yoğunluk, malzeme ve fiziksel özellikler içeren ürünler için farklı yöntemlerin tercihinin olacağı tespit edilmiştir. Süre, malzeme miktarı,

yüzey kalitesi gibi farklı etkenlerin, üretim sürecinde aktif rol oynadığı ortaya konmuştur. Müşteri istekleri için farklı yöntemleri kullanılmaktadır. Örneğin, lazer eritmenin lazer sinterlemeden daha iyi yüzeyler oluşturabilmesi, elektron ışın eritme yöntemi ile dayanıklı tozlar kullanılabilir olması, kullanıcının isteklerine uygun yöntemi seçmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır [15].

Yalçın ve Ergene (2017), yaptıkları çalışmada, geleneksel imalat yöntemleri dışında yapılan çalışmaları inceleyerek üç boyutlu eklemeli imalat yöntemlerini ve uygulama alanlarını araştırarak imalat sektörüne faydalı olabilecek yeni bilgiler sunmuşlardır [16].

2.2. Topoloji Literatür Taraması

Bu başlık altında eklemeli imalat yöntemlerinde sıkça kullanılan topoloji yöntemi hakkındaki çalışmalar incelenmiş olup aşağıda sunulmuştur.

Enginar (2014), bu çalışmada, yorulma testlerinden geçmiş ve çoğunlukla ağır taşıtlarda kullanılan bir jantın statik analizleri ve optimizasyonu sonlu elemanlar yöntemiyle Altair HyperWorks yazılımının Radioss ve Optistruct modülleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil optimizasyonu ve topoloji optimizasyonu neticesinde ilk tasarımının değiştirilmiştir. Yapılan optimum tasarım, modellerin maksimum gerilme ve ağırlık değerlerine göre belirlenmiştir [17].

Mete (2022), bu çalışmada, rot başı için topoloji optimizasyonu gerçekleştirmiştir. Belirli sınır şartları altında optimize edilen rot başı tasarımına ulaşmak amaçlanmıştır. Çalışmanın başında üç boyutlu modelleme çalışmaları yapılmış olup sonrasında rot başı yorulma ve burkulma performanslarını değerlendirmek için sonlu elemanlar analiz yöntemi kullanılmıştır. İlgili sonuçlar kıyaslanarak en uygun tasarım belirlenmiştir. Plastik deformasyon başlangıcı birinci model için 28,9 kN; ikinci model için 19,6 kN'da gerçekleşmiştir. Burkulma ise birinci model için 29,5 kN; ikinci model için 21,4 kN'da görülmektedir. Buna göre birinci model plastik deformasyon ve burkulma için müşteri gereksinimlerini karşılarken ikinci model karşılayamadığı görülmüştür [18].

Botsalı (2022), bu çalışmada, süspansiyon sisteminin alt kontrol kolunu örnek model olarak seçmiş ve topoloji optimizasyonu çalışmaları seçilen model üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Başlangıç modeli ve topoloji çalışmaları sonucu ortaya çıkan nihai model sonlu elemanlar analizlerine tabi tutulmuştur. Optimize edilen modelde yer değiştirme, gerilme ve doğal frekansların neredeyse sabit kalmasına karşın, %16,39 kütleli hafifleme sağlanmıştır [19].

Erol (2019), bu çalışmada, üst tork kolu komponenti için Alüminyum 7475 T7351 malzemesini seçerek üst tork kolunu Solidworks (SW) programını kullanarak modellemiştir. Statik analiz ve topoloji optimizasyonu çalışmasını Solidworks, ANSYS Workbench, HyperWorks ve sT Inspire yazılımları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yeniden tasarım sonrası parça ağırlıklarından sırasıyla %22,95 ve %41,8'lik kazanç sağlanmıştır [20].

Işık (2009), optimizasyon için ihtiyaç duyulan sınır şartlarını belirledikten sonra, Optistruct programını kullanarak bir çatallı flanşın topoloji optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Topoloji optimizasyonu sonucu ilgili parçaya ait yeni geometri modellenmiş ve sonlu elemanlar yöntemi ile analiz çalışmaları ile statik analizleri yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonlu elemanlar analizi ile doğrulanan yeni çatallı flanş geometrisinin üretimine karar verilmiş ve sonrasında fiziksel doğrulama testleri yapılmıştır. Yapılan topolojik optimizasyon çalışması sonucunda çatallı flanşın ağırlığı % 12 civarında azaltılmıştır [21].

2.3. Örgü Yöntemi ve Doluluk Oranı Literatür Taraması

Bu başlık altında eklemeli imalat yöntemi olan ergiyik yığma modellemede kullanılan örme yöntemleri ve doluluk oranları hakkındaki çalışmalar incelenmiş olup aşağıda sunulmuştur.

Koç (2022), bu çalışmada, PLA ve Re-PLA filament kullanılmış olup, filament çapı 1,75 mm tercih edilmiştir. Çalışmada FDM imalat yöntemi seçilerek ve baskı doluluk oranları %30, %50 ve %70 seçilmiştir. Örgü yöntemi ise çizgi kafes ve bal peteği olarak belirlenmiştir. Çekme testi numuneleri için: ISO 527 Type IV, izod darbe testi için ise ISO 180 Type I standartlarında iki farklı test numuneleri üretilmiştir. Test verilerine göre; PLA'nın çekme dayanımı, tüm katman kalınlıkları (0,15 mm, 0,20 mm, 0,25 mm ve 0,30 mm) ve doluluk oranları için Re-PLA'dan yüksek çıkmıştır [22].

Öztürk (2020), bu çalışmada, dört farklı sandviç yapı modeli tasarlanmıştır. Sandviç yapılar girintili, bal peteği, üçgen ve yıldız olarak Solidworks programında tasarlanmıştır. Sandviç

yapıların imalatı için FDM tipi üç boyutlu yazıcı kullanılmıştır. Sandviç yapılar termoplastik poliüretan (Ultimaker TPU 95 A) malzemeden imal edilmiştir. Mekanik özellikleri belirleyebilmek için basma test numuneleri imal edilmiştir. Gerçekleştirilen testlerde elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Basma test sonuçlarına göre Girintili sandviç yapı 11118.2 N ile en iyi basma dayanımına sahip olduğu tespit edilmiştir. Üçgen sandviç yapı basma test sonuçlarına göre basma dayanımı 1812.3 N ile en düşük model olduğu tespit edilmiştir. [23].

Efe (2020), çalışmasında, 3 boyutlu yazıcı teknolojisi ile üretilen bir parçanın dayanımı incelemiştir. Bu amaçla sanayide yük taşıma sistemlerinde sıklıkla kullanılan gözlü kanca bilgisayar destekli tasarım modellendikten sonra farklı üretim parametreleri (iç örme yapısı ve doluluk oranı) kullanılarak eklemeli imalat yöntemi ile üretilerek yük taşıma kabiliyeti incelenmiştir. Bunun yanında model sonlu elemanlar yöntemi ile de analiz edilerek parça üzerinde oluşan gerilmeler incelenmiştir. Bunun yanında üç boyutlu üretim teknolojisinin avantajlar kullanılarak gerek test gerekse de sonlu elemanlar yöntemi ile parça üzerinde tespit edilen zayıf bölgelere güçlendirmeler yapılarak parçaların dayanımlarının olumlu yönde iyileşeceği de gözlemlenmiştir [24].

Tatlı (2020), karmaşık geometriye sahip parçaların doğrudan üretimi mümkün kılan katmanlı üretim teknolojileri arasındaki en popüler ve ucuz yöntem olan FDM yöntemini kullanarak 200x200x210 mm yazdırma hacmine sahip bir üç boyutlu yazıcı tasarımı ve imalatı yapılmıştır. İmal edilen üç boyutlu yazıcı ile beş farklı iç dolgu geometrisine sahip PLA test numunesi üretilmiştir. Bu numunelere darbe, çekme ve üç nokta eğilme testleri yapılarak iç dolgu geometrilerinin mekanik özelliklere olan etkisi incelenmiştir. Çekme testi sonuçları değerlendirildiğinde; maksimum çekme dayanımı değerine 23,64 MPa değeriyle “triangle” iç dolgu ile en düşük mukavemet değerine ise 20,52 MPa ile “gyroid” iç dolgu ile ulaşılmıştır. Bu iki sonuç değerlendirildiğinde; iç dolgu geometrisindeki farklılığın mukavemeti yaklaşık olarak %15,2 oranında arttırdığı sonucuna ulaşılmıştır [25].

Çelik (2019), bu çalışmada, bal peteği (altıgen petek) yapıları sandviç kompozitlerin üç nokta eğilme ve basma kuvvetleri etkisi altındaki davranışlarını sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Kompozit levhaların yüzey örtüsü polyester/cam fiberden üretilmiş olup petek hücrelerin üretiminde ise ABS ve PLA olmak üzere 2 farklı özelliğe sahip malzeme kullanılmıştır. Sandviç yapıların çekirdek kısmının üretimi üç boyutlu yazıcı kullanılarak

gerçekleştirmiştir. Üç farklı hücre boyutuna ve üç farklı hücre yüksekliğine sahip petek yapılı sandviç numuneler aksel basma ve üç nokta eğilme deneyine maruz bırakılmıştır. Deneysel çalışmalardan sonra aynı sınır şartları için Ansys Workbench paket programı kullanılarak sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda altıgen petek hücre yüksekliğinin artmasına bağlı olarak basma dayanımının azaldığı, eğilme mukavemetinin arttığı sonucu görülmüştür [26].

Uzun ve arkadaşları (2017), yaptıkları çalışmada, üretilen numunelerin örme desenlerine göre çapraz açılı örme deseninden sonra yatay numunelerin mukavemet değerlerinin dikey numunelere oranlara daha yüksek çıktığını gözlemlenmişlerdir [27].

Özdemir ve arkadaşları (2016), yığılma teknolojisine sahip kartezyen tipi üç boyutlu bir yazıcı tasarımı yapmışlardır. Tasarladıkları yazıcıda ürettikleri malzemelerin doluluk oranlarının parçaların mekanik özelliklerine olan etkilerini araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada üç boyutlu yazıcıda PET ve PLA olmak üzere iki farklı malzeme kullanmışlardır. Bu malzemelerden %10, %20, %30, %40 ve %50 doluluk oranlarında numuneler hazırlayarak birçok test icra etmişlerdir. Üretilen numuneler tek aksel çekme testleri tabi tutulmuş, sertlik ve pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. İcra edilen testler ve yapılan ölçümler sonucunda her iki malzemede de sertlik değerinin malzemenin doluluk oranı ile doğru orantılı olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca kullanılan PET ve PLA malzemelerinden üretilen numunelerin çekme ve pürüzlülük değerlerinin birbirleriyle doğru orantıda olmadığı, çekme mukavemeti ve pürüzlülük değerlerinin %30 doluluk oranından itibaren %10 ve %20 doluluk oranındaki zıt yönde seyrettiği görülmüştür [28].

Polat ve arkadaşları (2021), numuneleri çekme testine tabi tutarak mekanik özelliklerini incelenmiş ve %100, %80, %60, %40 ve %20 doluluk oranlarında yapılan baskıların sonucunda, doluluk oranının yükselmesiyle birlikte parça mukavemet özelliklerinin iyileştiği gözlemlenmişlerdir [29].

Günay ve arkadaşları (2020), yaptıkları çalışmada, eriyik yığılma modelleme (FDM) tabanlı üç boyutlu bir yazıcı kullanarak test numunelerinin mekanik özelliklerini doluluk oranı, baskı hızı ve tarama açısı parametrelerini değiştirerek araştırmışlardır. Testler sonucunda çekme dayanımı üzerinde en etkin parametre doluluk oranı olurken, en az etkileyen parametrenin ise baskı hızı parametresi olduğunu gözlemlemişlerdir [30].

Evlen ve arkadaşları (2019), çalışmalarında, üç boyutlu yazıcıda üretilen test numunelerinin doluluk oranının parçanın mukavemet özelliklerine etkilerini incelemişlerdir. PET ve PLA malzemelerden %50, %40, %30, %20 ve %10 doluluk oranlarında mekanik test numuneleri üretmişlerdir. Üretilen numuneler çekme testleri gerçekleştirilmiş, pürüzlülük ve sertlik değerleri ölçülmüştür. Yapılan testler neticesinde PLA ve PET malzemelerde sertlik değerinin malzemenin doluluk oranı ile doğru orantılı olarak arttığını gözlemlemişlerdir [31].

Ferreira ve arkadaşları (2017), polilaktik asit (PLA) ve PLA+CF malzemeler kullanarak sabit parametreler altında 0° , 45° ve 90° baskı açılarında numuneler üretmiştir. Çekme deneyi sonuçlarına göre her iki malzeme için de çekme dayanımının en yüksek değeri, 0° 'de iken en düşük değeri, 45° 'de çıktığı görülmüştür [32].

Kim ve arkadaşları (2017), PLA malzemedan üretilen numunelerin yüzeylerinin ve mekanik özelliklerinin incelenmesine yönelik bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, numunelerin baskı yönünün yüzey pürüzlülüğü ve mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi amacıyla X, Y ve Z ile ifade edilen farklı yönlerde baskılar üretilmiştir. Z doğrultusunda üretilen numunelerin çekme dayanımı değerleri, X ve Y numunelerine göre çok daha küçük çıktığı sonucuna ulaşmışlardır [33].

Chacóna ve arkadaşları (2017), polilaktik asit (PLA) ile üretilen parçaların baskı yönü, katman kalınlığı ve ilerleme hızı olmak üzere üç parametreye göre mekanik özelliklerinin değişimlerini incelemişlerdir. Gerçekleştirdikleri çekme ve üç nokta eğme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Yapılan testler sonucunda en düşük mekanik özelliklerin dikey yönde basılan numunelerde olduğu ve kenar ile düz olarak adlandırılan yönlerdeki numunelerin daha iyi mekanik özellikler gösterdiklerini görmüşlerdir [34].

Bunların dışında farklı takviye elemanı ve matris malzemeleriyle biyo ve nano kompozitler hazırlayıp, bunların üç boyutlu yazıcılardaki uygulamalarını araştıran çalışmalar da literatürde mevcuttur [35-38].

2.4. Literatür Değerlendirmesi

Bu başlık altında literatür araştırmalarının özeti tarih sırasına uygun olarak Çizelge 2.1’de sunulmuştur. Ayrıca bu çalışmanın diğer araştırmalardan farkı bu bölümde sunulmuştur.

Çizelge 2.1. Literatür değerlendirme özet tablosu

Yazan	Yıl	Çalışma Özet Cümlesi	Meteryol Metod
Mete ve arkadaşları	2022	Rot başı için topoloji optimizasyonu çalışması	Topoloji optimizasyonu, sonlu elemanlar analizi
Botsalı	2022	Süspansiyon alt kontrol kolununa topoloji optimizasyonu uygulaması	Statik analiz, modal analiz ve topoloji optimizasyonu
Koç	2022	PLA ve Re-PLA filamentleri için mekanik özelliklerin incelenmesi	Doluluk oranı, örme yöntemi ve çekme testleri
Elmas ve arkadaşları	2021	3D printer konumlandırmasına göre mekanik özelliklerin incelenmesi	3D printer parametreleri sabit tutarak çekme, basma ve üç nokta eğme testleri
Öztürk	2020	Farklı sandviç yapıları tasarımı yapılarak mekanik özelliklerin incelenmesi	Farklı örme yöntemleri, çekme-basma ve üç nokta eğilme testleri
Efe	2020	3D yazıcı teknoloji ile üretilen parçanın dayanımının incelenmesi	Farklı örme yöntemi ve farklı doluluk oranları
Tatlı	2020	3D yazıcı tasarımı, imalatı ve üretilen numunelerin testleri	Farklı örme yöntemleri, darbe, çekme ve üç nokta eğilme testleri
Erol	2019	Üst tork kolunun modellenmesi ve topoloji optimizasyonu uygulaması	Statik analiz ve topoloji optimizasyonu
Çelik	2019	Bal peteği yapılı sandviç kompozitlerin incelenmesi	Üç nokta eğilme testi, basma testi deneyi ve sayısal analizleri
Çetinkaya ve arkadaşları	2018	3D prototip yazıcı geliştirme çalışması	3D yazıcı bağlantı parçaları referans alınarak üretim yapılmış ve çekme mukavemetleri kıyaslaması
Özkan ve arkadaşları	2017	Eklemeli imalat ile ilgili genel araştırma çalışması	Farklı üretim yöntemleri ile ilgili tespitler yapılmış ve üretimi doğrudan etkileyen parametrelerin belirlenmesi

Çizelge 2.1. (devam) Literatür değerlendirme özet tablosu

Yalçın ve arkadaşları	2017	3D eklemeli imalat yöntemlerini ve uygulama alanları araştırılması	Çalışmalar birbirleriyle kıyaslanarak imalat sektörüne faydalı bilgilerin elde edilmesi
Uzun ve arkadaşları	2017	PLA malzemeden üretilen numunelerin yüzeylerinin ve mekanik özelliklerinin incelenmesine	Farklı sıcaklık, farklı katman kalınlıkları ve üç farklı örme yöntemleri ile çekme mukavemetlerinin kıyaslanması ve matematiksel olarak modellenmesi
Ferreira ve arkadaşları	2017	PLA ve PLA+CF malzemelerin mekanik özelliklerinin açısal olarak incelenmesi	0°, 45° ve 90° derecelik baskı yönlerinde çekme testlerinin icrası
Kim ve arkadaşları	2017	PLA malzemeden üretilen numunelerin yüzeylerinin ve mekanik özelliklerinin incelenmesine	Malzeme baskı yönünün çekme testleri ile incelenmesi
Chacóna ve arkadaşları	2017	PLA malzemeden üretilen parçaların mekanik özelliklerinin incelenmesi	Baskı yönü, katman kalınlığı ve ilerleme hızlarının çekme ve eğme testleri ile incelenmesi
Kaya	2016	Polimer özlü termoplastik kompozit malzemenin mekanik özelliklerin araştırılması	Darbe, çekme ve üç nokta eğilme testleri
Özdemir ve arkadaşları	2016	3D yazıcı tasarımı, imalatı ve üretilen numunelerin testleri	Doluluk oranı, örme yöntemi ve çekme testleri
Enginar	2014	Ağır taşıtlarda kullanılan jantın analiz ve optimizasyonu	Statik analiz ve topoloji optimizasyonu
Işık	2009	Bir çatallı flanş parçasına topoloji optimizasyonu uygulaması	Modelleme ve topoloji optimizasyonu

Literatür incelendiğinde; numuneler özelinde topoloji optimizasyonu yapılmış ve sonlu elemanlar yöntemiyle analizleri yapılmıştır. Bunlara ek olarak ise çekme numuneleri üretilmiş ve çekme testlerine tabi tutulduğu gözlemlenmiştir. Ancak bu çalışmada literatürde mevcut olan diğer çalışmalardan farklı olarak; 14 adet parçadan oluşan bir montajın eklemeli imalat ile yekpare olarak üretilmiş ve topoloji optimizasyonu yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda ise çekme testleri yapılmış ve çıkan sonuçlar doğrultusunda gerçek numune üzerine gerinim ölçerler yerleştirilerek deneysel çalışmalar icra edilmiştir.

3. EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİ VE TOPOLOJİ

ASTM Eklemeli Üretim Teknolojileri Komitesi F42 tarafından yayınlanan ASTM F2792-12a'ya göre eklemeli imalat toplam 7 başlık altında sınıflandırılmaktadır. Bunlar sırasıyla malzeme püskürtme (material jetting), bağlayıcı püskürtme (binder jetting), toz yatağı füzyon (powder bed fusion), sac laminasyon (sheet lamination), yönlendirilmiş enerji yığma (directed energy deposition), vat fotopolimerizasyon (vat photopolymerisation) ve malzeme ekstrüzyon (material extrusion) metotlarıdır [1-3]. Bu çalışmada eklemeli imalat teknolojilerden birisi olan malzeme ekstrüzyon metodunun alt başlığı olan ergiyik yığma modelleme yöntemi kullanılmıştır.

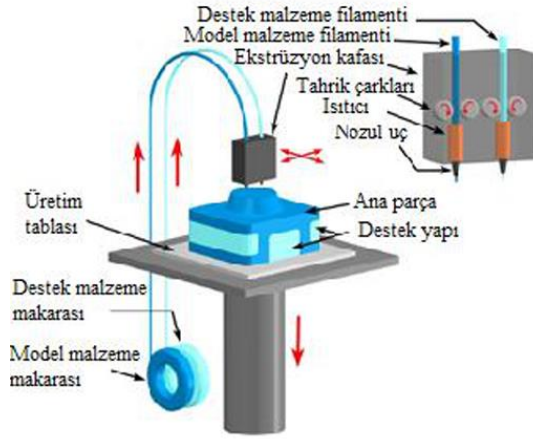
3.1. Ergiyik Yığma Modelleme Yöntemi

İngilizce literatürde fused deposition modelling olan bu eklemeli imalat teknolojisinin Türkçesi ergiyik yığma teknolojisi anlamına gelmektedir. Sıcaklık kontrollü bir nozzle vasıtası ile termoplastik malzeme katman katman üretim tablasına serilir. Model tamamlandığında destek yapıları el ile veya kimyasal bir karışımla kolaylıkla sökülebilir [39].

Dünyada en yaygın şekilde kullanılan Katmanlı Üretim Teknolojisi olarak bilinen FDM Teknolojisi, dünyadaki 3D yazıcıların yaklaşık %70'inin kullandığı teknoloji olarak tahmin edilmektedir. Bu yöntemde malzeme olarak polimer filamentler kullanılır. Basılacak parçanın özelliğine ve kullanım alanına göre farklı polimer filamentler tercih edilebilir [40].

Birleştirmeli yığma teknolojisi yöntemi basamakları aşağıda sırasıyla belirtilmiştir;

1. İlk katman, birinci nesne diliminin üzerine gerektiğinde birikintileri malzemesi olarak inşa edilir
2. Aşağıdaki katmanlar önceki katmanların üstüne eklenerek işleme devam edilir
3. Malzeme erimiş halde olduğu için katmanlar üst üste birbirine kaynaşır



Şekil 3.1. Ergiyik yığma modelleme yöntemi diyagramı [41]

FDM teknolojisi; kolay kullanımı, temizlenebilmeleri, modelleme ve hesaplama ihtiyacı duyulmadan otomatik olarak çıkarılan destekleri nedeniyle piyasadaki açık sistemli makinelerle oranla çok daha fazla tercih edilirler. Çalışmada bu baskı tekniğini tercih etmemizin nedenlerinden biri de kullanılan malzemelerin insana ve doğaya zarar vermeyen geri dönüştürülebilir özellikte olmasıdır. FDM teknolojisi uygulama alanlarına örnek olarak;

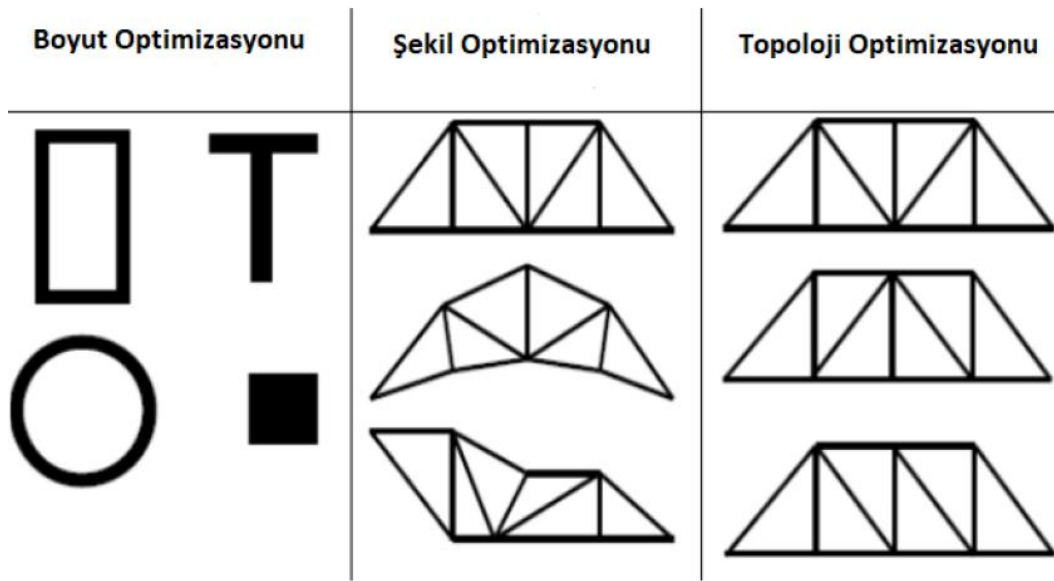
- Savunma sanayiinde silah sistemleri, simülâtör ve elektronik ürün kutuları.
- Prototipler ve tek parça olarak üretilmesi istenen büyük ölçekli ürünler.
- Otomotiv sektörü için iç ve dış trim, ürün geliştirme çıktısına sahip plastik parçalar
- Yüksek sıcaklığa dayanıklı, kimyasal maddelere karşı direnci olan, sıvı sızdırmaz özelliğe sahip son kullanıcı ürünleri ve prototipler.
- Beyaz eşya sektörü için geniş hacimli üniteler ve aksesuarlar verilebilir [42].

3.2. Optimizasyon Kavramı

Sürekli gelişen teknoloji ile birlikte, daha performanslı ve hafif ürünlerin tasarım ve üretim süreçleri daha da fazla önem kazanmıştır. Bundan dolayı tasarım süreçlerinde, tasarlanan ürünlere bir veya birden fazla optimizasyon metodu uygulanarak ideale yakın yapıya ulaşması sağlanır. Boyut, şekil ve topoloji optimizasyonu olarak üçe ayrılan optimizasyon yöntemleri arasında topoloji optimizasyonu, mühendis ve tasarımcılara önceden düşünülmüş bir tasarıma gerek olmaksızın yeni tasarım fikirleri sağlaması sebebiyle en kapsamlı yöntem olarak kabul edilir [43]. Boyut optimizasyonu, ideal forma ulaşmak için yapıdaki her bir

elemanın optimal kesit alanını bulmak ve boyutlarını değiştirmektir. Şekil optimizasyonu, yapının bağlantıları değiştirilmeden dış şeklinin optimize edilmesidir. Topoloji optimizasyonu ise yapıyı oluşturan elemanların en iyi şekilde nasıl bağlantı oluşturabileceğini açıklar [44].

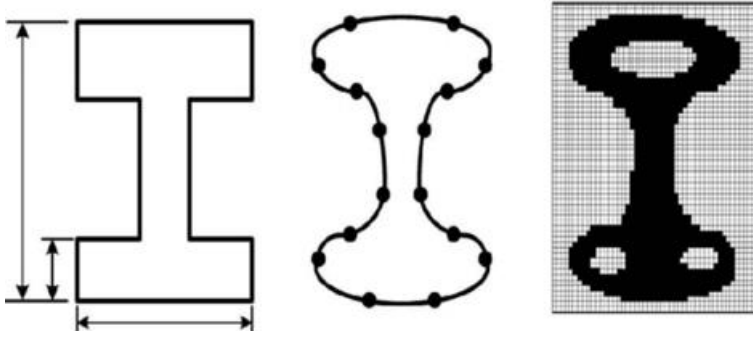
Boyut, şekil ve topoloji optimizasyonu yöntemlerinin grafiksel gösterimi Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'de belirtilmiştir.



Şekil 3.2. Boyut, şekil ve topoloji optimizasyonu grafiksel gösterimi [45]

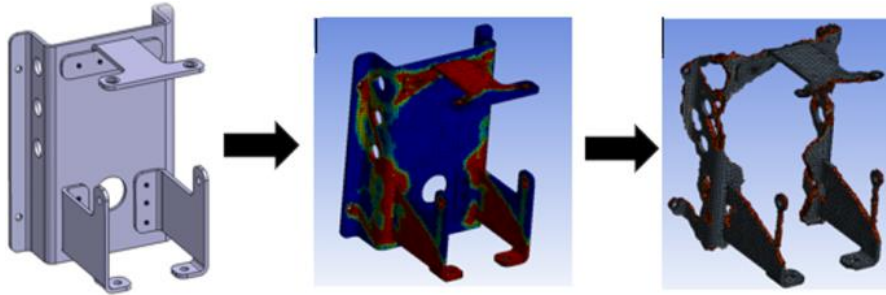
Topoloji optimizasyonu, tasarımdan kaynaklanan sınır şartları altında malzemenin en uygun dağılımının öğrenilmesi amacı ile kullanılır. Yapının dayanımına ve parçanın çalışma durumuna göre doğal frekansına en az etki yapan lokasyonlar tespit edilerek tasarımdan çıkarılabilecek bölgeler tanımlanır. Mevcut tasarımları daha dayanıklı hale getirmek, ağırlıklarını azaltarak hem hammadde ihtiyacını hemde havacılık ve otomotiv sektörü gibi ağırlık kısıtlamalarının olduğu sektörlerde parçanın ideal forma ulaşmasını sağlamaktadır.

Topoloji optimizasyon metodu ile malzeme dağılımının düzenlenmesi sürecinde, varsa yapıdaki yağlama ve soğutma kanallarının oluşturulması kolaylıkla yapılabilmektedir. Böylece parçanın işlevi değiştirilmeksizin ağırlığı en baştan azaltılarak ideal yapıya ulaşmak hedeflenir.



Şekil 3.3. Sırasıyla boyut, şekil ve topoloji optimizasyonu [46]

Topoloji optimizasyon sürecinde, ilk aşamada tasarlanan veya mevcutta var olan bir parçanın katı modeli üzerinde optimizasyonun uygulanacağı alan belirlenir. İkinci aşama olarak parçanın kullanılacağı yerden veya parçanın kendi kullanım faaliyetlerinden kaynaklanan gerekli sınır şartları sağlanır. Etkileyen kuvvetler uygulanır ve parça analize tabi tutulur. Analiz işleminin tamamlanmasının ardından elde edilen parça incelenir ve istenilen sonuçların elde edilmemesi durumunda yapılan işlemler tekrarlanır. Topoloji optimizasyonu uygulanmış yük taşıma aparatı örneği Şekil 3.4'de gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Topoloji optimizasyon süreci

Topoloji optimizasyonu, geleneksel imalatla kullanıldığı gibi eklemeli imalat metotları içerisinde en sık kullanılan optimizasyon yöntemidir. Topoloji optimizasyonunun eklemeli imalata kattığı en büyük değer belirlenen ideal tasarıma ulaşabilmek için malzeme yığılmasının optimize edilmesidir. Optimizasyon işlemi sonrası elde edilen model stereolithography (STL) formatında kaydedilerek doğrudan üretime gönderilip üç boyutlu yazıcılardan baskısı alınabilmektedir. Model üzerinde malzeme dağılımı optimal hale getirildiği için baskıda kullanılan malzeme miktarı da azalacak, dolayısıyla üretim maliyetleri de düşürülmüş olacaktır.

3.3. Eklemeli İmalatta Topoloji Optimizasyonu

Topoloji optimizasyonu bir parçayı, ürünü tasarlamak için tasarımcıya yön vermektedir. Topoloji optimizasyonunda parça tam olarak tasarlanmaz ve oluşturulmaz. Fakat nihai tasarıma ulaşılmasında büyük faydalar sağlar. Özellikle maliyet, ağırlık, hacim ve ürün performansı konusunda oldukça faydalı bir yaklaşımdır.

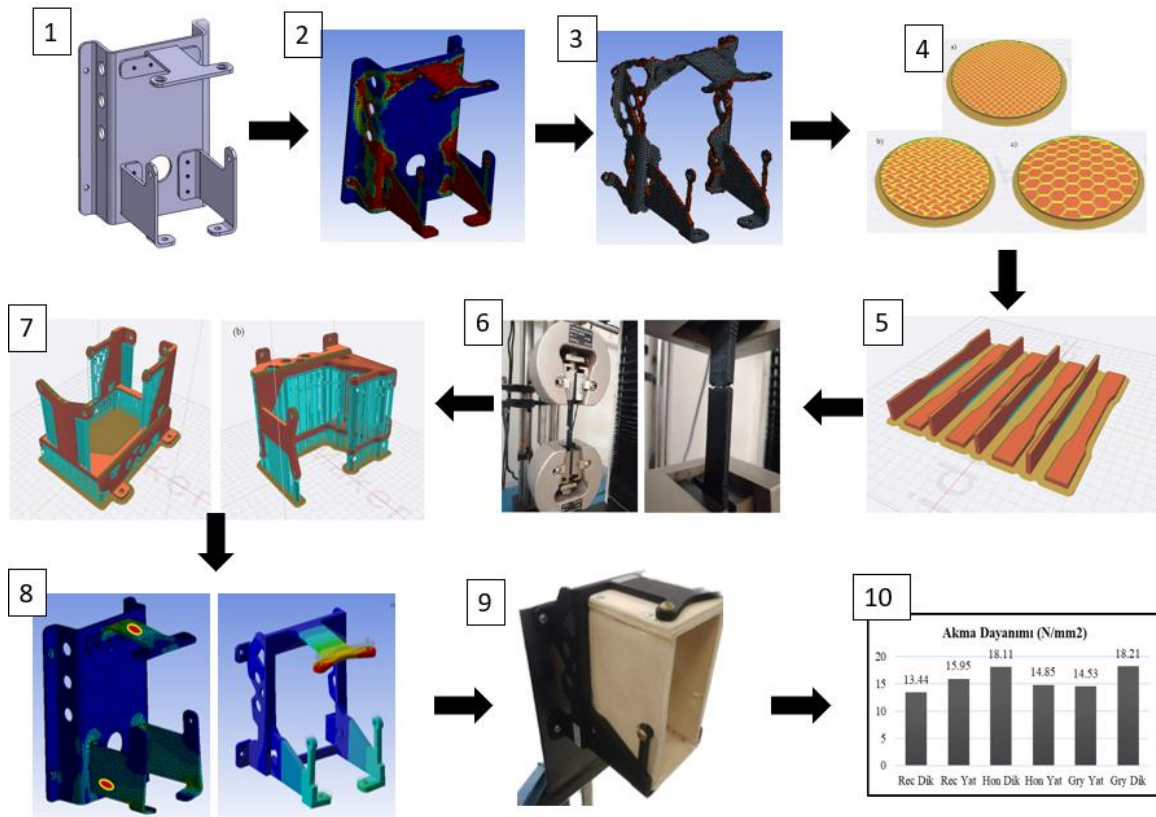
Eklemeli imalat yöntemleri aynı zamanda üç boyutlu yazıcı teknolojileri olarak da adlandırılır. Eklemeli imalat yöntemleri bilgisayar destekli programlarla parçanın yada sistemin katman katman doldurularak oluşturulmasını sağlayan bir üretim metodudur. Geleneksel imalat yöntemlerinde karmaşık geometrilerin oluşturulması oldukça zordur. Eklemeli imalat yöntemleri ise var olan parçadan malzeme çıkartarak yada eksilterek üretmek oldukça kolaydır. Malzeme dağılımının gerekli alanlara verimli şekilde yayılmasını sağlayarak fonksiyonel ve daha hafif ürünler tasarlamaya olanak sağlayan topoloji optimizasyonu ise eklemeli imalat teknolojileri birlikte uygulanabilecek en etkin yöntemlerden biridir. Eklemeli imalat teknolojilerindeki hızlı gelişmeler, tasarım sürecinde büyük kolaylıklar sağlamış ve önemli değişikliklere sebep olmuştur. Eklemeli imalat teknolojisi ile en karmaşık geometrideki parçaların dahi tek işlem basamağında üretilebiliyor olması gibi kolaylıklar sağlamıştır. Bu tez çalışmasında montaj parçalarından oluşan bir tasarımın yekpare olarak üretilmesi incelenecektir. Eklemeli imalat yöntemleri sayesinde rahatlıkla üretilebilen kafesli yapıdaki tasarımlar bu durumun en güzel örneğidir. Tasarımlarda kafesli yapıların kullanılma sebebi; geleneksel katı formdaki malzemeleri değiştirmek, parçayı hafifletmek ve parçanın fonksiyonel özelliklerini arttırmaktır. Kafesli yapılar üretmek için kullanılan yöntemlerden birisi olan topoloji optimizasyonunun optimal formlar elde etmek için etkili bir araç olduğu dikkat çekmiştir [47].

Eklemeli imalatta topoloji optimizasyonun uygulanması yapılarak; ham madde kullanımı, enerji tüketimi ve işletme maliyetleri düşmektedir. Optimizasyon ile yeterli ham madde kullanımı ve enerji tüketimi kaynakların daha verimli kullanımına katkı sağlamaktadır. Topoloji uygulaması sayesinde; daha hafif ve dayanıklı parçalar, daha az işleme ve taşıma maliyeti ile üretilebilmektedir [48].

4. MATERYAL VE METOD

Bu çalışmada hava aracı yer testlerinde kullanılan bir aviyonik ekipmanın hava aracına montajında kullanılan çok parçalı bir montaj parçasının eklemeli imalat ile yekpare olarak üretilbilirliği ve yük taşıma kabiliyetinin yeterliliği incelenmiştir. Araştırmada, Raise firmasının üretmiş olduğu “1,75 mm Premium PLA Filament” malzeme kullanılmıştır.

Çalışmada kullanılan cihaz ve ekipman bilgileri, tasarım süreçleri, topoloji optimizasyonu, analiz süreçleri ve deneysel çalışmalara ait bilgiler bu bölümde sunulmuştur. Ayrıca Şekil 4.1’de çalışmanın genel şeması sunulmuştur. Her bir süreç ayrı başlıklar altında detaylı olarak anlatılmıştır.



Şekil 4.1. Çalışmanın genel süreç yönetimi

Çizelge 4.1. Çalışmanın aşamalarının özetlenmesi

1. Aşama	13 parçadan oluşan montajlı parçanın modellenmesi
2. Aşama	Topoloji çalışması
3. Aşama	Topoloji çalışması
4. Aşama	Örme yöntemlerinin belirlenmesi
5. Aşama	Yatay ve dikey yerleşimli çekme test numunelerinin üretilmesi
6. Aşama	Çekme testlerinin gerçekleştirilmesi
7. Aşama	Topoloji uygulaması yapılan yekpare parçanın tasarlanması
8. Aşama	Yekpare parçanın analizlerinin yapılması
9. Aşama	Yekpare parçanın üretilmesi ve statik test düzeneğine bağlanması
10. Aşama	Statik testlerin icrası ve test sonuçları

4.1. Kullanılan Cihaz ve Ekipman Bilgileri

4.1.1. Üretimin yapıldığı üç boyutlu yazıcı ve filament bilgileri

Test numunelerinin üretiminde Raise 3D Pro2 Plus marka [49] FDM tipi üç boyutlu yazıcı kullanılmıştır. Yazıcının görseli Resim 4.1’de, özellikleri ise Çizelge 4.2’de sunulmuştur.



Resim 4.1. Raise 3D Pro2 Plus 3D yazıcı

Çizelge 4.2. Çalışmada kullanılan yazıcıya ait özellikler

RAISE 3D PRO 2 PLUS Yazıcı Özellikleri	
Baskı Teknolojisi	FFF
Baskı Hacmi	Tek Ekstrüzyon Baskısı
	12 × 12 × 23,8 inç / 305 × 305 × 605 mm
Baskı Hızı	30-150 mm / sn
XYZ Eksen Hassasiyeti	0,78125-0,78125-0,078125 mikron
Ekstruder Sayısı	2
Nozül Çapı	0,4 mm (Varsayılan), 0,2 / 0,6 / 0,8 / 1,0 mm
Nozül Sıcaklığı	300 °C
Flament	PLA / ABS / HIPS / PC / TPU / TPE / NAYLON / PETG / ASA / PP / PVA / Cam Elyaf Dolgulu / Karbon Elyaf Dolgulu / Metal Dolgu / Ahşap Dolgusu
Filament Çapı	1,75 mm
Baskı Tablası Sıcaklığı	110 °C
Dosya Formatı	STL / OBJ / 3MF

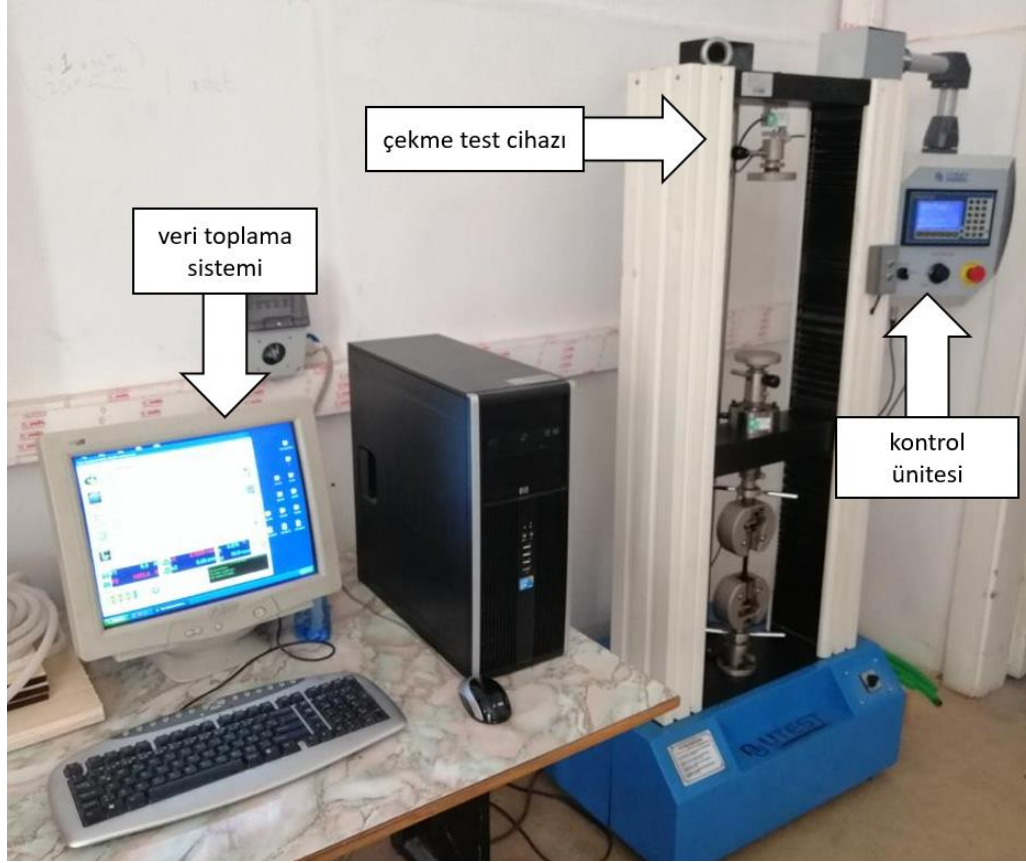
Test numunelerin üretilmesinde, malzeme olarak polilaktik asit (PLA) filament kullanılmış olup “Raise 3D” markasının “Premium” filamenti [50] tercih edilmiştir.

Çizelge 4.3. Çalışmada kullanılan malzemeye ait özellikler

RAISE 3D Premium Flament Özellikleri	
Marka	Raise3D
Model	Premium
Malzeme	PLA
Çap	1,75 mm
Yazıcı Sıcaklığı	205 – 235 °C
Yoğunluk	1,2 g/cm ³ (21,5 °C)
Erime Sıcaklığı	150,9 °C

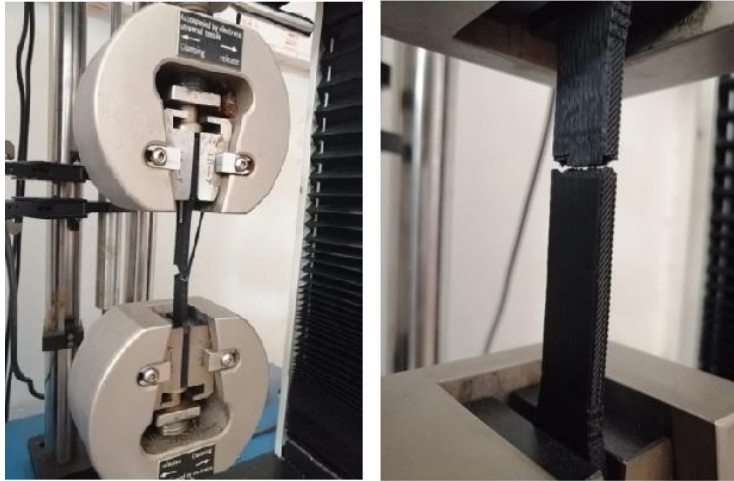
4.1.2. Çekme test cihazı

Üretilen çekme test numuneleri Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Laboratuvarında bulunan 6736/38.5.0.1.452 kod numaralı UTEST markasına ait PROFİ X6 model numaralı çekme test cihazında testlere tabi tutulmuştur. Cihaz görseli ve Test numunesinin çekme cihazına bağlanmış görseli Resim 4.2 ve Resim 4.3’de sunulmuştur.



Resim 4.2. UTEST PROFI X6 çekme test cihazı

Toplanan veriler kullanılarak her bir numuneye ait mühendislik gerilme-gerinim grafikleri elde edilmiştir. Elde edilen grafiklerden deformasyon miktarı (mm), uzama oranı (%), max yük (N) ve akma dayanımı (N/mm^2), çekme dayanımı akma dayanımı (N/mm^2) ve kopma dayanımı akma dayanımı (N/mm^2) değerleri elde edilmiştir.

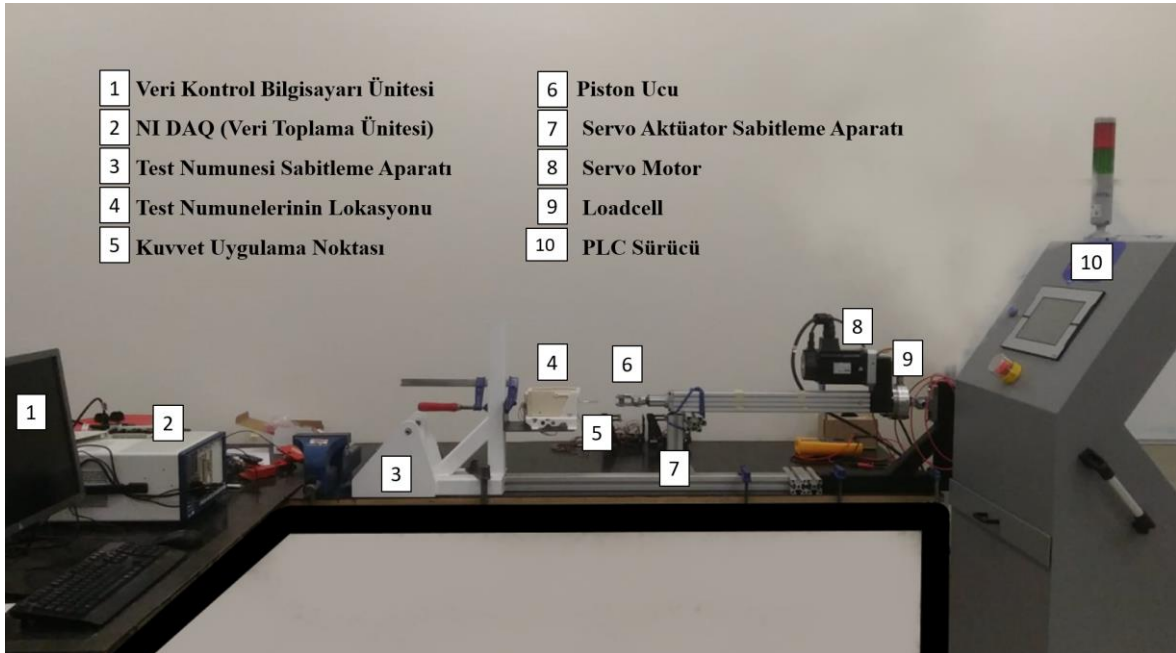


Resim 4.3. Test numunesinin çekme cihazına bağlanmış görseli

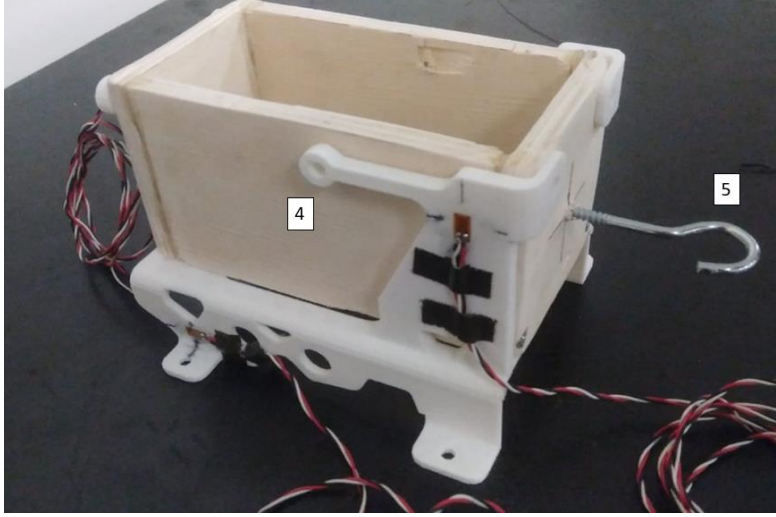
4.1.3. Statik test düzeneği ve kullanılan ekipmanlar

Diğer tez çalışmalarından farklı olarak, bu çalışma çekme testleri ile sınırlandırılmamış olup topoloji optimasyonu yapılan ve 3D yazıcıda birebir boyutlarda üretilen üç adet test numunesi için statik test düzeneği hazırlanmıştır (Resim 4.4). Parçaya montajı yapılacak olan aviyonik cihazı temsilen, üretilen test numunelerinin içerisine bağlantı noktaları aynı olacak şekilde tahta bir boş kutu hazırlanmış ve pistonu (servo aktüatöre) bağlantının yapılması için ucuna kanca bağlanmıştır (Resim 4.5). Böyle kanca yardımıyla içerisi boş olan tahta yapıya çekme kuvveti verilerek aviyonik cihazın ağırlığı verilmiş ve testlere numuneler kırılana kadar devam edilmiştir.

Statik test düzeneğinde sırasıyla; toplanan verileri incelemek için bir adet bilgisayar ekranı (Resim 4.4-1), gerinim ölçer (strain gauge) verilerini toplamak için National Instruments DAQ (Resim 4.4-2), pistonu hareket vermek için bir adet Futek marka servo aktüatör (Resim 4.4-6), uygulanan kuvvet değerlerinin ölçülebilmesi için bir adet loadcell (Resim 4.4-7) ve piston hareketini kontrol etmek için ise servo motora komut veren bir adet PLC (Resim 4.4 - 8) kullanılmıştır.



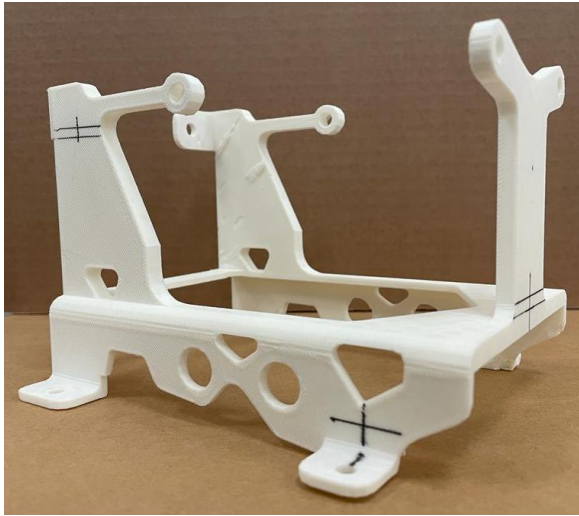
Resim 4.4. Statik test düzeneği genel görünümü



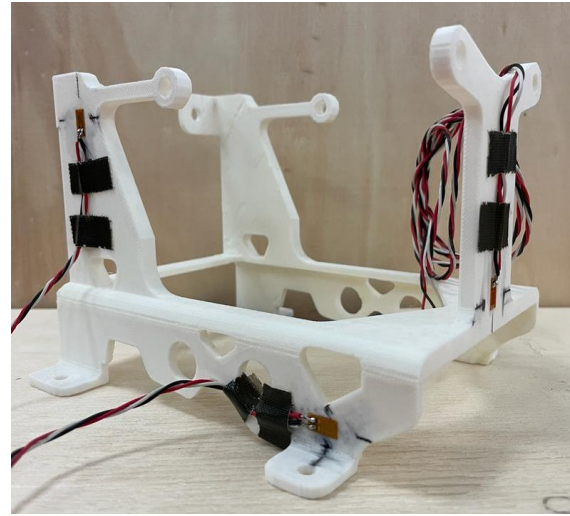
Resim 4.5. Test numunesi içerisinde yerleştirilen içi boş kancalı tahta yapı

Test numunelerine gerinim ölçer (strain gauge) uygulaması aşağıdaki sırayla yapılmıştır.

- Gerinim ölçer uygulaması yapılacak lokasyonlar markalandı (Resim 4.6).
- Yüzeyin pürüzlü olması sebebiyle zımparalama işlemi yapıldı.
- Zımparalanan yüzey pamuklu çubuk kullanılarak alkol yardımıyla temizlendi.
- Yüzey kurularak gerinim ölçer yapıştırmaya hazır hale getirildi.
- Gauge altında hava kabarcığı ve kir olmamasına dikkat edilerek yapıştırma işlemi yapıldı (Resim 4.7).



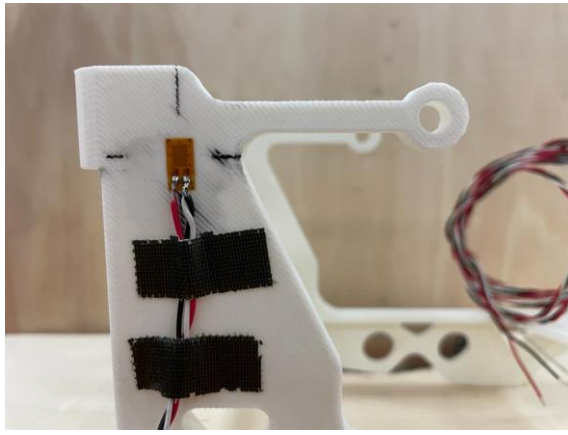
(a)



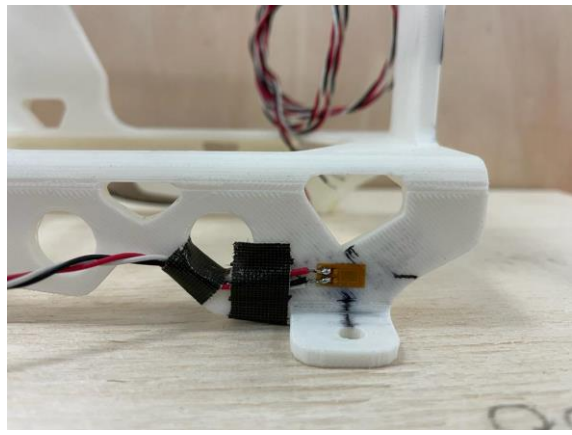
(b)

Resim 4.6. Gyroid yatay test numunesine gerinim ölçer markalaması (a) ve uygulaması (b)

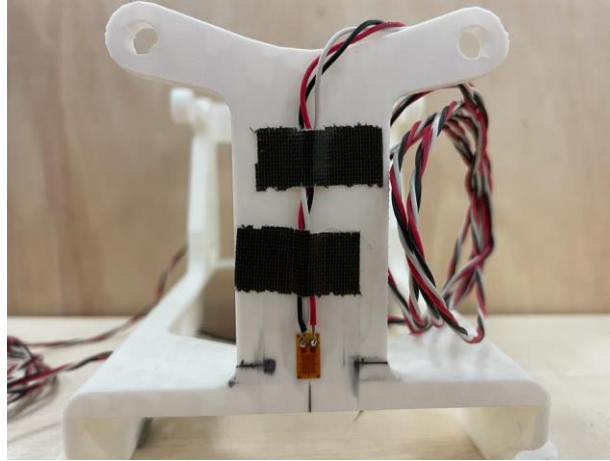
Test numunesi üzerine uygulanan gerinim ölçerlerin yakın çekimleri Resim 4.7’de sunulmuştur. Bu uygulama statik test için üretilen üç farklı numuneye de (rec_yat, gyr_dik ve gyr_yat) aynı işlemler yapılmıştır. Resim 4.7(a)’da gerinim ölçer uygulaması yapılan lokasyon “yan duvar” olarak, Resim 4.7(b)’de gerinim ölçer uygulaması yapılan lokasyon “ayak” ve Resim 4.7(c)’de gerinim ölçer uygulaması yapılan lokasyon ise “üst duvar” olarak adlandırılarak kıyaslamaların daha rahat yapılması için NI veri toplama sisteminde adlandırılmıştır. Üç farklı numune içinde aynı markalama yapılarak ve sonuçlar kısmında grafiklerin kıyaslanması kolaylaştırılmıştır.



(a)



(b)



(c)

Resim 4.7. Gyroid yatay test numunesi uygulanan gerinim ölçerlerin yakın görünümü

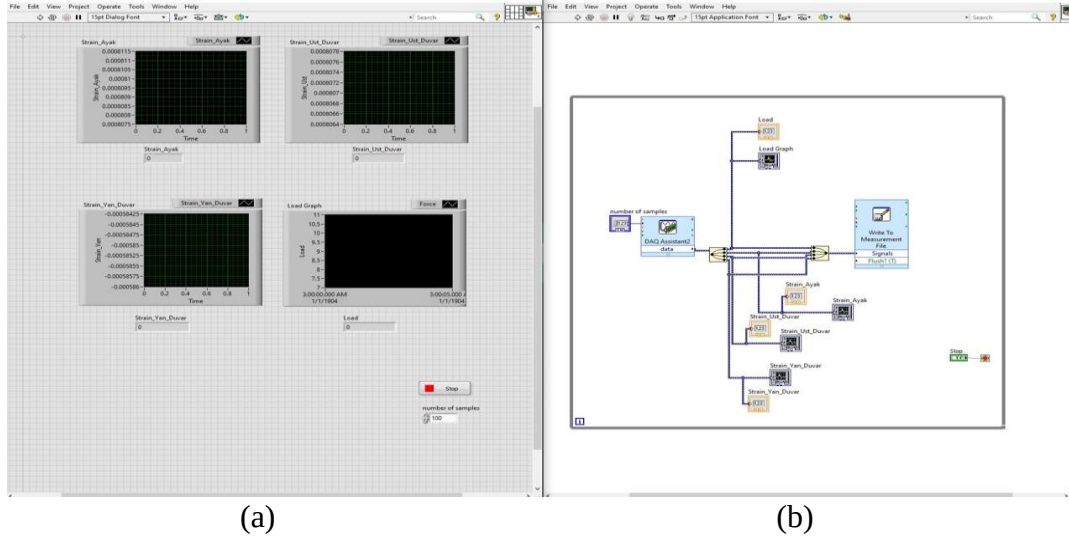


Resim 4.8. Gyroid dikey test numunesine gerinim ölçer uygulaması



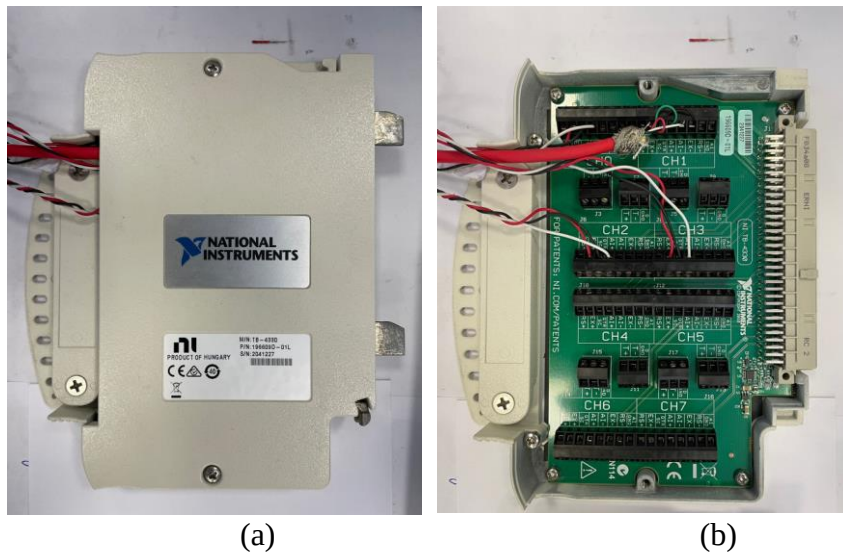
Resim 4.9. Rectilinear yatay test numunesine gerinim ölçer uygulaması

Resim 4.10 (a)'da görüldüğü üzere statik test esnasında 3 adet ekranda gerinim ölçer (strain gauge) 1 adet ekranda ise uygulanan kuvvetin ölçüldüğü (loadcell) değeri takip edilmekte ve kayıt altına alınmaktadır. Resim 4.10 (b)'de ise oluşturulan PLC data yönetim haritası gözükmemektedir.



Resim 4.10. Data toplama ekranı (a), data haritası (b)

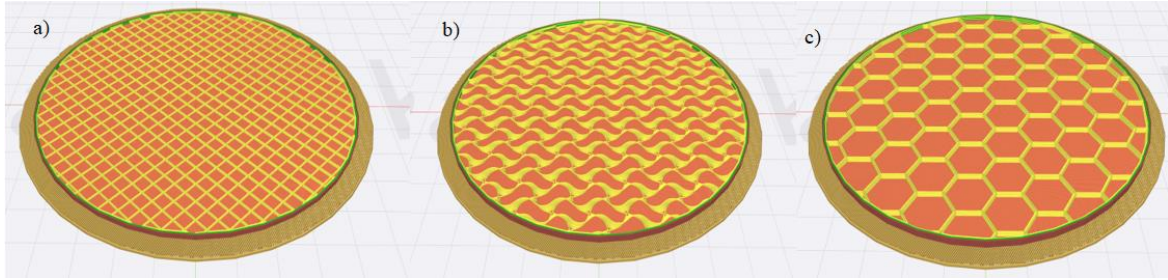
Numune üzerinde bulunan gerinim ölçerler (strain gauge) kablolarından veri almak için NI Strain Gauge modülü kullanılmıştır. Her numunede aynı yerlerde bulunan gerinim ölçerler aynı kanallara girilerek verilerin ortaklaşması sağlanmıştır (Resim 4.11).



Resim 4.11. NI STR modülü (a), STR modülü iç yapısı (b)

4.2. Numunelerde Kullanılan Örme Yöntemleri

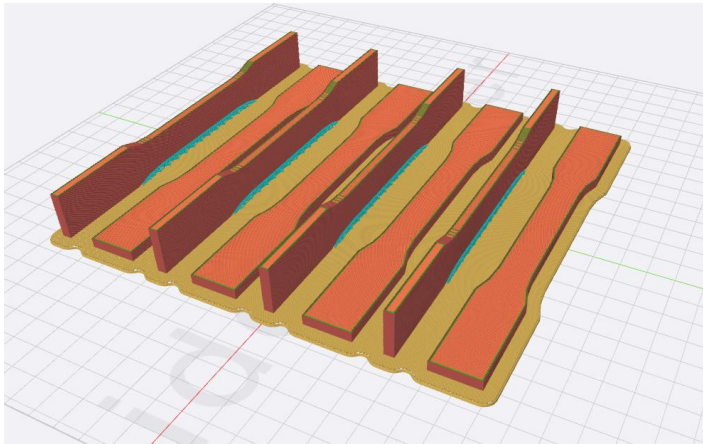
Numunelerin üretiminde düz çizgili (rectilinear), dönel çizgili (gyroid) ve bal peteği (honeycomb) tipi olmak üzere üç farklı örme yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan yazıcıda yaklaşık olarak 8 tip farklı örme yöntemi olmasına karşın birbirlerinden farkları açıkça görülen örme yöntemleri seçilmiştir.



Şekil 4.2 Çalışmada kullanılan örme yöntemleri a) düz çizgi (rectilinear), b) dönel çizgi (gyroid), c) bal peteği (honeycomb)

4.3 Numunelerde Kullanılan Baskı Yönleri

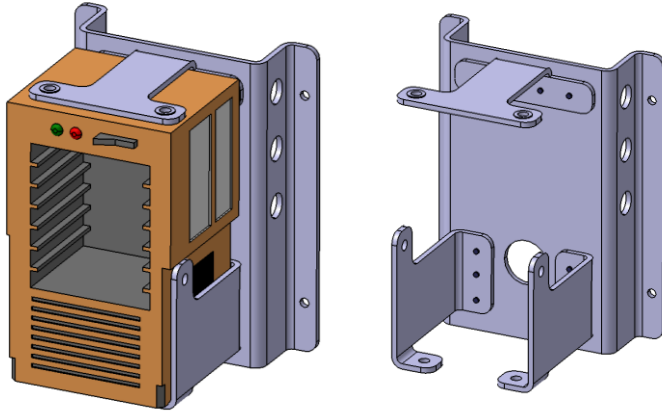
Numuneler, tablaya iki farklı yönde yatay ve dikey olarak konumlandırılmıştır. Çekme testi numuneleri dikdörtgen kesitli olup, ASTM D638 Type I standardında uygun şekilde 4,2 mm kalınlık ve 165 mm boyunda üretilmiştir. Çalışma kapsamında 3 farklı örme yönteminden yatay ve dikey yönlerde 4'er adet olacak şekilde toplam da 24 adet çekme numunesi üretilmiştir. Numunelerin 3B yazıcıya yerleşim görseli Şekil 4.3'de gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Numunelerin 3D yazıcıya yerleşimi

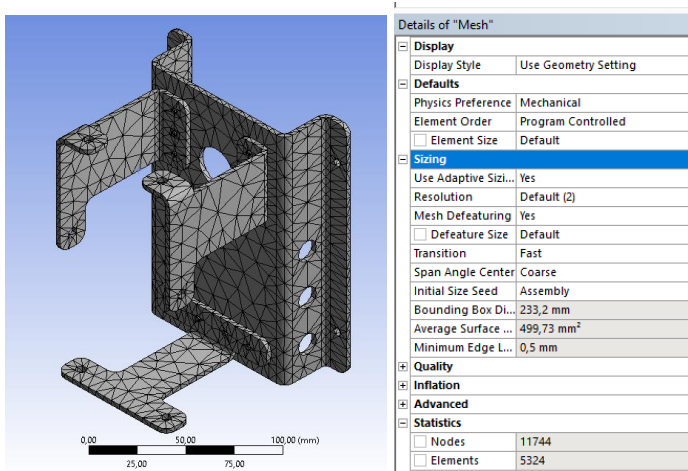
4.4. Tasarım ve Analiz Süreci

Parçanın tasarımı Catia V5 programı kullanılarak yapılmıştır. Montaj dört parçadan ve bu dört parçayı birbirine bağlayan on adet bağlayıcıdan oluşmaktadır. Montaj toplam on dört adet parçadan oluşmaktadır. Bu çalışmada tasarım eklemeli imalat ile yekpare olarak üretilebilmesi ve hafifletilebilmesi için parçaya topoloji optimizasyonu uygulanmıştır.



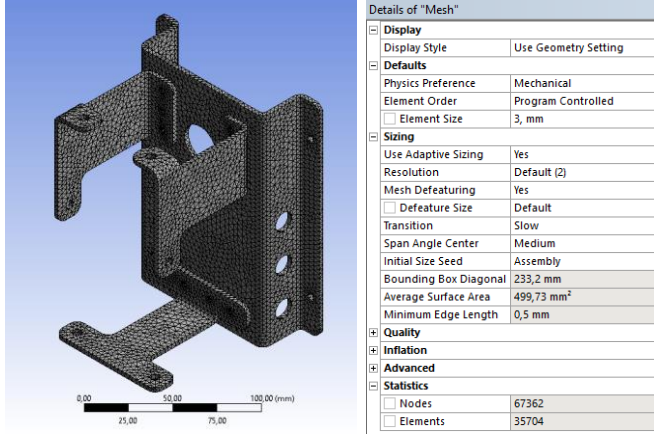
Şekil 4.4. Deney numunesinin montajı ve CAD modeli

Parçaya ilk mesh atılma işlemi yapılırken eleman boyutları Ansys programının seçmiş olduğu varsayılan ayarlarda bırakılmıştır. Ancak programın statics başlığından görüldüğü üzere nokta sayısı 11744 ve eleman sayısı 5324 olmuştur. Şekil 4.5’de de görüldüğü üzere hassas bir mesh atılmadığı düşünülerek değişiklikler yapılmıştır.



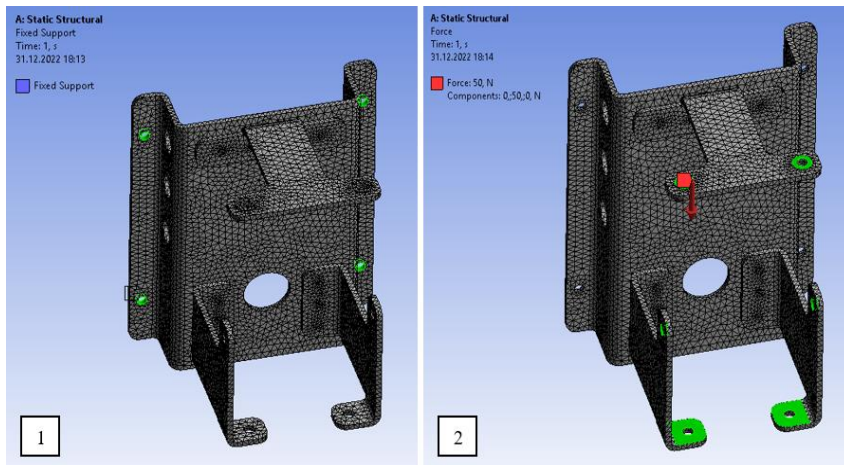
Şekil 4.5. Parçaya ilk mesh atılması işlemi

Mesh bağımsızlığı yakalanması için Detail of Mesh başlığı altında bulunan element size değeri “3 mm”, transition “slow” ve span angle center “medium” seçilerek Şekil 4.6’da sunulduğu üzere daha hassas bir mesh yüzeyi oluşturulmuştur. Bu durumda oluşturulan nokta sayısı 67362 ve eleman sayısı ise 35704 olmuştur.



Şekil 4.6. Paçadan hassas mesh yüzeyinin oluşturulması

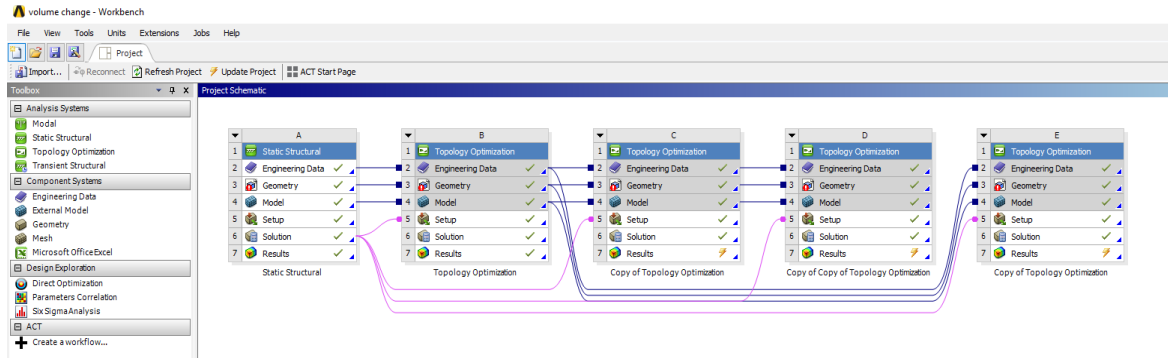
Parça CATIA V5 programından modellendikten sonra analiz ve topoloji uygulamasının yapılması için Ansys Workbench 2019 programına aktarılmıştır. İlk olarak montajlı parçanın yapıya sabitleneceği yerler Şekil 4.7(1)’de yeşil (fixed support) olarak belirtilmiştir. Aviyonik cihaz bağlantısının montajlı parça üzerindeki yük getiren bölgeler ise Şekil 4.7 (2)’de yeşil (force) olarak işaretlenmiştir.



Şekil 4.7. Analiz ve topoloji optimizasyonu sınır koşullarının belirlenmesi

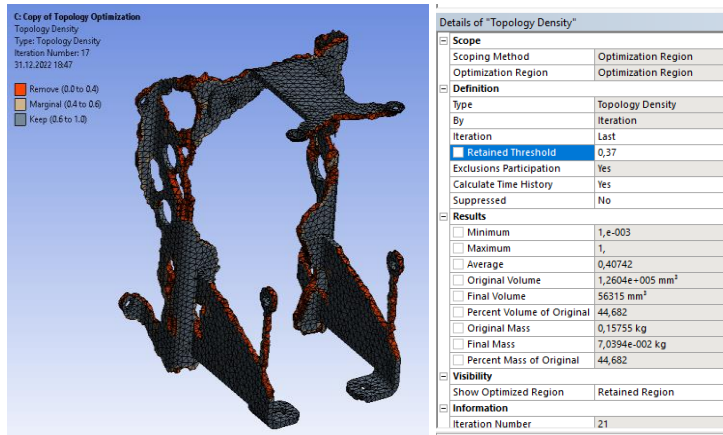
4.5. Topoloji Uygulaması

Bu çalışmada parça 4 farklı hacim azaltma tabanlı topoloji optimizasyonuna maruz bırakılmıştır. Şekil 4.9 da görüldüğü üzere (mavi çizgiler) sınır koşulları aynı tutularak yapı üzerinde sadece %50, %60, %70 ve %80 hacim azaltması olacak şekilde optimize edilmiştir.



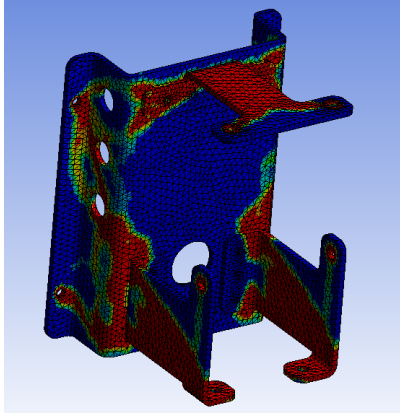
Şekil 4.8. Topoloji optimizasyonu hacim azaltma çalışmaları

%50 hacim azaltma çalışmasında programdaki değerlerden birisi olan retained threshold değeri 0,5’den 0,37’e düşürülerek Şekil 4.9’deki görsel elde edilmiştir.



Şekil 4.9. Topoloji optimizasyonu %50 hacim azaltma çalışması

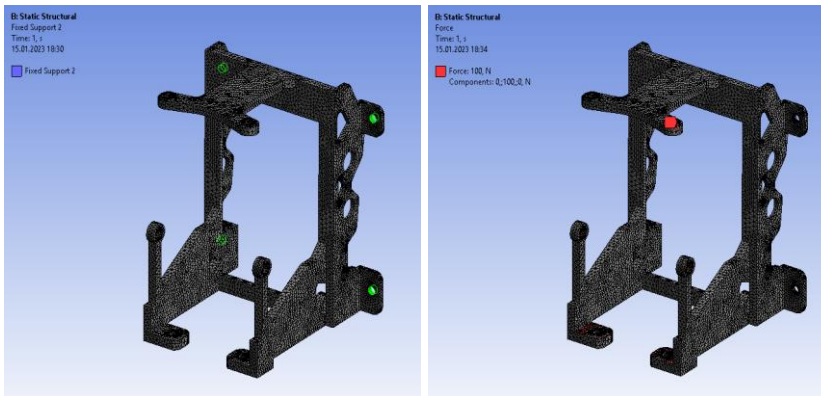
Şekil 4.10’da görüldüğü üzere malzeme üzerine yapılan topoloji işlemi sonrasında kalan kısımlar kırmızı renk ile, çıkarılan kısımlar ise mavi renk ile gösterilmiştir.



Şekil 4.10. Parça üzerindeki topoloji uygulamasının genel görünümü

4.6. Statik Analiz Süreci

Optimizasyon çalışması tamamlanan parça Ansys Workbench 2019 programı topoloji modülü kullanılarak analize tabi tutulmuştur. Analiz yapılırken malzeme PLA olarak seçilmiştir. Mesh bağımsızlığı sağlandıktan sınır koşulları programa tanımlandı. Yaklaşık olarak 10 kilogramlık kuvvet uygulandı. Kuvvet uygulanan yerler yine başlık 4.5 Topoloji Uygulaması bölümünde belirtilen sınır koşulları ile aynı olacak şekilde Ansys Workbench 2019 programına tanımlanmıştır. Mesh atarken sorun ile karşılaşmamak için tasarımdan radyüsler çıkartılarak keskin bir hale getirilmiştir. Topoloji uygulamasına tabi olan parça Şekil 4.11 de yeşil olarak işaretlenen yerlerden sabitlenmiştir. Kırmızı ile belirtilen yerlerden aşağı yönde 10 kg kadar kuvvet uygulanmıştır.



Şekil 4.11. Sınır koşullarının tanımlanması

5. DENEYSEL FAALİYETLER

Bu tez çalışmasında yapılan deneysel çalışmalar iki ayrı başlık altında incelenecektir. İlk olarak tüm parametreler (doluluk oranları, duvar kalınlıkları vb.) sabit tutulacak şekilde sadece iç örgü yöntemi ve örme yönleri (tablaya yerleşim yönü) farklı olacak şekilde numuneler üretilmiş ve çekme testine tabi tutulmuştur. İkinci deney çalışmasında ise seçilen üç farklı numune prototip olarak üç boyutlu yazıcıda üretilmiş ve statik test düzeneği kurularak testlere maruz bırakılmıştır. Üç adet numune seçimi en yüksek dayanımlara sahip yatay ve dikey numune olan gyroid modellerine ek olarak örme yönteminin de incelenmesi için en yüksek dayanıma sahip ikinci örme yöntemi olan rectilinear örme yöntemli yatay numune seçilmiştir.

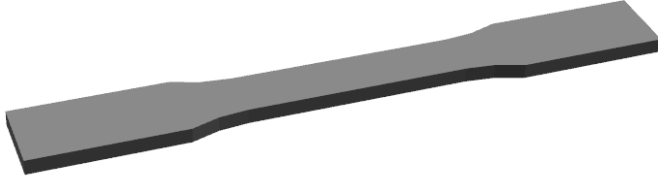
5.1. Çekme Testleri

Bu tez çalışmasında kullanılan örme yönteminin ve üretim yönünün (tablaya konumlandırma) tasarımının mekanik özelliklerine etkisini incelemek için hazırlanan numuneler ASTM D638 Type I [51] standartına göre üretilmiş ve UTEST markasına ait PROFI X6 model çekme test cihazı kullanılarak çekme testleri icra edilmiştir.



Şekil 5.1. ASTM D638 Type I numune ölçüleri

Çizimi “Catia V5” programı ile yapılan çekme numuneleri, “STL (Stereolithography)” uzantılı dosyalar halinde kaydedilmiştir. Bu dosyalar, “Ideamaker 4.0.1” [52] yazılımında açılarak numunelerin üç boyutlu yazıcıda üretiminin sağlanabilmesi için gerekli ayarlamalar yapılmıştır. Bu dosyalar da bir hafıza kartı yardımı ile üç boyutlu yazıcıya aktarılmıştır.



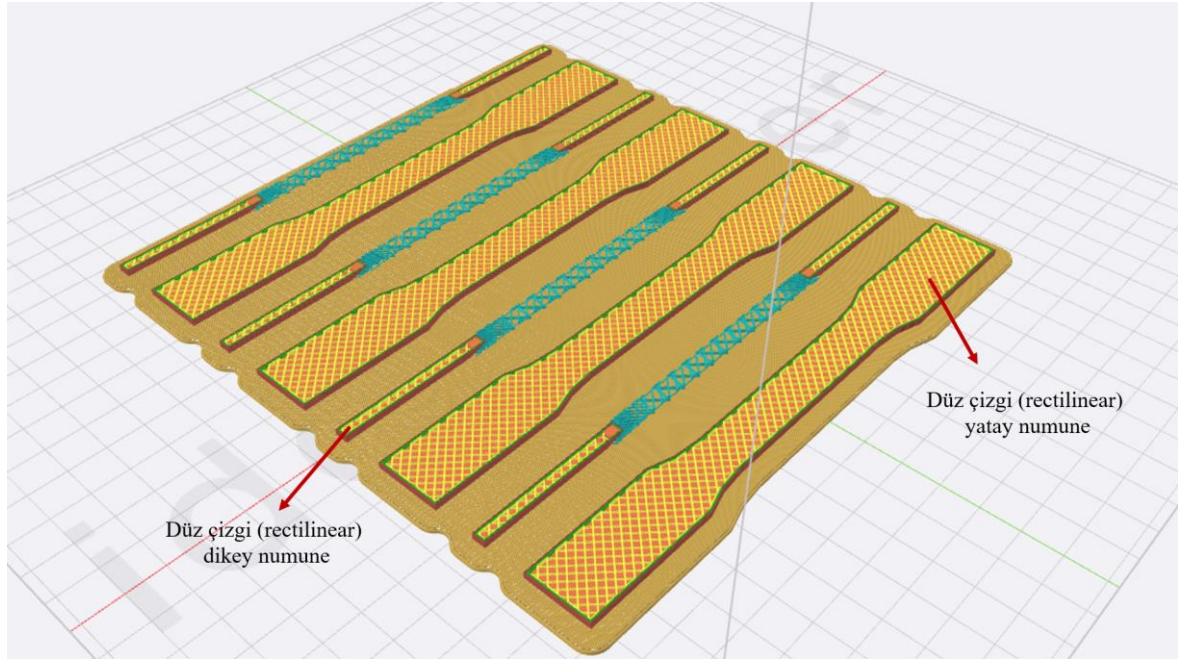
Şekil 5.2. Çekme numunesi CAD modeli

Üretilen numeler örme yöntemlerine ve baskı yönlerine sınıflandırılarak her bir numune üzerine markalama işlemleri yapılmıştır. Üretilen numunelerin markalanmış görselleri Resim 5.1’de sunulmuştur.

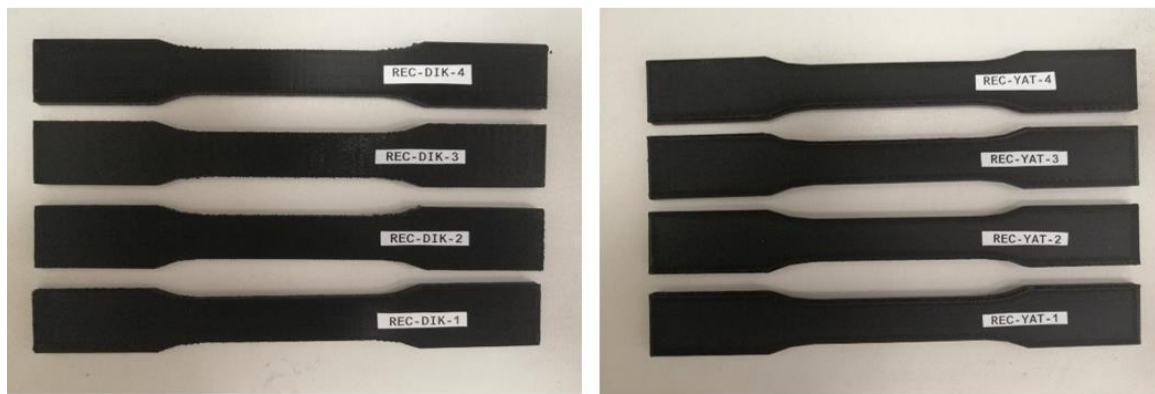


Resim 5.1. Üretilen çekme test numuneleri

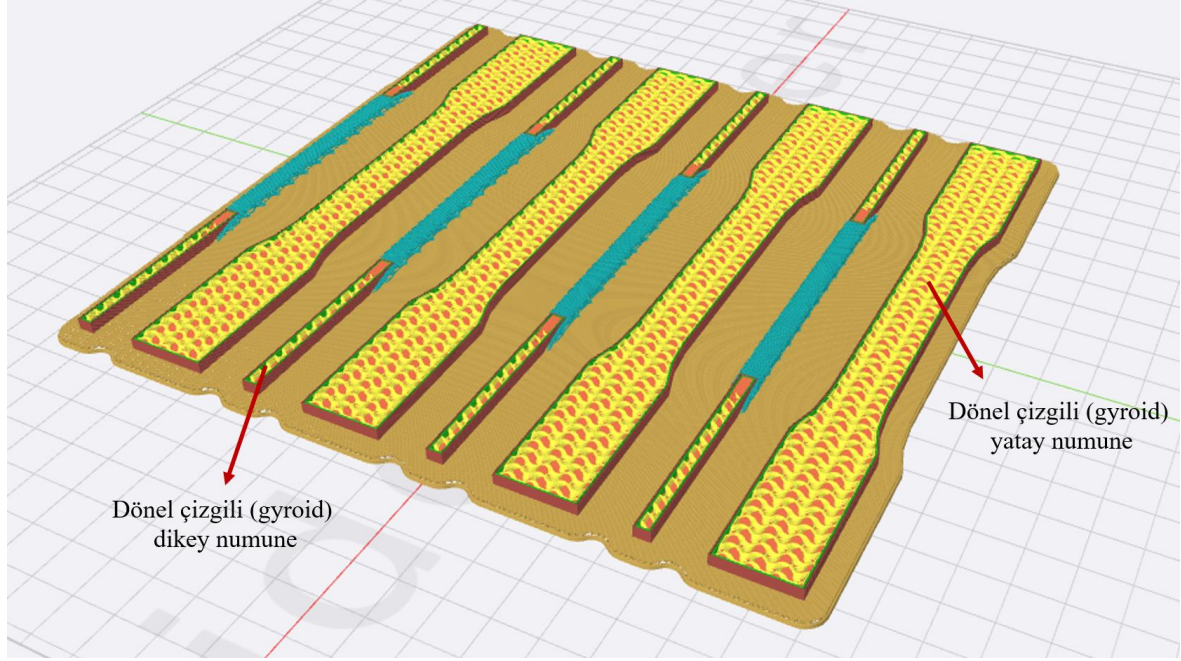
Düz çizgili (rectilinear) örme yöntemine göre yatay ve dikey olarak üretilen çekme numuneleri görseli Şekil 5.3 ve Resim 5.2’de aşağıda sunulmuştur. Dönel çizgili (gyroid) örme yöntemine göre yatay ve dikey olarak tasarlanan çekme numuneleri görseli Şekil 5.4 ve Resim 5.3’de aşağıda sunulmuştur. Bal peteği (honeycomb) örme yöntemine göre yatay ve dikey olarak tasarlanan çekme numuneleri görseli Şekil 5.5 ve Resim 5.4 de sunulmuştur.



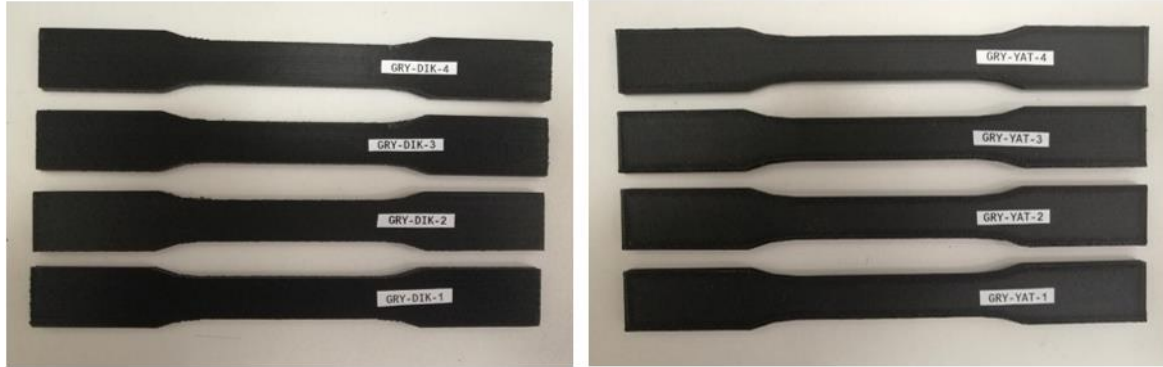
Şekil 5.3. Düz çizgi (rectilinear) örme yöntemine göre test numunelerinin yazıcıya yerleşimi



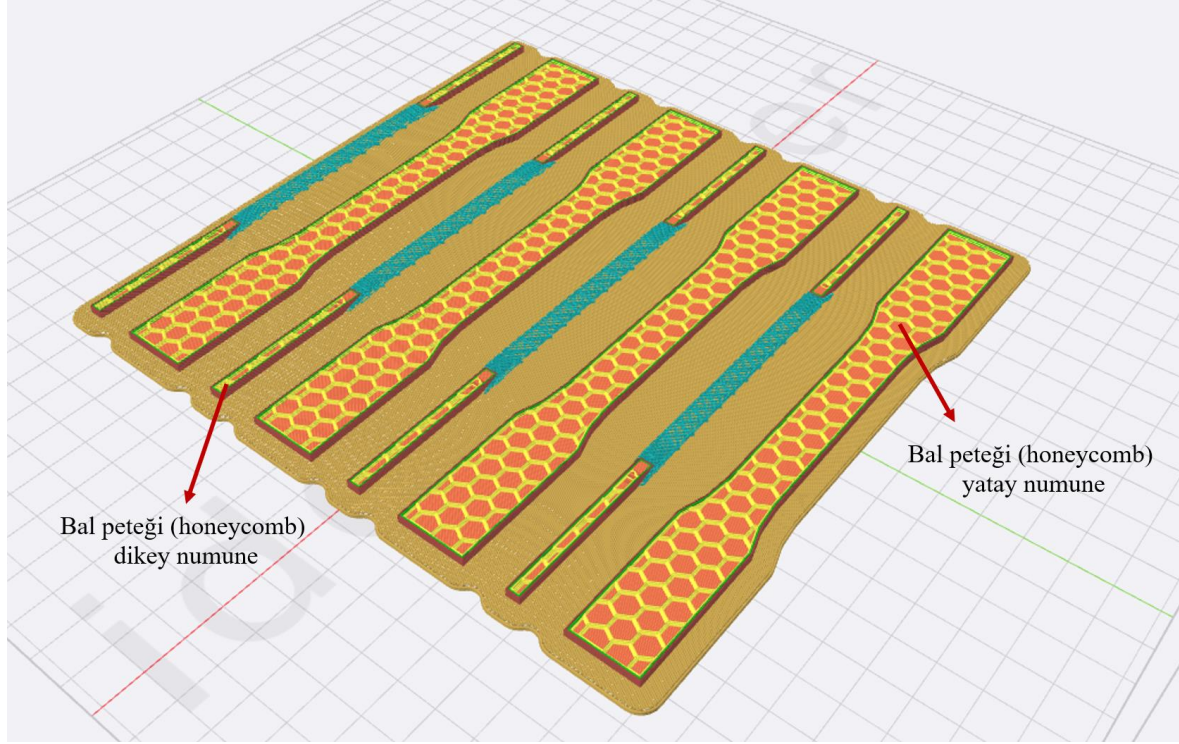
Resim 5.2. Düz çizgi (rectilinear) örme yöntemine göre üretilen yatay ve dikey test numuneleri



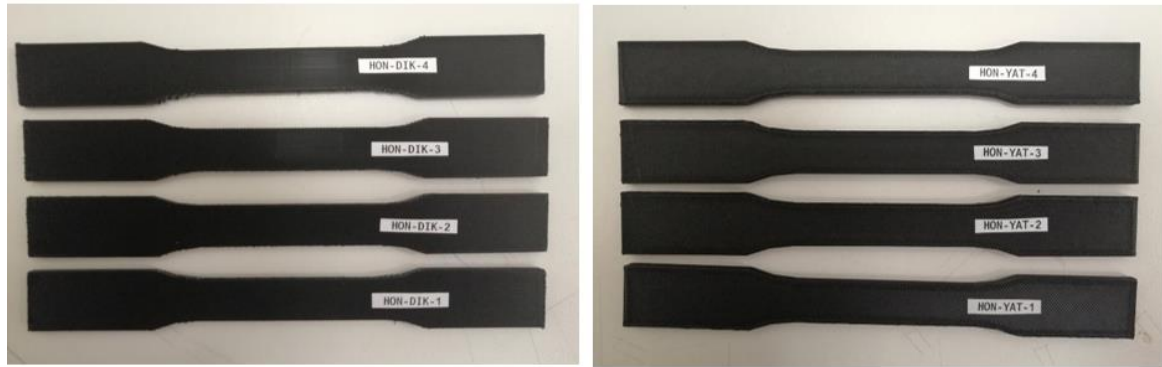
Şekil 5.4. Dönel çizgili (gyroid) örme yöntemine göre test numunelerinin yazıcıya yerleşimi



Resim 5.3. Dönel çizgili (gyroid) örme yöntemine göre üretilen yatay ve dikey test numuneleri



Şekil 5.5. Bal peteği (honeycomb) örme yöntemine göre test numunelerinin yazıcıya yerleşimi



Resim 5.4. Bal peteği (honeycomb) örme yöntemine göre üretilen yatay ve dikey test numuneleri

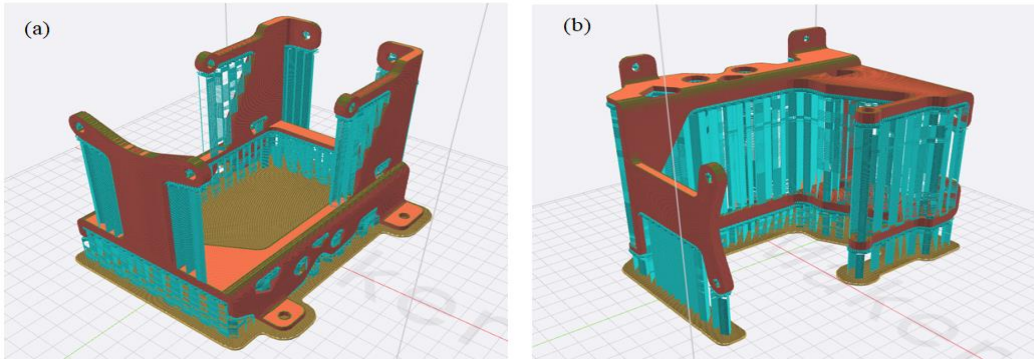
5.2. Statik Testler

Akma dayanımı en yüksek değere sahip olan dönel çizgili (gyroid) dikey numune ve akma dayanımı değeri en düşük olan dönel çizgili (gyroid) yatay numune üretilmiştir. Yatay olarak üretilen numune arasındaki farklılıkların temel olarak daha iyi anlaşılması için bir diğer örme yöntemi olan düz çizgili (rectilinear) yatay yerleşimli üç farklı prototip test numunesi üç boyutlu yazıcıda üretilmiş olup statik yükleme testlerine maruz bırakılmıştır.

Aşağıdaki başlıklarda seçilen farklı örme yöntemleri ve yerleşim durumlarında üç boyutlu yazıcıda ki üretim görselleri sunulmuştur.

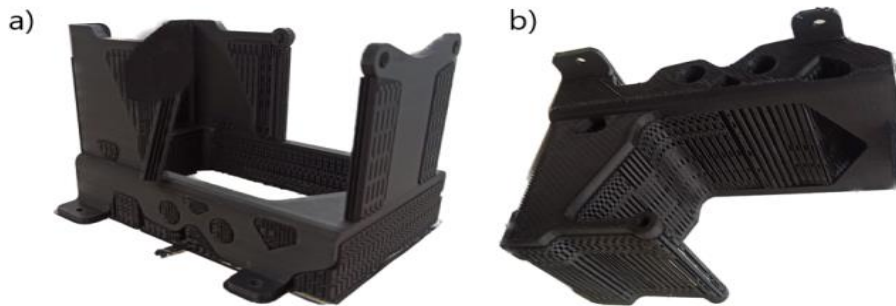
5.2.1. Yerleşim yönü

Statik test numunelerinin Şekil 5.6 (a)'da tablaya yerleşimi dikey olarak Şekil 5.6 (b)'de ise tablaya yerleşimi yatay olarak yapılmıştır. İki yerleşim arasında bariz olarak açık mavi renk ile gösterilen desteklerdir. Numunenin yatay olarak yerleşiminde üretim esnasından herhangi bir bozulma olmaması için destek sayısı artmış olmaktadır. Destek sayısının artması üretim süresini ve harcanan filament miktarını doğrudan artırmaktadır.



Şekil 5.6. Numunenin tablaya yerleşimi; dikey yerleşim (a), yatay yerleşim (b)

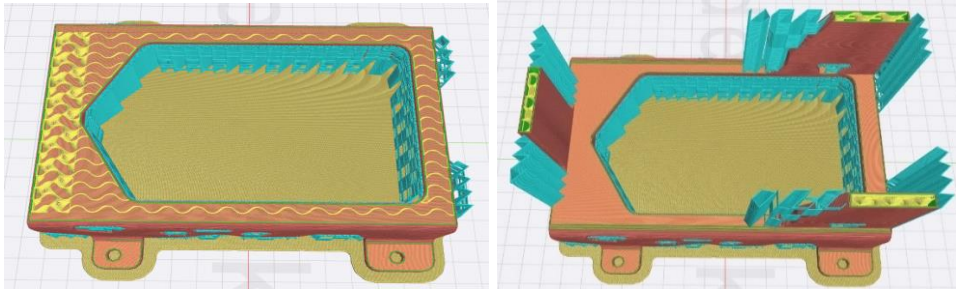
Resim 5.5 (a)'da sunulan dikey yerleşimli test numunesi yaklaşık 74 gr filament kullanılmış olup, görsel Resim 5.5 (b)'de sunulan yatay yerleşimli numunede ise 94 gr filament kullanılmıştır. Yerleşim yönüne bağlı olarak harcanan filament miktarında ise yaklaşık %20 lik bir farkın olduğu sonucuna ulaşılmıştır.



Resim 5.5. Üretilen test numuneleri; dikey yerleşimli (a), yatay yerleşimli (b)

5.2.2. Örme yöntemlerine göre üretim

Yapılan çekme testi sonuçlarına göre mekanik özellikleri en yüksek değere sahip olan dönel çizgili (gyroid) örme tipi seçilerek statik teste tabi tutmak için dönel çizgili (gyroid) örme tipi ile dikey ve yatay yerleşimli test numunesi üretilmiştir. Dönel çizgili (gyroid) örme tipli ve dikey yerleşimli test numunesinin üretim anındaki görseli Şekil 5.7 ve Resim 5.6’da sunulmuştur.

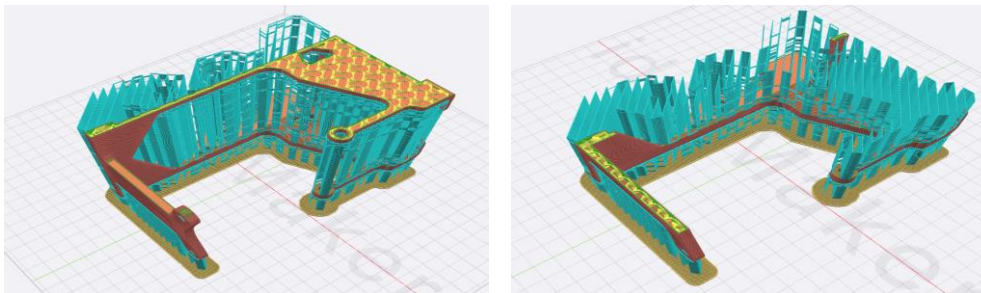


Şekil 5.7. Gyroid örme tipi ile dikey yerleşimli üretim

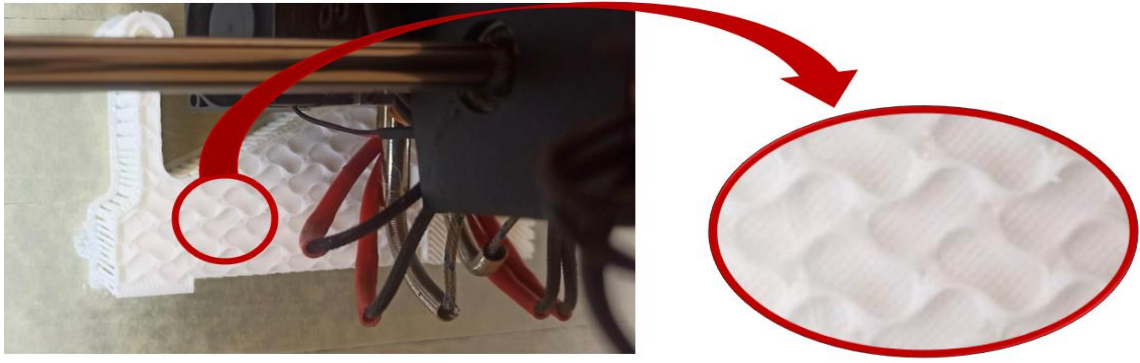


Resim 5.6. Dönel çizgili (gyroid) örme tipi ile dikey yerleşimli üretim

Dönel çizgili (gyroid) örme tipli ve yatay yerleşimli test numunesinin üretim anındaki görseli Şekil 5.8 ve Resim 5.7’de sunulmuştur.

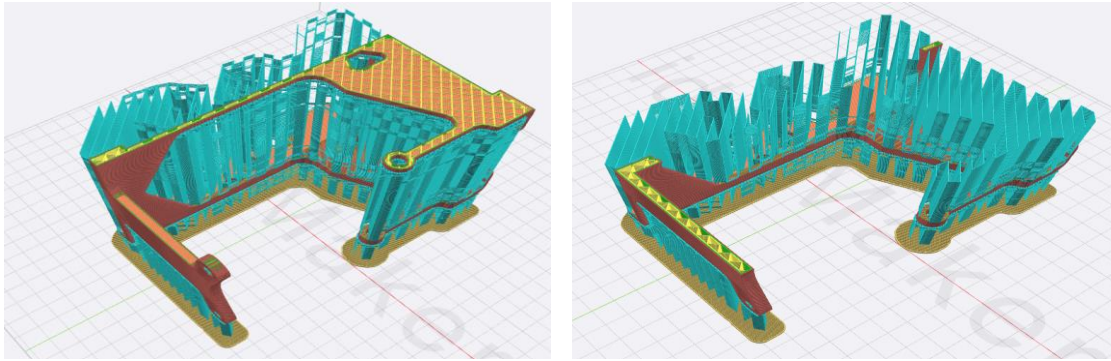


Şekil 5.8. Gyroid örme tipi ile yatay yerleşimli üretim



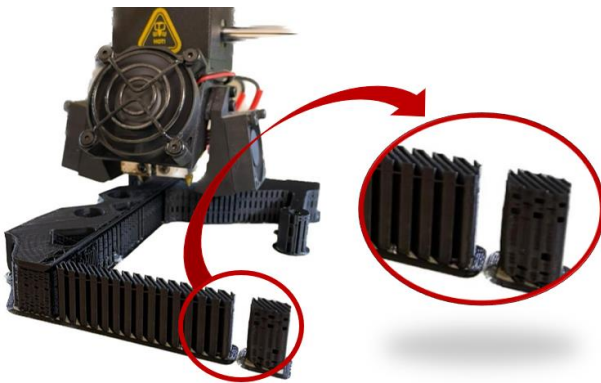
Resim 5.7. Dönel çizgili (gyroid) örme tipi ile yatay yerleşimli üretilen test numunesi

Rectilinear örme tipli ve yatay yerleşimli test numunesinin üretim anındaki görseli Şekil 5.9 ve Resim 5.8’de sunulmuştur.



Şekil 5.9. Rectilinear örme tipli yatay yerleşimli üretim

Resim 5.8’de sunulan görselde yatay olarak üretilen test numunesindeki destek yapılar net olarak görülmektedir.

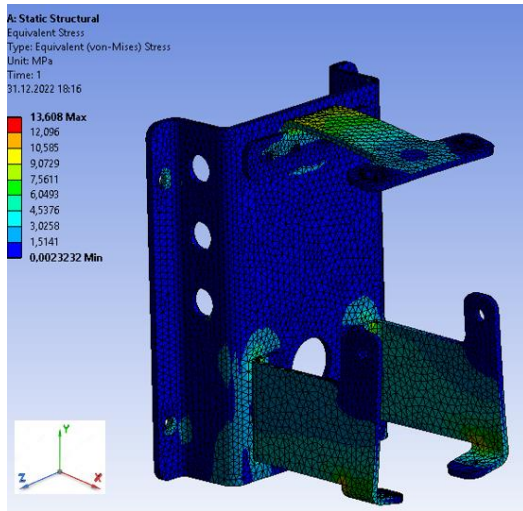


Resim 5.8. Düz çizgili (rectilinear) örme tipi ile yatay yerleşimli üretilen test numunesi

6. SONUÇ VE TARTIŞMA

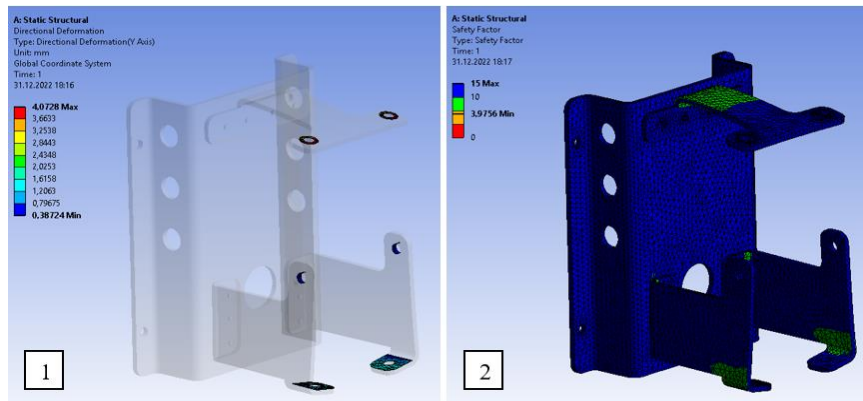
6.1. Montajlı Parçanın Statik Analiz Sonuçları

Ansys programına malzeme olarak Alüminyum olarak tanımlanmış ve montajlı halde analize tabi tutulmuştur. Maksimum eş değer gerilmenin 13 MPa olarak çıktığı Şekil 6.1’de de görülmektedir.



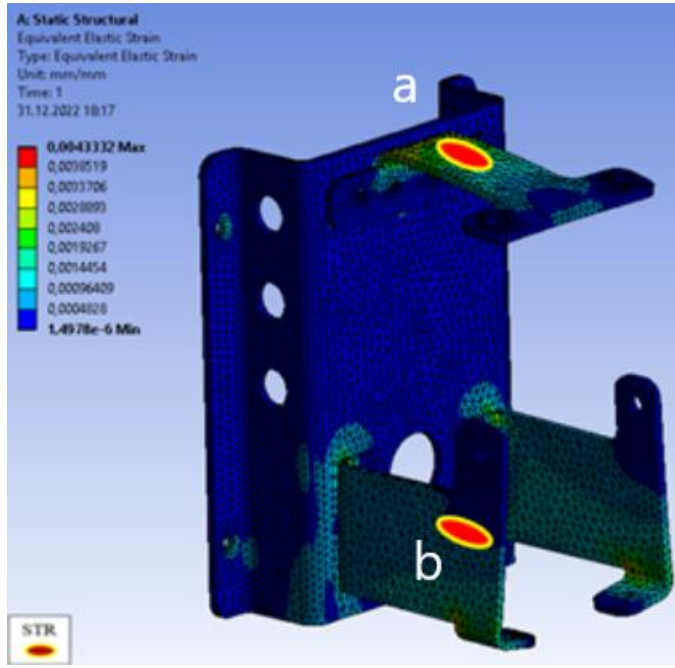
Şekil 6.1. Statik analiz eş değer gerilme sonucu

Kuvvetler Y ekseninde uygulandığı için malzeme üzerinde Y eksenin deki deformasyon incelenmiş olup masimum deformasyonun 4,07 mm olduğu Şekil 6.2 (1)’de görülmektedir. Ayrıca Ansys programının güvenlik faktörü ölçümünde ise yapının 3,9 kat sayı ile bir güvenlik faktörüne sahip olduğu Şekil 6.2 (2)’de sunulmuştur.



Şekil 6.2. Y eksenindeki deformasyon (1) ve Ansys güvenlik faktörü (2)

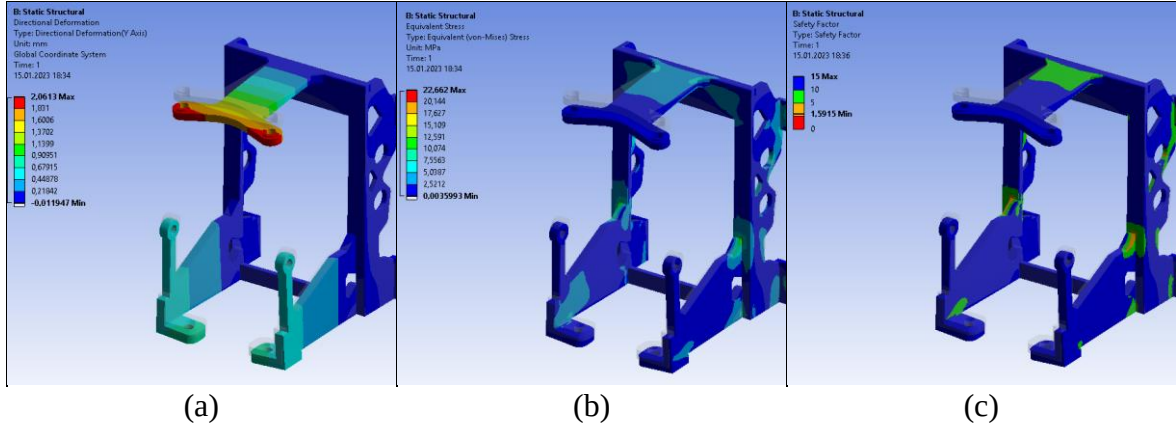
Ansys programı kullanılarak max gerinim oluşan yerler incelenmiş ve malzeme üzerinde gerinim ölçer (STR-strain gauge) uygulaması yapılacak yerler Şekil 6.3 üzerinde gösterilmiştir. Yapılan analiz sonucunda maksimum strain değerinin 0,0043332 mm/mm çıktığı gözlemlenmiştir. Ansys programında herhangi bir ek tanımla yapılmadığı için çıkan sonuçların parçanın %100 doluluk oranında örme yönteminden bağımsız olarak verildiği göz ardı edilmemelidir.



Şekil 6.3. STR uygulaması yapılacak yerlerin tespiti

6.2. Topoloji Sonrası Statik Analiz Sonuçları

Şekil 4.15’de kırmızı ile belirtilen yerlerden aşağı yönde 10 kg kadar kuvvet uygulanmıştır. Yapılan statik analiz sonucunda Y yönünde (aşağı yönde) maksimum 2 mm olacak şekilde bir deformasyon miktarına ulaşılmıştır. Analiz sonucunda eş değer gerilme maksimum 22 MPa değerinde çıktığı görülmüştür. Ayrıca Ansys Workbench programında göre tasarımın güvenlik faktörünün 1,6 değerinde olduğu Şekil 6.4’de görülmektedir.



Şekil 6.4. Topoloji uygulaması yapılan parçanın deformasyon (a), eşdeğer gerilme (b) ve güvenlik faktörü (c)

6.3. Çekme Testi Sonuçları

Her test numunesi örme yöntemlerine (bu çalışmada üç farklı örme yöntemi kullanılmıştır) ve yatay-dikey yerleşimine göre gruplara ayrılarak çekme testlerine tabi tutulmuştur. Testler aşağıdaki sıraya göre yapılmıştır.

- Düz çizgili (rectilinear) Yatay (4 adet test numunesi)
- Düz çizgili (rectilinear) Dikey (4 adet test numunesi)
- Dönel çizgili (gyroid) Yatay (4 adet test numunesi)
- Dönel çizgili (gyroid) Dikey (4 adet test numunesi)
- Bal peteği (honeycomb) Yatay (4 adet test numunesi)
- Bal peteği (honeycomb) Dikey (4 adet test numunesi)

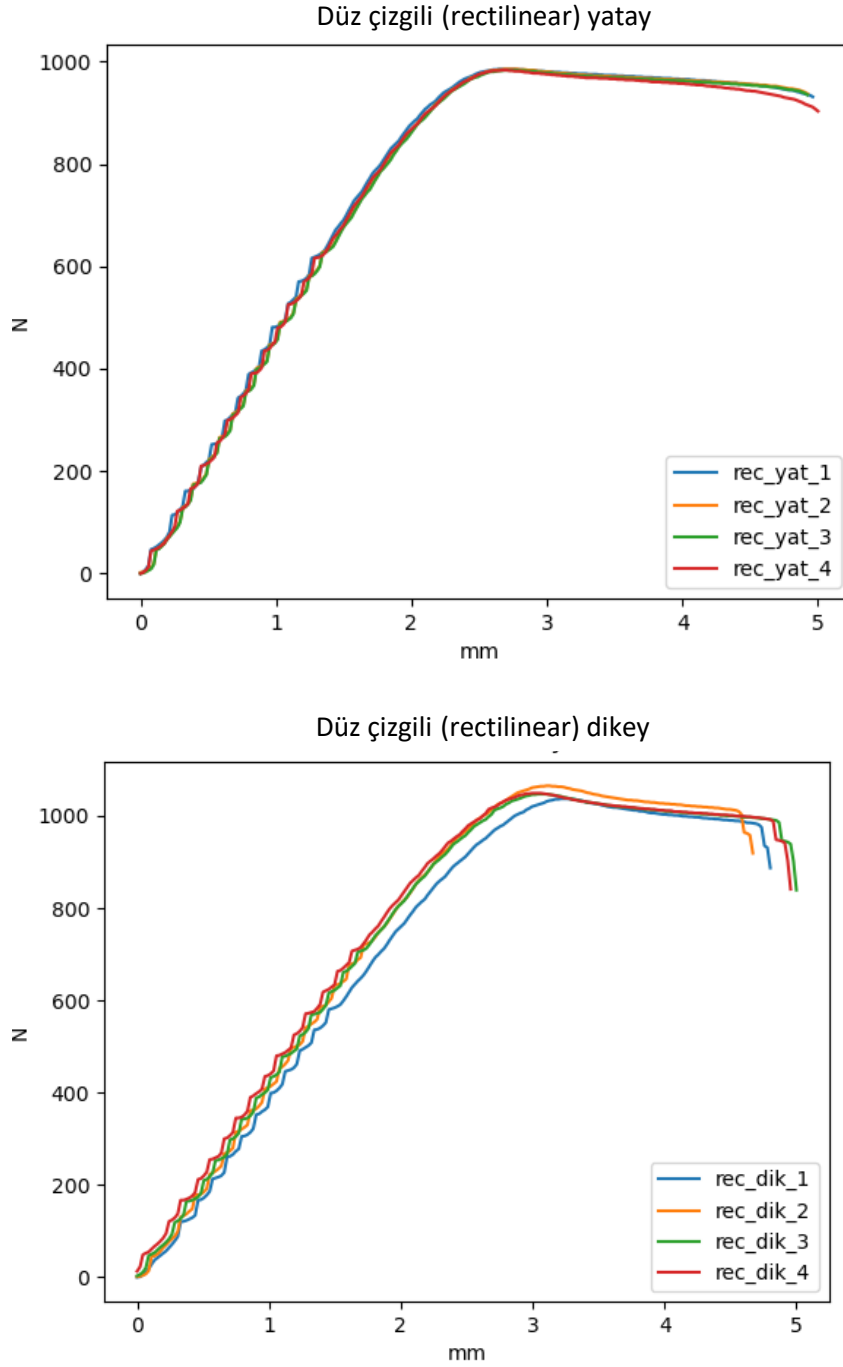
Örme yöntemi ve numune üretim yönünün detaylı olarak incelenmesi için set halinde dörder tane test numunesi üretilmiş ve toplamda 24 adet test icra edilmiştir. Toplanan veriler kendi içinde ortalamaları alınmış olup grafikler bu başlık altında ayrıca verilmiştir.



Resim 6.1. Test edilen tüm çekme numuneleri

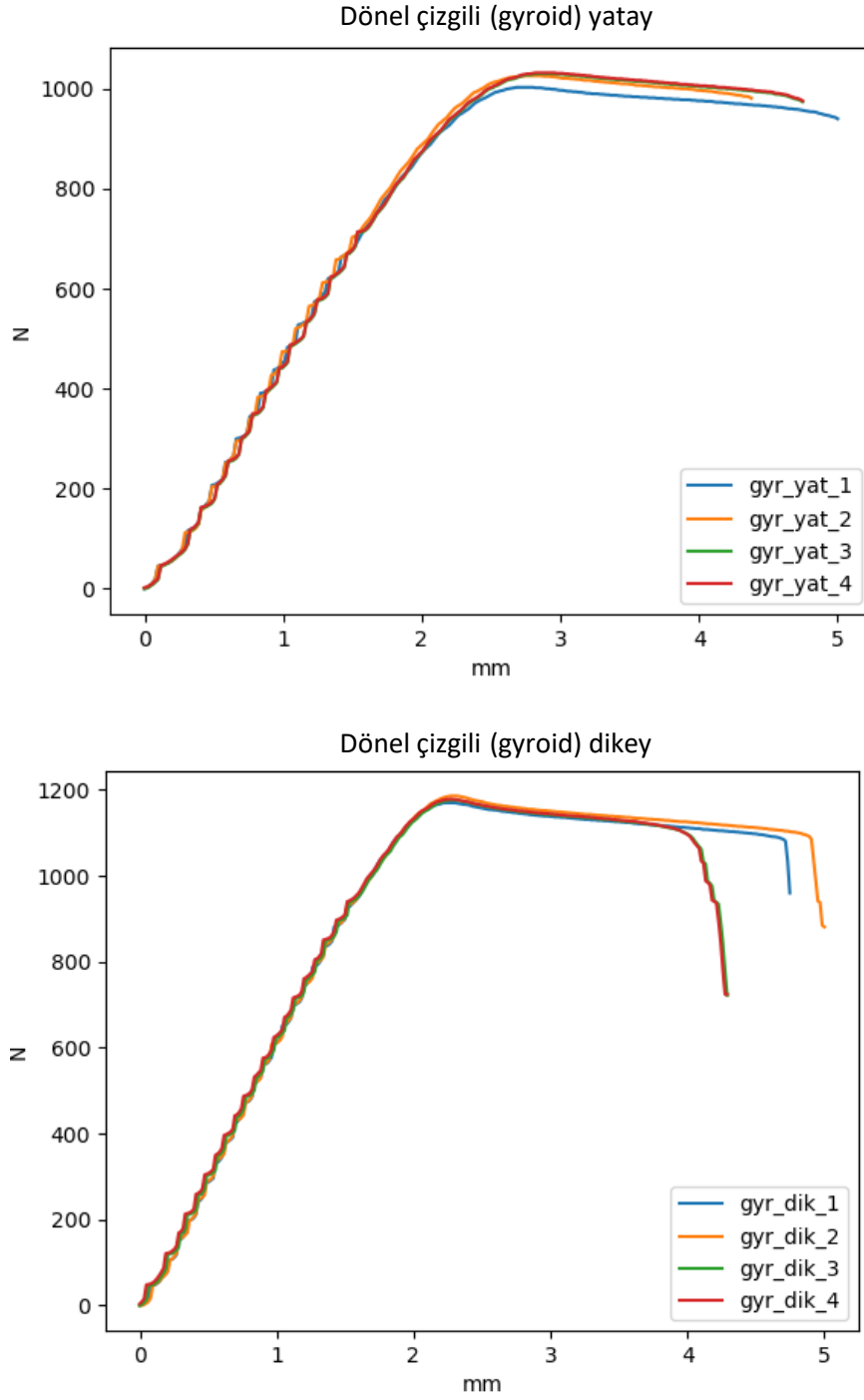
Düz çizgili (rectilinear) örme tipine göre üretilen test numunelerinin grafikleri yatay yerleşimli ve dikey yerleşimli olarak Resim 6.1’de sunulmuştur.

Şekil 6.5 – Şekil 6.7 numaralı grafikler detaylı incelendiğinde salınım olan bölgede elastik deformasyonun olduğu sonrasında ise plastik deformasyonun başladığı görülmektedir. Grafiğin son kısımlarında ise maksimum yük geçilerek kopma meydana geldiği açıkça gözlemlenmektedir.



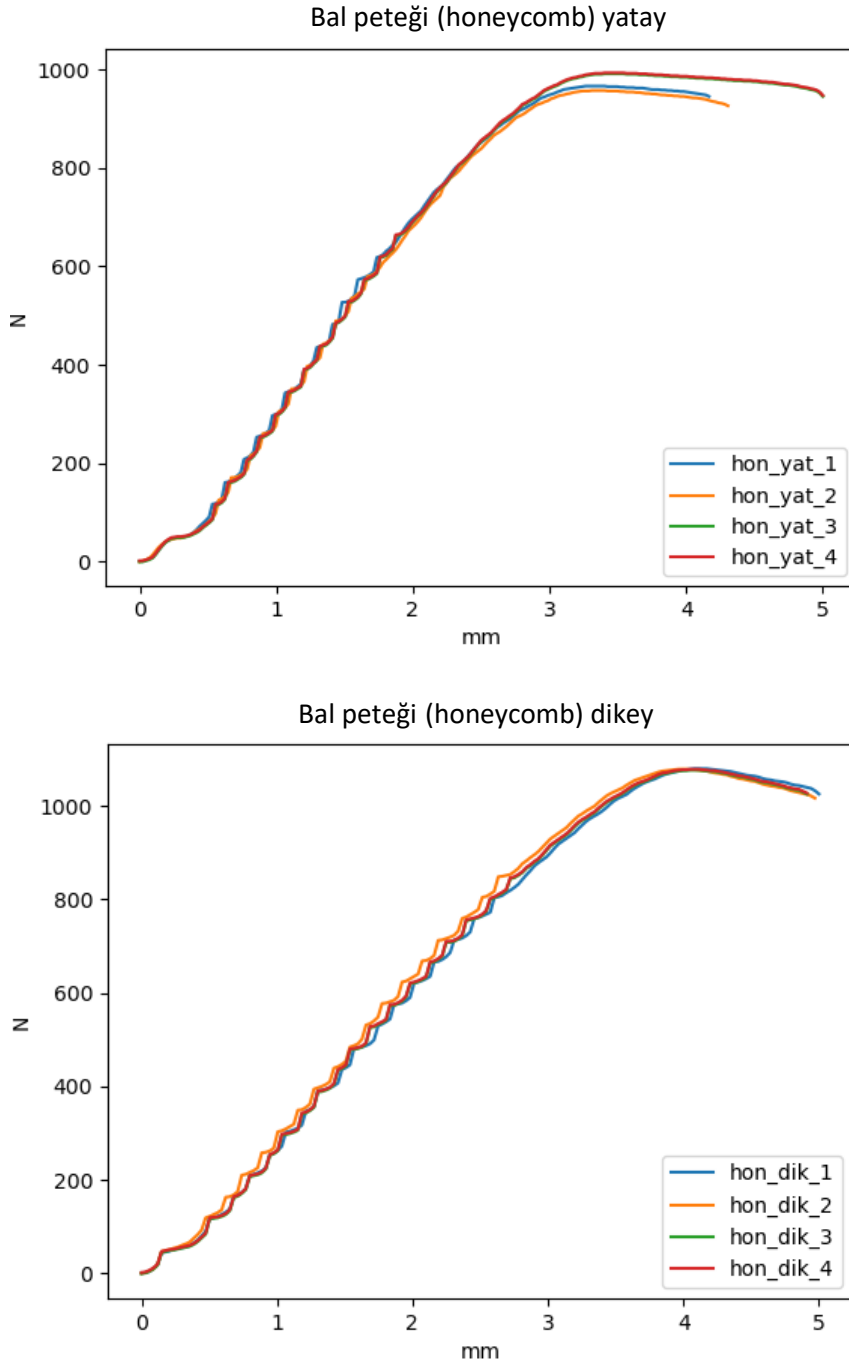
Şekil 6.5. Düz çizgili (rectilinear) örme tipine sahip yatay ve dikey yerleşimli test numunelerinin yük-deformasyon grafikleri

Dönel çizgili (gyroid) örme tipine göre üretilen test numunelerinin grafikleri yatay yerleşimli ve dikey yerleşimli olarak Şekil 6.6’da sunulmuştur. Grafikler detaylı incelendiğinde salınım olan bölgede elastik deformasyonun olduğu sonrasında ise plastik deformasyonun başladığı görülmektedir. Sonrasında ise maksimum yük geçilerek kopma meydana gelmiştir.



Şekil 6.6. Dönel çizgili (gyroid) örme tipine sahip yatay ve dikey yerleşimli test numunelerinin yük-deformasyon grafikleri

Honeycomb örme tipine göre üretilen test numunelerinin grafikleri yatay yerleşimli ve dikey yerleşimli olarak Şekil 6.7’de sunulmuştur. Grafikler detaylı incelendiğinde salınım olan bölgede elastik deformasyonun olduğu sonrasında ise plastik deformasyonun başladığı görülmektedir. Sonrasında ise maksimum yük değerleri aşılarak kopma meydana gelmiştir.



Şekil 6.7. Bal peteği (honeycomb) örme tipine sahip yatay ve dikey yerleşimli test numunelerinin yük-deformasyon grafikleri

6.4. Çekme Testi Kıyaslama Sonuçları

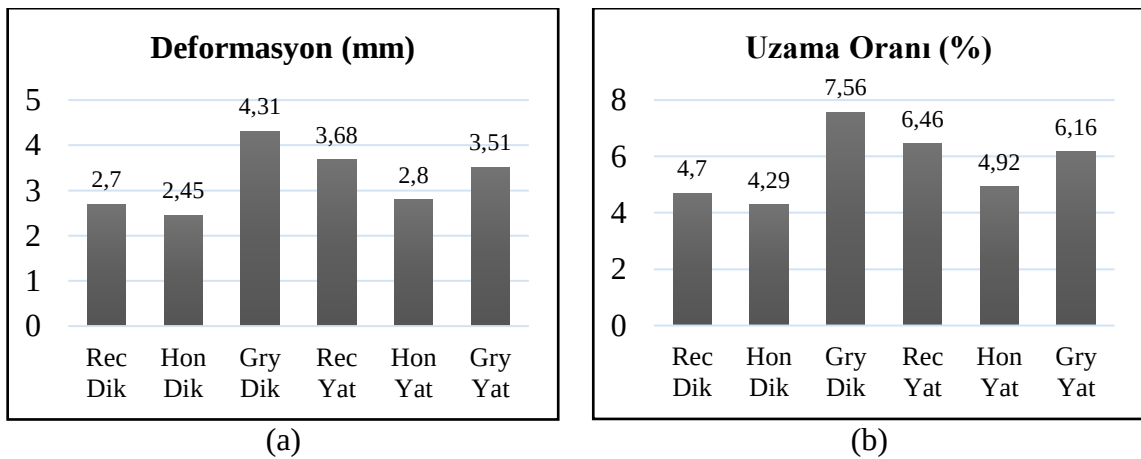
Her bir örme yöntemi ve üretim yönü için test edilen dörder adet numune üretilerek toplamda 24 test yapılmış ve her bir örme yöntemi ve yerleşim yönü için ortalamala değerler alınarak Çizelge 6.1’de sunulmuştur. Ölçüm sonuçlarının daha kolay anlaşılması için deformasyon miktarı (mm), uzama oranı (%), max yük (N), akma dayanımı (N/mm^2), çekme dayanımı

(N/mm²) ve kopma dayanımı (N/mm²) değerlerini içeren grafikler oluşturulmuştur (Şekil 6.5 – Şekil 6.7).

Çizelge 6.1. Test edilen çekme numunelerinin test sonuçları ortalaması

	Rec Dik	Hon Dik	Gry Dik	Rec Yat	Hon Yat	Gry Yat
Deformasyon (mm)	2,7	2,45	4,31	3,68	2,8	3,51
Uzama Oranı (%)	4,7	4,29	7,56	6,46	4,92	6,16
Max Yük (N)	1056	1077,66	1177,66	983,66	971,33	1019,66
Akma Dayanımı (N/mm ²)	13,44	18,11	18,21	15,95	14,85	14,53
Çekme Dayanımı (N/mm ²)	18,885	19,438	21,242	17,767	17,262	18,299
Kopma Dayanımı (N/mm ²)	15,133	18,434	15,41	16,793	16,703	17,406

Şekil 6.8’de test numunelerinin deformasyon ve uzama oranı değerlerinin kıyaslanması verilmiştir.



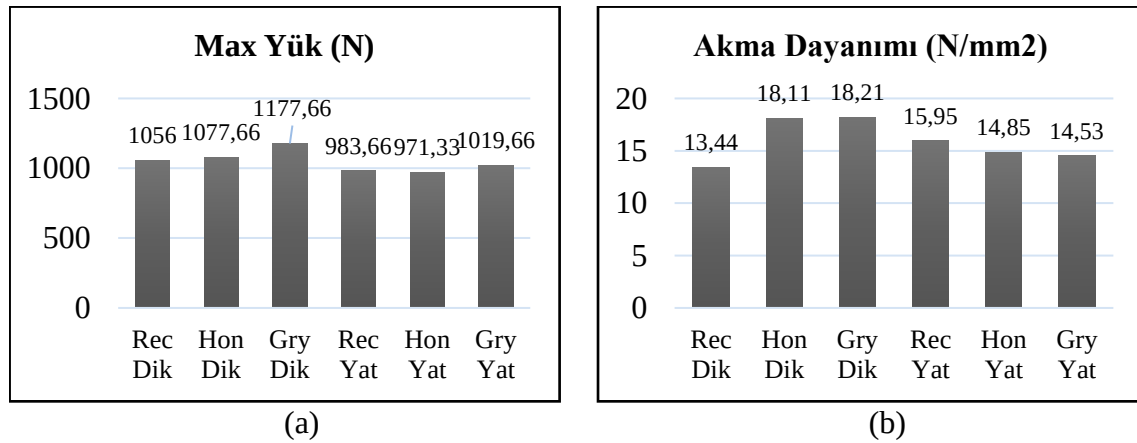
Şekil 6.8. Test numunelerinin deformasyon ve uzama oranı değerlerinin kıyaslanması

Çekme test numuneleri deformasyon bakımından incelendiğinde (Şekil 6.8-a) en fazla deformasyonun dönel çizgili (gyroid) örme yöntemli dikey yerleşimli numunede olduğu

görülmüştür. En az deformasyonun ise bal peteği (honeycomb) örme yöntemi ile dikey olarak üretilen test numunesine ait olduğu ve maksimum deformasyon ile minimum deformasyon değeri arasında yaklaşık %43 fark olduğu gözlemlenmiştir.

Çekme test numuneleri uzama yüzdesi bakımından incelendiğinde (Şekil 6.8-b) en fazla uzama yüzdesinin dönel çizgili (gyroid) örme yöntemli dikey yerleşimli numunede olduğu tespit edilmiştir. En az uzama yüzdesinin ise (bal peteği) honeycomb örme yöntemi ile dikey olarak üretilen test numunesi ait olduğu ve minimum uzama oranı ile maksimum uzama oranı değeri arasında yaklaşık 1,76 kat fark olduğu gözlemlenmiştir.

Test numunelerinin maksimum yük ve akma dayanımı değerlerinin kıyaslanması Şekil 6.9'da verilmiştir.



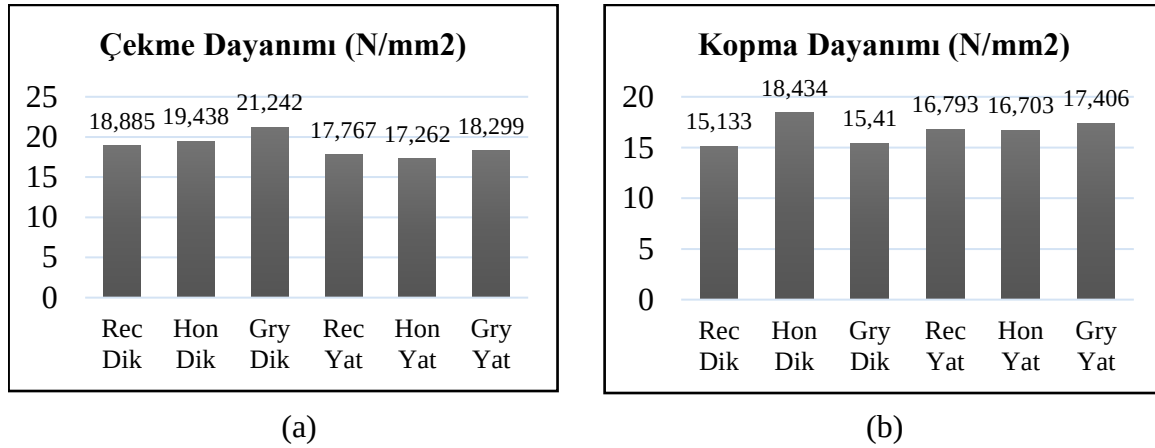
Şekil 6.9. Test numunelerinin maksimum yük ve akma dayanımı değerlerinin kıyaslanması

Çekme test numuneleri maksimum yük bakımından incelendiğinde (Şekil 6.9-a) en fazla maksimum yük değerinin dönel çizgili (gyroid) örme yöntemli dikey yerleşimli numune olduğu görülmüştür. En düşük yük değerinin ise bal peteği (honeycomb) örme yöntemi ile yatay olarak üretilen test numunesine ait olduğu ve maksimum yük ile minimum yük değeri arasında yaklaşık %17 fark olduğu gözlemlenmiştir.

Çekme test numuneleri akma dayanımı bakımından incelendiğinde (Şekil 6.9-b) en fazla akma dayanımı değerinin dönel çizgili (gyroid) örme yöntemli dikey yerleşimli numunelerde olduğu belirlenmiştir. En düşük akma değerinin ise dönel çizgili (gyroid) örme yöntemi ile yatay olarak üretilen test numunelerine ait olduğu ve maksimum akma dayanımı ile

minimum akma dayanımı değeri arasında yaklaşık %26 fark olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca bal peteği (honeycomb) örme yöntemi ile dikey olarak üretilen test numuneleri akma dayanımı değerinin dönel çizgili (gyroid) örme yöntemli dikey yerleşimli numunelerin akma dayanımı değerlerine oldukça benzer olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 6.10'da test numunelerinin çekme dayanımı ve kopma dayanımı değerlerinin kıyaslanması görülmektedir.



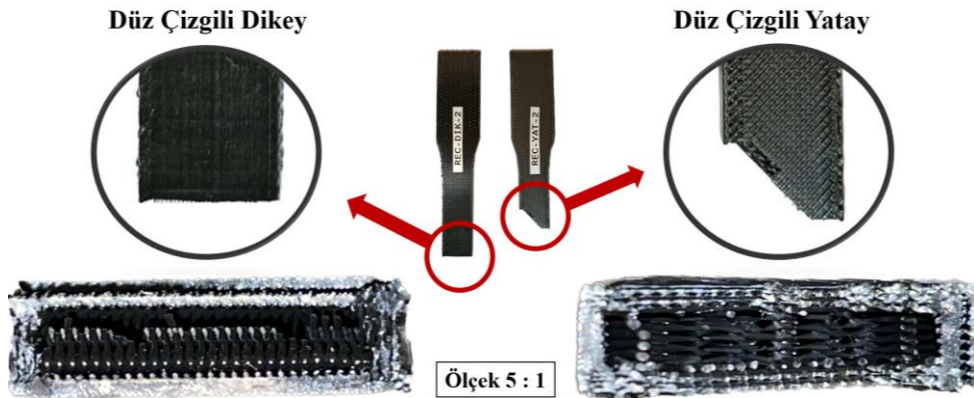
Şekil 6.10. Test numunelerinin çekme dayanımı ve kopma dayanımı değerlerinin kıyaslanması

Çekme test numuneleri çekme dayanımı bakımından incelendiğinde (Şekil 6.10-a) en fazla çekme dayanımı değerlerinin dönel çizgili (gyroid) örme yöntemli dikey yerleşimli numuneler olduğu görülmüştür. En düşük çekme dayanımı değerinin ise (düz çizgili) rectilinear örme yöntemi ile yatay olarak üretilen test numunelerine ait olduğu ve maksimum çekme dayanımı ile minimum çekme dayanımı arasında yaklaşık %18 fark olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca literatürde Koç (2022) yaptığı çalışmasında da düz çizgili (rectilinear) yatay numunenin bal peteği (honeycomb) yatay numeneye göre çekme dayanımının fazla çıktığı sunulmuştur [22].

Çekme test numuneleri kopma dayanımı bakımından incelendiğinde (Şekil 6.10-b) en fazla kopma dayanımı değerinin bal peteği (honeycomb) örme yöntemli dikey yerleşimli numunelerde olduğu tespit edilmiştir. En düşük kopma dayanımı değerlerinin ise dönel çizgili (gyroid) örme yöntemi ile dikey olarak üretilen test numunelerine ait olduğu ve maksimum kopma dayanımı değeri ile minimum kopma dayanımı değeri arasında yaklaşık %17 fark olduğu gözlemlenmiştir.

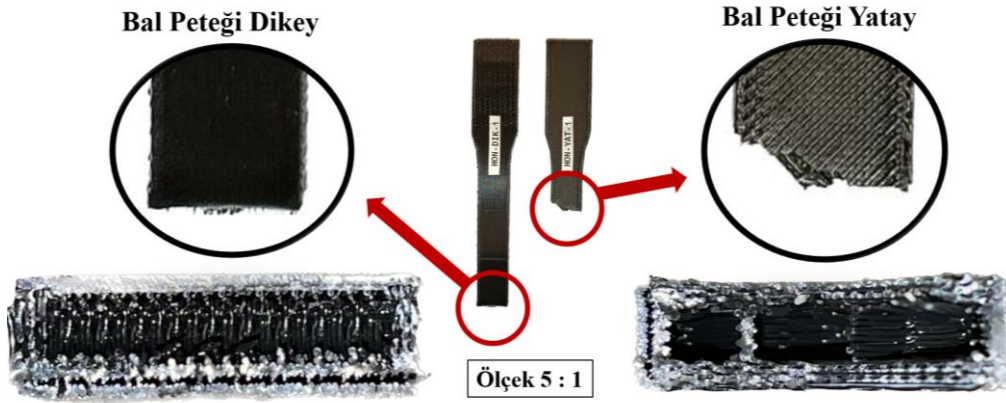
6.5. Kopma Yüzeylerinin İncelenmesi

Bu başlık altında test edilen 24 çekme testi numunelerinden aynı örme tipinde fakat farklı yerleşimler ile üretilen numunelerin kırılma yüzeyleri detaylı olarak incelenmiştir. Örme yöntemlerinden bağımsız olarak dikey numunelerin gevrek kırılma tipine daha yakın bir davranış sergilediği yatay numunelerin ise dikey numunelere nispeten daha sünek bir davranış sergileyerek kırıldığı gözlemlenmiştir. Resim 6.2 de görüldüğü üzere rectilinear çekme numuneleri detaylı olarak incelendiğinde dikey olarak üretilen numunenin yatay olarak üretilen numuneye kıyasla fazla plastik deformasyon meydana gelmeden kırıldığı ve uzama oranı test sonuçlarına göre ise yatay numuneye oranla %27 daha az uzama oranına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Yatay yerleşimli numunenin plastik deformasyona izin verecek şekilde uzadığı ve örme ağındaki kesişim yüzeylerinden kırıldığı gözlemlenmiştir.



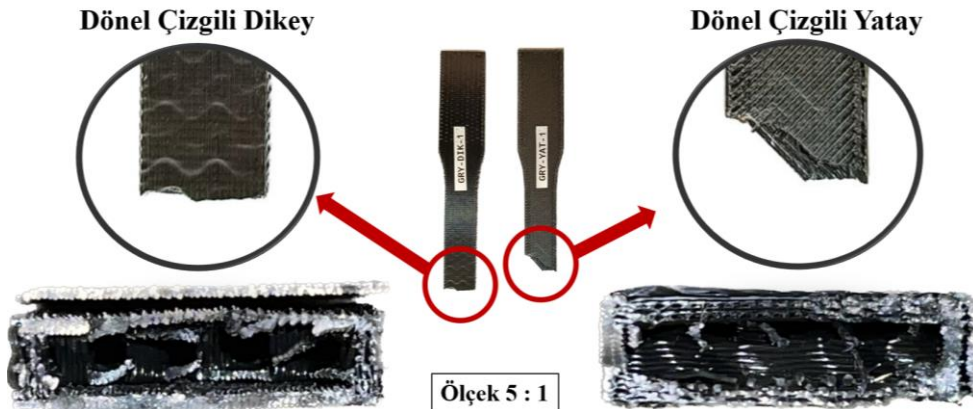
Resim 6.2. Düz çizgili (rectilinear) çekme test numunesinin yüzeylerinin detaylı incelenmesi

Resim 6.3’de görüldüğü üzere bal peteği (honeycomb) çekme numuneleri detaylı olarak incelendiğinde, dikey olarak üretilen numunenin yatay olarak üretilen numuneye kıyasla daha fazla plastik deformasyon meydana gelmeden kırıldığı gözükmemektedir. Dikey numunenin yatay yerleşimli numunenin plastik deformasyona izin verecek şekilde uzadığı ve yatay numunede örme ağındaki kesişim yüzeylerinden kırıldığı da açıkça gözlemlenmiştir. Ancak dikey numunenin yatay numuneye oranla akma dayanımı bakımından %18, çekme dayanımı bakımından %11, kopma dayanımının bakımından ise %9 oranında daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Dikey numunenin dayanım değerleri açısından yüksek olmasının sebebinin çekme test numunesi kesit alanında yatay numuneye oranla daha fazla temas yüzeyi oluşturmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Resim 6.3. Bal peteği (honeycomb) çekme test numunesinin yüzeylerinin detaylı incelenmesi

Resim 6.4’de görüldüğü üzere gyroid çekme numuneleri detaylı olarak incelendiğinde ise düz çizgili (rectilinear) ve bal peteği (honeycomb) örme yönteminin aksine yatay olarak üretilen numunenin dikey olarak üretilen numuneye kıyasla fazla plastik deformasyon meydana gelmeden kırıldığı ve uzama oranı test sonuçlarına göre ise yatay numuneye oranla %14 daha fazla uzama oranına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Dikey numunenin yatay yerleşimli numunenin plastik deformasyona izin verecek şekilde uzadığı ve yatay numunede örme ağındaki kesişim yüzeylerinden kırıldığı da açıkça gözlemlenmiştir. Ancak dikey numunenin yatay numuneye oranla akma dayanımı bakımından %20, çekme dayanımı bakımından %13 daha yüksek olduğu, kopma dayanımının bakımından ise %11 oranında daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Dikey numunenin akma ve çekme dayanım değerleri açısından yüksek olmasının sebebinin çekme test numunesi kesit alanında yatay numuneye oranla daha fazla temas yüzeyi oluşturmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Resim 6.4. Dönel çizgili (gyroid) çekme test numunesinin yüzeylerinin detaylı incelenmesi

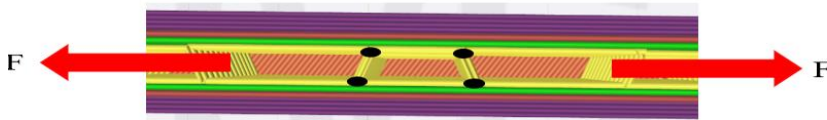
Her bir örme yöntemi için baskı yönlerine göre alınan kesit resimleri aşağıda sunulmuştur (Şekil 6.11 – Şekil 6.18). Yatay ve dikey yerleşimli numunelerin kesitleri detaylı olarak incelendiğinde, dikey yerleşimli numune kesitinin daha sık ve tok yapıya sahip olduğu açıkça görülmektedir. Rectilinear örme yöntemli numunede kuvvetlerin geldiği yerler siyah noktalar ile gösterilmiştir. Yatay yerleşimli numunede esnemeye daha fazla izin verecek olan noktaların fazlalığı açıkça gözükmemektedir. Düz çizgili (rectilinear) ve bal peteği (honeycomb) örme yöntemlerinin aksine dönel çizgili (gyroid) örme yöntemli numunenin dikey numuneli kesitinin daha sık ve tok olmasından dolayı (kuvvet gelen yerler siyah nokta ile gösterilmiştir) yatay numuneye kıyasla daha fazla deformasyona izin verdiği gözlemlenmiştir. Yatay yerleşimli numunenin örme yönteminden kaynaklı olarak geometrik şekillerin uzamaya daha fazla izin verdiği de Çizelge 6.1 de açıkça gözükmemektedir. Literatür incelendiğinde Özmen ve arkadaşlarının yaptığı çalışmadaki [53] kırılma yüzeylerine benzer yüzeylerin oluştuğu gözlemlenmiştir.



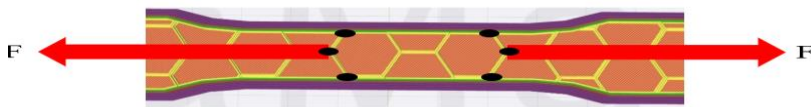
Şekil 6.11. Düz çizgili (rectilinear) örme yöntemli dikey numune kesiti



Şekil 6.12. Düz çizgili (rectilinear) örme yöntemli yatay numune kesiti



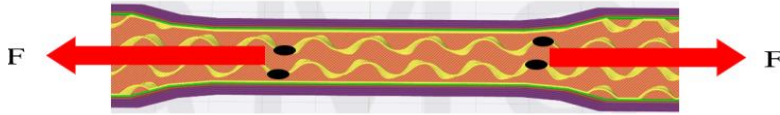
Şekil 6.13. Bal peteği (honeycomb) örme yöntemli dikey numune kesiti



Şekil 6.14. Bal peteği (honeycomb) örme yöntemli yatay numune kesiti



Şekil 6.15. Dönel çizgili (gyroid) örme yöntemli dikey numune kesiti



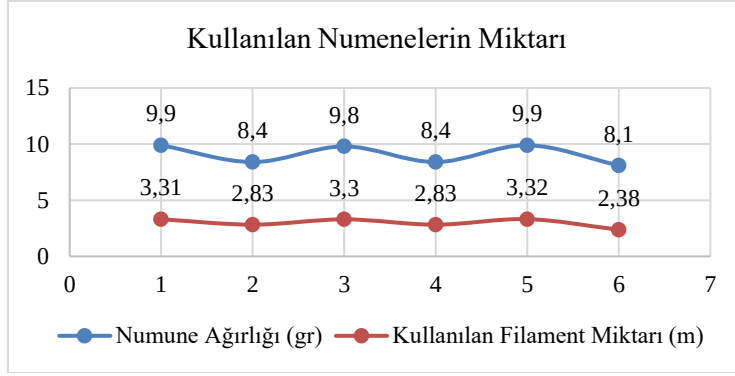
Şekil 6.16. Dönel çizgili (gyroid) örme yöntemli yatay numune kesiti

6.6. Numunelerin Fiziksel Özellikleri

ASTM D638 Tip I standartlarında üretilen çekme test numuneleri örme yöntemlerine ve baskı yönlerine göre üretildiğinde numune ağırlıkları ve kullanılan filament miktarları Çizelge 6.2 ve Şekil 6.17’de sunulmuştur. Çizelge 6.2 detaylı olarak incelendiğinde örme yönteminden bağımsız olarak, yatay numunelerin üretimi için kullanılan filament miktarının dikey numunelerin üretimi için kullanılan filament oranla %15 daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

Çizelge 6.2. Çekme test numunelerinin fiziksel özellikleri

Örme yöntemi_baskı yönü	Numune Ağırlığı	Kullanılan Filament Miktarı
Düz çizgili (rectilinear)_yatay	9,9 gr	3,31 m
Düz çizgili (rectilinear)_dikey	8,4 gr	2,83 m
Bal peteği (honeycomb)_yatay	9,8 gr	3,30 m
Bal peteği (honeycomb)_dikey	8,4 gr	2,83 m
Dönel çizgili (gyroid)_yatay	9,9 gr	3,32 m
Dönel çizgili (gyroid)_dikey	8,1 gr	2,38 m



Şekil 6.17. Çekme test numunelerinin fiziksel özellikleri

Topoloji optimizasyonu yapılan parçaların örme yöntemleri ve baskı yönlerine göre üretim süreleri ve kullanılan filament miktarları İdeamaker programına tarafından tahmini olarak Çizelge 6.3’de sunulmuştur. Çizelge 6.3 detaylı olarak incelendiğinde, yatay numunelerin üretilirken destek malzemesinin daha fazla atılması ihtiyacından dolayı dikey numunelere oranla yaklaşık %20 daha fazla filament kullanıldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca yatay numunelerin üretim sürelerinin dikey numunelere oranla yaklaşık %25 daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

Çizelge 6.3. Statik test numunelerinin fiziksel özellikleri

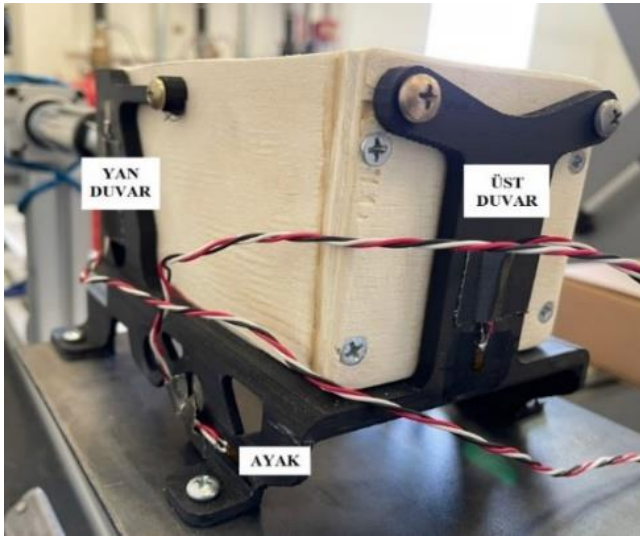
Örme yöntemi_baskı yönü	Basılma Süresi	Malzeme Miktarı	Malzeme Miktarı
Düz çizgili (rectilinear)_dikey	10 s 13 dk	78,1 gr	26,1 m
Bal peteği (honeycomb)_dikey	10 s 28 dk	76,6 gr	26,7 m
Dönel çizgili (gyroid)_dikey	10 s 05 dk	76,5 gr	25,6 m
Düz çizgili (rectilinear)_yatay	13 s 51 dk	94,7 gr	31,7 m
Bal peteği (honeycomb)_yatay	13 s 57 dk	94,5 gr	31,7 m
Dönel çizgili (gyroid)_yatay	13 s 51 dk	94,4 gr	31,6 m

6.7. Statik Test Deneyi Sonuçları

Statik test düzeneği kurulmuş ve data toplama denemeleri yapıldıktan sonra; sırasıyla dönel çizgili (gyroid) yatay test numunesi, dönel çizgili (gyroid) dikey test numunesi ve düz çizgili (rectilinear) yatay test numunesi statik testlere tabi tutulmuştur. Testler de girdi olarak 1 mm sabit hızda hareket verilmiş ve oluşan deformasyona bağlı olarak gerinim ölçerinde (strain

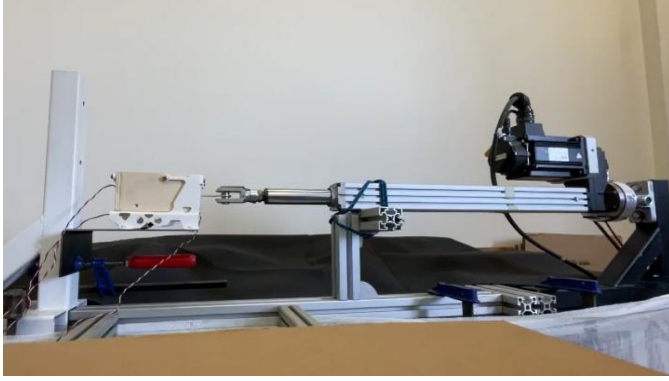
gaugelerde) oluşan değerler ve deformasyona karşılık gelen kuvvet değeri ölçülmüştür. Gerçekleştirilen üç adet test Resim 6.5 – Resim 6.11’de sunulmuştur. Kırılma yüzeyleri bakımından numuneler incelendiğinde, topoloji optimizasyonuna tabi tutulan yekpare parça dönel çizgili (gyroid) ve düz çizgili (rectilinear) yatay numunelerde ayak bölümünden kırılmıştır (Resim 6.6 (b) ve Resim 6.10 (b)). Üç numune arasında en dayanımlı yapının ise dönel çizgili (gyroid) dikey olarak üretilen test numunesi olduğu görsel sonuçlardan anlaşılmaktadır.

Test edilen üç numunede bulunan gerinim ölçerler Resim 6.5 de belirtildiği üzere “üst duvar”, “yan duvar” ve “ayak” olarak isimlendirilmiştir. Böylece aynı lokasyonlara yerleştirilen gerinim ölçerler için kıyaslamaların rahat bir şekilde yapılması amaçlanmıştır.

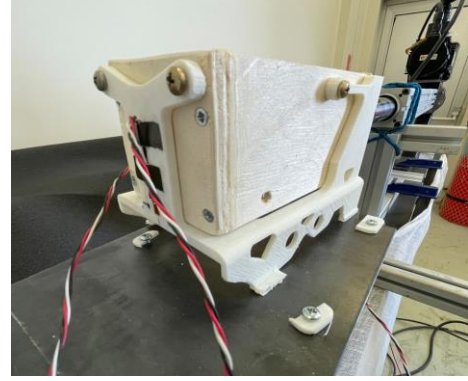


Resim 6.5. Statik test numuneler üzerindeki gerinim ölçerlerin markalanması

Dönel çizgili (gyroid) yatay numune statik test düzeneğinde testlere tabi tutularak (Resim 6.6(a)) 1 mm olacak şekilde sabit hızla çekilmiş ve kuvvetölçerde (loadcellde) oluşan kuvvetler ile birlikte gerinim ölçerlerde oluşan değerler gerçek zamanlı olarak kayıt altına alınmıştır. Testin sonucunda numune ayak kısmından kırıldığı Resim 6.6(b) gözükmemektedir. Resim 6.7’de ise 5:1 ölçekle büyütülmüş halde kırılan yüzey sunulmuştur.

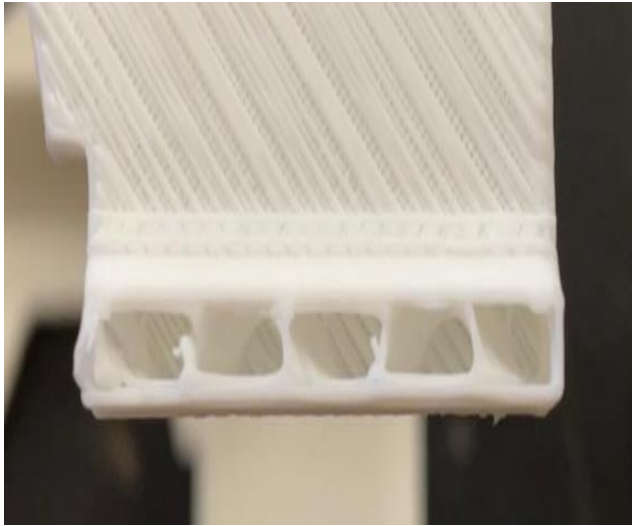
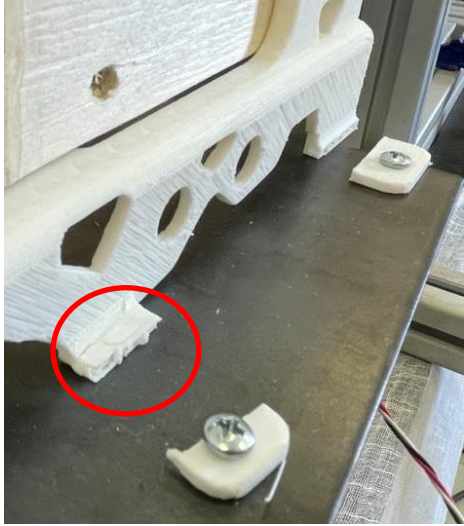


(a)



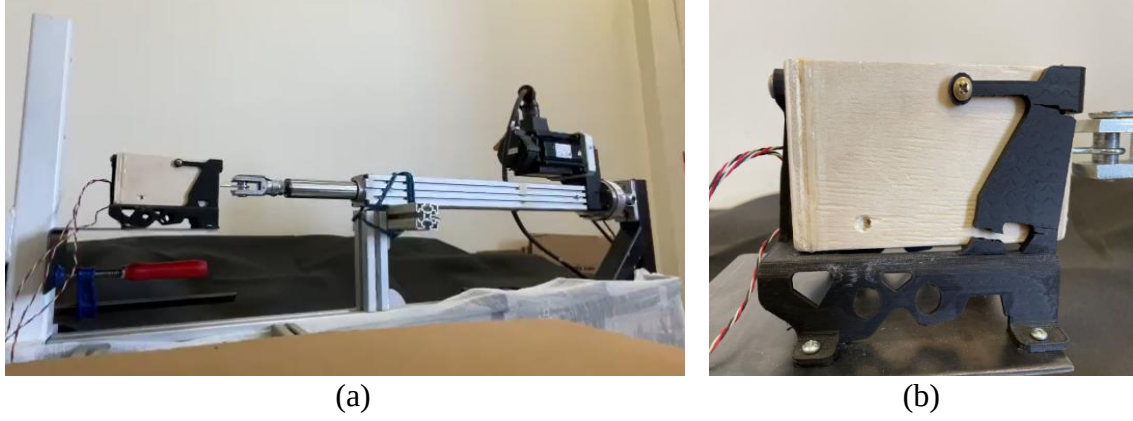
(b)

Resim 6.6. Gyroid yatay test numunesinin statik test düzeneği (a), gyroid yatay test numunesinin son hali (b)



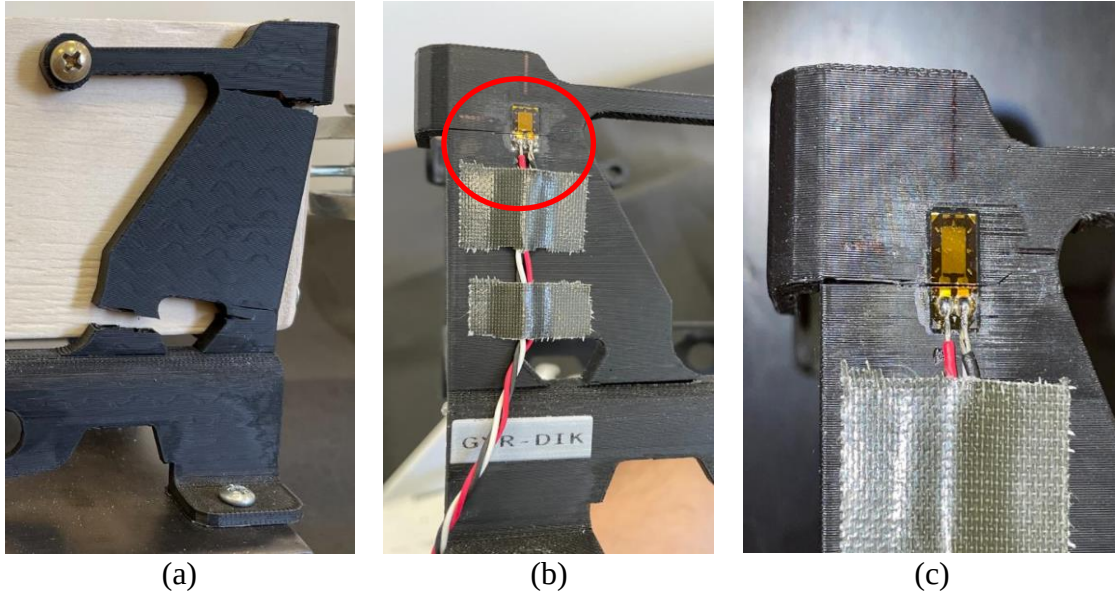
Resim 6.7. Gyroid yatay test numunesinin kırılma yüzeyinin yakın çekimleri

Dönel çizgili (gyroid) dikey numune statik test düzeneğinde testlere tabi tutularak (Resim 6.8(a)) 1 mm olacak şekilde sabit hızla çekilmiş ve kuvvetölçerde (loadcellde) oluşan kuvvetler ile birlikte gernim ölçerlerde oluşan değerler gerçek zamanlı olarak kayıt altına alınmıştır. Testin sonucunda numune yan duvar kısmından kırıldığı Resim 6.8(b)'de açıkça görülmektedir.



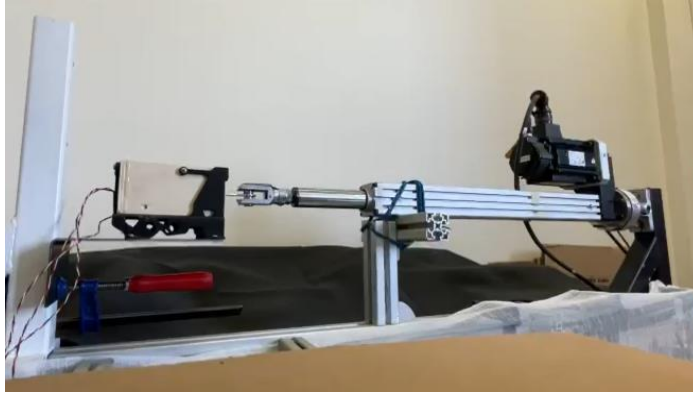
Resim 6.8. Gyroid dikey test numunesinin statik test düzeneği (a), gyroid dikey test numunesinin son hali (b)

Resim 6.9 detaylı olarak incelendiğinde, gyroid dikey numunede gerinim ölçer mevcut olan yerden çatladığı açıkça gözükmemektedir.

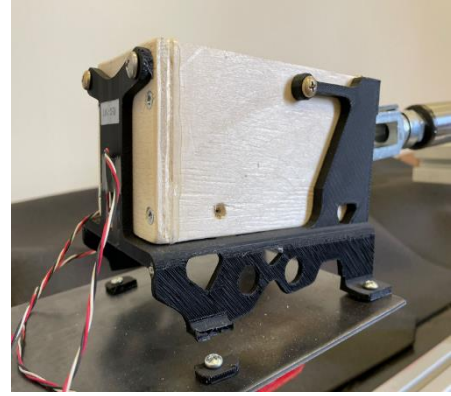


Resim 6.9. Gyroid dikey test numunesinin kırılma yüzeyinin yakın çekimi test anı (a), test sonrası (b), kırılan yüzeyin 5:1 ölçek ile yakın çekimi (c)

Düz çizgili (rectilinear) yatay numune statik test düzeneğinde testlere tabi tutularak (Resim 6.10(a)) 1 mm olacak şekilde sabit hızla çekilmiş ve kuvvet ölçer (loadcellde) oluşan kuvvetler ile birlikte gerinim ölçerlerde oluşan değerler gerçek zamanlı olarak kayıt altına alınmıştır. Testin sonucunda numune ayak kısmından kırıldığı Resim 6.10(b) ve Resim 6.11'de açıkça gözükmemektedir.



(a)



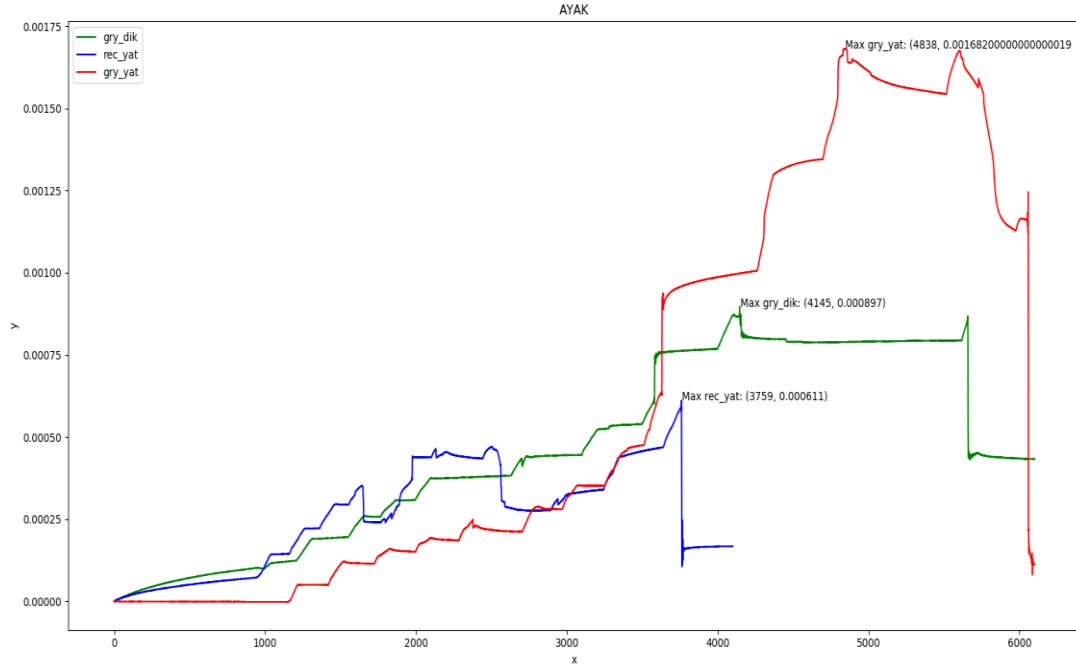
(b)

Resim 6.10. Rectilinear yatay test numunenin statik test düzeneği (a), rectilinear yatay test numunesinin son hali (b)



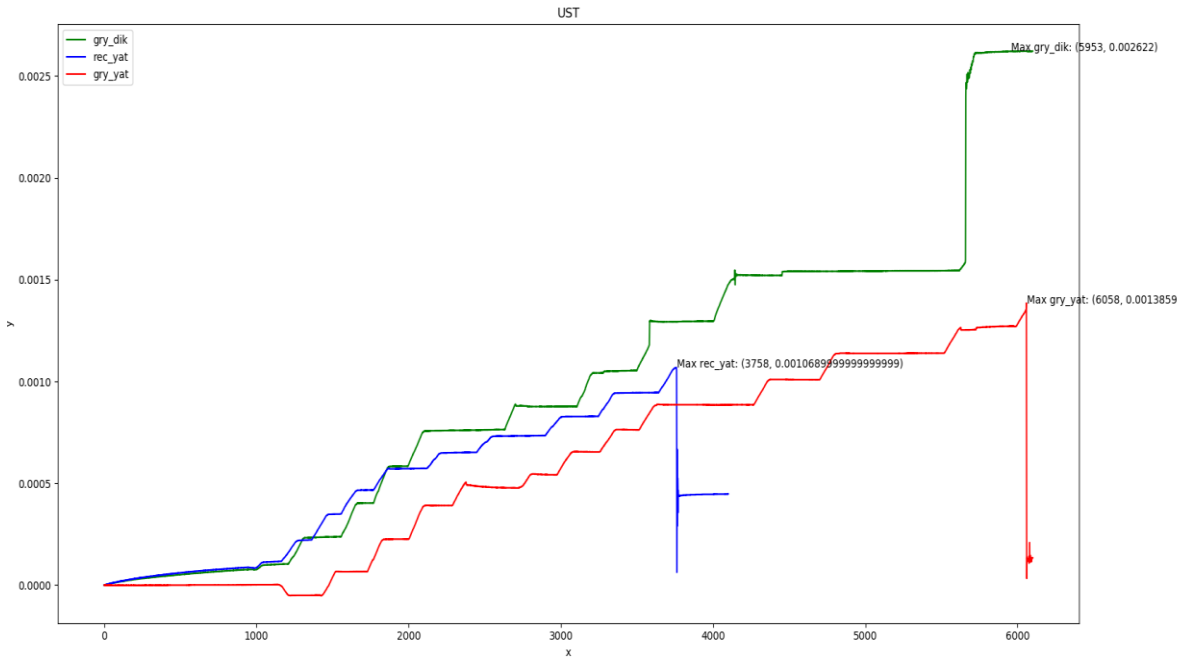
Resim 6.11. Rectilinear yatay test numunesinin kırılma yüzeyinin yakın çekimi

Test esnasında her numune için toplanan gerinim ölçer (strain gauge) verileri aşağıda grafikler halinde sunulmuştur (Şekil 6.18 – Şekil 6.22). Ayak bölgesi yatay (x) yönlü gerinim ölçer verileri incelendiğinde en yüksek değerin dönel çizgili yatay numuneye, en düşük değerin ise düz çizgili (rectilinear) yatay numuneye ait olduğu gözlemlenmiştir.



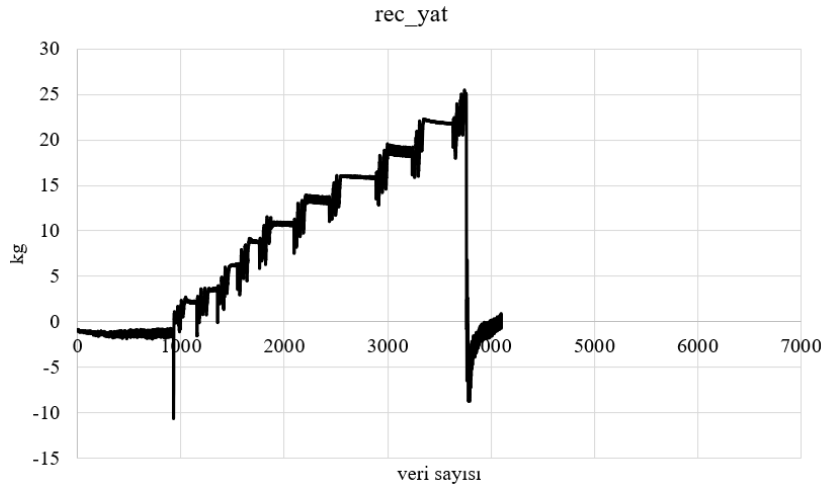
Şekil 6.18. Her bir numune için ayak bölgesi yatay (x) yönlü gerinim ölçer verisi

Üst duvar bölgesi dikey (y) yönlü gerinim ölçer verileri incelendiğinde en yüksek değerin dönel çizgili (gyroid) dikey numuneye, en düşük değerin ise düz çizgili (rectilinear) yatay numuneye ait olduğu gözlemlenmiştir.

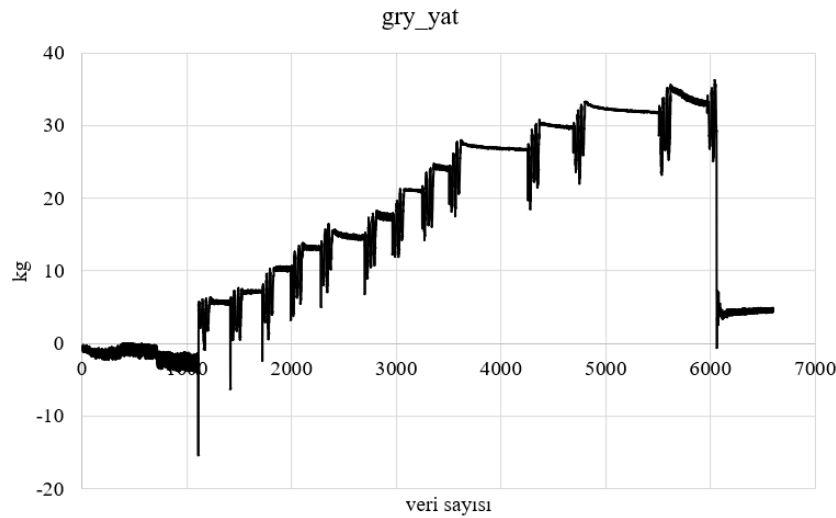


Şekil 6.19. Her bir numune için üst duvar bölgesi dikey (y) yönlü gerinim ölçer verisi

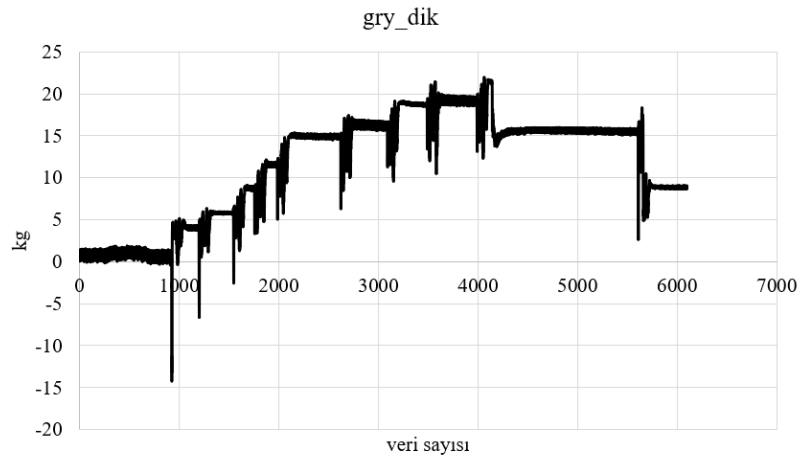
Test esnasında her numune için toplanan gerinim kuvvetölçer (loadcell) verileri aşağıda grafikler halinde sunulmuştur (Şekil 6.20 – 6.25). Her bir basamak 1 mm çekme değerine karşılık gelmektedir. Grafikler detaylı olarak incelendiğinde en yüksek uzamaya izin veren 12 mm ile dönel çizgili (gyroid) yatay test numunesidir. Bu uzama değerini sırasıyla 10 mm ile dönel çizgili (gyroid) dikey test numunesi ve 9 mm ile düz çizgili (rectilinear) yatay test numunesi takip etmiştir. En yüksek kuvvete dayanan test numunesi ise yaklaşık 35 kg değeri ile ölçülen dönel çizgili (gyroid) yatay test numunesidir (Şekil 6.21). Bu yük değerini sırasıyla 25 kg ile düz çizgili (rectilinear) yatay test numunesi (Şekil 6.20) ve 22 kg ile dönel çizgili (gyroid) dikey test numunesi takip etmiştir (Şekil 6.22).



Şekil 6.20. Düz çizgili (rectilinear) yatay numune için kuvvet ölçer (loadcell) verisi



Şekil 6.21. Dönel çizgili (gyroid) yatay numune için kuvvet ölçer (loadcell) verisi



Şekil 6.22. Dönel çizgili (gyroid) dikey numune için kuvvet ölçer (loadcell) verisi

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada, montajdan oluşan havacılık parçasına topoloji optimizasyonu yapılmış ve parça yekpare olacak şekilde 3 boyutlu yazıcıda PLA malzemeden üretilmiştir. Malzeme dayanımına etki eden ve üretim parametresi olan örme yöntemi ve baskı yönlerini belirlemek için 24 adet çekme test numunesi aynı doluluk oranlarında üç farklı örme yöntemi ve farklı basım yönlerinde üretilmiş ve çekme testlerine tabi tutulmuştur. Çalışmanın sonuçları aşağıda kısaca özetlenmiştir;

- Dikey yerleşimli test numunelerinin yatay yerleşimli test numunelerine oranla daha fazla maksimum yüke dayanabildiği gözlemlenmiştir.
- Yatay yerleşimli numuneler kendi içinde sıralandığında en yüksek akma dayanımına, uzama oranına ve deformasyon miktarına düz çizgili numunenin olduğu, maksimum yüke en fazla çekme ve kopma dayanımına ise dönel çizgili numunesinin sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
- Dikey yerleşimli olarak üretilen numunelerde ise en yüksek akma ve çekme dayanımına, en yüksek deformasyon, uzama miktarı ve maksimum yüke dönel çizgili örme yönteminin düz çizgili ve bal peteği örme yöntemine göre daha avantajlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
- Yüzey incelemelerinde ise yatay numunelerinde örme şekillerinin esnemeye daha çok müsaade edecek gözeneklere sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.
- Dikey numunelerde ise gözenek yüzeylerinin sıklığından dolayı malzeme bu yüzeylerden kırılmış ve gevrek kırılmaya benzer bir davranış sergilemiştir.
- Düz çizgili ve bal peteği örme yöntemli yatay numunelerin düz çizgili ve bal peteği örme yöntemli dikey numunelere kıyasla uzama oranlarının daha fazla olduğu ancak dönel çizgili örme yönteminde ise bunun tam tersi olduğu gözlemlenmiştir. Buradaki nedenin dönel çizgili örme yöntemli dikey numunenin yapısından geometrik olarak uzamaya daha fazla izin verdiği düşünülmektedir.
- Kullanılan malzeme miktarının mukavemet dayanımlara etkisinin doğrudan olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.
- İçyapı incelendiğinde ise örme yapısının bağ noktalarına gelen kuvvetin deformasyona belirgin bir şekilde izin verdiği gözlemlenmiştir.

KAYNAKLAR

1. Tofail, S. A., Koumoulos, E. P., Bandyopadhyay, A., Bose, S., O'Donoghue, L., & Charitidis, C. (2018). Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Materials Today*, 21(1), 22-37.
2. Agarwala, M., Bourell, D., Beaman, J., Marcus, H. ve Barlow, J. (1995). Direct selective laser sintering of metals. *Rapid Prototyping Journal*, 1(1), 26-36.
3. Sürmen, H. (2019). Eklemeli imalat (3B baskı): teknolojiler ve uygulamalar, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(2), 373-392.
4. Tümer, M. (2020). *Üç boyutlu yazıcılar ve günümüz mimarisinde kullanımı*. Yüksek Lisans Tezi, Işık Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul, 12-28.
5. Özsoy, K. ve Duman, B. (2017). Eklemeli imalat (3 boyutlu baskı) teknolojilerinin eğitimde kullanılabilirliği. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 1(1), 36-48.
6. Vaezi M. ve Chua C.K. (2011). Effects of layer thickness and binder saturation level parameters on 3D printing process, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 53, 275–284.
7. Mohamed, O., Masood, S. ve Bhowmik, J. (2015). Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects. *Advances in Manufacturing*, 3, 42-53.
8. Casavola C., Cazzato A., Moramarco V. ve Pappalettere C. (2016). Orthotropic mechanical properties of fused deposition modelling parts described by classical laminate theory, *Materials and Design*, 90, 453–458.
9. Rankouhi, B., Javadpour, S., Delfanian, F. ve Letcher, T. (2016). Failure analysis and mechanical characterization of 3D printed ABS with respect to layer thickness and orientation. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 16, 467-481.
10. Tymrak, B., Kreiger, M. ve Pearce, J. (2014). Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions. *Materials & Design*, 58, 242-246.
11. Domingo-Espin, M., Puigoriol-Forcada, J., Garcia-Granada, A., Llumà, J., Borros, S. ve Reyes, G. (2015). Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts. *Materials & Design*, 83, 670-677.
12. İnternet: Topoloji. (2022). URL: <https://zebraproje.com/topoloji-optimizasyonu>. Son Erişim Tarihi: 25.12.22.
13. Elmas, S. (2021). *Üç Boyutlu (3D) Yazıcıda Üretilen Polilaktik Asit (PLA) Numunelerinin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 42-52.

14. Çelik, D. ve Çetinkaya, K. (2016). Üç boyutlu yazıcı tasarımları, prototipleri ve ürün yazdırma karşılaştırmaları. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 5(2), 151-163.
15. Çelik, K. ve Özkan, A. (2017). Eklemeli imalat yöntemleri ile üretim ve onarım uygulamaları. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5, 107-121.
16. Yalçın, B. ve Ergene, B. (2017). Endüstride yeni eğilim olan 3-b eklemeli imalat yöntemi ve metalurjisi. *SDÜ Uluslararası Teknoloji Bilimi Dergisi*, 9(3), 65-88.
17. Enginar H. (2014). *Ağır Taşıt Jantının Topoloji Optimizasyonu Yardımıyla Optimum Tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 18-34.
18. Mete, E. (2022). *Topoloji Optimizasyonu Kullanılarak Rot Başı Tasarımı, Analizi Ve Doğrulanması*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 27-39.
19. Botsalı, H. (2022). *Design For Additive Manufacturing Of Automotive Components Via Topology Optimization*, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 22-29.
20. Erol, B. (2019). *Uçak Komponentlerinin Bilgisayar Destekli Malzeme Seçimi ve Topoloji Optimizasyonu İle Tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 6-22.
21. Işık, E. (2009). *Topoloji Optimizasyonu Çatallı Flans Uygulaması*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 1-23.
22. Koç, H. (2022). *Üç Boyutlu Yazıcılarda Kullanılmak Üzere Geri Dönüştürülmüş Pla Filamentle Basılan Parçaların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, , Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 23-30.
23. Öztürk, B. (2020). *3 Boyutlu Yazıcı İle Üretilen Sandviç Yapıların Statik Ve Dinamik Yük Altında Davranışlarının İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 23-38.
24. Efe, S. (2020). *FDM Tipi 3 Boyutlu Yazıcılardaki Örgü Parametrelerinin Ürün Dayanımına Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 32-44.
25. Tatlı, O. (2020). *Üç Boyutlu Yazıcı Tasarımı, İmalatı Ve Dolgu Geometrisinin Mekanik Özelliklere Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 10-20.
26. Çelik, E. (2019). *3 Boyutlu Yazıcı Kullanılarak Üretilen Bal Peteği Sandviç Kompozitlerin Mekanik Performanslarının Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 6-13.

27. Bayraktar, Ö., Uzun, G. Çakıroğlu, R. ve Guldaz, A. (2017). Experimental study on the 3D-printed plastic parts and predicting the mechanical properties using artificial neural networks. *Polymers for Advanced Technologies*, 28(8), 1044-1051.
28. Özdemir, M. A., Evlen, H., & Çalışkan, A. (2016). *Doluluk oranının PLA ve PET malzemelerin mekanik özellikleri üzerine etkisi*. 3B Baskı Teknolojileri Uluslararası Sempozyumu, İstanbul.
29. Polat, N. ve Nergizhan, A. (2021). Eklemeli imalat ile üretilen PLA parçaların yapıştırılmasında yapıştırma parametrelerinin mekanik dayanımına etkisinin incelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 1-1.
30. Günay, M., Gündüz, S., Yılmaz, H., Yaşar, N. ve Kaçar, R. (2020). PLA esaslı numunelerde çekme dayanımı için 3D baskı işlem parametrelerinin optimizasyonu. *Politeknik Dergisi*, 23(1), 73-79.
31. Evlen, H., Özdemir, M. ve Çalışkan, A. (2019). Doluluk oranlarının PLA ve PET malzemelerin mekanik özellikleri üzerine etkileri. *Politeknik Dergisi*, 22(4), 1031-1037.
32. Ferreira R., Amatte I., Dutra T. ve Bürger D. (2017). Experimental characterization and micrography of 3d printed pla and pla reinforced with short carbon fibers, *Composites Part B: Engineering*, 124, 88-100.
33. Kim H. Kim D., Lee J. ve Park K. (2017) Improvement of mechanical properties and surface finish of 3d-printed polylactic acid parts by constrained remelting, *Advanced Materials Letters*, 8(12), 1199-1203.
34. Chacóna J., Caminerob M., Plaza E. ve Núñez P. (2017) Additive manufacturing of pla structures using fused deposition modelling: effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection, *Materials & Design*, 2017, 124, 143-157.
35. Ahrabi A., Bilici İ., Bilgesu A. (2012). Pet Atıkları Kullanılarak Kompozit Malzeme Üretiminin Araştırılması, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27, 467-471.
36. Reddy M., Vivekanandhan S., Misraa M., Bhatia S.K. ve Mohantya A.K. (2013). Biobased plastics and bionanocomposites: Current status and future opportunities”, *Progress in Polym. Sci.*, 38:1653–1689.
37. Armentano I., Bitinis N., Fortunati E., Mattioli S., Rescignano N., Verdejo R., Manchado M.A.L. ve Kenny J.M. (2013) Multifunctional nanostructured PLA materials for packaging and tissue engineering, *Progress in Polymer Science*, 38:1720–1747.
38. Raquez J.M., Habibi Y., Murariu M. ve Dubois P. (2013). Polylactide (PLA)-based nanocomposites, *Progress in Polymer Science*, 38:1504–1542.
39. Başcı, Ü. G., ve Yamanoglu, R. (2021). Yeni nesil üretim teknolojisi: FDM ile eklemeli imalat. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 5(2), 339-352.

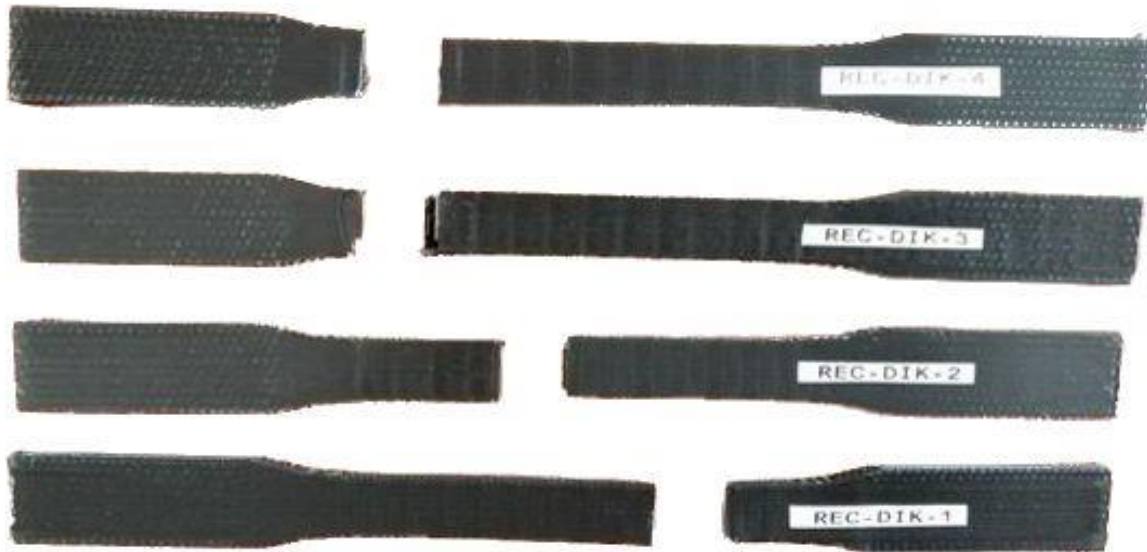
40. İnternet: FDM Teknolojisi. (2022). Novatek. URL: <https://novatek3d.com/fdm-teknolojisi-nedir>, Son Erişim Tarihi: 10.02.2023.
41. Tian, X., Liu, T., Yang, C., Wang, Q., ve Li, D. (2016). Interface and performance of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 88, 198-205.
42. Smith, M.L., Jones F.X.J. (2018). Dual-extrusion 3D printing of anatomical models for education", *Anatomical Sciences Education*, 11(1), 65-72.
43. Liu, S., Li, Q., Liu, J., Chen, W., & Zhang, Y. (2018). A realization method for transforming a topology optimization design into additive manufacturing structures. *Engineering*, 4(2), 277-285.
44. Özkal, F. M., & Uysal, H. (2010). Üç boyutlu konsol kirişlerde topoloji optimizasyonu uygulamaları. *International Journal of Engineering Research and Development*, 2(1), 54-57.
45. Thummar, R. (2014) *Truss Topology Optimization Using Modified Genetic Algorithm*, *Master of Technology in Machine Design*, Department of Mechanical Engineering School of Engineering, RK University, Rajkot, 8-15
46. Luh, G. C., Lin, C. Y., & Lin, Y. S. (2011). A binary particle swarm optimization for continuum structural topology optimization. *Applied Soft Computing*, 11(2), 2833-2844.
47. Cheng, L., Liu, J., Liang, X., & To, A. C. (2018). Coupling lattice structure topology optimization with design-dependent feature evolution for additive manufactured heat conduction design. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 332, 408-439.
48. İnternet: Okudan, A. (Eylül, 2018) Topoloji optimizasyonu. URL: <https://tr.linkedin.com/pulse/topolojioptimizasyonu-101-ahmet-okudan>, Son Erişim Tarihi: 12.02.2023.
49. İnternet: Raise 3D Printer Products. URL: <https://www.raise3d.com/products/pro2-plus-3d-printer>, Son Erişim Tarihi: 12.02.2023.
50. İnternet: Raise 3D PLA Filament. URL: <https://dukkkan.3d3teknoloji.com/raise-3d-premium-pla-filament-siyah-175-mm-pmu332>, Son Erişim Tarihi: 12.01.2023.
51. İnternet: ASTM D638 Standart. URL: <https://www.astm.org/d0638-14.html>, Son Erişim Tarihi: 12.01.23.
52. İnternet: İdeamaker Program. <https://www.raise3d.com/ideamaker>, Son Erişim Tarihi: 12.01.23.
53. Özmen, Ö., Sürmen, H. K., & Sezgin, A. (2023). 3 Boyutlu baskıda dolgu biçiminin çekme dayanımına etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 11(1), 336-348.

EKLER

EK-1. Test edilen çekme testi numuneleri



Resim 1.1. Test edilen rectilinear - yatay numuneler



Resim 1.2. Test edilen rectilinear - dikey numuneler

EK-1. (devam) Test edilen çekme testi numuneleri



Resim 1.3. Test edilen gyroid - yatay numuneler



Resim 1.4. Test edilen gyroid - dikey numuneler

EK-1. (devam) Test edilen çekme testi numuneleri

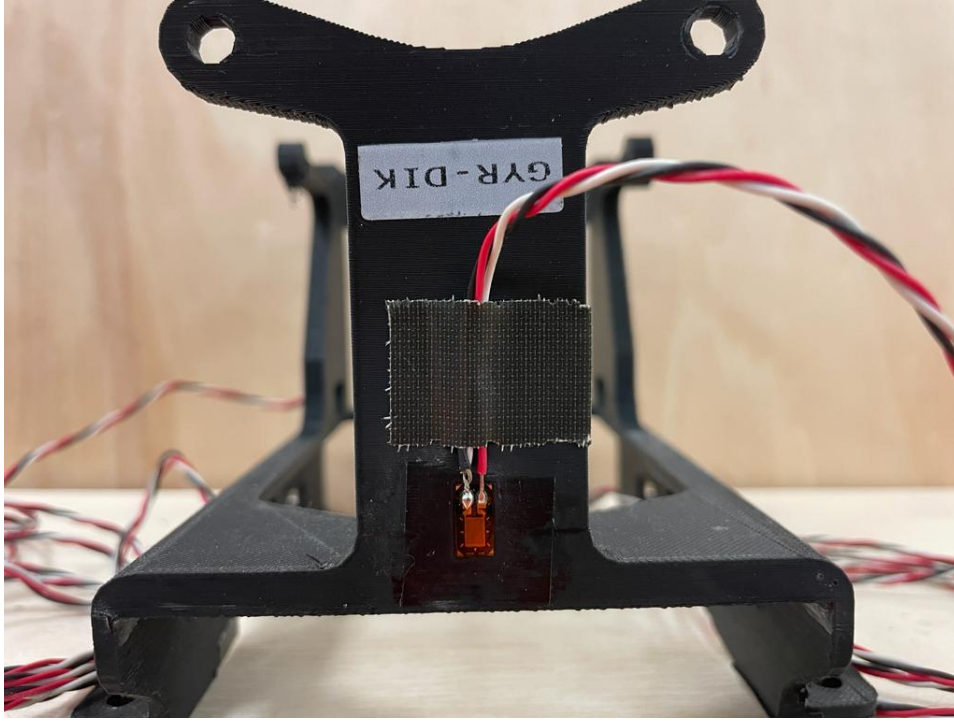


Resim 1.5. Test edilen honeycomb - yatay numuneler

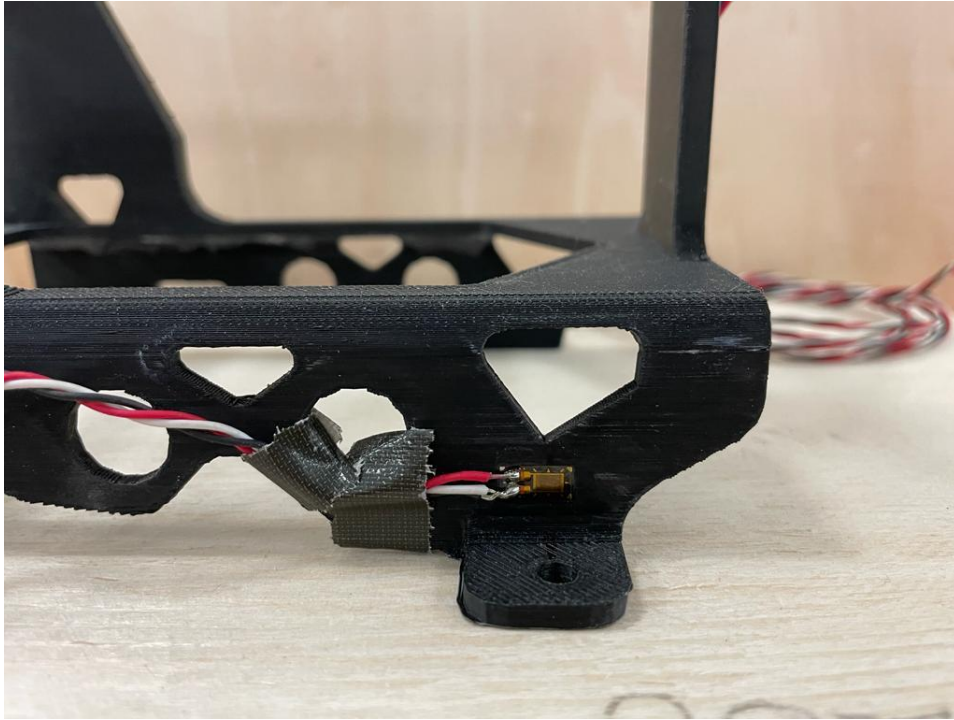


Resim 1.6. Test edilen honeycomb - dikey numuneler

EK – 2. Statik test için üretilen numunelerin yakın çekimleri

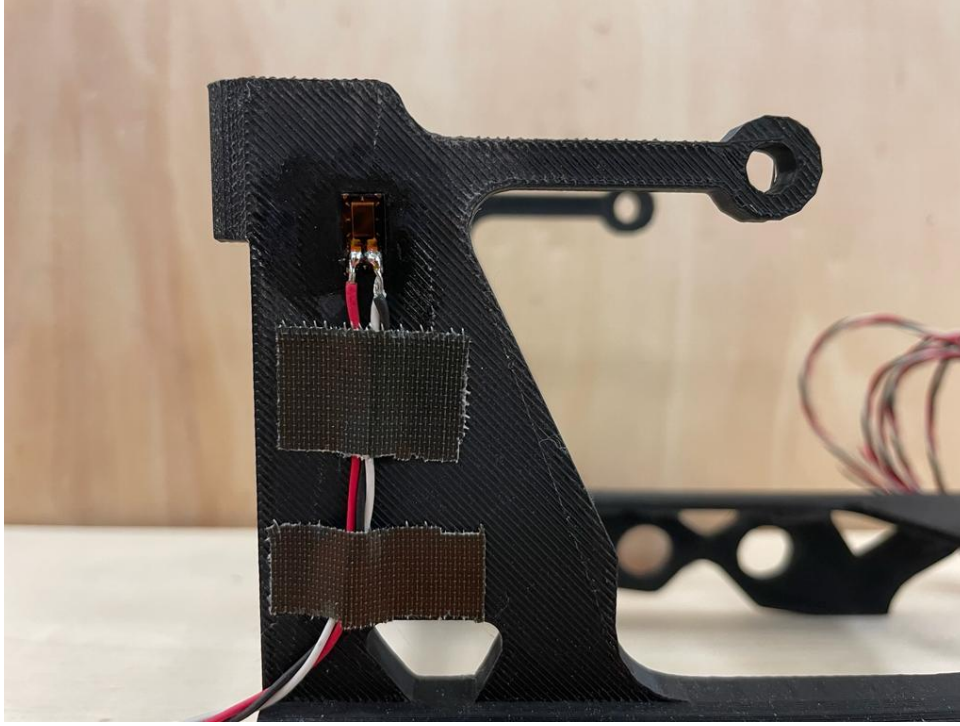


Resim 2.1. Gyroid dikey numune “üst duvar” gerinim ölçer uygulaması

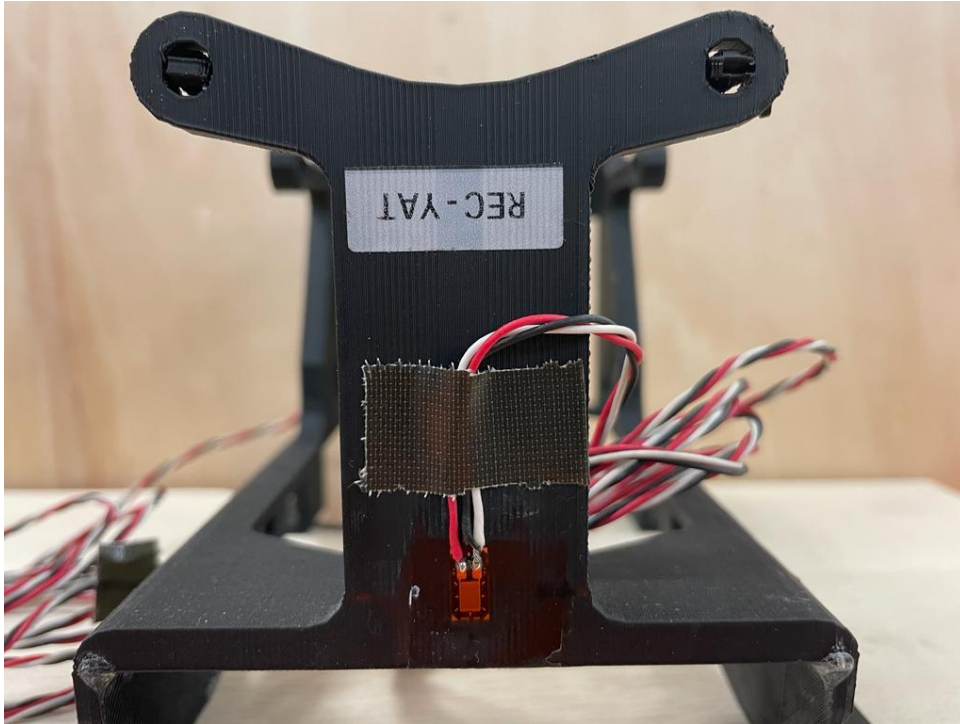


Resim 2.2. Gyroid dikey numune “ayak” gerinim ölçer uygulaması

EK – 2. (devam) Statik test için üretilen numunelerin yakın çekimleri

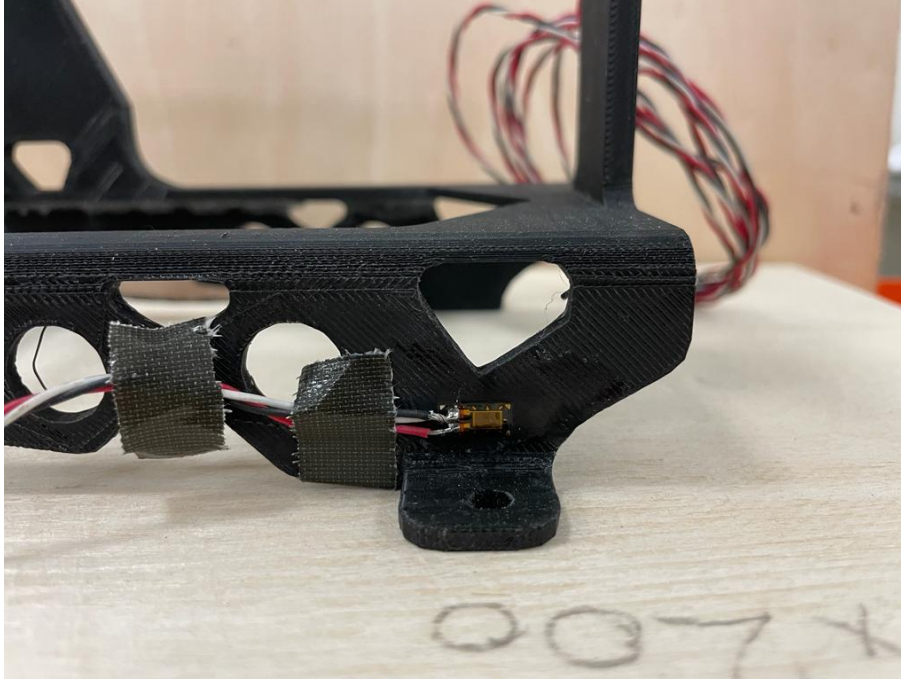


Resim 2.3. Gyroid dikey numune “yan duvar” gerinim ölçer uygulaması

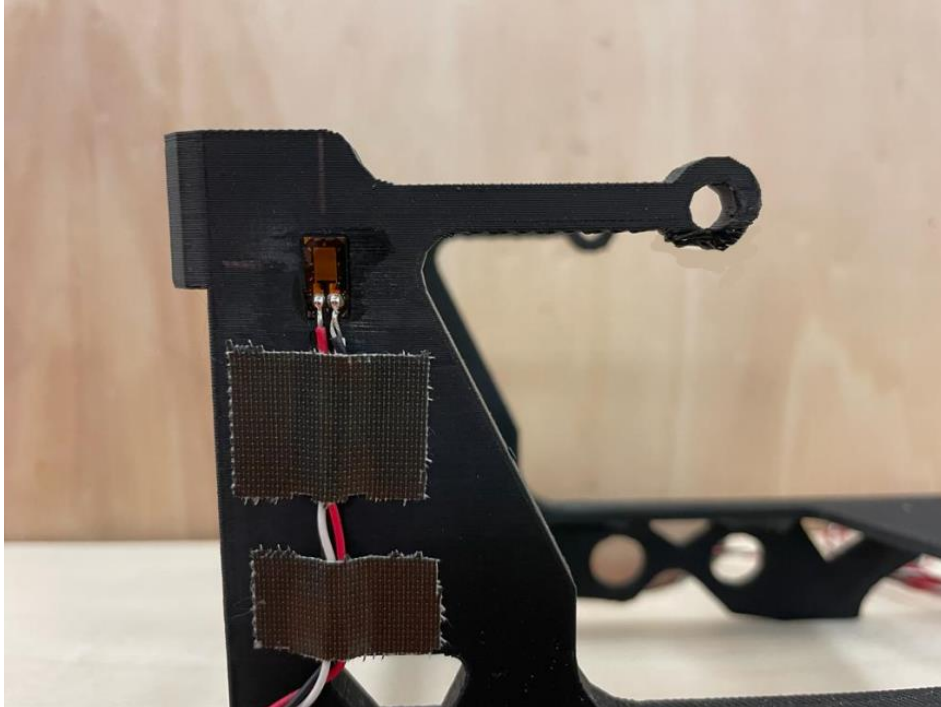


Resim 2.4. Rectilinear yatay numune “üst duvar” gerinim ölçer uygulaması

EK – 2. (devam) Statik test için üretilen numunelerin yakın çekimleri



Resim 2.5. Rectilinear yatay numune “ayak” gerinim ölçer uygulaması



Resim 2.6. Rectilinear yatay numune “yan duvar” gerinim ölçer uygulaması



Gazili olmak ayrıcalıktır