
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİYLE FARKLI TERMOPLASTİK MALZEMELERDEN ÜRETİLEN PARÇALARIN ÇEŞİTLİ AĞ MODELLERİ VE İÇ DOLULUK ORANLARININ DAYANIMA ETKİLERİ

Ilkin SHAHBAZOV

YÜKSEK LİSANS
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NİSAN 2024

ETİK BEYAN

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

- 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 çalışmasında 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.

Ilkin SHAHBAZOV

04/04/2024

EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİYLE FARKLI TERMOPLASTİK MALZEMELERDEN ÜRETİLEN PARÇALARIN ÇEŞİTLİ AĞ MODELLERİ VE İÇ DOLULUK ORANLARININ DAYANIMA ETKİLERİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Ilkin SHAHBAZOV

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Nisan 2024

ÖZET

Mühendislikte kullanılan parçaların en önemli iki özelliği dayanıklı ve hafif olmasıdır. Bu iki kriter, malzeme seçimi ve geometrik yapıyla değişiklik göstermektedir. Plastik malzemelerin çeşitli geometrik şekillerle üretilerek dayanımlarının ve ağırlıklarının optimum değeri bulunabilir. Bu geometrik şekillerin üretimi plastik enjeksiyon, talaşlı imalat yöntemleriyle zorlu olup sadece 3B baskı yöntemleriyle yapılabilmektedir. Mevcut çalışmalarla ilgili literatür araştırması yapılmıştır. Bu tezde hem ideal geometrik baskı şeklinin, hem iç doluluk oranının yapısal dayanıma olan etkileri araştırılmış, hem de hafif ve dayanıklı plastik filament seçiminin sonuçları belirlenmiştir. Tasarımı belirlenen test parçasından 3B FDM yöntemiyle ve PLA+ malzemesi kullanılarak her geometriden üçer adet olacak şekilde ızgara, sekizgen, tam petek, hızlı petek, sinusoid, kübik, doğrusal, üçgen ve jiroskopik iç doluluk geometrileriyle ve %25 iç doluluk oranı, 1 mm nozul ucu çapı ve 210 Co derece sıcaklıkta baskı yapılmıştır. Bu baskı örnekleri tez kapsamında özel olarak tasarlanan cihaz yardımıyla burulma testiyle kırılmış, en iyi doluluk geometrisi üçgen deseni olarak belirlenmiştir. Üçgen geometrisi ile PLA+ malzemeden aynı tasarımlı parça %45, %65 ve %85 iç doluluk oranlarıyla üçer adet üretilip burulma testi tekrar edilmiştir. En iyi iç doluluk oranı %85 olarak belirlenmiştir. Üçgen iç doluluk geometrisi ve %85 iç doluluk oranıyla PLA+, ABS, PETG ve ASA malzemelerinden her birinden iki adet olacak şekilde ISO 527-2 Plastik Çekme Testi, ISO 604-1973 Plastik Basma Testi'ne uygun parçalar tasarlanmış, ilgili testler yapılmıştır. Testler sonucunda denenen malzemelerden en iyi sonuca PLA+ malzemesiyle ulaşılmıştır.

Bilim Kodu	:	91438
Anahtar Kelimeler	:	Plastik malzemeler, 3B FDM baskı, eklemeli imalat, filament, PLA+, ABS, PETG, ASA, iç doluluk oranı, iç doluluk geometrisi, burulma testi, basma testi, çekme testi
Sayfa Adedi	:	239
Danışman	:	Prof. Dr. Abdulmecit GÜLDAŞ

EFFECTS OF VARIOUS MESH MODELS AND INTERNAL FILLING RATIOS ON THE STRENGTH OF PARTS PRODUCED FROM DIFFERENT THERMOPLASTIC MATERIALS BY ADDITIVE MANUFACTURING

(M. Sc. Thesis)

Ilkin SHAHBAZOV

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

April 2024

ABSTRACT

The two most important characteristics of parts used in engineering are durability and light weight. These two criteria vary with material selection and geometric structure. The optimum value of the strength and weight of plastic materials can be found by producing them in various geometric shapes. The production of these geometric shapes is challenging with plastic injection molding and machining methods and can only be done with 3D printing methods. A literature survey was conducted on existing studies. In this thesis, the effects of both the ideal geometric printing shape and the internal filling ratio on structural strength were investigated, and the results of the selection of light and durable plastic filament were determined. The designed test piece was printed using the 3D FDM method and PLA+ material with grid, octagonal, full honeycomb, fast honeycomb, sinusoid, cubic, linear, triangular and gyroscopic internal filling geometries, three of each geometry, with an internal filling ratio of 25%, a nozzle tip diameter of 1 mm and a temperature of 210 degrees Celsius. These print samples were broken by torsion test with the help of the device specially designed within the scope of the thesis, and the best filling geometry was determined as the triangular pattern. With the triangular geometry, three pieces of the same design were produced from PLA+ material with 45%, 65% and 85% internal filling ratios and the torsion test was repeated. The best internal filling ratio was determined as 85%. With a triangular internal filling geometry and 85% internal filling ratio, two pieces of each of PLA+, ABS, PETG and ASA materials were designed in accordance with ISO 527-2 Plastic Tensile Test and ISO 604-1973 Plastic Compression Test, and the relevant tests were carried out. As a result of the tests, the best result among the materials tested was achieved with PLA+ material.

Science Code : 91438

Key Words : Plastic materials, 3D FDM printing, additive manufacturing, filament, PLA+, ABS, PETG, ASA, infill ratio, infill geometry, torsion test, compression test, tensile test

Page Number : 239

Supervisor : Prof. Dr. Abdulmecit GÜLDAŞ

TEŞEKKÜR

Tez süreci kapsamında hem teorik eğitimini hem de pratik açıdan yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen danışmanım Sayın Prof. Dr. Abdulmecit GÜLDAŞ'a teşekkürlerimi sunuyorum. Ayrıca yüksek lisans kapsamında aldığım dersler ve bana kattıklarından dolayı bütün hocalarıma derin saygılarımı iletiyorum.

Tüm yaşamım boyunca emeğini ve sevgisini asla esirgemeyen ve tezi bitirmemde büyük motivasyon kaynağım olan annem Khatira KARIMOVA'ya sonsuz bir içtenlikle teşekkür ediyorum.

Tezimi bitirene kadar beni sürekli motive eden, hem araştırmalarımda hem de yazım ve kontrol sürecinde yardımlarını ve zamanını benden esirgemeyen çok değerli arkadaşım Zeynep Gizem EMİR'e derin teşekkürlerimi sunuyorum.

Bu tez çalışmasında çeşitli test süreçlerini gerçekleştirmeme yardımcı oldukları için Gazi Üniversitesi İmalat Mühendisliği Üretim Laboratuarı ekibine teşekkürlerimi sunuyorum.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xiii

RESİMLERİN LİSTESİ xviii

SİMGELER VE KISALTMALAR xxiv

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 5

3. TEMEL BİLGİLER 37

3.1. FDM Tekniğiyle 3 Boyutlu Baskıda Farklı Kriterlerin Yapısal Dayanıma Etkisi 37

3.1.1. İç doluluk oranının yapısal dayanıma olan etkisi 38

3.1.2. Kullanılan nozul çapının yapısal dayanıma etkisi 43

3.1.3. Nozul sıcaklığının yapısal dayanıma etkisi 47

3.1.4. Tabla sıcaklığının yapısal dayanıma etkisi 49

3.1.5. Baskı hızının ve katman yüksekliğinin yapısal dayanıma etkisi 51

3.1.6. İç doluluk geometrisi türleri ve yapısal dayanıma etkisi 58

3.1.7. Üç boyutlu FDM baskı yöntemine uygun malzeme türleri 64

4. MATERYAL VE METOT 69

Sayfa

4.1. Burulma Testi İçin Tasarım ve Kurulum 69

4.1.1. Burulma testi için düzenek kurulumu 70

4.1.2. Grid (ızgara) iç doluluk geometrisiyle baskı 90

4.1.3. Octahedral (sekizgen) iç doluluk geometrisiyle baskı 91

4.1.4. Full honeycomb (tam petek) iç doluluk geometrisiyle baskı 92

4.1.5. Fast honeycomb (hızlı petek) iç doluluk geometrisiyle baskı 94

4.1.6. Sinusoid iç doluluk geometrisiyle baskı 96

4.1.7. Cubic (kübik) iç doluluk geometrisiyle baskı 98

4.1.8 Rectilinear (doğrusal) iç doluluk geometrisiyle baskı 99

4.1.9. Triangular (üçgen) iç doluluk geometrisiyle baskı 101

4.1.10. Gyroid (jiroskopik) iç doluluk geometrisiyle baskı 102

4.2. Çekme Testi İçin Tasarım ve Kurulum 104

4.2.1. PLA malzemesi ile çekme testi için test parçası üretimi 108

4.2.2. PETG malzemesi ile çekme testi için test parçası üretimi 109

4.2.3. ABS malzemesi ile çekme testi için test parçası üretimi 110

4.2.4. ASA malzemesi ile çekme testi için test parçası üretimi 110

4.2.5. Çekme testi için düzenek kurulumu 111

4.3. Basma Testi İçin Tasarım ve Kurulum 112

4.3.1. PLA+ malzemesi ile basma testi için parça üretimi 114

4.3.2. PETG malzemesi ile basma testi için test parçası üretimi 116

4.2.3. ABS malzemesi ile çekme testi için test parçası üretimi 117

Sayfa

4.2.4. ASA malzemesi ile çekme testi için test parçası üretimi 118

4.2.5. Basma testi için düzenek kurulumu 119

5. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA 121

5.1. Burulma Testi Sonuçları 121

5.1.1. Burulma testi ile iç doluluk geometrisinin belirlenmesi 121

5.1.2. Burulma testi ile iç doluluk oranının belirlenmesi 182

5.2. Çekme Testi Sonuçları 205

5.2.1. PLA+ malzemesiyle üretilen parçanın çekme testi 205

5.2.2. PETG malzemesiyle üretilen parçanın çekme testi 207

5.2.3. ABS malzemesiyle üretilen parçanın çekme testi 209

5.2.4. ASA malzemesiyle üretilen parçanın çekme testi 210

5.3. Basma Testi Sonuçları 212

5.3.1. PLA+ malzemesiyle üretilen parçaların basma testi 212

5.3.2. PETG malzemesiyle üretilen parçaların basma testi 215

5.3.3. ABS malzemesiyle üretilen parçaların basma testi 218

5.3.4. ASA malzemesiyle üretilen parçaların basma testi 221

5.4. Birleşik Gerilme Hesaplaması 224

6. SONUÇ VE ÖNERİLER 225

KAYNAKLAR 235

ÖZGEÇMİŞ 239

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1. Ortalama örnek patlama kuvvetlerinin özeti..... 45

Çizelge 3.2. Üç farklı tabla sıcaklığında FDM 3B baskılı DCB'ler için kırılmadirencinin ortalama ± standart sapması ve karşılık gelen kırılma yükü değerleri. 50

Çizelge 3.3. Girdi parametrelerinin değeri 52

Çizelge 3.4. Sıkıştırma testi ile elde edilen deneysel sonuçlar 53

Çizelge 3.5. Basınç dayanımı için varyans analizi 54

Çizelge 3.6. ESUN PLA+ filament parametreleri 64

Çizelge 3.7. ESUN PETG filament parametreleri 65

Çizelge 3.8. ESUN ABS+ filament parametreleri 66

Çizelge 3.9. ESUN eASA filament parametreleri 67

Çizelge 4.1. Grid (ızgara) iç doluluk geometrisiyle baskı parametreleri..... 91

Çizelge 4.2. Octahedral (sekizgen) iç doluluk geometrisiyle baskı parametreleri 92

Çizelge 4.3. Full honeycomb (tam petek) iç doluluk geometrisiyle baskı parametreleri..... 94

Çizelge 4.4. Fast honeycomb (hızlı petek) iç doluluk geometrisiyle baskı parametreleri..... 96

Çizelge 4.5. Sinusoid iç doluluk geometrisiyle baskı parametreleri..... 98

Çizelge 4.6. Cubic (kübik) iç doluluk geometrisiyle baskı parametreleri 99

Çizelge 4.7. Rectilinear (doğrusal) iç doluluk geometrisiyle baskı parametreleri..... 101

Çizelge 4.8. Triangular (üçgen) iç doluluk geometrisiyle baskı parametreleri..... 102

Çizelge 4.9. Gyroid (jiroskopik) iç doluluk geometrisiyle baskı parametreleri 104

Çizelge 4.10. ISO 527-4 standardı kapsamında tasarım ölçüleri..... 105

Çizelge 4.11. PLA malzemesine uygun baskı parametreleri 108

Çizelge 4.12. PETG malzemesine uygun baskı parametreleri..... 109

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 4.13. ABS malzemesine uygun baskı parametreleri 110

Çizelge 4.14. ASA malzemesine uygun baskı parametreleri 111

Çizelge 4.15. ESUN PLA+ malzemesine uygun baskı parametreleri 114

Çizelge 4.16. PETG malzemesine uygun baskı parametreleri 116

Çizelge 4.17. ABS malzemesine uygun baskı parametreleri 117

Çizelge 4.18. ASA malzemesine uygun baskı parametreleri 118

Çizelge 5.1. Izgara iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında en yüksek tork dayanımları 128

Çizelge 5.2. Sekizgen iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında en yüksek tork dayanımları 135

Çizelge 5.3. Tam petek iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında en yüksek tork dayanımları 142

Çizelge 5.4. Hızlı petek iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında en yüksek tork dayanımları 150

Çizelge 5.5. Sinusoid iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında en yüksek tork dayanımları 156

Çizelge 5.6. Kübik iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında en yüksek tork dayanımları 162

Çizelge 5.7. Doğrusal iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında en yüksek tork dayanımları 169

Çizelge 5.8. Üçgen iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında en yüksek tork dayanımları 175

Çizelge 5.9. Jiroskopik iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında en yüksek tork dayanımları 181

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 5.10. Burulma testinin ilk aşamasında iç doluluk geometrilerinin kırılma değerleri 182

Çizelge 5.11. Triangular (üçgen) iç doluluk geometrisiyle farklı iç doluluk oranlarının baskı parametreleri..... 184

Çizelge 5.12. Üçgen iç doluluk deseniyle ve %45 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında en yüksek tork dayanımları 190

Çizelge 5.13. Üçgen iç doluluk deseniyle ve %65 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında en yüksek tork dayanımları 197

Çizelge 5.14. Üçgen iç doluluk deseniyle ve %85 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında en yüksek tork dayanımları 204

Çizelge 5.15. Burulma testinin ikinci aşamasında iç doluluk oranlarının kopma torku değerleri 204

Çizelge 5.16. PLA+ malzemeden üretilen parçaların çekme testi sonuçları 206

Çizelge 5.17. PETG malzemeden üretilen parçaların çekme testi sonuçları 207

Çizelge 5.18. ABS malzemeden üretilen parçaların çekme testi sonuçları 209

Çizelge 5.19. ASA malzemeden üretilen parçaların çekme testi sonuçları 210

Çizelge 5.20. Çekme testlerinde farklı malzemelerle denenen test parçalarının sonuçlarının ortalaması 212

Çizelge 5.21. PLA+ malzemeden üretilen parçaların basma testi sonuçları..... 212

Çizelge 5.22. PETG malzemeden üretilen parçaların basma testi sonuçları 215

Çizelge 5.23. ABS malzemeden üretilen parçaların basma testi sonuçları..... 218

Çizelge 5.24. ASA malzemeden üretilen parçaların basma testi sonuçları 221

Çizelge 5.25. Basma testlerinde farklı malzemelerle denenen test parçalarının sonuçlarının ortalaması 224

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. İç doluluk geometrisi 6

Şekil 2.2. FEA analizi ve gerilme statik yapısal analiz sonuçları 7

Şekil 2.3. FLM 3B baskılı test numunelerinin belirli mekanik özelliklerini test etmek için özel olarak yapılmış iki ahşap flamentten yapılmış çeşitli geometriler 9

Şekil 2.4. FFF baskının şematik illüstrasyonu 10

Şekil 2.5. %20, %60, %100 dolgulu PLA'nın sıkıştırma gerilme-şekil değiştirme eğrileri..... 11

Şekil 2.6. Polimer malzemeler için FDM sürecinin büzülme modellemesi için analitik çerçeve..... 12

Şekil 2.7. 3B baskılı kübik yapının dört dolgu deseni 13

Şekil 2.8. FE modeli..... 15

Şekil 2.9. Üçlü periyodik minimal yüzeyler ve işlevsel olarak derecelendirilmiş kafes yapılar tasarlandı. Rhino 7 kullanılarak çeşitli hücre geometrilerine göre modellendi ve nihai modeller basıldı 16

Şekil 2.10. Dolgu yoğunluğu varyasyonu çalışmasında RVE 17

Şekil 2.11. MaCh3B numunesi ve farklı kalınlık 21

Şekil 2.12. Nozul çapı 0,4 mm olan basılı bir parçanın çiziminin kesiti 22

Şekil 2.13. Dolgu stabilitesinin tahmini..... 23

Şekil 2.14. Dolgu desenleri 24

Şekil 2.15. Tek eksenli çekme testlerinin simülasyonu, gerilme dağılımı, σ_{xx}, (renkli) incelenen tüm geometrilerde sonuçlanmıştır 28

Şekil 2.16. Kesik iç dolgu yapıları..... 29

Şekil 2.17. FDM eklemenin şematik diyagramı 30

Şekil 2.18. Darbe testi şeması ve düzenleme 31

Şekil 2.19. Dolgu tasarımı ve bunun hafif kabuk yapısına uyarlanması için programlama yapısı 34

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.1. ASTM D638 numunesi 39

Şekil 3.2. Değişken dolgu yapıları için üniversal test makinesinde elde edilen maksimum akma dayanımı ve dolgu oranı 40

Şekil 3.3. ANSYS tezgahında elde edilen maksimum akma dayanımı ve çeşitli dolgu yapıları için dolgu oranı 41

Şekil 3.4 Farklı dolgu yoğunluğu ve desenlerinin kombinasyonunda darbe enerjisi emilimi 43

Şekil 3.5. Mukavemet testleri için tasarlanmış numune 44

Şekil 3.6. Ortalama numune kırma kuvveti (kendi detaylandırması) 46

Şekil 3.7. Nozul sıcaklığının, enjekte edilen numunelere kıyasla basılan numunelerin kopma gerilimi ve genç modülü üzerindeki etkisi 48

Şekil 3.8. Nozul sıcaklığının basılan ve enjekte edilen numunelerin kopma anındaki gerinimine etkisi 48

Şekil 3.9. ASTM D695'e göre sıkıştırma testi numunesi (tüm boyutlar mm cinsindendir) 51

Şekil 3.10. Proses değişkenlerinin basınç dayanımı üzerindeki ana etkisi 54

Şekil 3.11. Baskı hızının (a) %60, (b) %70 ve (c) %80 dolgu yoğunluğunda farklı katman yüksekliğinde basınç dayanımı üzerindeki etkisi 56

Şekil 3.12. Doğrusal iç doluluk geometrisi 58

Şekil 3.13. Üçgen iç doluluk geometrisi 60

Şekil 3.14. Bal peteği iç doluluk geometrisi 61

Şekil 3.15. Eşmerkezli iç doluluk geometrisi 62

Şekil 3.16. Schwarz D iç doluluk geometrisi 63

Şekil 4.1. Burulma testi için tasarlanan test parçasının 3 boyutlu izometrik görüntüsü 70

Şekil 4.2. Burulma testi için tasarlanan parçanın ölçüleri (mm) 70

Şekil 4.3. NEMA 17HS8401 step motorunun teknik resim ölçüleri 72

Şekil 4.4. Arduino MEGA 2560 Rev 3 pin şematiği 74

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.5. RepRap Ramps v1.6 kontrol kartının pin şematiği 76

Şekil 4.6. Planet dişli mekanizması tasarımı 82

Şekil 4.7. Burulma testi cihazının Onshape programında yapılan tasarım görüntüsü 82

Şekil 4.8. Simplify V5.0 programının step motor kontrol arayüzü 85

Şekil 4.9. Simplify 3B V5.0 program arayüzünde nozul ayarı 87

Şekil 4.10. Simplify 3B V5.0 program arayüzünde katman ayarı 88

Şekil 4.11. Simplify 3B V5.0 program arayüzünde iç doluluk ayarı 89

Şekil 4.12. Simplify 3B V5.0 program arayüzünde baskı hızı ayarı 90

Şekil 4.13. Simplify 3B V5.0 programında test parçasının grid (ızgara) geometrisi ve %25 dolulukla görüntüsü 91

Şekil 4.14. Simplify 3B V5.0 programında test parçasının octahedral (sekizgen) geometrisi ve %25 dolulukla görüntüsü 92

Şekil 4.15. Simplify 3B V5.0 programında test parçasının full honeycomb (tam petek) geometrisi ve %25 dolulukla görüntüsü 93

Şekil 4.16. Simplify 3B V5.0 programında test parçasının fast honeycomb (hızlı petek) geometrisi ve %25 dolulukla görüntüsü 95

Şekil 4.17. Simplify 3B V5.0 programında test parçasının sinusoid geometrisi ve %25 dolulukla görüntüsü 97

Şekil 4.18. Simplify 3B V5.0 programında test parçasının cubic (kübik) geometrisi ve %25 dolulukla görüntüsü 98

Şekil 4.19. Simplify 3B V5.0 programında test parçasının rectilinear (doğrusal) geometrisi ve %25 dolulukla görüntüsü 100

Şekil 4.20. Simplify 3B V5.0 programında test parçasının triangular (üçgen) geometrisi ve %25 dolulukla görüntüsü 101

Şekil 4.21. Simplify 3B V5.0 programında test parçasının gyroid (jiroskopik) geometrisi ve %25 dolulukla görüntüsü 103

Şekil 4.22. ISO 527-4 standardı kapsamında parçanın teknik resmi 105

Şekil 4.23. Çekme testi için tasarlanan test parçasının teknik resmi (mm) 106

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.24. Çekme testi için tasarlanan test parçasının izometrik görüntüsü..... 106

Şekil 4.25. Simplify 3B V5.0 programında test parçasının triangular (üçgen) geometrisi ve %85 dolulukla görüntüsü..... 108

Şekil 4.26. Basma testinde kullanılan parçanın tasarımı: 113

Şekil 4.27. Simplify 3B V5.0 programında test parçasının triangular (üçgen) geometrisi ve %85 dolulukla görüntüsü..... 114

Şekil 5.1. Izgara iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında dayanımlarının tork-zaman değişim grafiği 128

Şekil 5.2. Sekizgen iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında dayanımlarının tork-zaman değişim grafiği 135

Şekil 5.3. Tam petek iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında dayanımlarının tork-zaman değişim grafiği 142

Şekil 5.4. Hızlı petek iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında dayanımlarının tork-zaman değişim grafiği 149

Şekil 5.5. Sinusoid iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında dayanımlarının tork-zaman değişim grafiği 156

Şekil 5.6. Kübik iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında dayanımlarının tork-zaman değişim grafiği 162

Şekil 5.7. Doğrusal iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında dayanımlarının tork-zaman değişim grafiği 169

Şekil 5.8. Üçgen iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında dayanımlarının tork-zaman değişim grafiği 175

Şekil 5.9. Jiroskopik iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında dayanımlarının tork-zaman değişim grafiği 182

Şekil 5.10. Farklı iç doluluk oranlarıyla Simplify V5.0 programında üçgen iç doluluk deseniyle baskı planı yapılan test parçasının görüntüleri 184

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.11. Üçgen iç doluluk deseniyle ve %45 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında dayanımlarının tork-zaman değişim grafiği 190

Şekil 5.12. Üçgen iç doluluk deseniyle ve %65 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında dayanımlarının tork-zaman değişim grafiği 197

Şekil 5.13 Üçgen iç doluluk deseniyle ve %85 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında dayanımlarının tork-zaman değişim grafiği 204

Şekil 5.14 Burulma testinin ikinci aşamasında kopma torku değerlerinin iç doluluk oranlarına göre değişim grafiği 205

Şekil 5.15. PLA+ malzemesinden üretilen parçaların çekme testi grafiği 207

Şekil 5.16. PETG malzemesinden üretilen parçaların çekme testi grafiği 208

Şekil 5.17. ABS malzemesinden üretilen parçaların çekme testi grafiği 210

Şekil 5.18. ASA malzemesinden üretilen parçaların çekme testi grafiği 211

Şekil 5.19. PLA+ malzemesinden üretilen parçaların basma testi grafiği 213

Şekil 5.20. PETG malzemesinden üretilen parçaların basma testi grafiği 216

Şekil 5.21. ABS malzemesinden üretilen parçaların basma testi grafiği 219

Şekil 5.22. ASA malzemesinden üretilen parçaların basma testi grafiği 222

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 2.1. Test edilen ekartörler 14

Resim 2.2. 3B gözenekli yapıların iç mimarileri 18

Resim 2.3. Örnekler: (a) dolgu yoğunluğu %30, %50 ve %70'e eşitlenerek elde edilen bal peteği benzeri yapı; (b) farklı üretim açısı θp değerleri ve farklı dolgu seviyeleri için gözlemlenen çatlama davranışı (numunelerin boylamasına ekseni dikeydir) 19

Resim 2.4. 3B baskılı numunelerin yüzeyindeki çentik çaplarının %20 dolgu oranında karşılaştırılması 20

Resim 2.5. Örnek test numunelerinin kırılma detayı 25

Resim 2.6. Numunenin biriktirme şekli ile iç şekil 26

Resim 2.7. Çeşitli 3B dolgu tipleri ve boyutlarına sahip 3B baskılı numuneler (solda) ve stereoskopik dijital görüntü korelasyon sistemi ile hidrolik preste silindir sıkıştırma testi kurulumu (sağda) 27

Resim 2.8. Onyx örneklerinde test edilen dolgu geometrileri (dikdörtgen ve üçgen) ve yoğunluklar (%10 ve %70) 33

Resim 2.9. Kullanılan tarama açısı ve yükleme yönünün belirtildiği test sonrası sıkıştırma numuneleri 35

Resim 3.1. Katman sıkıştırma testi numuneleri: 55

Resim 3.2. ESUN PLA+ filament çeşitleri 64

Resim 3.3. ESUN PETG filament 65

Resim 3.4. ESUN ABS+ filament 66

Resim 3.5 ESUN eASA filament 67

Resim 4.1. NEMA 17HS8401 step motorunun izometrik görüntüsü 73

Resim 4.2. Arduino MEGA 2560 Rev3 75

Resim 4.3. RepRap Ramps v1.6 kontrol kartı 77

Resim 4.4. A4988 sürücü kartı 78

Resim 4.5. TS210-1 12V 10A slim güç kaynağı adaptörü 79

Resim **Sayfa**

Resim 4.6. WISRETEC BDA3-135 isimli torkmetre cihazı 80

Resim 4.7. Burulma testi cihazı 83

Resim 4.8. Full honeycomb (tam petek) iç doluluk geometrisiyle baskı sırasında alınan görüntü 94

Resim 4.9. Fast honeycomb (hızlı petek) iç doluluk geometrisiyle baskı sırasında alınan görüntü 96

Resim 4.10. Sinusoid iç doluluk geometrisiyle baskı sırasında alınan görüntü..... 97

Resim 4.11. Cubic (kübik) iç doluluk geometrisiyle baskı sırasında alınan görüntü 99

Resim 4.12. Doğrusal iç doluluk geometrisiyle baskı sırasında alınan görüntü 100

Resim 4.13. Üçgen iç doluluk geometrisiyle baskı sırasında alınan görüntü 102

Resim 4.14. Gyroid (jiroskopik) iç doluluk geometrisiyle baskı sırasında alınan görüntü 104

Resim 4.15. ESUN PLA+ malzemesi ile çekme testi için üretilen test parçaları 109

Resim 4.16. PETG malzemesi ile çekme testi için üretilen test parçaları 110

Resim 4.17. ABS malzemesi ile çekme testi için üretilen test parçaları..... 110

Resim 4.18. ASA malzemesi ile çekme testi için üretilen test parçaları 111

Resim 4.19. "UTEST PROFI X6" cihazının bilgileri 112

Resim 4.20. Çekme cihazına bağlanmaya hazır test parçası 112

Resim 4.21. PLA+ malzemesi ile basma testi için üretilen test parçaları..... 115

Resim 4.22. PETG malzemesi ile basma testi için üretilen test parçaları..... 116

Resim 4.23. ABS malzemesi ile basma testi için üretilen test parçaları..... 118

Resim 4.24. ABS malzemesi ile basma testi için üretilen test parçaları..... 119

Resim 4.25. Basma testinde kullanılan cihazın bilgileri..... 120

Resim 4.26. Basma testinde kullanılan cihaz..... 121

Resim 5.1. Izgara iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ilk test parçasının burulma testi prosedürü..... 122

Resim **Sayfa**

Resim 5.2. Izgara iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ikinci test parçasının burulma testi prosedürü..... 124

Resim 5.3. Izgara iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş üçüncü test parçasının burulma testi prosedürü..... 126

Resim 5.4. Sekizgen iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ilk test parçasının burulma testi prosedürü..... 129

Resim 5.5. Sekizgen iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ikinci test parçasının burulma testi prosedürü..... 131

Resim 5.6. Sekizgen iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş üçüncü test parçasının burulma testi prosedürü..... 133

Resim 5.7. Tam petek iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ilk test parçasının burulma testi prosedürü..... 136

Resim 5.8. Tam petek iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ikinci test parçasının burulma testi prosedürü..... 138

Resim 5.9. Tam petek iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş üçüncü test parçasının burulma testi prosedürü..... 140

Resim 5.10. Hızlı petek iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ilk test parçasının burulma testi prosedürü..... 143

Resim 5.11. Hızlı petek iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ikinci test parçasının burulma testi prosedürü..... 145

Resim 5.12. Hızlı petek iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş üçüncü test parçasının burulma testi prosedürü..... 147

Resim 5.13. Sinusoid iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ilk test parçasının burulma testi prosedürü..... 150

Resim **Sayfa**

Resim 5.14. Sinusoid iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ikinci test parçasının burulma testi prosedürü..... 152

Resim 5.15. Sinusoid iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş üçüncü test parçasının burulma testi prosedürü..... 154

Resim 5.16. Kübik iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ilk test parçasının burulma testi prosedürü..... 157

Resim 5.17. Kübik iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ikinci test parçasının burulma testi prosedürü..... 159

Resim 5.18. Kübik iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş üçüncü test parçasının burulma testi prosedürü..... 160

Resim 5.19. Doğrusal iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ilk test parçasının burulma testi prosedürü..... 163

Resim 5.20. Doğrusal iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ikinci test parçasının burulma testi prosedürü..... 165

Resim 5.21. Doğrusal iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş üçüncü test parçasının burulma testi prosedürü..... 167

Resim 5.22. Üçgen iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ilk test parçasının burulma testi prosedürü..... 170

Resim 5.23. Üçgen iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ikinci test parçasının burulma testi prosedürü..... 171

Resim 5.24. Üçgen iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş üçüncü test parçasının burulma testi prosedürü..... 173

Resim 5.25. Jiroskopik iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ilk test parçasının burulma testi prosedürü..... 176

Resim **Sayfa**

Resim 5.26. Jiroskopik iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ikinci test parçasının burulma testi prosedürü..... 177

Resim 5.27. Jiroskopik iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş üçüncü test parçasının burulma testi prosedürü..... 180

Resim 5.28. Üçgen iç doluluk deseniyle ve %45 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ilk test parçasının burulma testi prosedürü..... 185

Resim 5.29. Üçgen iç doluluk deseniyle ve %45 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ikinci test parçasının burulma testi prosedürü..... 187

Resim 5.30. Üçgen iç doluluk deseniyle ve %45 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş üçüncü test parçasının burulma testi prosedürü..... 188

Resim 5.31. Üçgen iç doluluk deseniyle ve %65 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ilk test parçasının burulma testi prosedürü..... 191

Resim 5.32. Üçgen iç doluluk deseniyle ve %65 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ikinci test parçasının burulma testi prosedürü..... 193

Resim 5.33. Üçgen iç doluluk deseniyle ve %65 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş üçüncü test parçasının burulma testi prosedürü..... 195

Resim 5.34. Üçgen iç doluluk deseniyle ve %85 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ilk test parçasının burulma testi prosedürü..... 198

Resim 5.35. Üçgen iç doluluk deseniyle ve %85 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ikinci test parçasının burulma testi prosedürü..... 200

Resim 5.36. Üçgen iç doluluk deseniyle ve %85 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş üçüncü test parçasının burulma testi prosedürü..... 202

Resim 5.37. PLA+ malzemesinden üretilen parçaların çekme testi 206

Resim 5.38. PETG malzemesinden üretilen parçaların çekme testi 208

Resim **Sayfa**

Resim 5.39. ABS malzemesinden üretilen parçaların çekme testi 209

Resim 5.40. ASA malzemesinden üretilen parçaların çekme testi 211

Resim 5.41. PLA+ malzemesinden üretilen parçaların basma testi 215

Resim 5.42. PETG malzemesinden üretilen parçaların basma testi 218

Resim 5.43. ABS malzemesinden üretilen parçaların basma testi..... 221

Resim 5.44. ASA malzemesinden üretilen test parçalarının basma testi..... 224

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	**Açıklamalar**
μm	Mikrometre
^{o}	Derece
^{o}C	Santigrta derece
cm^3	Santimetre küp
g	Gram
km	Kilometre
MPa	Megapaskal
mm	Millimetre
N	Newton

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
2B	İki boyutlu
3B	Üç boyutlu
ABS	Akrilonitril bütadien stiren
ASA	Acrylonitrile styrene acrylate
FDM	Fused deposition modeling
MJF	Multi jet fusion
PBT	Polybutylene terephthalate
PETG	Polyethylene terephthalate glycol
PLA	Polilaktik asit
PP	Polipropilen
SLA	Stereolithography
SLS	Selective laser sintering

1. GİRİŞ

Gelişen teknoloji ile birlikte, 3B baskı yöntemi giderek daha fazla önem kazanmaktadır. 3B baskı, katmanlar halinde malzemenin bir araya getirilmesiyle nesnelerin üretimini sağlayan yenilikçi bir üretim yöntemidir. Bu yöntem, birçok endüstride çeşitli uygulamalara sahiptir ve son yıllarda özellikle dikkat çekici bir şekilde ilerlemiştir.

3B baskının yaygınlaşmasının birkaç ana sebebi bulunmaktadır:

- Teknolojik ilerlemeler: 3B baskı teknolojisindeki sürekli gelişmeler, daha hızlı, daha hassas ve daha uygun maliyetli baskı süreçlerini mümkün kılmıştır. Bu, daha geniş bir kullanıcı kitlesine ulaşılmasını sağlamıştır.
- Üretim süreçlerindeki dönüşüm: Geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla, 3B baskı daha esnek ve özelleştirilebilir üretim imkanları sunmaktadır. Bu da birçok endüstride yeni uygulamaların keşfedilmesini ve daha verimli üretim süreçlerinin benimsenmesini sağlamıştır.
- Maliyet ve zaman tasarrufu: 3B baskı, prototiplerin hızlı ve maliyet etkin bir şekilde üretilmesine olanak tanır. Bu da ürün geliştirme süreçlerini hızlandırır ve maliyetleri düşürür.
- Kişiselleştirilmiş üretim: 3B baskı, ürünlerin kişiselleştirilmesine olanak tanır. Bu, tüketicilerin isteklerine ve ihtiyaçlarına daha iyi cevap verebilen ürünlerin üretilmesini sağlar. Özellikle sağlık sektörü gibi alanlarda, kişiselleştirilmiş ürünlerin önemi büyüktür.
- Eğitim ve Ar-Ge alanındaki kullanım: 3B baskı, eğitim kurumları ve araştırma-geliştirme faaliyetleri için önemli bir araç haline gelmiştir. Öğrencilerin ve araştırmacıların kavramları daha iyi anlamalarına ve prototipler üretmelerine olanak tanır.

Bu nedenlerle, 3B baskı teknolojisi giderek daha yaygın hale gelmektedir ve birçok endüstride önemli bir rol oynamaktadır. Bu üretim yöntemi tercih edilirken bazı faktörler göz önünde bulundurulmalıdır. 3B baskıda dikkat edilmesi gereken önemli faktörler şunlardır:

- Malzeme seçimi: 3B baskıda kullanılacak malzeme, baskının kalitesi, dayanıklılığı ve işlevselliği üzerinde büyük etkiye sahiptir. Malzeme seçiminde baskı amacı, kullanım koşulları ve istenilen özellikler dikkate alınmalıdır.
- Baskı teknolojisi: Farklı 3B baskı teknolojileri farklı özelliklere sahiptir ve farklı malzemelerle çalışırlar. Baskı teknolojisinin baskı amacına ve gereksinimlere uygunluğu dikkate alınmalıdır.
- Baskı parametreleri: Baskı hızı, katman kalınlığı, doluluk oranı gibi parametreler baskı sonucunu etkiler. Bu parametrelerin doğru bir şekilde ayarlanması, istenen kalite ve doğrulukta bir baskı elde etmek için önemlidir.
- Tasarım doğruluğu: Baskı öncesi tasarımın doğruluğu ve uygunluğu, baskı sonucunu belirleyen önemli bir faktördür. Tasarımın baskı teknolojisine uygun olması ve destek yapılarının doğru bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir.
- Baskı ortamı: Baskı sırasında ortamın sıcaklığı, nem oranı ve temizliği baskı kalitesini etkiler. Optimum baskı koşullarının sağlanması başarılı bir baskı süreci için önemlidir.
- Destek yapıları: Karmaşık geometrili parçaların baskısında destek yapıları kullanılabilir. Bu destek yapılarının doğru bir şekilde belirlenmesi ve temizlenmesi baskı sonucunu etkiler.
- Kalite kontrolü: Baskı sonrası parçaların kalitesinin kontrol edilmesi önemlidir. Ölçüm ve denetim işlemleriyle parçaların doğruluğu, dayanıklılığı ve işlevselliği değerlendirilmelidir.

Bu faktörler, başarılı bir 3B baskı süreci için dikkate alınması gereken önemli unsurlardır. Her bir faktörün doğru bir şekilde ele alınması, istenen kalitede ve doğrulukta bir baskı elde etmek için önemlidir.

3B baskı ile topoloji analizi yapılmış çeşitli karmaşık parçaların basılması mümkündür. Topoloji optimizasyonu, bir parçanın yapısal performansını artırmak ve malzeme kullanımını optimize etmek için uygulanan bir tasarım yöntemidir. Bu analizler, parçaların daha hafif, daha güçlü ve daha işlevsel olmasını sağlamak için kullanılır. Parçalarda topoloji analizi, yapısal mukavemetin artırılması, malzeme kullanımının optimize edilmesi ve ağırlığın azaltılması gibi hedefleri gerçekleştirmek için önemlidir. Topoloji analizinin sağladığı avantajlar şu şekilde sıralanabilir:

- Yapısal performansın artırılması: Topoloji analizi, bir parçanın yapısal performansını artırmak için kullanılır. Bu analiz, parçanın yük taşıma kapasitesini, dayanıklılığını ve sertliğini artırmak için geometrik yapıyı optimize etmeyi sağlar.
- Malzeme kullanımının optimizasyonu: Topoloji analizi, bir parçanın gereksiz malzeme kullanımını belirleyerek optimizasyon sağlar. Bu şekilde, parça ağırlığı azaltılabilir ve üretim maliyetleri düşürülebilir.
- Ağırlığın azaltılması: Topoloji optimizasyonu, parçanın hafifletilmesine olanak tanır. Bu, birçok endüstride, özellikle havacılık ve otomotiv sektörlerinde önemlidir çünkü hafif parçalar yakıt verimliliğini artırır ve performansı iyileştirir.
- Fonksiyonellik ve esneklik: Topoloji analizi, parçanın fonksiyonelliğini ve esnekliğini artırmak için kullanılabilir. Optimize edilmiş geometri, parçanın belirli uygulamalara daha iyi uyum sağlamasını ve daha karmaşık işlevleri yerine getirmesini sağlayabilir.
- Hızlı prototipleme ve üretim: Topoloji analizi, tasarım sürecinin hızlanmasına ve daha verimli prototip üretimine olanak tanır. Bu, ürün geliştirme sürecini hızlandırır ve rekabet avantajı sağlar.

3B baskı, karmaşık geometrili parçaların üretilmesinde son derece esnek bir yöntemdir. Bu teknoloji, katman katman malzeme birleştirme işlemiyle çalışır, bu da çok çeşitli şekillerin ve yapıların üretilmesine olanak tanır. Bu nedenle, 3B baskı ile topoloji analizi yapılmış karmaşık geometrileri olan parçaların basılması oldukça mümkündür.
Topoloji analizi yapılan parçalarda genellikle parçaların doluluk oranı azaltılarak parçanın maruz kaldığı kuvvet ve momentleri sönümleyecek iç doluluk desenleri oluşturulmaya çalışılır. Bu desenlerin karmaşık yapıları sebebiyle kalıp enjeksiyon, CNC işleme veya başka yöntemlerle üretilmesi çok zor veya olanaksızdır.

İç doluluk deseni ve oranı, bir yapıdaki parçaların yapısal dayanıklılığını önemli ölçüde etkileyebilir. Bu etkiler birkaç şekilde ortaya çıkabilir:

- Yük dağılımı: İç doluluk deseni ve oranı, parçanın yükü nasıl dağıttığını belirleyebilir. Doğru iç doluluk düzenlemesi, yükü homojen bir şekilde dağıtarak parçanın dayanıklılığını artırabilir. Ancak yanlış bir iç doluluk deseni veya oranı, yüklerin odaklanmasına veya belirli noktalarda stres konsantrasyonlarına neden olabilir, bu da parçanın kırılma veya çökme riskini artırabilir.

- Malzeme kullanımı: İç doluluk deseni ve oranı, kullanılan malzemenin miktarını ve dağılımını etkiler. Daha düşük iç doluluk oranları, daha az malzeme kullanımını gerektirebilir, bu da maliyeti düşürebilir ancak yapısal dayanıklılığı azaltabilir. Daha yüksek iç doluluk ise daha fazla malzeme kullanımını gerektirebilir ancak daha yüksek dayanıklılık sağlayabilir.
- Stabilite ve deformasyon: İç doluluk deseni ve oranı, parçanın stabilitesini ve deformasyon davranışını etkiler. Doğru iç doluluk düzenlemesi, parçanın istenmeyen şekilde eğilmesini veya bükülmesini önleyebilir. Ancak yanlış bir iç doluluk düzenlemesi, parçanın stabilitesini azaltabilir veya deformasyonunu artırabilir.
- Darbe dayanımı: İç doluluk deseni ve oranı, parçanın darbe dayanımını da etkiler. Doğru iç doluluk düzenlemesi, parçanın darbe veya çarpma etkisine karşı daha dirençli olmasını sağlayabilir. Ancak yanlış bir iç doluluk düzenlemesi, parçanın darbe dayanımını azaltabilir.

Sonuç olarak, iç doluluk deseni ve oranı, parçaların yapısal dayanıklılığını belirleyen önemli faktörlerden biridir. Doğru bir şekilde tasarlanması ve uygulanması, parçaların istenilen performansı sergilemesine yardımcı olabilirken, yanlış bir şekilde uygulanması yapısal zayıflıklara ve performans düşüşüne neden olabilir. Bu nedenle, iç doluluk deseni ve oranı, yapısal tasarım sürecinde dikkatle ele alınmalı ve analiz edilmelidir.

Bu tez çalışması kapsamında 3B baskı teknolojisine ait FDM yöntemiyle üretilen parçalardaki çeşitli iç doluluk deseni ve iç doluluk oranlarının parçaların yapısal dayanımlarını nasıl etkilediğine dair araştırma ve burulma testi çalışmaları yapılmıştır. Uygun iç doluluk oranı ve deseni belirlendikten PLA, PETG, ABS ve ASA malzemeleriyle parçaların tekrar baskısı alınmış, bu parçalara çekme ve basma testi uygulanmıştır. Tezin hedefi doğrultusunda 3B baskı FDM teknolojisinde kullanılabilecek en uygun iç doluluk oranı, deseni ve baskı malzemesi belirlenmiştir. Bu tez alandaki mevcut bilgiyi derinleştirerek ve yeni bilgiler ekleyerek ilerlemeyi amaçlamaktadır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

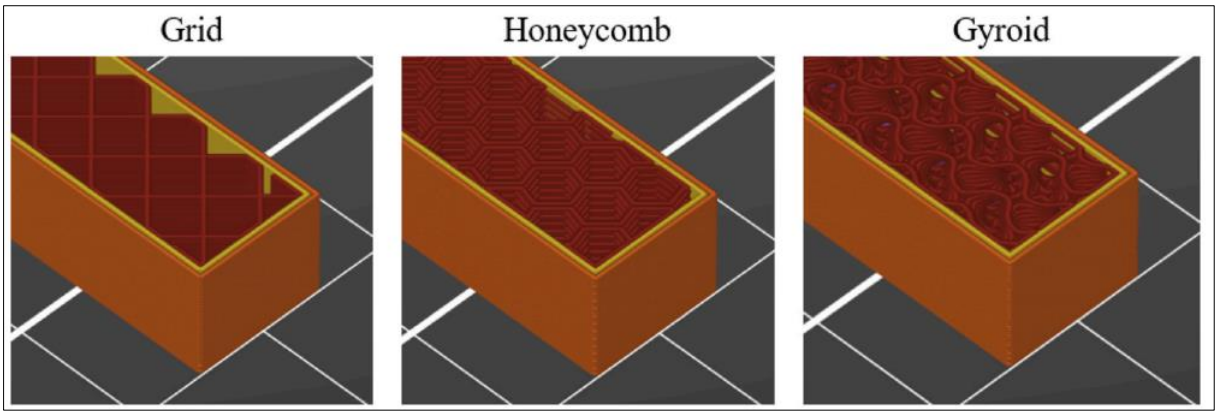
3B baskı teknolojisi, günümüz imalat endüstrisinde önemli bir yer edinmiş ve giderek daha fazla ilgi görmektedir. Özellikle Fused Deposition Modeling (FDM), yaygın bir 3B baskı yöntemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu yöntem, katmanlı imalatın (additive manufacturing) bir alt kategorisi olarak, termoplastik filamentlerin katman katman birleştirilmesiyle nesnelerin üretilmesini sağlar. Ancak, FDM ile üretilen parçaların yapısal dayanımı üzerinde iç doluluk deseni ve iç doluluk oranının etkisi hala netlik kazanmamıştır. Bu tez çalışması, FDM ile üretilen parçaların iç doluluk deseninin ve iç doluluk oranının parçanın yapısal dayanımına olan etkisini araştırmayı amaçlamaktadır. Literatürdeki mevcut bilgilerin analizi, bu etkileri anlamamıza ve 3B baskı teknolojisinin mühendislik uygulamalarındaki potansiyelini daha iyi değerlendirmemize olanak tanıyacaktır. Bu giriş bölümü, FDM teknolojisinin genel bir tanımıyla başlayacak, ardından iç doluluk deseninin ve iç doluluk oranının yapısal dayanım üzerindeki potansiyel etkilerini anlatarak, çalışmanın önemini vurgulayacaktır. Ayrıca, bu çalışmanın yapısal mühendislik alanında olan önemine değinilecek ve literatürdeki boşlukları doldurmayı amaçlayan metodoloji ve analiz yaklaşımları hakkında özet bir bilgi sunulacaktır. Bu tez çalışması, FDM ile üretilen parçaların yapısal dayanımını artırmak için tasarım süreçlerine rehberlik edecek önemli bilgiler sağlayabilir ve 3B baskı teknolojisinin imalat endüstrisindeki rolünü daha da güçlendirebilir.

Literatür araştırması kapsamında incelenecek konular:

- FDM ekli imalatta kullanılan farklı dolgu desenleri
- Dolgu deseni ve dolgu oranının parçanın mekanik özelliklerine etkisi
- FDM ekli imalatta optimum dolgu deseni ve dolgu oranının belirlenmesi
- FDM ile üretilen parçaların yapısal dayanımını optimize etme yöntemleri

Marton Tamas Birosz, Daniel Ledenyak, Matyas Ando'nun (2022) yapmış olduğu "Effect of FDM infill patterns on mechanical properties" başlıklı çalışma, Fused Deposition Modeling (FDM) 3B baskı yöntemi ile üretilen plastik parçaların iç doluluk geometrisinin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmaktadır. Çalışmada, üç farklı iç doluluk geometrisi kullanılmıştır: honeycomb, gyroid ve grid. Ayrıca, parçaların katman yönüne göre değişen

etkileri de değerlendirilmiştir. Çekme, eğilme ve basınç testleri gibi çeşitli mekanik testler kullanılarak, her bir doluluk geometrisinin mekanik özellikleri incelenmiştir. Sonuçlar, farklı doluluk geometrilerinin farklı mekanik özelliklere sahip olduğunu göstermektedir. Honeycomb doluluk geometrisinin en yüksek mukavemet ve en düşük elastik deformasyon modülüne sahip olduğu tespit edilirken, gyroid doluluk geometrisinin en yüksek elastik deformasyon modülüne sahip olduğu bulunmuştur. Grid doluluk geometrisi ise en düşük mukavemete sahip olmuştur. Katman yönü değişikliklerinin ise genellikle mukavemette azalma ve elastik deformasyon modülünde artışa neden olduğu görülmüştür. Şekil 2.1'de grid, honeycomb ve gyroid iç doluluk geometrileri belirtilmiştir.



Şekil 2.1. İç doluluk geometrisi (Birosz, M. T., Ledenyák, D., & Andó, M., 2022)

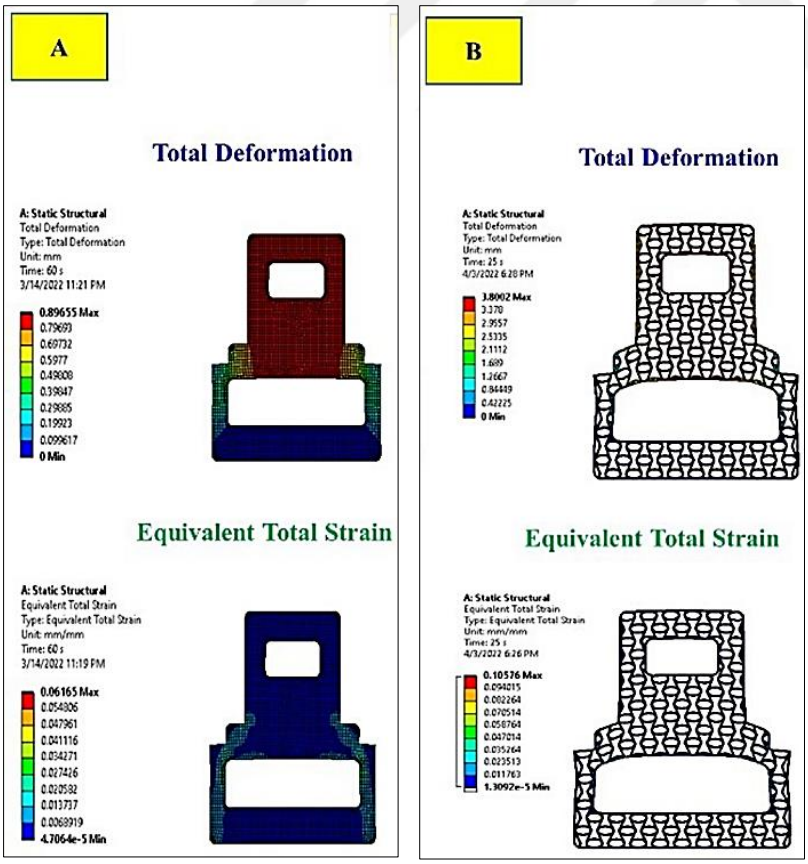
Sonuç olarak, bu çalışma, FDM yöntemi ile üretilen plastik parçaların iç doluluk geometrisinin mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, 3B baskı üretiminde doluluk geometrisinin doğru bir şekilde seçilmesi, parçaların optimize edilmiş mekanik özelliklere sahip olmasını sağlayabilir.

Ibrahim M. Alarifi'nın (2023) yaptığı "Mechanical properties and numerical simulation of FDM 3B printed PETG/carbon composite unit structures" başlıklı makale, 3B yazıcılarda FDM yöntemi kullanarak üretilen PETG/karbon bileşikleri ile yapılan yapıların mekanik özelliklerini ve sayısal simulasyon sonuçlarını değerlendirmektedir. Aşağıda, makalenin ana bulgularına ilişkin özet bilgiler verilmiştir:

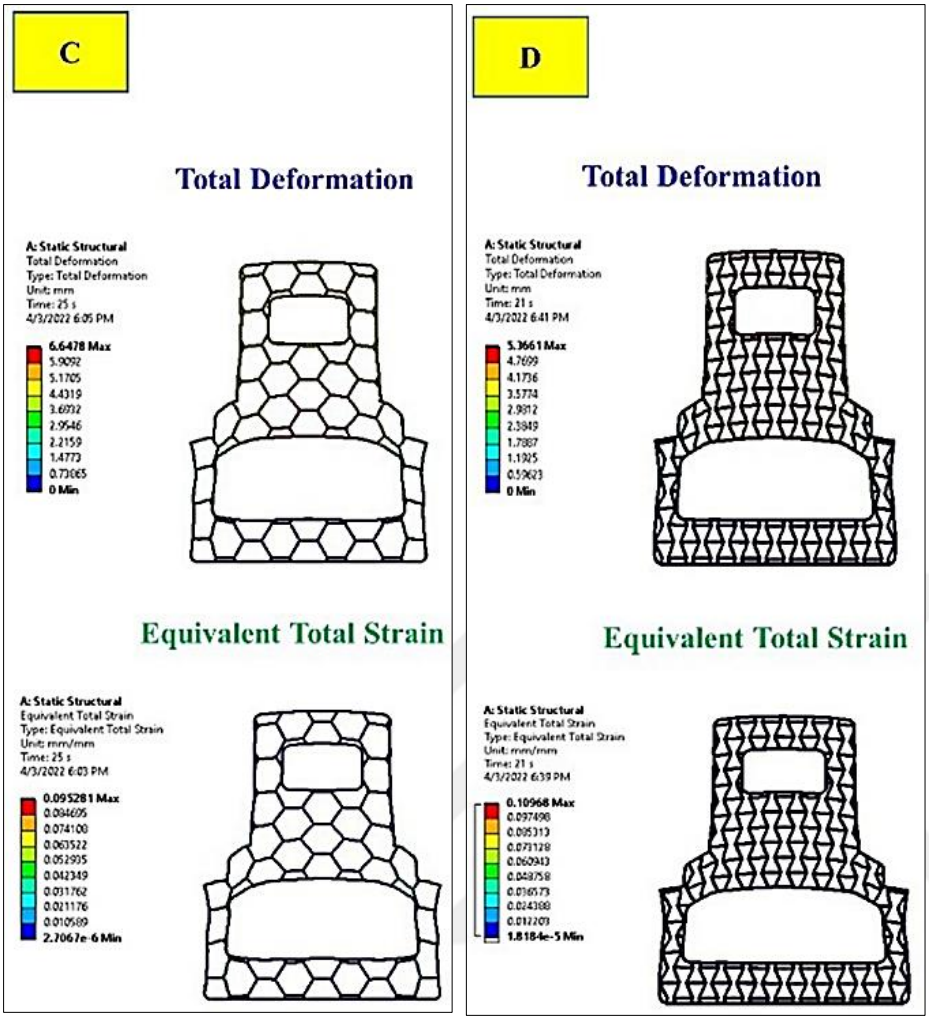
- Çalışmada, PETG/karbon bileşiğinin farklı doluluk oranları ve tabaka yönlendirmeleri kullanılarak 3B baskı yapıları oluşturulmuştur. Bu yapıların mukavemeti, rijitliği ve deformasyon özellikleri çeşitli mekanik testler kullanılarak belirlenmiştir.

- Sonuçlar, farklı doluluk oranları ve tabaka yönlendirmelerinin yapıların mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir. Özellikle, %20 doluluk oranına sahip yapıların en yüksek mukavemete sahip olduğu tespit edilmiştir.
- Ayrıca, sayısal simulasyonlar kullanılarak, farklı doluluk oranları ve tabaka yönlendirmelerinin yapıların mekanik özelliklerine etkisi daha ayrıntılı olarak incelenmiştir. Simulasyon sonuçları, deneysel verilerle uyumlu olmuştur ve yapıların mukavemet ve rijitliğinin artması için doluluk oranının artırılması gerektiğini göstermiştir.
- Makale, 3B yazıcılarla üretilen PETG/karbon bileşikleri ile yapıların endüstriyel uygulamaları için potansiyel olarak uygun olduğunu ve yapının mekanik özelliklerinin doluluk oranı ve tabaka yönlendirmesi gibi parametrelerin optimize edilmesi ile iyileştirilebileceğini belirtmektedir.

Şekil 2.2'de makale kapsamında tasarlanan parçaların simülasyon analiziyle deformasyon ve gerinim sonuçları belirtilmiştir.



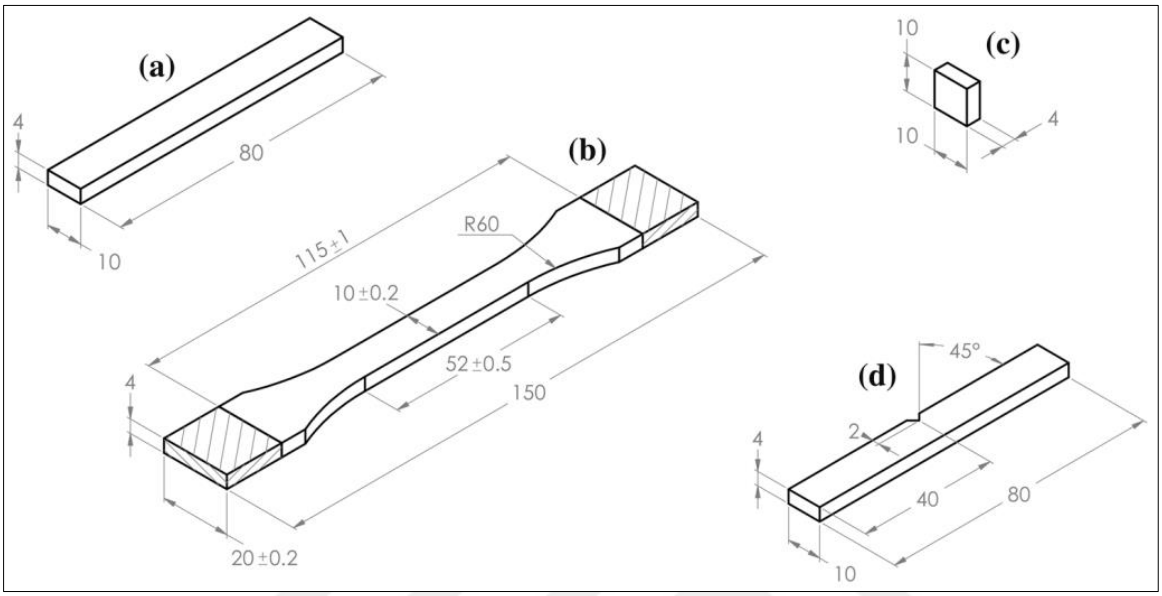
Şekil 2.2. FEA analizi ve gerilme statik yapısal analiz sonuçları, toplam deformasyonla (a) katı yapı; (b) daire şeklinde yapı; (c) altıgen yapı; (d) girintili yapı şeklinde yapılmıştır (Alarifi, I. M., 2023).



Şekil 2.2. (devam) FEA analizi ve gerilme statik yapısal analiz sonuçları, toplam deformasyonla (a) katı yapı; (b) daire şeklinde yapı; (c) altıgen yapı; (d) girintili yapı şeklinde yapılmıştır (Alarifi, I. M., 2023).

S. Kain, J.V.Ecker, A. Haider, M. Musso, A. Petutschnigg'in (2019) yaptığı "'Effects of the infill pattern on mechanical properties of fused layer modeling (FLM) 3B printed wood/polylactic acid (PLA) composites" isimli makale FLM 3B baskısıyla üretilmiş ahşap/polilaktik asit (PLA) kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki iç doluluk desenlerinin etkisini araştırmaktadır. İç doluluk geometrileri, hücresel (honeycomb), çift yönlü tarama (diamond), çizgi (line), çift çizgi (double line), kare (square) ve üçgen (triangle) olmak üzere altı farklı tipte oluşturulmuştur. Sonuçlar, mekanik özelliklerin, iç doluluk geometrilerine ve doluluk oranlarına bağlı olarak değiştiğini göstermektedir. Özellikle, hücresel ve kare doluluk geometrileri, en yüksek çekme dayanımı ve elastisite modülüne sahip olurken, çizgi ve üçgen doluluk geometrileri en düşük çekme dayanımı ve elastisite modülüne sahip olmuştur. Ayrıca, iç doluluk geometrisi, malzeme yüzey kalitesi üzerinde de belirgin bir etkiye sahip olmuştur. Bu çalışma, FLM 3B baskısıyla üretilen

ahşap/PLA kompozitlerin mekanik özelliklerinin optimize edilmesinde iç doluluk geometrilerinin önemini vurgulamaktadır. Şekil 2.3'te makale kapsamında yapılan farklı testlerin standartlarını ve ölçülerini içeren teknik resim belirtilmiştir.



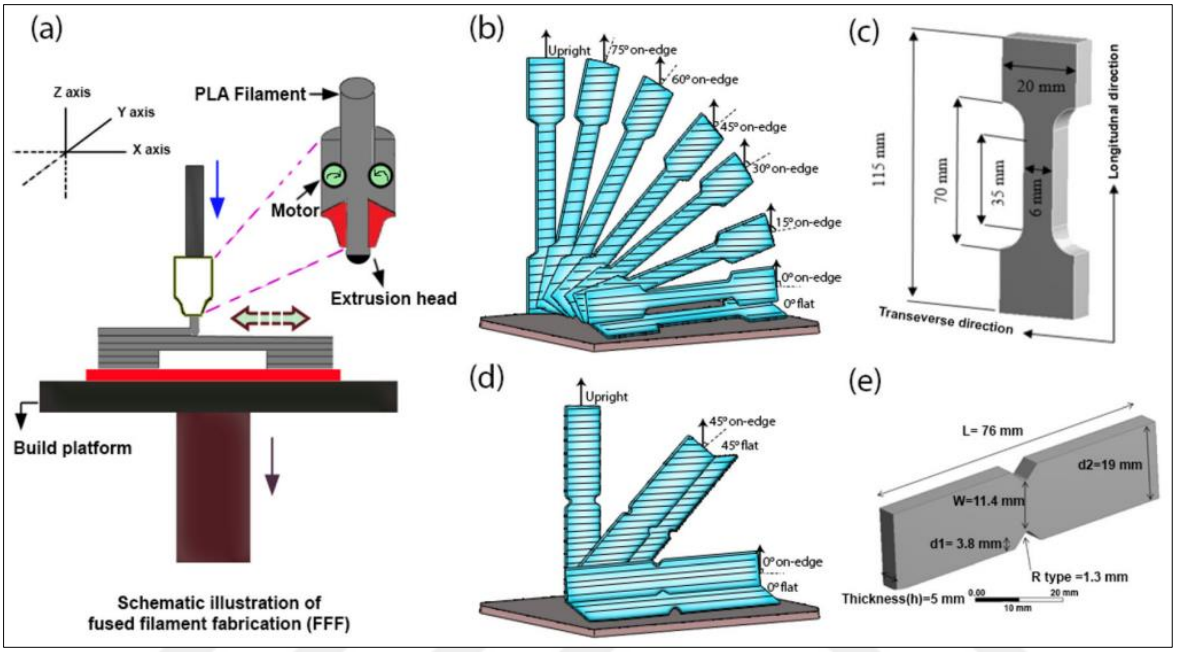
Şekil 2.3. FLM 3B baskılı test numunelerinin belirli mekanik özelliklerini test etmek için özel olarak yapılmış iki ahşap flamentten yapılmış çeşitli geometriler: (a) Charpy darbe dayanımı (çentiksiz) ve HDT; (b) çekme dayanımı; (c) basınç dayanımı; (d) Charpy darbe dayanımı (Kain, S., Ecker, J. V., Haider, A., Musso, M., & Petutschnigg, A., 2019)

H. Gonabadi, A. Yadav ve S. J. Bull'un (2020) yaptığı "The effect of processing parameters on the mechanical characteristics of PLA produced by a 3B FFF printer" isimli makale, 3B Fused Filament Fabrication (FFF) baskı yöntemiyle üretilen PLA (polylactic acid) malzemenin mekanik özellikleri üzerine baskı parametrelerinin etkisini araştırmaktadır.
Çalışmada, PLA numuneleri üretmek için farklı baskı parametreleri kullanılmış ve numunelerin mekanik özellikleri, yani sertlik, çekme dayanımı ve elastisite modülü ölçülmüştür. Bu parametreler, baskı sıcaklığı, tabaka kalınlığı ve doluluk yüzdesi gibi faktörlere bağlı olarak değişmektedir.

Ayrıca, makalede numunelerin yüzey pürüzlülüğü ve mikro yapıları da incelenmiştir. Sonuçlar, baskı parametrelerinin PLA'nın mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Özellikle, yüksek sıcaklık ve düşük doluluk yüzdesi ile baskı

yapıldığında, numunelerin sertliği ve çekme dayanımı artmıştır. Ancak, düşük sıcaklık ve yüksek doluluk yüzdesi kullanıldığında, numunelerin elastisite modülü artmıştır.

Makale, 3B baskı parametrelerinin PLA malzemenin mekanik özelliklerini belirlemede kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir. Şekil 2.4'te makale kapsamında yapılan çekme ve darbe testlerinde kullanılan parçaların ölçüleri ve baskı yönleri belirtilmiştir.

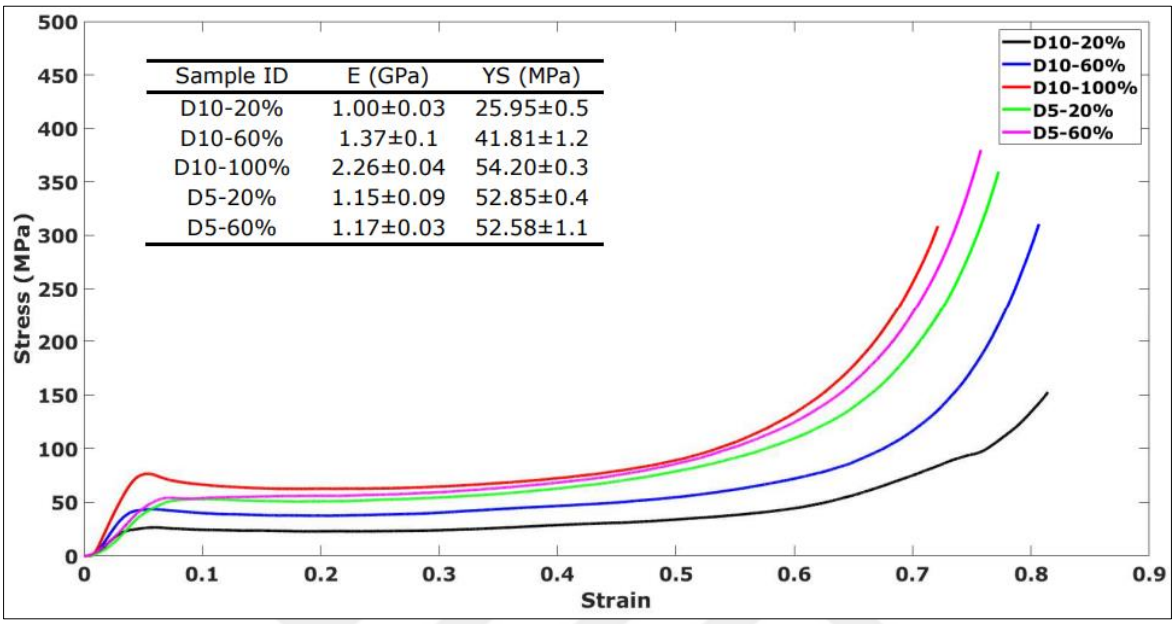


Şekil 2.4. FFF baskının şematik illüstrasyonu: (a) Modelin katman katman oluşturulduğu 3B FFF yazıcının şematik görünümü; (b) bu araştırmada gerilim için kullanılan numunelerin yönelimlerinin şeması; (c) bu araştırmada kesme için kullanılan numunelerin yönelimleri; (d) çekme numunesi; (e) Iosipescu kesme numunesi (Gonabadi, H., Yadav, A., & Bull, S. J., 2020)

Nabila Elmrabet ve Petros Siegkas'ın (2020) yaptığı "Dimensional considerations on the mechanical properties of 3B printed polymer parts" isimli çalışmada, 3B baskı ile üretilen polimer parçaların boyutlarının, mekanik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Araştırmacılar, üç farklı polimer (PLA, ABS ve PETG) kullanarak üretim işlemini gerçekleştirmişler ve baskı parametrelerini değiştirerek farklı boyutlarda parçalar elde etmişlerdir. Elde edilen parçaların boyutları, ölçülendirme hatalarının etkisi, değişken sıcaklık ve nem koşullarının etkisi dikkate alınarak analiz edilmiştir.

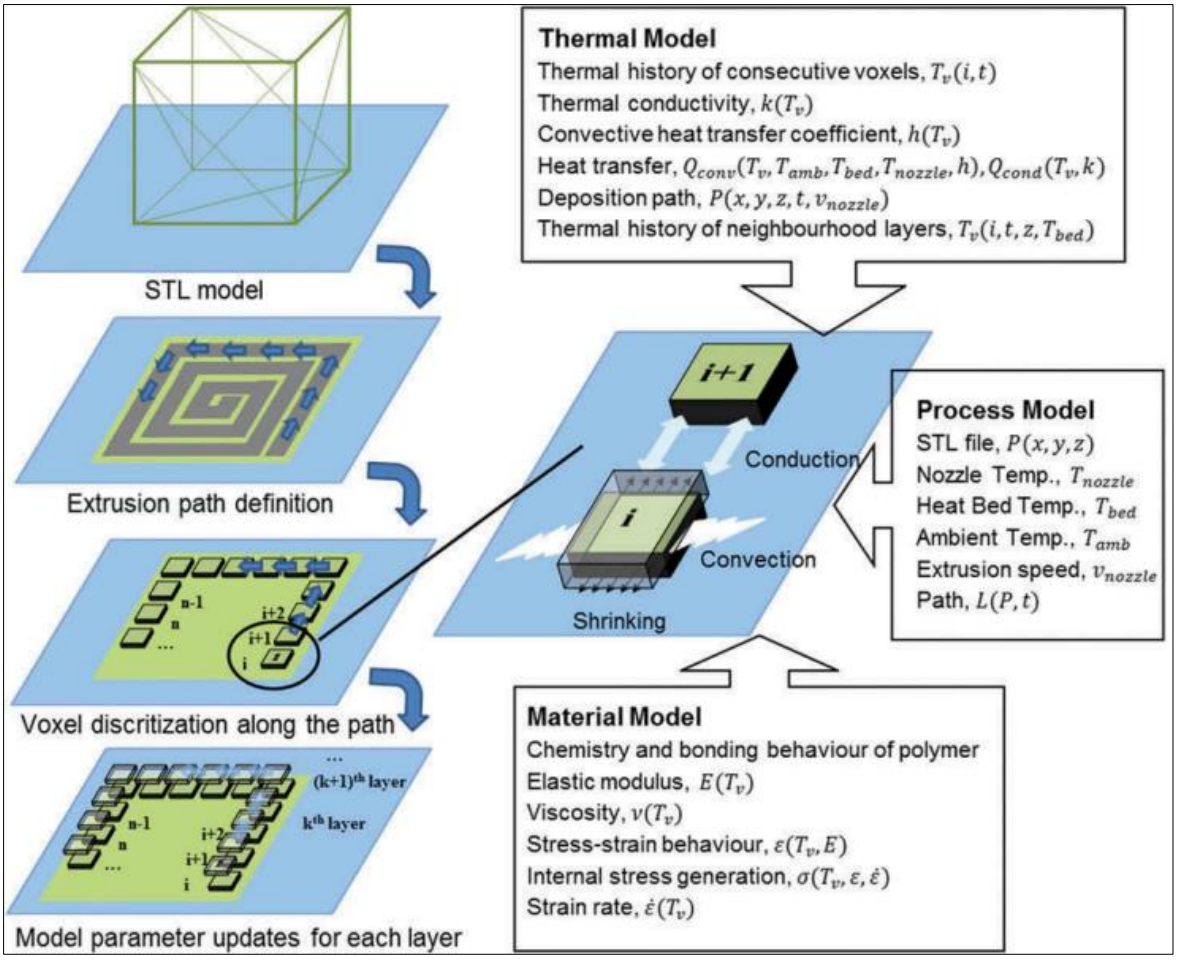
Sonuç olarak, parça boyutlarındaki hataların, baskı parametrelerine ve kullanılan malzemeye bağlı olarak mekanik özellikleri önemli ölçüde etkilediği bulunmuştur. Ayrıca, sıcaklık ve nem koşullarının da mekanik özellikler üzerinde etkili olduğu gözlemlenmiştir. Araştırmacılar, bu bulguların, 3B baskı ile üretilen parçaların tasarımı ve üretiminde dikkate

alınması gereken önemli faktörler olduğunu vurgulamışlardır. Şekil 2.5'te makale kapsamında yapılan polimerlerin gerilim gerinim grafiği yer almaktadır.



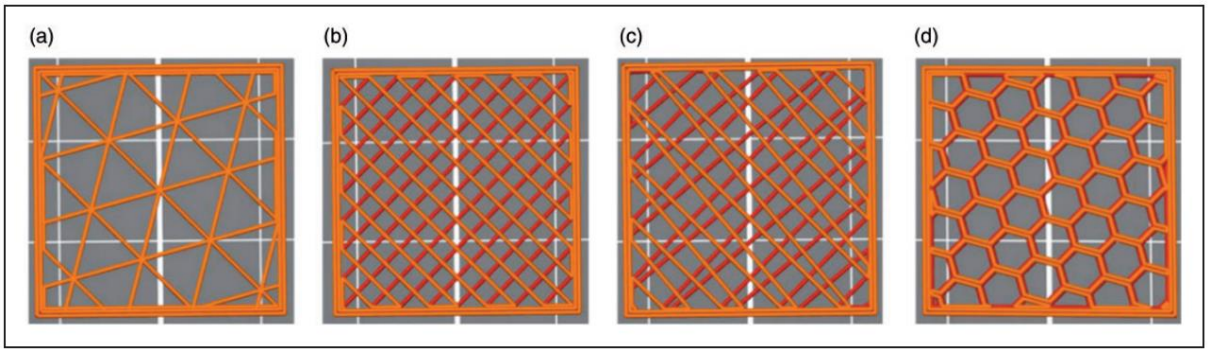
Şekil 2.5. %20, %60, %100 dolgulu PLA'nın sıkıştırma gerilme-şekil değiştirme eğrileri (Elmrabet, N., & Siegkas, P., 2020)

Uğur M. Dilberoğlu, Şeyda Şimşek ve Ulaş Yaman'ın (2019) yaptığı "Shrinkage compensation approach proposed for ABS material in FDM process" başlıklı makale, FDM yöntemi ile ABS malzemenin 3B baskısında görülen boyut küçülmesini telafi etmek için bir yaklaşım önermektedir. Bu amaçla, ABS malzemenin kullanıldığı baskı işlemindeki sıcaklık, tabaka kalınlığı, dolgu yoğunluğu ve malzeme oryantasyonu gibi parametrelerin etkisi incelenmiştir. Daha sonra, küçülme miktarının belirlenmesi ve telafi edilmesi için bir matematiksel model önerilmiştir. Önerilen modelin etkinliği, deneysel olarak belirlenmiş boyut küçülme oranlarını ve önerilen yaklaşımın kullanılmasıyla telafi edilen boyutları karşılaştırarak değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, önerilen yaklaşımın ABS malzeme için 3B baskı sürecindeki boyut küçülmelerinin etkisini azaltmada etkili olduğu ve telafi etmede yüksek bir doğruluk sağladığı bulunmuştur. Şekil 2.6'da makale kapsamında araştırılan polimer malzemelerin sıcaklık ve diğer parametreler karşısındaki küçülme değişim miktarının belirlenmesini sağlayan matematiksel model belirtilmiştir.



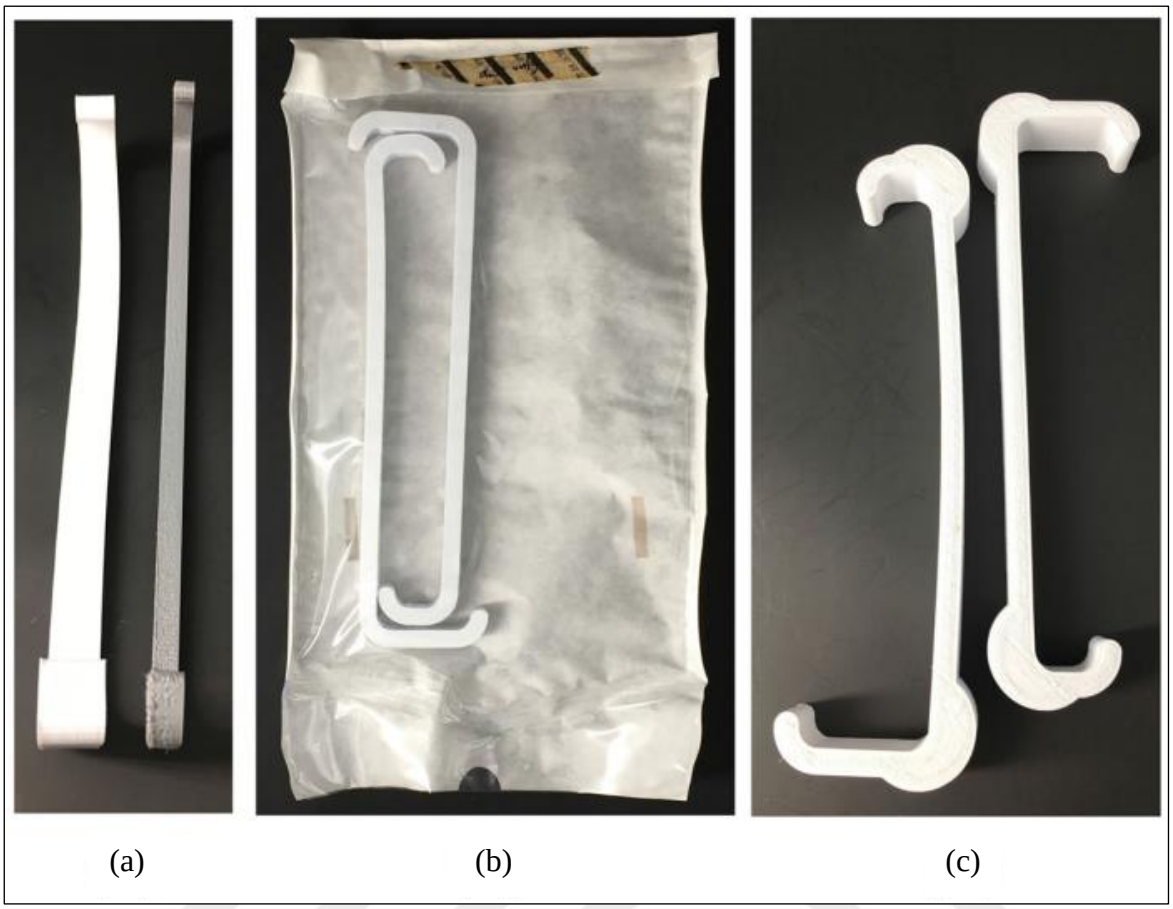
Şekil 2.6. Polimer malzemeler için FDM sürecinin büzülme modellemesi için analitik çerçeve (Dilberoglu, U. M., Simsek, S., & Yaman, U., 2019)

Ma, Q., Rejab, M., Kumar, A. P., Fu, H., Kumar, N. M., & Tang, J.'nin (2020) yaptığı "Effect of infill pattern, density and material type of 3B printed cubic structure under quasi-static loading" isimli makale, 3B baskı teknolojilerinin yapısal uygulamalarda kullanımının yaygınlaşmasıyla birlikte bu teknolojinin üretiminde kullanılan yapı malzemeleri ve dolgu desenlerinin yapısal özelliklere olan etkisini araştırmayı amaçlamaktadır. Bu çalışmada, farklı dolgu desenleri, yoğunluklar ve malzeme tipleri kullanılarak basılmış küp yapılar, kısmi statik yük altında test edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, dolgu desenlerinin yapısal özellikleri üzerinde önemli bir etkisinin olduğu ve bazı dolgu desenlerinin diğerlerine göre daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca, yapı yoğunluğunun artırılmasının yapısal özellikleri değiştirdiği ve malzeme tipinin yapısal performansı da etkilediği tespit edilmiştir. Şekil 2.7'de makale kapsamında yapılan parçaların çeşitli iç doluluk geometri türleri belirtilmiştir.



Şekil 2.7. 3B baskılı kübik yapının dört dolgu deseni: (a) üçgen; (b) doğrusal; (c) çizgi; (d) bal peteği (Ma, Q., Rejab, M., Kumar, A. P., Fu, H., Kumar, N. M., & Tang, J., 2020)

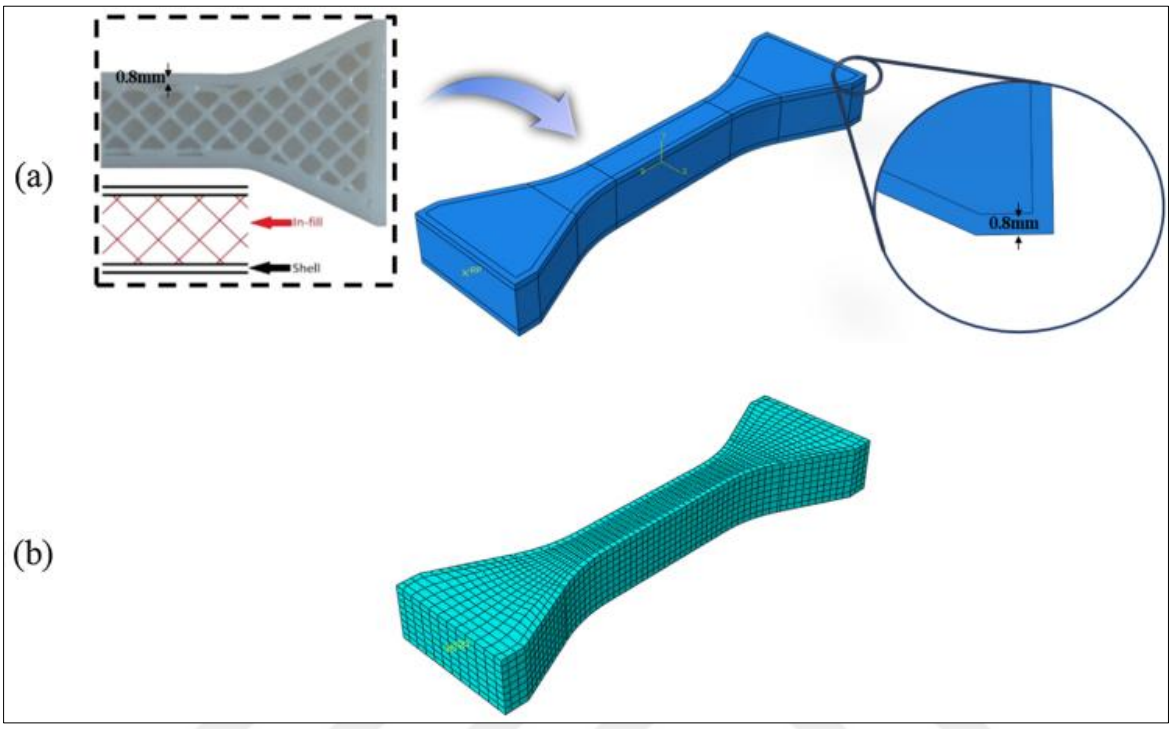
Joshua V. Chen, Kara S. Tanaka, Alan B. C. Dang ve Alexis Dang'ın (2020) yaptığı "Identifying a commercially-available 3B printing process that minimizes model distortion after annealing and autoclaving and the effect of steam sterilization on mechanical strength" isimli makale, 3B baskı sonrası model distorsiyonunu en aza indirebilen bir 3B baskı işlemi belirlemeyi ve bu işlem sonrası modelin mekanik dayanımının buhar sterilizasyonu gibi sonraki uygulamalarla nasıl etkilendiğini araştırmayı amaçlamaktadır. Araştırmada, farklı 3B baskı metotları kullanılarak üretilen modeller, çeşitli sıcaklık, nem ve basınç koşulları altında tavlama, otoklav ve buhar sterilizasyonu gibi işlemlere tabi tutulmuştur. Sonrasında, distorsiyon miktarı ve mekanik dayanım ölçümleri yapılmış ve sonuçlar analiz edilmiştir. Araştırma sonuçları, PolyJet 3B baskı işleminin diğer yöntemlere kıyasla daha az distorsiyon ve daha yüksek mekanik dayanım gösterdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, buhar sterilizasyonunun mekanik dayanımı önemli ölçüde azalttığı, tavlama ve otoklav işlemlerinin mekanik dayanımı arttırdığı görülmüştür. Resim 2.1'de tavlama ve otokolavlama uygulanmış standart ve geliştirilmiş ekartörler yer almıştır.



Resim 2.1. Test edilen ekartörler: (a) sıcak su banyosunda tavlama sonrasında; (b) otoklavlama sonrasında eğrilen standart ekartörler; (c) müdahale olmadan mukavemeti optimize edilmiş ekartör (sağda) ve sıcak su banyosunda tavlama sonrasında eğrilme (solda) (Chen, J. V., Tanaka, K. S., Dang, A. B., & Dang, A., 2020)

Tomas Webbe Kerekes, Hyoungjun Lim, Woong Yeol Joe ve Gun Jin Yun'un (2019) yaptığı "Characterization of process–deformation/damage property relationship of fused deposition modeling (FDM) 3B-printed specimens" isimli makale, FDM 3B baskı yönteminde üretilen numunelerin deformasyon özellikleri ve üretim süreci arasındaki ilişkiyi karakterize etmeyi amaçlamaktadır. Bu amaçla, farklı doluluk oranları ve katman kalınlıkları kullanılarak çeşitli polimer numuneleri basılmıştır. Daha sonra, bu numunelerin mekanik özellikleri (örneğin, elastik modülü, çekme dayanımı, kopma uzaması vb.) belirlendi ve her numunenin üretim sürecindeki değişiklikler incelenmiştir. Ayrıca, üretim sürecindeki değişkenlerin (örneğin, nozul sıcaklığı, yatak sıcaklığı, ilerleme hızı vb.) numunelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi de araştırılmıştır. Sonuç olarak, farklı parametrelerin çeşitli polimer malzemelerinin deformasyon özellikleri üzerinde farklı etkilere sahip olduğu bulunmuştur. Bu çalışma, FDM 3B baskı yöntemiyle üretilen parçaların üretim süreci ve mekanik

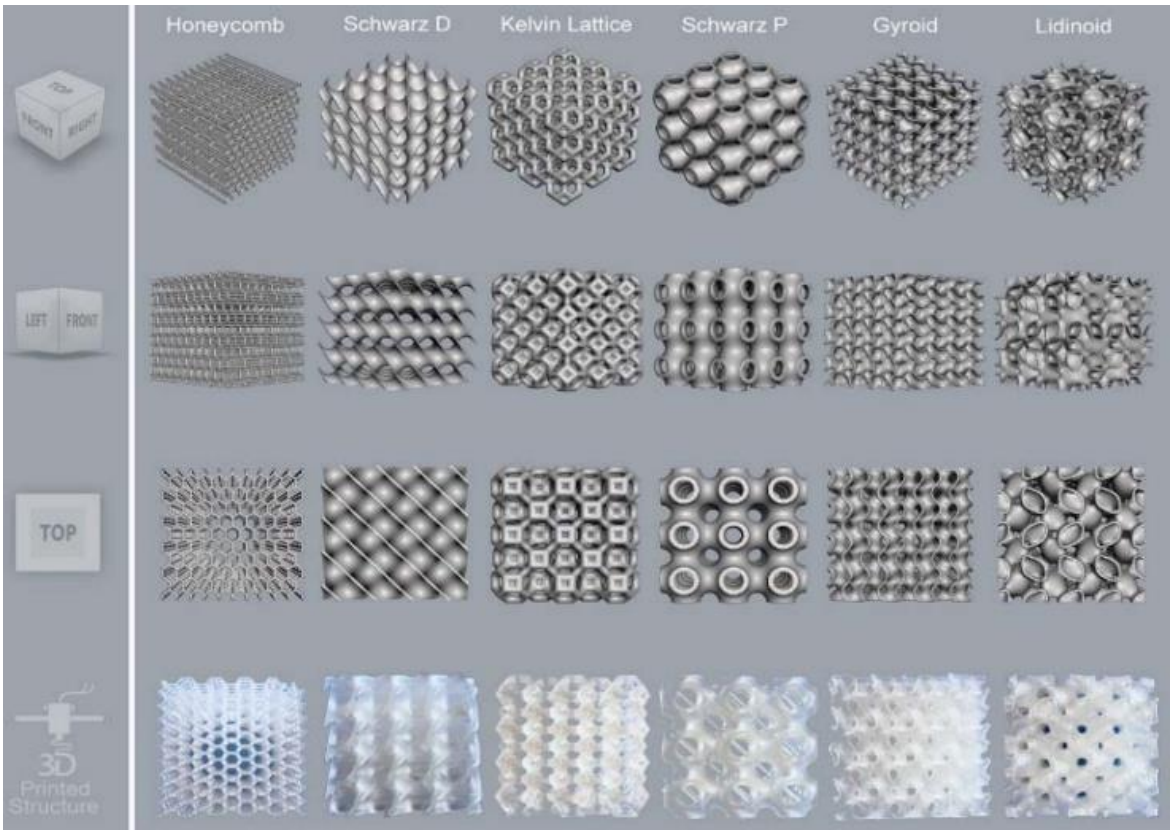
özellikleri arasındaki ilişkiyi ortaya koymaktadır. Şekil 2.8'de iç doluluk geometrisi belirtilmiştir.



Şekil 2.8. FE modeli: (a) FE modeli için dış kabuğun ve dolgunun geometri bölümü; (b) FE modeli (Webbe Kerekes, T., Lim, H., Joe, W. Y., & Yun, G. J., 2019)

M. Shams, Z. Mansurov, C. Daulbayev ve B. Bakbolat'ın (2021) yaptığı "Effect of Lattice Structure and Composite Precursor on Mechanical Properties of 3B-Printed Bone Scaffolds" isimli makalede, kemik greftlerinin 3B baskı teknolojisi kullanılarak nasıl üretilebileceği ve kemik dokusuyla uyumlu hale getirilebileceği incelenmiştir. Araştırmanın odak noktası, farklı örgü yapılarına ve kompozit öncüllere sahip kemik greftlerinin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemektir. Çalışmada, Poli(L-laktik asit) (PLLA) biyopolimeri ve cam elyafı takviyeli PLLA kullanılarak dört farklı örgü yapısına sahip kemik greftleri üretilmiştir. Üretilen kemik greftleri, basınç testleri, çekme testleri ve mikro yapı analizleri için test edilmiştir. Sonuçlar, farklı örgü yapılarının, kemik greftlerinin mekanik özelliklerini belirleyen kritik bir faktör olduğunu göstermektedir. Özellikle, yüksek örgü yoğunluğuna sahip greftlerin, yüksek mukavemet, düşük elastisite modülü ve yüksek enerji emilimi gösterdiği bulunmuştur. Ayrıca, cam elyafı takviyeli PLLA'nın, kemik greftlerinin mekanik özelliklerini arttırdığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak, bu araştırma, 3B baskı teknolojisi ile özelleştirilmiş kemik greftlerinin üretimi için farklı örgü yapılarının ve kompozit öncüllerin

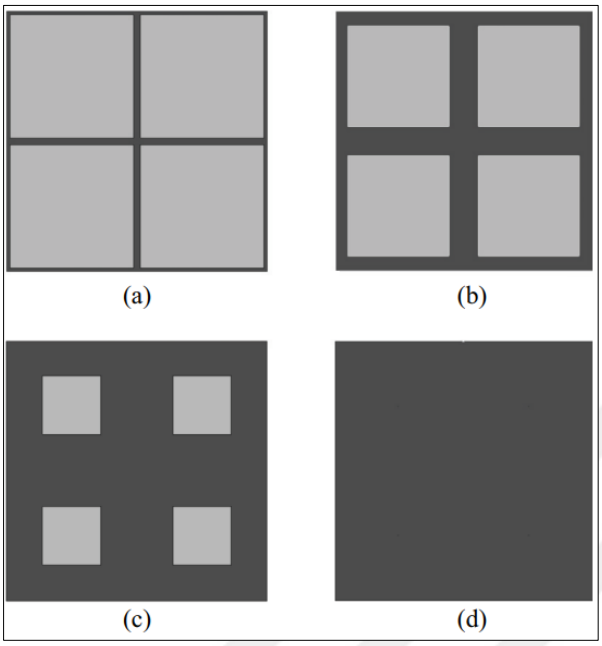
kullanılmasının, kemik greftlerinin mekanik özelliklerini arttırmak için etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir. Şekil 2.9'da makale kapsamında denenen farklı örgü yapıları belirtilmiştir.



Şekil 2.9. Üçlü periyodik minimal yüzeyler ve işlevsel olarak derecelendirilmiş kafes yapılar tasarlandı; Rhino 7 kullanılarak çeşitli hücre geometrilerine göre modellendi ve nihai modeller basıldı (Shams, M., Mansurov, Z., Daulbayev, C., & Bakbolat, B., 2021)

Gökhan Aydın, B. Çağrı Sarar, M. Erden Yıldızdağ ve B. Emek Abali'nin (2022) yaptığı "Investigating infill density and pattern effects in additive manufacturing by characterizing metamaterials along the strain-gradient theory" isimli çalışmada, katmanlı imalat yöntemi kullanılarak üretilen metamalzemelerin şekil hafızalı alaşımların mekanik özellikleri ile ilişkisini incelemek amaçlanmıştır. İmalat parametrelerinden iç doluluk deseni ve yoğunluğunun metamalzemelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Sonuçlar, iç yoğunluğunun artmasıyla metamalzemelerin sertliğinde ve gerilme dayanımında artış olduğunu göstermektedir. Ayrıca, iç doluluk deseninin metamalzemelerin mekanik özellikleri üzerinde belirgin bir etkisi olduğu bulunmuştur. İç desenleri değiştiğinde, metamalzemelerin sertlikleri, gerilme dayanımları ve şekil hafızası özellikleri

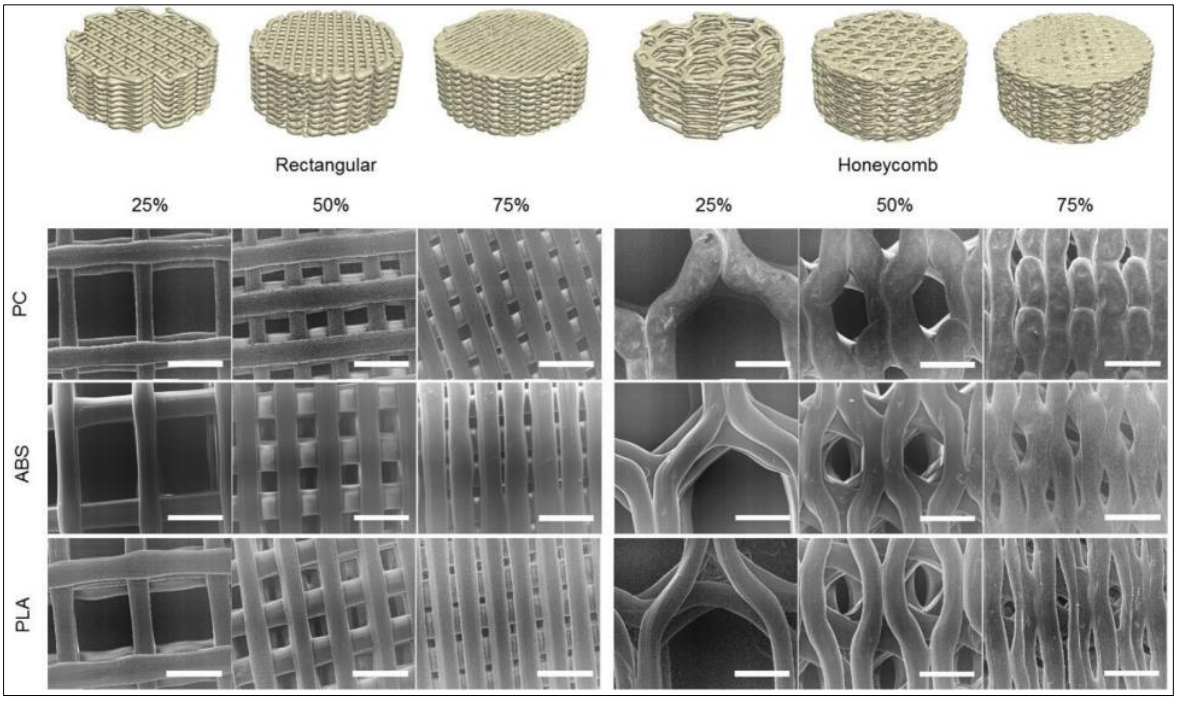
değişmiştir. Bu sonuçlar, katmanlı imalat yöntemiyle üretilen metamalzemelerin tasarımında iç doluluk deseni ve yoğunluğunun dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Şekil 2.10'da çeşitli iç doluluk oranlarıyla yapılan tasarımlar belirtilmiştir.



Şekil 2.10. Dolgu yoğunluğu varyasyonu çalışmasında RVE: (a) %10; (b) %40; (c) %80; (d) %100 dolgu oranlı 3B baskı (Aydin, G., Sarar, B. C., Yildizdag, M. E., & Abali, B. E., 2022)

Elena Provaggi, Claudio Capelli, Benyamin Rahmani, Gaetano Burriesci ve Deepak M. Kalaskar'ın (2019) yaptığı "3B printing assisted finite element analysis for optimising the manufacturing parameters of a lumbar fusion cage" isimli makale, 3B yazdırma teknolojileri kullanılarak bir lomber füzyon kafesi üretmek için uygun üretim parametrelerini belirlemek amacıyla sonlu eleman analizi kullanımını araştırmaktadır. Makalede, bir lomber füzyon kafesi üretmek için kullanılan üç farklı 3B yazıcı teknolojisi (FDM, SLA ve SLS) ve malzeme (PLA, ABS ve PA) değerlendirildi. Her bir malzeme ve yazıcı tekniği için, optimum baskı parametrelerinin belirlenmesi için sonlu eleman analizi (FEA) kullanıldı. Daha sonra, en iyi sonuçları veren parametreler kullanılarak farklı üretim süreçleri ve malzemeler kullanılarak üretilen lomber füzyon kafesleri deneysel olarak test edildi. Sonuçlar, PLA'nın FDM tekniğiyle en iyi sonuçları veren malzeme olduğunu ve SLS teknolojisi ile üretilen füzyon kafeslerinin en yüksek mukavemet değerlerine sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, FEA'nın uygun parametrelerle birleştirilmesiyle, füzyon kafesi tasarımında optimizasyon sağlandığı ve üretim sürecinin verimliliğinin arttığı belirlenmiştir.

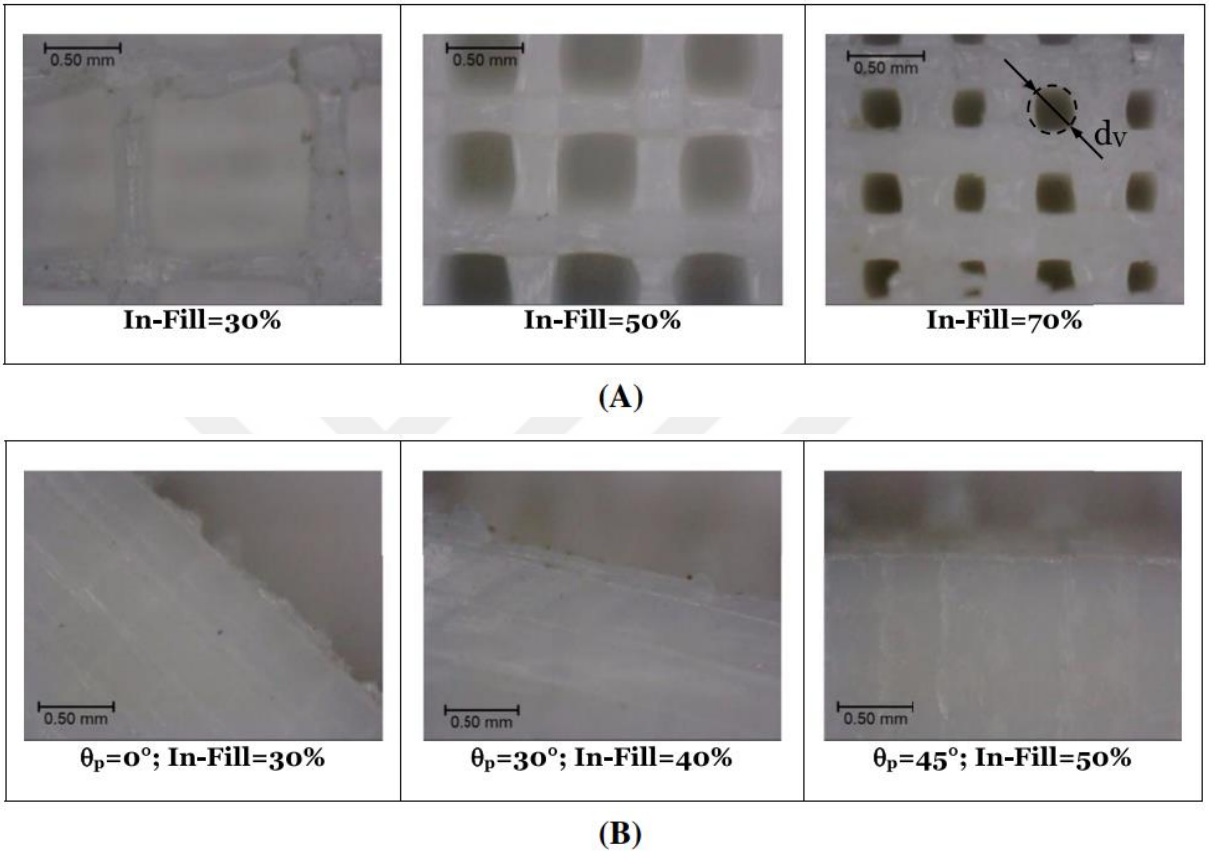
Resim 2.2'de çeşitli iç doluluk mimarisi ve oranı, aynı zamanda farklı malzemelerin SEM görüntüleri belirtilmiştir. İncelenen tüm malzemeler için dikdörtgen ve bal peteği desenlerinin gözenek boyutunu ve dolgu mimarisi belirtilmiştir (ölçek çubukları: 1 mm). PC (üstte) için referans olarak gösterilen μCT tabanlı 3B rekonstrüksiyonlar, aynı yapının SEM görüntülerine benzer yapı geometrisini ve gözenekliliğini göstermektedir.



Resim 2.2. 3B gözenekli yapıların iç mimarileri (Provaggi, E., Capelli, C., Rahmani, B., Burriesci, G., & Kalaskar, D. M., 2019).

Adnan A.Ahmed ve Luca Susmel'in (2018) yaptığı "Static assessment of plain/notched polylactide (PLA) 3B-printed with different infill levels: Equivalent homogenised material concept and Theory of Critical Distances" isimli makalelerinde, 3B baskı ile üretilen polylactide (PLA) numunelerin farklı iç dolgu seviyelerindeki mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Deneyler, eşdeğer homojenleştirilmiş malzeme konsepti ve Kritik Mesafeler Teorisi'ni kullanarak gerçekleştirilmiştir. PLA numuneler, yüzey pürüzlülüğü, yoğunluk ve porozite gibi farklı özelliklerine göre karakterize edilmiştir. Daha sonra, numunelerin mekanik özellikleri, eğilme ve çekme testleri gibi farklı yüklemeler altında incelenmiştir. Sonuçlar, iç dolgu seviyelerinin numunelerin mekanik davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, eşdeğer homojenleştirilmiş malzeme konsepti ve Kritik Mesafeler Teorisi kullanılarak, numunelerin mekanik özelliklerinin tahmini yapılmıştır. Bu yaklaşımların sonuçları, deney sonuçları ile iyi bir uyum içinde olduğunu

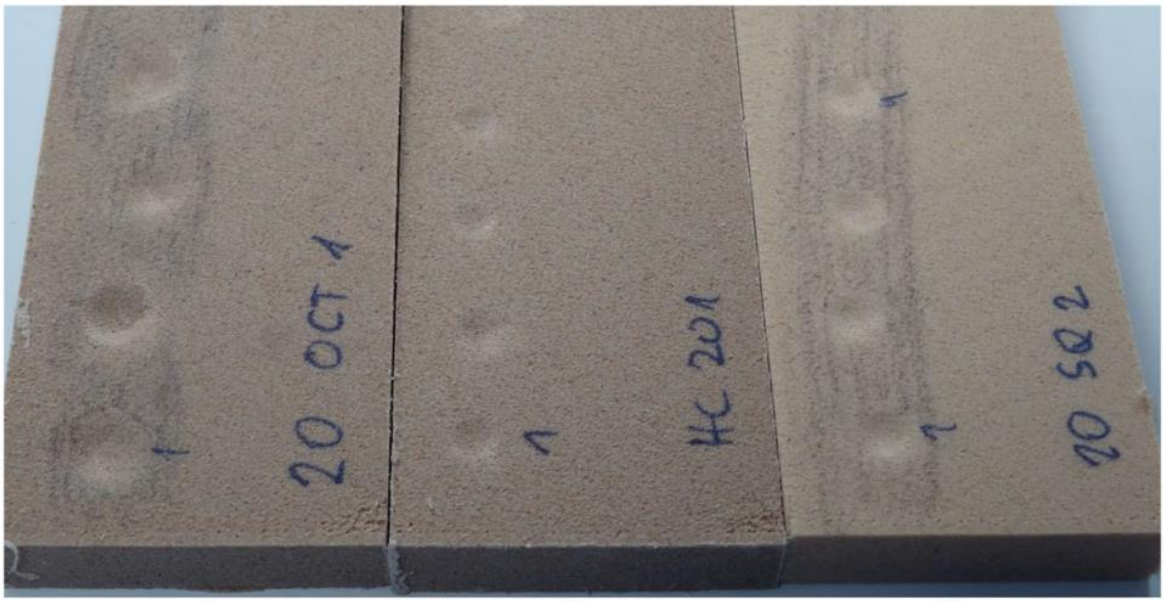
göstermiştir. Bu çalışma, 3B baskı ile üretilen malzemelerin mekanik özelliklerinin anlaşılmasına ve gelecekteki tasarımların optimize edilmesine yardımcı olabilir. Resim 2.3'te makale kapsamında üretilen parçaların çeşitli iç doluluk oranı ve desen açılarının görüntüleri belirtilmiştir.



Resim 2.3. Örnekler: (a) dolgu yoğunluğu %30, %50 ve %70'e eşitlenerek elde edilen bal peteği benzeri yapı; (b) farklı üretim açısı θp değerleri ve farklı dolgu seviyeleri için gözlemlenen çatlama davranışı (numunelerin boylamasına ekseni dikeydir) (Ahmed, A. A., & Susmel, L., 2018)

Nadir Ayrılmıs, Mirko Kariz, Milan Sernek ve Manja Kitek Kuzman'ın (2021) yaptığı "Effects of sandwich core structure and infill rate on mechanical properties of 3B-printed wood/PLA composites" isimli makale, 3B yazıcı kullanarak ahşap/PLA kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini araştırmaktadır. Kare, altıgen ve sekizgen gibi farklı dolgu oranlarına (%0, %20, %40 ve %60) ve desen türlerine sahip ahşap/PLA numuneleri bir 3B yazıcı kullanılarak üretilmiştir. 3B baskılı numunelerin üretimindeki işlem parametreleri, çekirdek konfigürasyonu dışında sabit tutulmuştur. Dış katman kalınlığı tüm numuneler için sabit tutulmuştur. Araştırmada, iki farklı sandviç çekirdek yapısı (içi boş ve

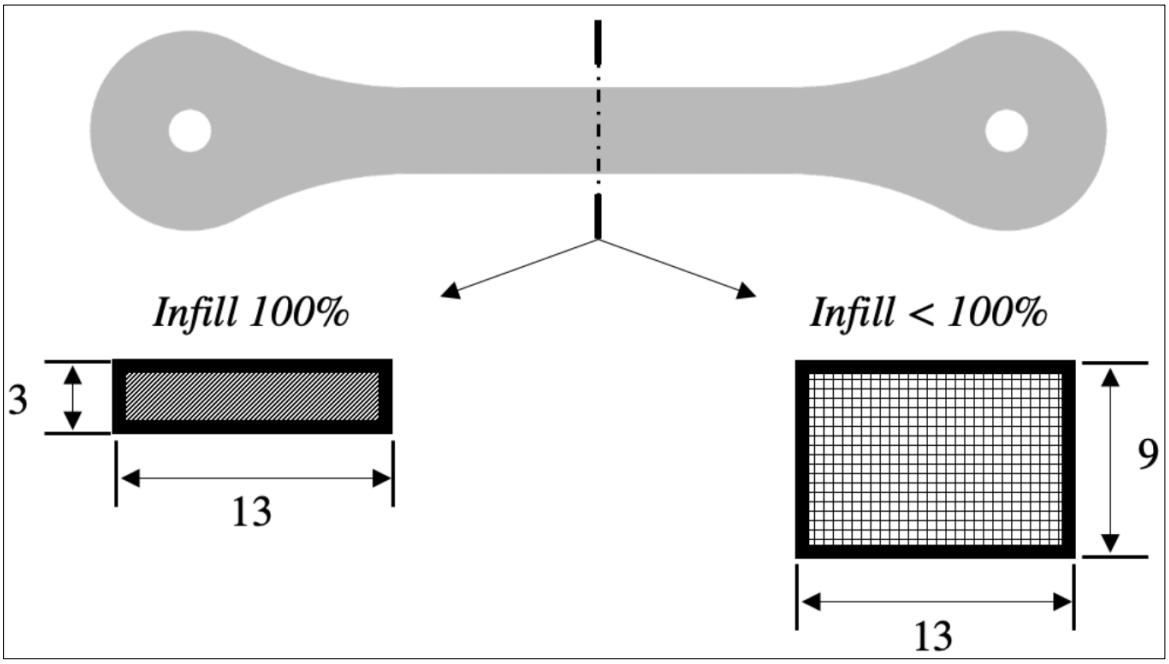
dolu) ve farklı iç doluluk oranları (%0, %20, %40 ve %60) kullanılarak 3B yazıcıda üretilen numunelerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Makalenin sonuçlarına göre, dolu sandviç çekirdek yapısı, içi boş sandviç çekirdek yapısına göre daha yüksek mekanik özelliklere sahiptir. Ayrıca, artan iç doluluk oranı ile birlikte, numunelerin bükülme dayanımı ve esneklik modülü artmaktadır. Ancak, bu orandaki artış numunelerin darbe dayanımını azaltmaktadır. Araştırma sonuçları, sandviç çekirdek yapısının ve iç doluluk oranının 3B yazıcı kullanarak üretilen ahşap/PLA kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Makale sonucuna göre altıgen iç doluluk deseni ile üretilen parça en yüksek mekanik özelliklere sahiptir. Resim 2.4'te farklı iç doluluk sesenleri ile üretilen parçaların test sonrası görselleri belirtilmiştir.



Resim 2.4. 3B baskılı numunelerin yüzeyindeki çentik çaplarının %20 dolgu oranında karşılaştırılması: (a) sekizgen numune; (b) altıgen numune; (c) kare numuneler (Ayrilmis, N., Kariz, M., Şernek, M., & Kuzman, M. K., 2021)

L. Bergonzi, M. Vettori, L. Stefanini ve L. D'Alcamo'nun (2021) yaptığı "Different infill geometry influence on mechanical properties of FDM produced PLA" isimli makalede, FDM tekniği kullanılarak PLA malzemesiyle üretilen numunelerin mekanik özellikleri üzerine farklı iç doluluk geometrilerinin etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, yatay, çapraz, ısı yalıtımı ve tam dolu iç doluluk desenleri kullanılarak numuneler üretilmiştir. Numunelerin basınç dayanımı, elastisite modülü ve kırılma gerilmesi değerleri deneysel olarak belirlenmiştir. Sonuçlar, bu desenlerin mekanik özellikler üzerinde belirgin bir etkisi

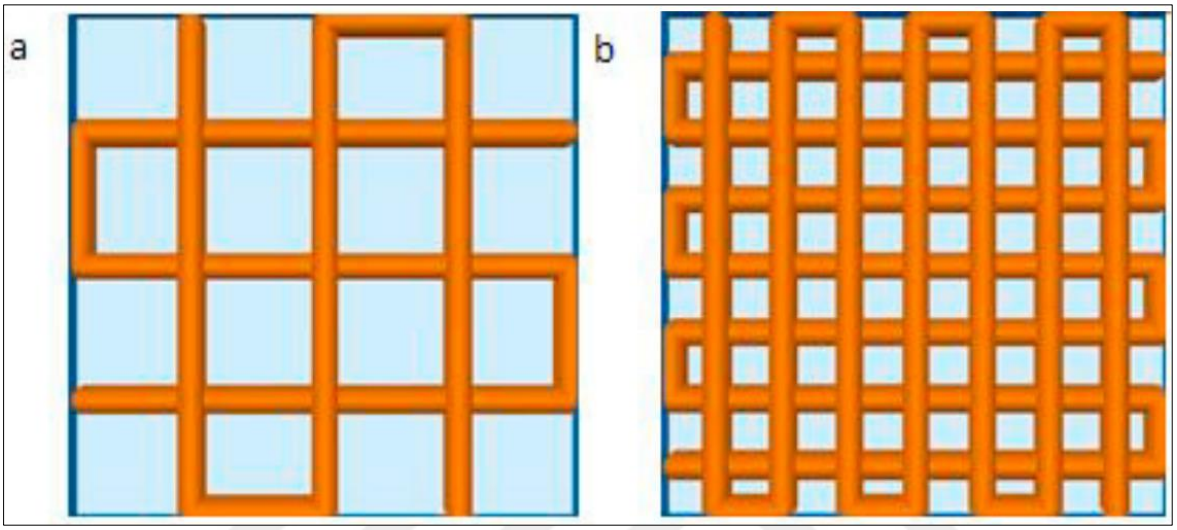
olduğunu göstermiştir. Tam dolu desenin diğer desenlere kıyasla en yüksek basınç dayanımına ve kırılma gerilmesine sahip olduğu bulunmuştur. Ayrıca, çapraz desenin yatay desene göre daha yüksek elastisite modülüne sahip olduğu görülmüştür. İç doluluk geometrisinin FDM tekniğiyle üretilen parçaların mekanik özelliklerini belirlemede önemli bir faktör olduğu sonucuna varılmıştır. Şekil 2.11'de makale kapsamında yapılan çekme testi numunesinin teknik resmi belirtilmiştir.



Şekil 2.11. MaCh3B numunesi ve farklı kalınlık (Bergonzi, L., Vettori, M., Stefanini, L., & D'Alcamo, L., 2021)

Irene Buj-Corral, Ali Bagheri, Alejandro Dominguez-Fernandez ve Ramon Casado-Lopez'in (2019) yaptığı "Influence of infill and nozzle diameter on porosity of FDM printed parts with rectilinear grid pattern" isimli makale, Fused Deposition Modeling (FDM) yöntemiyle üretilen parçalardaki boşlukluluğun (porozite) çeşitli parametrelerle nasıl etkilendiğini araştırmaktadır. Çalışmada, PLA malzeme kullanılarak üretilen parçalar, farklı dolgu yoğunlukları (infill) ve farklı nozzle çapları kullanılarak basılmıştır. Rectilinear dolgu deseni kullanılarak üretilen parçaların poroziteleri, mikro-CT taraması ile ölçülmüştür. Araştırma sonuçları, dolgu yoğunluğu ve nozzle çapının parçaların porozitesine önemli ölçüde etkisi olduğunu göstermektedir. Daha yüksek dolgu yoğunluğu ve daha küçük nozzle çapı, daha az poroziteye sahip parçalar üretmektedir. Bununla birlikte, dolgu yoğunluğu arttıkça, parçaların mekanik özelliklerinde de bir artış görülmüştür. Ayrıca, çalışma

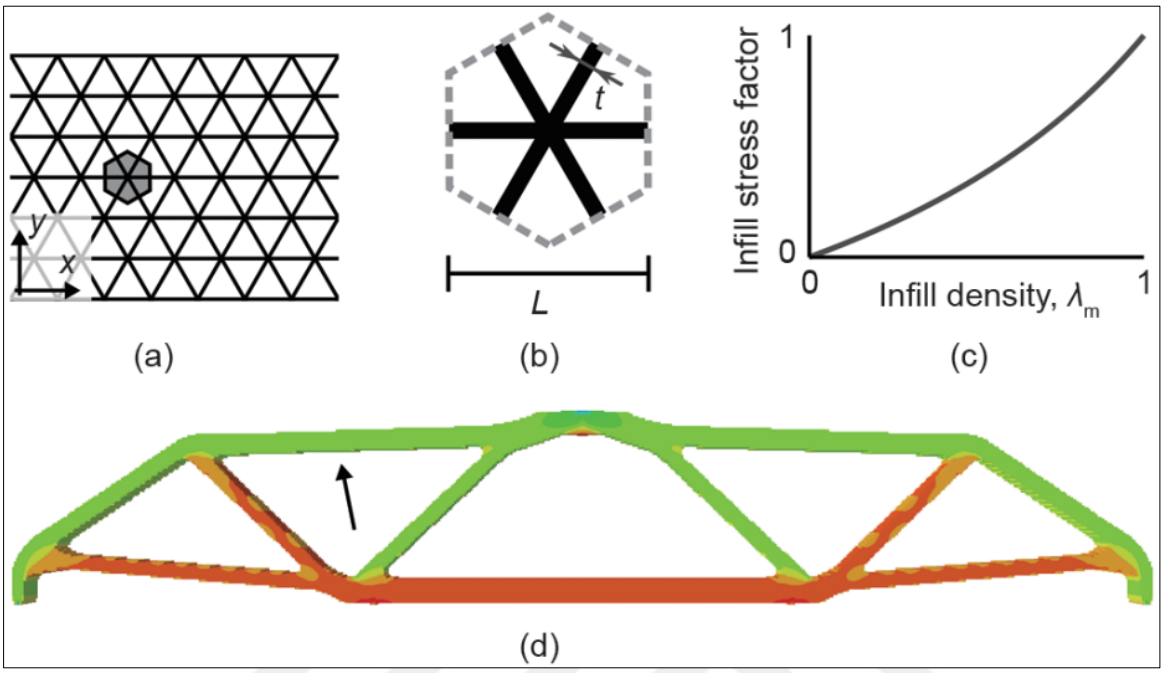
rectilinear dolgu deseninin parçaların porozitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Daha yüksek dolgu yoğunluğu kullanılan parçalar, daha az poroziteye sahip olsa da, dolgu desenindeki değişikliklerin parçaların porozitesinde belirgin bir etkisi olmuştur. Şekil 2.12'de makale kapsamında tasarlanan parçanın çeşitli iç doluluk oranlarıyla kesitleri belirtilmiştir.



Şekil 2.12. Nozul çapı 0,4 mm olan basılı bir parçanın çiziminin kesiti: (a) %20 dolgu; (b) %40 dolgu (Buj-Corral, I., Bagheri, A., Domínguez-Fernández, A., & Casado-López, R., 2019)

Anders Clausen, Niels Aage ve Ole Sigmun'dun (2016a) yaptığı "Exploiting Additive Manufacturing Infill in Topology Optimization for Improved Buckling Load" isimli makale, 3B baskı süreçleri ve topoloji optimizasyon yöntemleri kullanarak, malzeme tasarrufu sağlayacak ve özellikle elastik bükülme dayanımını arttıracak yenilikçi bir malzeme tasarım metodu sunmaktadır. Makalede, elastik bükülme dayanımı için optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalarda, topoloji optimizasyonu yapılmadan önce, baskı malzemesinin elastik bükülme dayanımı ölçülmüştür. Bu ölçümler, daha sonra optimize edilmiş yapıların performansıyla karşılaştırılmıştır. Araştırma sonuçları, optimizasyon sonrası iç doluluk deseni ve oranının malzeme miktarında %35'e kadar bir tasarruf sağlayabileceğini göstermiştir. Bunun yanı sıra, ey uygum tasarımın baskı malzemesinin elastik bükülme dayanımını %70 arttırdığı görülmüştür. Sonuç olarak, makale, 3B baskı ve topoloji optimizasyonu kullanarak malzeme tasarrufu sağlayarak elastik bükülme dayanımının arttırılabileceğini göstermektedir. Bu, özellikle hafif yapısal uygulamalar için potansiyel avantajlar sunabilir. Şekil 2.13'te makale kapsamında tasarlanan parçanın

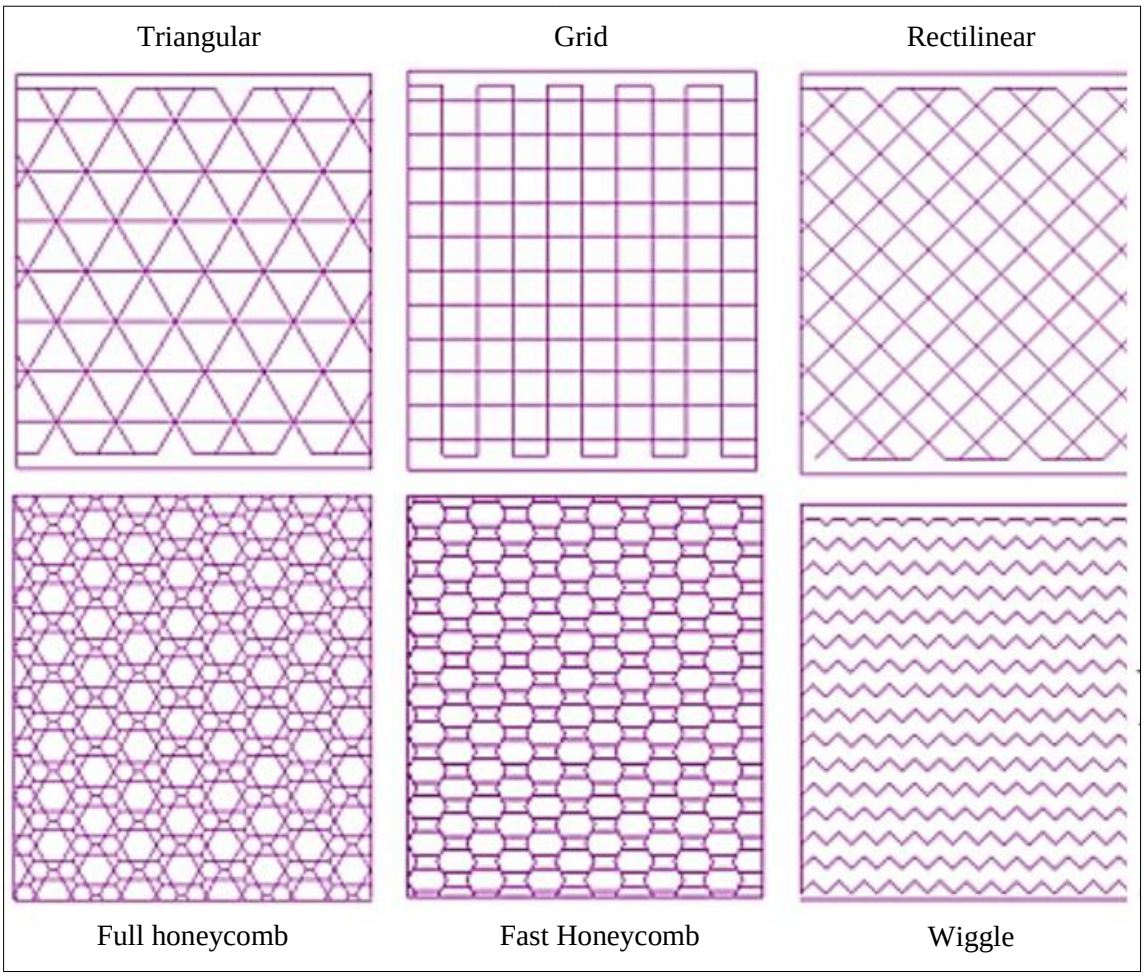
topoloji analizinin iç kesitinde hücre görüntüsü ve simülasyonun görsel çıktıları belirtilmiştir.



Şekil 2.13. Dolgu stabilitesinin tahmini: (a) tek bir birim hücre ile gösterilen üçgen dolgu yapısı; (b) birim hücre geometrik parametreleri; (c) dolgudaki makroskopik gerilmeleri eşdeğer tamamen katı bir yapıdaki gerilmelerle ilişkilendiren "dolgu gerilme faktörü"; (d) (mutlak) maksimum asal gerilme dağılımı; yeşil sıkıştırma, kırmızı/turuncu ise gerilimdir (Clausen, A., Aage, N., & Sigmund, O., 2016a)

Cristian Dudescu ve Laszlo Racz'ın (2017) yaptığı "Effects of raster orientation, infill rate and infill pattern on the mechanical properties of 3B printed materials" isimli makalede, 3B yazıcıların mekanik özellikleri üzerinde raster yönelimi, dolgu oranı ve dolgu deseni gibi parametrelerin etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmada, ABS malzemesi kullanılarak farklı dolgu desenleri (lineer, çapraz, dalgalı) ve dolgu oranları (% 10, % 20, % 30) test edilmiştir. Ayrıca raster yöneliminin de mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Makalenin sonuçları, dolgu oranının artmasıyla dayanıklılık ve sertliğin arttığını göstermiştir. Ayrıca, dalgalı dolgu deseninin çapraz ve lineer dolgu desenlerine göre daha yüksek dayanıklılık ve sertlik değerleri verdiği tespit edilmiştir. Raster yöneliminin de mekanik özellikler üzerinde belirgin bir etkisi olduğu görülmüştür. Yatay raster yönelimi, dikey yönelime göre daha yüksek sertlik ve dayanıklılık değerleri vermiştir. Makale, 3B yazıcılarda dolgu deseni ve dolgu oranının mekanik özelliklere etkisini göstererek, 3B yazılımında dolgu desenleri ve

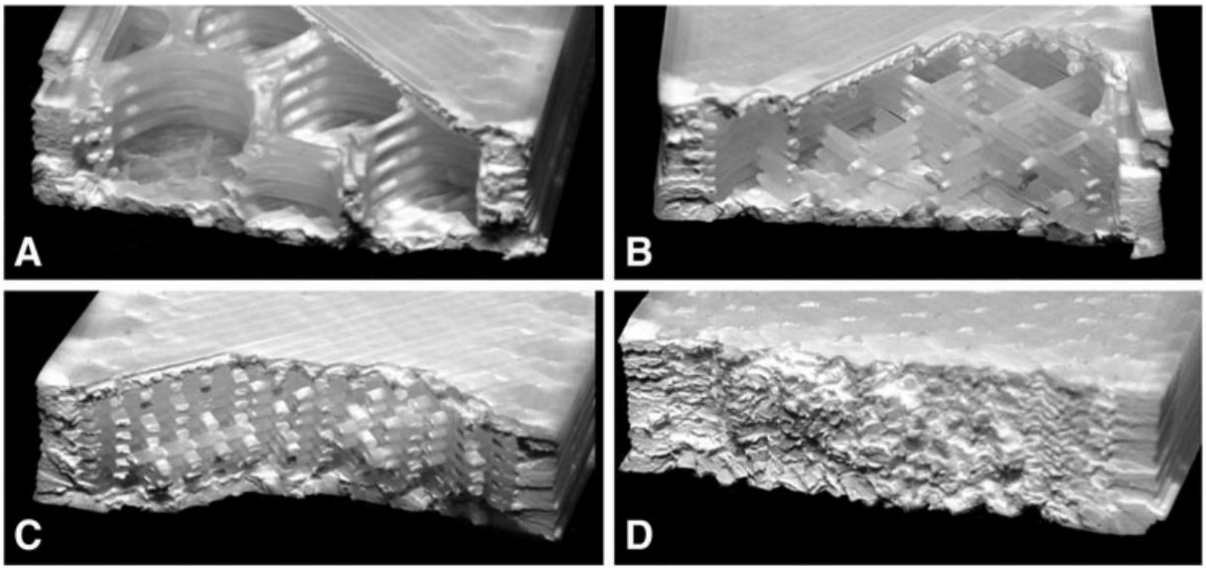
dolgu oranı gibi parametrelerin önemine dikkat çekmektedir. Şekil 2.14'te makale kapsamında denenen farklı iç desen geometrileri belirtilmiştir.



Şekil 2.14. Dolgu desenleri (Dudescu, C., & Racz, L., 2017)

Miguel Fernandez-Vicente, Wilson Callen, Santiago Ferrandiz ve Andres Conejero'nun (2016) yaptığı "Effect of Infill Parameters on Tensile Mechanical Behavior in Desktop 3B Printing" isimli makale, 3B yazıcılar kullanılarak üretilen polimerik malzemelerin, iç dolgu oranı ve dolgu deseninin mekanik özelliklerine etkisini incelemektedir. Çalışmada, çeşitli dolgu oranları ve dolgu desenleri kullanılarak üretilen PLA örnekleri test edilmiştir. Dolgu desenleri olarak "honeycomb" (arı peteği), "rectangular" (diktörtgen) ve "triangular" (üçgen) seçilmiştir. Testler, ASTM D638 standardına göre gerilme-gerinim testleri ile gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, örneklerin dolgu oranı ve dolgu deseninin mekanik özellikleri üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Honeycomb dolgu deseni, diğer dolgu desenlerine göre daha düşük bir gerilme dayanımı gösterirken, en yüksek gerinme dayanımına sahiptir. Yüksek dolgu oranları, örneğin daha yüksek gerilme dayanımı ve

elastikiyet modülü ile sonuçlanırken, düşük dolgu oranları daha düşük gerilme dayanımı ve elastikiyet modülü ile sonuçlanmıştır. Çalışmanın sonucunda, 3B yazıcılar kullanılarak üretilen parçaların mekanik özelliklerinin, dolgu oranı ve dolgu deseninin seçimi gibi üretim parametrelerine bağlı olduğu ve bu parametrelerin tasarım aşamasında dikkate alınması gerektiği sonucuna varılmıştır. Resim 2.5'te makale kapsamında farklı iç doluluk desenleri ve dolgu oranlarıyla üretilen parçaların kesitleri gösterilmiştir.



Resim 2.5. Örnek test numunelerinin kırılma detayı: (a) petek %20; (b) doğrusal %20; (c) doğrusal %50; (d) doğrusal %100 (Fernandez-Vicente, M., Calle, W., Ferrandiz, S., & Conejero, A., 2016)

Kyoung-SU Seol, Panxi Zhao, Byoung-Chul Shin ve Sung-Uk Zhang'ın (2018) yaptığı "Infill Print Parameters for Mechanical Properties of 3B Printed PLA Parts" isimli makale, 3B baskı ile üretilen PLA parçaların mekanik özellikleri üzerinde iç doluluk baskı parametrelerinin etkisini incelemektedir. Araştırma, dört farklı iç doluluk yoğunluğu ve dört farklı iç doluluk deseni kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Baskı parametreleri olarak baskı hızı, katman kalınlığı, ekstrüzyon sıcaklığı ve yatak sıcaklığı değiştirilmiştir. Bu değişkenlerin farklı kombinasyonları ile PLA parçalar üretilmiştir. Araştırmanın sonuçlarına göre, iç doluluk yoğunluğu arttıkça parçaların mekanik özellikleri de artmaktadır. Ayrıca, iç doluluk desenlerinin mekanik özellikler üzerinde etkisi bulunmaktadır ve bazı desenler diğerlerinden daha yüksek mukavemet değerlerine sahip olmaktadır. Ekstrüzyon sıcaklığı ve baskı hızının ise PLA parçaların mekanik özellikleri üzerinde az etkisi olduğu görülmüştür. Bu çalışma, 3B baskı ile üretilen parçaların mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi için iç

doluluk baskı parametrelerinin nasıl ayarlanabileceğini göstermektedir. Resim 2.6'da makale kapsamında yapılan parçaların çeşitli iç doluluk desenlerinin kesitleri gösterilmiştir.



(a) Line



(b) Lattice



(c) Concentric



(d) Crystal I



(e) Crystal II

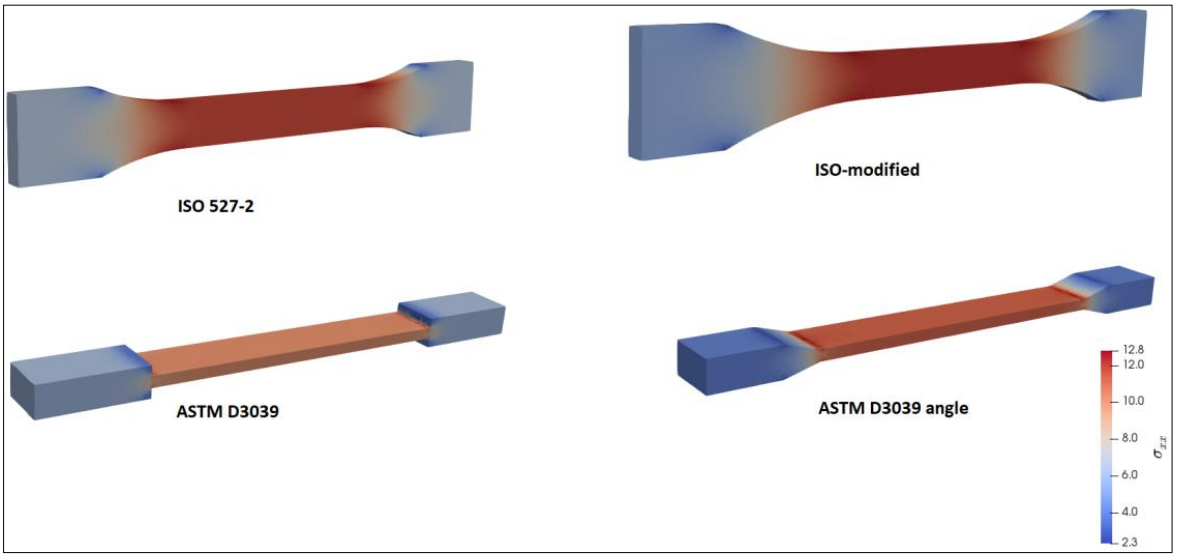
Resim 2.6. Numunenin biriktirme şekli ile iç desen (Seol, K.-S., Zhao, P., Shin, B.-C., & Zhang, S.-U., 2018)

Jan Podroužek, Marco Marcon, Kresimir Nincevic ve Roman Wan-Wendner'in (2019) yaptığı "Bio-Inspired 3B Infill Patterns for Additive Manufacturing and Structural Applications" isimli makalesi, biyolojik formlardan esinlenerek tasarlanan yeni 3 boyutlu dolgu yapıları ile ilgilidir. Makale, 3 boyutlu yazıcıların günümüzde hızla yaygınlaşması ve üretimdeki önemli rolü nedeniyle, 3 boyutlu yazıcılarda kullanılan dolgu yapılarının mukavemetlerinin artırılması üzerinde durmaktadır. Makalede, biyolojik formların incelenmesi sonucunda, kafatası, kemik yapısı ve bitkilerin özelleşmiş dokuları gibi çeşitli yapıların mukavemetlerindeki sırrın, genellikle belirli bir geometrik formun kademeli olarak oluşmasında yattığı keşfedilmiştir. Araştırmacılar, bu keşiften yola çıkarak, 3 boyutlu yazıcılarla üretilen yapıların mukavemetlerini artırmak için benzer bir yaklaşımı kullanmışlardır. Makalede, farklı geometrik şekillerin üretimi için birkaç yeni dolgu yapısı önerilmiştir. Bu dolgu yapıları, geleneksel dolgu yapılarından daha karmaşık ve güçlüdür. Ayrıca, bu yapıların tasarımı ve üretimi, geleneksel dolgu yapılarına göre daha karmaşık olmasına rağmen, 3 boyutlu yazıcıların gelişmiş teknolojileri sayesinde, üretimi mümkün hale gelmiştir. Makalede, yeni dolgu yapılarının mukavemet testleri yapılmış ve sonuçlar geleneksel dolgu yapılarına göre önemli ölçüde daha yüksek mukavemet değerleri göstermiştir. Bu sonuçlar, biyolojik formlardan esinlenerek tasarlanan dolgu yapılarının, 3 boyutlu yazıcılarla üretilen parçaların mukavemetini artırmak için kullanılması konusunda önemli bir adım olduğunu göstermektedir. Resim 2.7'de makale kapsamında çeşitli dolgu desenleri ile üretilen test parçaları ve test düzeneği gösterilmiştir.



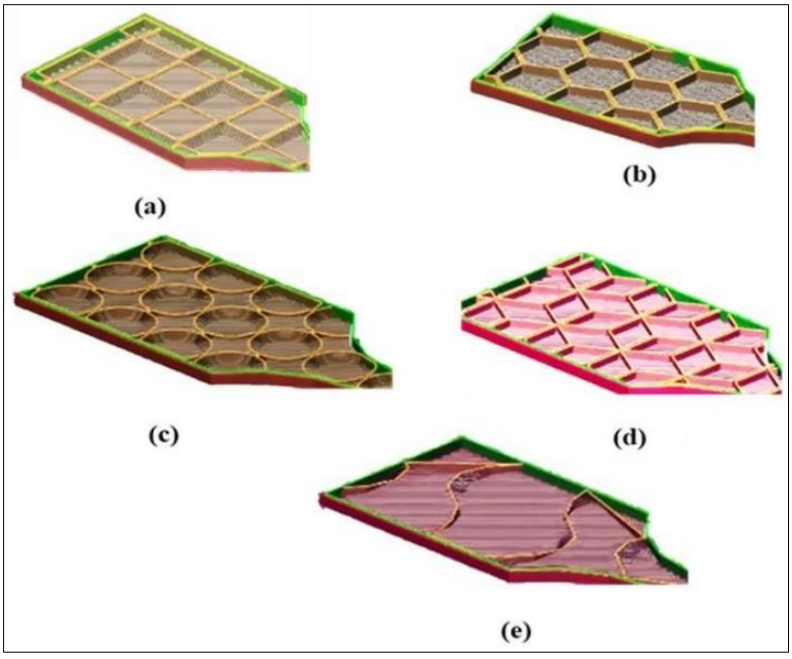
Resim 2.7. Çeşitli 3B dolgu tipleri ve boyutlarına sahip 3B baskılı numuneler (solda) ve stereoskopik dijital görüntü korelasyon sistemi ile hidrolik preste silindir sıkıştırma testi kurulumu (sağda) (Podroužek, J., Marcon, M., Ninčević, K., & Wan-Wendner, R., 2019)

Arda Özen, Dietmar Auhl, Christina Völlmecke, Josef Kiendel ve Bilen Emek Abali'nin (2021) yaptığı "Optimization of Manufacturing Parameters and Tensile Specimen Geometry for Fused Deposition Modeling (FDM) 3B-Printed PETG" isimli makale, FDM tekniğiyle üretilen PETG malzemelerinin mekanik özelliklerinin optimize edilmesine yönelik bir çalışmadır. Makalede, FDM tekniği kullanılarak PETG malzemesinden yapılmış örneklerin farklı geometrileri ve dolgu yoğunlukları test edilmiştir. İlk olarak, farklı dolgu yoğunlukları kullanılarak üretilen numunelerin mekanik özellikleri test edilmiştir. Sonuçlar, daha yüksek dolgu yoğunluklarının numunelerin mukavemetini artırdığını göstermiştir. Ayrıca, farklı geometrilerdeki numunelerin mekanik özellikleri de test edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, çekme testinde "dogbone" numunelerinin kullanılmasının, diğer geometrilerden daha doğru sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Makale ayrıca, farklı dolgu yoğunlukları ve geometriler için en iyi sonuçları veren FDM parametrelerinin belirlenmesi için yapılan optimizasyon çalışmalarını da içermektedir. Bu çalışmalar sonucunda, en iyi sonuçların, %100 dolgu yoğunluğunda ve daha yüksek tabaka kalınlığına sahip numunelerde elde edildiği belirlenmiştir. Sonuç olarak, bu çalışma FDM tekniğiyle üretilen PETG numunelerinin mekanik özelliklerinin optimize edilmesinde dolgu yoğunluğu, geometri ve üretim parametrelerinin önemli faktörler olduğunu göstermektedir. Şekil 2.15'te makale kapsamında çeşitli standartlara göre tasarlanan "dogbone" yapıları gösterilmiştir.



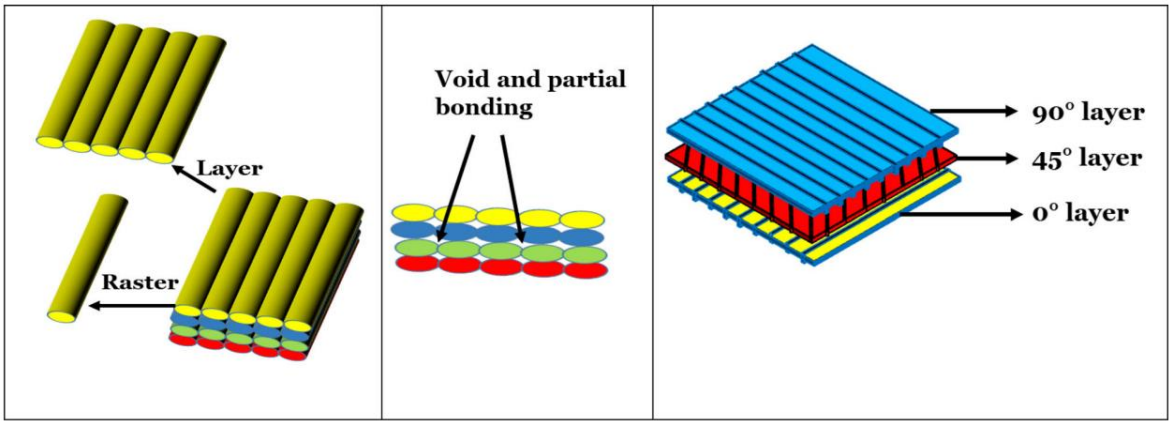
Şekil 2.15. Tek eksenli çekme testlerinin simülasyonu, gerilme dağılımı, σ_{xx}, (renkli) incelenen tüm geometrilerde sonuçlanmıştır (Özen, A., Auhl, D., Völlmecke, C., Kiendl, J., & Abali, B. E., 2021)

S. Ganeshkumar ve arkadaşlarının (2022) yaptığı “Investigation of Tensile Properties of Different Infill Pattern Structures of 3B-Printed PLA Polymers: Analysis and Validation Using Finite Element Analysis in ANSYS” isimli makale, farklı dolgu desenlerinin PLA polimerleriyle 3B baskı yapılan numunelerin mukavemet özelliklerine etkisini incelemektedir. Bu çalışmada, doğrusal dolgu, üçgen dolgu, kare dolgu, altıgen dolgu ve çift yönlü dolgu desenleri kullanılmıştır. Çalışmada, ilk olarak dolgu desenlerinin etkisi deneysel olarak belirlenmiş ve ardından sonlu elemanlar analizi (FEA) kullanılarak doğrulanmıştır. Numunelerin mukavemet özellikleri deneysel olarak belirlenirken, ANSYS yazılımı kullanılarak FEA modelleri oluşturulmuştur. Bu modeller, numunelerin gerilme ve deformasyon davranışlarını simüle etmek için kullanılmıştır. Sonuçlar, farklı dolgu desenlerinin numunelerin mukavemet özelliklerine etkisi olduğunu göstermektedir. Özellikle, üçgen dolgu deseninin en yüksek gerilme dayanımı ve modülüne sahip olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, çift yönlü dolgu deseni, en yüksek deformasyon kapasitesine sahip olmuştur. Bu çalışma, 3B baskı teknolojisinin mukavemet özelliklerini etkileyen parametrelerin belirlenmesi açısından önemlidir ve dolgu desenlerinin, 3B baskı numunelerinin mukavemet özelliklerini etkileyen önemli bir faktör olduğunu göstermektedir. Şekil 2.16’da makale kapsamında yapılan çeşitli iç doluluk desenleri gösterilmiştir.



Şekil 2.16. Kesik iç dolgu yapıları: (a) kesik oktahedron dolgu yapısı; (b) altıgen dolgu yapısı; (c) dairesel dolgu yapısı; (d) rhombile dolgu yapısı; (e) gyroid dolgu yapısı (Ganeshkumar, S., Kumar ve arkadaşları, 2022).

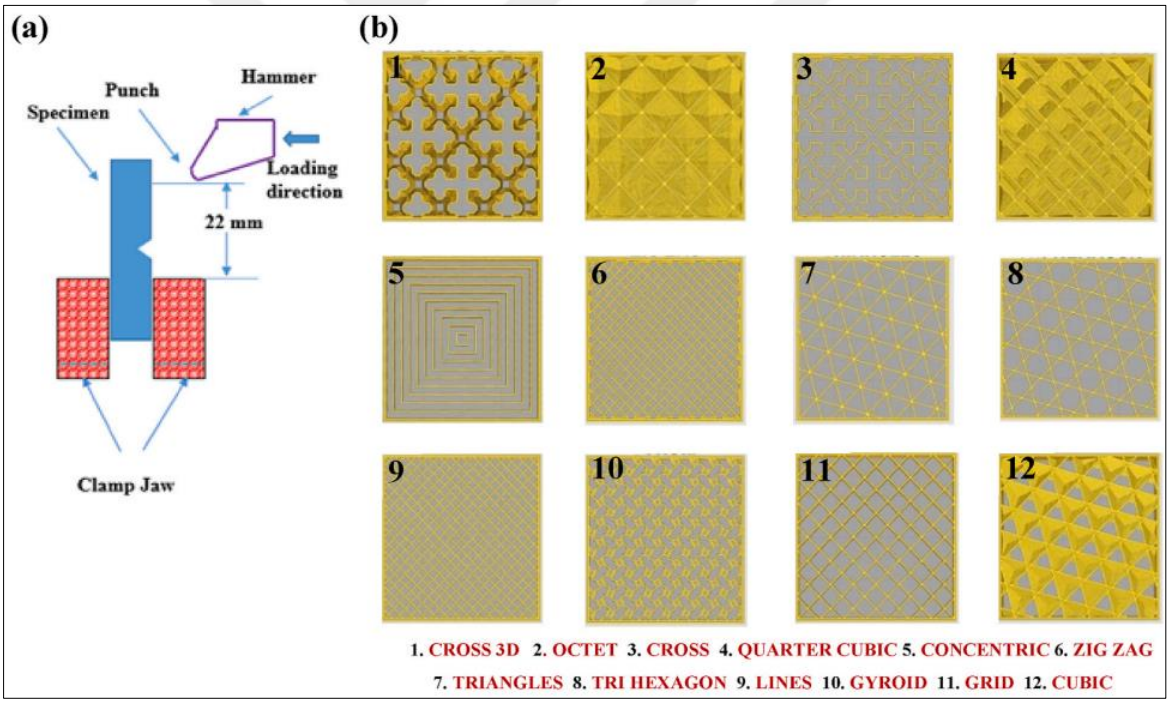
Kavita Mathur , S. M. Fijul Kabir ve Abdel-Fattah M. Seyam'ın (2020) yaptığı "Tensile properties of 3B printed continuous fiberglass reinforced cellular composites" isimli makale, sürekli cam elyafı ile takviye edilmiş hücresel kompozitlerin 3B baskı ile üretilen örneklerinin çekme özelliklerini incelemektedir. Bu çalışmada, sürekli cam elyafı takviyesinin hücresel kompozitlerin mekanik özelliklerine olan etkisi ve aynı zamanda 3B baskı parametrelerinin bu özellikler üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışmada, 3B baskı ile üretilen farklı hücresel yapıların, takviye malzemesi olarak sürekli cam elyafı ile birleştirilmesi ile oluşturulan kompozit numunelerinin çekme testi yapılmıştır. Bu numunelerin çekme testi sonuçları, sürekli cam elyafı takviyesinin, hücresel yapıların mekanik özelliklerine olan etkisini göstermektedir. Ayrıca, 3B baskı parametrelerinin (infill yoğunluğu, katman kalınlığı ve baskı hızı gibi) hücresel yapıların mekanik özelliklerine olan etkisi de incelenmiştir. Çalışmanın sonuçları, sürekli cam elyafı takviyesinin hücresel kompozitlerin çekme dayanımı ve modülü üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir. Ayrıca, iç doluluk yoğunluğunun artmasıyla birlikte, çekme dayanımı ve modülü de artmaktadır. Ancak, baskı hızı ve katman kalınlığının bu özellikler üzerindeki etkisi daha az belirgin bir şekilde görülmektedir. Bu çalışma, sürekli cam elyafı ile takviye edilmiş hücresel kompozitlerin 3B baskı ile üretiminde en uygun parametrelerin belirlenmesi için önemli bir katkı sağlamaktadır. Şekil 2.17'de makale kapsamında yapılan tasarımda katman yerleşimi belirtilmiştir.



Şekil 2.17. FDM eklemenin şematik diyagramı: rasterler, katmanlar, boşluklar, oryantasyon ve kısmi yapıştırma (Mathur, K., Kabir, S. M., & Seyam, A.-F. M., 2020)

Pradeep Kumar Mishra, P. Senthil, S. Adarsh ve M.S. Anoop'un (2021) yaptığı "An investigation to study the combined effect of different infill pattern and infill density on the impact strength of 3B printed polylactic acid parts" isimli makalede, farklı dolgu

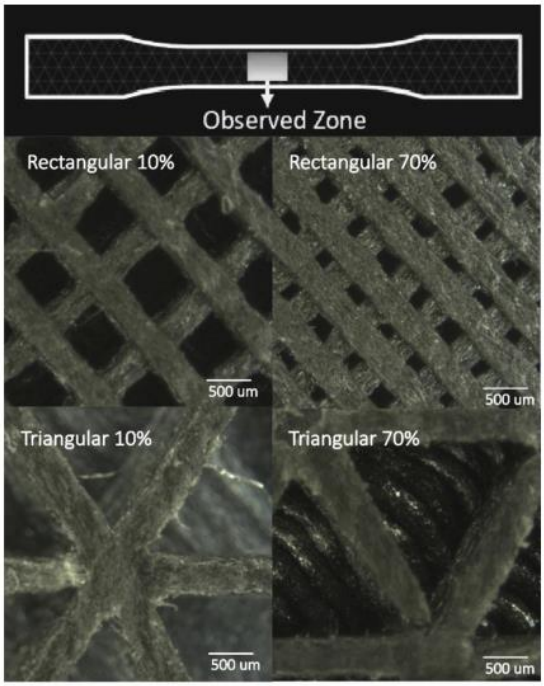
yoğunlukları ve dolgu desenlerinin 3B baskı yapılan polilaktik asit (PLA) parçalarının darbe dayanımına olan etkileri incelenmektedir. Araştırma kapsamında, 3B yazıcıda çeşitli dolgu yoğunlukları ve dolgu desenleri kullanılarak PLA numuneleri üretilmiştir. Numuneler, ASTM standartlarına uygun şekilde darbe testleri yapılmış ve sonuçlar analiz edilmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre, daha yüksek dolgu yoğunluğu, daha yüksek darbe dayanımı ile sonuçlanmaktadır. Ayrıca, bazı dolgu desenleri (örneğin honeycomb, yani arı peteği) diğerlerine (örneğin rectilinear, yani doğrusal) göre daha yüksek darbe dayanımı sağlamaktadır. Dolgu desenlerinin darbe dayanımına etkisi, dolgu yoğunluğundan daha az belirgindir. Sonuç olarak, 3B baskı yapılan PLA parçalarının darbe dayanımının artırılması için, daha yüksek dolgu yoğunlukları ve belirli dolgu desenlerinin kullanılması önerilmektedir. Şekil 2.18'de makale kapsamında çeşitli iç doluluk desenleri ile yapılan parçaların kesitleri gösterilmiştir.



Şekil 2.18. Darbe testi şeması ve düzenleme: (a) darbe test ekipmanının şeması; (b) farklı dolgu desenlerinin geometrik düzenlemesi (Mishra, P. K., Senthil, P., Adarsh, S., & Anoop, M. S., 2021)

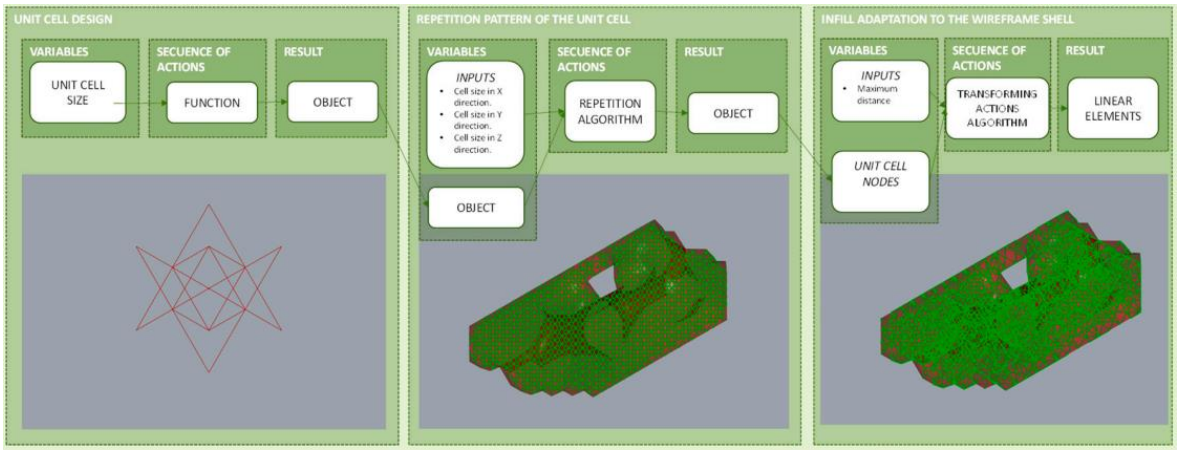
Juan Naranjo-Lozada, Horacio Ahuett-Garza, Pedro Orta-Castañón, Wilco M.H. Verbeeten ve Daniel Sáiz-González'in (2019) yaptığı "Tensile properties and failure behavior of chopped and continuous carbon fiber composites produced by additive manufacturing" isimli makalesinde, karbon fiber takviyeli kompozitlerin (CFRP) 3 boyutlu baskı ile

üretiminde lif uzunluğunun ve lif oryantasyonunun, mekanik özellikler ve hasar davranışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışmada, CFRP numuneleri iki farklı yöntemle üretilmiştir: sürekli elyaf takviyeli kompozitler (CFRP-CC) ve kesikli elyaf takviyeli kompozitler (CFRP-SC). CFRP-CC numuneleri, karbon elyafın 3 boyutlu yazıcı ile doğrudan baskılanması yoluyla üretilirken, CFRP-SC numuneleri ise daha önce hazırlanmış bir karbon elyaf takviyeli filamanın kullanımıyla üretilmiştir. Numuneler farklı lif uzunluklarına ve oryantasyonlarına sahip olacak şekilde tasarlanmış ve üretilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, uzun elyaf takviyeli CFRP numuneleri, kısa elyaf takviyeli numunelere göre daha yüksek maksimum gerilmeye ve daha düşük gerilme değerlerine sahip olmuştur. Ayrıca, uzun elyaf takviyeli numuneler daha yüksek elastik modül ve daha yüksek enerji emilimi kapasitesine sahiptir. Sonuçlar ayrıca, numunelerin gerilme-yoğunluk eğrisinin, malzeme tiplerine ve takviye yöntemlerine bağlı olarak farklılıklar gösterdiğini göstermiştir. Bu çalışma, 3 boyutlu yazıcı ile üretilen karbon fiber takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerini ve hasar davranışını anlamak için önemli bir adımdır. Ayrıca, lif uzunluğunun ve oryantasyonunun CFRP'lerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi de gösterilmiştir. Resim 2.8'de makale kapsamında yapılan diktörtgen ve üçgen iç doluluk deseni ve çeşitli yoğunlukların kesit görüntüleri gösterilmiştir.



Resim 2.8. Onyx örneklerinde test edilen dolgu geometrileri (dikdörtgen ve üçgen) ve yoğunluklar (%10 ve %70) (Naranjo-Lozada, J., Ahuett-Garza, H., Orta-Castañón, P., Verbeeten, W. M. H., & Sáiz-González, D., 2019)

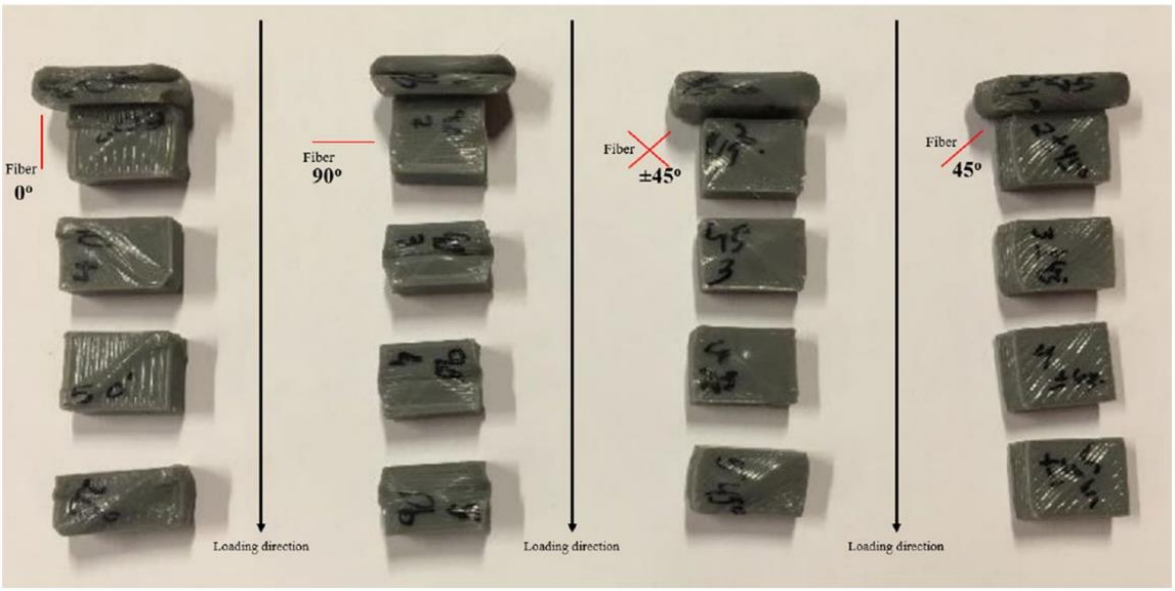
Amabel García-Dominguez, Juan Claver ve Miguel A. Sebastián'in (2020) yaptığı "Integration of Additive Manufacturing, Parametric Design, and Optimization of Parts Obtained by Fused Deposition Modeling (FDM). A Methodological Approach" isimli makale, Fused Deposition Modeling (FDM) ile üretilen parçaların tasarımı, optimizasyonu ve üretim süreçlerinin birleştirilmesini ele almaktadır. Bu amaçla, öncelikle tasarım parametreleri ve FDM üretim parametreleri belirlenmiş ve optimize edilmiştir. Ardından, parçaların üretimi gerçekleştirilmiştir. Makalede, bir adet örnek parça üzerinden anlatılan süreç, başarılı bir şekilde tasarlanan ve optimize edilen parçanın FDM ile üretimini kapsamaktadır. Tasarım, SolidWorks parametrik modelleme yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve OptimumLAP yazılımı ile optimize edilmiştir. Bu yazılım, üretim parametreleri ile birlikte en uygun tasarım parametrelerini belirleyerek, üretim sürecindeki zaman ve maliyeti minimize etmeyi amaçlamaktadır. Optimize edilmiş tasarım parametreleri kullanılarak, parça FDM teknolojisi ile üretilmiştir. Üretim sürecinde kullanılan parametreler, tabaka kalınlığı, dolgu yoğunluğu ve baskı hızını içermektedir. Üretilen parça, optimize edilmiş parametrelerin kullanımı ile yüksek kaliteli ve doğru boyutlara sahip olmuştur. Sonuç olarak, makale, FDM ile üretilen parçaların tasarımı, optimize edilmesi ve üretim süreçlerinin birleştirilmesinin mümkün olduğunu ve bu yöntemin parça üretiminde zaman ve maliyet tasarrufu sağladığını göstermektedir. Şekil 2.19'da makale kapsamında optimize edilmiş parçanın tasarım arayüzü belirtilmiştir.



Şekil 2.19. Dolgu tasarımı ve bunun hafif kabuk yapısına uyarlanması için programlama yapısı (García-Dominguez, A., Claver, J., & Sebastián, M. A., 2020)

Catarina Silva, Ana Isabel Pais, Gabriela Caldas, Barbara P. P. A. Gouveia, Jorge Lino Alves ve Jorge Belinha'nın (2021) yaptığı "Study on 3B printing of gyroid-based structures for

superior structural behaviour” isimli makale, 3B baskı ile jiroskopik temelli yapıların üretiminde kullanılan parametrelerin yapısal performansı üzerindeki etkisini incelemektedir. Bu amaçla, FDM tekniği kullanılarak PLA malzemesi ile jiroskopik tabanlı numuneler üretilmiştir. Farklı iç doluluk yoğunlukları ve baskı hızları ile farklı yönlere ve açılara göre numuneler üretilerek, yapısal performansları test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, jiroskopik temelli yapıların daha yüksek bir çözünürlük ile üretildiğinde daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, iç doluluk yoğunluğunun artırılmasının da yapısal performansı artırdığı görülmüştür. Bununla birlikte, baskı hızının artmasıyla birlikte yapısal performansın azaldığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, jiroskopik temelli yapıların 3B baskı kullanılarak üretimi için uygun parametrelerin belirlenmesinde bu çalışmadan elde edilen sonuçlar kullanılabilir. Resim 2.9’da makale kapsamında farklı jiroskopik iç desen açılarıyla üretilen parçaların basma testi sonrası görüntüleri gösterilmiştir.



Resim 2.9. Kullanılan tarama açısı ve yükleme yönünün belirtildiği test sonrası sıkıştırma numuneleri (Silva, C., Pais, A. I., Caldas, G., Gouveia, B. P., Alves, J. L., & Belinha, J., 2021)

Bu literatür taraması, FDM ekleme işleminde kullanılan iç doluluk deseninin ve oranının, üretilen parçaların yapısal dayanımı üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışmalar, doluluk deseninin ve oranının, parçanın mekanik özelliklerini, mukavemetini ve tokluğunu önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Doluluk deseni, malzemenin parçanın içinde nasıl dağıldığını belirler. En yaygın doluluk desenleri arasında kafes, bal peteği ve üçgen bulunur. Her desenin kendine özgü avantajları ve dezavantajları vardır. Kafes deseni yüksek

mukavemet ve tokluk sunarken, bal peteği deseni daha hafif ve daha az malzemeyle üretilir. Üçgen deseni ise ikisinin arasında bir denge sağlar. Doluluk oranı, parçanın ne kadar yoğun olduğunu belirler. Daha yüksek doluluk oranı, daha yüksek mukavemet ve tokluk sağlar. Ancak, daha fazla malzeme ve üretim süresi de gerektirir. Optimum doluluk oranı, parçanın kullanım amacına ve istenen özelliklere bağlıdır.

Literatür taraması, FDM eklenen parçaların yapısal dayanımını optimize etmek için doluluk deseni ve oranının dikkatli bir şekilde seçilmesi gerektiğini göstermiştir. Literatür araştırmalar sonucunda ızgara, sekizgen, petek, sinusoid, kübik, doğrusal, üçgen ve jiroskopik iç doluluk desenlerinin yapısal dayanımı etkilediği gözlemlenmiştir. İç doluluk oranı %0-%100 arasında değişmektedir ve genelde oran arttıkça daha yüksek dayanım ortaya çıkmaktadır. Bunun dışında nozul çaplarının 0.1-1.2 mm arasında değiştiği, ayrıca baskı hızı, katman kalınlığı gibi parametrelerin de yapısal dayanımı çeşitli ölçüde etkilediği daha önce yapılan çalışmalar sonucunda belirlenmiştir. Bir diğer etkili parametre de iç doluluk oranıdır. Bu tez çalışmasında literatür araştırmasında önemli görülen parametreler değiştirilerek burulma, çekme ve basma testleri denenmiş, ayrıca malzeme etkileri de araştırılmıştır.

3. TEMEL BİLGİLER

3.1. FDM Tekniğiyle 3 Boyutlu Baskıda Farklı Kriterlerin Yapısal Dayanıma Etkisi

Son yıllarda üç boyutlu (3B) baskı teknolojisine büyük ilgi gösterilmektedir. 3B baskı teknolojisi, tek bir teknolojiden ziyade çeşitli avantaj ve dezavantajlara sahip diğer birçok teknolojinin toplamı olarak kabul edilmektedir. Bunlar arasında, kaynaşmış biriktirme modellemesi (FDM) diğer 3B baskı yöntemlerine kıyasla daha ekonomiktir, ayrıca çeşitli malzemelerle üretime uygundur; bu nedenle, diğer geleneksel 3B baskı teknolojilerinden daha yaygın olarak kullanılmaktadır. 3B yazıcıların avantajları, ürünlerde yapısal inovasyonu mümkün kılmaktadır. Geleneksel üretim teknolojisi kullanılarak üretilmesi zor olabilecek herhangi bir şekil kolayca uygulanabilir ve bitmiş ürünlerin üretimi sırasında üretim sürecini basitleştirmesi nedeniyle maliyetlerin ve zamanın azaltılmasına yardımcı olabilir. Özellikle, tek gövdeli imalat sayesinde zaman ve maliyetin azalmasına ve montaj ve kaynak işlemlerinin basitleştirilmesi sayesinde imalat sürecindeki diğer maliyetlerin düşürülmesine katkıda bulunulabilir. Ayrıca, ürünlerin dolgu yoğunluğunu ayarlayarak karmaşık şekillere ve boş iç kısımlara sahip ürünlerin üretimini kolaylaştırılabilir ve ürünün iç kısımlarının topolojisinin optimizasyonunu sağlanabilir, böylece mukavemeti korurken ağırlığı yarı yarıya azaltılır ve işlemden sonra kullanılan malzemelerde fazla kullanıma yol açılmaz. Bununla birlikte, 3B baskının sayısız avantajına rağmen, bu teknolojii ile yapılan ürün kalitesinin eksikliği, ürünlerin endüstride kullanımını kısıtlamıştır (Seol, K.-S. ve arkadaşları, 2018).

FDM modunda kullanılabilen malzemeler polimer malzemeler olan genellikle polilaktik asit (PLA) ve akrilonitril bütadien stiren (ABS)'dir. Polimer malzemeler, karmaşık parçaları basitleştirebilen modülerleştirme için avantajlı olan tasarım ve işlevsel kombinasyon ve şekillendirilebilirlik açısından üstün özelliklere sahiptir. Bununla birlikte, seçilen polimerik malzemeleri basmak için FDM kullanıldığında, mevcut enjeksiyon yöntemlerinden daha düşük bir mukavemet üretilir. Ayrıca, basılan ürünler uzun süre mekanik yükler (titreşim ve şok), sıcaklık ve nem gibi dış ortamlara maruz kalırsa, tasarımda gerekli olan mekanik özellikler olması gereken seviyeden daha fazla bozulur. Bu nedenle, halihazırda endüstrilerde kullanılan mekanik yapılar muhtemelen zorlu ortamlara ve çeşitli dış sınır

koşullarına maruz kaldığından, mekanik yapılarda kullanılan malzemelerin güvenilirliğini ve sağlamlığını atamak için yapılarda kullanılan malzemelerin gerçek kullanım koşullarına yanıt olarak mekanik özellikleri tasarım aşamasında doğru bir şekilde belirlenmelidir (Seol, K. S. ve arkadaşları, 2018).

3 boyutlu FDM baskıda çeşitli baskı ayarları yapılmaktadır. Genel olarak yapısal dayanıma en çok etki eden kriterler aşağıdakilerdir:

- Kullanılan nozulun çapı (Kiński, W., & Pietkiewicz, P., 2020)
- İç doluluk oranı (Ganeshkumar, S. ve arkadaşları, 2022), (Mishra, P. K. ve arkadaşları, 2021)
- İç doluluk geometrisi (Birosz, M. T. ve arkadaşları, 2022), (Kain, S. ve arkadaşları, 2019)
- Dış katman kalınlığı
- Nozul sıcaklığı
- Tabla sıcaklığı
- Baskı hızı (Dudescu, C., & Racz, L., 2017)
- Filament malzemesi (Alarifi, I. M., 2023)

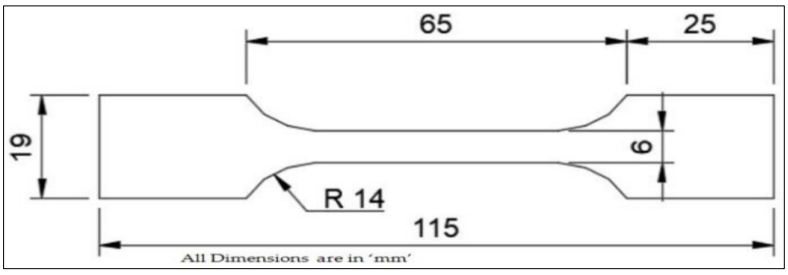
3.1.1. İç doluluk oranının yapısal dayanıma olan etkisi

Hızlı prototipleme, israfı azaltmak ve karmaşık modeller oluşturmak için kullanılan zaman kazandırıcı bir eklemeli üretim tekniğidir. Endüstriyel, imalat ve araştırma-geliştirme sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Üç boyutlu (3B) baskı, uygulamalara bağlı olarak hem metallerle hem de polimer malzemelerle elde edilebilir. Malzeme dolguları, destek ve katman kalınlığı, ürünlerin mukavemetinde önemli bir rol oynar. Izgaralar ve üçgen, altıgen, üçgen ve doğrusal yapılar gibi dolgu yapıları standart dolgu yapılarıdır. Dolgu yapıları ile birlikte dolgu yoğunluğu da 3B baskılı nesnelerin mekanik özelliklerinde önemli bir rol oynar (Ganeshkumar, S. ve arkadaşları, 2022).

S.Ganeshkumar ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada füzyon biriktirme modelleme tekniği kullanılarak üretilen bir PETG parçasında dolgu yoğunluğunun çürükler üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Mekanik özelliklerin dolgu yapıları ve yoğunluğundan önemli ölçüde etkilendiği bulunmuştur. Ticari polimer malzemelerin çekme mukavemeti, FDM 3B-Baskı tekniği için araştırılmıştır. Farklı dolgu oranları için 3B baskılı parçaların teorik ve deneysel

kütlelerini gösterdi. Daha yüksek kütleye sahip numune iyi gerilme özelliklerine sahipti. Mekanik özellikler üzerine benzer bir araştırma, ASTM D638 Tip IV Standardına uygun olarak 3B baskılı PLA malzemelerinde gerçekleştirilmiş, numunenin akma dayanımı evrensel bir test makinesi kullanılarak test edilmiş ve ANSYS yazılımı kullanılarak sonlu eleman analizi ile doğrulanmıştır. Biyomedikal uygulamalarda çeşitli dolgu tasarımlarına ve dolgu oranlarına sahip biyolojik olarak emilebilir polimer test numunelerinin özellikleri araştırılmıştır (Ganeshkumar, S. ve arkadaşları, 2022).

ABS 3B baskılı parçaların mekanik özellikleri sıcaklık, dolgu yoğunluğu, baskı hızı vb. ile ilgili olarak test edilmiştir. Numunenin gerilme mukavemeti ve darbe direnci incelenmiş ve %100 dolgu için baskı süresinin daha yüksek olduğu gösterilmiştir. Bu nedenle, deney sonuçları, uygulamalara dayalı olarak ve yük parametrelerini göz önünde bulundurarak %100'den daha az dolgu aralığını önermektedir (Ganeshkumar, S. ve arkadaşları, 2022).
3B baskılı numune ASTM D638 Tip IV'e göre modellenmiş ve mekanik testlere tabi tutulmuştur. ASTM D638 standardı, güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş plastikleri test etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Test numuneleri, test cihazının çenelerine belirli bir kavrama aralığında yerleştirilmiş ve arızalanana kadar çekilmiştir. Şekil 3.1'de makale kapsamında yapılan test parçasının tasarım ölçüleri belirtilmiştir. (Ganeshkumar, S. ve arkadaşları, 2022).



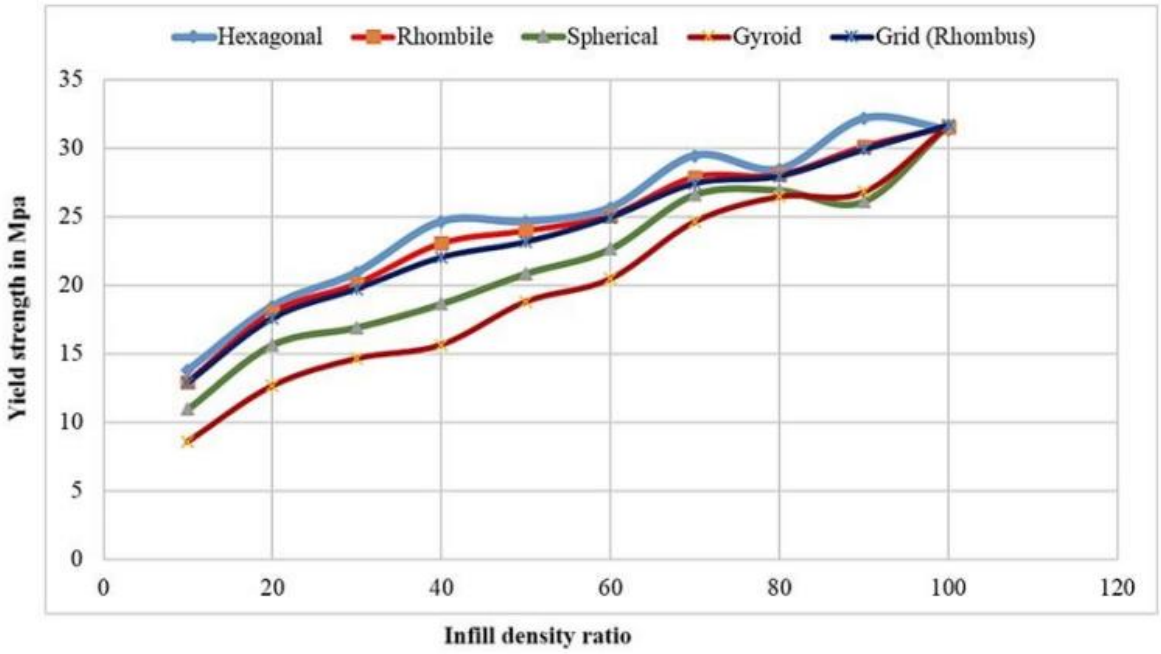
Şekil 3.1. ASTM D638 numunesi (Ganeshkumar, S. ve arkadaşları, 2022).

Numune test cihazında bağlanmış ve akma dayanımı beş farklı dolgu yapısı için gözlemlenmiştir: jiroid, eşkenar dörtgen, küresel ve bal peteği yapıları (altıgen). Çapraz kafanın yer değiştirmesi hidrolik sistem tarafından sağlanmış ve uygulanan basınç numunenin kırılma noktasında kaydedilmiştir. Numunenin gerilme mukavemeti, test çapraz kafalarında numunenin başarısız olduğu andaki basınçtan alınmıştır. ASTM D 638

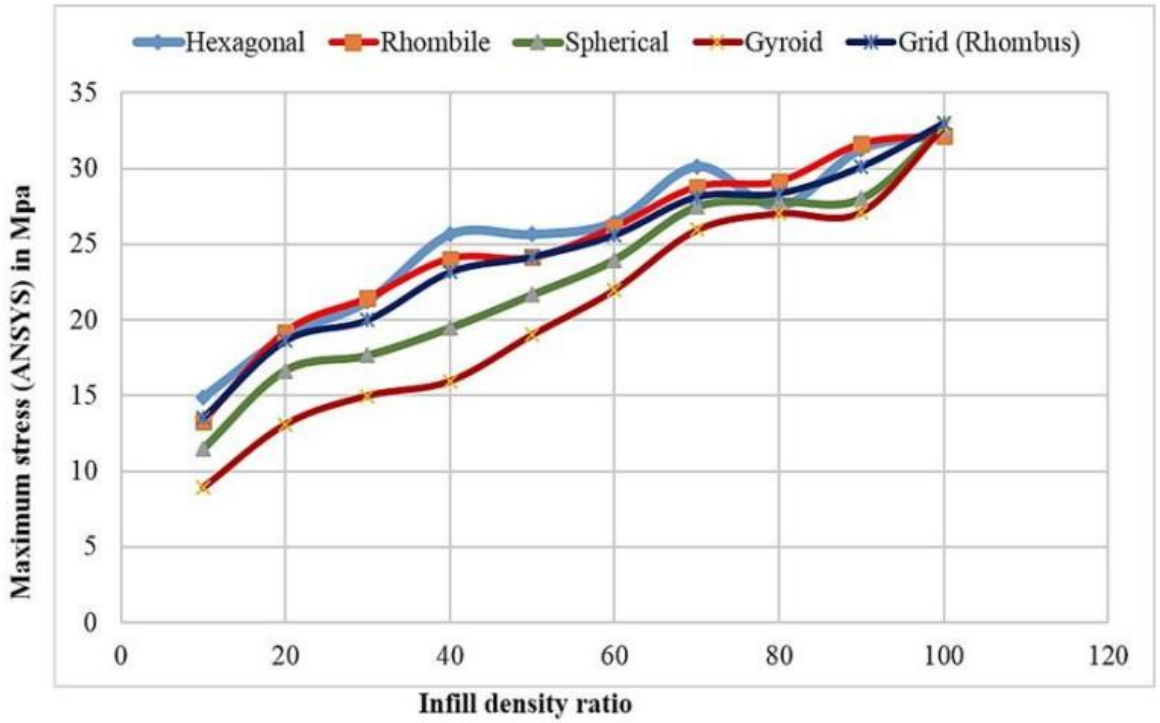
numunesi, değişen dolgu oranlarına sahip çeşitli dolgu yapıları ile yüklenmiş ve numune arızasındaki basınç kaydedilmiştir. (Ganeshkumar, S. ve arkadaşları, 2022).

Çekme özellikleri, malzemenin kırılma gelişimi ve kopma yoluyla evrensel test makinesinde gözlemlenmiştir. Numunenin maksimum akma dayanımı, dolgu yapısına bakılmaksızın daha yüksek çımıştır. Benzer şekilde, numunenin dolgu oranının arttırılması akma dayanımındaki sapmayı azaltmıştır. Bu olgu, dolgu oranındaki artışın akma dayanımında bir artışa yol açtığını ve bunun ANSYS sonuçlarında da tekrarlandığını göstermektedir (Ganeshkumar, S. ve arkadaşları, 2022).

Çekme testlerinden elde edilen maksimum akma dayanımı ile ANSYS sonuçları arasındaki ilişki sırasıyla Şekil 3.2 ve 3.3'te gösterilmektedir. Dolgu yapılarından (jiroid, eşkenar dörtgen, küresel ve bal peteği) bağımsız olarak, dolgu yapılarında malzeme oranı arttıkça akma dayanımlarının birbirine daha yakın olduğu gözlemlenmiştir: akma dayanımı bağlayıcı katmanlarla orantılıdır ve malzemenin mekanik özelliklerinde artışa yol açar (Ganeshkumar, S. ve arkadaşları, 2022).



Şekil 3.2. Değişken dolgu yapıları için üniversal test makinesinde elde edilen maksimum akma dayanımı ve dolgu oranı (Ganeshkumar, S. ve arkadaşları, 2022).



Şekil 3.3. ANSYS tezgahında elde edilen maksimum akma dayanımı ve çeşitli dolgu yapıları için dolgu oranı (Ganeshkumar, S. ve arkadaşları, 2022).

3B baskı teknolojisinin yaygınlaşması, araştırmacıların farklı laboratuvar ve endüstriyel uygulamalar için yüksek darbe enerjisi emici yapı tasarlamak üzere karmaşık geometrik yapılar üretmesini sağlamıştır. Pradeep Kumar Mishra ve arkadaşlarının yaptıkları araştırmada, farklı dolgu desenleri ve dolgu yoğunluklarının kombinasyonu ile PLA (Polilaktik asit) 3B baskılı bileşenlerin plastik deformasyonu sırasında emilen enerjiyi ölçmek için bir Darbe testi gerçekleştirilmiştir. Izod darbe testi aracılığıyla numuneler üzerinde yapılan deneysel araştırma, her bir dolgu deseni için %85 dolgu yoğunluğunda enerji emiliminin maksimum olduğu sonucuna varmıştır. Sonuçlar, numunelerin kırılma direncinin, darbe testi sırasında çentik alanında indüklenen gerilme ve çatlak ilerlemesinin ve laminat kompozit mekaniği tarafından özetlenen darbeyle kopmanın dinamiklerinin karşılıklı bir fonksiyonu olduğunu göstermiştir (Mishra, P. K. ve arkadaşları, 2021).

Numunelerdeki gerilme yoğunluğu faktörü ve çatlak ilerlemesinin etkisini araştırmak için numunelerin mezoyapısı dikkate alınmıştır. Çizgi dolgu modeli, temel geometrik topolojisi için incelemeye alınmış ve dolgu yüzdesindeki değişimin gerilme yoğunluğu ve çatlakların yayılması üzerindeki etkisi incelenmiştir. Üç dolgu yüzdesi (%50, %85 ve %100) dikkate alınmıştır (Mishra, P. K. ve arkadaşları, 2021).

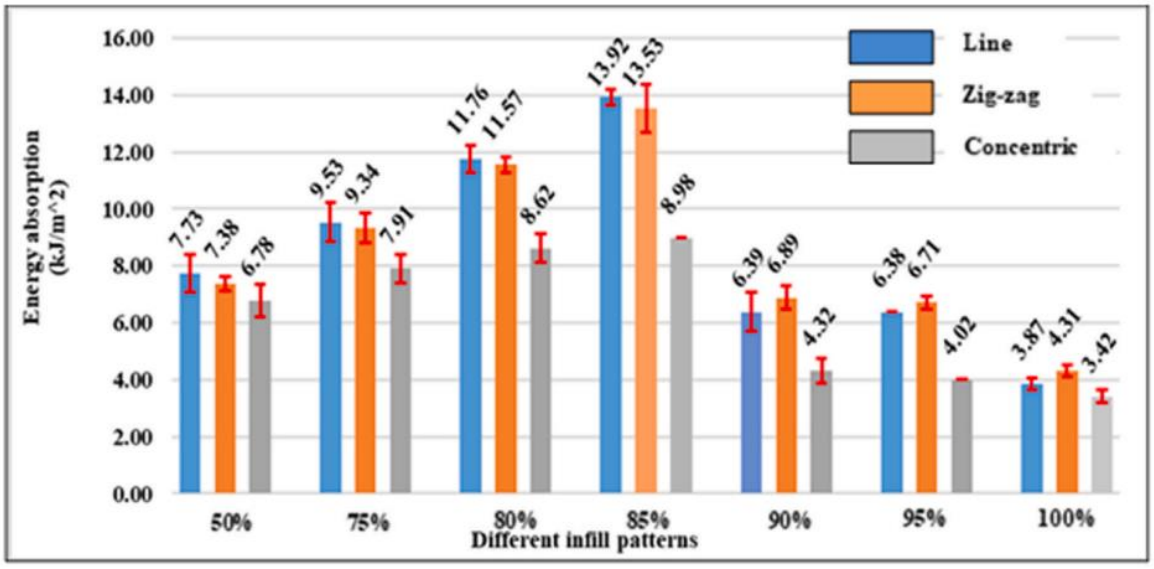
Tüm dolgu desenleri için darbe direnci, %85 dolgu yoğunluğunda diğer dolgu yoğunluklarına kıyasla en yüksek darbe direnci değerini göstermiştir. %85'lik bir dolgu yoğunluğunda, bazı katmanlar delaminasyona uğramıştır ve bu süreç çatlak ucu tarafından gerçekleştirilen kırılma enerjisini azaltmış ve numuneler tarafından daha fazla miktarda enerjinin absorbe edilmesine izin vermiştir. %85'lik dolgu yoğunluğunda maksimum ve minimum darbe direnci değeri arasındaki fark yaklaşık %55,07'dir ve dolgu yoğunluğu değeri arttıkça fark değeri azalmaktadır. En düşük fark değeri %100 dolgu yoğunluğunda %26,02 olarak kaydedilmiştir. Sonuçlar, maksimum darbe direncinin (13,91 kJ/m^2) %85 dolgu yoğunluğu ve çizgi dolgu deseni kombinasyonunda kaydedildiğini ve bu değerin saf PLA tarafından sağlanan darbe direncinin 3,49 katı olduğunu göstermiştir. 100 dolgu yoğunluğunda, çatlak uzunluğu her dolgu deseni için neredeyse aynı büyüklüğe sahiptir ve darbe direnci değerleri bunu doğrulamıştır. Bu olgu, dolgu yoğunluğu arttıkça numunelerin daha homojen göründüğünü ve çatlağın çentik alanı boyunca kolayca yayıldığını göstermiştir. Ayrıca, %100 ve %95 dolgu yoğunluğunda, kırılma bölgesindeki delaminasyon her dolgu modelinde kaybolmuştur. Sonuç olarak, numunelerin darbe direnci %85 dolgu yoğunluğundan sonra keskin bir şekilde azalmış ve hatta %50'de darbe direncinin altına düşmüştür (Mishra, P. K. ve arkadaşları, 2021).

Darbe dayanımının, gerilme yoğunluğu faktörü ile çatlak ilerlemesi olgusu arasındaki dengeyi sağlayan mezoyapının doğasına sıkı sıkıya bağlı olduğu gözlemlenmiştir. Böylece %85, her bir dolgu şablonunun bir kombinasyonu ile dolgu yoğunluğu aralığı boyunca (%50 ila %100) en yüksek enerji emme potansiyelini göstermiştir (Mishra, P. K. ve arkadaşları, 2021).

Düşük dolgu yoğunluklarında (%50, %75, %80 ve %85) numunedeki her bir baskılı boncuk arasında bir boşluk bulunmaktadır. Bu nedenle, dolgu desenindeki çatlak yayılımı sürekli değildir ve bu çatlak çekirdeği nedeniyle direnç göstermiştir ve sınırlı yüzey alanı nedeniyle kırılmaya daha ağır stres neden olmuştur (Mishra, P. K. ve arkadaşları, 2021).

Çatlak ilerlemesi, daha yüksek dolgu yoğunluğunda (%90, %95 ve %100) kırılma oranını katalize etmiştir ve bu fenomen, numunenin mezo yapısındaki dirençli bölgedeki devamlılık nedeniyle meydana gelmiştir (Mishra, P. K. ve arkadaşları, 2021). Mezostrüktürdeki katmanların delaminasyonu, darbe sırasında çatlak ilerlemesinin sürekliliğini bozmuştur. Çatlak yayılımındaki bu kesinti, kırılma bölgesinde, yapının enerji emme kabiliyetini

kademeli olarak arttırmıştır. Şekil 3.4'te makale kapsamında çeşitli iç doluluk deseni ve yoğunluklarıyla yapılan test parçalarının enerji emilim değerleri belirtilmiştir (Mishra, P. K. ve arkadaşları, 2021).



Şekil 3.4. Farklı dolgu yoğunluğu ve desenlerinin kombinasyonunda darbe enerjisi emilimi (Mishra, P. K. ve arkadaşları, 2021).

Yukarıda belirtilen iki ayrı makalede çıkan sonuçlar değerlendirildiğinde FDM yöntemiyle 3B baskıda iç doluluk oranı arttıkça yapısal dayanım etkisi artmaktadır. Ama %85-%100 arası bir doluluk oranında çatlakların oluşumu artmaktadır. Dolayısıyla bu tez çalışmasında farklı iç doluluk geometrileri için %65-%85 arası bir doluluk oranı uygulanmıştır.

3.1.2. Kullanılan nozul çapının yapısal dayanıma etkisi

Nozul çapı, baskıda kullanılan katman kalınlığını belirler. Daha büyük bir nozul çapı, daha kalın katmanlar demektir. Bu, baskının daha hızlı olmasını sağlayabilir ancak detayları azaltabilir. Daha ince katmanlar, daha yüksek bir çözünürlük sağlar ve daha güçlü yapılar elde edilmesine yardımcı olabilir. Ayrıca nozul çapı, malzemenin akış hızını etkiler. Daha büyük bir nozul, daha fazla malzeme çıkarabilir, ancak bu yüzey kalitesini etkileyebilir. Daha küçük bir nozul, daha ince detaylar sağlayabilir ancak baskı süresini uzatabilir. Nozul çapı, tabakalar arasındaki bağlantıyı etkiler. Daha büyük bir nozul çapı, daha geniş tabaka birleşimleri demektir, bu da yapısal dayanımı azaltabilir. Daha küçük bir nozul, daha ince

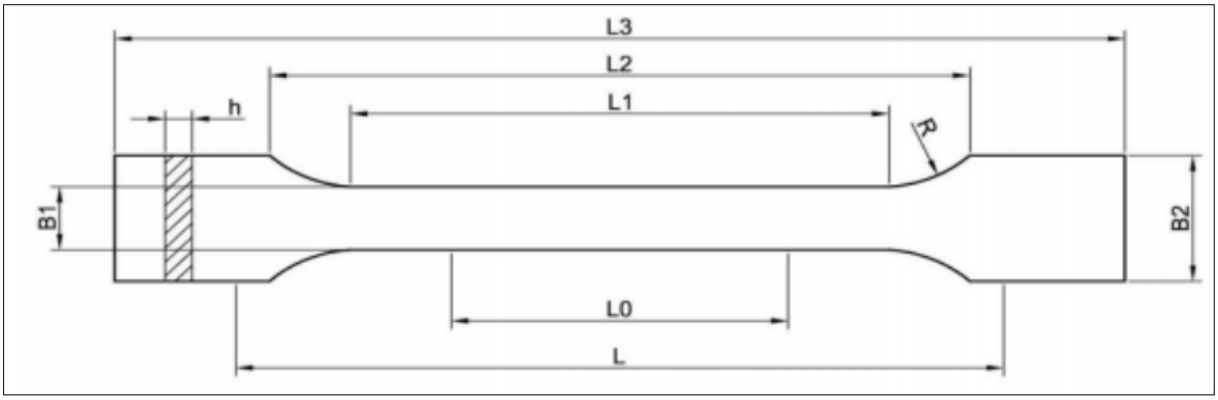
ve sağlam birleşimler sağlayabilir. Bunun dışında nozul çapı, baskı sırasında malzemenin nasıl dağıldığını etkiler. Daha büyük bir nozul, daha büyük dolgu oranları sağlayabilir ancak iç dolgudaki boşlukları artırabilir. Daha küçük bir nozul, daha homojen bir dolgu sağlayabilir ancak baskı süresini arttırabilir.

Örnek bir makale, baskı nozul çapının etkisini dikkate alarak çekme mukavemeti testlerinin sonuçlarını sunmaktadır. FDM teknolojisinde 3B baskı yöntemi açıklanmaktadır. Araştırmanın amacı, kafaya takılan baskı nozul çapının etkisini araştırmaktı. İki tip dolgu ile basılan numuneler test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar özetlenmiş ve karşılaştırılmıştır. Numunelerin baskı süresi her bir nozulun çapı ile karşılaştırılmıştır. Mukavemet testlerine dayanarak, FDM baskı teknolojisi ile yapılan numunelerin çekme mukavemetinin kullanılan baskı nozulu çapı ile orantılı olduğu sonucuna varılabilir (Kiński, W., & Pietkiewicz, P., 2020).

Baskı işlemi sırasında aşağıdaki faktörler etkili olur (Kiński, W., & Pietkiewicz, P., 2020):

- Filament çapı ve toleransı
- Baskı kafası sıcaklığı
- Malzeme ekstrüzyon hızı

Mukavemet numunelerinin kırılma testleri, germe ve sıkıştırma için tasarlanmış Werkstoffprufmaschinen test cihazında gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.5'te makale kapsamında denenen test parçasının tasarım ölçüleri belirtilmiştir. (Kiński, W., & Pietkiewicz, P., 2020).



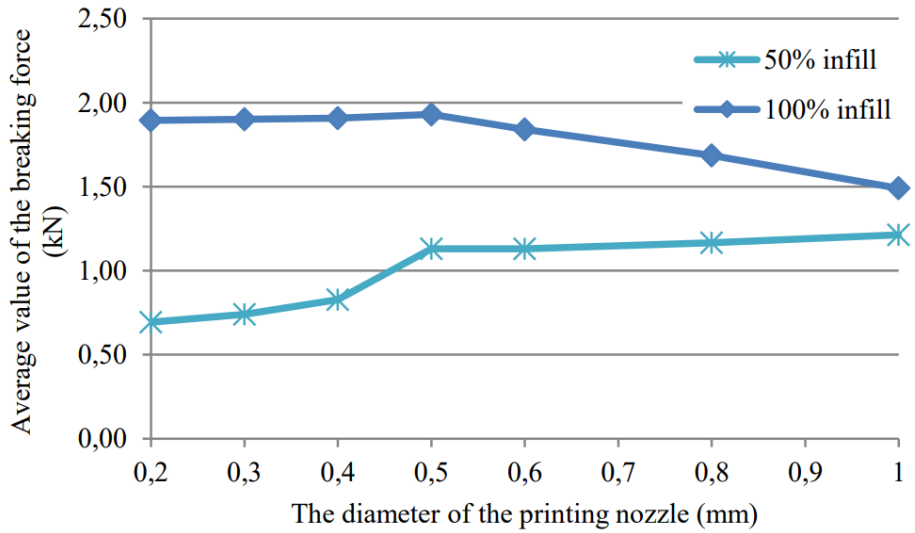
Şekil 3.5. Mukavemet testleri için tasarlanmış numune (Kiński, W., & Pietkiewicz, P., 2020).

Mukavemet testlerinin sonuçlarının ortalamasını almak için mukavemet numuneleri üçerli olarak basılmıştır. Patlama kuvvetinin literatürden bilinen dolgu derecesine bağlı seyri

nedeniyle (Miazio, 2016), test numuneleri %50 ve %100 dolgu derecesi ile basılmıştır. Modeller, model duvarlarına dik (90°'lik bir açıyla) bir ağ şeklinde çapraz dolgu ile yapılmıştır. Her test 3 kez tekrar edilmiştir. Çizelge 3.1'de makale kapsamında farklı nozul çaplarıyla baskısı alınan parçaların kırılma kuvvetleri tablo şeklinde belirtilmiştir. Şekil 3.6'da %50 ve %100 doluluk oranlarıyla ve farklı nozul çaplarıyla üretilen parçaların kırılma kuvvetlerinin ortalamasının değişim grafiği gösterilmiştir (Kiński, W., & Pietkiewicz, P., 2020).

Çizelge 3.1. Ortalama örnek patlama kuvvetlerinin özeti (Kiński, W., & Pietkiewicz, P., 2020)

Infill 50%					
The diameter of the printing nozzle (mm)	Layerhe-ight (mm)	Test 1: the breaking force (kN)	Test 2: the breaking force (kN)	Test 3: the breaking force (kN)	Average value of the breaking force (kN)
0.2	0.1	0.68	0.7	0.7	0.69
0.3	0.15	0.72	0.75	0.75	0.74
0.4	0.2	0.84	0.81	0.83	0.83
0.5	0.25	1.1	1.15	1.14	1.13
0.6	0.3	1.12	1.12	1.15	1.13
0.8	0.4	1.18	1.15	1.17	1.17
1	0.5	1.18	1.25	1.21	1.21
Infill 100%					
The diameter of the printing nozzle (mm)	Layerhe-ight (mm)	Test 1: the breaking force (kN)	Test 2: the breaking force (kN)	Test 3: the breaking force (kN)	Average value of the breaking force (kN)
0.2	0.1	1.88	1.9	1.9	1.89
0.3	0.15	1.89	1.91	1.9	1.90
0.4	0.2	1.9	1.92	1.9	1.91
0.5	0.25	1.95	1.9	1.94	1.93
0.6	0.3	1.85	1.85	1.82	1.84
0.8	0.4	1.69	1.7	1.67	1.69
1	0.5	1.5	1.47	1.5	1.49



Şekil 3.6. Ortalama numune kırma kuvveti (kendi detaylandırması) (Kiński, W., & Pietkiewicz, P., 2020)

Katmanlı teknikler kullanılarak üretilen modeller, anizotropileri nedeniyle, geleneksel enjeksiyon yöntemiyle üretilen nesnelerden farklı bir mukavemete sahiptir. Bununla birlikte, baskı ve yenilikçi cihazlar için 3B model hazırlayan bir yazılımın kullanılmasıyla, uygun parametrelerin seçilmesiyle (örneğin, dolgu türü ve yoğunluğu, çalışma platformundaki model oryantasyonu) mukavemet parametrelerini önemli ölçüde etkilemek mümkündür (Kiński, W., & Pietkiewicz, P., 2020).

Yapılan mukavemet testlerinden sonra, test edilen numunelerin numune uzunluğunun ortasında kırıldığı görülebilir. Dolum derecesi %50 olan mukavemet numuneleri söz konusu olduğunda, numune kırılma kuvveti baskı nozulu çapının artmasıyla artmaktadır. Öte yandan, dolum derecesi %100'e eşit olan numunelerde, baskı nozulu çapının artmasıyla patlama kuvveti azalmaktadır. Çapı 0,5 mm olan bir nozulun kullanılması, üretilen nesnenin yüksek mukavemeti ve iyi kalitede dış görünümü ile karakterize edilen numunelerin çıkmasına sebep olur. Öte yandan, kullanılan baskı nozulu arttıkça baskı süresi de kısalmaktadır. (Kiński, W., & Pietkiewicz, P., 2020). Basılı elemanların mukavemeti, kullanılan malzemenin türü, baskı hızı, baskı sıcaklığı, model dolgusunun türü, baskı sırasında basılı modelin soğutulması ve baskı nozulu çapı gibi bir dizi farklı faktörden etkilenir (Kiński, W., & Pietkiewicz, P., 2020).

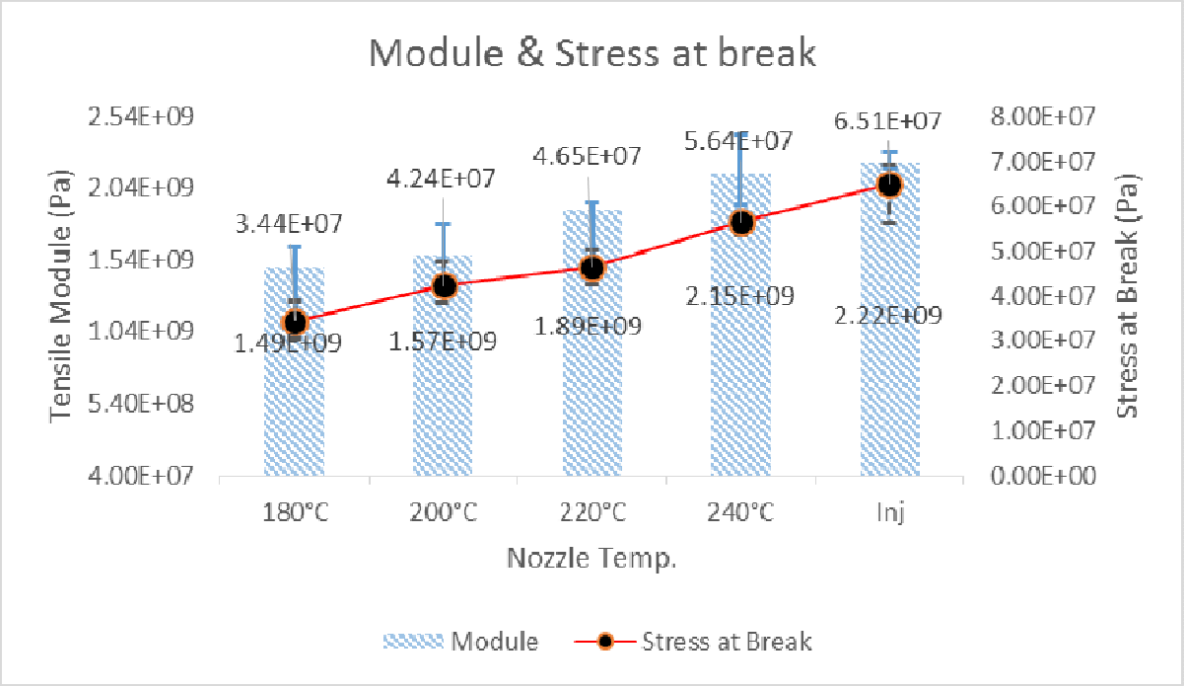
Yapılan çalışmanın sonucu baz alındığında nozul çapı 0.5 mm'den büyük olmalıdır. Nozul çapı büyüdükçe yapısal dayanım etkisi de artmaktadır. Ama bu artış %100 doluluk oranında

gözlemlenmemektedir. 3.1.1 kısmındaki sonuçtan yola çıkarak iç doluluk oranı %65-%85 arası değişeceği için bu tez çalışmasında nozul çapı sabit 1 mm olarak kabul edilmiştir.

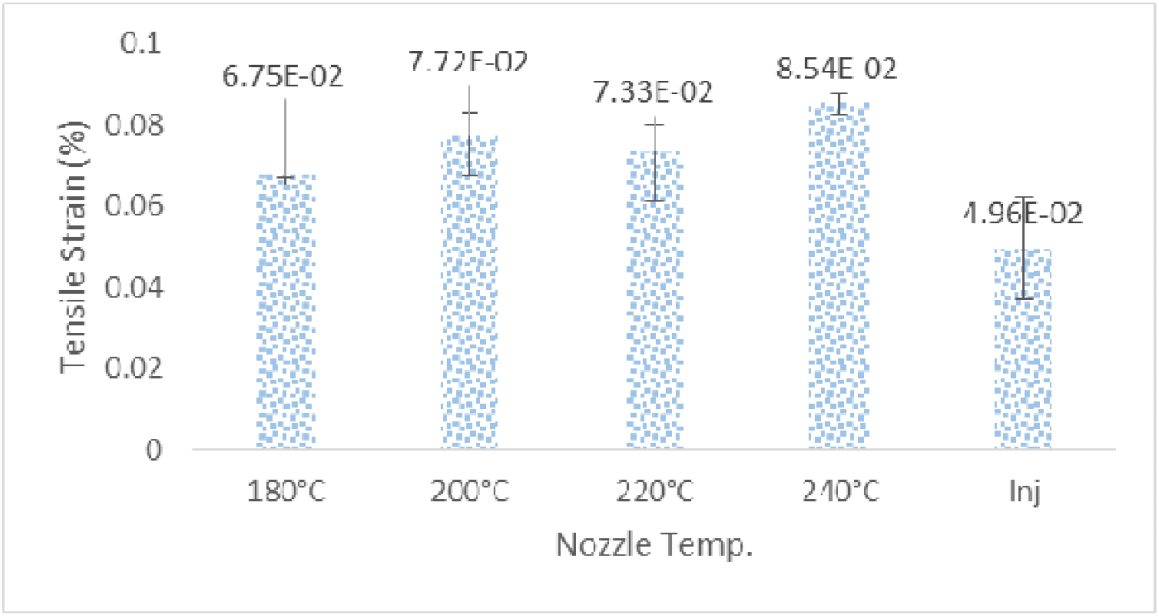
3.1.3. Nozul sıcaklığının yapısal dayanıma etkisi

FDM, 3B Baskı/Eklemeli Üretim alanında en yaygın yöntemlerden biridir. Bu süreçte son ürünün kalitesi, kullanılan hammaddelerin yanı sıra işleme değişkenlerine de büyük ölçüde bağlıdır. Morteza Behzadnasab ve Ali Akbar Yousefi'nin yaptığı çalışmada, baskı sıcaklığının basılı numunelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkileri, enjeksiyon kalıplama yoluyla hazırlanan numunelerle karşılaştırılarak incelenmiştir. Sonuçlar, basılan numunelerin mekanik özelliklerinin nozul kafası sıcaklığına büyük ölçüde bağlı olduğunu, ancak enjekte edilen numunelerle rekabet edemediğini göstermiştir (Behzadnasab, Morteza & Yousefi, Ali., 2016).

Ekstrüzyon sıcaklığının nihai ürünün mekanik özellikleri üzerindeki rolünün daha iyi anlaşılması için dört numune 180, 200, 220 ve 240°C'de basılmıştır. 180, 200, 220 ve 240 °C'de basılan numunelerin ve ayrıca enjeksiyon kalıplama prosedürüyle hazırlanan numunelerin kopma gerilimi ve Young modülü Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Şekil 3.8'de ilgili kopma gerilmesi verileri de gösterilmektedir. Açıkça görüldüğü gibi, nozul sıcaklığının artması çekme mukavemetinin ve Young modülünün artmasına neden olurken, numunelerin kopma uzaması üzerinde ihmal edilebilir bir etkiye sahiptir. Şekil 3.8'de görülebileceği gibi, PLA'nın eriyik viskozitesi güçlü bir şekilde sıcaklığa bağlıdır ve bu nedenle, baskı işlemi sırasında nozul kafası sıcaklığının artmasıyla, PLA'nın eriyik viskozitesi azalır, bu da yeni ekstrüde edilmiş PLA moleküllerinin alttaki tabakada daha iyi difüzyonu ile sonuçlanır ve bu da daha güçlü bir ara tabaka yapışması ile sonuçlanır. Örneğin, nozul sıcaklığının 180°C'den 240°C'ye yükseltilmesiyle kopma gerinimi değeri 34 MPa'dan 56 MPa'ya yükselir ki bu da enjekte edilen numunenin değerine, yani 65MPa'ya yakındır. Baskı işleminin neden olduğu yetersiz karıştırma ve homojen olmama nedeniyle, basılan numuneler enjeksiyonla kalıplanan numuneler için gözlemlenen aynı mekanik mukavemet seviyesine sahip değildir. Baskı sıcaklığının 240ºC'nin üzerine çıkarılmasıyla baz polimerde bir miktar bozulma gözlemlenebilir ve bu da işleme sıcaklığını 240ºC ile sınırlar (Behzadnasab, Morteza & Yousefi, Ali., 2016).



Şekil 3.7. Nozul sıcaklığının, enjekte edilen numunelere kıyasla basılan numunelerin kopma gerilimi ve genç modülü üzerindeki etkisi (Behzadnasab, Morteza & Yousefi, Ali., 2016).



Şekil 3.8. Nozul sıcaklığının basılan ve enjekte edilen numunelerin kopma anındaki gerinimine etkisi (Behzadnasab, Morteza & Yousefi, Ali., 2016).

PLA filamentleri ile basılan son ürünün mekanik özellikleri büyük ölçüde nozul kafası sıcaklığına bağlıdır, ancak enjekte edilen numunelerle rekabet edemez, bu nedenle kürleme

sonrası gibi diğer son işlem adımları şiddetle tavsiye edilir (Behzadnasab, Morteza & Yousefi, Ali., 2016).

Yapılan çalışmanın sonucuna dayanarak yüksek sıcaklıkta baskı almak katmanların birbirine daha iyi tutunmasını sağlamaktadır. Dolayısıyla bu tez çalışmasında kullanılan her malzemeye uygun daha yüksek baskı sıcaklığı tercih edilmiştir.

3.1.4. Tabla sıcaklığının yapısal dayanıma etkisi

3B baskılı parçaların mekanik özellikleri birçok faktörden etkilenebilir. Baskı koşulları, mezoyapısal tasarım, malzeme türü ve yazıcı türü bu faktörlerden bazılarıdır. Basılı parçaların mekanik performansını araştıran çok sayıda araştırma çalışması vardır. Gerilme-gerinim temelli çalışmalar, 3B baskılı malzemelerin mekanik özelliklerinin, nozul sıcaklığı, tabla sıcaklıkları ve baskı hızı gibi işlem parametrelerinden etkilendiğini göstermektedir. Bununla birlikte, havacılık, otomotiv ve tıbbi uygulamalar gibi birçok endüstriyel uygulamada, malzemenin güvenli performansı için kararsız ve tekrarlanan yüklere karşı direncinin bilinmesi çok önemlidir. Gerilme-gerinim yöntemleri, tekrarlanan mekanik, termal ve/veya termomekanik yüklere maruz kaldıklarında basılı numunelerin mukavemetini doğrudan tahmin edemez. Tekrarlanan yükler, malzeme kararlı durum mukavemetine ulaşmadan çok önce katastrofik arızaya neden olabilir. Bu nedenle, basılı malzemelerin çatlak büyüme özelliklerini tam olarak anlamak için kırılma mekaniği yaklaşımlarına ihtiyaç vardır (Aliheidari, N., Tripuraneni, R., Hohimer, C., Christ, J., Ameli, A., & Nadimpalli, S., 2017).

Nahal Aliheidari ve arkadaşlarının yaptığı çalışmanın amacı, nozul ve tabla sıcaklıklarının FDM-3B baskılı parçaların kırılma direnci üzerindeki etkisini incelemektir. Bu makale, kırılma mekaniği yaklaşımını kullanarak, nozul ve tabla sıcaklıklarının katmanlar arası yapışmayı ve numunelerin mezoyapısal özelliklerini ve nihayetinde 3B baskılı malzemelerin kırılma özelliklerini nasıl kontrol ettiğini araştırmaktadır. Bu amaçla, akrilonitril bütadien stiren (ABS) çift konsol kiriş (DCB) numuneleri tasarlanmış, basılmış ve açma modunda yüklenmiştir. Veri indirgeme şemasında bir sonlu eleman modeli kullanılmış ve J-integral yöntemi kullanılarak görünür ve katmanlar arası kırılma dirençleri elde edilmiştir. Basılan numunelerin mikroyapısını karakterize etmek için mikroskopi yapılmıştır. Nozul ve tabla

sıcaklıklarının yapı ve kırılma direnci üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Çizelge 3.2'de makale kapsamında farklı tabla sıcaklıklarıyla baskısı alınmış parçaların kırılma direnç kuvvetleri belirtilmiştir (Aliheidari, N. ve arkadaşları, 2017).

Çizelge 3.2. Üç farklı tabla sıcaklığında FDM 3B baskılı DCB'ler için kırılma direncinin ortalama ± standart sapması ve karşılık gelen kırılma yükü değerleri (Aliheidari, N. ve arkadaşları, 2017).

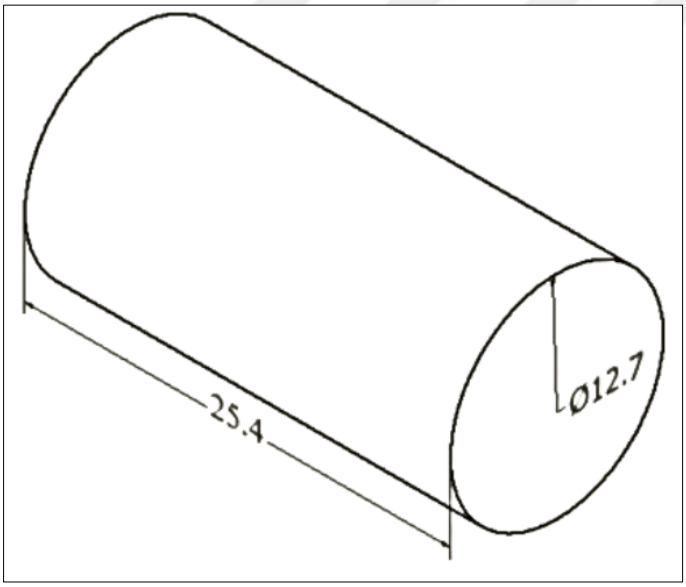
Bed temperature	Load (N)	Apparent fracture Resistance, $J_{cr,a}$ (J/m^2)	Interlayer fracture Resistance, $J_{cr,i}$ (J/m^2)
85°C	138.75±4.34	2063.82±129.37	3527.90±221.15
95°C	142.38±1.99	2172.00±60.77	3566.65±99.79
105°C	147.75±5.43	2419.67±129.97	3798.55±204.05

Genel olarak, nozul veya tabladan bağımsız olarak, sıcaklık yükseldikçe kırılma direncinin arttığı söylenebilir. Bu durum, daha yüksek sıcaklıklarda daha iyi bir füzyon kalitesine bağlıdır. Nozul veya tabla sıcaklığı arttığında, füzyon yerindeki ara katman sıcaklığı da artar. Daha yüksek sıcaklıklarda, polimer molekülleri daha fazla hareketliliğe (daha az viskozite) sahiptir ve böylece iki katman arasındaki moleküller arası difüzyon daha kolay gerçekleşebilir. Aynı zamanda, füzyon sürecinin başladığı sıcaklık daha yüksek olduğunda, polimer molekülleri daha fazla etkili bir şekilde hareket edemeyecekleri bir sıcaklığa (camsı geçiş sıcaklığı) ulaşmadan önce difüzyon için daha fazla zamana sahip olurlar. Sonuç olarak, füzyon sıcaklığı daha yüksek olduğunda, katmanlar arasında daha fazla sayıda dolaşık molekül (daha güçlü yapışma) ile büyük bir boyunlaşma oranı (daha fazla inter-difüzyon, daha büyük kaynaşmış bölge) oluşur ve bu da daha yüksek kırılma direnci anlamına gelir. Aynı sebeple, nozul sıcaklığına kıyasla tabla sıcaklığının daha az önemli etkisi açıklanabilir. Nozul sıcaklığı, çok daha yüksek bir büyüklüğe sahip olduğu ve daha yüksek sıcaklıklarda füzyon sağladığı için füzyon sıcaklığı üzerinde daha büyük bir kontrole sahiptir. Tabla sıcaklığının genel füzyon süresi üzerinde bir kontrole sahip olduğunu, ancak moleküler hareketin çok aktif olmadığı daha düşük bir sıcaklık aralığında olduğunu söylemek mantıklıdır. Bu nedenle, etkisi nozul sıcaklığınınki kadar güçlü olmayabilir (Aliheidari, N. ve arkadaşları, 2017).

Yapılan önceki çalışmalar kapsamında bu tez çalışmasında tabla sıcaklığının her malzemeye uygun biçimde olabildiğince yükseltilmesi hedeflenmiştir.

3.1.5. Baskı hızının ve katman yüksekliğinin yapısal dayanıma etkisi

Harshit K. Dave ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada çeşitli 3B baskı parametreleri arasında, katman kalınlığı, dolgu yoğunluğu ve baskı hızı olmak üzere üç baskı parametresi, basılı parçanın basınç dayanımı üzerindeki etkilerini incelemek için seçilmiştir. Mevcut araştırmanın amacı olarak, basılı parçanın basınç dayanımını incelemek için, parça test numuneleri, test numunesinin geometrisini ve boyutlarını belirleyen ASTM D695'e göre tasarlanmış ve üretilmiştir. Şekil 3.9'da farklı baskı parametrelerinde üretilmek üzere tasarlanan sıkıştırma numunesinin tasarım ölçüleri gösterilmektedir (Dave, Harshit & Rajpurohit, Shilpesh & Patadiya, Naushil & Dave, Shalin & Kumar Sharma, Swaraj & Thambad, Siddharth & Prathapam Srinivasan, Varunkumar & Sheth, Khyati., 2019).



Şekil 3.9. ASTM D695'e göre sıkıştırma testi numunesi (tüm boyutlar mm cinsindendir) (Dave ve arkadaşları, 2019)

Katman yüksekliği, parça baskısı sırasında eklenen her katmanın kalınlığıdır. Üç katman yüksekliği seçilmiştir ve yazıcının kapasitesine göre 0,1 mm, 0,2 mm ve 0,3 mm olarak değiştirilmiştir. Dolgu yoğunluğu, baskı içinde gereken malzeme miktarını tanımlar. Daha yüksek dolgu yoğunluğu daha fazla malzeme ve daha küçük gözenek boyutu sağlarken, daha

küçük dolgu yoğunluğu daha az malzeme ve daha büyük gözenek boyutu sağlar. Üç farklı dolgu yoğunluğu seçilmiş ve %60, %70 ve %80 olarak değiştirilmiştir. Üç farklı baskı hızı dikkate alınmış ve 30 mm/dak, 40 mm/dak ve 50 mm/dak olarak değiştirilmiştir. Çizelge 3.3'te gösterildiği gibi her üç baskı değişkeni ve bunlara karşılık gelen üç seviye için, tam faktöriyel deney tasarımına göre toplam 27 deney yapılması gerekmektedir. Sonuçların tekrarlanabilirliğini sağlamak için tüm deneyler üç kez gerçekleştirilmiştir, bu da toplam 81 deneysel çalışma ile sonuçlanmaktadır. Parçanın basılması sırasında PLA malzemesi 210°C'de ekstrüde edilirken tabla sıcaklığı 70°C'de ve tarama genişliği 0,4 mm'de sabit tutulmuştur (Dave ve arkadaşları, 2019).

Çizelge 3.3. Girdi parametrelerinin değeri (Dave ve arkadaşları, 2019)

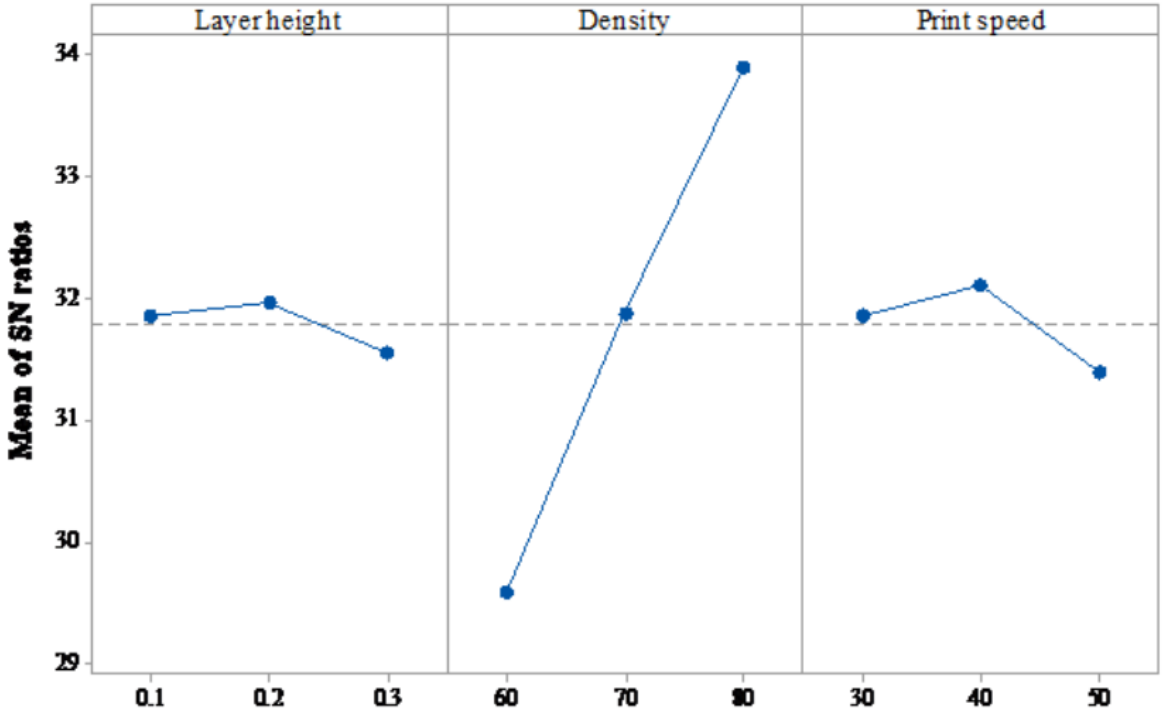
Parameters	Unit	Level 1	Level 2	Level 3
Layer height (h_L)	mm	0.1	0.2	0.3
Infill density (ρ_d)	%	60	70	80
Print speed (S_P)	mm/min	30	40	50

Tüm test numuneleri ASTM D695 standardına uygun olarak üretilmiş ve tam faktöriyel deneysel tasarımla test edilmiştir. Çizelge 3.4, her bir deneysel çalışma için ortalama basınç dayanımını ve S/N oranını göstermektedir. S/N oranlarının ortalama değerlerinin her bir işlem parametresi için çizilen grafikleri Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Daha yüksek bir basınç dayanımına sahip olmak hedeflenir, bu nedenle ana etki grafiği "daha büyük daha iyi" özellikleri kullanılarak yorumlanmıştır. S/N oranının analizi, en uygun mukavemet performansının 0,2 mm katman yüksekliğinde, %80 dolgu yoğunluğunda ve 40 mm/dak baskı hızında elde edildiğini ortaya koymaktadır (Dave ve arkadaşları, 2019).

Basınç dayanımının dolgu yoğunluğundan büyük ölçüde etkilendiği de görülebilir. Sıkıştırma mukavemetinin dolgu yoğunluğundaki artışla birlikte arttığı, katman yüksekliği ve baskı hızının ise sıkıştırma mukavemeti üzerinde herhangi bir spesifik etki göstermediği tespit edilmiştir (Dave ve arkadaşları, 2019).

Çizelge 3.4. Sıkıştırma testi ile elde edilen deneysel sonuçlar (Dave ve arkadaşları, 2019).

Layer Height (mm)	Infill Density (%)	Print Speed (mm/min)	Mean Compressive Strength (N/mm^2)	S/N Ratio
0.1	60	30	31.790	30.042
		40	31.973	30.092
		50	29.540	29.364
	70	30	34.847	30.722
		40	38.490	31.668
		50	36.137	31.033
	80	30	52.983	34.479
		40	52.477	34.353
		50	52.577	34.379
0.2	60	30	30.960	30.960
		40	33.543	33.543
		50	31.073	31.073
	70	30	42.480	42.480
		40	43.120	43.120
		50	43.617	43.617
	80	30	52.593	52.593
		40	52.927	52.927
		50	33.130	39.243
0.3	60	30	26.460	26.460
		40	30.060	30.060
		50	26.673	26.673
	70	30	39.437	39.437
		40	37.913	37.913
		50	37.520	37.520
	80	30	50.773	50.773
		40	49.730	49.730
		50	52.153	52.153



Şekil 3.10. Proses değişkenlerinin basınç dayanımı üzerindeki ana etkisi (Dave ve arkadaşları, 2019).

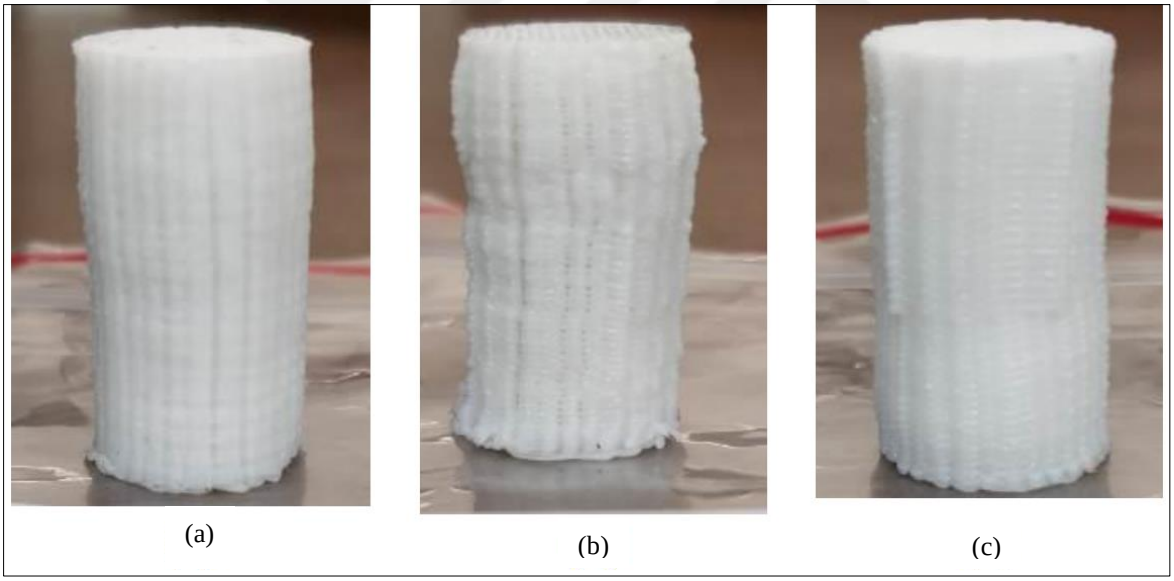
Ayrıca, basılı parçanın basınç dayanımını önemli ölçüde etkileyen süreç değişkenlerini bulmak için varyans analizi gerçekleştirilmiştir. Çizelge 3.5, sıkıştırma mukavemetini etkileyen önemli süreç değişkenlerini belirlemek için gerçekleştirilen varyans analizini göstermektedir. ANOVA analizinden, dolgu yoğunluğunun %87,07'lik eklemeli imalat ile test numunesinin basınç dayanımını etkileyen tek önemli süreç değişkeni olduğu gözlemlenebilir (Dave ve arkadaşları, 2019).

Çizelge 3.5. Basınç dayanımı için varyans analizi (Dave ve arkadaşları, 2019).

Factor	DOF	SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Layer Height	2	19.75	9.873	0.85	0.442
Infill Density	2	1876.02	938.008	80.82	0.000
Print Speed	2	26.80	13.400	1.15	0.335
Error	20	232.13	11.606		
Total	26	2154.69			

Basınç dayanımının katman yüksekliğindeki artışla 0,2 mm'ye kadar arttığı, daha sonra azalmaya başladığı görülmüştür. Vakaların çoğunda, %80 dolgu yoğunluğuna ve 0,2 mm katman yüksekliğine sahip 50 mm/dak hızında basılan numune haricinde 0,2 mm katman yüksekliğinde daha yüksek basınç dayanımı gözlemlenmiştir (Dave ve arkadaşları, 2019).

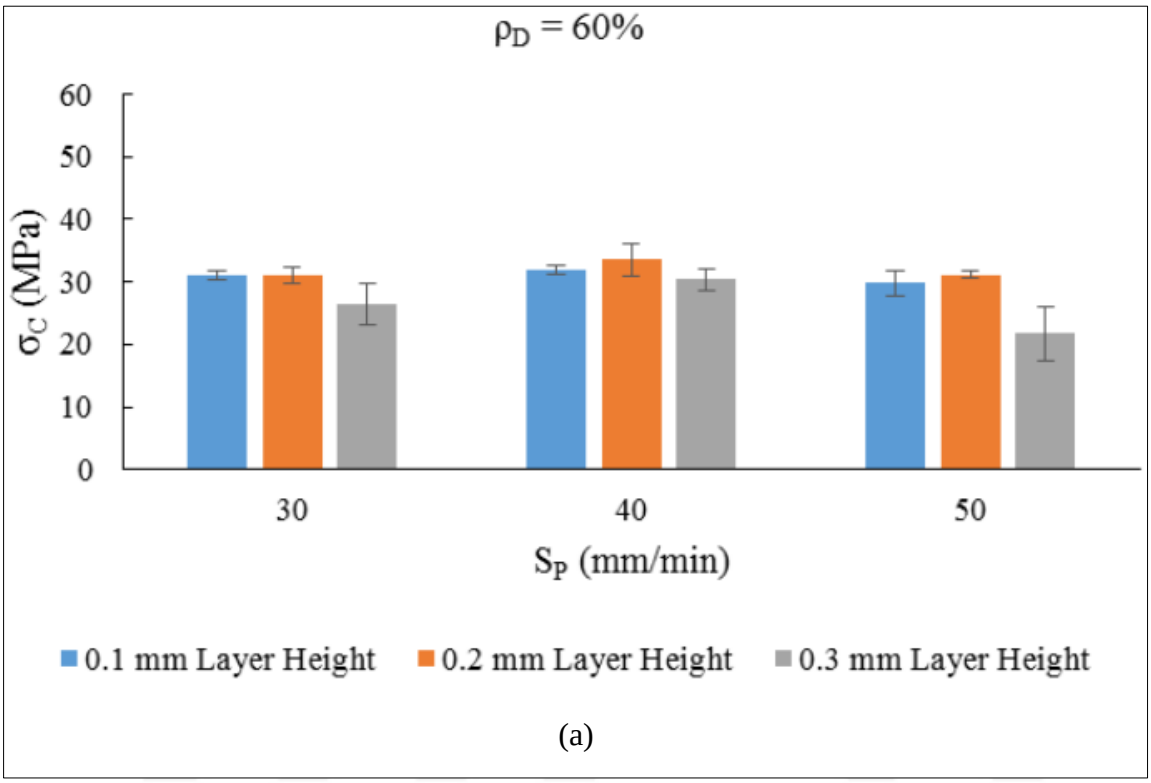
70'lik dolgu yoğunluğu için 0,1 mm'lik katman yüksekliğinden 0,3 mm'ye kadar yaklaşık %15'lik bir mukavemet artışı ve 0,1 mm'den 0,2 mm'ye kadar yaklaşık %20'lik bir artış gözlemlenmiştir. Daha düşük katman yüksekliğinde, bir katmanın daha fazla sayıda olması nedeniyle parçada daha fazla yapışma çizgisi ortaya çıkmıştır. Katmanlar arasındaki arayüz bağları monofilamente göre nispeten daha zayıf olduğu için katmanların yer değiştirme olasılığı daha yüksektir ve bu da daha düşük mukavemete neden olur. Resim 3.1, test edilen numunede şişkinliğin gözlemlenebildiği sıkıştırma testinden sonraki test numunesini göstermektedir (Dave ve arkadaşları, 2019).



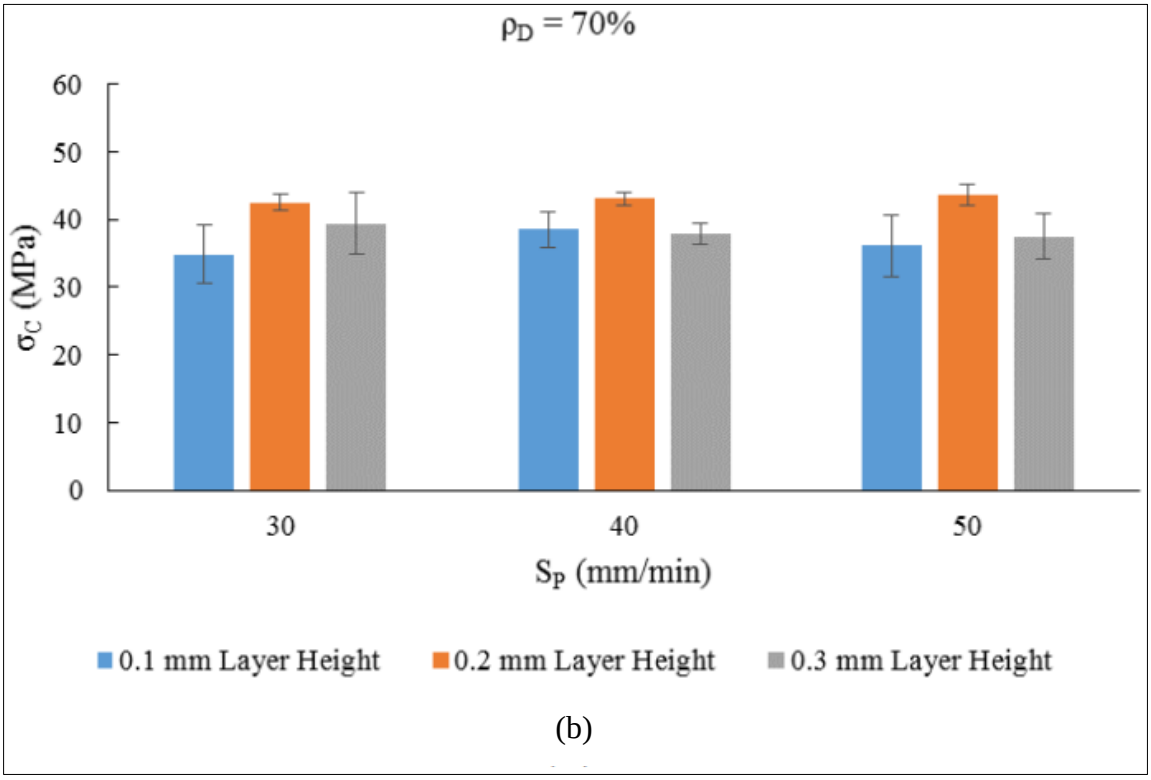
Resim 3.1. Katman sıkıştırma testi numuneleri: (a) 0,1 mm; (b) 0,2 mm; (c) 0,3 mm katman yüksekliğinde sıkıştırma testinden sonra numuneler (Dave ve arkadaşları, 2019).

Dolgu yoğunluğunu sabit tutarken ve katman yüksekliğini değiştirirken test numunelerinin basınç dayanımının baskı hızına göre değişimini göstermektedir. Şekil 3.11'de baskı hızı ile birlikte basınç dayanımındaki değişimin çok az olduğu görülmektedir, ancak dayanımın başlangıç değerinden 40 mm/dk'ya kadar arttığı ve bu değerden sonra dayanımın azaldığı da gözlemlenmektedir. Bu eğilim 40 mm/dk baskı hızına kadar her üç katman yüksekliğinde de

gözlemlenmiştir. ANOVA analizi de baskı hızının basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkisi olmadığını doğrulamaktadır (Dave ve arkadaşları, 2019).

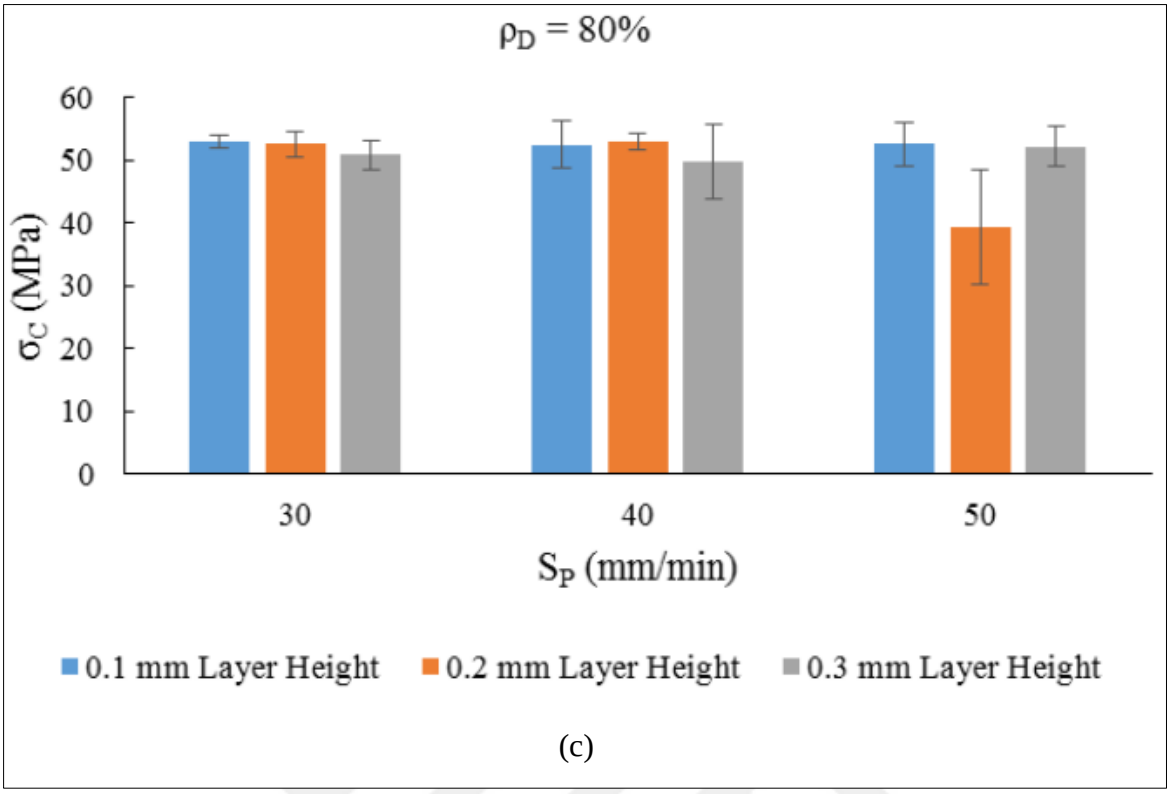


(a)



(b)

Şekil 3.11. Baskı hızının (a) %60; (b) %70; (c) %80 dolgu yoğunluğunda farklı katman yüksekliğinde basınç dayanımı üzerindeki etkisi (Dave ve arkadaşları, 2019).



(c)

Şekil 3.11. (devam) Baskı hızının (a) %60; (b) %70; (c) %80 dolgu yoğunluğunda farklı katman yüksekliğinde basınç dayanımı üzerindeki etkisi (Dave ve arkadaşları, 2019).

Katman yüksekliği, dolgu yoğunluğu ve baskı hızı gibi işlem değişkenlerinin 3B baskılı PLA tabanlı iskelelerin basınç dayanımı üzerindeki etkisi üzerine deneysel araştırma ASTM D695 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmadan aşağıdaki ana sonuçlar çıkarılabilir. S/N oranının analizi, mukavemetin optimum performansının 0,2 mm katman yüksekliğinde, %80 dolgu yoğunluğunda ve 40 mm/dk baskı hızında elde edildiğini ortaya koymaktadır. Dolgu yoğunluğu, basılan parçanın basınç dayanımını etkileyen en önemli işlem parametresi olarak bulunmuştur. Katman yüksekliği ve baskı hızı, test numunesinin basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip değildir (Dave ve arkadaşları, 2019).

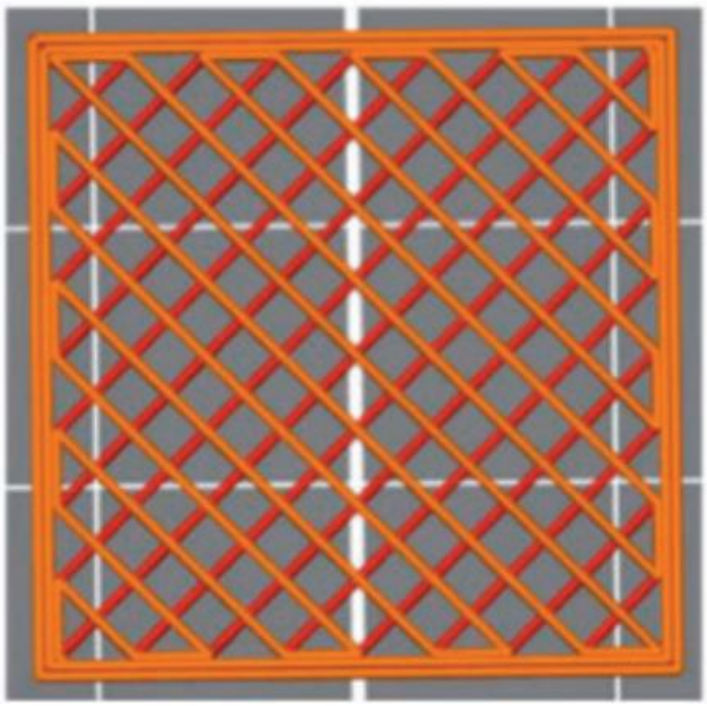
İncelen çalışmalar doğrultusunda baskı hızının yapısal dayanıma aşırı etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. Sadece malzeme uygun yavaş veya orta düzeyde baskı hızı katmanların bir birine daha iyi yapışmasını sağlıyor. Bu yüzden tez çalışmasında yüksek baskı hızlarından kaçınılmıştır.

3.1.6. İç doluluk geometrisi türleri ve yapısal dayanıma etkisi

Hem 3B FDM baskıda, hem de birçok farklı yöntemle üretilmiş parçanın iç yapısının geometrisi yapısal açıdan büyük önem taşımaktadır. %100 iç doluluk oranı yapısal olarak daha fazla dayanıklılık sağlasa da üretim kısıtlamalarından dolayı çoğu zaman istenen dayanıklılık değerlerinin üzerinde kalmaktadır. Son zamanlarda yaygınlaşan çeşitli eklemeli imalat yöntemleri tasarlanan parçanın optimum topoli analizine uygun üretimini gerçekleştirebilir durumdadır. Bu konuda çeşitli tez çalışmaları yapılmış, iç doluluk oranı ve geometrileri araştırılmıştır. Bazı geometrik yapılar sadece tek yönde uygulanan kuvvete dayanıklı olurken, her yönde uygulanan kuvvete eşit dayanıklılık sunan geometriler de mevcuttur. Tez çalışmasında denenecek olan iç gometri yapıları aşağıdakilerdir:

Doğrusal iç doluluk geometrisi

Doğrusal dolgu geometrisi, 3B baskıda kullanılan bir dolgu deseni türüdür. Dolgu, 3B baskılı bir nesnenin içine basılan ve malzeme kullanımını ve baskı süresini azaltırken genel yapıya destek ve güç sağlayan iç yapı veya deseni ifade eder. Şekil 3.12’de doğrusal iç yapı deseni gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Doğrusal iç doluluk geometrisi (Ma, Q. Ve arkadaşları, 2020)

Doğrusal dolgu geometrisinde, iç desen hem X hem de Y yönlerinde birbirine paralel uzanan düz çizgilerden veya ızgaralardan oluşur. Bu çizgiler tipik olarak eşit aralıklıdır ve dik açılarla kesişir. Doğrusal desen, baskıda basitliği ve verimliliği nedeniyle yaygın olarak kullanılır, çünkü minimum hareket gerektirir ve daha karmaşık dolgu desenlerine kıyasla daha yüksek baskı hızlarına izin verir.

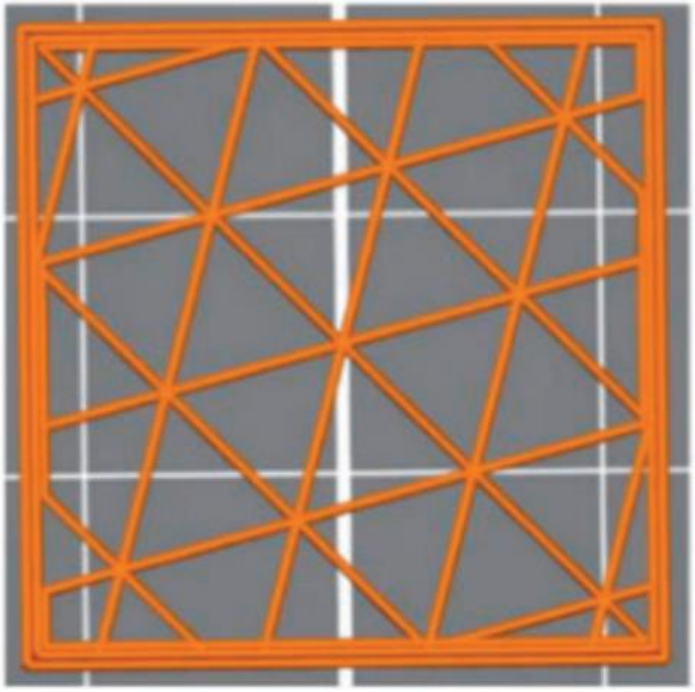
Dolgu yoğunluğu veya yüzdesi, basılı nesnedeki iç yapı miktarını kontrol etmek için ayarlanabilir. Daha yüksek dolgu yoğunlukları daha katı ve sağlam bir nesneyle sonuçlanırken, daha düşük yoğunluklar daha hafif ve daha içi boş bir yapı oluşturur.

Doğrusal dolgu geometrisi, yapısal bütünlük ve baskı verimliliği arasındaki dengesi nedeniyle 3B baskıda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, basılı nesnenin istenen mukavemet, ağırlık ve estetiğine bağlı olarak bal peteği, üçgen veya jiroskopik gibi diğer dolgu desenleri de kullanılabilir.

Üçgen iç doluluk geometrisi

Üçgen dolgu geometrisi, 3B baskıda kullanılan bir dolgu deseni türüdür. Dolgu, 3B baskılı bir nesnenin içine basılan, malzeme kullanımını ve baskı süresini azaltırken destek ve güç sağlayan iç yapı veya deseni ifade eder.

Üçgen dolgu geometrisinde, iç desen birbirine bağlı üçgenlerden oluşur. Üçgenler tipik olarak tekrar eden bir düzende düzenlenir ve her üçgen bitişik üçgenlerle bir veya daha fazla kenarı paylaşır. Bu düzenleme, iç yapı boyunca birbirine bağlı üçgenlerden oluşan bir ağ oluşturur. Şekil 3.13’te üçgen iç doluluk geometri deseni gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Üçgen iç doluluk geometrisi (Ma, Q. Ve arkadaşları, 2020)

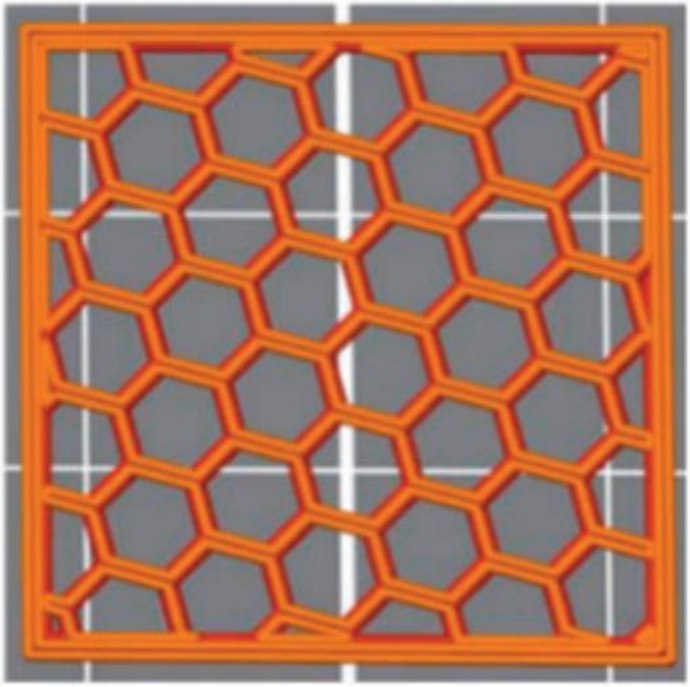
Üçgen dolgu deseni çeşitli avantajlar sunar. İlk olarak, üçgen şekli iyi bir yapısal stabilite sağlar ve kuvvetleri doğrusal dolguya kıyasla daha eşit bir şekilde dağıtarak mukavemeti artırır. Üçgenlerin birbirine bağlı yapısı da basılı nesnenin genel stabilitesini ve sertliğini artırır. Ek olarak, üçgen dolgu kullanımı, nesnenin yüzeyinde görünür desenlerin oluşumunu azaltmaya yardımcı olabilir.

Dolgu yoğunluğu veya yüzdesi, basılı nesnedeki iç yapı miktarını kontrol etmek için ayarlanabilir. Daha yüksek dolgu yoğunlukları daha katı ve sağlam bir nesneyle sonuçlanırken, daha düşük yoğunluklar daha hafif ve daha içi boş bir yapı oluşturur. Üçgen dolgu geometrisi, özellikle güç ve stabilite önemli faktörler olduğunda, 3B baskıda yaygın olarak kullanılır.

Bal peteği iç doluluk geometrisi

Petek dolgu geometrisi, 3B baskıda kullanılan bir dolgu deseni türüdür. Dolgu, 3B baskılı bir nesnenin içine basılan, malzeme kullanımını ve baskı süresini azaltırken destek ve güç sağlayan iç yapı veya deseni ifade eder.

Bal peteği dolgu geometrisinde, iç desen bir bal peteğinin yapısına benzer şekilde birbirine bağlı altıgen hücrelerden oluşur. Altıgen hücreler tipik olarak tekrar eden bir düzende düzenlenir ve her hücre bitişik hücrelerle bir veya daha fazla kenarı paylaşır. Bu düzenleme, iç yapı boyunca birbirine bağlı altıgenlerden oluşan bir ağ oluşturur. Şekil 3.14'te bal peteği deseni gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Bal peteği iç doluluk geometrisi (Ma, Q. Ve arkadaşları, 2020)

Bal peteği dolgu deseni çeşitli avantajlar sunar. İlk olarak, altıgen şekil iyi bir yapısal stabilite sağlar ve daha basit dolgu desenlerine kıyasla kuvvetleri daha eşit bir şekilde dağıtır. Altıgenlerin birbirine bağlı yapısı, basılı nesnenin genel stabilitesini ve sertliğini artırır. Ayrıca, petek deseninin kullanılması, nesnenin yüzeyinde görünür desenlerin oluşmasını azaltmaya yardımcı olabilir.

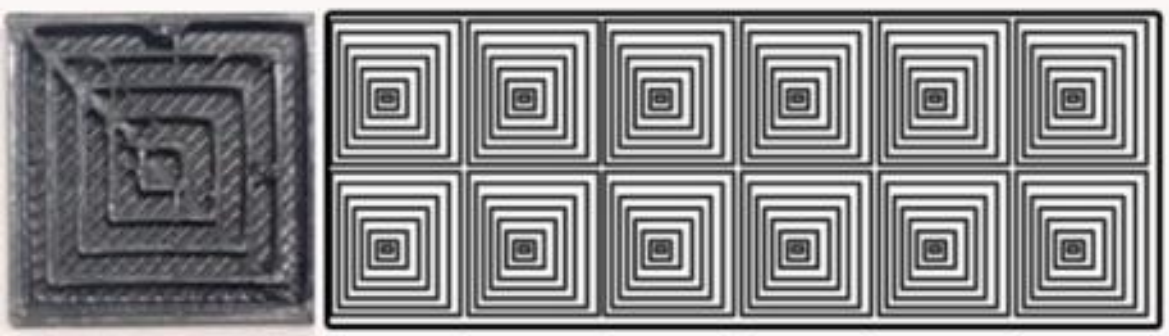
Dolgu yoğunluğu veya yüzdesi, basılı nesnedeki iç yapı miktarını kontrol etmek için ayarlanabilir. Daha yüksek dolgu yoğunlukları daha katı ve sağlam bir nesneyle sonuçlanırken, daha düşük yoğunluklar daha hafif ve daha içi boş bir yapı oluşturur. Petek dolgu geometrisi, özellikle güç, ağırlık ve malzeme kullanımı dengesi istendiğinde 3B baskıda yaygın olarak kullanılır.

Eşmerkezli iç doluluk geometrisi

Eşmerkezli dolgu geometrisi, 3B baskıda kullanılan bir dolgu deseni türüdür. Dolgu, 3B baskılı bir nesnenin içine yazdırılan, malzeme kullanımını ve baskı süresini azaltırken destek ve güç sağlayan iç yapı veya deseni ifade eder.

Eşmerkezli dolgu geometrisinde, iç desen katman katman yazdırılan eşmerkezli dairelerden oluşur. Daireler nesnenin dış çevresinden başlar ve kademeli olarak içe doğru hareket ederek bir dizi iç içe halka oluşturur. Bu, nesnenin iç alanını dolduran sürekli spiral benzeri bir desen oluşturur.

Eşmerkezli dolgu deseni çeşitli avantajlar sunar. İlk olarak, basılı nesneye iyi bir yapısal destek ve güç sağlar. Eşmerkezli daireler kuvvetleri yapı boyunca eşit olarak dağıtarak stabilitesini ve dayanıklılığını artırır. Ek olarak, eş merkezli desen, aşırı dolgu ihtiyacını ortadan kaldırdığı ve baskı süresini azalttığı için verimli malzeme kullanımına olanak tanır. Şekil 3.15'te eşmerkezli iç doluluk deseni gösterilmiştir.



Şekil 3.15. Eşmerkezli iç doluluk geometrisi (Gonabadi, H., Yadav, A., & Bull, S. J., 2020)

Dolgu yoğunluğu veya yüzdesi, basılı nesnedeki iç yapı miktarını kontrol etmek için ayarlanabilir. Daha yüksek dolgu yoğunlukları daha katı ve sağlam bir nesneyle sonuçlanırken, daha düşük yoğunluklar daha hafif ve daha içi boş bir yapı oluşturur. Eşmerkezli dolgu geometrisi, özellikle güç ve malzeme verimliliği dengesi gerektiren nesneler için 3B baskıda yaygın olarak kullanılır.

Schwarz D iç doluluk geometrisi

"Schwarz D", 3B baskıda Alman matematikçi Hermann Schwarz'ın adını taşıyan bir dolgu deseni türüdür. 3B baskılı nesneler içinde dolgu deseni olarak kullanılabilen karmaşık ve girift bir kafes yapısıdır.

Schwarz D dolgu deseni, elmas benzeri bir kafes oluşumunda düzenlenmiş birbirine bağlı diyagonal kirişlerden oluşur. Malzeme kullanımını en aza indirirken basılı nesneye iyi bir yapısal bütünlük ve destek sağlar. Bu desen genellikle güç ve malzeme verimliliği arasında bir denge kurulmak istendiğinde kullanılır. Şekil 3.16'da Schwarz D iç doluluk deseni gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Schwarz D iç doluluk geometrisi (Shams, M. ve arkadaşları, 2021)

Schwarz D dolgu deseni, çeşitli 3B baskı yazılımlarında ve dilimleyici programlarında yaygın olarak bulunur. 3B yazdırılmış bir nesnenin dolgu ayarlarını yapılandırırken bir seçenek olarak seçilebilir. Dolgu yoğunluğu ve diğer parametreler, nihai basılı parçanın gücünü ve yoğunluğunu kontrol etmek için ayarlanabilir. Genel olarak, Schwarz D dolgu deseni, malzeme kullanımını optimize ederken 3B baskılı nesnelerin mekanik özelliklerini geliştirebilecek ilginç bir geometrik yapı sunar.

3.1.7. Üç boyutlu FDM baskı yöntemine uygun malzeme türleri

Filament malzemesi olarak ESUN markası tercih edilmiştir. ESUN markası filament özelliklerinin testi ve detaylı belirlenmesi açısından daha doğru verileri sunmaktadır.

ESUN PLA+ (polylactic acid) filament

ESUN PLA+, baskısı kolay ve pürüzsüz bir yüzeye sahip çevre dostu bir malzemedir. PLA+ filament iyi mukavemet, sertlik, tokluk dengesi, güçlü darbe direncine sahiptir; Bu nedenle PLA plus, fonksiyonel parça baskısı için uygun kabul edilir. eSUN PLA + FDA tarafından onaylanmıştır, kullanımı daha güvenlidir; PLA pro modelleme, hızlı prototipleme için kullanılabilir (URL 1). Çizelge 3.6'da ESUN PLA+ malzemesinin mekanik özellikleri, Resim 3.2'de filamentin görseli belirtilmiştir.

Çizelge 3.6. ESUN PLA+ filament parametreleri (URL 1)

Parametre	Değer
Baskı sıcaklığı (^oC)	210-230 (önerilen 215)
Tabla sıcaklığı (^oC)	45-60
Baskı hızı (mm/s)	40-100
Yoğunluk (g/cm^3)	1,23
Fan çalışma oranı	%100
Çekme dayanımı (MPa)	60
Kopma uzaması	%20
Eğilme dayanımı (MPa)	74
Eğilme modülü (MPa)	1973
Lzod çentikli darbe dayanımı (kJ/m^2)	6
Isı bozulma sıcaklığı (^oC)	53 (0,45 MPa)



Resim 3.2. ESUN PLA+ filament çeşitleri (URL 1)

ESUN PETG (polyethylene terephthalate glycol) filament

PETG malzemesi ABS'den daha serttir; petg filament ile basılan ürün yarı saydam ve pürüzsüz bir yüzeye sahiptir. Sıcaklık odası olmadan PLA gibi baskı yapmak kolaydır (URL 2). Çizelge 3.7'de ESUN PETG malzemesinin mekanik özellikleri, Resim 3.3'te filamentin görseli belirtilmiştir.

Çizelge 3.7. ESUN PETG filament parametreleri (URL 2)

Parametre	Değer
Baskı sıcaklığı (°C)	230-250 (önerilen 240)
Tabla sıcaklığı (°C)	75-90
Baskı hızı (mm/s)	40-100
Yoğunluk (g/cm^3)	1,27
Fan çalışma oranı	%100
Çekme dayanımı (MPa)	52,2
Kopma uzaması	%83
Eğilme dayanımı (MPa)	58,1
Eğilme modülü (MPa)	1073
Lzod çentikli darbe dayanımı (kJ/m^2)	4,7
Isı bozulma sıcaklığı (°C)	64



Resim 3.3. ESUN PETG filament (URL 2)

ESUN ABS (acrylonitrile butadiene styrene) filament

Yüksek tokluk ve yüksek darbe direncine sahip eSUN ABS + 3B yazıcı malzemesi, sağlam ve dayanıklı parçaları yazdırmak için kullanılabilir.ABS plus, düşük VOC uçucu içeriği, baskı sırasında düşük koku, basınçsız rahat baskıdır; ABS+ filamenti düşük büzülmeye sahiptir, baskı sırasında bükülmesi ve çatlaması kolay değildir (URL 3). Çizelge 3.8'de ESUN PETG malzemesinin mekanik özellikleri, Resim 3.4'te filamentin görseli belirtilmiştir.

Çizelge 3.8. ESUN ABS+ filament parametreleri (URL 3)

Parametre	Değer
Baskı sıcaklığı (°C)	230-270 (önerilen 240)
Tabla sıcaklığı (°C)	95-110
Baskı hızı (mm/s)	40-100
Yoğunluk (g/cm^3)	1,06
Fan çalışma oranı	%0
Çekme dayanımı (MPa)	40
Kopma uzaması	%30
Eğilme dayanımı (MPa)	68
Eğilme modülü (MPa)	1203
Lzod çentikli darbe dayanımı (kJ/m^2)	42
Isı bozulma sıcaklığı (°C)	73



Resim 3.4. ESUN ABS+ filament (URL 3)

ESUN ASA (acrylonitrile styrene acrylate) filament

Mükemmel hava direnci ve mekanik özellikler, asa filamentini çevresel yaşlanmanın etkilerine karşı daha dirençli hale getirir. ASA 3B yazıcı filamenti dış mekan uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. ASA filamentinin özellikleri abs filamentine benzer, ancak ultraviyole ışınlarına ve sert hava koşullarına karşı daha dayanıklıdır. Ayrıca, ASA 3B yazıcı filamenti güçlü tokluğa, güçlü sertliğe ve yüksek darbe direncine sahiptir (URL 4). Çizelge 3.9'da ESUN ASA malzemesinin mekanik özellikleri, Resim 3.5'te filamentin görseli belirtilmiştir.

Çizelge 3.9. ESUN eASA filament parametreleri (URL 4).

Parametre	Değer
Baskı sıcaklığı (°C)	240-270 (önerilen 240)
Tabla sıcaklığı (°C)	90-110
Baskı hızı (mm/s)	40-100
Yoğunluk (g/cm^3)	1
Fan çalışma oranı	%0
Çekme dayanımı (MPa)	50
Kopma uzaması	%30
Eğilme dayanımı (MPa)	35
Eğilme modülü (MPa)	4300
Lzod çentikli darbe dayanımı (kJ/m^2)	19
Isı bozulma sıcaklığı (°C)	88



Resim 3.5. ESUN eASA filament (URL 4)

4. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde daha önce yapılmış literatür çalışmaları ve temel bilgiler kapsamında amaçlanan test ve deneylerin hazırlanma prosedürlerinden bahsedilmiştir. Yapılan burulma, basma ve çekme testlerine uygun parça tasarımlarıyla ilgili bilgiler aktarılmıştır. İç doluluk geometrisi, iç doluluk oranı ve malzeme seçiminin yapısal dayanıma olan etkisinin belirlenmesi için ayrı ayrı test prosedürleri oluşturulmuştur. İç doluluk geometrisi ve oranı burulma testiyle, malzemenin etkisi çekme ve basma testleriyle analiz edilmiştir.

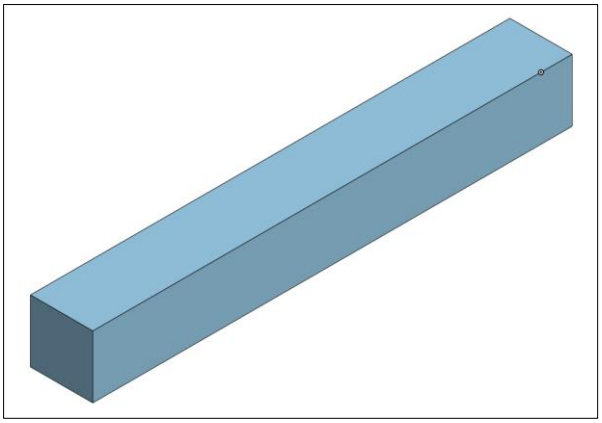
4.1. Burulma Testi İçin Tasarım ve Kurulum

"Burulma testi" terimi genellikle mühendislik, malzeme bilimi veya yapısal analiz bağlamında kullanılır. Bu terim, bir malzemenin, bir yapı elemanının veya bir parçanın belirli bir miktarda torka veya dönme kuvvetine maruz kaldığında ne kadar deforme olduğunu veya burulduğunu ölçen bir testi ifade eder.

Burulma testi, genellikle malzemenin mukavemet özelliklerini, elastik ve plastik deformasyon davranışını anlamak için kullanılır. Bu test, bir malzemenin burulma direncini, elastik sınırlarını ve malzemenin burulma sonucu meydana gelen deformasyon miktarını belirlemek için tasarlanmıştır.

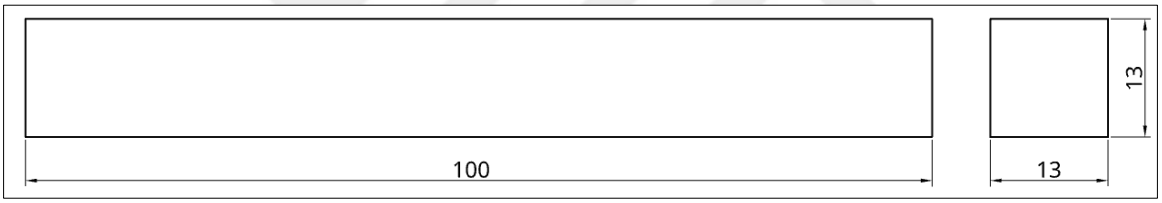
Bu tür bir test genellikle bir tork uygulama cihazı kullanılarak gerçekleştirilir. Malzeme, belirli bir torka maruz bırakılırken, deformasyon miktarı ölçülerek malzemenin burulma özellikleri analiz edilir. Bu test, metal, plastik, kompozit malzemeler gibi çeşitli malzemelerin mühendislik uygulamalarında önemli bir rol oynar.

Burulma testi için tez kapsamında diktörtgen bir parça tasarlanmıştr. Burulma torkunun minimum olmasını sağlamak amacıyla parça kalınlığı olabildiğince azaltılmıştır. Şekil 4.1’de parçanın 3 boyutlu görüntüsü, Şekil 4.2’de parça ölçüleri belirtilmiştir.



Şekil 4.1. Burulma testi için tasarlanan test parçasının 3 boyutlu izometrik görüntüsü

Dikkat edilen bir başka husus çeşitli iç doluluk geometrilerine uygun tasarım yapılmış olmasıdır. 13 mm'den daha az kalınlıklarda denenecek olan iç doluluk desenlerinin baskısı tasarıma uygun olmamıştır. Bu yüzden kalınlık parça kalınlığı 13 mm olarak belirlenmiştir.



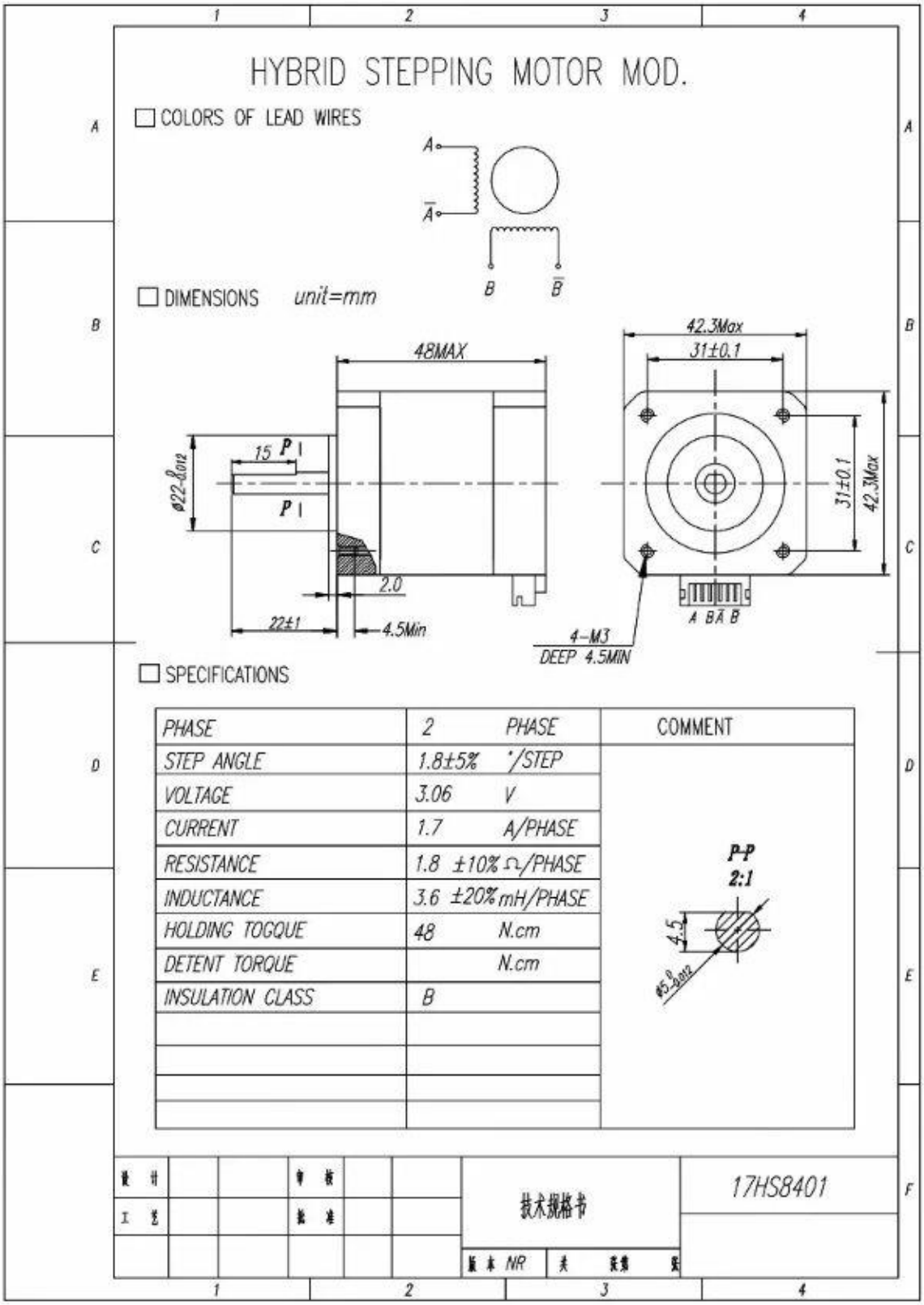
Şekil 4.2. Burulma testi için tasarlanan parçanın ölçüleri (mm)

4.1.1. Burulma testi için düzenek kurulumu

Burulma testinin gerçekleştirilmesi için özel bir cihaz tasarlanmıştır. Bu cihazın tasarlanma amacı sabit hızda tork uygulayarak parçanın tork zaman değişimi grafiğini oluşturmaktı. Elle yapılan denemelerde testlerin gereçekleştirilmesi için 20 Nm torkun yeterli olduğu tespit edilmiştir. Burulma testi için NEMA 17HS8401 step motor kullanılmıştır. NEMA 17, Amerikan Ulusal Elektrik Üreticileri Birliği'nin standartlarına göre boyutlandırılmış bir adım motoru serisidir. Bu motorun 1.7 inç (43.2 mm) boyutunda bir kare gövdesi vardır. Motorun ölçüleri ve diğer teknik bilgiler Şekil 4.3'te, izometrik görsel Resim 4.1'de gösterilmiştir.

Motorun teknik özellikleri: **(**URL 5)

- Model: 17HS8401
- Faz: 2
- Adım açısı (derece): 1.8
- Tur başına adım sayısı:200
- Motor boyutu: 42x48 mm
- Çalışma akımı: 1.7 Amper/Faz
- Direnç/Faz(ohm): 1.8
- İndüktans/Faz(mH): 3.2
- Tutunma torku(N.cm): 48
- Kablo damar sayısı: 4
- Motor uzunluk: 48 mm
- Adım açısı doğruluğu :± %5(tam adım,yükte değilken)
- Direnç doğruluğu:±%10
- Endüktans doğruluğu: ±%20
- Ortam sıcaklığı: (-20°) - (+50°)
- İzolasyon direnci: 100MΩ Min, 500 VDC
- İzolasyon gücü: 500VAC bir dakika süreyle



Şekil 4.3. NEMA 17HS8401 step motorunun teknik resim ölçüleri (URL 5)



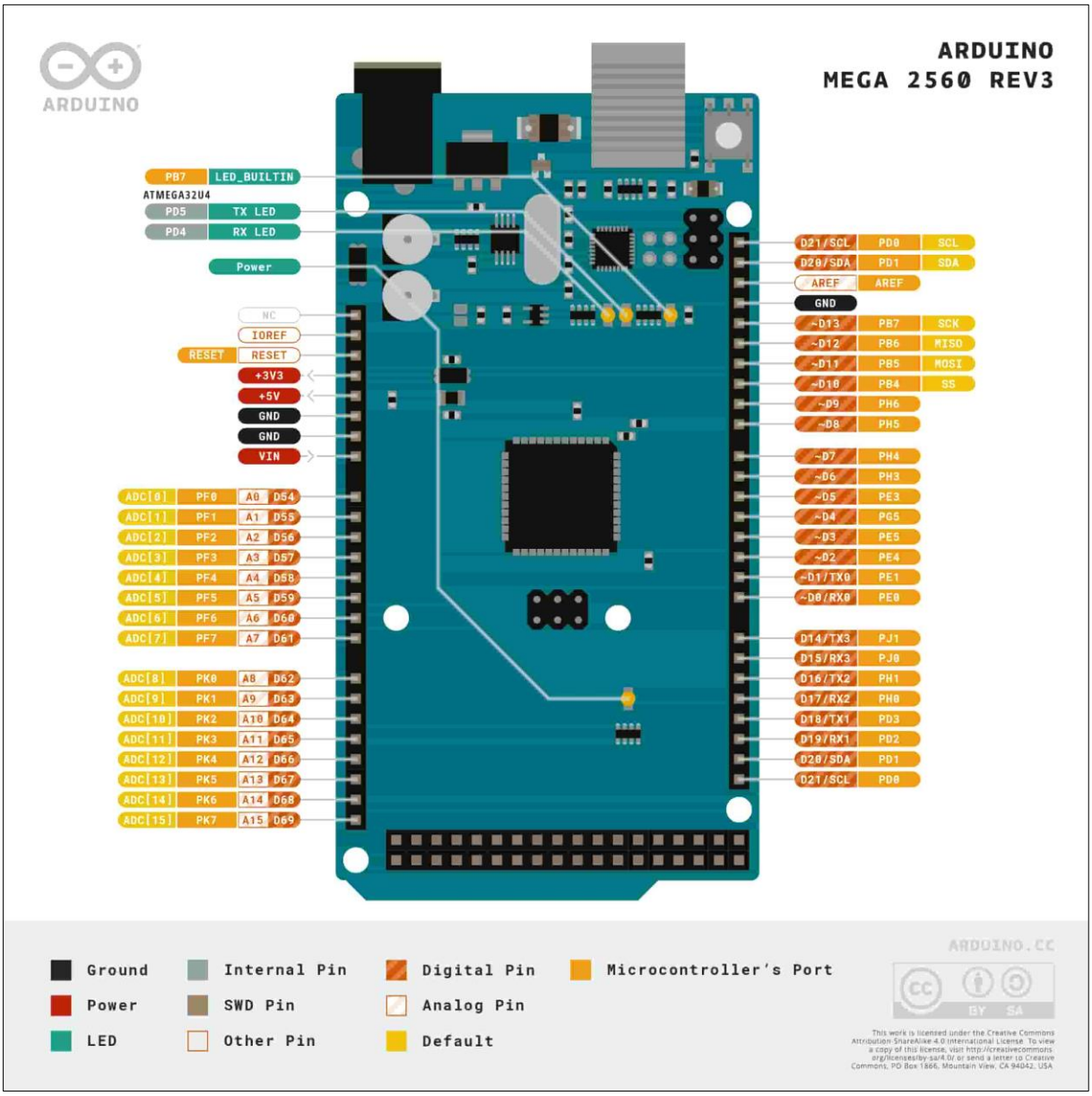
Resim 4.1. NEMA 17HS8401 step motorunun izometrik görüntüsü (URL 5)

Step motorun kontrolü Arduino Mega 2560 R3 işlemcisi ile sağlanmıştır. Arduino Mega 2560 ATmega2560 çipi üzerine kurulmuş bir mikrokontrolcü kartıdır. Üzerinde 54 dijital giriş/çıkış pini (15 tanesi pwm kapasiteli), 16 analog giriş, 4 UART (donanımsal seri port), 16 MHz kristal osilatör, Usb bağlantısı, güç girişi, ICSP pinleri ve bir adet reset butonu ve mikro kontrolcüde olması gereken temel özellikleri içerir (URL 6). Şekil 4.4'te işlemcinin pin şematiği, Resim 4.2'de işlemcinin izometrik görünümü gösterilmiştir.

Özellikler: **(**URL 6)

- Mikro kontrolcü: ATmega2560
- Çalışma voltajı: 5v
- Giriş voltajı(tavsiye edilen): 7-12v
- Giriş voltajı(limit): 6-20v
- Dijital giriş/çıkış pini : 54 adet(15 tanesi pwm kapasiteli)
- Analog giriş pini:16 adet
- Her pinin geçirebileceği en fazla akım: 20mA
- 3.3v pininin en fazla geçirebileceği akım: 50mA
- Flaş bellek: 256KM(8KB bootloader)
- Sram: 8KB

- EEPROM: 4KB
- Saat hızı: 16MHz
- Uzunluk: 101.52mm
- Genişlik: 53.3mm
- Ağırlık: 37g



Şekil 4.4. Arduino MEGA 2560 Rev 3 pin şematiği (URL 6)



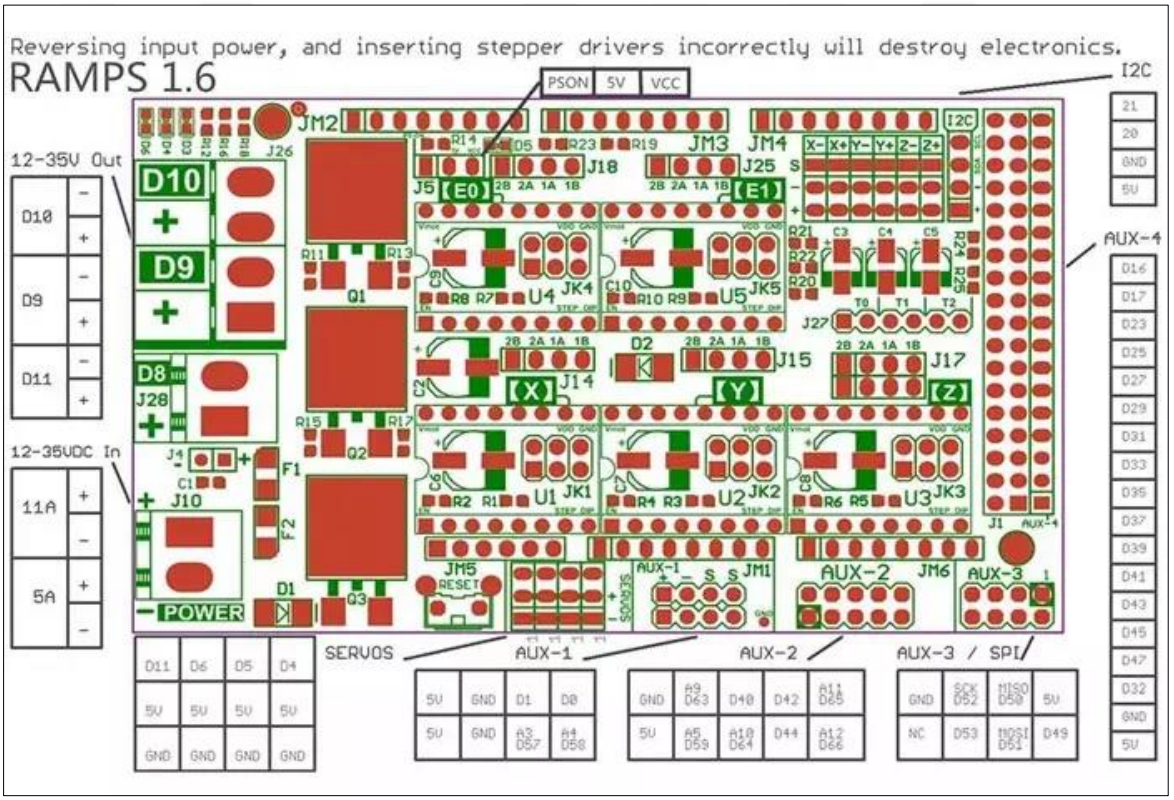
Resim 4.2. Arduino MEGA 2560 Rev3 (URL 6)

İşlemciyi step motor sürücüsüyle aynı devrede bağlamak için RepRap Ramps v1.6 Kontrol Kartı kullanılmıştır. Ramps 1.6, 4 katmanlı pcb yapısı sayesinde ısı dağıtmada yüksek performansa sahiptir. Ramps 1.6, bağlanması daha basit ve kullanışlı olan yeni 2 pin konektörlere de sahiptir, ayrıca kolayca yanmaz. Dahası Ramps 1.6 modeli, ısı dağılımına daha iyi bir işlev vermek için MOS tüpünün üzerinde iyi bir soğutucuya sahiptir. Şekil 4.5'te kontrol kartının pin şematiği, Resim 4.3'te üstten ve yandan görünümü gösterilmiştir (URL 7).

Özellikler: (URL 7).

- Model: Ramps 1.6
- LCD ve diğer parçalara genişletilebilir.
- Isıtıcı ve fan MOSFET çıkışları ve 3 termistör arabirimi vardır.

- 5A ek güvenlik ve bileşen koruma sigortası
- Isıtmalı yatak ek 11A sigortaları kontrol eder.
- 5 step sürücü kapasitesi vardır.
- I2C ve SPI pinleri gelecekteki genişleme için kullanılabilir.
- Boyut: 101.5 x 60.5mm
- Destek motor sürücüleri: beş motor sürücüleri eşzamanlı olarak, A4988, DRV8825 ve diğer motor sürücüleri
- Giriş voltajı: 12V
- MOSFET: B55NF06



Şekil 4.5. RepRap Ramps v1.6 kontrol kartının pin şematiği (URL 7)



Resim 4.3. RepRap Ramps v1.6 kontrol kartı (URL 7)

Step motorun sürülmesini sağlamak için A4988 sürücü kartı kullanılmıştır. A4988 step motorları mikro adımlarla kontrol etmek için tasarlanmış bir çiptir. Tam , yarım ¼, 1/8 ve 1/16 bipolar motor sürüş modları bulunur. Motor sürme voltajı 35v volta kadar destekler. 2A kadar motor sürebilir ve akımı akım regülatörü sayesinde kontrol edilebilir. Her bir sinyalinde step motorun bir fazına sinyal gönderir. Kullanılan motor tipine göre motorun dönüş adımı sayılabilir. Resim 4.4'te A4988 sürücü kartının görseli mevcuttur (URL 8).

Özellikler: (URL 8).

- Otomatik akım kontrolü
- Akım düşme kontrolü

- Senkron doğrultma (Düşük güç tüketimi için)
- Dahili UVLO
- Ters akım koruması
- Mantıksal 3.3v veya 5v seçeneği
- Sıcaklık koruması
- Kısa devre yük koruması
- 5 farklı adım seçeneği: tam, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16



Resim 4.4. A4988 sürücü kartı (URL 8)

Cihazın çalıştırılması için güç kaynağı olarak 12V 10A Slim metal kasa 120W adaptör tercih edilmiştir. A+ seviyesinde güç tüketimine sahiptir. (URL 9). Resim 4.5'te kullanılan güç kaynağı gösterilmiştir.

Özellikler: (URL 9)

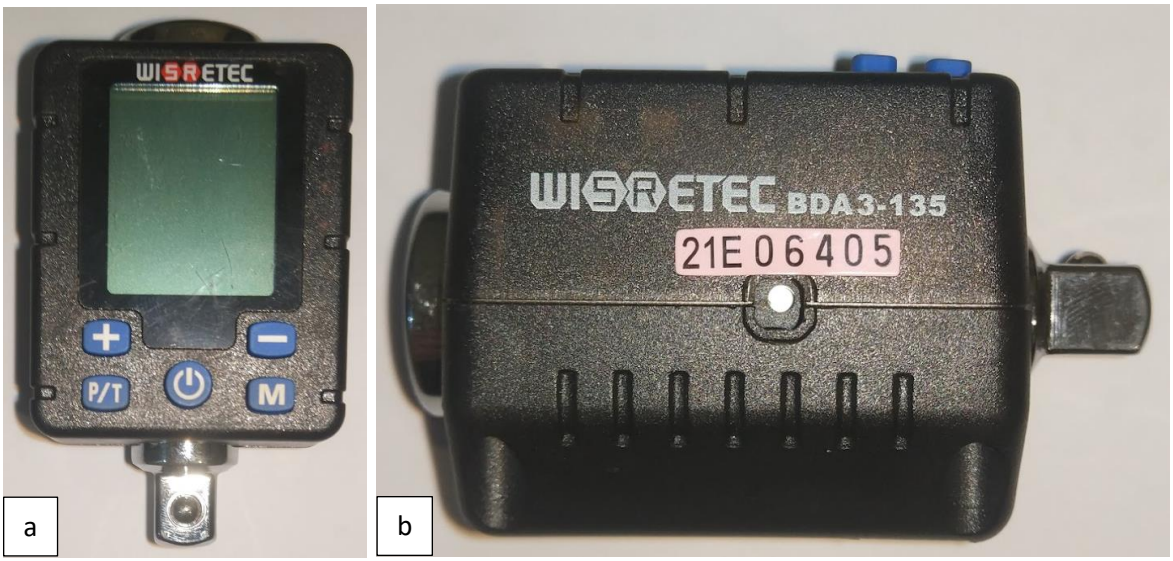
- Model: TS210-1
- Metal Kasa
- Giriş voltajı : AC 87V-264V, 50/60 Hz
- Çıkış voltajı : 12VDC
- Çıkış akımı : 10A
- Güç : 120 watt

- Slim adaptör
- Boyut: 185x45x32
- ROHS uygunluğu
- Ip Sınıfı: Ip20
- Çalışma Sıcaklığı: -20 - +50°C
- Su, nem, buhar, aşırı sıcak vb. ortamlardan uzak kullanılmalıdır.



Resim 4.5. TS210-1 12V 10A slim güç kaynağı adaptörü (URL 9)

Burulma testinde “WISRETEC BDA 3-135” isimli torkmetre cihazı kullanılmıştır. Bu cihazın maksimum ölçümü 135 Nm’dir. Resim 4.6’da cihazın görüntüsü gösterilmiştir.



Resim 4.6. WISRETEC BDA3-135 isimli torkmetre cihazı: (a) üst görüntü; (b) yan görüntü

Step motorun Arduino ile sürülmesi için Marlin yazılımı kullanılmıştır. NEMA 17HS8401 motorun tutunma torku 0.48 Nm olsa da, dönerken uygulayabildiği tork 0.1 Nm'dir. Dolayısıyla bu torku yükseltecek bir dişli sistemi tasarlanmış ve uygulanmıştır. Dişli mekanizmasında ardıl planet dişli sistemi kullanılmıştır. Planet dişli sistemi, bir merkez dişli (güneş dişlisi) etrafında dönen birden fazla dişliden (gezegen dişlileri) oluşan bir dişli sistemidir. Bu sistem, yüksek tork ve kompakt boyut gibi birçok avantajı nedeniyle birçok farklı alanda kullanılmaktadır.

Planet dişli sisteminin temel parçaları şunlardır:

- Güneş dişlisi: Sistemin merkezinde bulunan dişlidir.
- Gezegen dişlileri: Güneş dişlisi etrafında dönen dişlilerdir.
- Çevre dişlisi: Planet dişlileri etrafında sabit duran dişlidir.
- Taşıyıcı: Planet dişlilerini ve güneş dişlisini taşıyan yapıdır.

Güneş dişlisi döndüğünde, planet dişlileri de onunla birlikte döner. Planet dişlileri, taşıyıcıya bağlı olduklarından, çevre dişlisini de döndürürler. Bu sistem, dişli oranına bağlı olarak, giriş milinden daha yüksek bir tork çıkış milinde elde etmeyi sağlar.

Planet dişli sisteminin avantajları:

- Yüksek tork: Planet dişli sistemi, giriş milinden çok daha yüksek bir tork çıkış milinde elde etmeyi sağlar.
- Kompakt boyut: Planet dişli sistemi, klasik dişli sistemlerine kıyasla çok daha kompakt bir yapıya sahiptir.
- Yüksek verim: Planet dişli sistemi, klasik dişli sistemlerine kıyasla daha yüksek verime sahiptir.
- Düşük ses seviyesi: Planet dişli sistemi, klasik dişli sistemlerine kıyasla daha az ses üretir.

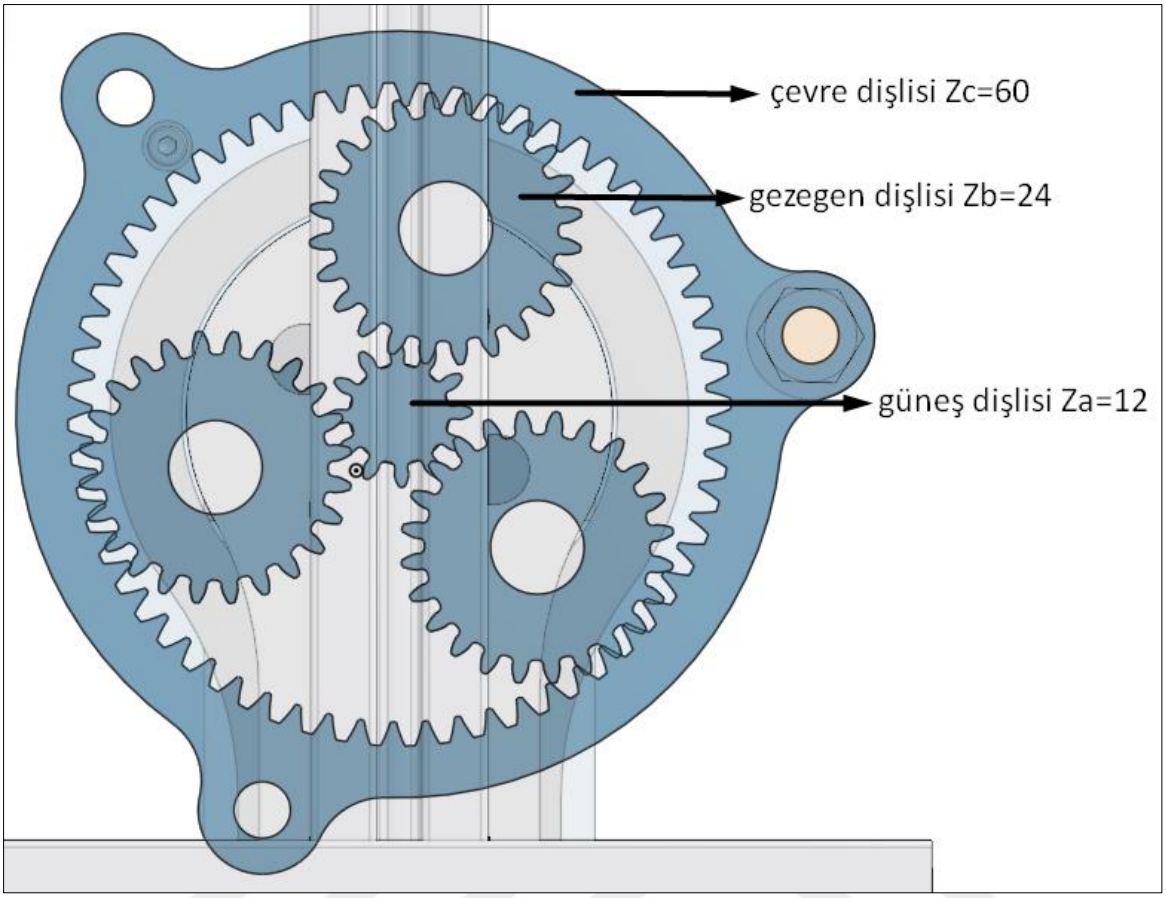
Planet dişli sistemi, yüksek tork ve kompakt boyut gibi birçok avantajı nedeniyle birçok farklı alanda kullanılmaktadır. Karmaşık ve pahalı bir sistem olmasına rağmen, birçok uygulamada klasik dişli sistemlerine kıyasla daha iyi bir çözüm sunmaktadır.

Tez kapsamında yapılan dişli mekanizmasında her biri 3 adet gezegen, 1 adet güneş ve 1 adet çevre dişlisinden oluşan ardıl 3 adet planet dişli sistemi kullanılmıştır.

Her sistem için redüksiyon oranı: i = Zc/Za+1 şeklinde hesaplanmaktadır.
i = Zc/Za + 1 = 60/12 + 1 = 6

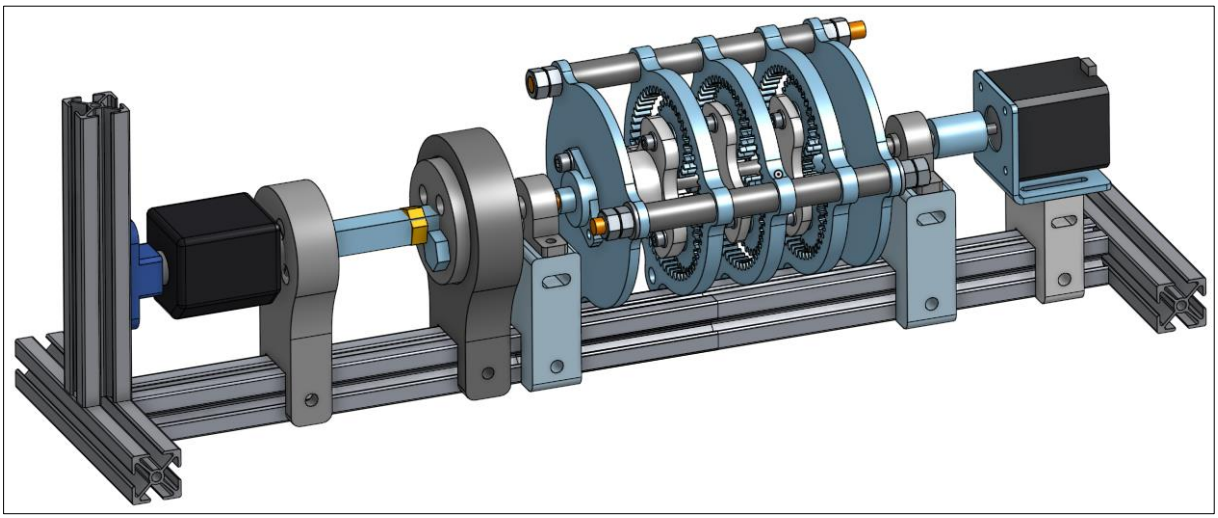
Dolayısıyla her seferinde %98 verimle aktarım olduğunu varsayarsak:
T1 = T0*i*E = 0,1*6*0,98 = 0,588 Nm
T2 = T1*i*E = 0,588*6*0,98 = 3,457 Nm
T3 = T2*i*E = 3,457*6*0,98 = 20,327 Nm

Bu mekanizmayla test için gereken maksimum 20 Nm değere ulaşılmaktadır. Şekil 4.6’da tez kapsamında yapılan cihazın dişli mekanizmasının bir kısmının tasarımı gösterilmiştir.



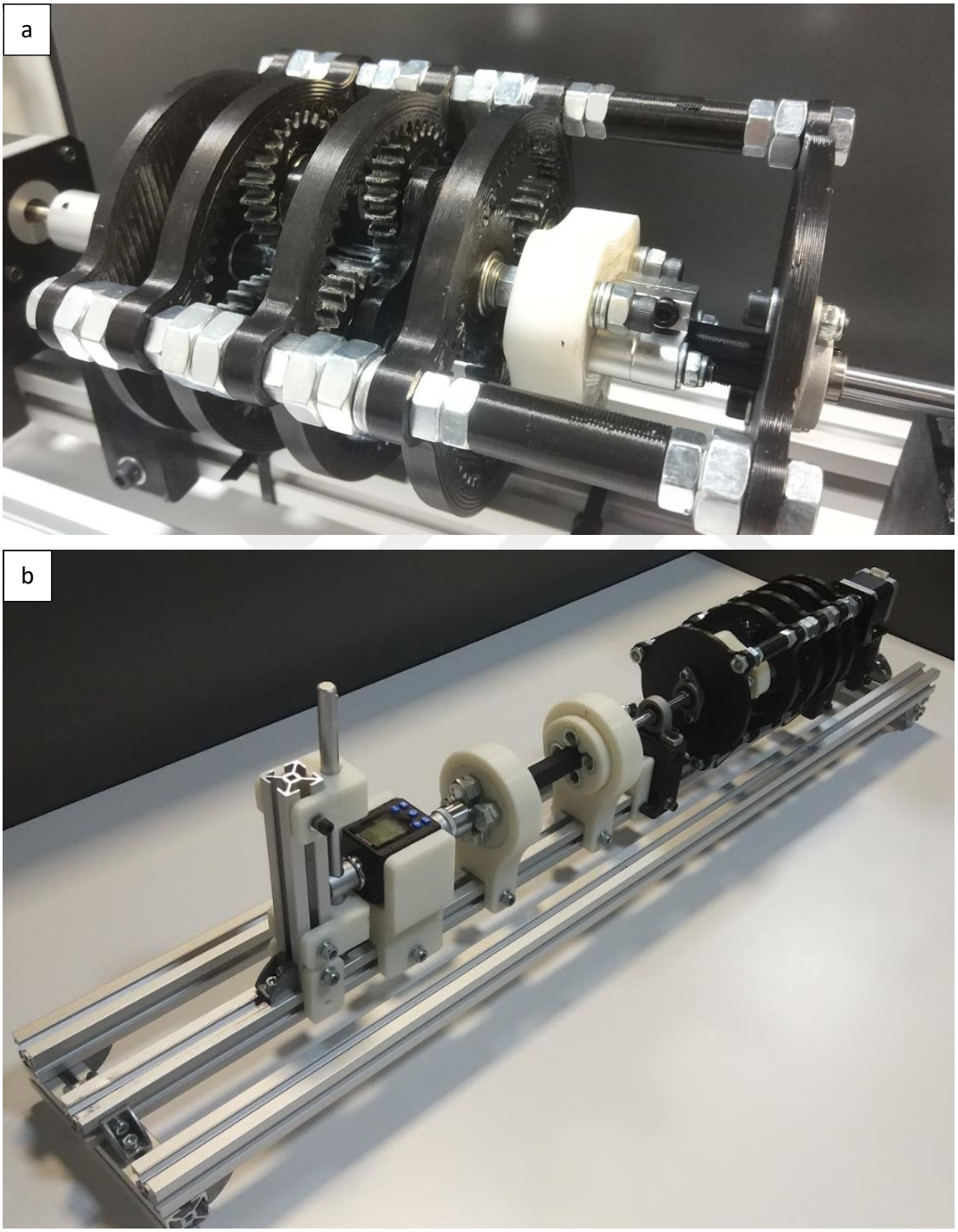
Şekil 4.6. Planet dişli mekanizması tasarımı

Şekil 4.7'de cihazın tam tasarım görüntüsü yer almaktadır. Tasarım Onshape online çizim programında tamamlanmıştır.

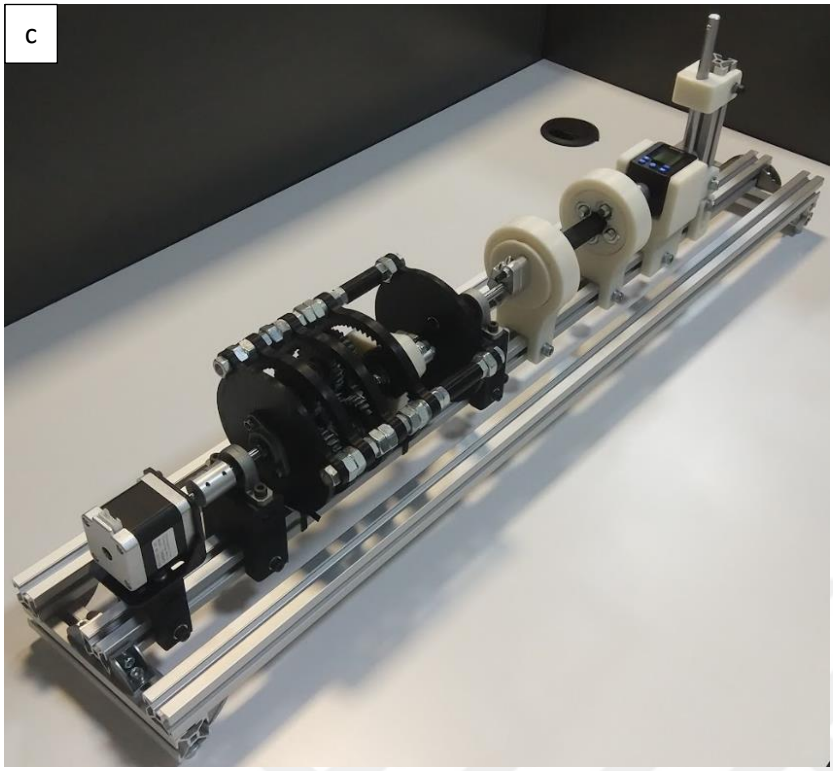


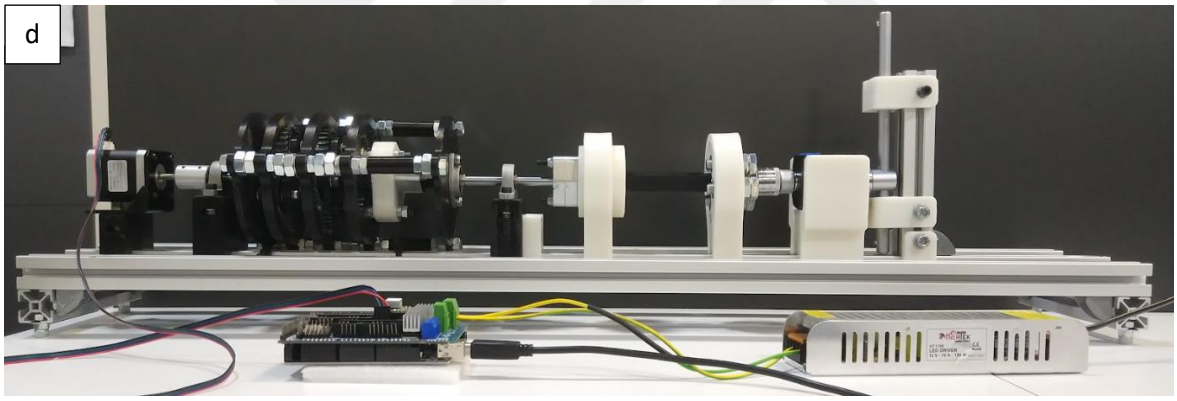
Şekil 4.7. Burulma testi cihazının Onshape programında yapılan tasarım görüntüsü

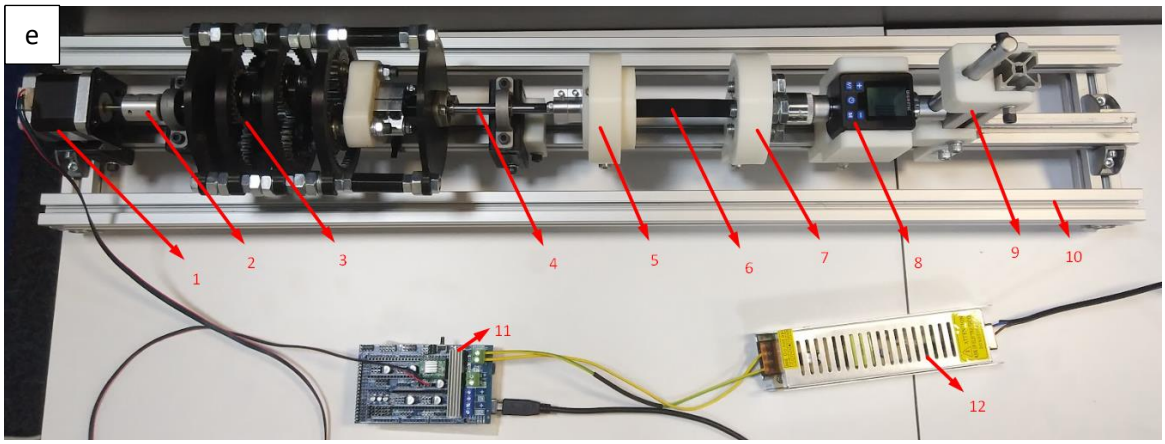
Resim 4.7’de cihaz aksamı numaralarla belirtilmiştir. Ara bağlantı elemanı olarak montaj kolaylığı açısından sigma profiller tercih edilmiştir.



Resim 4.7. Burulma testi cihazı: (a) planet dişli mekanizması; (b) cihazın önden izometrik görüntüsü; (c) cihazın arkadan izometrik görüntüsü; (d) cihazın yandan görüntüsü; (e.1) step motor; (e.2) kapli; (e.3) planet dişli mekanizması; (e.4) aktarma mili; (e.5) ön tutucu; (e.6) test parçası; (e.7) arka tutucu; (e.8) torkmetre; (e.9) torkmetre sabitleyici; (e.10) sigma profil; (e.11) arduino, repramps ve sürücü kartı; (e.12) güç kaynağı

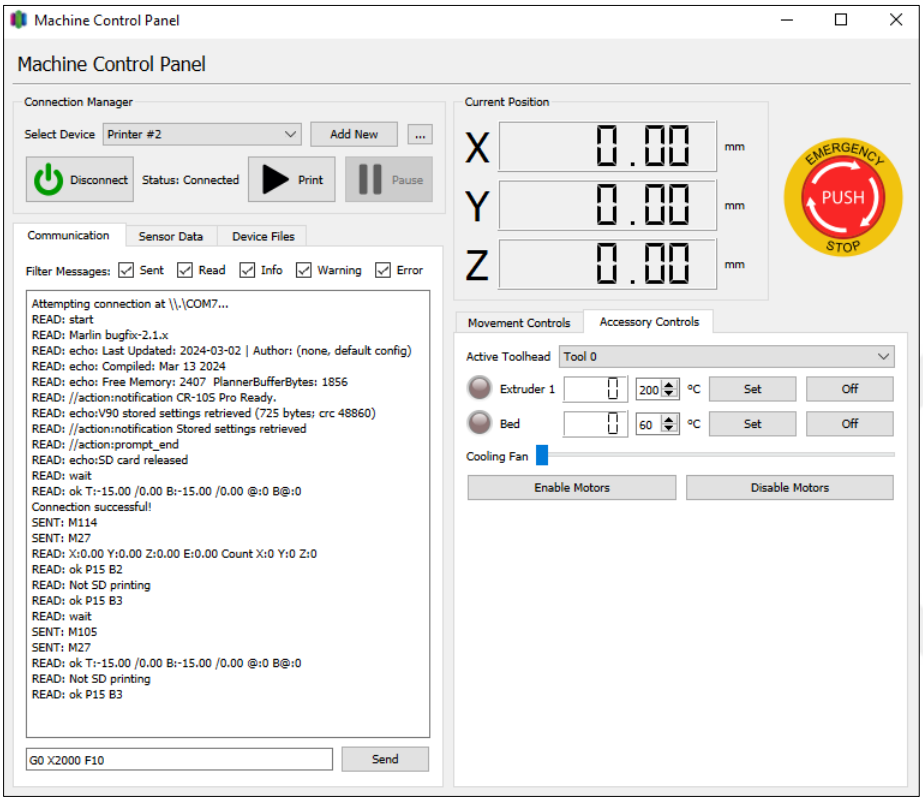






Resim 4.7. (devam) Burulma testi cihazı: (a) planet dişli mekanizması; (b) cihazın önden izometrik görüntüsü; (c) cihazın arkadan izometrik görüntüsü; (d) cihazın yandan görüntüsü; (e.1) step motor; (e.2) kapli; (e.3) planet dişli mekanizması; (e.4) aktarma mili; (e.5) ön tutucu; (e.6) test parçası; (e.7) arka tutucu; (e.8) torkmetre; (e.9) torkmetre sabitleyici; (e.10) sigma profil; (e.11) arduino, repramps ve sürücü kartı; (e.12) güç kaynağı

Cihaz “Simplify 3B V5.0” programıyla çalıştırılmıştır. Bu program aracılığıyla Arduino üzerinden cihaza veri göndererek motoru hareket ettirmek mümkündür. Şekil 4.8’de programın kontrol arayüzü gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Simplify V5.0 programının step motor kontrol arayüzü

Step motor 0,966 rad/saniye hızda çalıştırılmıştır. Planet dişli mekanizması frekansı 6^3=216 kat azalttığı için:

$n_{çıkış}$ = 0,966/216 = 0,00447 rad/saniye frekansta test parçası dönmektedir.

$T_{step\ motor}$ = 6,5 saniye/tur

$T_{test\ parçası}$ = 2π/n = 2*3,14/0,00447 = 1404,92 saniye = 23 dakika 24 saniye / tur

Genelde parçalar maksimum 2 tur burulma sonucunda kopmuştur. Diğer bir ifadeyle, testler 23-46 dakika arasında sürmüştür.

Burulma testi 2 aşamalı şekilde gerçekleştirilmiştir:

- İlk aşama – Parçaların iç doluluk desenlerinin etkisi incelenmiştir. Bu yüzden ilk aşamada ESUN PLA+ malzemesiyle ve sadece %25 iç doluluk oranıyla desenler

değiştirilerek parçaların baskısı alınmıştır. Her iç doluluk geometrisi (deseni) için 3 adet test gerçekleştirilmiştir.

- İkinci aşama – En dayanıklı iç doluluk geometrisi belirlendikten sonra aynı iç doluluk deseniyle ESUN PLA+ malzemeden her birinden 3 adet olmak üzere %45, %65 ve %85 iç doluluk oranlarıyla test parçalarının baskısı alınmıştır. Her doluluk oranı 3 kez test edilmiştir.

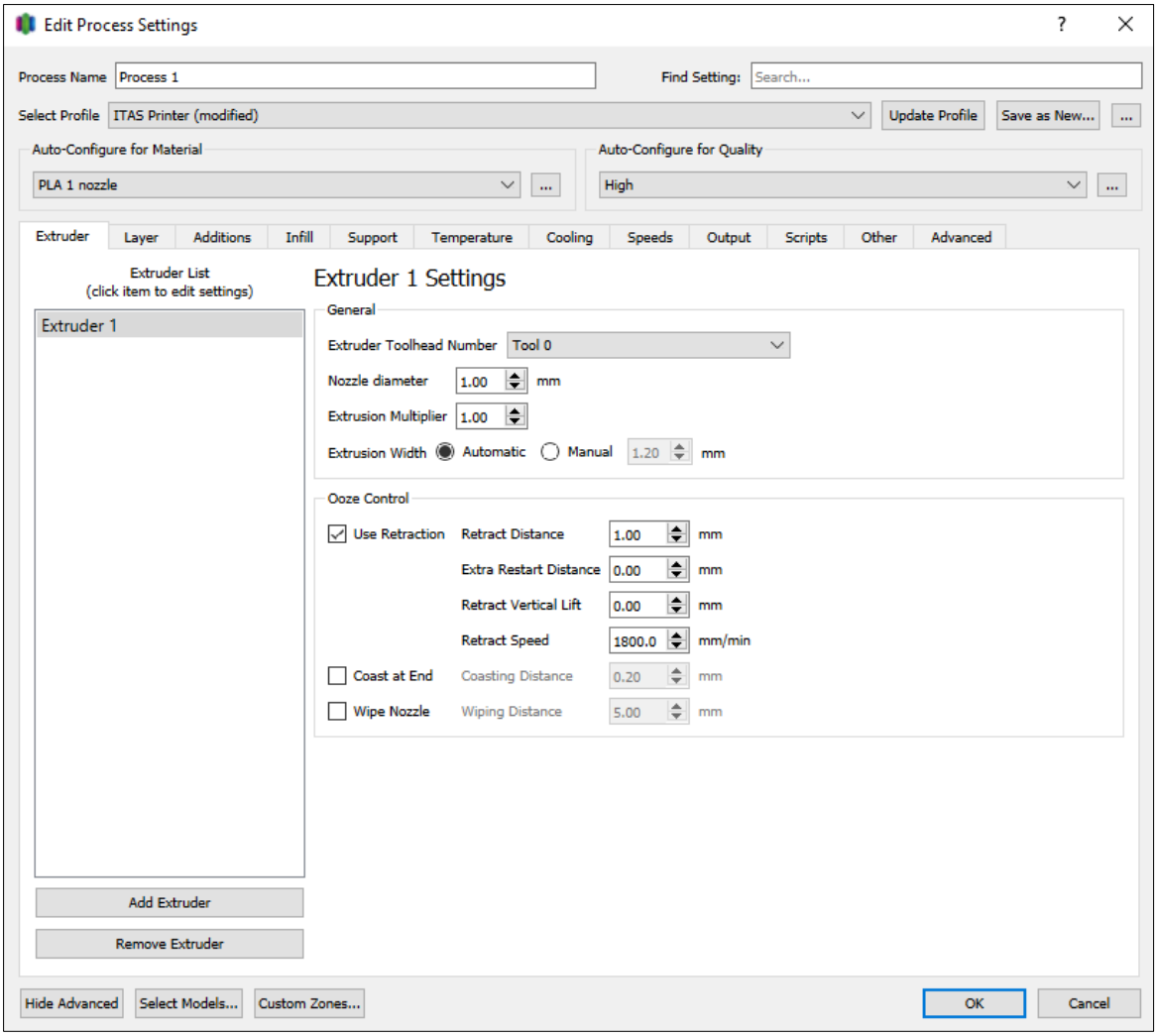
Test parçalarının iç doluluk geometrilerinin FDM baskıya ayarlanması için "Simplify 3B V5.0" programı kullanılmıştır. Şekil 4.9'da programın nozul çapı ayarının, Şekil 4.10'da katman ayarının, Şekil 4.11'de iç doluluk oranı ayarının, Şekil 4.12'de baskı hızı ayarının arayüzü gösterilmiştir.

Cihaz bu şekilde ayarlanmıştır:

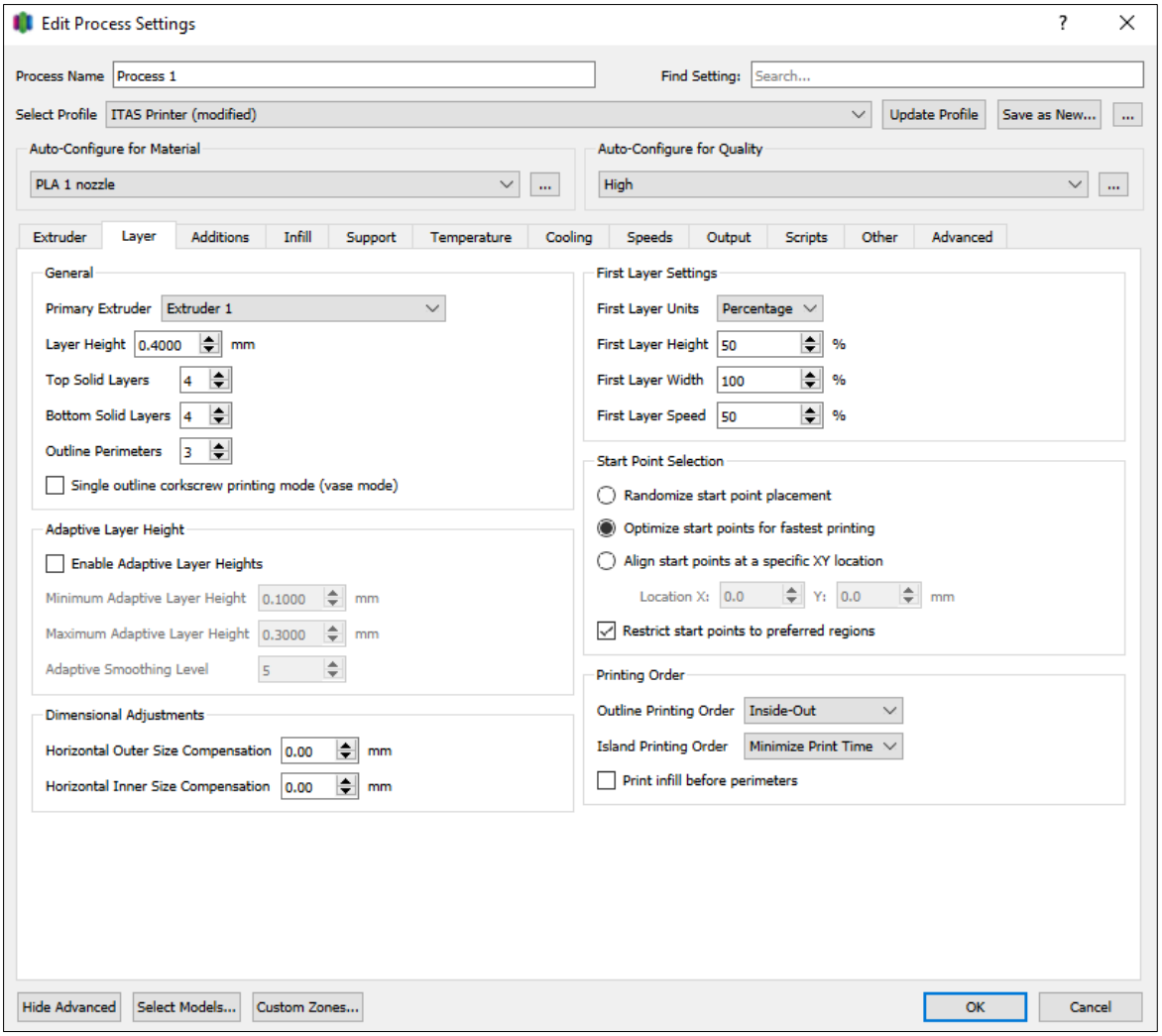
- Nozul çapı: 1 mm
- Tabla sıcaklığı: 60 ^{o}C
- Nozul sıcakığı: 200 ^{o}C
- Fan hızı: %100 hızda (2 adet 5V DC fan kullanılmıştır)
- Baskı hızı: 1800 mm/dakika
- Katman yüksekliği: 0.4 mm

Aşağıdaki iç doluluk geometrileri test edilmiştir:

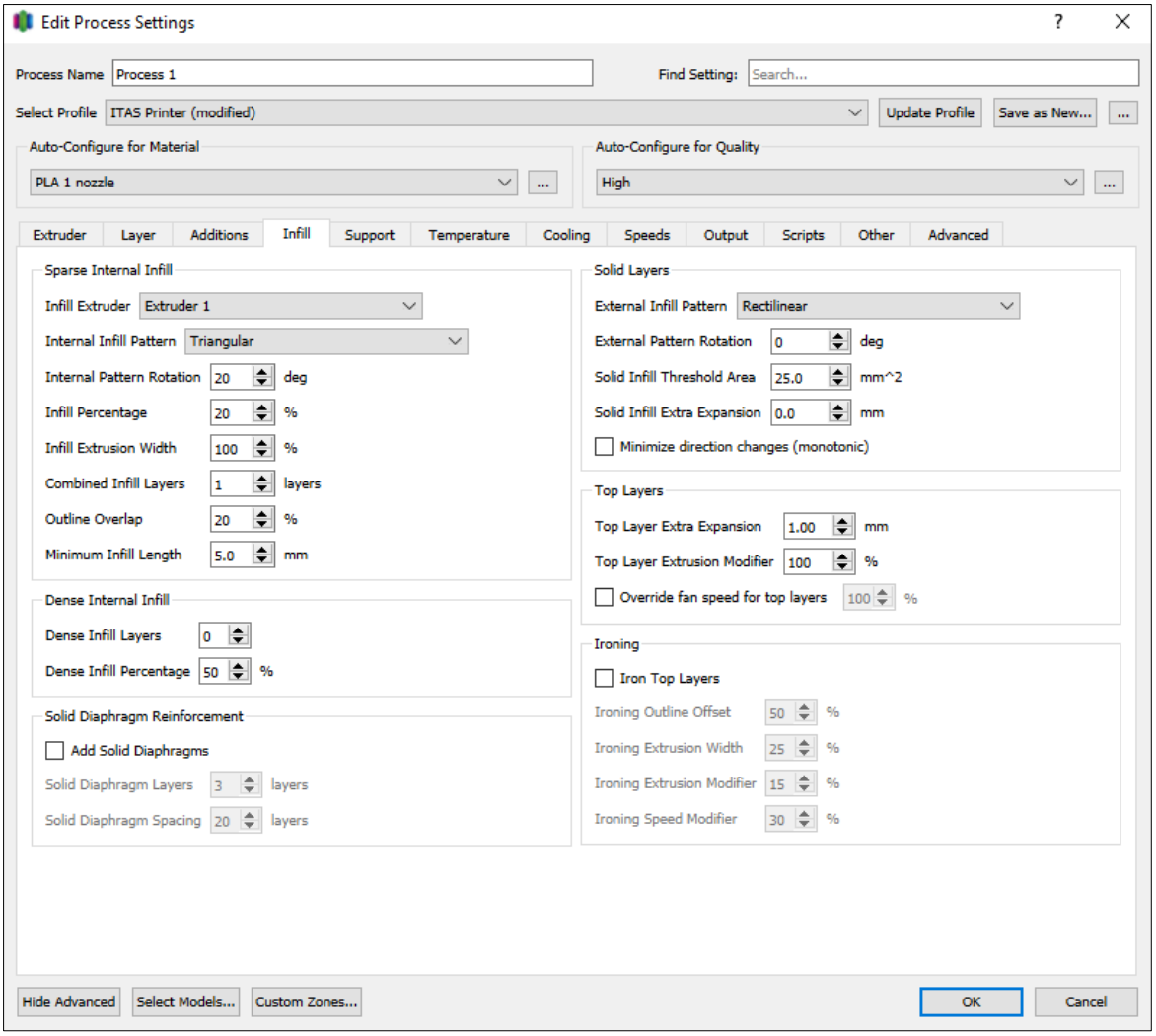
- Grid (ızgara)
- Octahedral (sekizgen)
- Fast honeycomb (hızlı petek)
- Sinusoidal
- Cubic (kübik)
- Rectilinear (doğrusal)
- Full honeycomb (tam petek)
- Triangular (üçgen)
- Gyroid (jiroskopik)



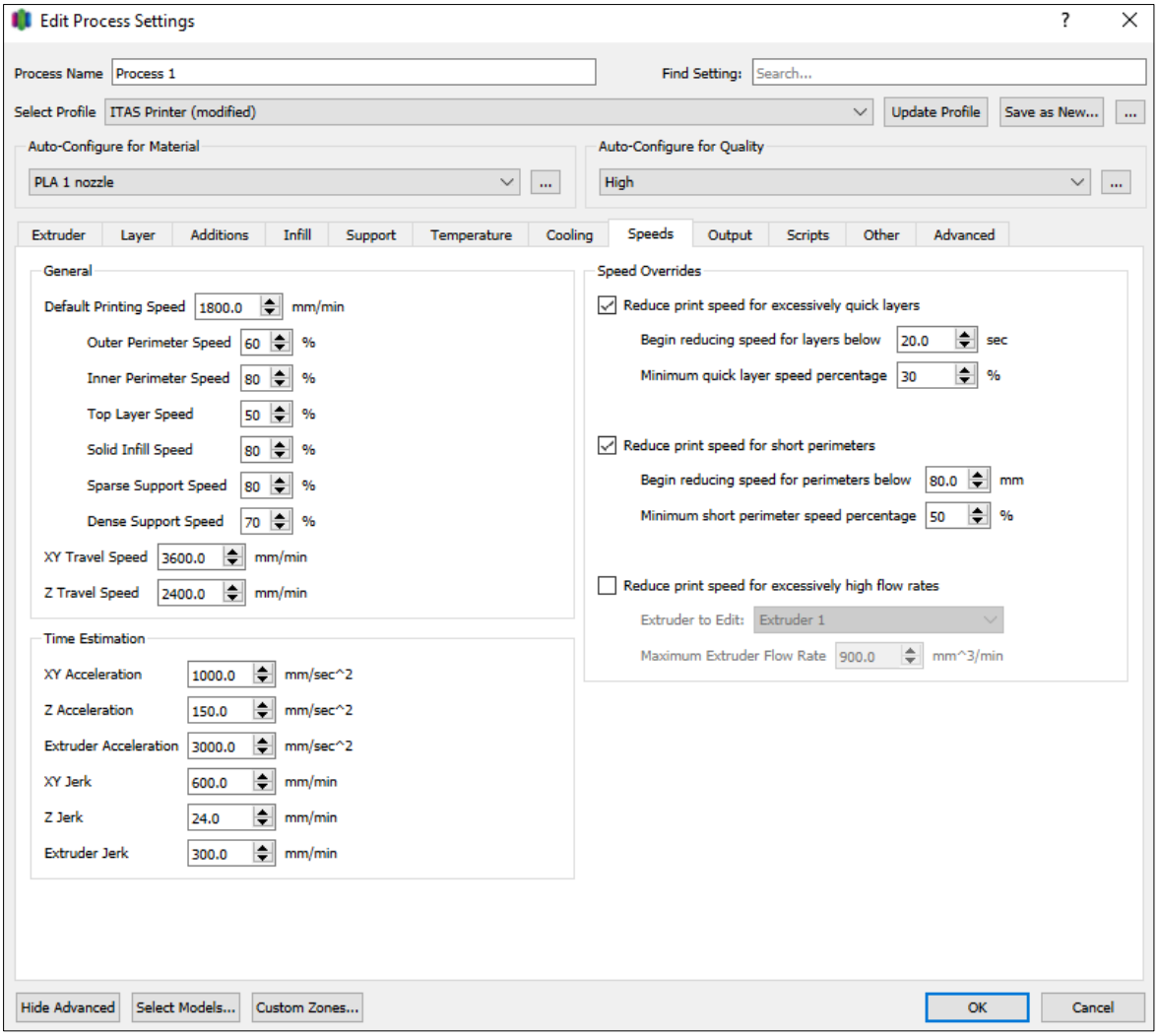
Şekil 4.9. Simplify 3B V5.0 program arayüzünde nozul ayarı



Şekil 4.10. Simplify 3B V5.0 program arayüzünde katman ayarı



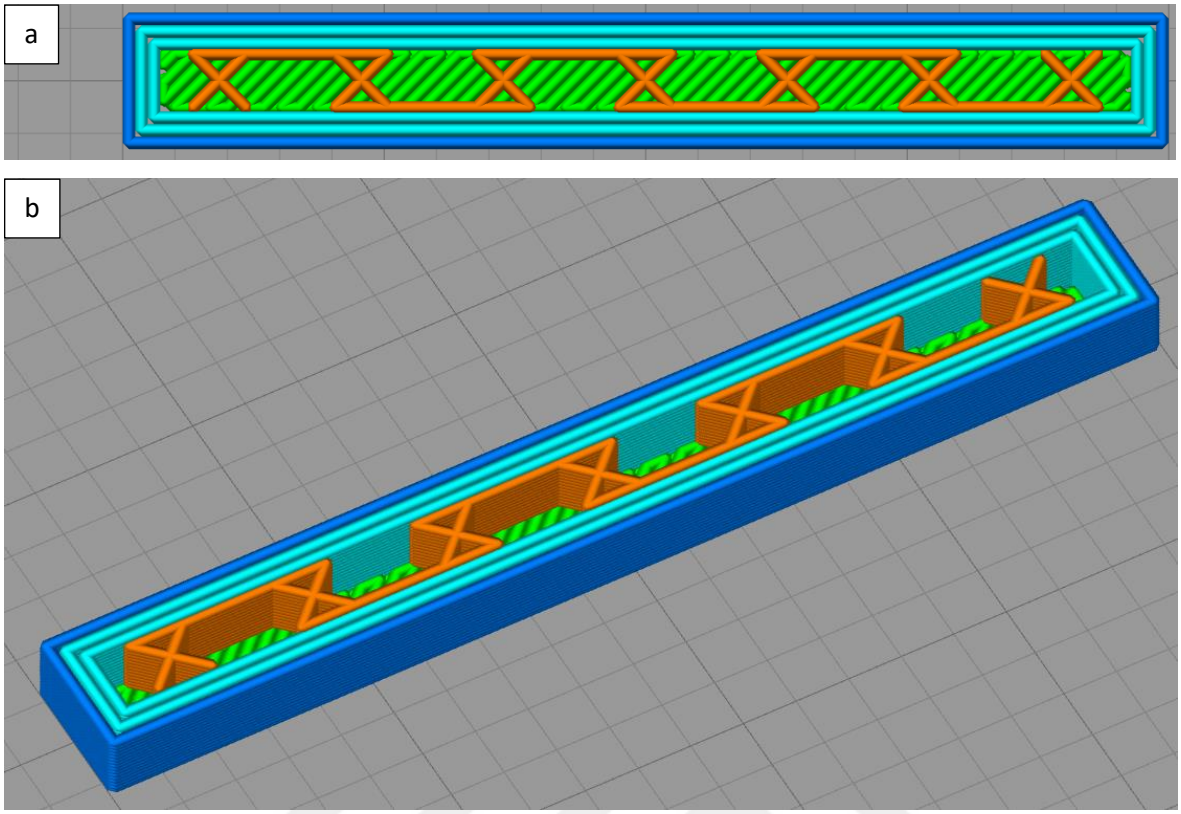
Şekil 4.11. Simplify 3B V5.0 program arayüzünde iç doluluk ayarı



Şekil 4.12. Simplify 3B V5.0 program arayüzünde baskı hızı ayarı

4.1.2. Grid (ızgara) iç doluluk geometrisiyle baskı

Grid iç doluluk geometrisi, bir nesnenin iç kısmının, katmanlar arasında oluşturulan bir ızgara deseni ile doldurulduğu bir desen tipidir. Bu, nesnenin iç kısmının sağlam olmasını ve dayanıklılığını artırmak için kullanılır. Aynı zamanda malzemenin gereksiz yere kullanılmasını önleyerek baskı süresini ve malzeme maliyetini azaltabilir. Bu doluluk geometrisi, genellikle nesnenin iç kısmını desteklemek ve güçlendirmek amacıyla kullanılır. Grid iç doluluk geometrisi, birçok 3B baskı uygulamasında yaygın olarak kullanılan bir doluluk desenidir. Şekil 4.13'te ızgara deseninin baskı şeklinin kesiti gösterilmiştir.



Şekil 4.13. Simplify 3B V5.0 programında test parçasının grid (ızgara) geometrisi ve %25 dolulukla görüntüsü: (a) üst görüntü; (b) izometrik görüntü

Çizelge 4.1'de ızgara deseniyle üretilen test parçasının baskı parametreleri yer almaktadır.

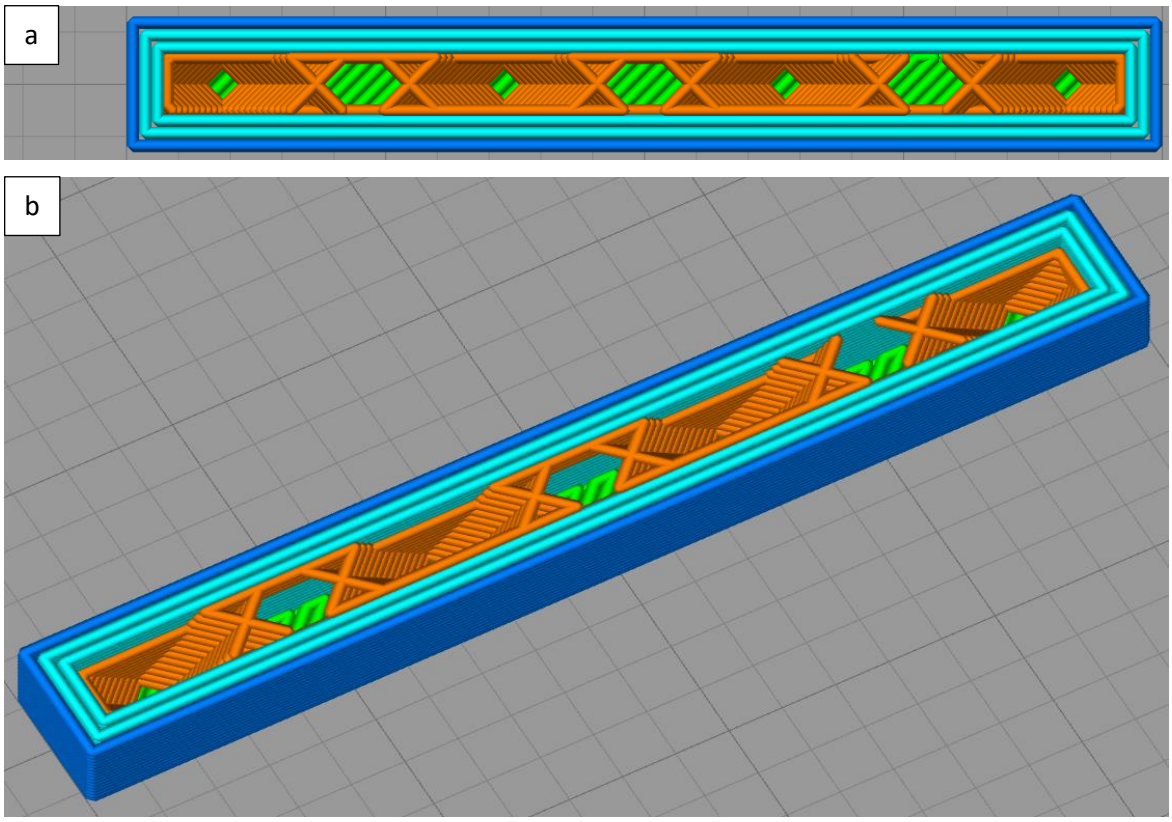
Çizelge 4.1. Grid (ızgara) iç doluluk geometrisiyle baskı parametreleri

Baskı Süresi (dakika)	23
Kullanılan filament uzunluğu (m)	6,03
Parça hacmi (mm^3)	14598
Parça ağırlığı (g)	18,25

4.1.3. Octahedral (sekizgen) iç doluluk geometrisiyle baskı

Octahedral iç doluluk geometrisi, 3B baskıda kullanılan bir doluluk deseni türüdür. Bu geometri, bir nesnenin iç kısmının, octahedron adı verilen sekizgen bir şekil içeren bir desenle doldurulduğu bir desen tipidir. Octahedron, sekiz üçgen yüzeyden oluşan çok yüzlü bir geometrik şekildir. Bu iç doluluk geometrisi, nesnenin iç yapısını desteklemek ve sağlamlaştırmak için kullanılır. Octahedral doluluk, özellikle dayanıklılık gerektiren uygulamalarda tercih edilebilir, çünkü bu geometri, malzemenin iç kısmında güçlü bir yapı

oluşturabilir. Ayrıca, malzeme maliyetini ve baskı süresini optimize etmeye yönelik avantajlar sunabilir. Şekil 4.14'te sekizgen deseninin baskı şeklinin kesiti gösterilmiştir.



Şekil 4.14. Simplify 3B V5.0 programında test parçasının octahedral (sekizgen) geometrisi ve %25 dolulukla görüntüsü: (a) üst görüntü; (b) izometrik görüntü

Çizelge 4.2'de sekizgen deseniyle üretilen test parçasının baskı parametreleri yer almaktadır.

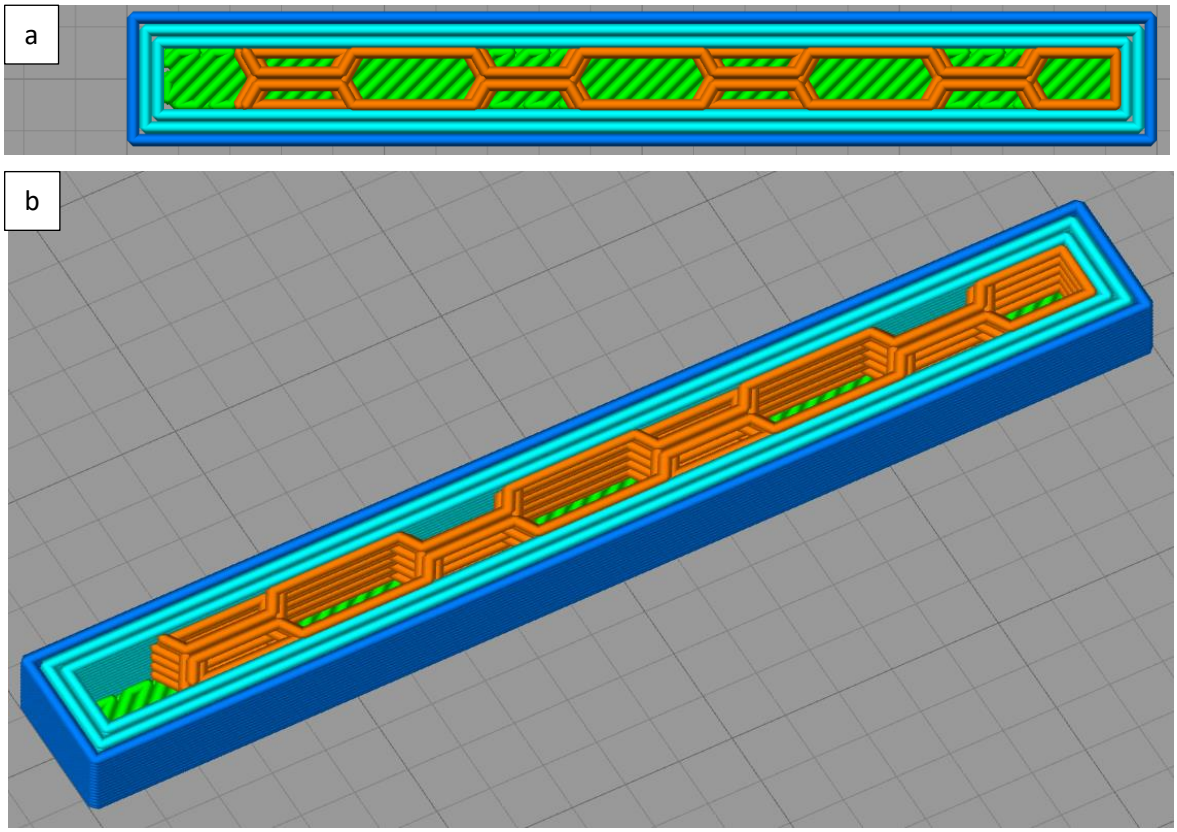
Çizelge 4.2. Octahedral (sekizgen) iç doluluk geometrisiyle baskı parametreleri

Baskı Süresi (dakika)	23
Kullanılan filament uzunluğu (m)	5,89
Parça hacmi (mm^3)	14172
Parça ağırlığı (g)	17,72

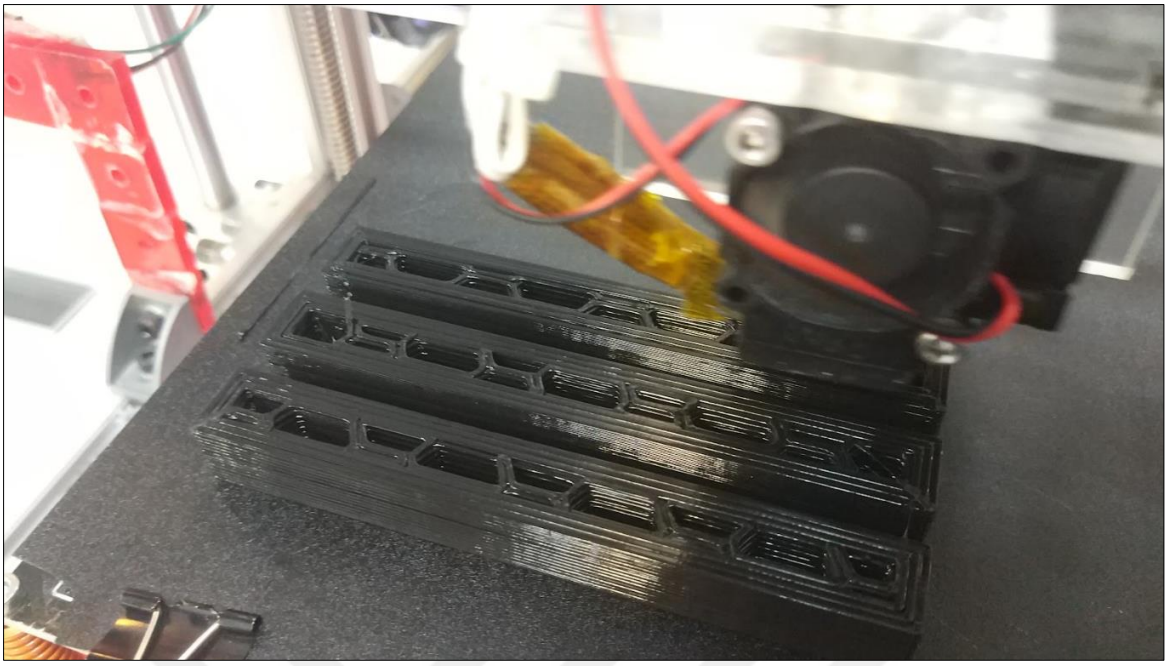
4.1.4. Full honeycomb (tam petek) iç doluluk geometrisiyle baskı

"Full Honeycomb" veya "Tam Petek" iç doluluk geometrisi, 3B baskıda kullanılan bir doluluk deseni türüdür. Bu geometri, nesnenin iç kısmının tamamen altıgen hücrelerden oluşan bir petek deseni ile doldurulduğu bir desen tipidir. Altıgen hücreler, dayanıklı ve etkili

bir iç yapı oluşturmak için sıkça kullanılır. Bu doluluk deseni, malzeme kullanımını optimize etmek, nesnenin iç kısmını desteklemek ve dayanıklılığını artırmak için tasarlanmıştır. Tam petek iç doluluk geometrisi, genellikle hafif ve sağlam yapılar elde etmek isteyenler için uygundur. Ayrıca, malzeme tasarrufu sağlamak ve baskı süresini minimize etmek amacıyla kullanılabilir. Şekil 4.15'te tam petek deseninin baskı şeklinin kesiti gösterilmiştir. Resim 4.8'de tam petek iç doluluk deseniyle baskı sırasında alınan görüntü gösterilmiştir.



Şekil 4.15. Simplify 3B V5.0 programında test parçasının full honeycomb (tam petek) geometrisi ve %25 dolulukla görüntüsü: (a) üst görüntü; (b) izometrik görüntü



Resim 4.8. Full honeycomb (tam petek) iç doluluk geometrisiyle baskı sırasında alınan görüntü

Çizelge 4.3'te tam petek deseniyle üretilen test parçasının baskı parametreleri yer almaktadır.

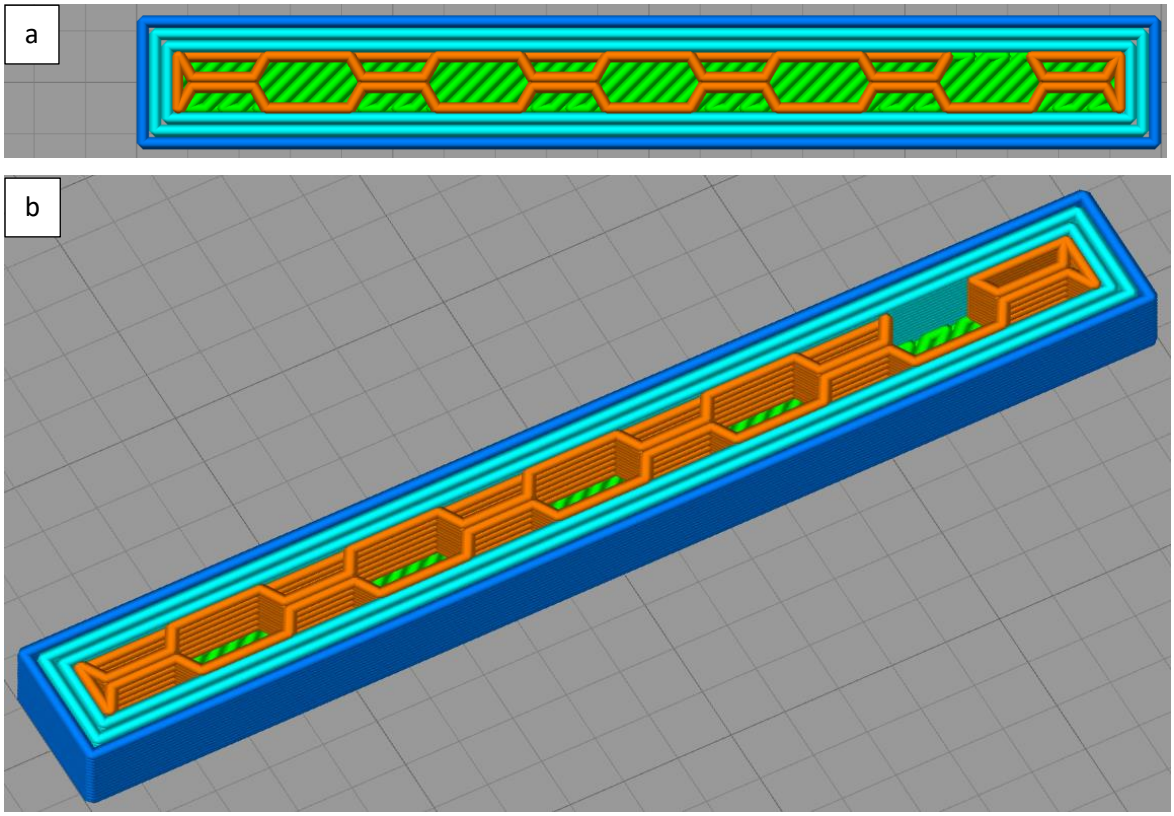
Çizelge 4.3. Full honeycomb (tam petek) iç doluluk geometrisiyle baskı parametreleri

Baskı Süresi (dakika)	22
Kullanılan filament uzunluğu (m)	5,61
Parça hacmi (mm^3)	13498
Parça ağırlığı (g)	16,87

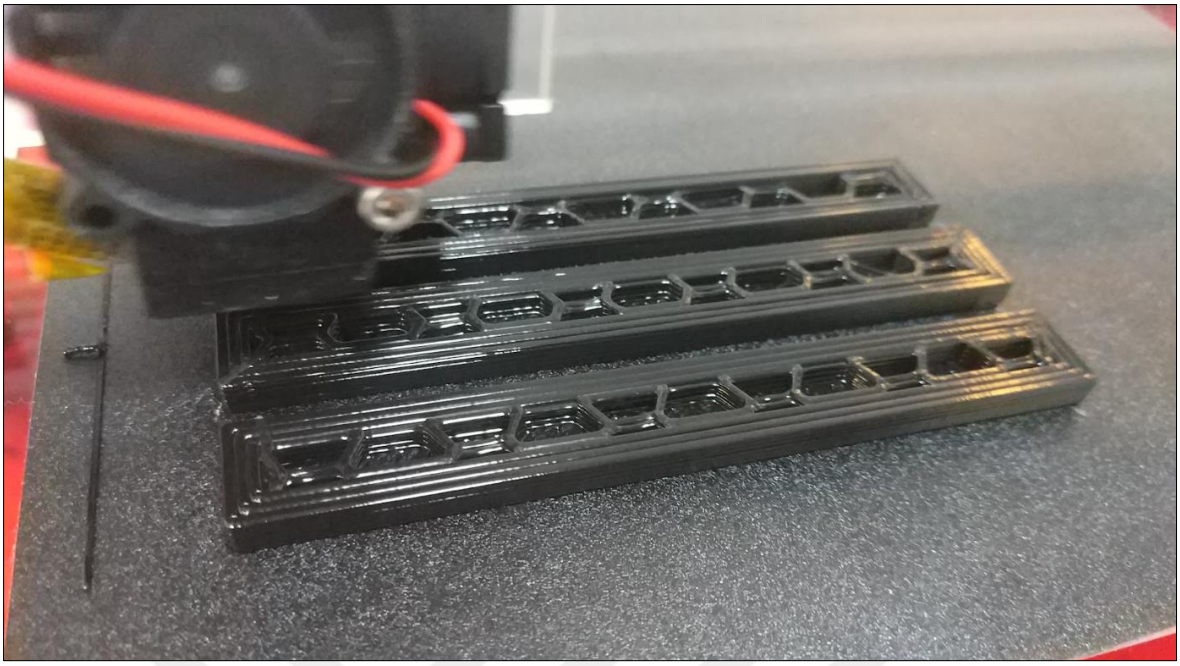
4.1.5. Fast honeycomb (hızlı petek) iç doluluk geometrisiyle baskı

"Fast Honeycomb" veya "Hızlı Petek" iç doluluk geometrisi, 3B baskıda kullanılan bir doluluk deseni türüdür. Honeycomb (Petek) deseni, altıgen hücrelerden oluşan bir düzen içerir ve genellikle iç dolulukta kullanılarak malzeme kullanımını optimize eder. Fast Honeycomb, bu temel petek desenini kullanarak hızlı baskı süreleri ve etkili malzeme kullanımı sağlamak amacıyla tasarlanmış bir iç doluluk geometrisi türüdür. Bu desen, doluluk oranını artırarak nesnenin iç kısmını desteklemeyi ve güçlendirmeyi hedefler. Bu iç doluluk geometrisi, özellikle 3B baskı süreçlerinde baskı hızını artırmak isteyenler veya malzeme tasarrufu sağlamak isteyenler için avantajlı olabilir. Fast Honeycomb, nesnenin iç

kısmını birçok küçük altıgen hücre ile doldurarak bir denge sağlar. Bu sayede, nesnenin iç yapısı güçlü olabilirken malzeme tüketimi minimize edilir. Şekil 4.16'da hızlı petek deseninin baskı şeklinin kesiti gösterilmiştir. Resim 4.9'da hızlı petek iç doluluk deseniyle baskı sırasında alınan görüntü gösterilmiştir.



Şekil 4.16. Simplify 3B V5.0 programında test parçasının fast honeycomb (hızlı petek) geometrisi ve %25 dolulukla görüntüsü: (a) üst görüntü; (b) izometrik görüntü



Resim 4.9. Fast honeycomb (hızlı petek) iç doluluk geometrisiyle baskı sırasında alınan görüntü

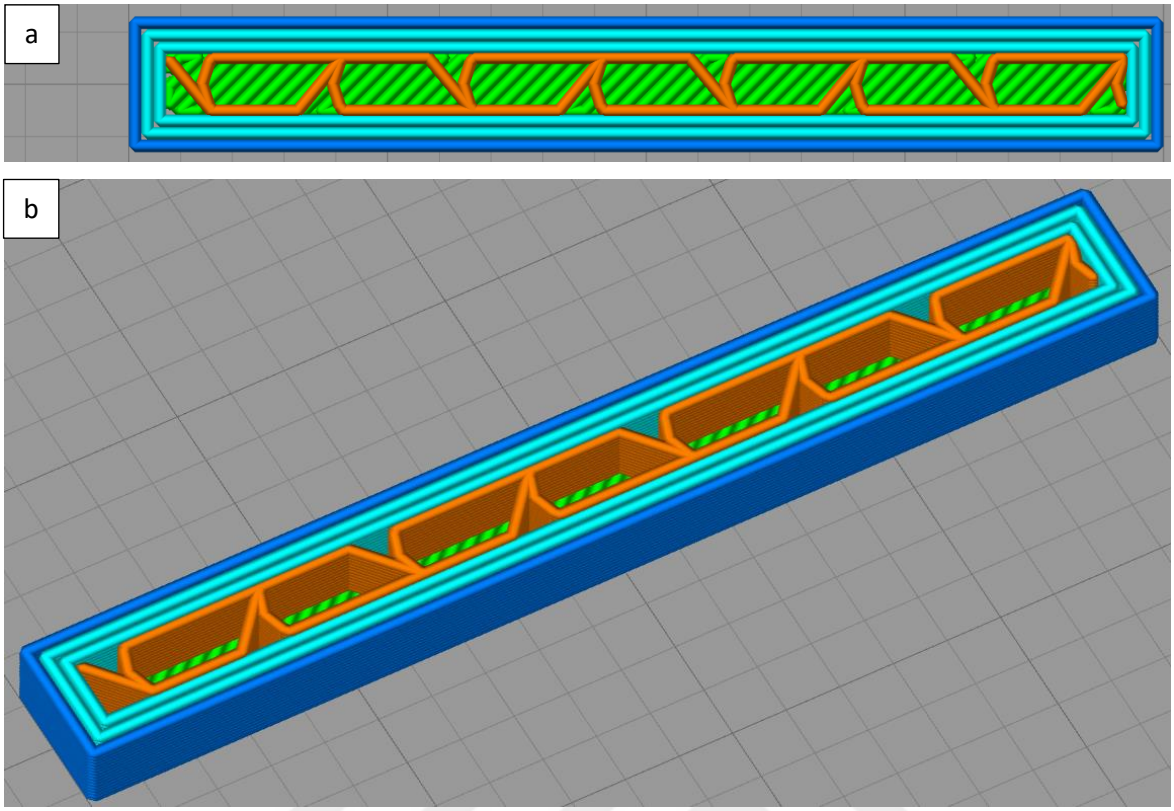
Çizelge 4.4'te hızlı petek deseniyle üretilen test parçasının baskı parametreleri yer almaktadır.

Çizelge 4.4. Fast honeycomb (hızlı petek) iç doluluk geometrisiyle baskı parametreleri

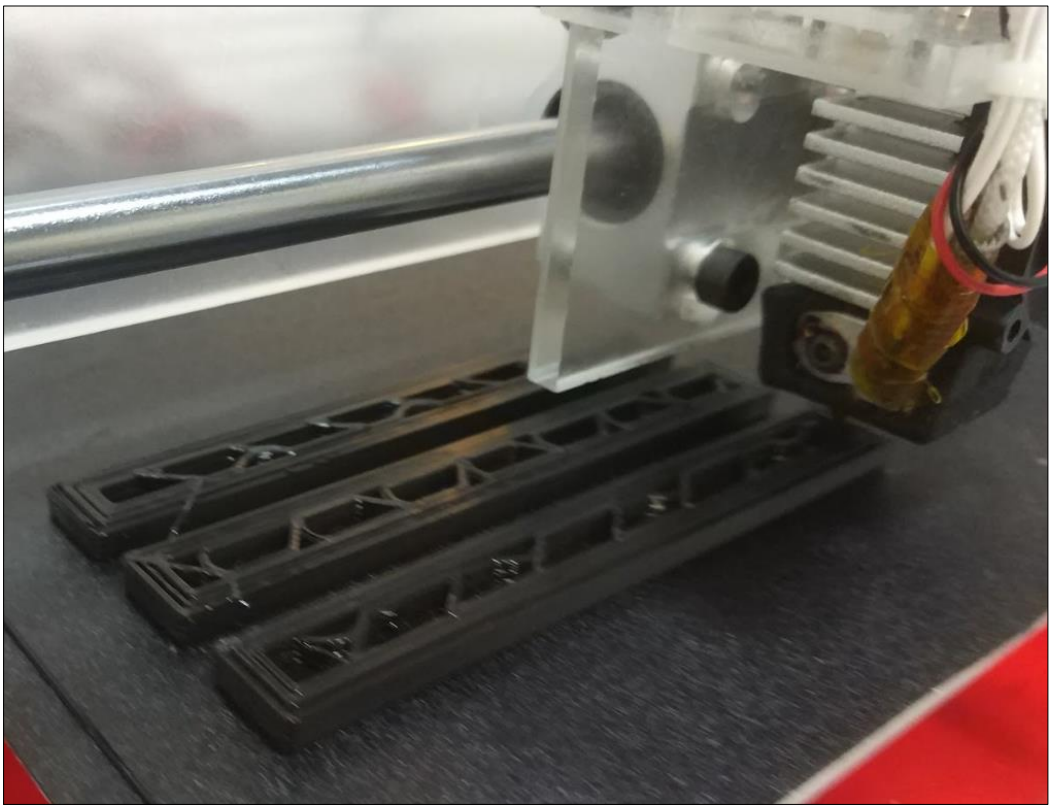
Baskı Süresi (dakika)	23
Kullanılan filament uzunluğu (m)	5,69
Parça hacmi (mm^3)	13696
Parça ağırlığı (g)	17,12

4.1.6. Sinusoid iç doluluk geometrisiyle baskı

"Sinusoid" iç geometrisi, 3B baskıda kullanılan bir doluluk deseni türüdür. Bu desen, matematikteki sinüsoidal fonksiyonlara benzer bir dalga formunu taklit eder. Doluluk deseninin iç yapısı, bir dalga formu gibi dalgaların veya dalgalı çizgilerin tekrarıyla oluşturulur. Şekil 4.17'de sinusoidal deseninin baskı şeklinin kesiti gösterilmiştir. Resim 4.10'da sinusoidal iç doluluk deseniyle baskı sırasında alınan görüntü gösterilmiştir.



Şekil 4.17. Simplify 3B V5.0 programında test parçasının sinusoid geometrisi ve %25 dolulukla görüntüsü: (a) üst görüntü; (b) izometrik görüntü



Resim 4.10. Sinusoid iç doluluk geometrisiyle baskı sırasında alınan görüntü

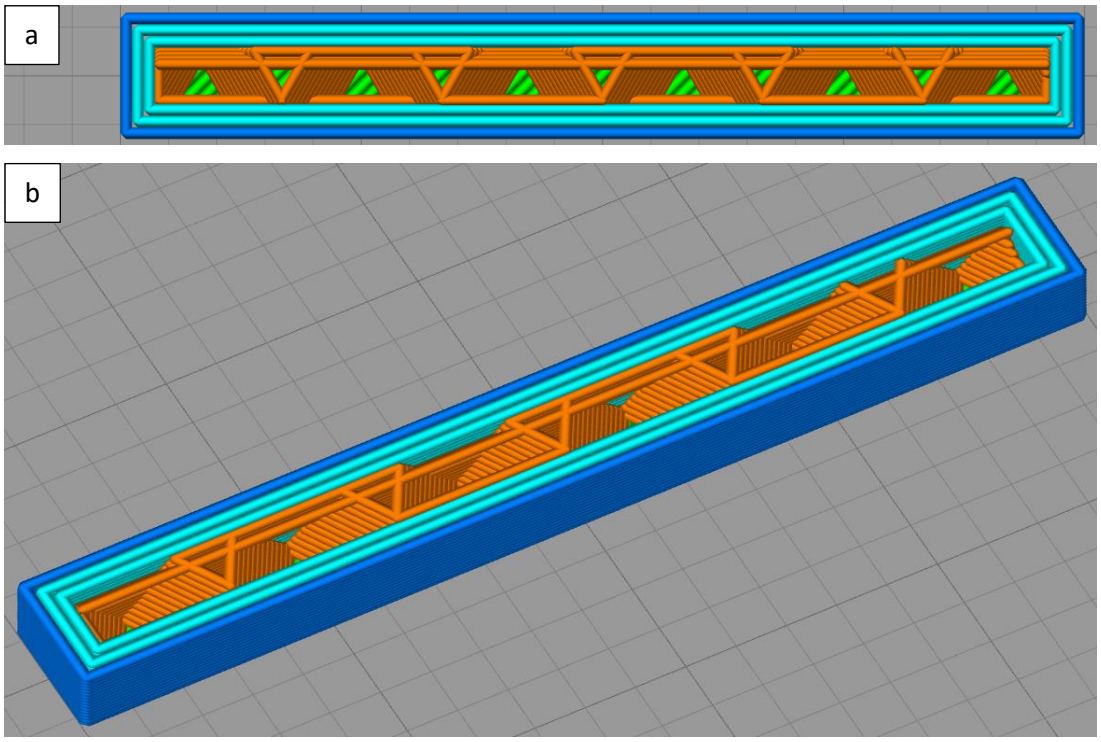
Çizelge 4.5'te sinusoid deseniyle üretilen test parçasının baskı parametreleri yer almaktadır.

Çizelge 4.5. Sinusoid iç doluluk geometrisiyle baskı parametreleri

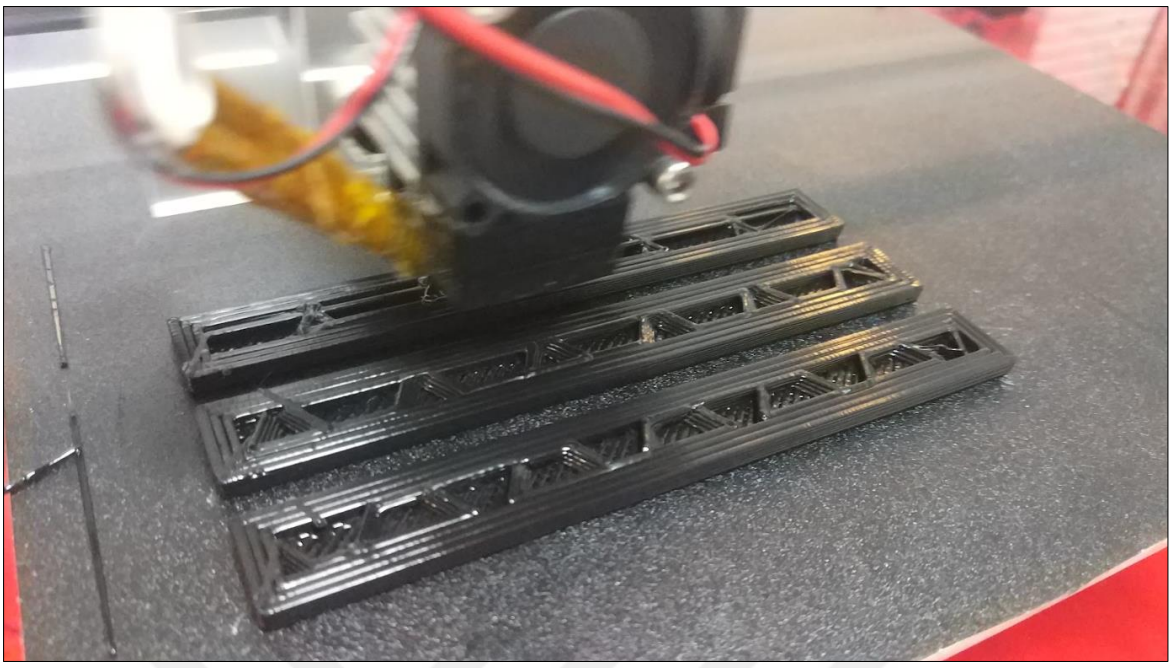
Baskı Süresi (dakika)	23
Kullanılan filament uzunluğu (m)	5,96
Parça hacmi (mm^3)	14324
Parça ağırlığı (g)	17,91

4.1.7. Cubic (kübik) iç doluluk geometrisiyle baskı

"Cubic" veya "Kübik" iç doluluk geometrisi, 3B baskıda kullanılan bir doluluk deseni türüdür. Bu geometri, nesnenin iç kısmını küp şeklindeki hücrelerle doldurarak bir desen tipi oluşturur. Kübik iç doluluk geometrisi, nesnenin iç yapısını desteklemek, dayanıklılığını artırmak ve malzeme kullanımını optimize etmek için tasarlanmıştır. Küp hücreler, düzenli bir iç yapı oluşturarak nesnenin mukavemetini artırabilir. Bu tip doluluk deseni genellikle katı ve sağlam bir iç yapı oluşturmak amacıyla kullanılır. Şekil 4.18'de kübik deseninin baskı şeklinin kesiti gösterilmiştir. Resim 4.11'de kübik iç doluluk deseniyle baskı sırasında alınan görüntü gösterilmiştir.



Şekil 4.18. Simplify 3B V5.0 programında test parçasının cubic (kübik) geometrisi ve %25 dolulukla görüntüsü: (a) üst görüntü; (b) izometrik görüntü



Resim 4.11. Cubic (kübik) iç doluluk geometrisiyle baskı sırasında alınan görüntü

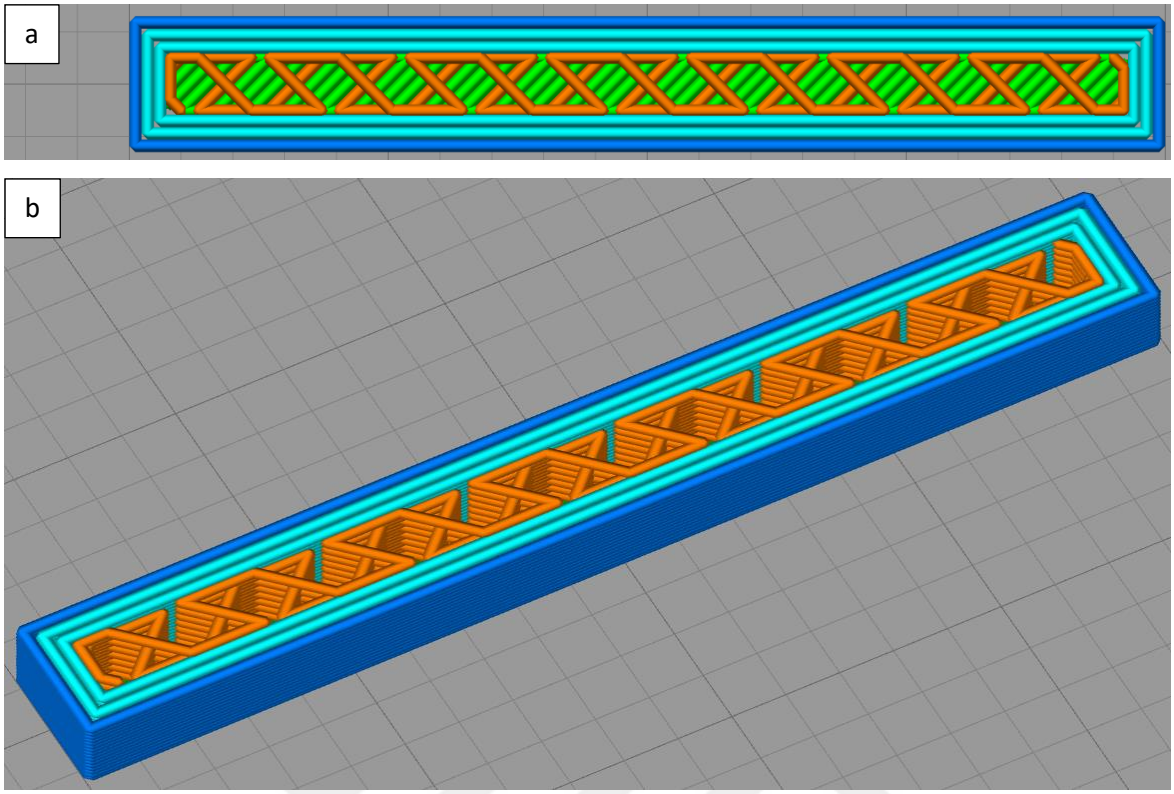
Çizelge 4.6'da kübik deseniyle üretilen test parçasının baskı parametreleri yer almaktadır.

Çizelge 4.6. Cubic (kübik) iç doluluk geometrisiyle baskı parametreleri

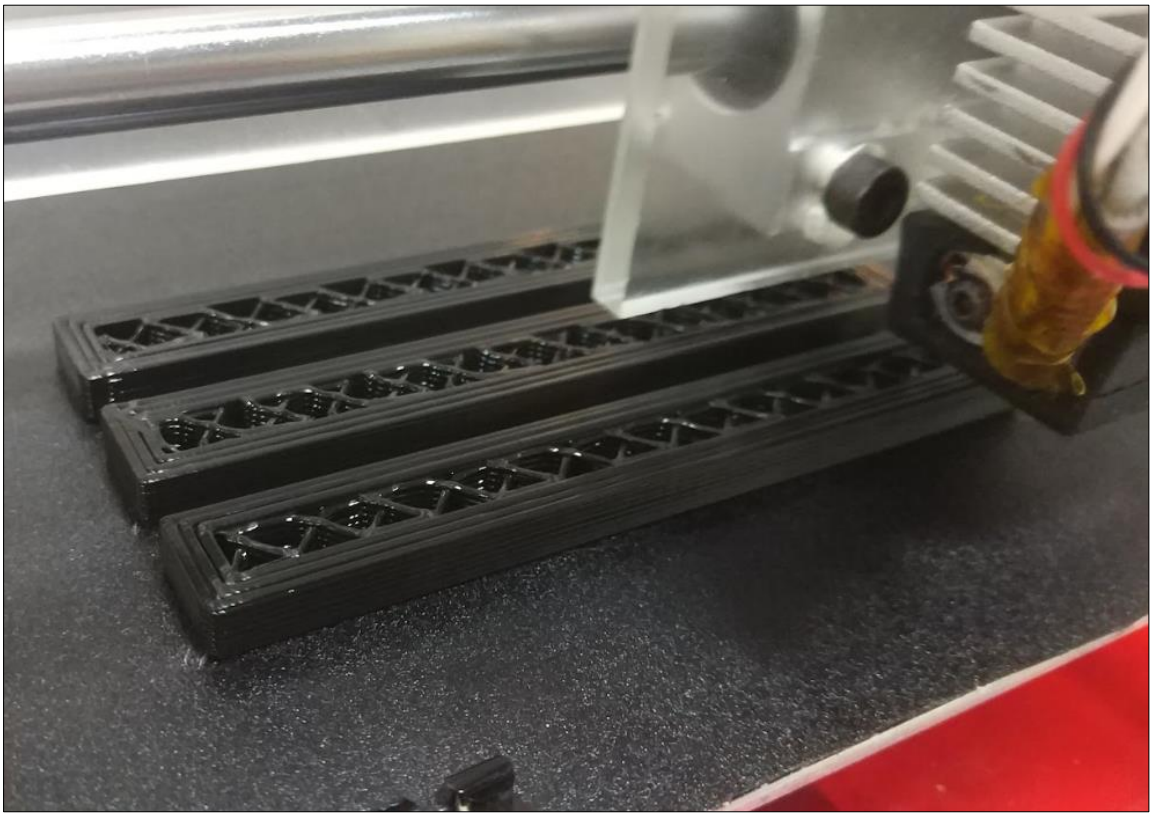
Baskı Süresi (dakika)	23
Kullanılan filament uzunluğu (m)	6,05
Parça hacmi (mm^3)	14561
Parça ağırlığı (g)	18,20

4.1.8. Rectilinear (doğrusal) iç doluluk geometrisiyle baskı

"Rectilinear" veya "Doğrusal" iç doluluk geometrisi, 3B baskıda kullanılan bir doluluk deseni türüdür. Bu geometri, nesnenin iç kısmını düz çizgilerle oluşturulan bir düzenle doldurarak bir desen tipi oluşturur. Doğrusal iç doluluk geometrisi, nesnenin iç yapısını desteklemek, dayanıklılığını artırmak ve malzeme kullanımını optimize etmek amacıyla tasarlanmıştır. Bu desen genellikle basit ve etkili bir iç yapı sağlar. Doğrusal doluluk, düz çizgilerle yapıldığı için baskı sürecini hızlandırabilir ve malzeme tasarrufu sağlayabilir. Şekil 4.19'da doğrusal deseninin baskı şeklinin kesiti gösterilmiştir. Resim 4.12'de doğrusal iç doluluk deseniyle baskı sırasında alınan görüntü gösterilmiştir.



Şekil 4.19. Simplify 3B V5.0 programında test parçasının rectilinear (doğrusal) geometrisi ve %25 dolulukla görüntüsü: (a) üst görüntü; (b) izometrik görüntü



Resim 4.12. Doğrusal iç doluluk geometrisiyle baskı sırasında alınan görüntü

Çizelge 4.7’da doğrusal iç doluluk deseniyle üretilen test parçasının baskı parametreleri yer almaktadır.

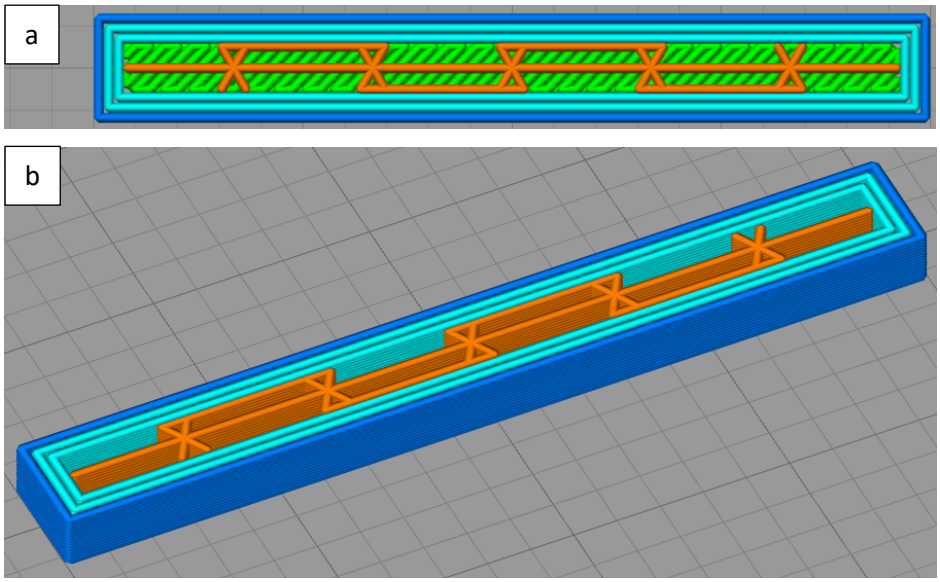
Çizelge 4.7. Rectilinear (doğrusal) iç doluluk geometrisiyle baskı parametreleri

Baskı Süresi (dakika)	24
Kullanılan filament uzunluğu (m)	6,18
Parça hacmi (mm^3)	14860
Parça ağırlığı (g)	18,58

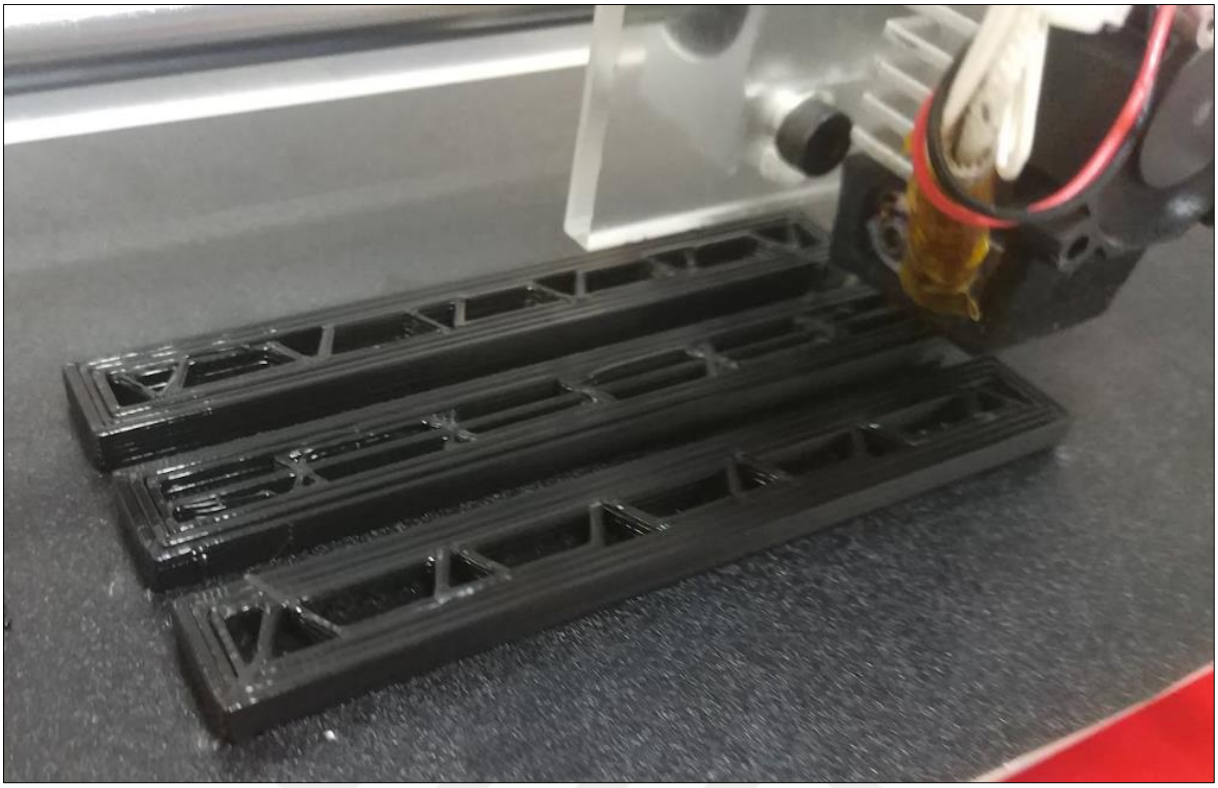
4.1.9. Triangular (üçgen) iç doluluk geometrisiyle baskı

"Triangular" veya "Üçgen" iç doluluk geometrisi, 3B baskıda kullanılan bir doluluk deseni türüdür. Bu geometri, nesnenin iç kısmını üçgen şeklindeki hücrelerle doldurarak bir desen tipi oluşturur.

Üçgen iç doluluk geometrisi, nesnenin iç yapısını desteklemek, dayanıklılığını artırmak ve malzeme kullanımını optimize etmek amacıyla tasarlanmıştır. Üçgen hücreler, düzenli bir iç yapı oluşturarak nesnenin mukavemetini artırabilir. Bu desen genellikle daha karmaşık ve güçlü iç yapılar elde etmek için uygun olabilir. Şekil 4.20’de üçgen deseninin baskı şeklinin kesiti gösterilmiştir. Resim 4.13’te üçgen iç doluluk deseniyle baskı sırasında alınan görüntü gösterilmiştir.



Şekil 4.20. Simplify 3B V5.0 programında test parçasının triangular (üçgen) geometrisi ve %25 dolulukla görüntüsü: (a) üst görüntü; (b) izometrik görüntü



Resim 4.13. Üçgen iç doluluk geometrisiyle baskı sırasında alınan görüntü

Çizelge 4.8'de üçgen iç doluluk deseniyle üretilen test parçasının baskı parametreleri yer almaktadır.

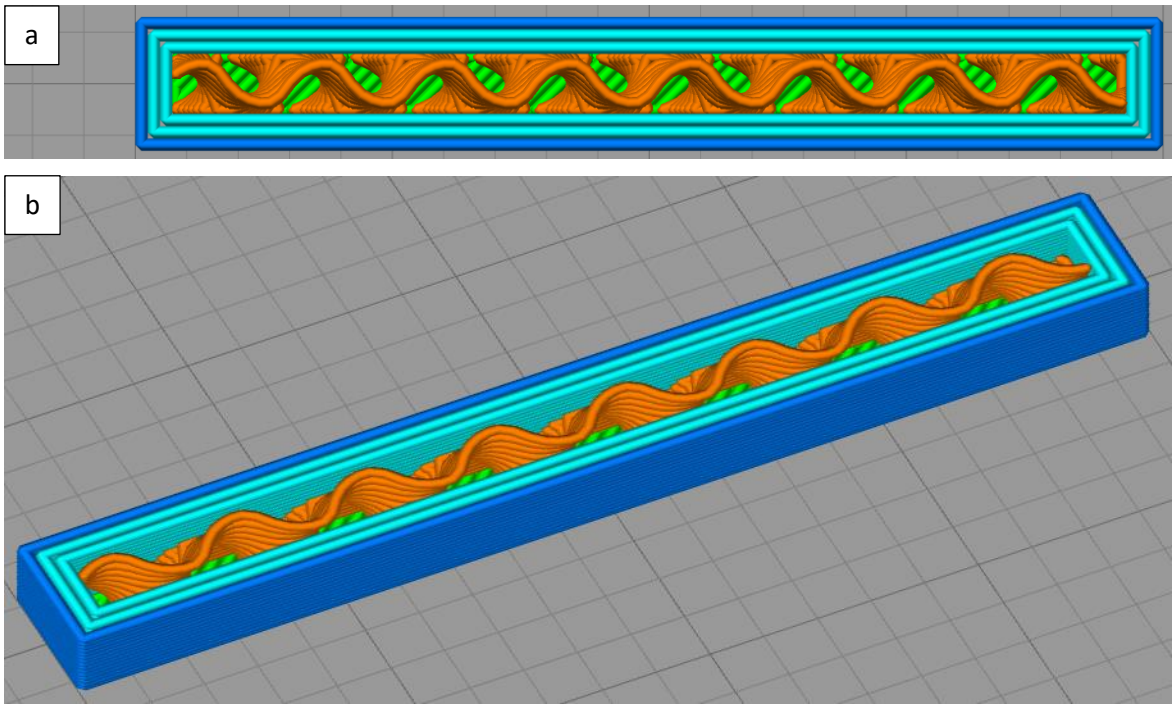
Çizelge 4.8. Triangular (üçgen) iç doluluk geometrisiyle baskı parametreleri

Baskı Süresi (dakika)	24
Kullanılan filament uzunluğu (m)	6,18
Parça hacmi (mm^3)	14860
Parça ağırlığı (g)	18,58

4.1.10. Gyroid (jiroskopik) iç doluluk geometrisiyle baskı

"Gyroid" veya "Jiroskopik" iç doluluk geometrisi, 3B baskıda kullanılan bir doluluk deseni türüdür. Bu desen, matematikteki jiroskop yüzeyine dayanır ve karmaşık, tekrarlanan bir yapı oluşturur. Jiroskop deseni genellikle düşük yoğunluklu, hafif ve güçlü iç yapılar elde etmek amacıyla kullanılır. Jiroskop iç doluluk geometrisi, nesnenin iç kısmını üç boyutlu olarak dolaşan ve birbirine bağlı bir dizi tünel şeklindeki yapılarla doldurarak oluşturulur. Bu desen, dayanıklılığı ve malzeme dağılımını optimize etmeyi amaçlar. Ayrıca, jiroskop deseni nedeniyle baskı malzemesi içinde birçok hava boşluğu bulunur, bu da nesnenin daha

hafif olmasına ve malzeme tasarrufu sağlanmasına katkıda bulunabilir. Jiroskopik iç doluluk geometrisi, özellikle aerodinamik, mimari, ve biyomedikal uygulamalarda kullanılabilir. 3B baskı yazıcılarında genellikle bu tür geometrileri kullanabilmek için özel tasarım yazılımları veya parametre ayarları gerekebilir. Şekil 4.21'de jiroskopik deseninin baskı şeklinin kesiti gösterilmiştir. Resim 4.14'te jiroskopik iç doluluk deseniyle baskı sırasında alınan görüntü gösterilmiştir.



Şekil 4.21. Simplify 3B V5.0 programında test parçasının gyroid (jiroskopik) geometrisi ve %25 dolulukla görüntüsü: (a) üst görüntü; (b) izometrik görüntü



Resim 4.14. Gyroid (jiroskopik) iç doluluk geometrisiyle baskı sırasında alınan görüntü

Çizelge 4.9'da jiroskopik iç doluluk deseniyle üretilen test parçasının baskı parametreleri yer almaktadır.

Çizelge 4.9. Gyroid (jiroskopik) iç doluluk geometrisiyle baskı parametreleri

Baskı Süresi (dakika)	22
Kullanılan filament uzunluğu (m)	5,53
Parça hacmi (mm^3)	13307
Parça ağırlığı (g)	16,63

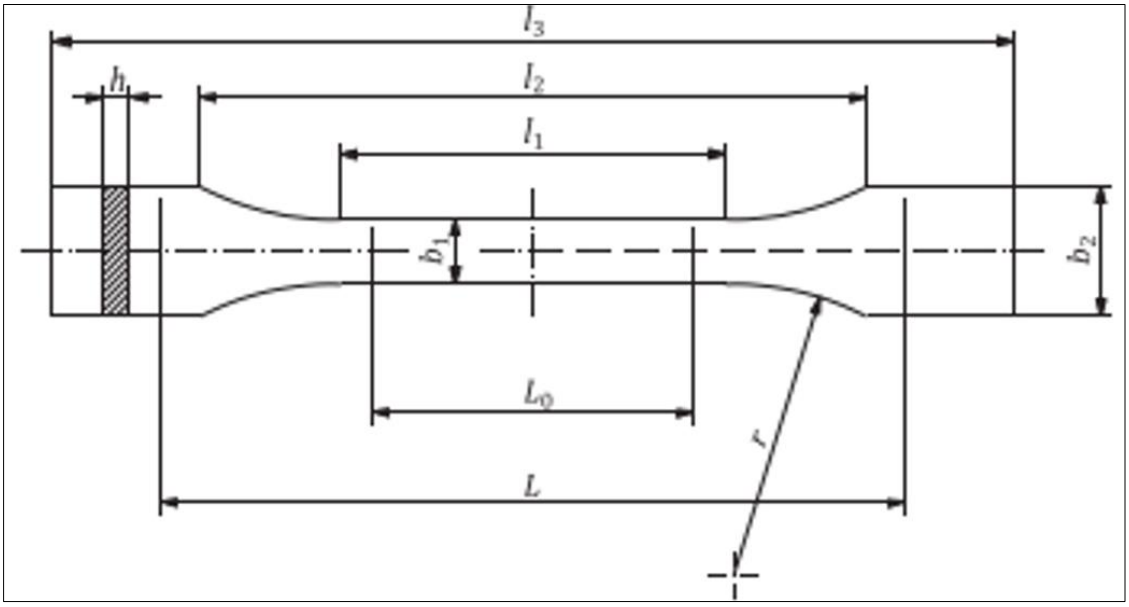
4.2. Çekme Testi İçin Tasarım ve Kurulum

Çekme testi, bir malzemenin çekme dayanımını belirlemek amacıyla yapılan bir deneydir. Bu test, bir malzemenin çekme mukavemetini, elastikiyetini ve diğer mekanik özelliklerini değerlendirmek için kullanılır. Çekme testi, malzemenin belirli bir yük altında ne kadar uzayabildiğini ve ne kadar dayanıklı olduğunu ölçer.

Çekme testi genellikle standartlaştırılmış prosedürler ve test makineleri kullanılarak gerçekleştirilir. Temel olarak, bir malzeme örneği belirli bir şekilde hazırlanır ve bir makara şeklindeki çekme cihazı aracılığıyla belirli bir yük altında çekilir. Malzeme çekildikçe, bu

yükün altında uzamaya başlar ve bu değişiklikler genellikle bir veri kayıt sistemi aracılığıyla ölçülür.

Burulma testlerinin sonucunda iç doluluk geometrisi ve iç doluluk oranı belirlendikten sonra malzemelerin etkisini araştırmak amacıyla çekme ve basma testleri gerçekleştirilmiştir. Çekme testi için ISO 527-1,2,3,4 standardı baz alınmıştır. Normalde bu standart kapsamında Şekil 4.22'de belirtilen ölçülerde tasarım yapılması gerekmektedir. Çizelge 4.10'da standart kapsamında tasarım parametreleri belirtilmiştir.



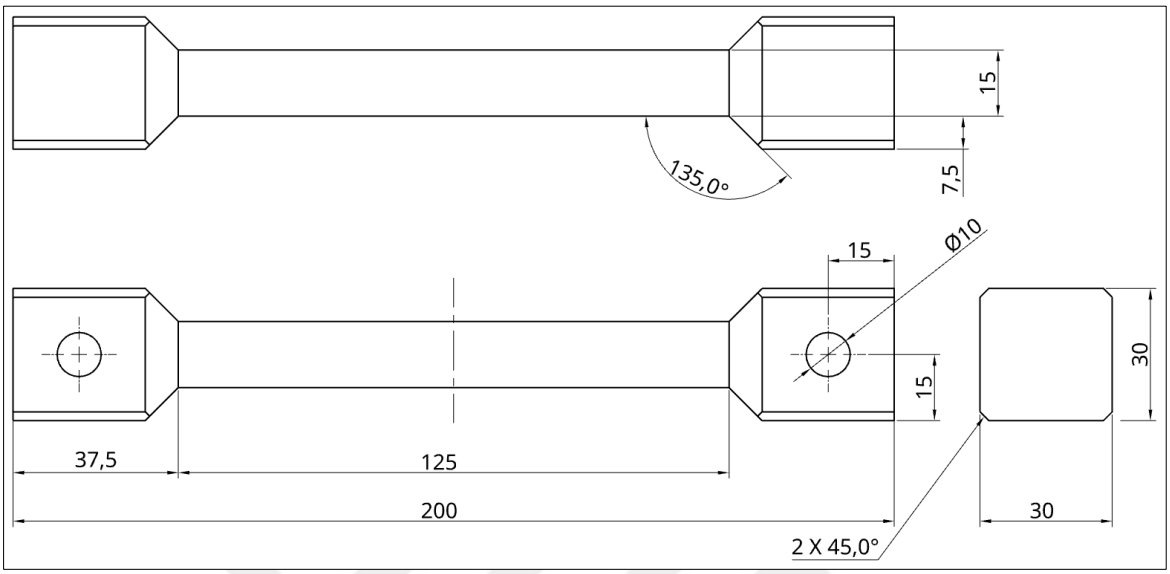
Şekil 4.22. ISO 527-4 standardı kapsamında parçanın teknik resmi

Çizelge 4.10. ISO 527-4 standardı kapsamında tasarım ölçüleri

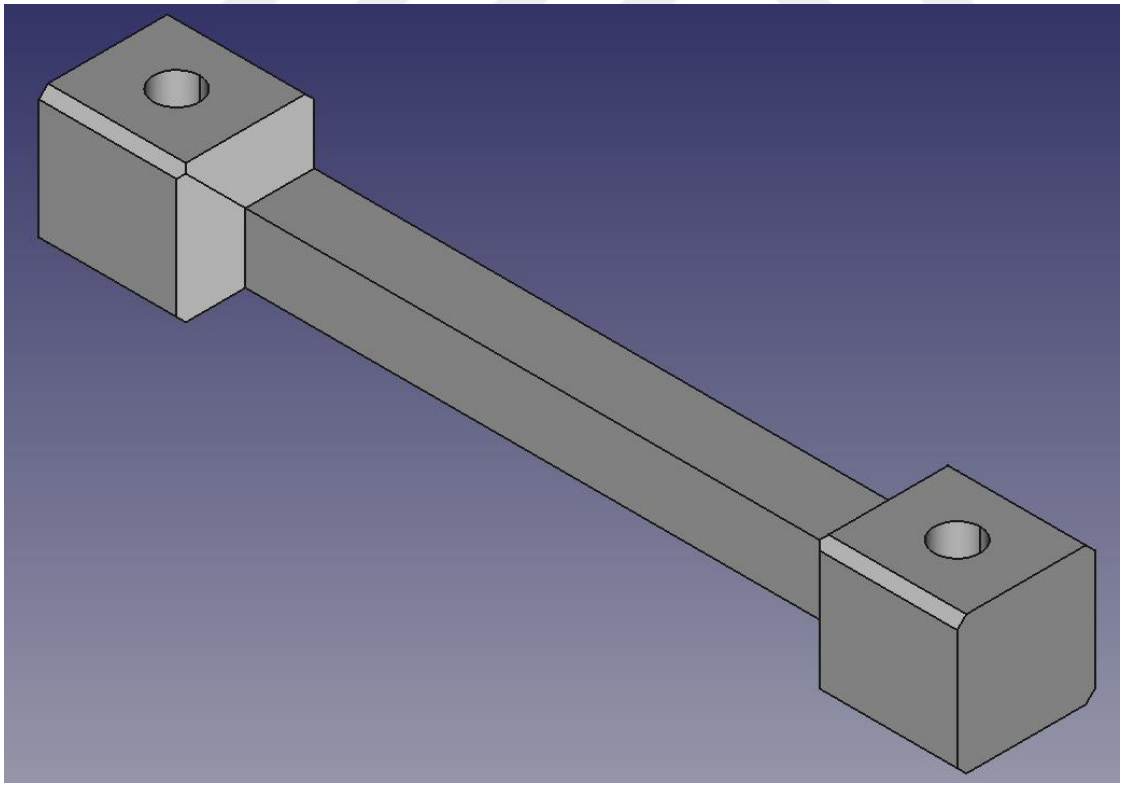
Sembol	Ölçüler (mm)
l_3	≥150
l_1	60,0 ± 0,5
r	≥60
b_2	20,0 ± 0,2
b_1	10,0 ± 0,2
h	2'den 10'a kadar
L_0	50,0 ± 0,5
L	115 ± 1

Standarda uygun tasarımda parçanın et kalınlığı 10 mm olduğunda bile iç doluluk geometrisi ölçülebilir miktarda parçaya eklenememiştir. Bu yüzden çekme testinde kopacak olan kısım

minimum 15 mm olarak tasarlanmıştır. Şekil 4.23'te çekme testi için tez kapsamında yapılan tasarımın teknik resmi, Şekil 4.24'te tasarımın izometrik görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 4.23. Çekme testi için tasarlanan test parçasının teknik resmi (mm)

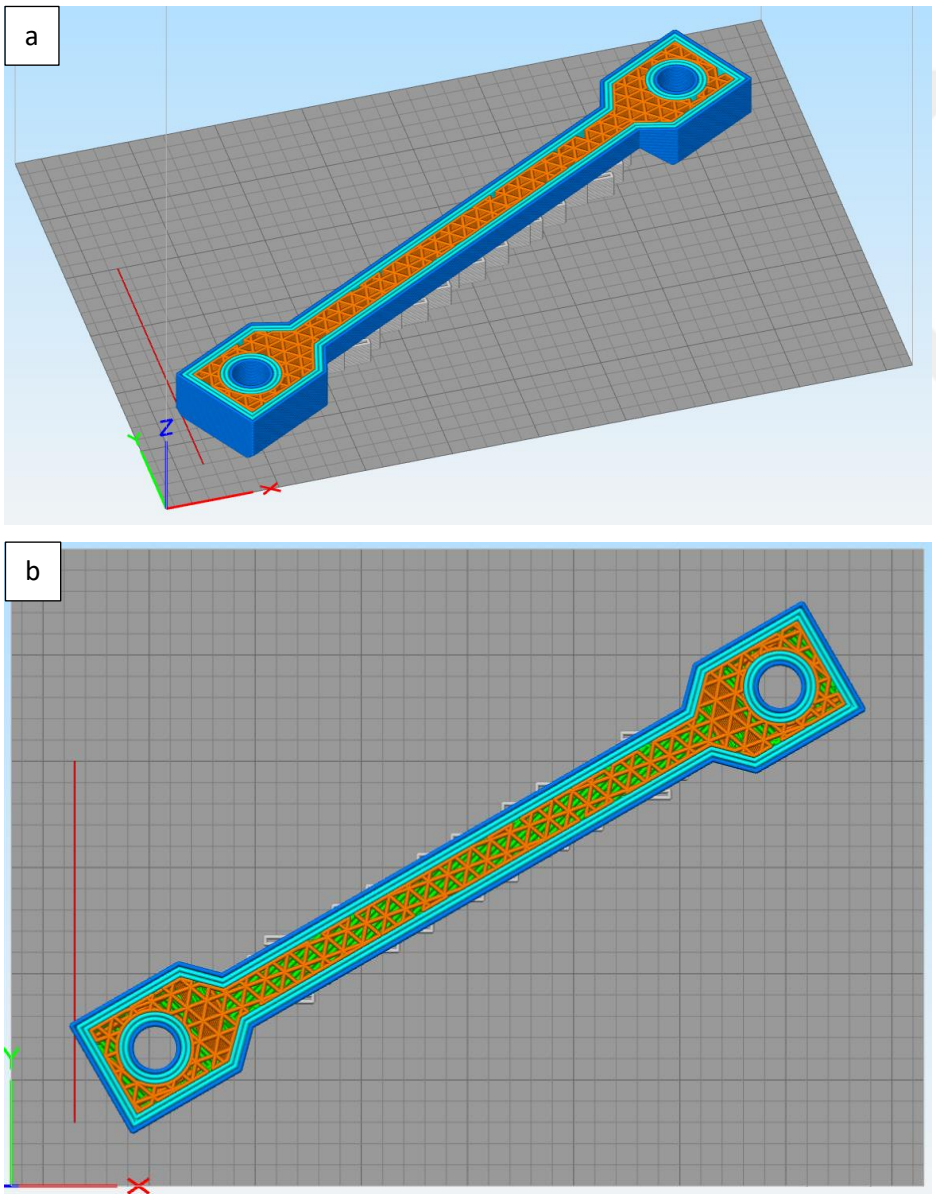


Şekil 4.24. Çekme testi için tasarlanan test parçasının izometrik görüntüsü

Çekme testlerinde kullanılan malzemeler için aşağıdaki yazıcı ayarları yapılmıştır:

- Nozul ucu: 1 mm
- Fan hızı: %100 hızda (2 adet 5V DC fan kullanılmıştır)
- Katman yüksekliği: 0.4 mm
- İç doluluk geometrisi: triangular
- İç doluluk oranı: %85

Şekil 4.25'te üçgen deseninin %85 iç doluluk oranıyla baskı şeklinin kesiti gösterilmiştir.



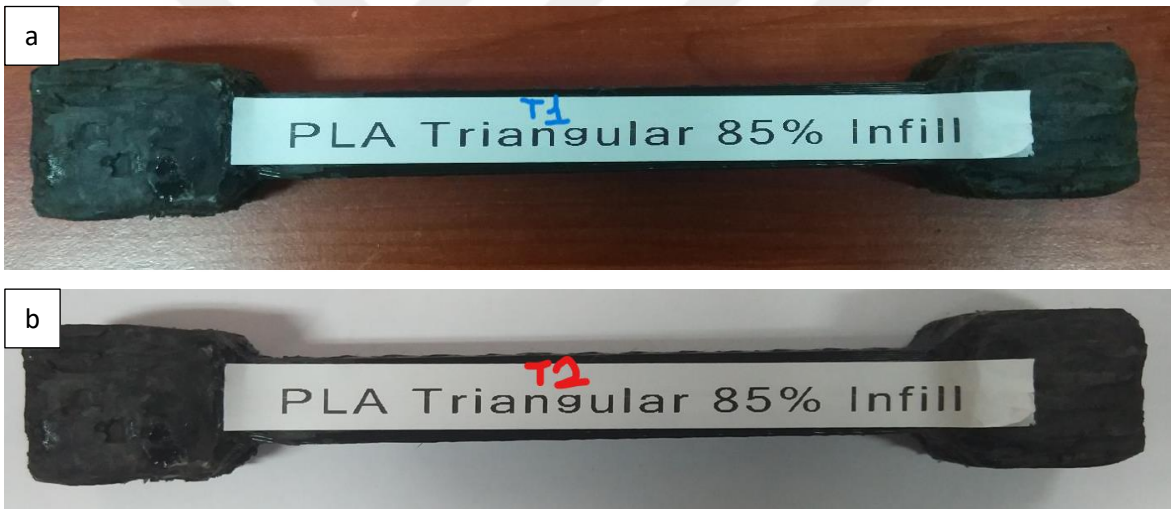
Şekil 4.25. Simplify 3B V5.0 programında test parçasının triangular (üçgen) geometrisi ve %85 dolulukla görüntüsü: (a) izometrik görüntü; (b) üst görüntü

4.2.1. PLA malzemesi ile çekme testi için test parçası üretimi

ESUN PLA+ malzemesi ile ilgili teorik bilgi 3.1.7 bölümünde paylaşılmıştır. Bu malzemeye özel baskı ayarları Çizelge 4.11'de belirtilmiştir. ESUN PLA+ malzemesi ile 2 test parçası üretilmiş ve test edilmiştir. Resim 4.15'te üretimi yapılan parçaların üst görünümleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.11. PLA malzemesine uygun baskı parametreleri

Tabla sıcaklığı (°C)	60
Nozul sıcaklığı (°C)	210
Baskı hızı (mm/dakika)	1800



Resim 4.15. ESUN PLA+ malzemesi ile çekme testi için üretilen test parçaları: (a) parça 1; (b) parça 2

4.2.2. PETG malzemesi ile çekme testi için test parçası üretimi

PETG malzemesi ile ilgili teorik bilgi 3.1.7 bölümünde paylaşılmıştır. PETG malzemesine özel baskı ayarları Çizelge 4.12'de belirtilmiştir. PETG malzemesi ile 2 test parçası üretilmiş ve test edilmiştir. Resim 4.16'da üretimi yapılan parçaların üst görünümleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.12. PETG malzemesine uygun baskı parametreleri

Tabla sıcaklığı (°C)	80
Nozul sıcaklığı (°C)	220
Baskı hızı (mm/dakika)	900



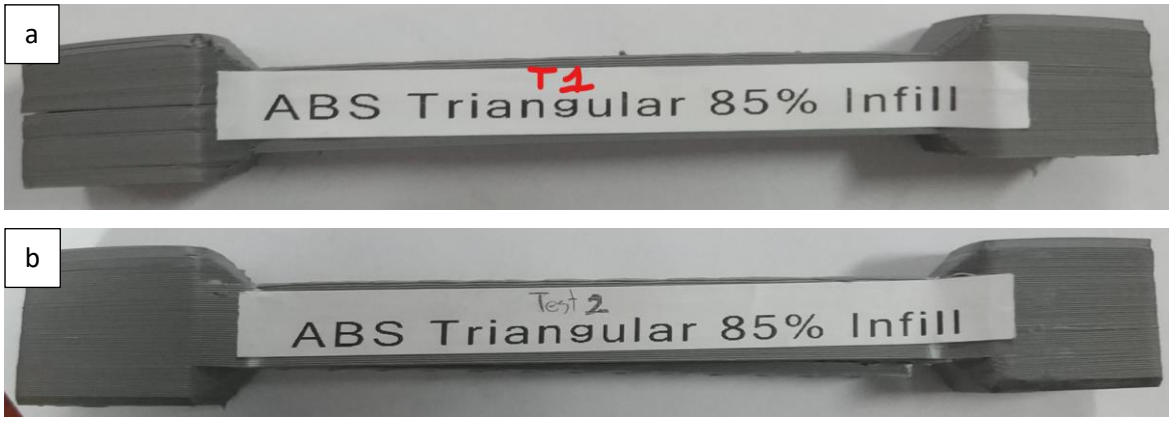
Resim 4.16. PETG malzemesi ile çekme testi için üretilen test parçaları: (a) parça 1; (b) parça 2

4.2.3. ABS malzemesi ile çekme testi için test parçası üretimi

ABS malzemesi ile ilgili teorik bilgi 3.1.7 bölümünde paylaşılmıştır. ABS malzemesine özel baskı ayarları Çizelge 4.13'te belirtilmiştir. ABS malzemesi ile 2 test parçası üretilmiş ve test edilmiştir. Resim 4.17'de üretimi yapılan parçaların üst görünümleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.13. ABS malzemesine uygun baskı parametreleri

Tabla sıcaklığı (°C)	80
Nozul sıcaklığı (°C)	220
Baskı hızı (mm/dakika)	900



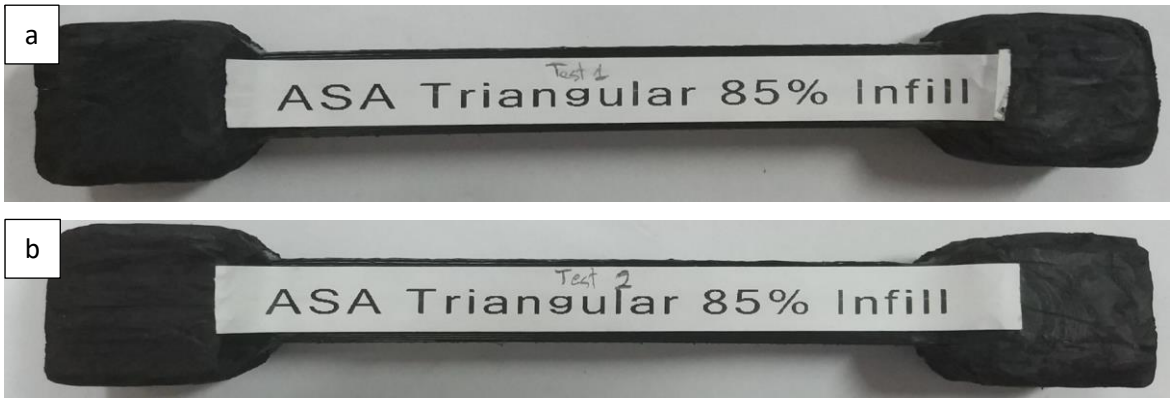
Resim 4.17. ABS malzemesi ile çekme testi için üretilen test parçaları: (a) parça 1; (b) parça 2

4.2.4. ASA malzemesi ile çekme testi için test parçası üretimi

ASA malzemesi ile ilgili teorik bilgi 3.1.7 bölümünde paylaşılmıştır. ASA malzemesine özel baskı ayarları Çizelge 4.14'te belirtilmiştir. ASA malzemesi ile 2 test parçası üretilmiş ve test edilmiştir. Resim 4.18'de üretimi yapılan parçaların üst görünümleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.14. ASA malzemesine uygun baskı parametreleri

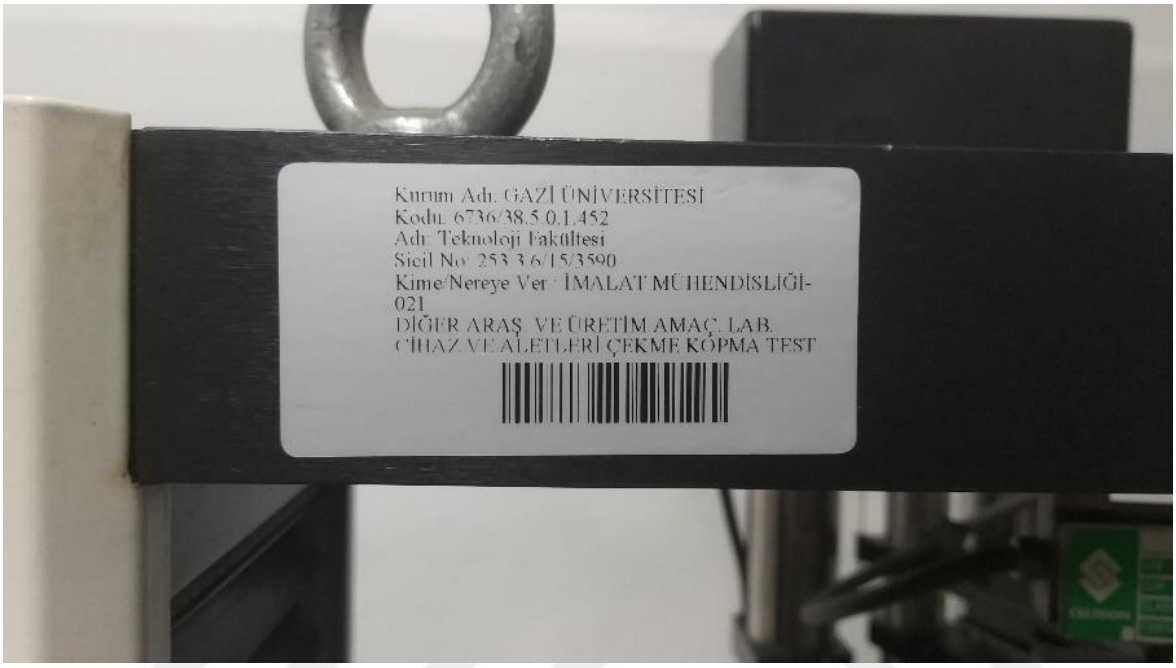
Tabla sıcaklığı (^oC)	100
Nozul sıcaklığı (^oC)	220
Baskı hızı (mm/dakika)	450



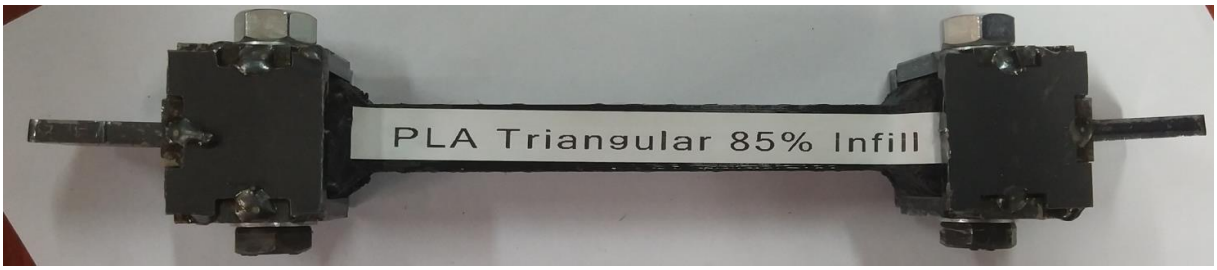
Resim 4.18. ASA malzemesi ile çekme testi için üretilen test parçaları: (a) parça 1; (b) parça 2

4.2.5. Çekme testi için düzenek kurulumu

Çekme testlerinde “UTEST PROFI X6” cihazı kullanılmıştır. Cihazın çekme kapasitesi maksimum 1 tondur. Test parçasını cihaza bağlayacak ara aparatlar üretilmiştir. Resim 4.19’da cihazın bilgileri; Resim 4.20’de çekme testine hazır test parçası gösterilmiştir.



Resim 4.19. "UTEST PROFI X6" cihazının bilgileri



Resim 4.20. Çekme cihazına bağlanmaya hazır test parçası

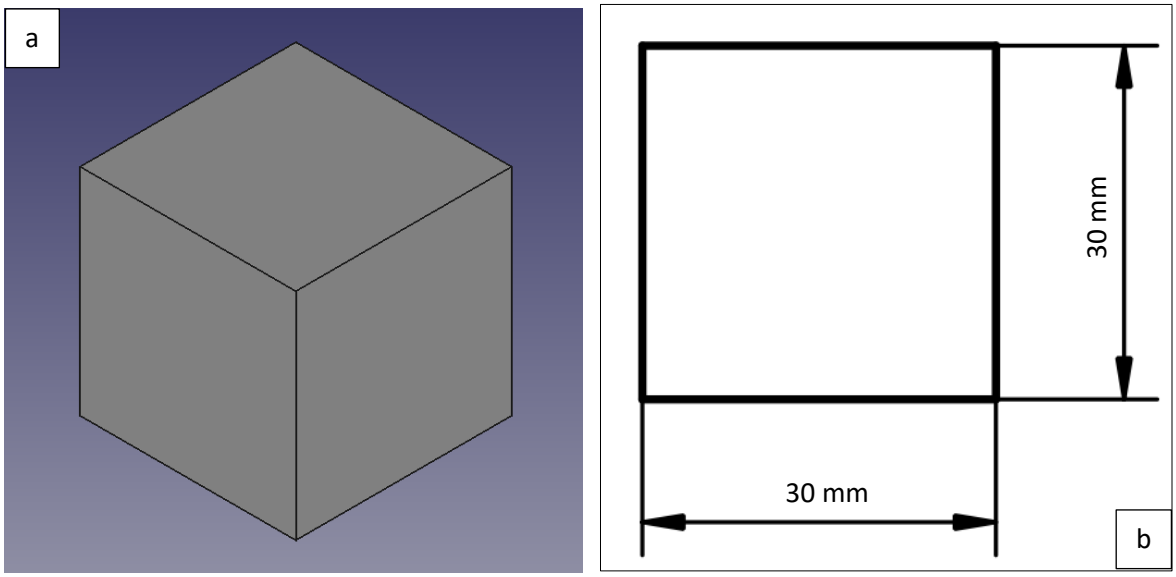
4.3. Basma Testi İçin Tasarım ve Kurulum

Basma testi genellikle malzemenin dayanıklılığını, sertliğini veya genel olarak bir malzemenin bir yük altında nasıl davrandığını belirlemek amacıyla yapılan bir testtir. Bu tür testler, bir malzemenin mukavemetini, elastikiyetini, sertliğini, kopma dayanımını veya

diğer mekanik özelliklerini değerlendirmek için kullanılır. Basma testleri, çeşitli endüstrilerde ve malzeme türlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Basma testi genellikle bir malzemenin örneklerinin bir makara veya plakanın altında uygulanan düzgün bir basınç altında sıkıştırılması ile gerçekleştirilir. Bu test, malzemenin dayanıklılığını ve deformasyon özelliklerini değerlendirmek için kullanılır.
Bir başka örnek ise elastomerler veya plastik malzemeler için basma testidir. Bu test, malzemenin basınç altında nasıl davrandığını ve deformasyona nasıl yanıt verdiğini ölçer.
Basma testi, genellikle standartlaştırılmış test yöntemleri veya endüstri standartları kullanılarak gerçekleştirilir. Bu standartlar, testin yapılma şekli, kullanılan ekipman, örnek hazırlığı ve sonuçların raporlanması gibi konularda belirli bir prosedürü sağlar.

Basma testi için "ISO 604-1973 Plastics-Determination of Compressive Properties" isimli standard baz alınmıştır. İç doluluk geometri yapısı ve basma testine uygun olacak şekilde 30x30x30 mm şeklinde bir küp farklı malzemlerden üretilerek test edilmiştir. Şekl 4.26'da basma testinde kullanılacak parçanın tasarımının izometrik görüntüsü ve ölçüleri gösterilmiştir.



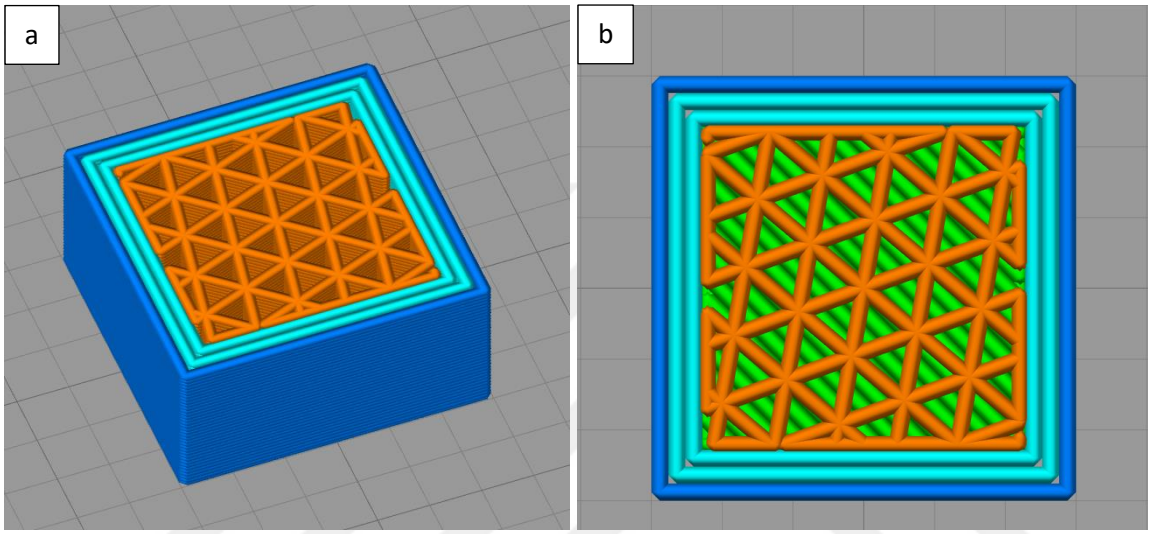
Şekil 4.26. Basma testinde kullanılan parçanın tasarımı: (a) basma testi için tasarlanan test parçası; (b) test parçasının ölçüleri

Basma testlerinde kullanılan malzemeler için aşağıdaki yazıcı ayarları yapılmıştır:

- Nozul ucu: 1 mm

- Fan hızı: %100 hızda (2 adet 5V DC fan kullanılmıştır)
- Katman yüksekliği: 0.4 mm
- İç doluluk geometrisi: triangular
- İç doluluk oranı: %85

Şekil 4.27'de %85 iç doluluk oranıyla üçgen deseninin baskı şeklinin kesiti gösterilmiştir.



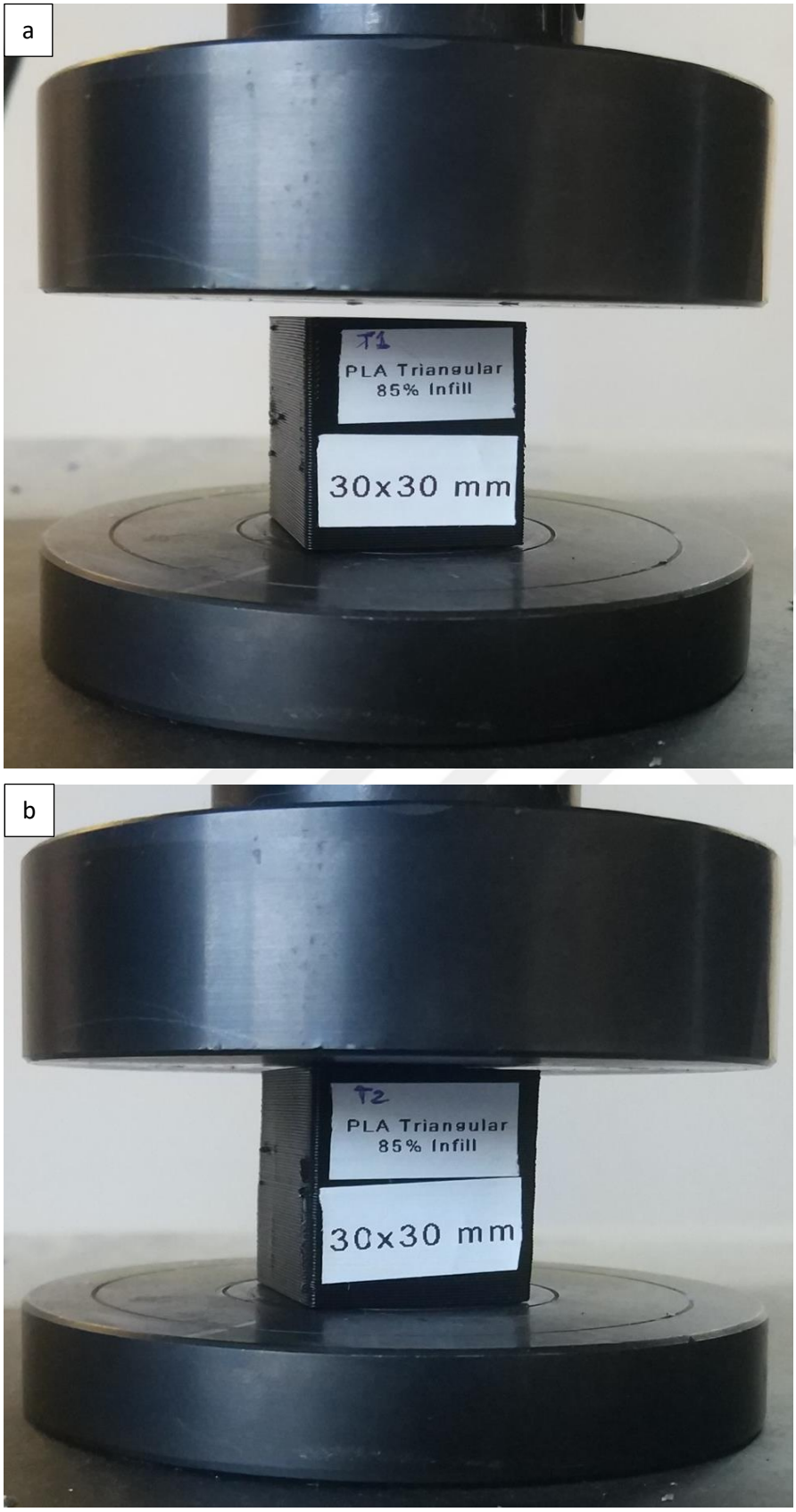
Şekil 4.27. Simplify 3B V5.0 programında test parçasının triangular (üçgen) geometrisi ve %85 dolulukla görüntüsü: a) izometrik görüntü; (b) üst görüntü

4.3.1. PLA+ malzemesi ile basma testi için parça üretimi

ESUN PLA+ malzemesi ile ilgili teorik bilgi 3.1.7 bölümünde paylaşılmıştır. Bu malzemeye özel baskı ayarları Çizelge 4.15'te belirtilmiştir. PLA malzemesi ile 2 test parçası üretilmiş ve test edilmiştir. Resim 4.21'de üretimi yapılan parçaların testten önceki görünümleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.15. ESUN PLA+ malzemesine uygun baskı parametreleri

Tabla sıcaklığı (°C)	60
Nozul sıcaklığı (°C)	210
Baskı hızı (mm/dakika)	1800



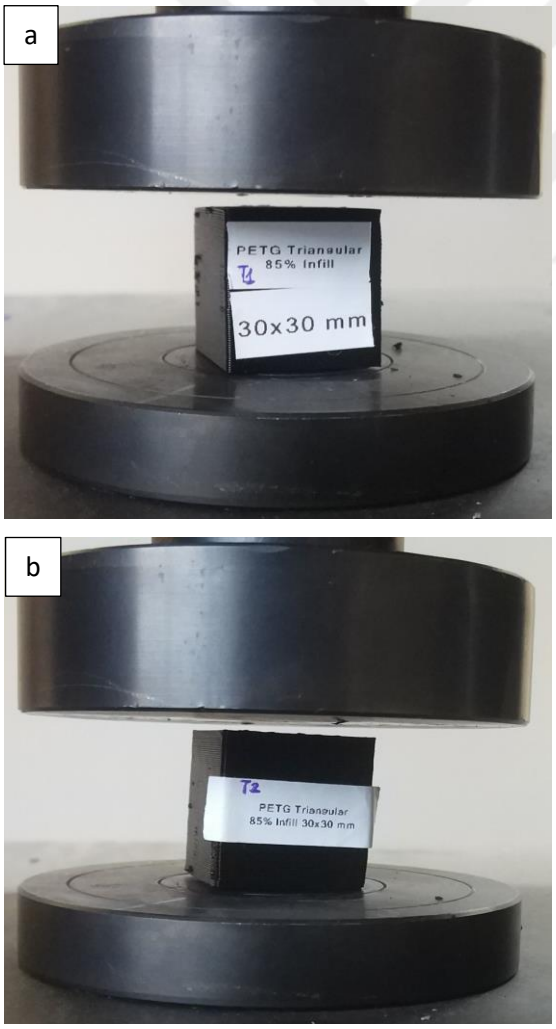
Resim 4.21. PLA+ malzemesi ile basma testi için üretilen test parçaları: (a) parça 1; (b) parça 2

4.3.2. PETG malzemesi ile basma testi için test parçası üretimi

PETG malzemesi ile ilgili teorik bilgi 3.1.7 bölümünde paylaşılmıştır. PETG malzemesine özel baskı ayarları Çizelge 4.16'da belirtilmiştir. PETG malzemesi ile 2 test parçası üretilmiş ve test edilmiştir. Resim 4.22'de üretimi yapılan parçaların testten önceki görünümleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.16. PETG malzemesine uygun baskı parametreleri

Tabla sıcaklığı (°C)	80
Nozul sıcaklığı (°C)	220
Baskı hızı (mm/dakika)	900



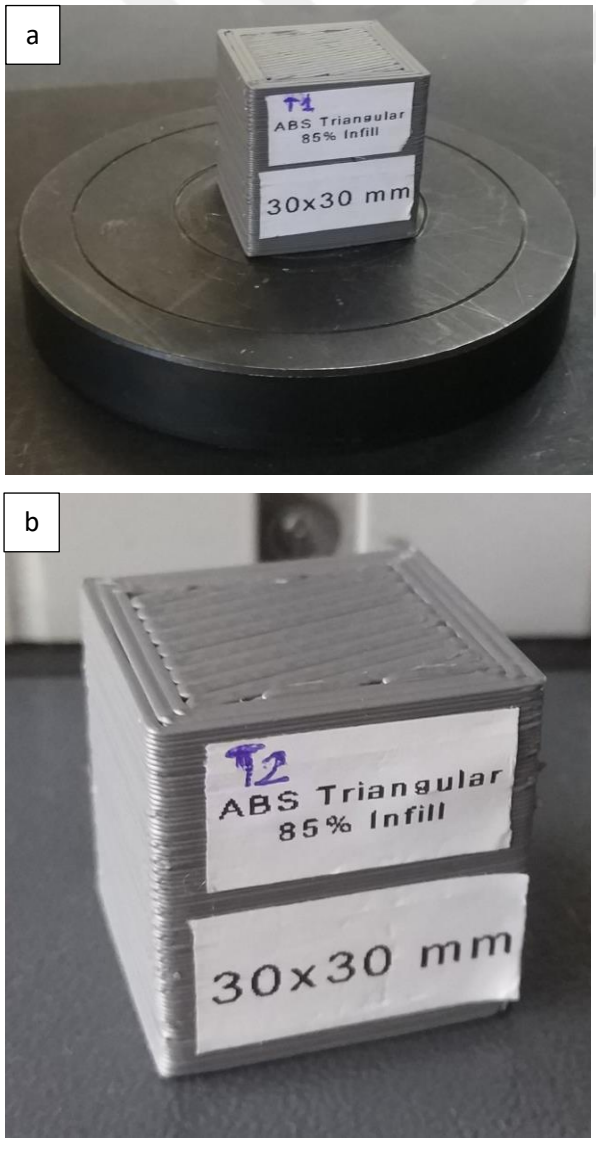
Resim 4.22. PETG malzemesi ile basma testi için üretilen test parçaları: (a) parça 1; (b) parça 2

4.2.3. ABS malzemesi ile çekme testi için test parçası üretimi

ABS malzemesi ile ilgili teorik bilgi 3.1.7 bölümünde paylaşılmıştır. ABS malzemesine özel baskı ayarları Çizelge 4.17'de belirtilmiştir. ABS malzemesi ile 2 test parçası üretilmiş ve test edilmiştir. Resim 4.23'te üretimi yapılan parçaların testten önceki görünümleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.17. ABS malzemesine uygun baskı parametreleri

Tabla sıcaklığı (°C)	80
Nozul sıcaklığı (°C)	220
Baskı hızı (mm/dakika)	900



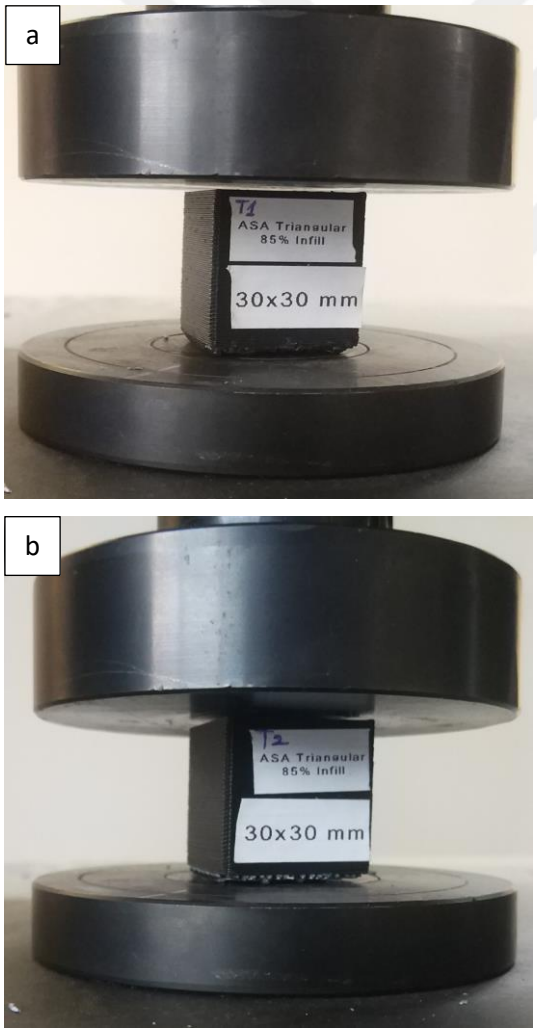
Resim 4.23. ABS malzemesi ile basma testi için üretilen test parçaları: (a) parça 1; (b) parça 2

4.2.4. ASA malzemesi ile çekme testi için test parçası üretimi

ASA malzemesi ile ilgili teorik bilgi 3.1.7 bölümünde paylaşılmıştır. ASA malzemesine özel baskı ayarları Çizelge 4.18'de belirtilmiştir. ASA malzemesi ile 2 test parçası üretilmiş ve test edilmiştir. Resim 4.24'te üretimi yapılan parçaların testten önceki görünümleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.18. ASA malzemesine uygun baskı parametreleri

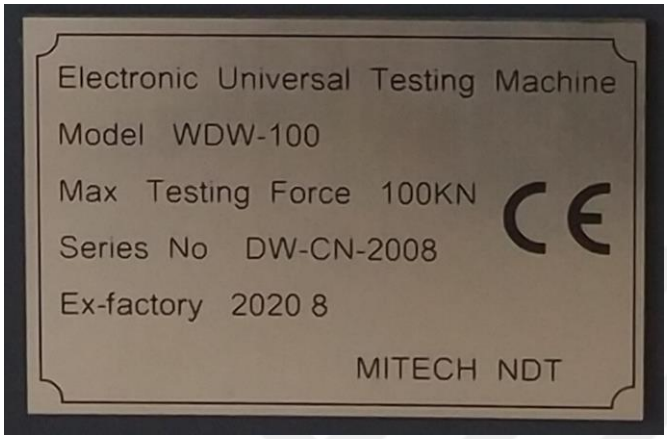
Tabla sıcaklığı (°C)	100
Nozul sıcaklığı (°C)	220
Baskı hızı (mm/dakika)	450



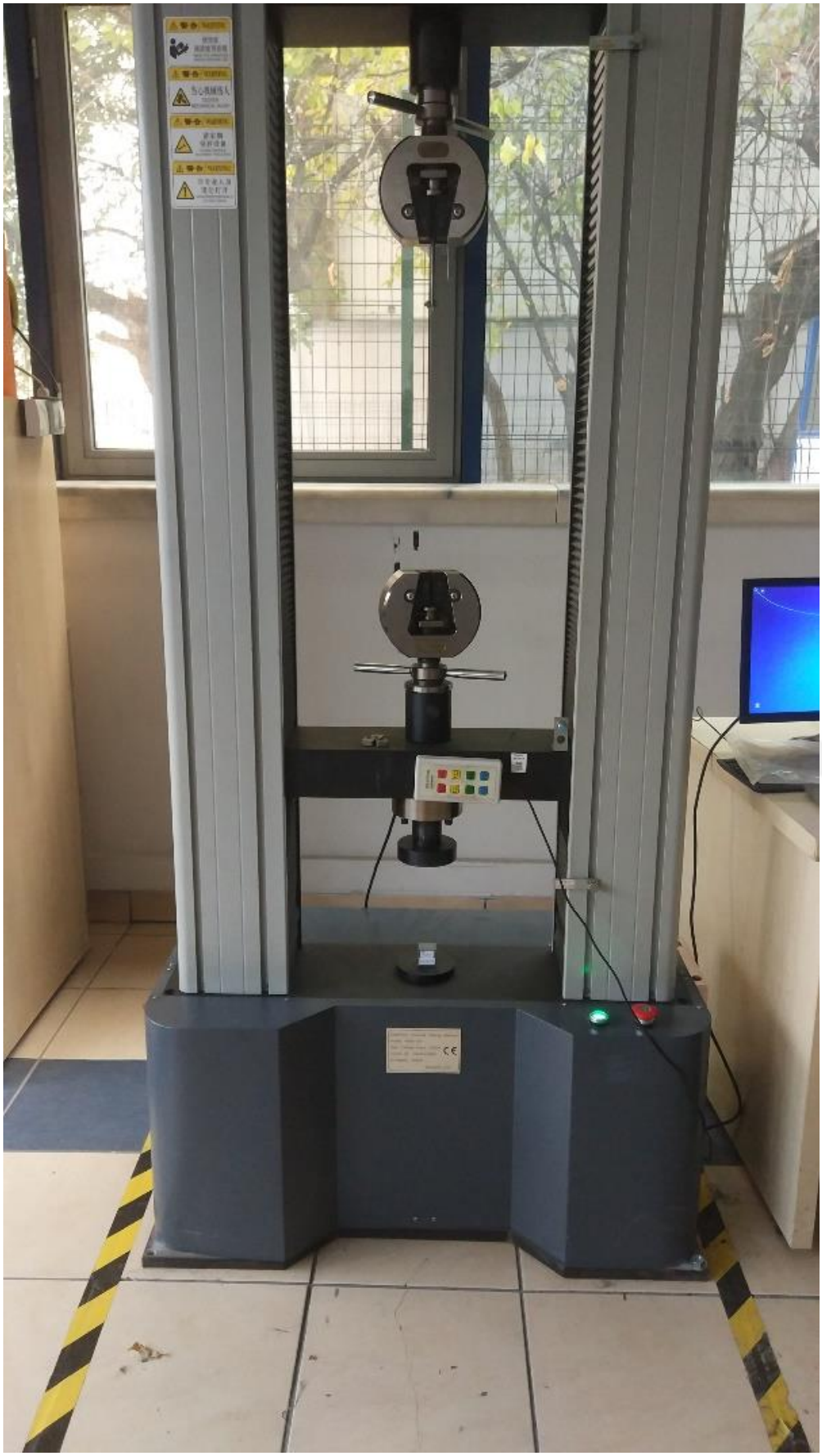
Resim 4.24. ABS malzemesi ile basma testi için üretilen test parçaları: (a) parça 1; (b) parça 2

4.2.5. Basma testi için düzenek kurulumu

Basma testi için “MITECH NDT WDW-100” isimli cihaz kullanılmıştır. Maksimum basma kuvveti 100 kN’dur. Testler sırasında cihazla ilgili bir sorun yaşanmamıştır. Resim 4.25’te cihaz bilgileri; Resim 4.26’da cihazın genel görünümü gösterilmiştir.



Resim 4.25. Basma testinde kullanılan cihazın bilgileri



Resim 4.26. Basma testinde kullanılan cihaz

5. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

Bir önceki bölümde detaylı bir şekilde ele alınan test prosedürlerinin sonuçlarına bu bölümde değinilmiştir. Test parçalarının burulma, çekme ve basma testleri gerçekleştirilmiş ve bu testlerin sonuçları incelenmiştir. Özellikle, iç doluluk geometrileri ve iç doluluk oranlarının parça üzerindeki burulma direncine olan etkileri detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Ayrıca, aynı geometri ve doluluk oranlarına sahip farklı malzemelerin parça ve malzeme üzerindeki çekme ve basma etkileri de ayrıntılı bir şekilde araştırılmıştır.

Bu deneysel çalışmanın, 3B baskı ile tasarım ve üretim sürecinde mühendislerin karşılaştığı zorluklara değerli bir katkı sağlaması beklenmektedir. Elde edilen bulgular, tasarımda materyal seçimi, iç doluluk optimizasyonu ve mühendislik uygulamalarında kullanılan 3B baskı teknolojilerinin iyileştirilmesi konularında önemli bilgiler sunacağı düşünülmektedir. Bu çalışma, çeşitli alanlardaki mühendislik uygulamalarında daha dayanıklı, hafif ve etkili parça tasarımına yönelik gelecekteki çalışmalara ilham kaynağı olmayı amaçlamaktadır.

5.1. Burulma Testi Sonuçları

Burulma testi iki farklı aşama halinde yapılmıştır. İlk aşamada iç doluluk oranı %25 olarak sabit tutulmuş, ESUN PLA+ malzemesi kullanılarak farklı iç doluluk geometrileriyle aynı tasarımlı parçalar üretilmiş ve test edilmiştir. İlk aşama sonucunda uygun iç doluluk geometrisi belirlenmiştir.

İkinci aşamada ise belirlenen iç doluluk geometrisi ve aynı tasarımlı parçanın PLA malzemesi ile farklı iç doluluk oranlarında (%45, %65 ve %85) üretimi yapılarak testleri gerçekleştirilmiştir. Testler sonucunda burulma direnci en yüksek iç doluluk oranı belirlenmiştir.

5.1.1. Burulma testi ile iç doluluk geometrisinin belirlenmesi

Aşağıdaki iç doluluk geometrileri ilk aşamada test edilmiştir:

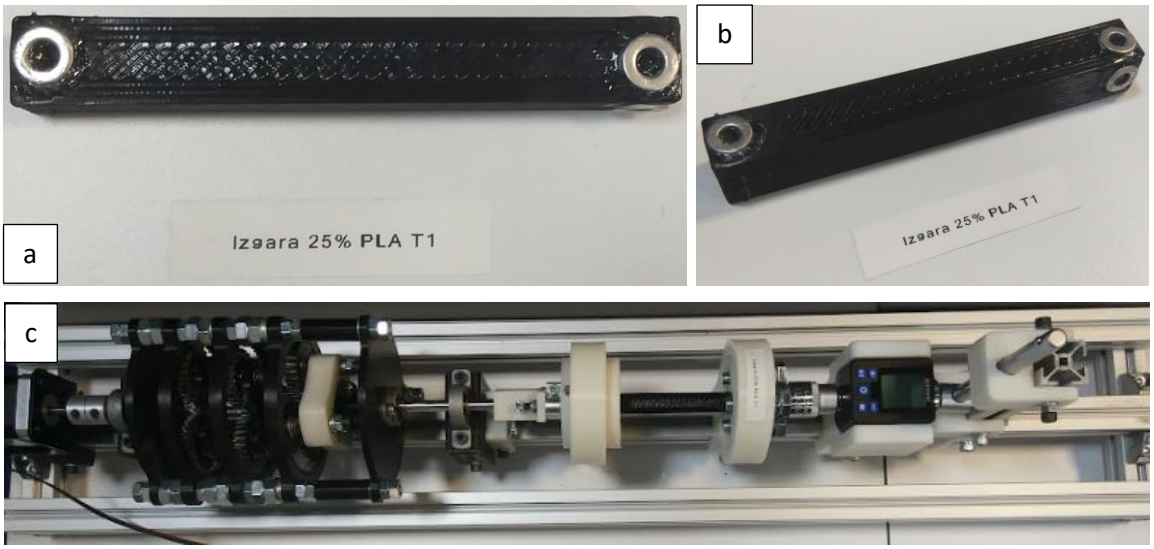
- Grid (ızgara)

- Octahedral (sekizgen)
- Full honeycomb (tam petek)
- Fast honeycomb (hızlı petek)
- Sinusoidal
- Cubic (kübik)
- Rectilinear (doğrusal)
- Triangular (üçgen)
- Gyroid (jiroskopik)

Bu aşamada test edilen bütün parçalar %25 iç doluluk oranıyla, PLA malzemeden üretilmiştir. Test sırasında özel olarak tasarlanıp üretilmiş cihazda bulunan torkmetreden 5 saniyede 1 olacak şekilde veriler alınmıştır. Bu verilerle parça dayanımının tork-zaman değişim grafiği oluşturulmuştur.

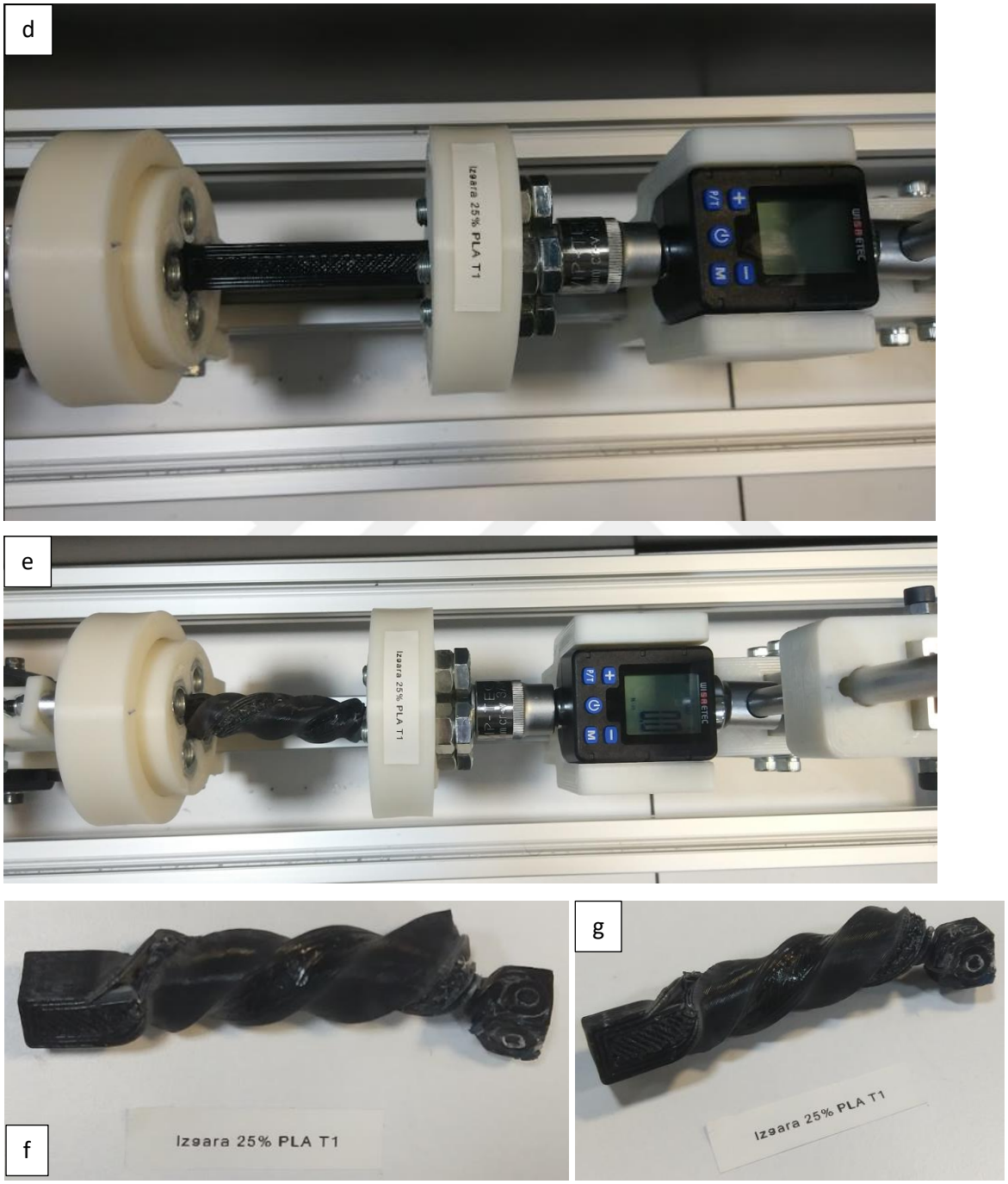
Izgara iç doluluk deseninin burulma testi sonuçları

Izgara iç doluluk geometrisiyle %25 dolulukla ESUN PLA+ malzemeden üretilen 3 test parçasına burulma testi yapılmıştır. Resim 5.1'de ilk test parçasının, Resim 5.2'de ikinci test parçasının, Resim 5.3'te üçüncü test parçasının burulma testi prosedürü gösterilmiştir.

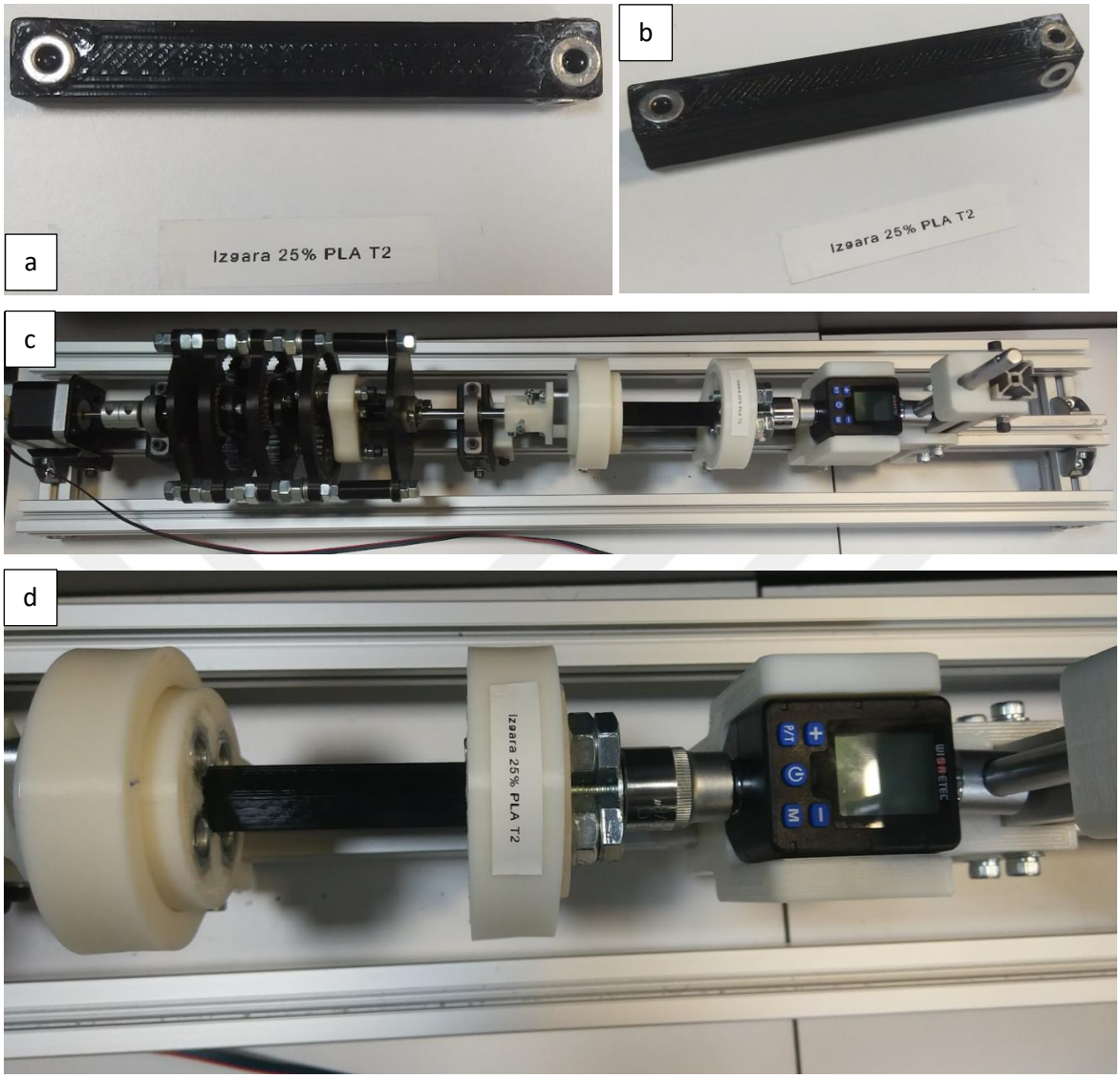


Resim 5.1. Izgara iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ilk test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın

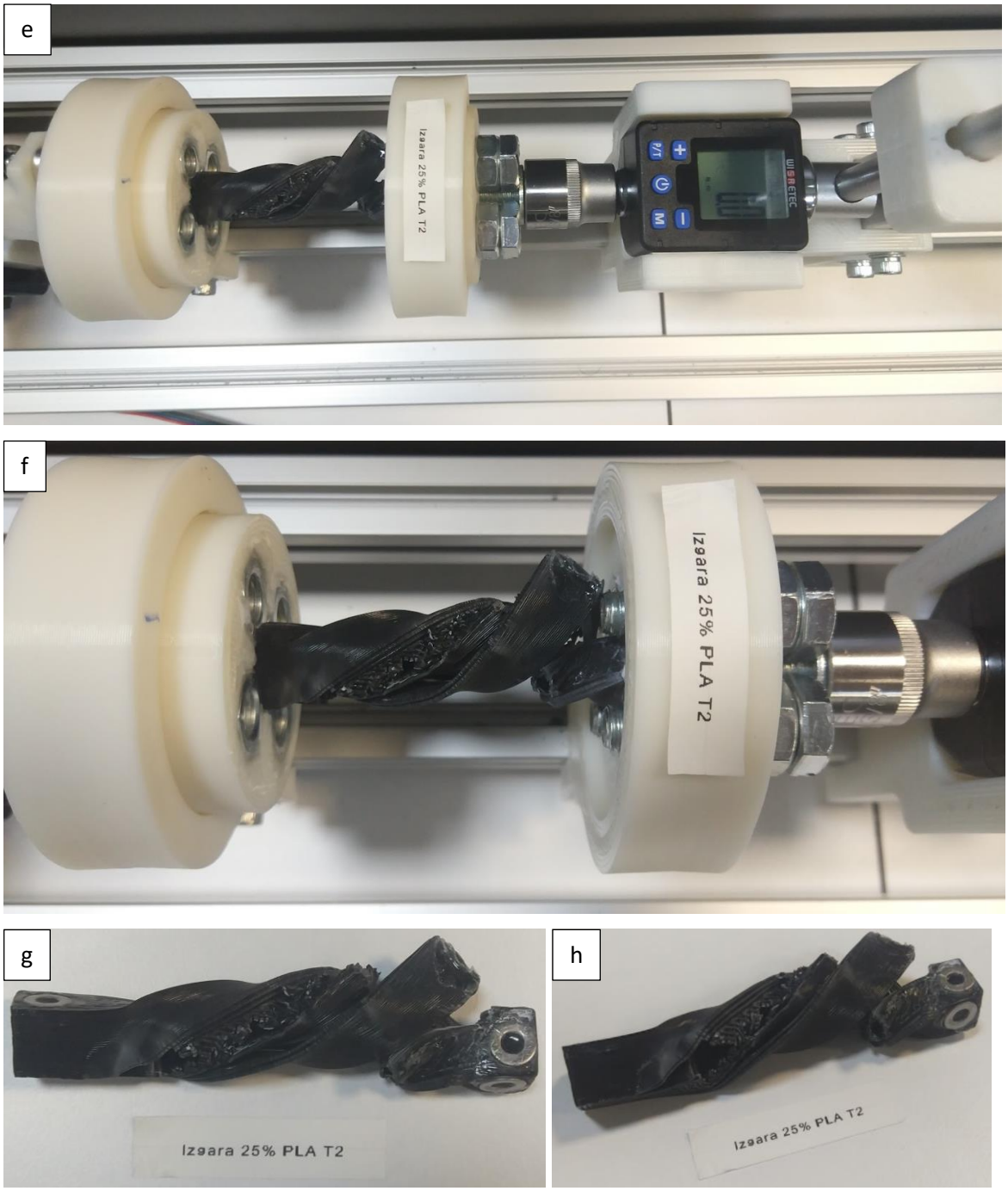
üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (g) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü



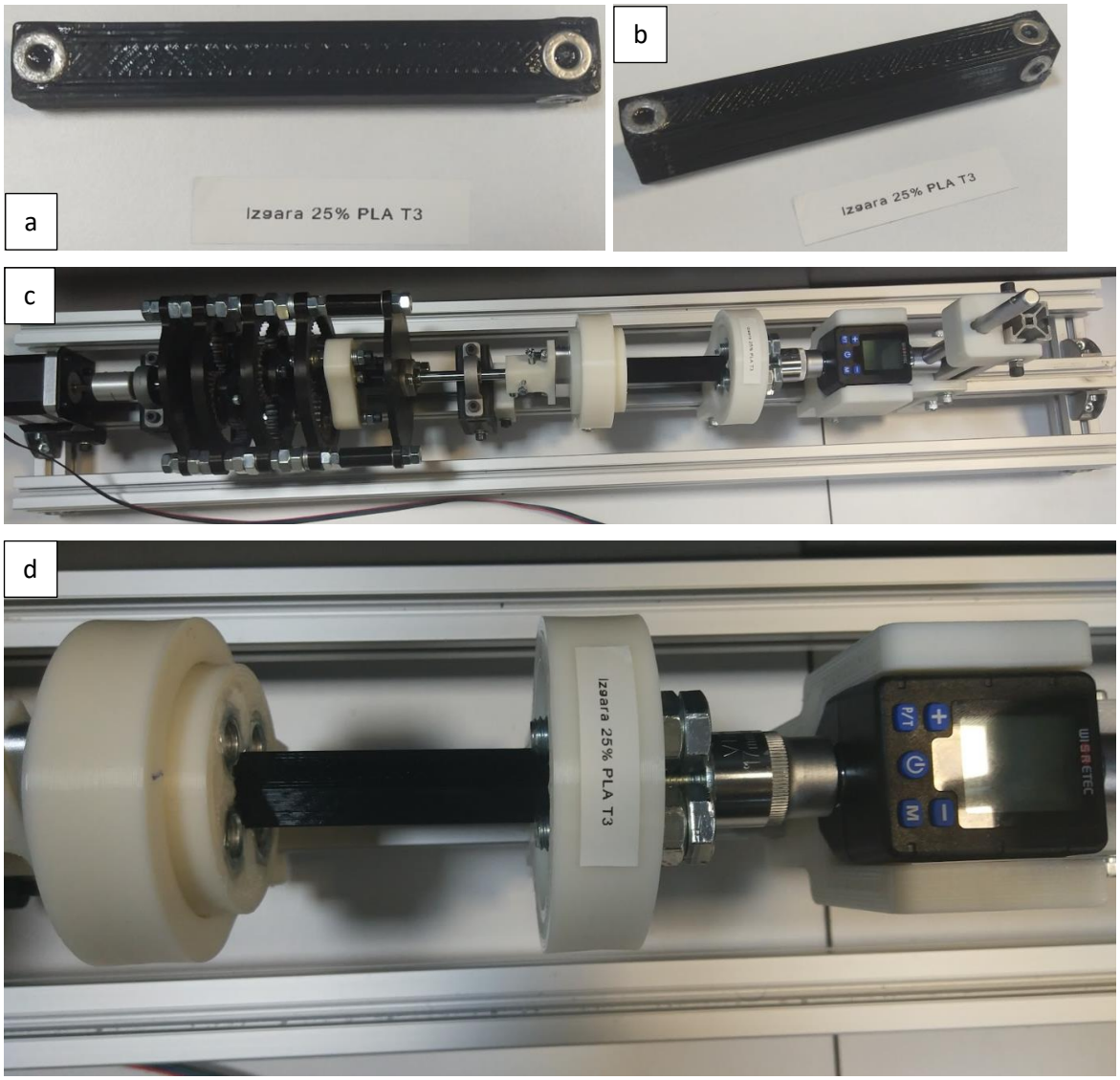
Resim 5.1. (devam) Izgara iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ilk test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (g) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü



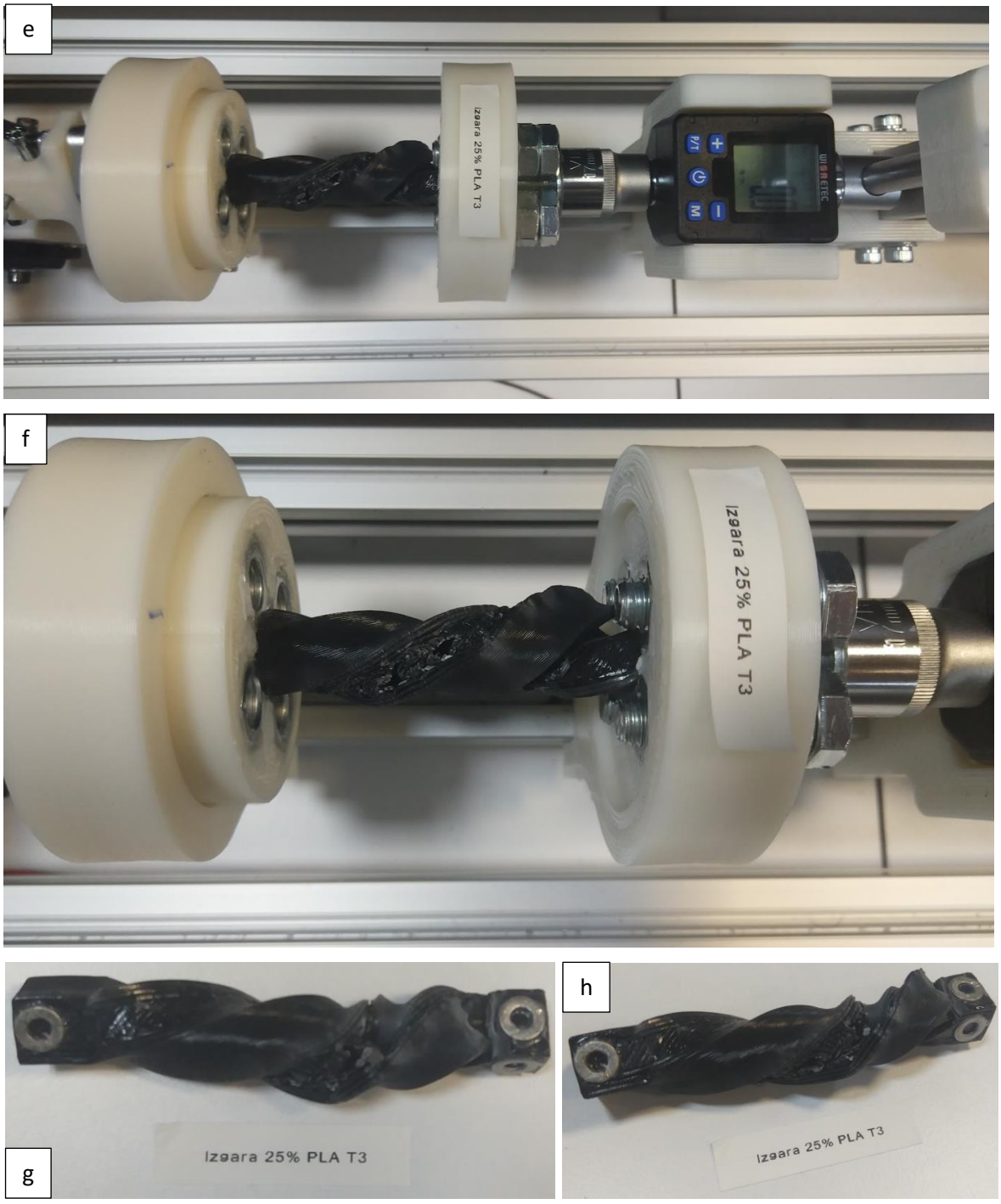
Resim 5.2. Izgara iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ikinci test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü



Resim 5.2. (devam) Izgara iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ikinci test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü



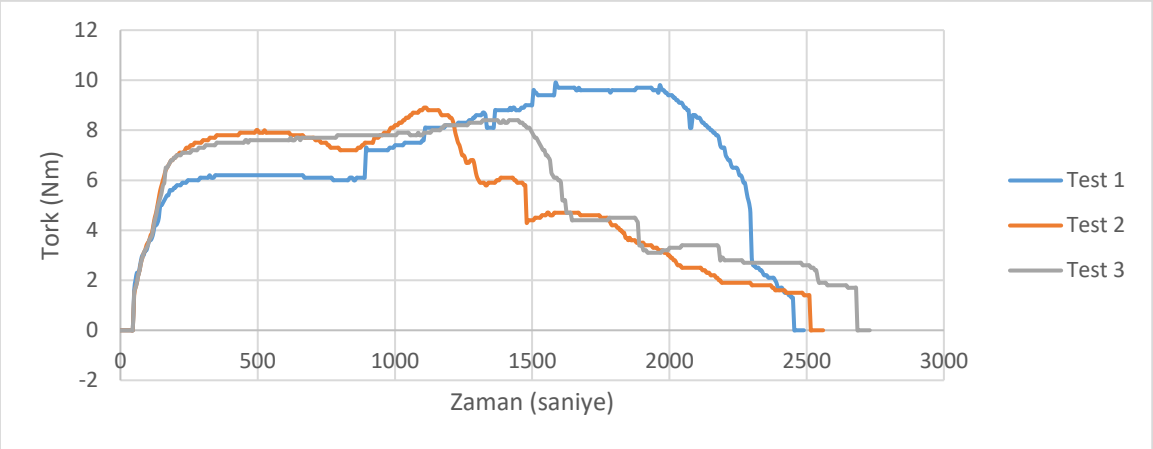
Resim 5.3. Izgara iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş üçüncü test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü



Resim 5.3. (devam) Izgara iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş üçüncü test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü

Şekil 5.1'de ızgara iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında dayanımlarının tork-zaman

değişim grafiği gösterilmiştir. Her 5 saniyede bir tork verisi alınmıştır. Grafik incelendiğinde parçaların 500-800 saniye aralığında dayanımlarının azaldığı, bu aralıktan sonra arttığı görülmektedir. Testler sırasında 800.saniyeye kadar iç doluluk desen yapısının bozulmadığı gözlemlenmiştir. Geri kalan sürede iç doluluk deseni parça içinde sıkışmış ve parça tam dolu hale gelmiştir. İç doluluk deseninin etkisi araştırıldığı için 800. saniyeye kadar olan aralıktaki veriler önem taşımaktadır ve değerlendirme için en yüksek tork değeri bu aralıktaki verilerden elde edilmiştir. Çizelge 5.1'de üç test parçalarının 0-800 saniye aralığındaki maksimum tork değeri ve bu değerlerin ortalaması yer almaktadır.



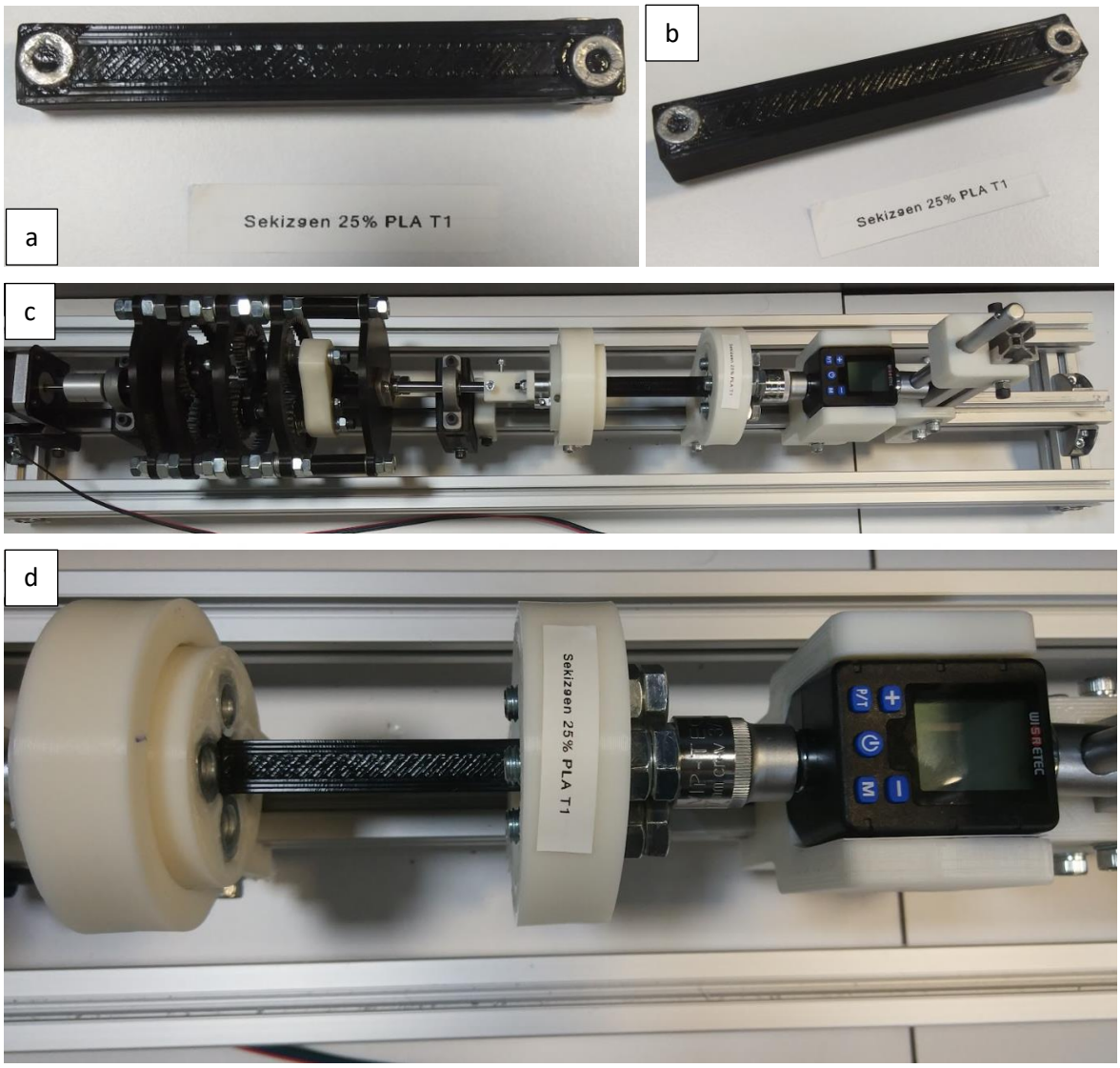
Şekil 5.1. Izgara iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında dayanımlarının tork-zaman değişim grafiği

Çizelge 5.1. Izgara iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında en yüksek tork dayanımları

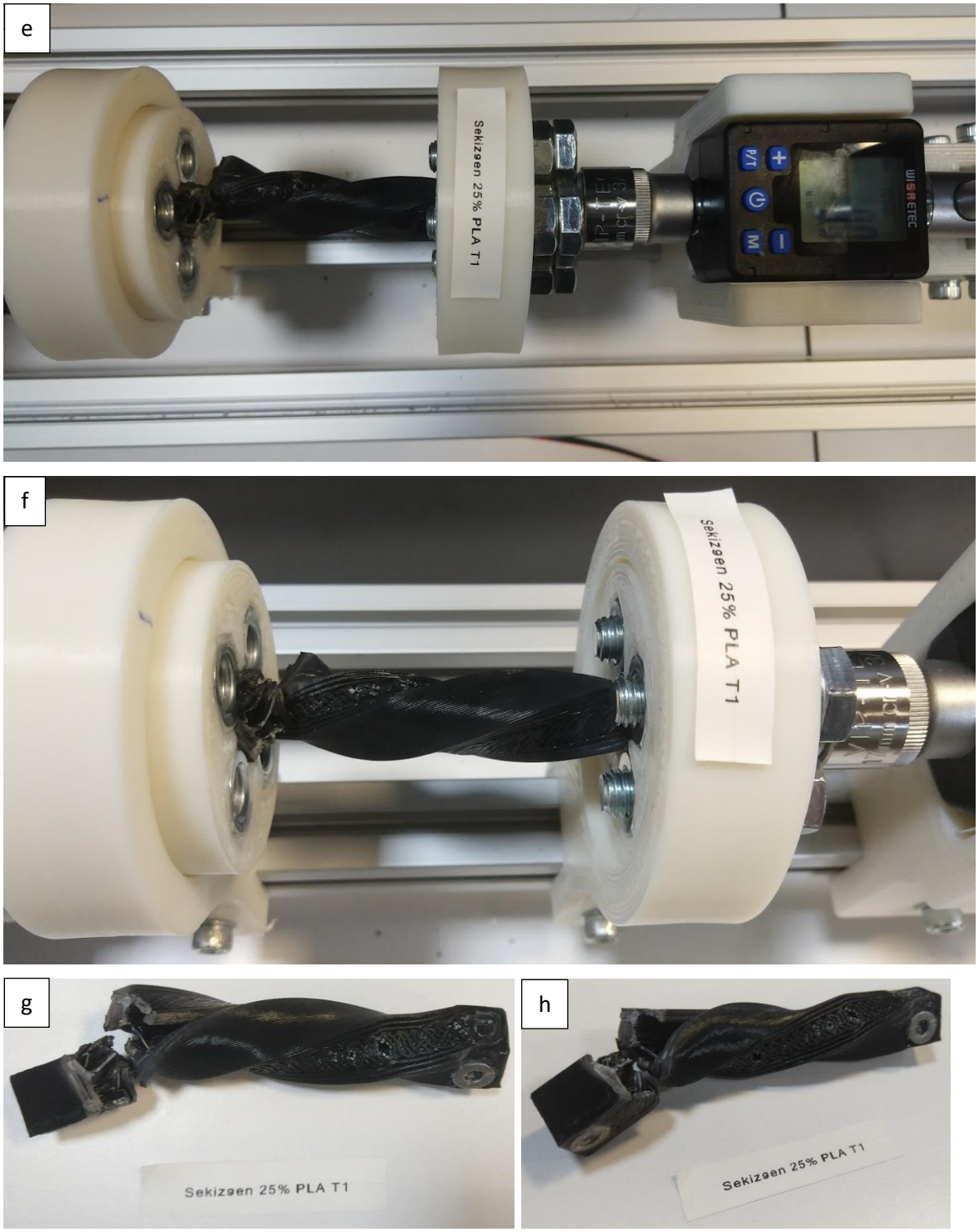
Tork	Nm
Test 1	6.2
Test 2	8
Test 3	7,7
Ortalama	7,3

Sekizgen iç doluluk deseninin burulma testi sonuçları

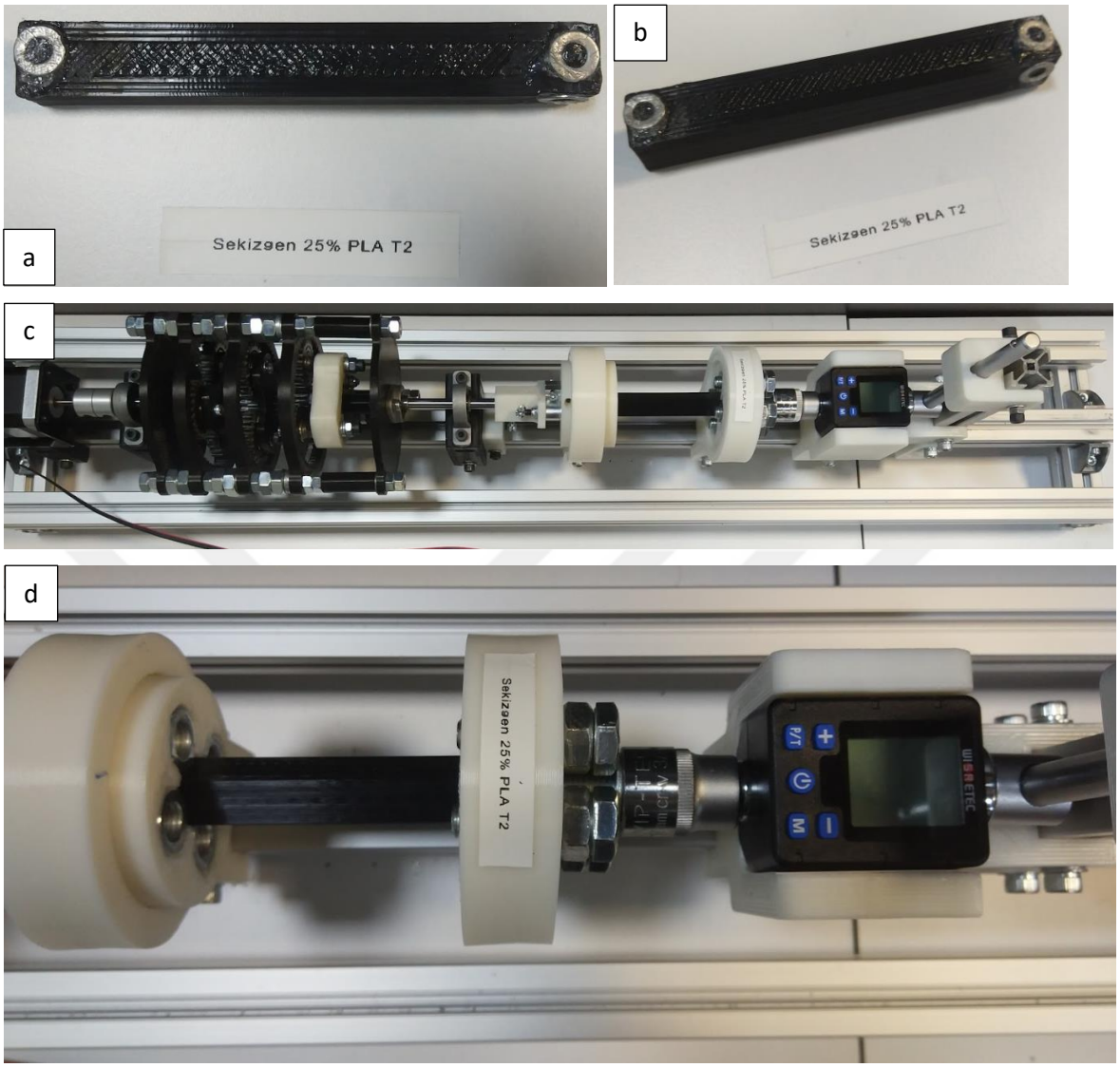
Sekizgen iç doluluk geometrisiyle %25 dolulukla ESUN PLA+ malzemeden üretilen 3 test parçasına burulma testi yapılmıştır. Resim 5.4'te ilk test parçasının, Resim 5.5'te ikinci test parçasının, Resim 5.6'da üçüncü test parçasının burulma testi prosedürü gösterilmiştir.



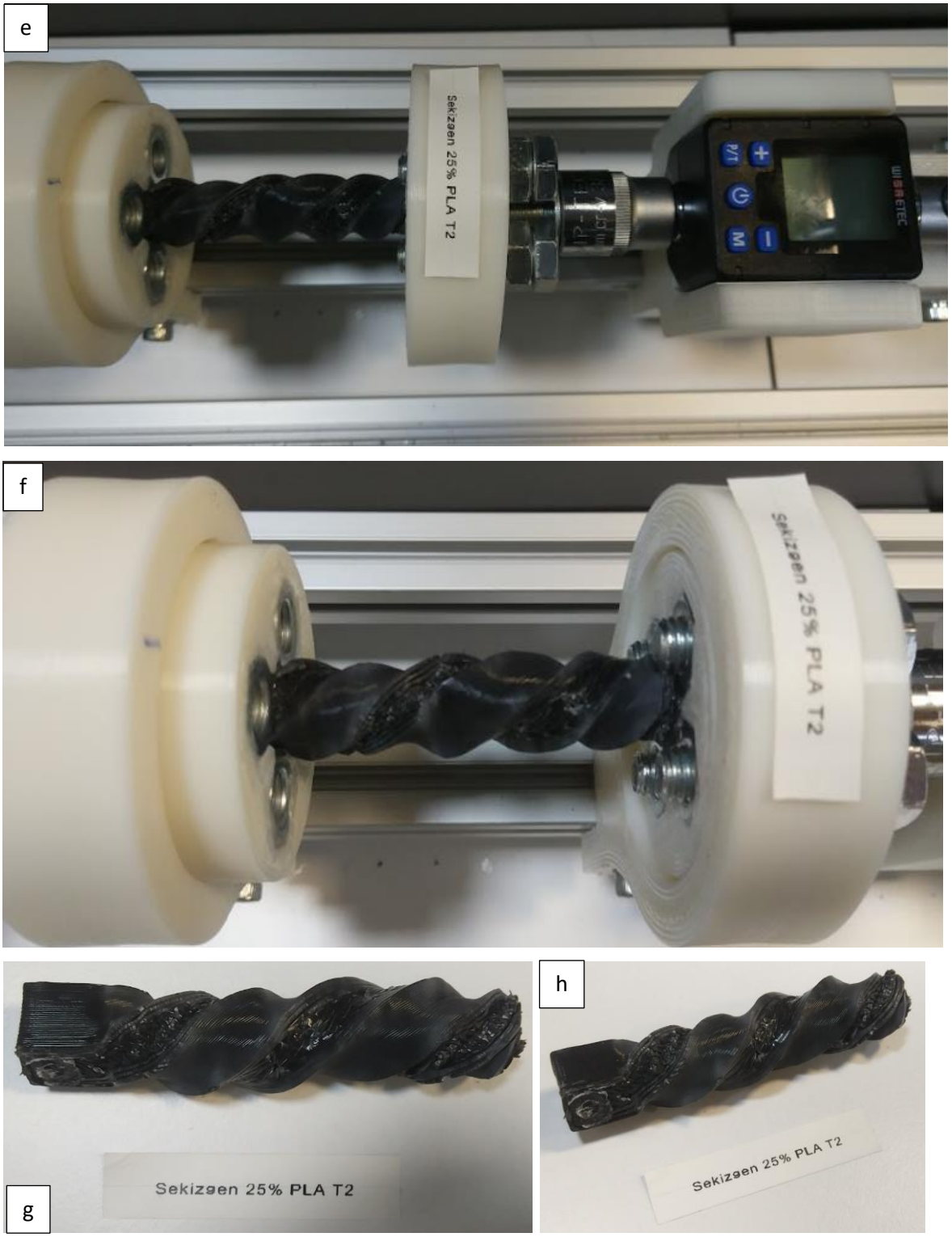
Resim 5.4. Sekizgen iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ilk test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü



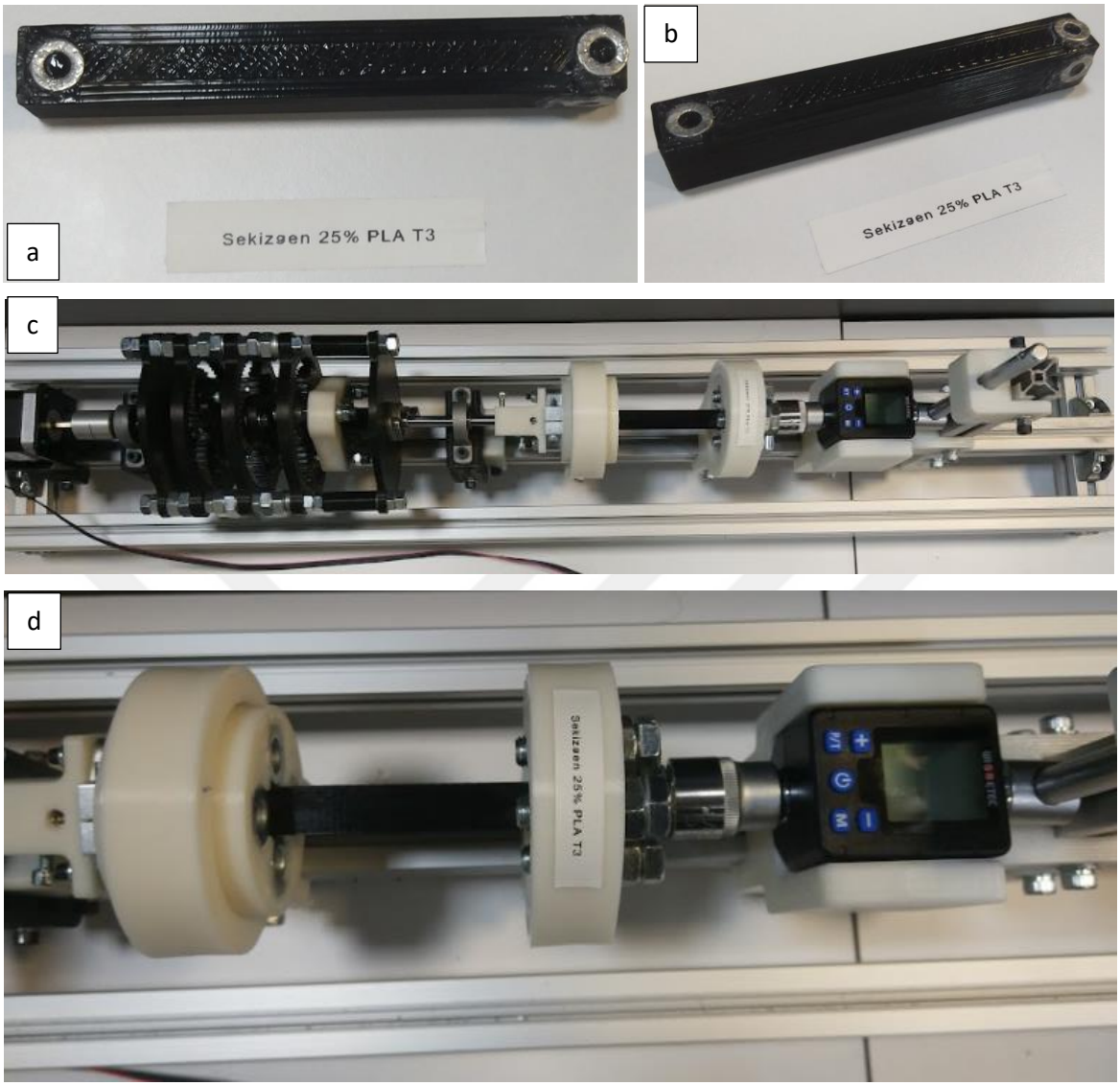
Resim 5.4. (devam) Sekizgen iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ilk test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü



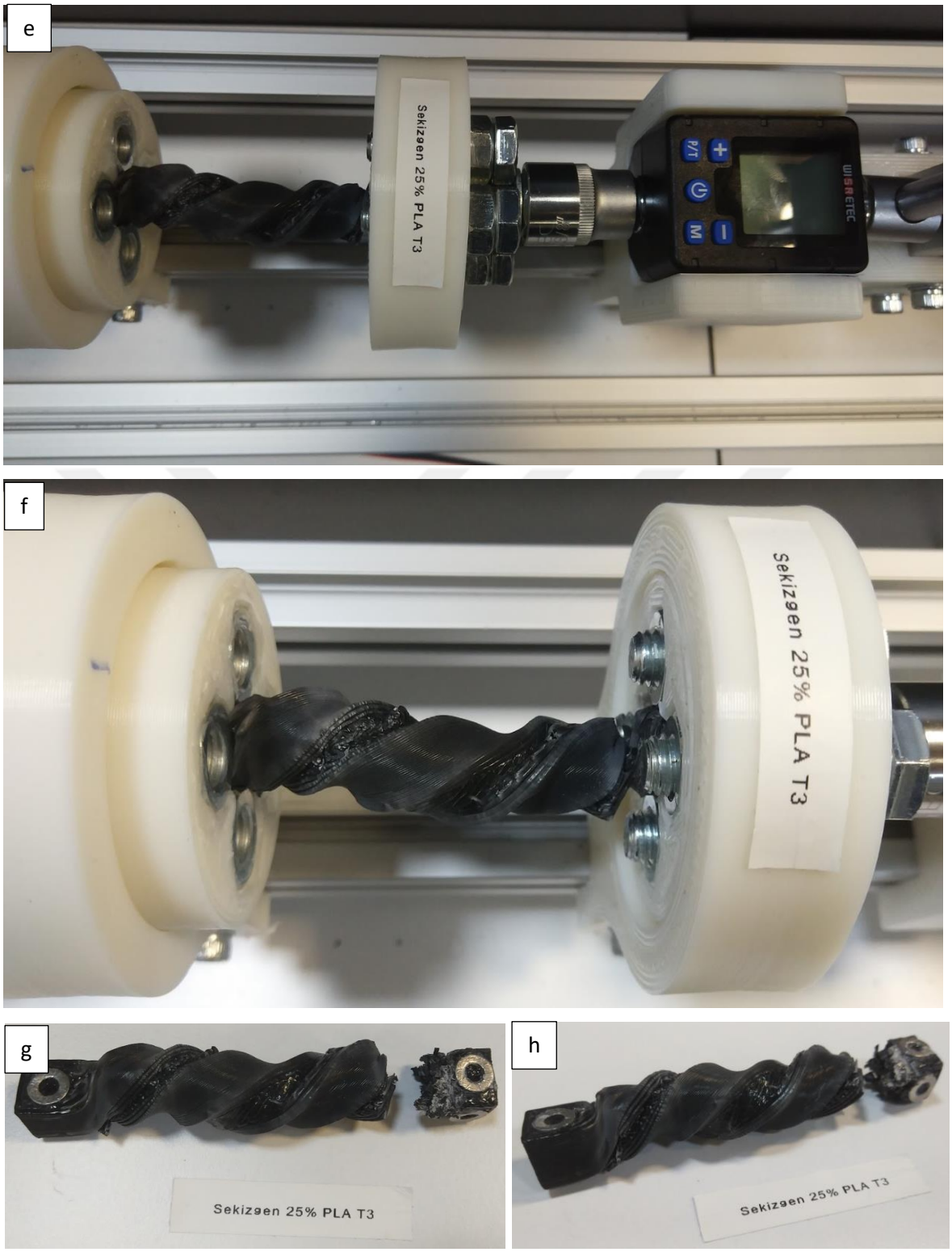
Resim 5.5. Sekizgen iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ikinci test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü



Resim 5.5. (devam) Sekizgen iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ikinci test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü

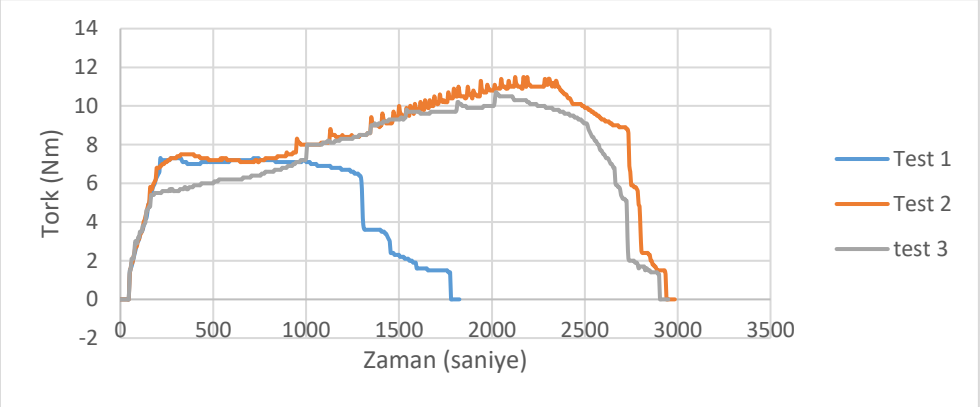


Resim 5.6. Sekizgen iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş üçüncü test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü



Resim 5.6. (devam) Sekizgen iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş üçüncü test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü

Şekil 5.2'de sekizgen iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında dayanımlarının tork-zaman değişim grafiği gösterilmiştir. Her 5 saniyede bir tork verisi alınmıştır. Grafik incelendiğinde parçaların 500-750. saniye aralığında dayanımlarının azaldığı, bu aralıktan sonra arttığı görülmektedir. Testler sırasında 750. saniyeye kadar iç doluluk desen yapısının bozulmadığı gözlemlenmiştir. Geri kalan sürede iç doluluk deseni parça içinde sıkışmış ve parça tam dolu hale gelmiştir. İç doluluk deseninin etkisi araştırıldığı için 750. saniyeye kadar olan aralıktaki veriler önem taşımaktadır ve değerlendirme için en yüksek tork değeri bu aralıktaki verilerden elde edilmiştir. Çizelge 5.2'de üç test parçalarının 0-750 saniye aralığındaki maksimum tork değeri ve bu değerlerin ortalaması yer almaktadır.



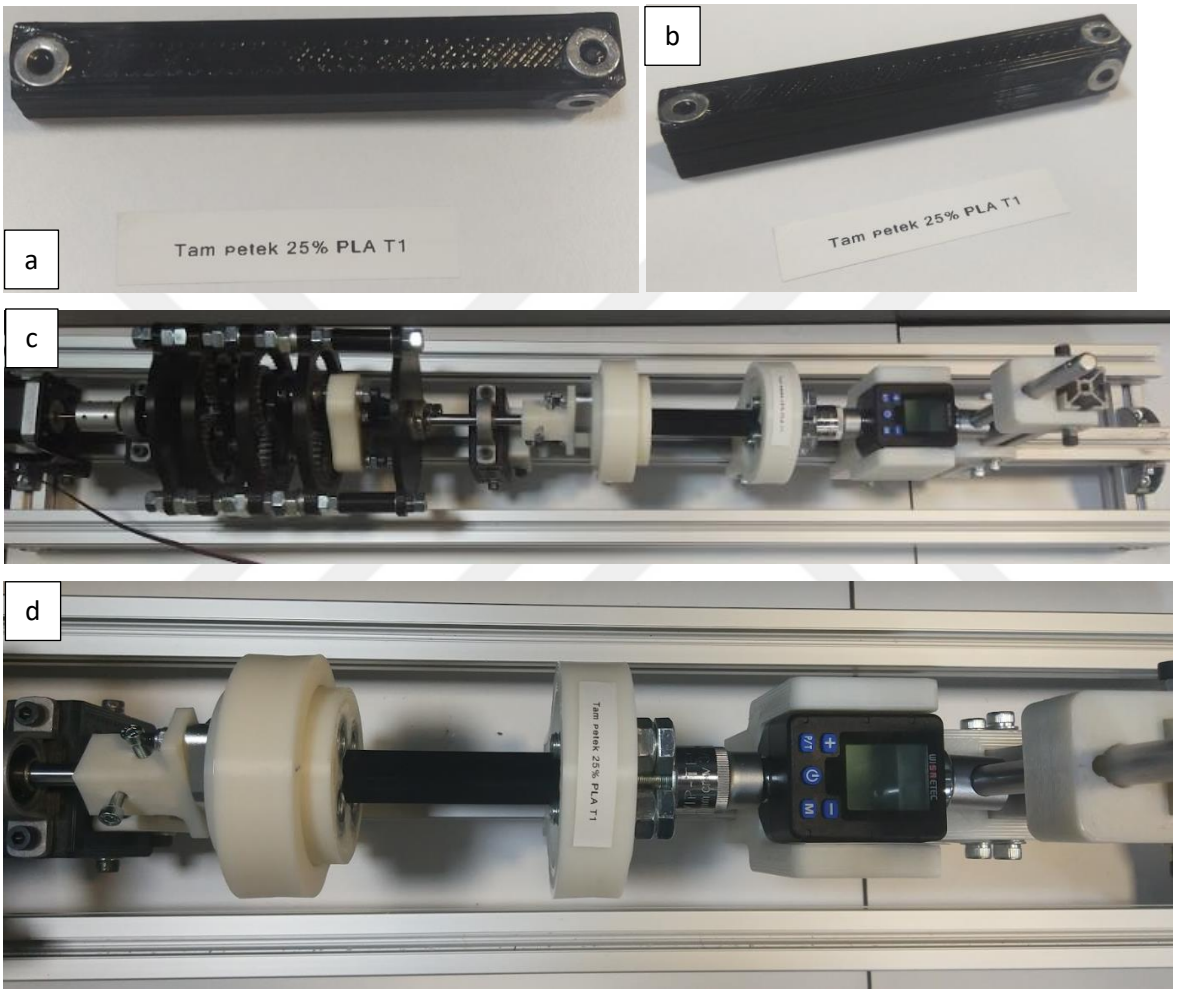
Şekil 5.2. Sekizgen iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında dayanımlarının tork-zaman değişim grafiği

Çizelge 5.2. Sekizgen iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında en yüksek tork dayanımları

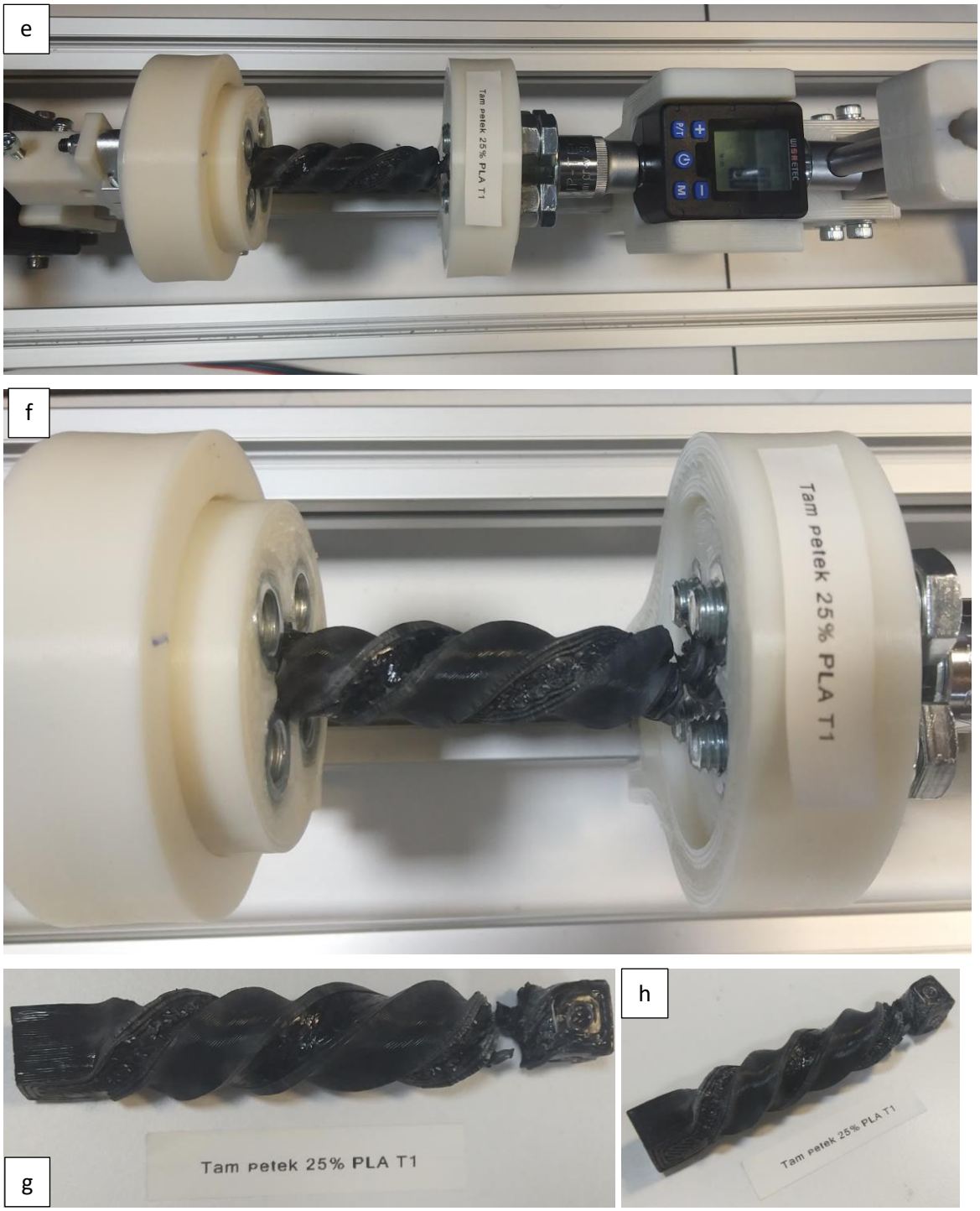
Tork	Nm
Test 1	7,3
Test 2	7,5
Test 3	6,4
Ortalama	7,07

Tam petek iç doluluk deseninin burulma testi sonuçları

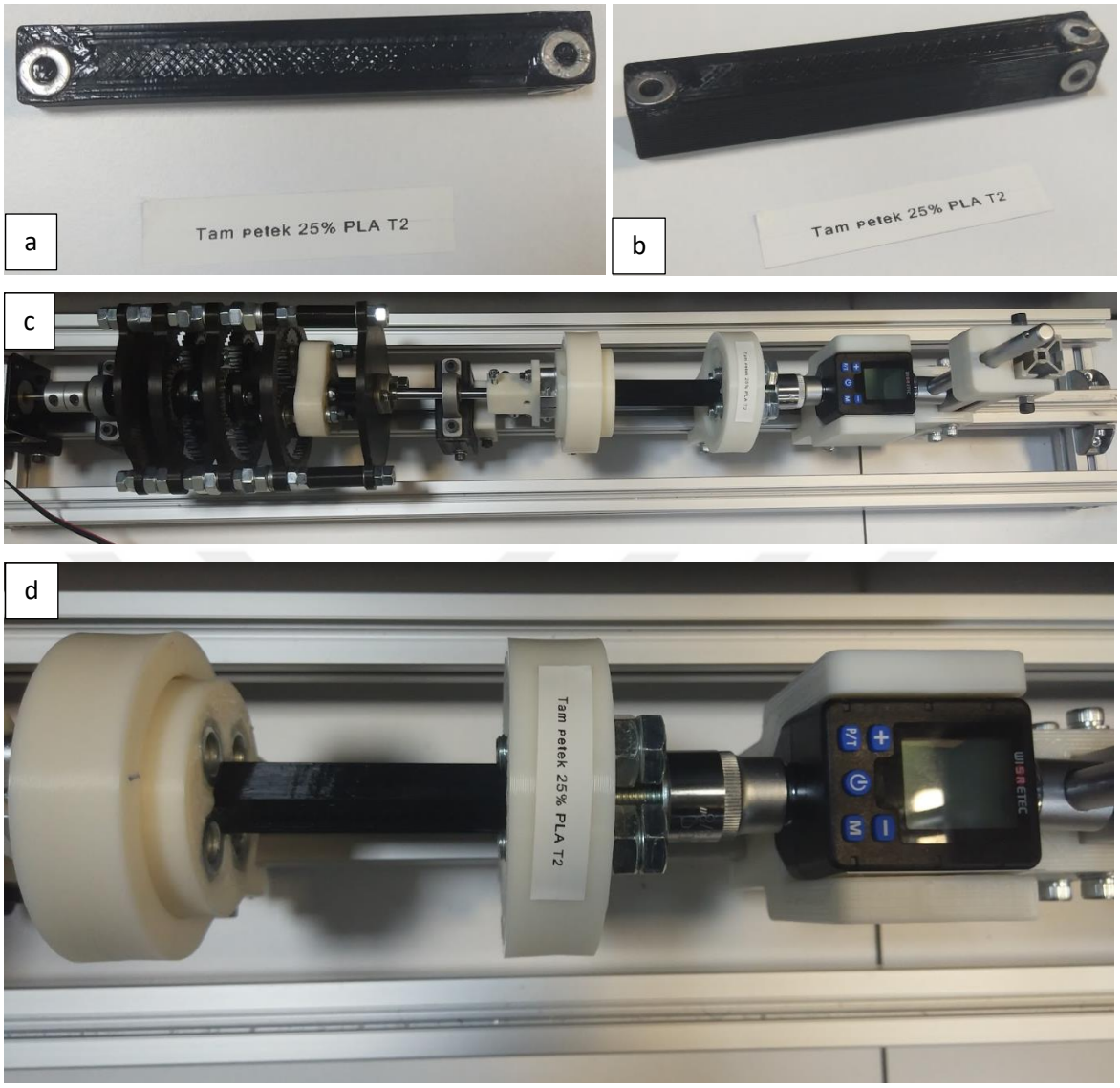
Tam petek iç doluluk geometrisiyle %25 dolulukla ESUN PLA+ malzemeden üretilen 3 test parçasına burulma testi yapılmıştır. Resim 5.7'de ilk test parçasının, Resim 5.8'de ikinci test parçasının, Resim 5.9'da üçüncü test parçasının burulma testi prosedürü gösterilmiştir.



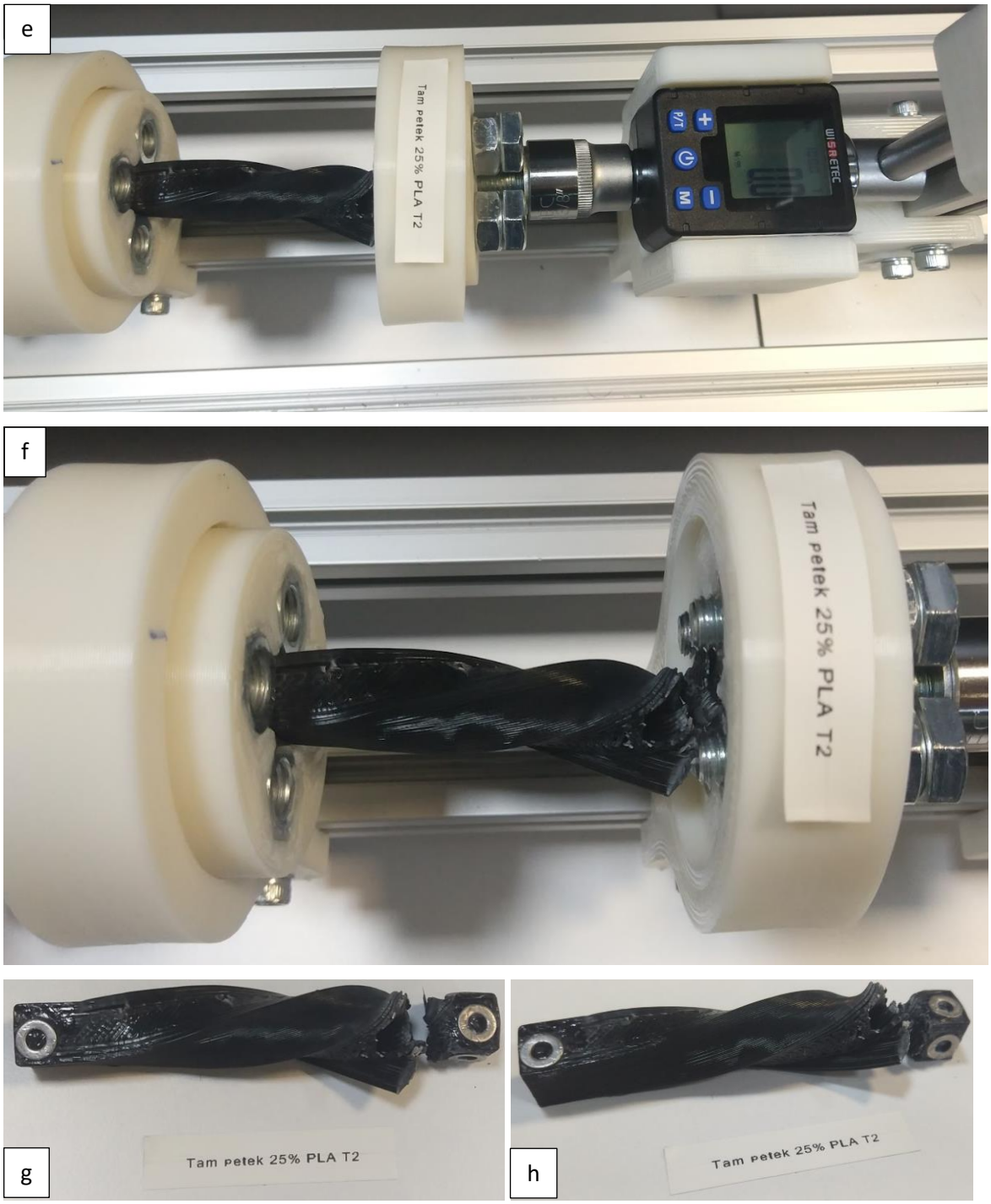
Resim 5.7. Tam petek iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ilk test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü



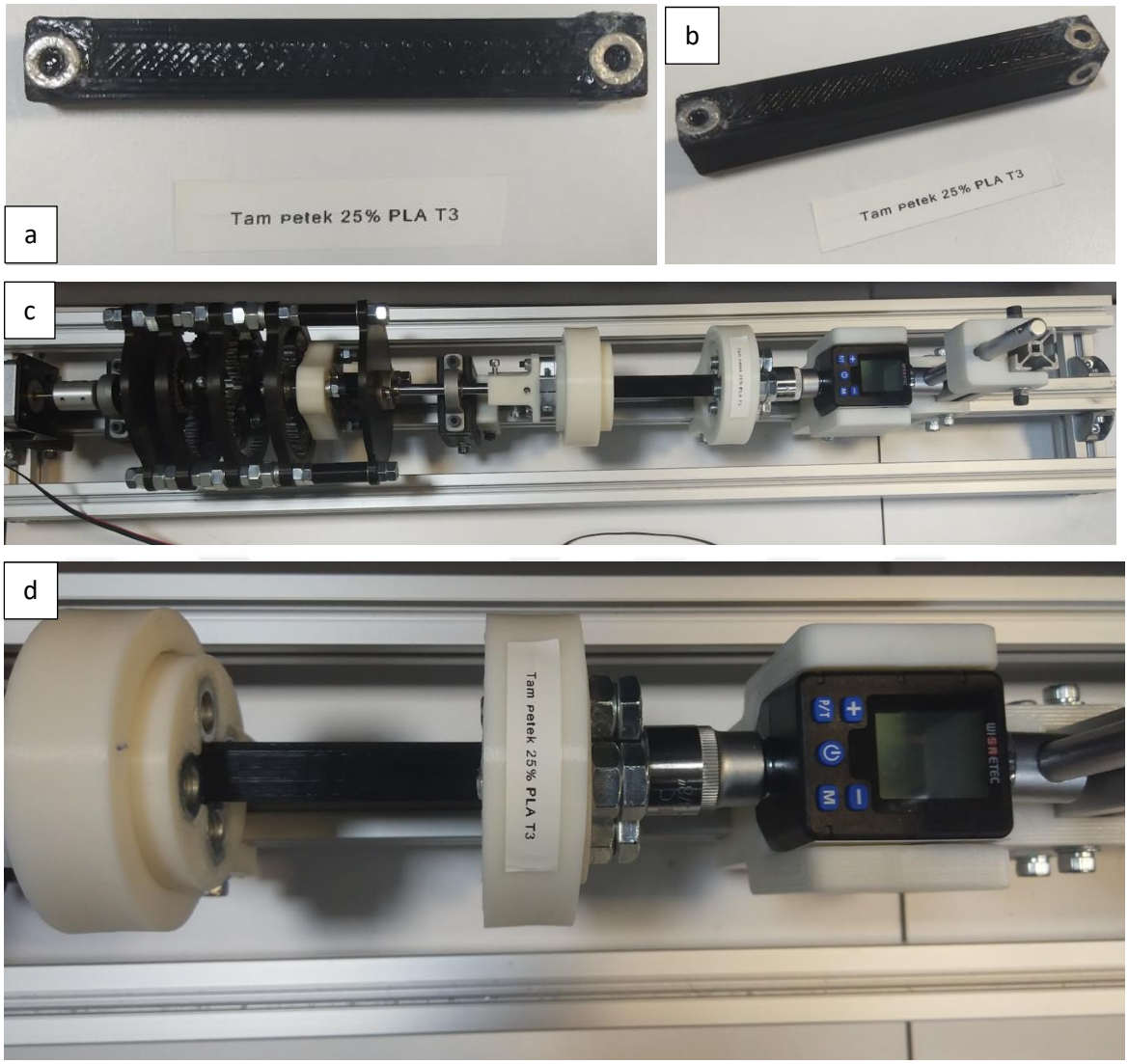
Resim 5.7. (devam) Tam petek iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ilk test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü



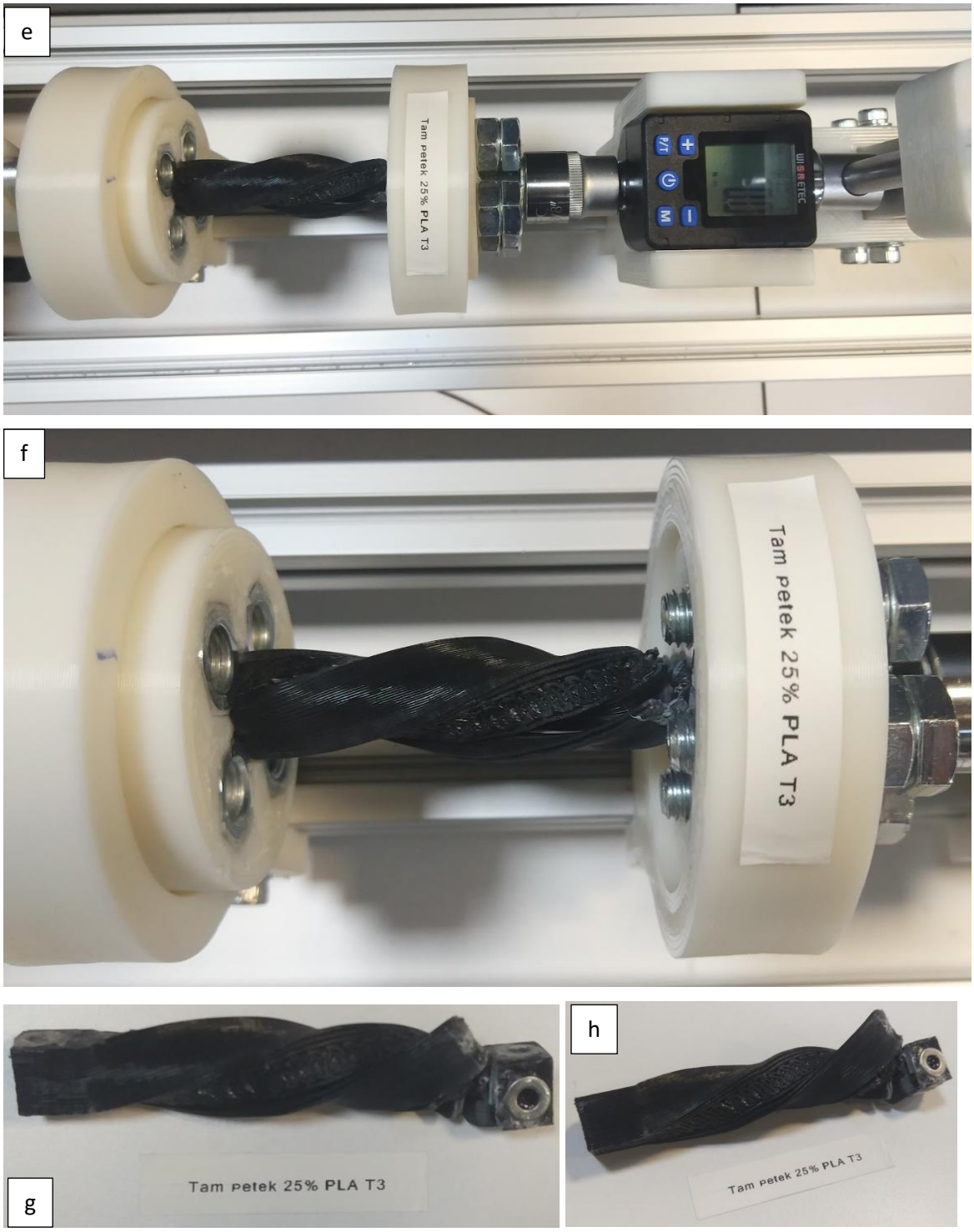
Resim 5.8. Tam petek iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ikinci test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü



Resim 5.8. (devam) Tam petek iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ikinci test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü

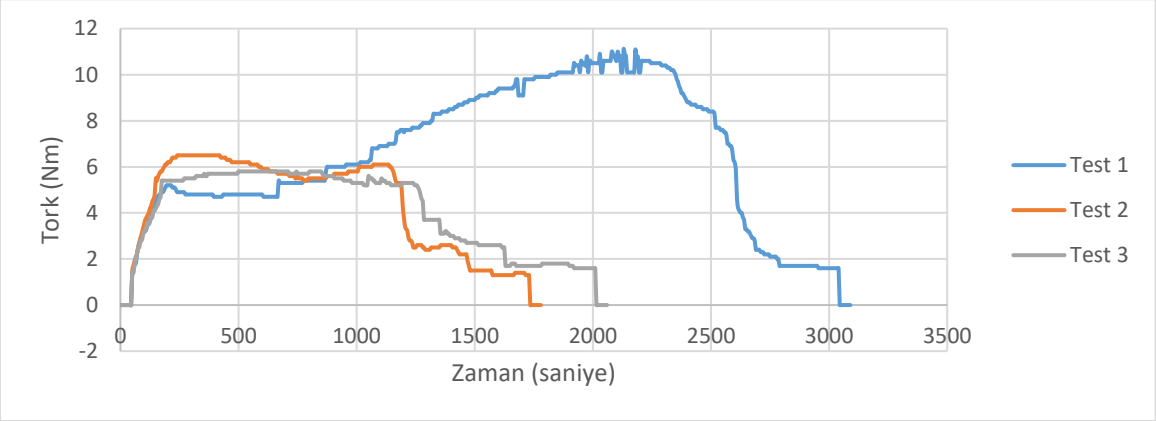


Resim 5.9. Tam petek iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş üçüncü test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü



Resim 5.9. (devam) Tam petek iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş üçüncü test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü

Şekil 5.3'te tam petek iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında dayanımlarının tork-zaman değişim grafiği gösterilmiştir. Her 5 saniyede bir tork verisi alınmıştır. Grafik incelendiğinde parçaların 500-1000. saniye aralığında dayanımlarının azaldığı, bu aralıktan sonra arttığı görülmektedir. Testler sırasında 1000. saniyeye kadar iç doluluk desen yapısının bozulmadığı gözlemlenmiştir. Geri kalan sürede iç doluluk deseni parça içinde sıkışmış ve parça tam dolu hale gelmiştir. İç doluluk deseninin etkisi araştırıldığı için 1000. saniyeye kadar olan aralıktaki veriler önem taşımaktadır ve değerlendirme için en yüksek tork değeri bu aralıktaki verilerden elde edilmiştir. Çizelge 5.3'te üç test parçalarının 0-1000 saniye aralığındaki maksimum tork değeri ve bu değerlerin ortalaması yer almaktadır.



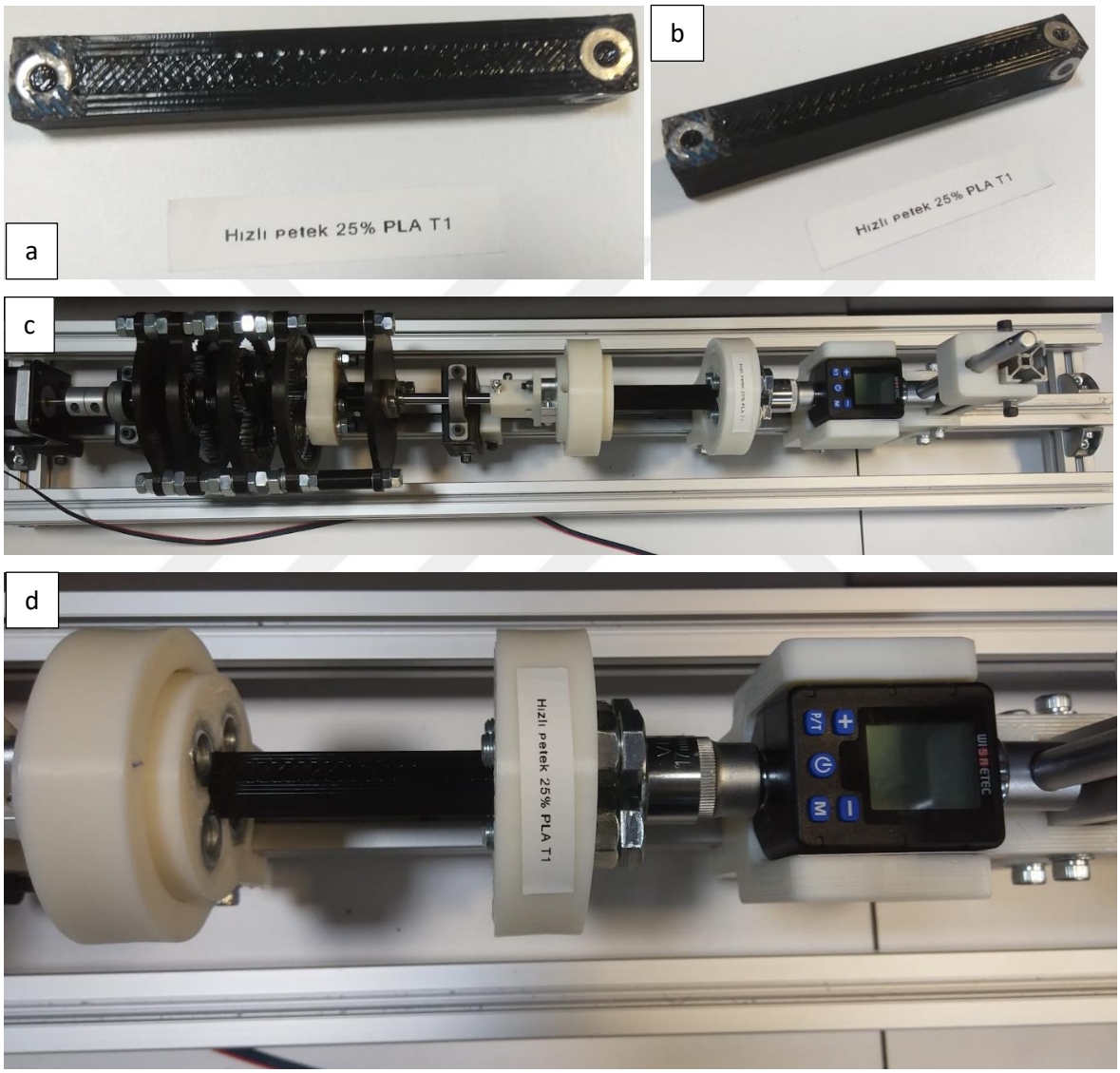
Şekil 5.3. Tam petek iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında dayanımlarının tork-zaman değişim grafiği

Çizelge 5.3. Tam petek iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında en yüksek tork dayanımları

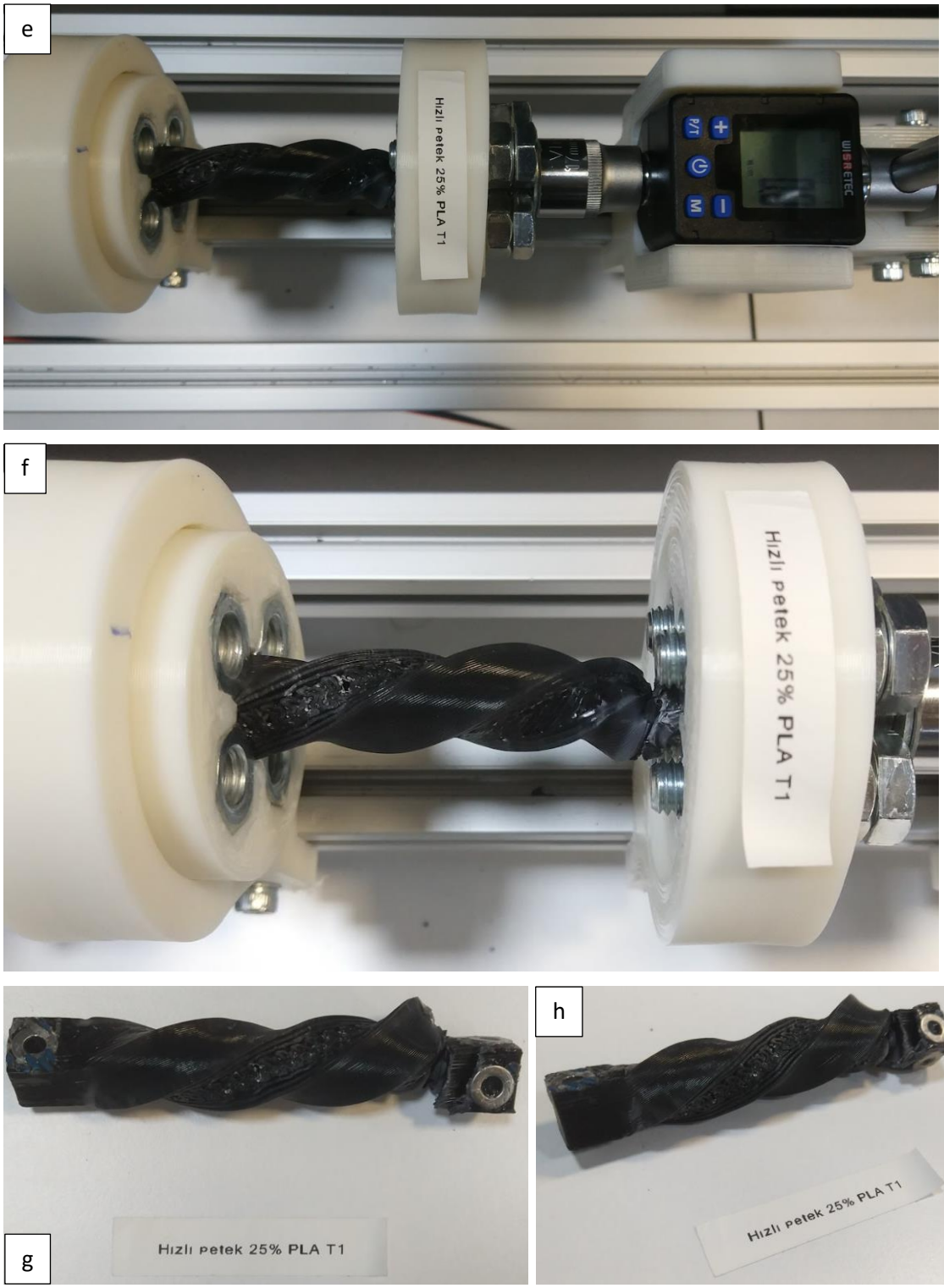
Tork	Nm
Test 1	6,0
Test 2	6,5
Test 3	5,8
Ortalama	6,1

Hızlı petek iç doluluk deseninin burulma testi sonuçları

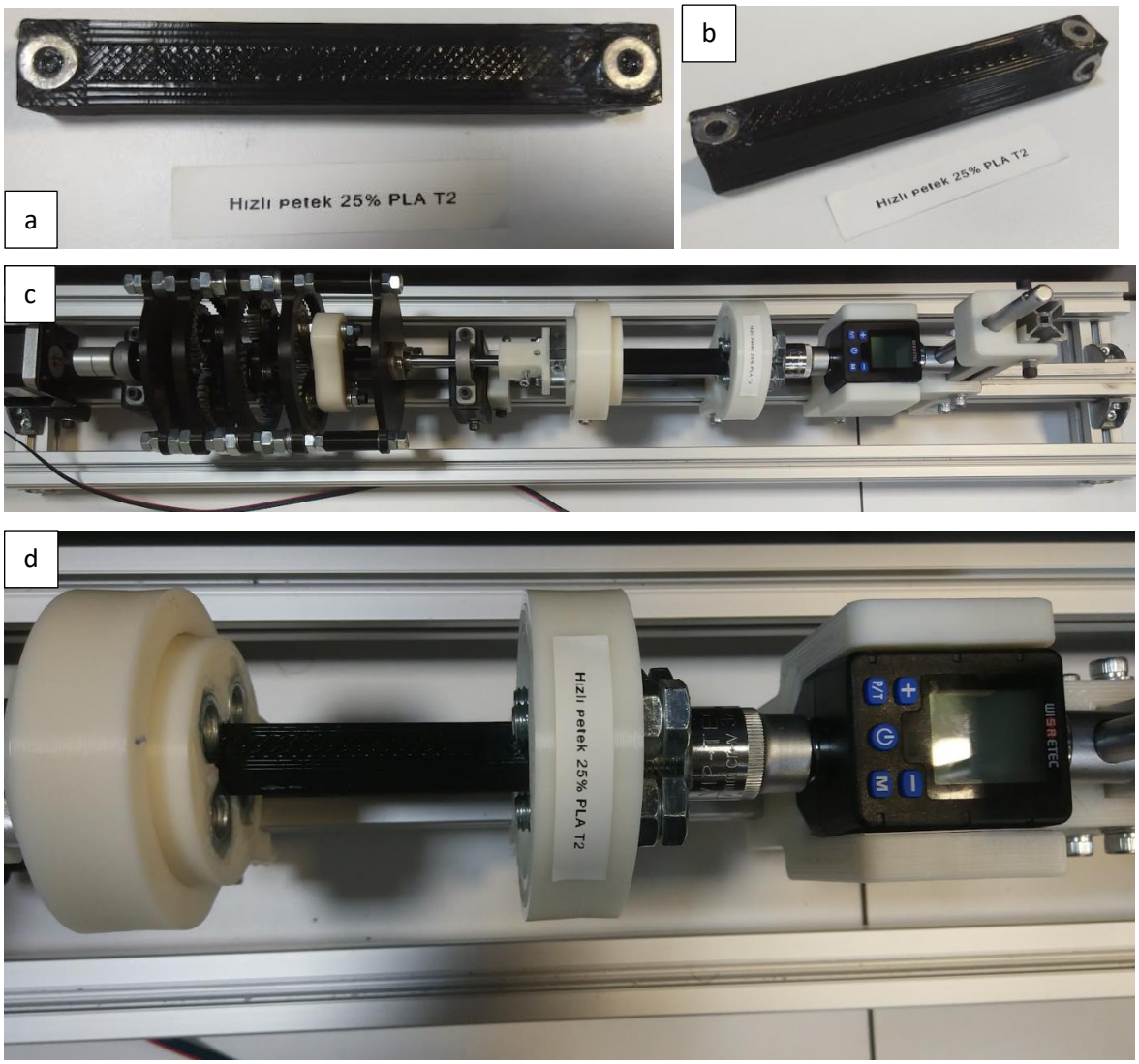
Hızlı petek iç doluluk geometrisiyle %25 dolulukla ESUN PLA+ malzemeden üretilen 3 test parçasına burulma testi yapılmıştır. Resim 5.10'da ilk test parçasının, Resim 5.11'de ikinci test parçasının, Resim 5.12'de üçüncü test parçasının burulma testi prosedürü gösterilmiştir.



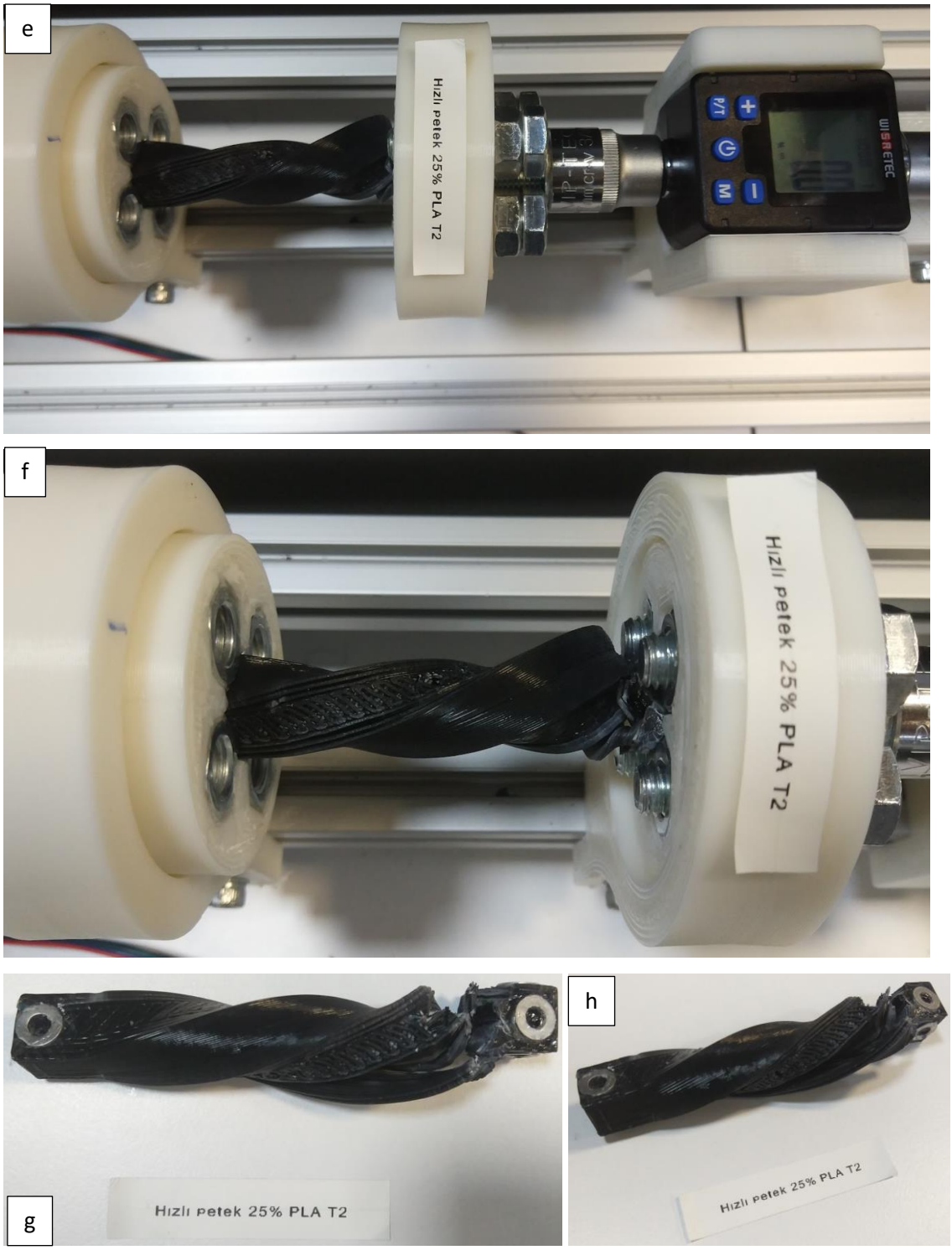
Resim 5.10. Hızlı petek iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ilk test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü



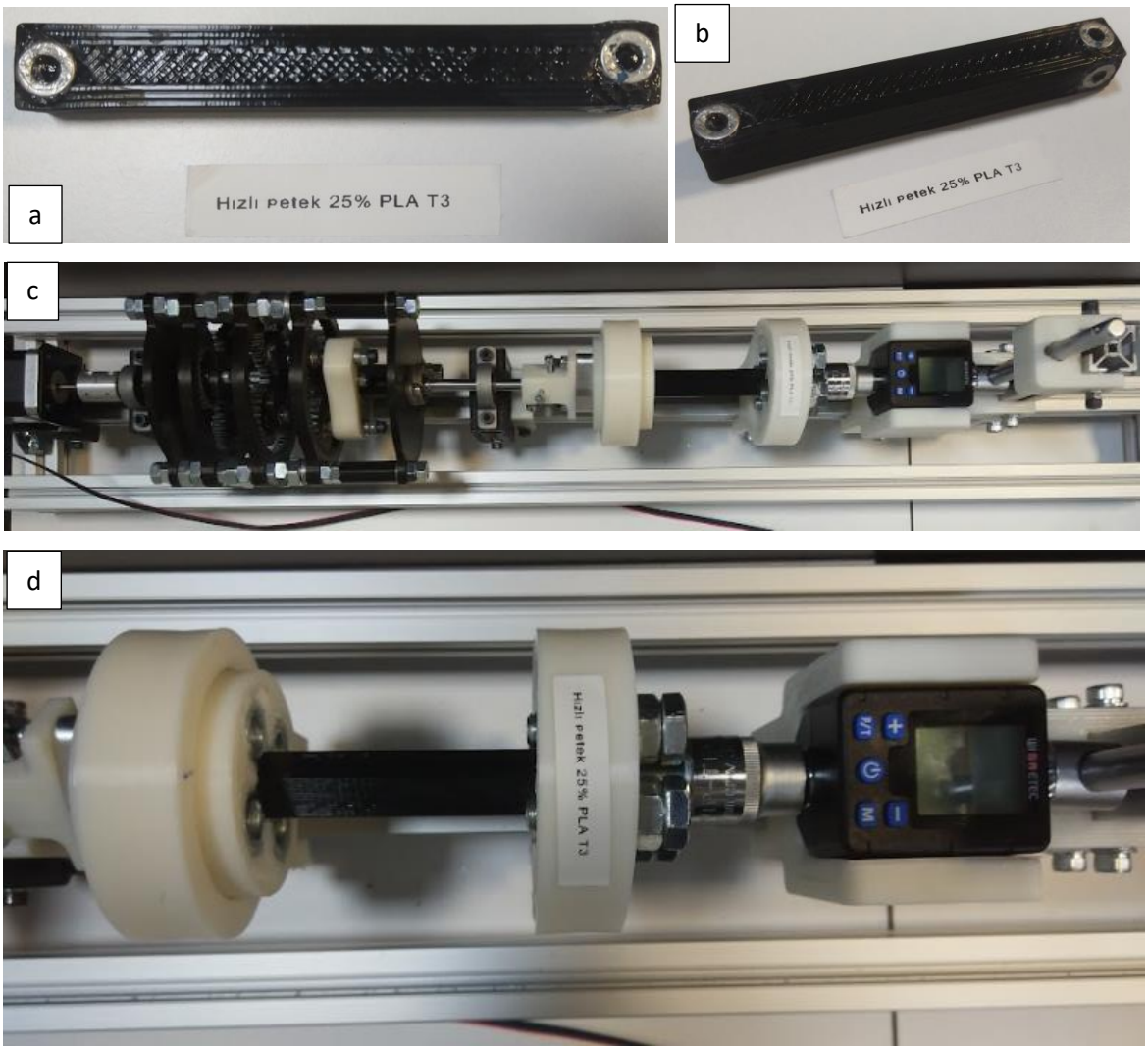
Resim 5.10. (devam) Hızlı petek iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ilk test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü



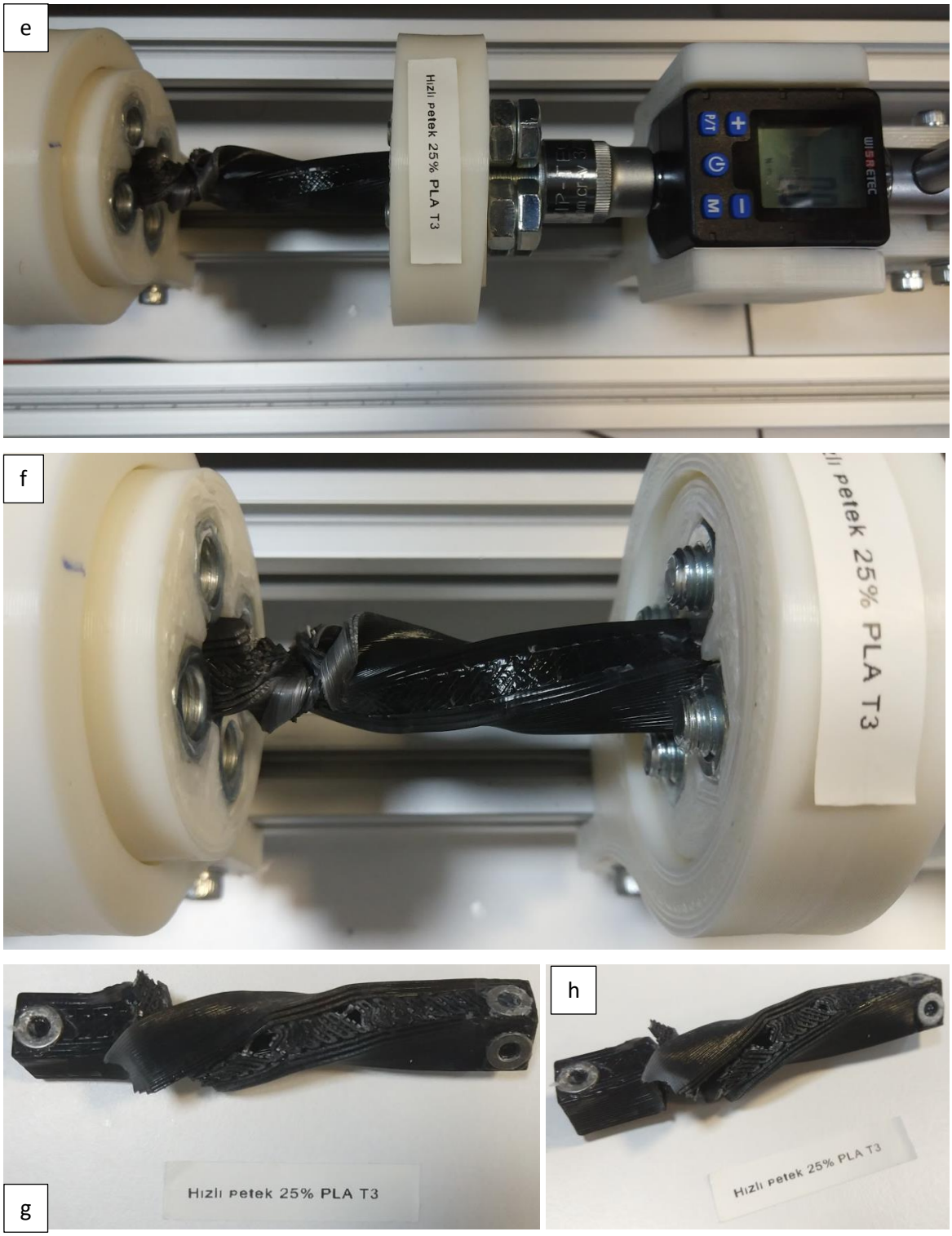
Resim 5.11. Hızlı petek iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ikinci test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü



Resim 5.11. (devam) Hızlı petek iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ikinci test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü

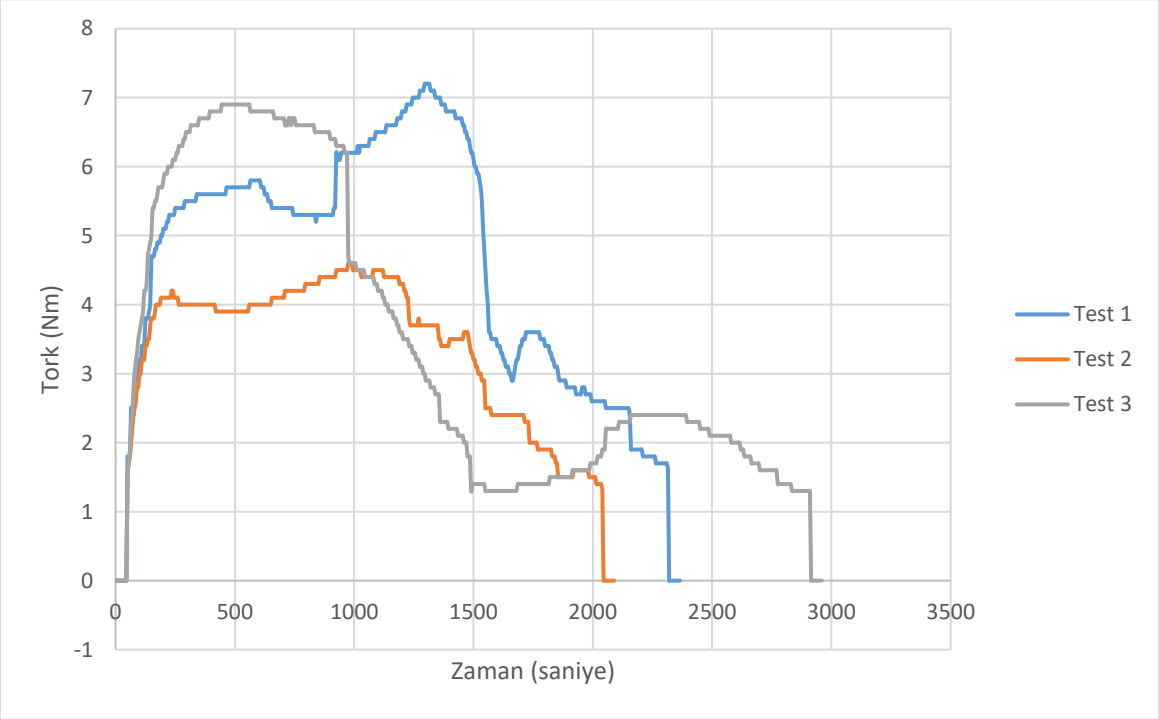


Resim 5.12. Hızlı petek iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş üçüncü test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü



Resim 5.12. (devam) Hızlı petek iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş üçüncü test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü

Şekil 5.4'te hızlı petek iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında dayanımlarının tork-zaman değişim grafiği gösterilmiştir. Her 5 saniyede bir tork verisi alınmıştır. Grafik incelendiğinde parçaların 500-750. saniye aralığında dayanımlarının azaldığı, bu aralıktan sonra arttığı görülmektedir. Testler sırasında 750. saniyeye kadar iç doluluk desen yapısının bozulmadığı gözlemlenmiştir. Geri kalan sürede iç doluluk deseni parça içinde sıkışmış ve parça tam dolu hale gelmiştir. İç doluluk deseninin etkisi araştırıldığı için 750. saniyeye kadar olan aralıktaki veriler önem taşımaktadır ve değerlendirme için en yüksek tork değeri bu aralıktaki verilerden elde edilmiştir. Çizelge 5.4'te üç test parçalarının 0-750 saniye aralığındaki maksimum tork değeri ve bu değerlerin ortalaması yer almaktadır.



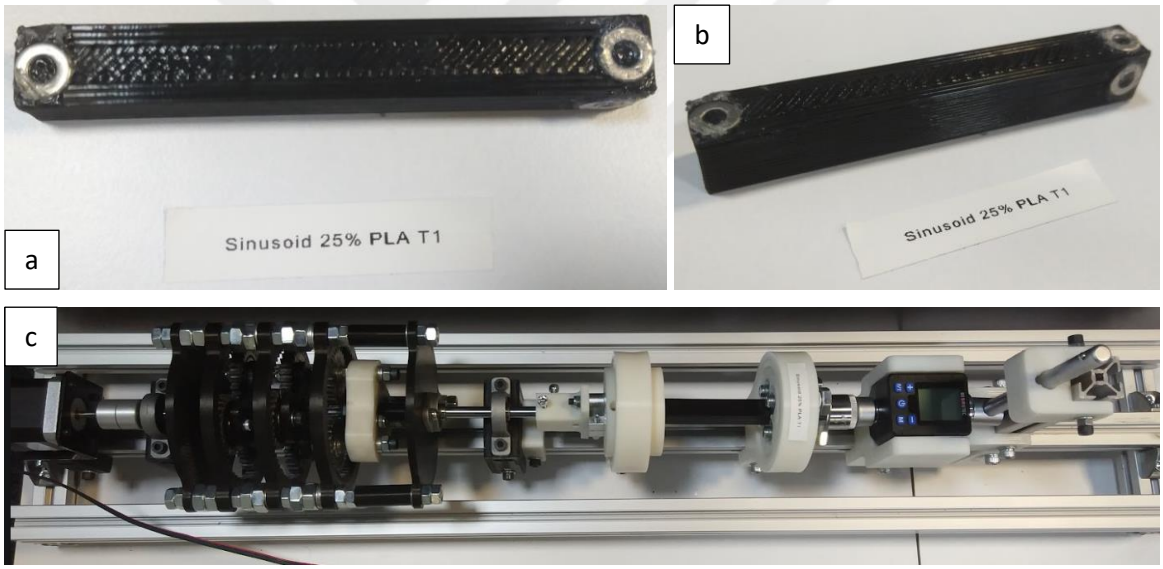
Şekil 5.4. Hızlı petek iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında dayanımlarının tork-zaman değişim grafiği

Çizelge 5.4. Hızlı petek iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında en yüksek tork dayanımları

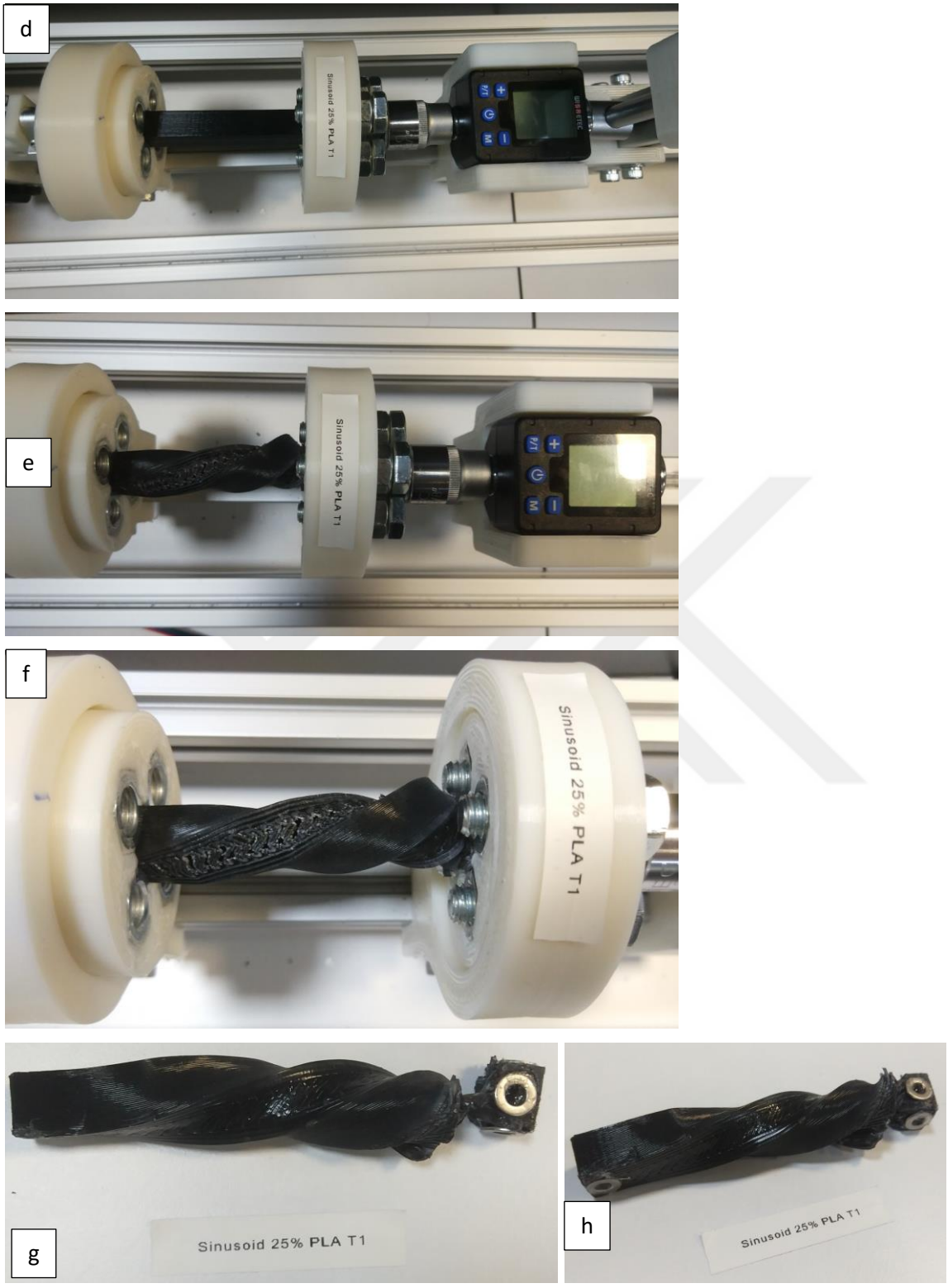
Tork	Nm
Test 1	5,8
Test 2	4,2
Test 3	6,9
Ortalama	5,63

Sinusoid iç doluluk deseninin burulma testi sonuçları

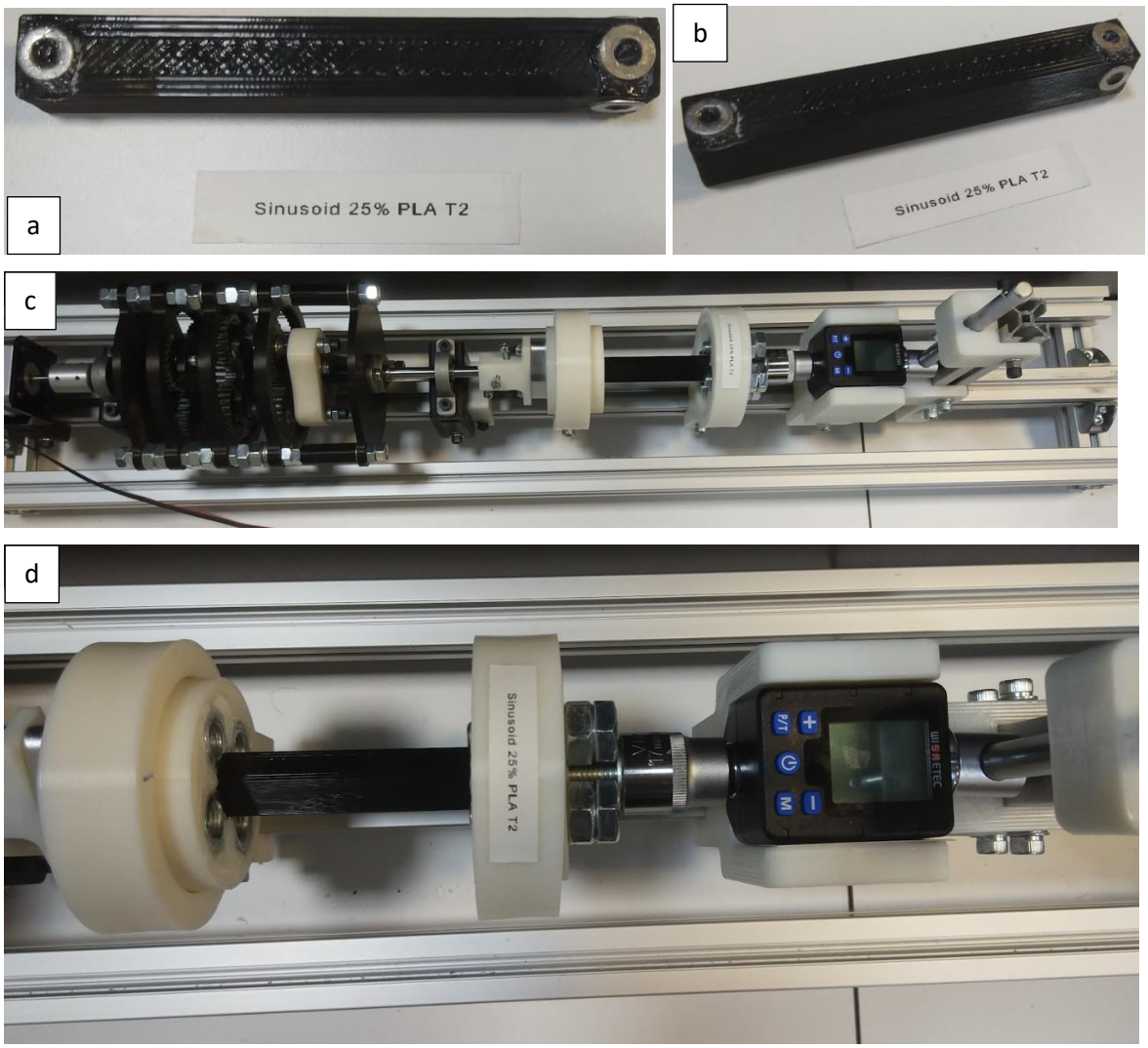
Sinusoid iç doluluk geometrisiyle %25 dolulukla ESUN PLA+ malzemeden üretilen 3 test parçasına burulma testi yapılmıştır. Resim 5.13'te ilk test parçasının, Resim 5.14'te ikinci test parçasının, Resim 5.15'te üçüncü test parçasının burulma testi prosedürü gösterilmiştir.



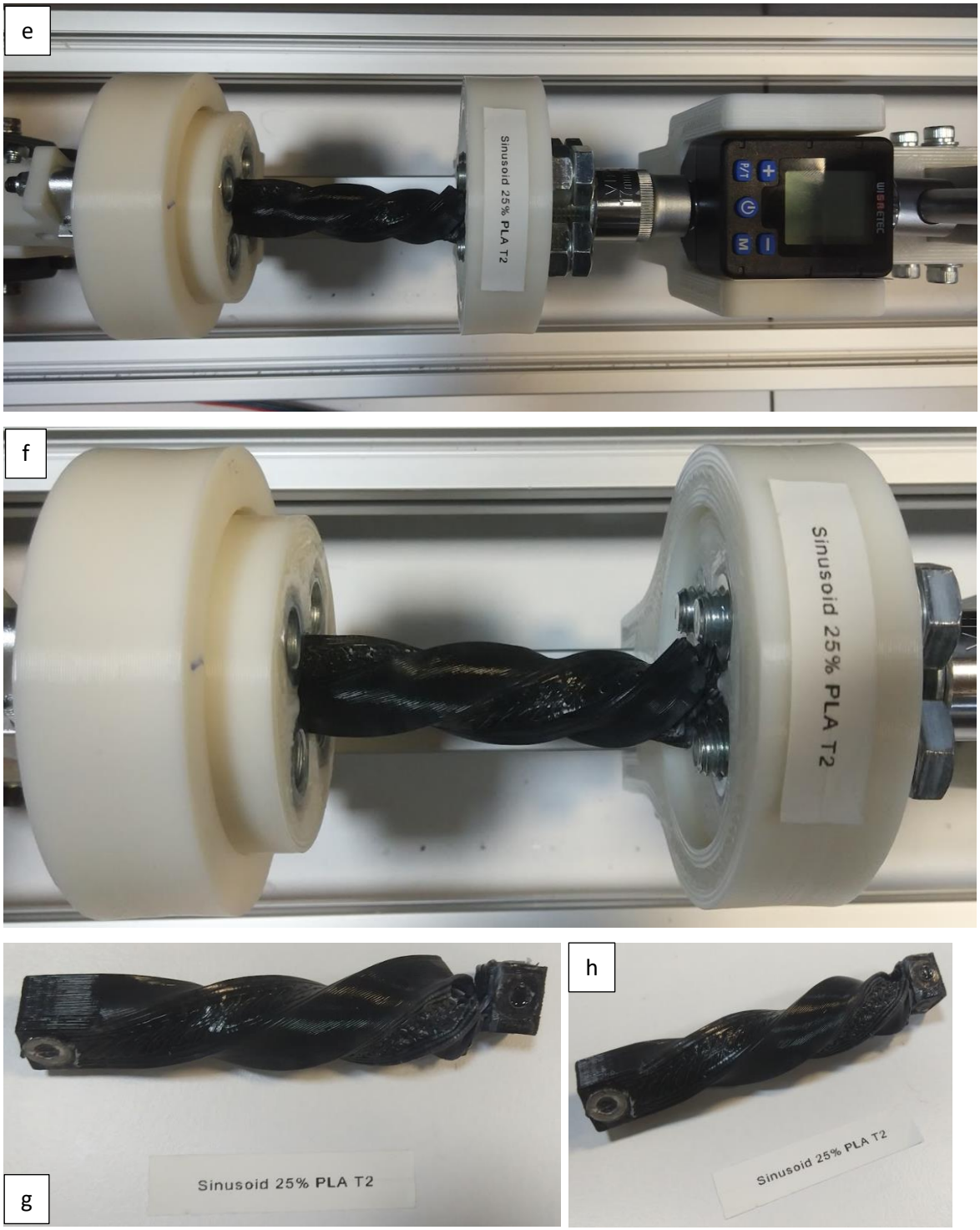
Resim 5.13. Sinusoid iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ilk test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü



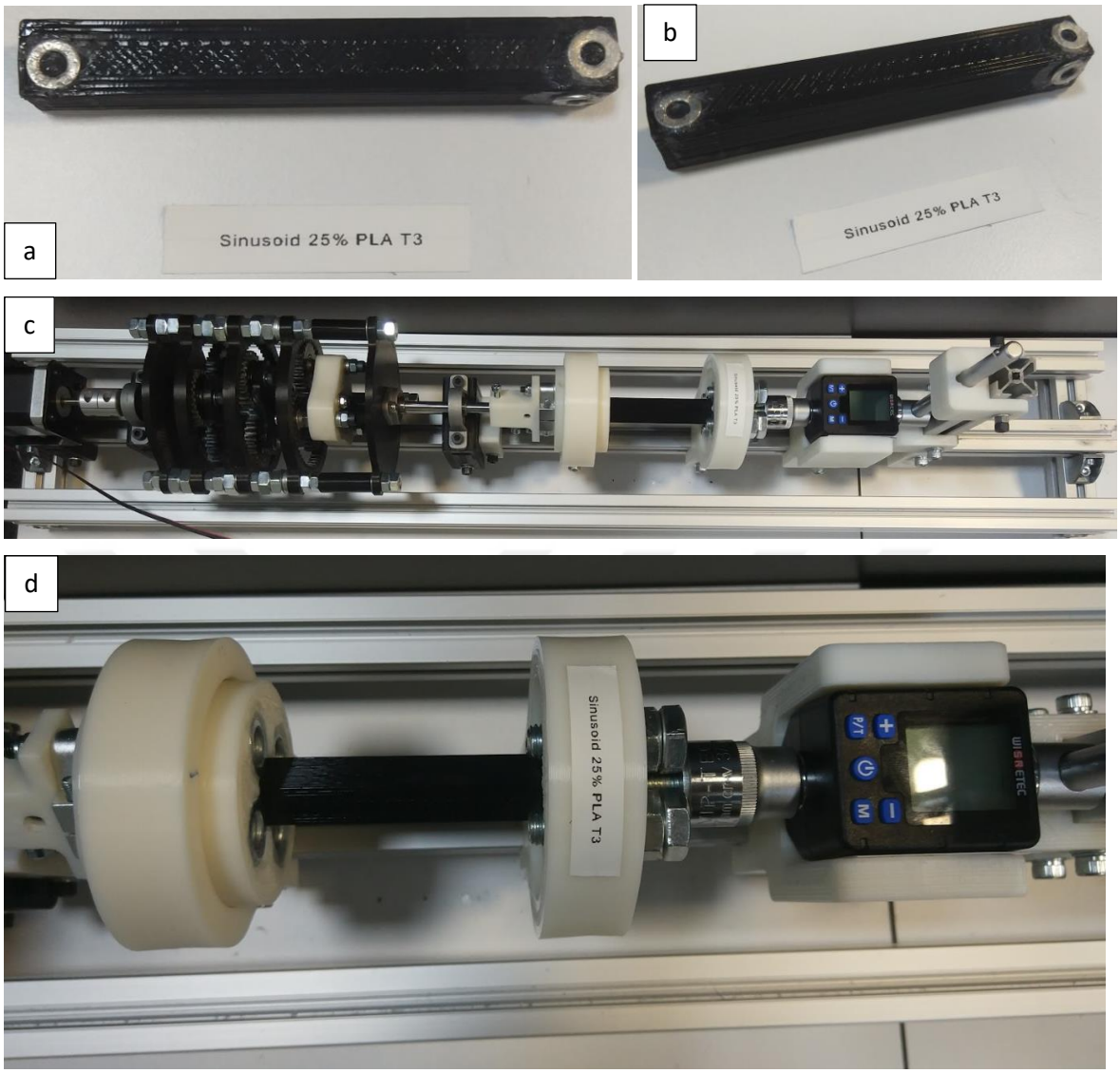
Resim 5.13. (devam) Sinusoid iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ilk test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü



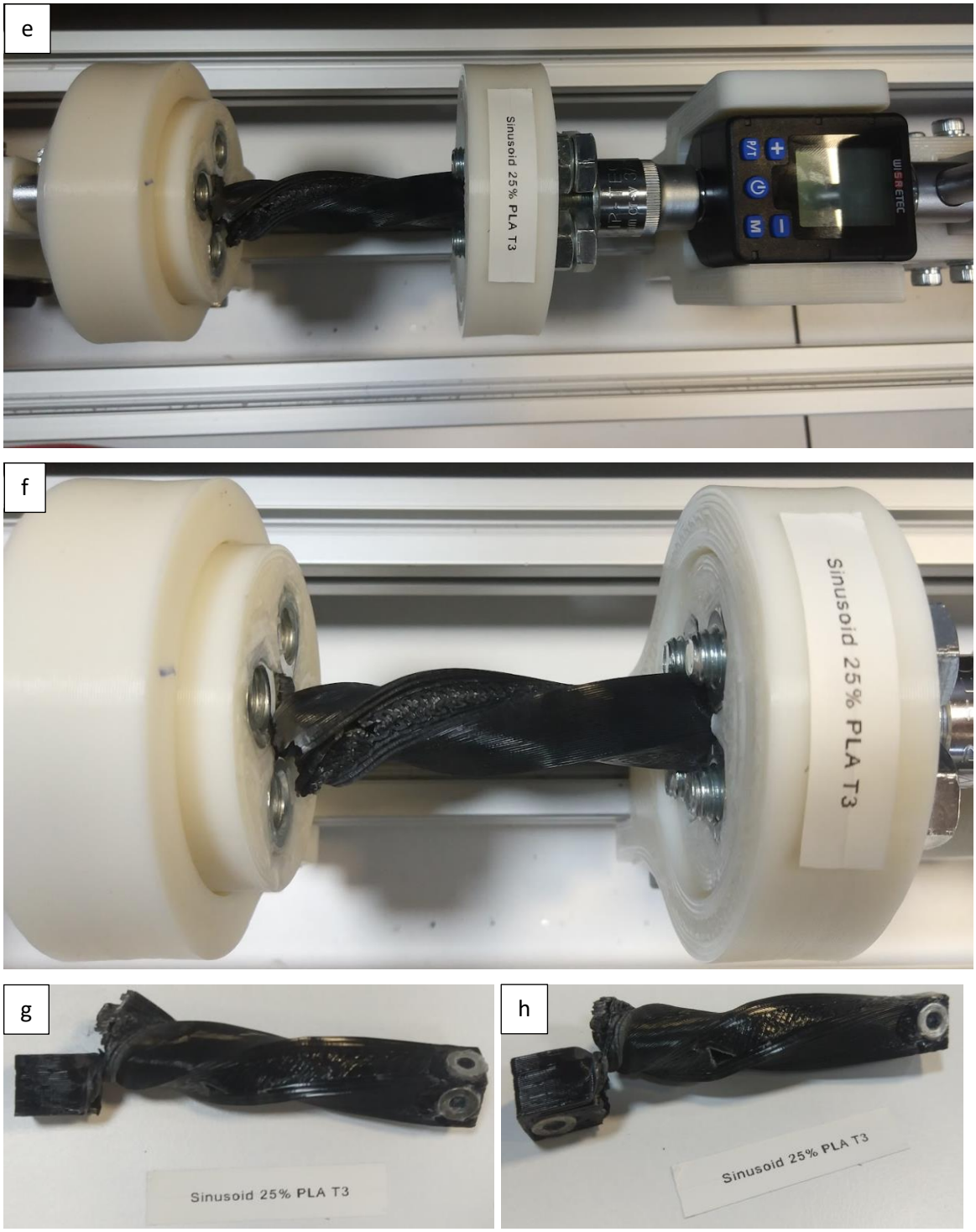
Resim 5.14. Sinusoid iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ikinci test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü



Resim 5.14. (devam) Sinusoid iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ikinci test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü

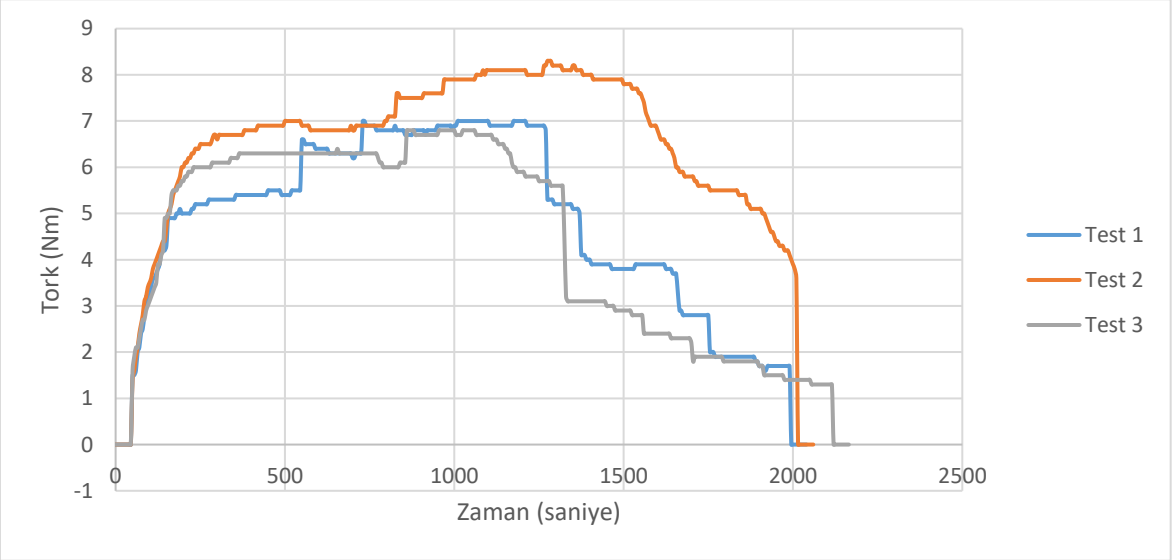


Resim 5.15. Sinusoid iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş üçüncü test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü



Resim 5.15. (devam) Sinusoid iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş üçüncü test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü

Şekil 5.5'te sinusoid iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında dayanımlarının tork-zaman değişim grafiği gösterilmiştir. Her 5 saniyede bir tork verisi alınmıştır. Grafik incelendiğinde parçaların 500-750. saniye aralığında dayanımlarının azaldığı, bu aralıktan sonra arttığı görülmektedir. Testler sırasında 750. saniyeye kadar iç doluluk desen yapısının bozulmadığı gözlemlenmiştir. Geri kalan sürede iç doluluk deseni parça içinde sıkışmış ve parça tam dolu hale gelmiştir. İç doluluk deseninin etkisi araştırıldığı için 750. saniyeye kadar olan aralıktaki veriler önem taşımaktadır ve değerlendirme için en yüksek tork değeri bu aralıktaki verilerden elde edilmiştir. Çizelge 5.5'te üç test parçalarının 0-750 saniye aralığındaki maksimum tork değeri ve bu değerlerin ortalaması yer almaktadır.



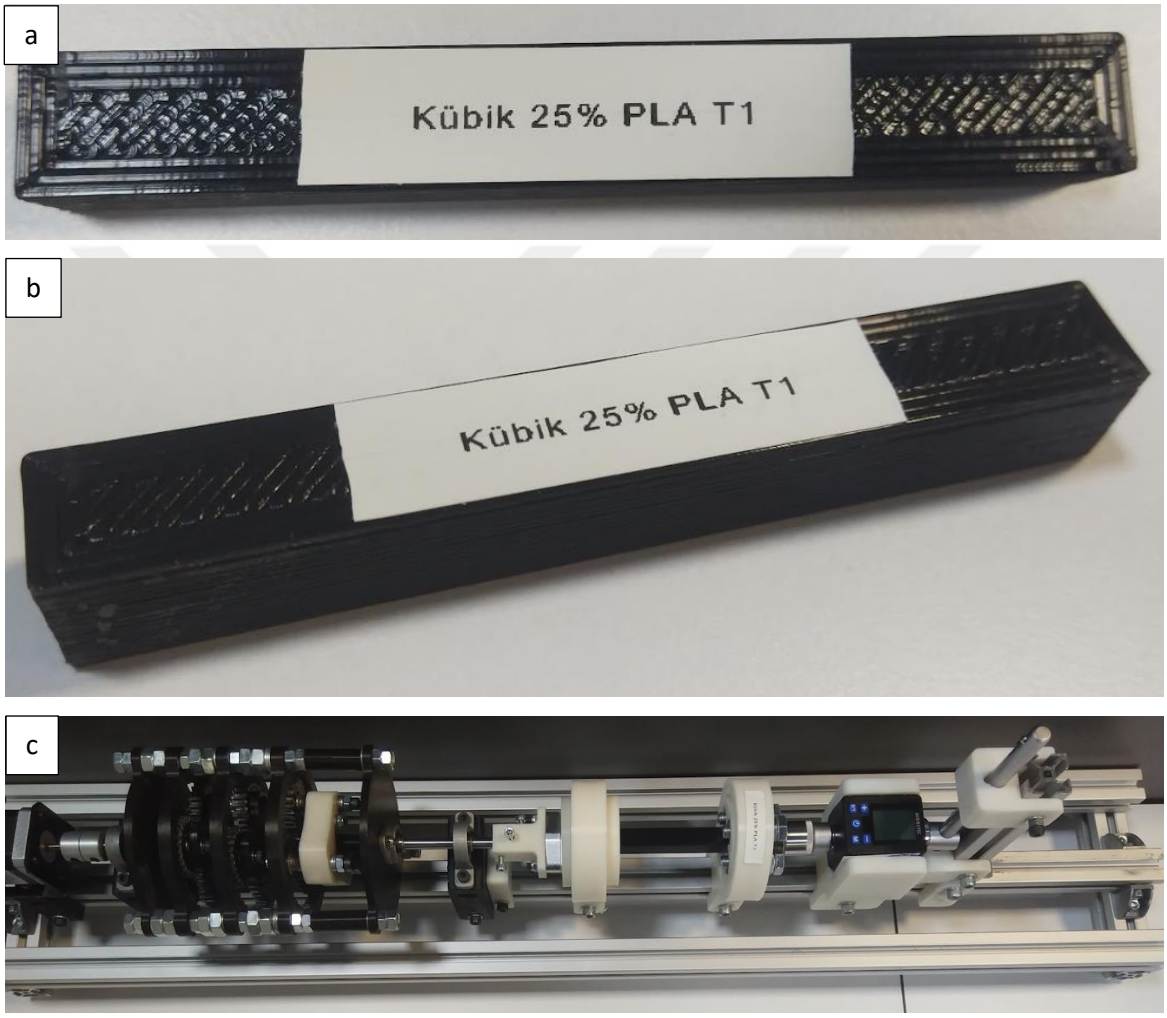
Şekil 5.5. Sinusoid iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında dayanımlarının tork-zaman değişim grafiği

Çizelge 5.5. Sinusoid iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında en yüksek tork dayanımları

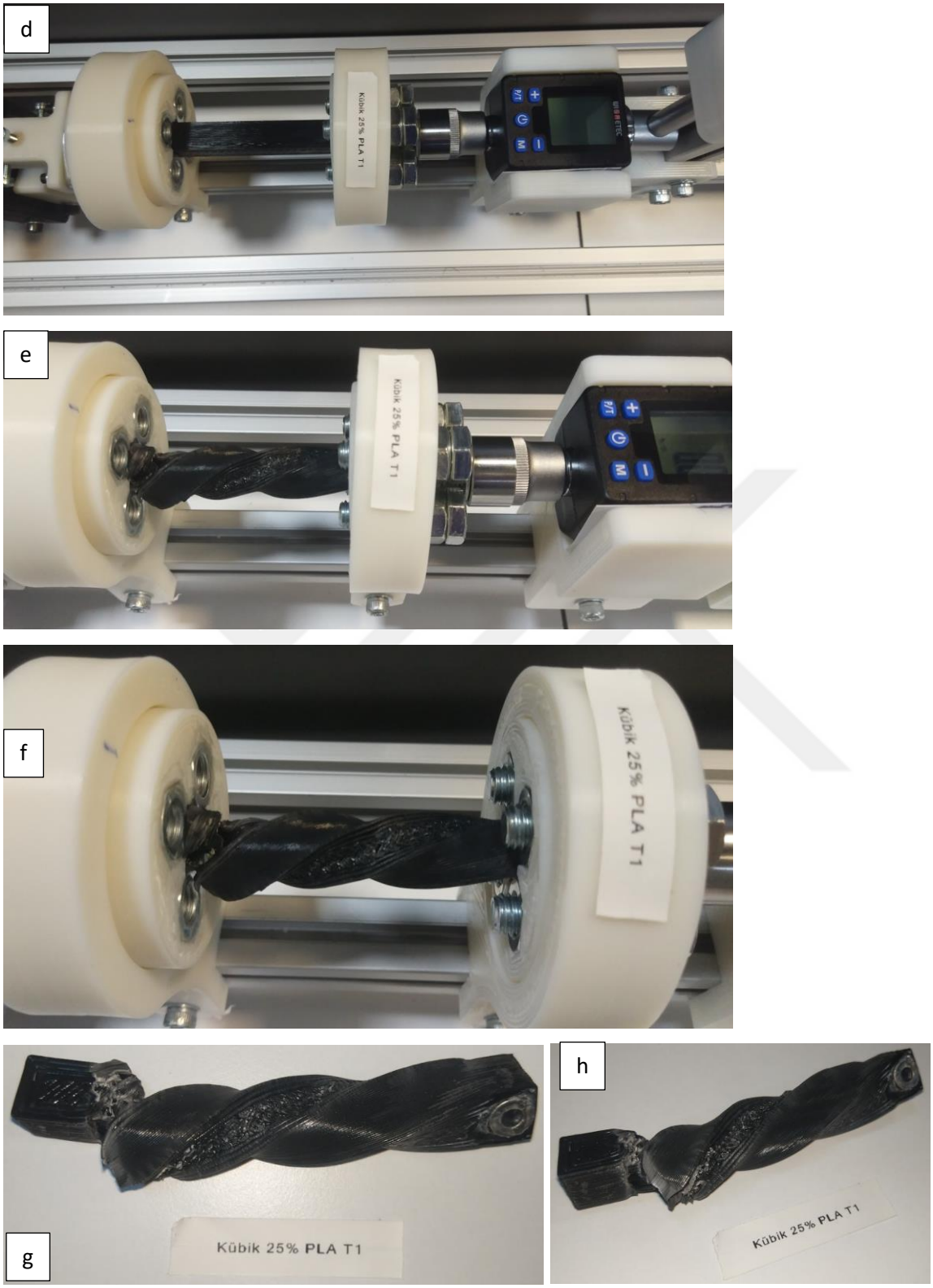
Tork	Nm
Test 1	5,5
Test 2	6,9
Test 3	6,3
Ortalama	6,23

Kübik iç doluluk deseninin burulma testi sonuçları

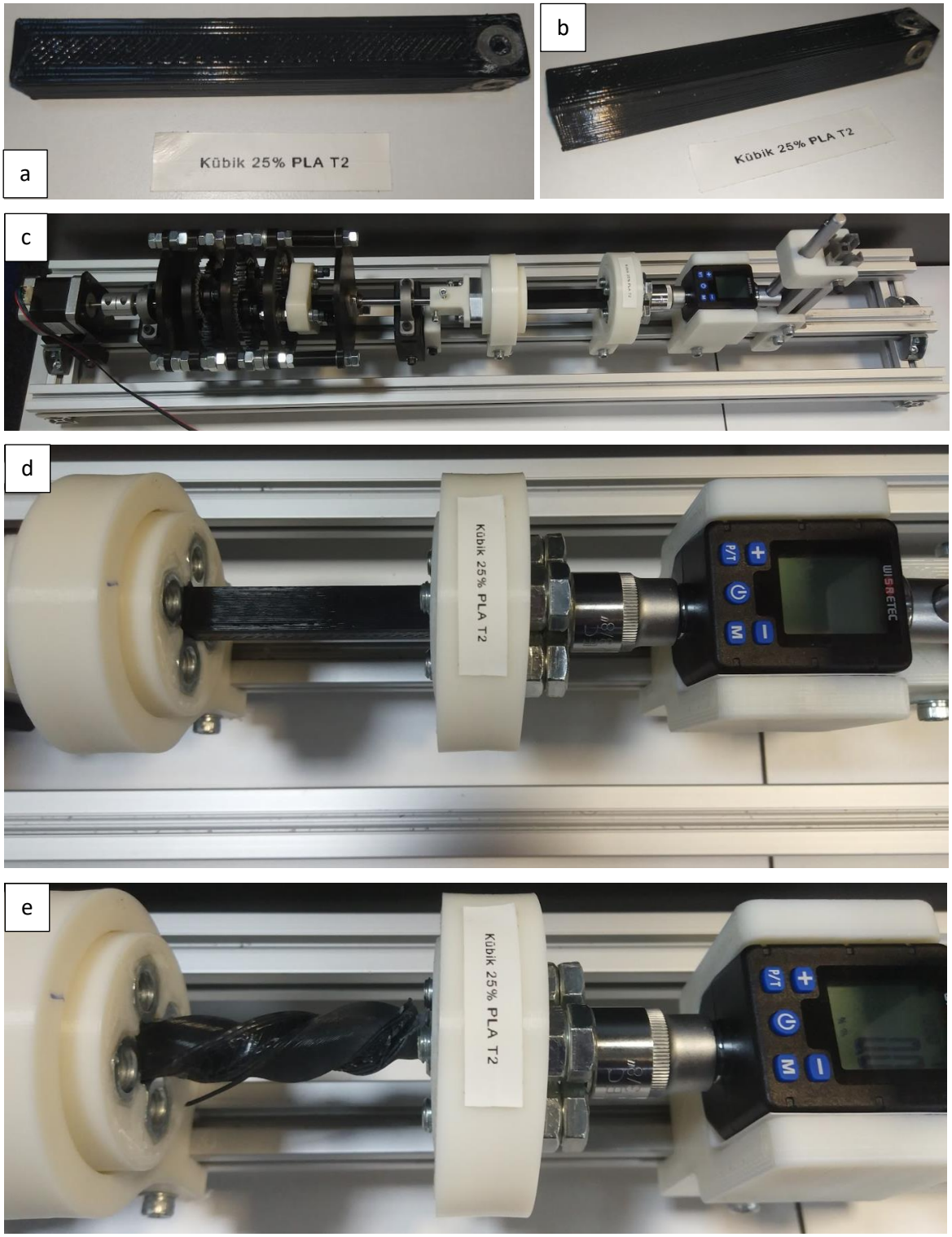
Kübik iç doluluk geometrisiyle %25 dolulukla ESUN PLA+ malzemeden üretilen 3 test parçasına burulma testi yapılmıştır. Resim 5.16'da ilk test parçasının, Resim 5.17'de ikinci test parçasının, Resim 5.18'de üçüncü test parçasının burulma testi prosedürü gösterilmiştir.



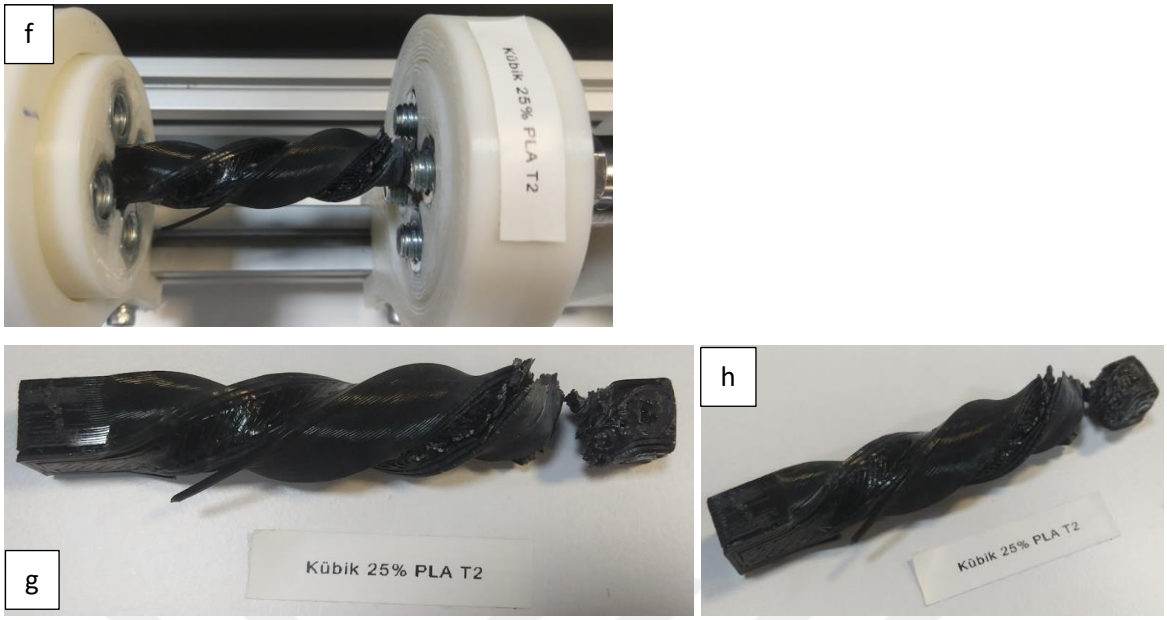
Resim 5.16. Kübik iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ilk test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü



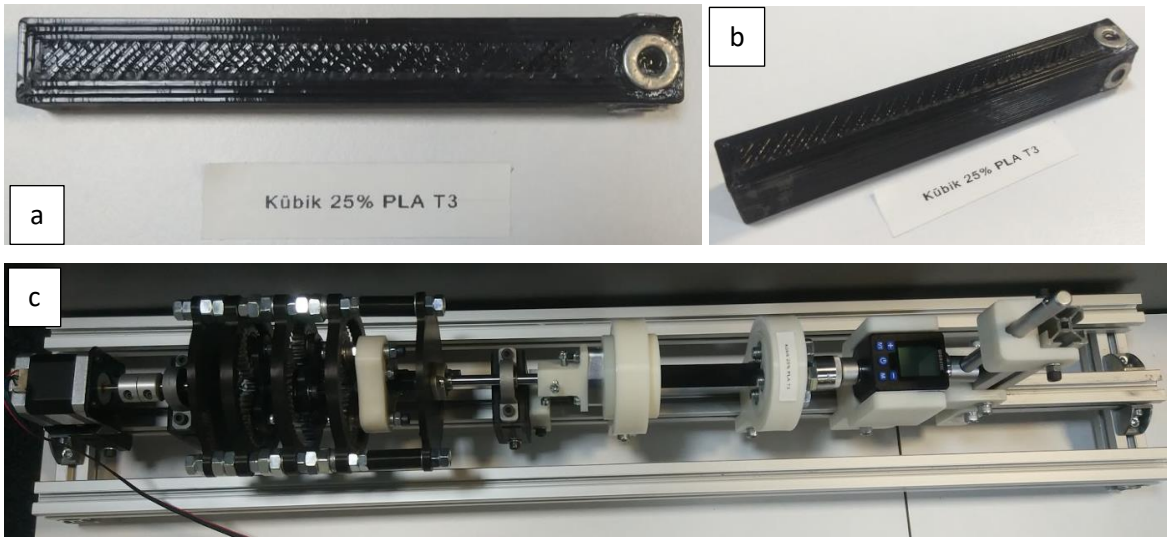
Resim 5.16. (devam) Kübik iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ilk test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü



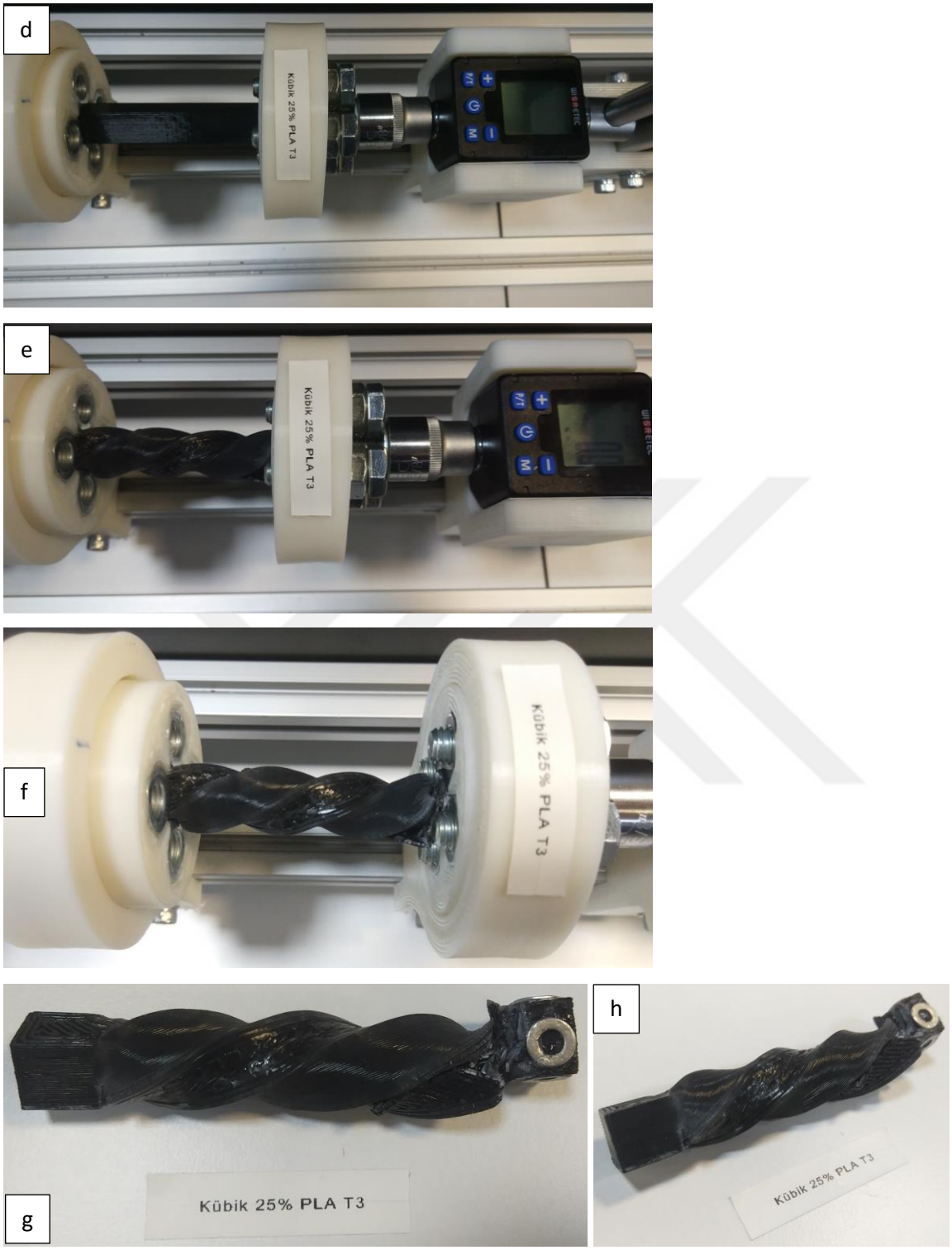
Resim 5.17. Kübik iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ikinci test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü



Resim 5.17. (devam) Kübik iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ikinci test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü

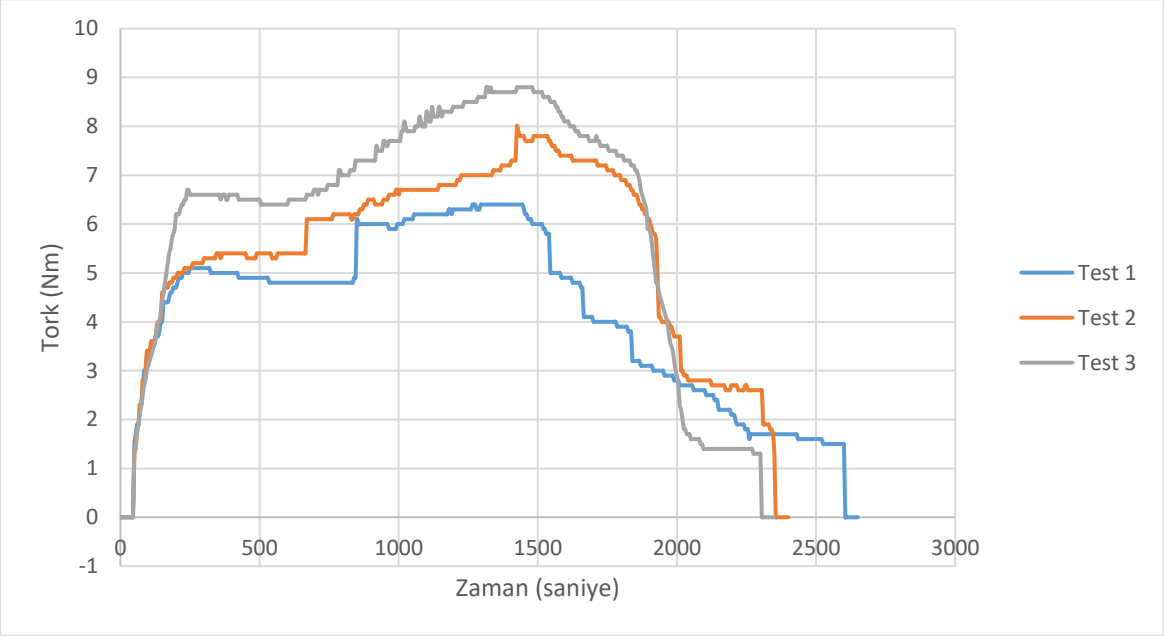


Resim 5.18. Kübik iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş üçüncü test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü



Resim 5.18. (devam) Kübik iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş üçüncü test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü

Şekil 5.6'da kübik iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında dayanımlarının tork-zaman değişim grafiği gösterilmiştir. Her 5 saniyede bir tork verisi alınmıştır. Grafik incelendiğinde parçaların 250-500. saniye aralığında dayanımlarının azaldığı, bu aralıktan sonra arttığı görülmektedir. Testler sırasında 500. saniyeye kadar iç doluluk desen yapısının bozulmadığı gözlemlenmiştir. Geri kalan sürede iç doluluk deseni parça içinde sıkışmış ve parça tam dolu hale gelmiştir. İç doluluk deseninin etkisi araştırıldığı için 500. saniyeye kadar olan aralıktaki veriler önem taşımaktadır ve değerlendirme için en yüksek tork değeri bu aralıktaki verilerden elde edilmiştir. Çizelge 5.6'da üç test parçalarının 0-500 saniye aralığındaki maksimum tork değeri ve bu değerlerin ortalaması yer almaktadır.



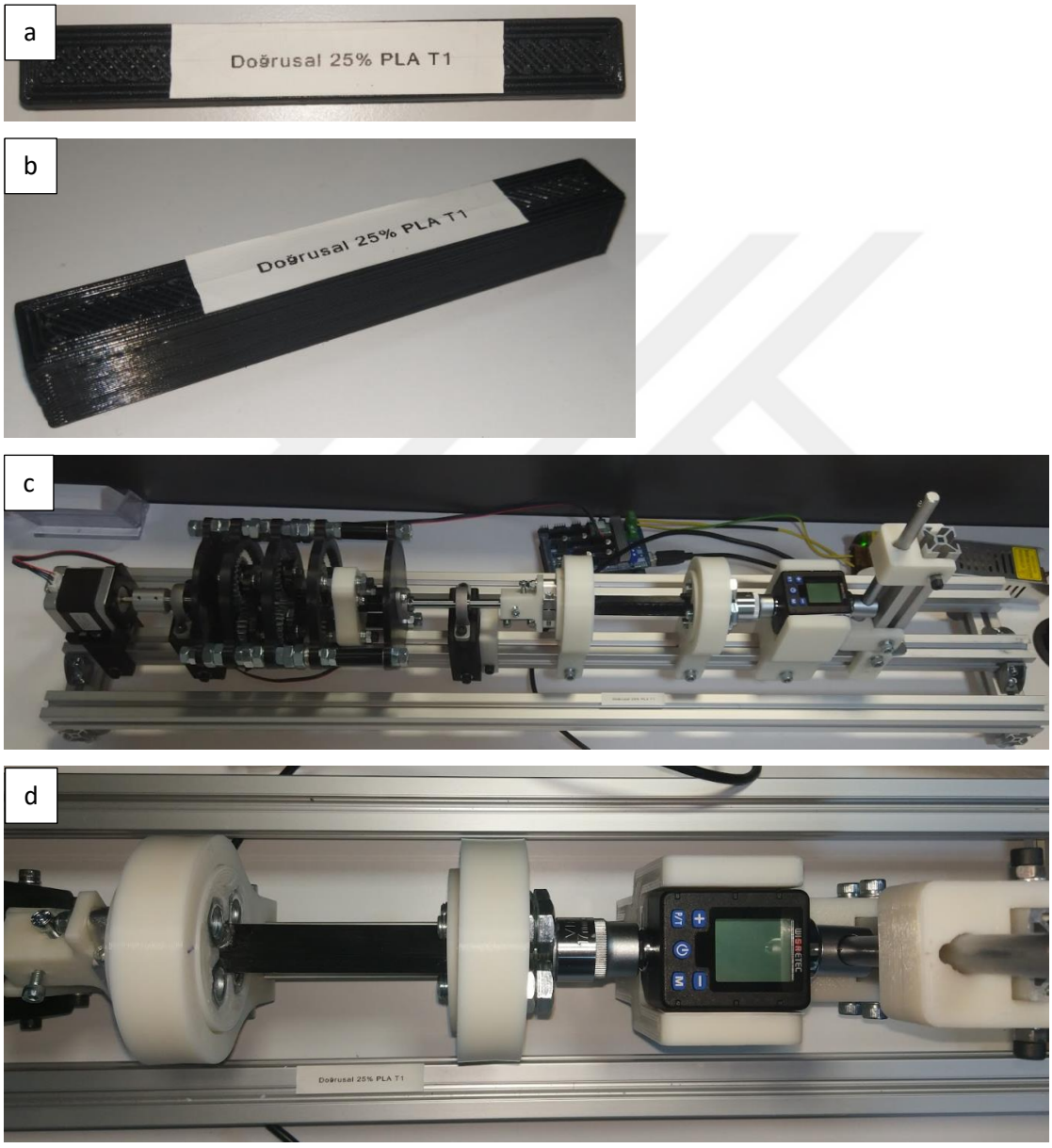
Şekil 5.6. Kübik iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında dayanımlarının tork-zaman değişim grafiği

Çizelge 5.6. Kübik iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında en yüksek tork dayanımları

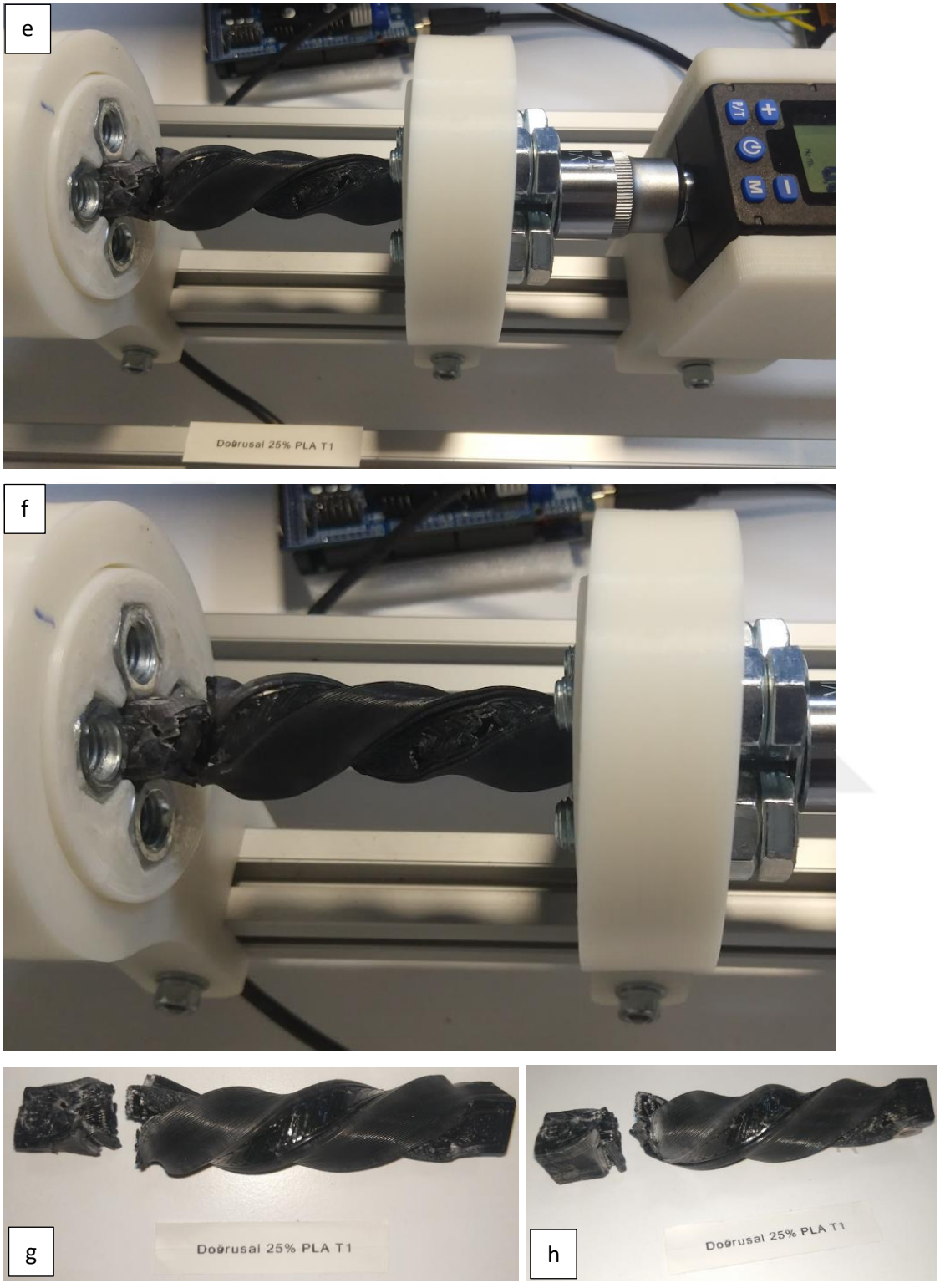
Tork	Nm
Test 1	5,1
Test 2	5,4
Test 3	6,7
Ortalama	5,73

Doğrusal iç doluluk deseninin burulma testi sonuçları

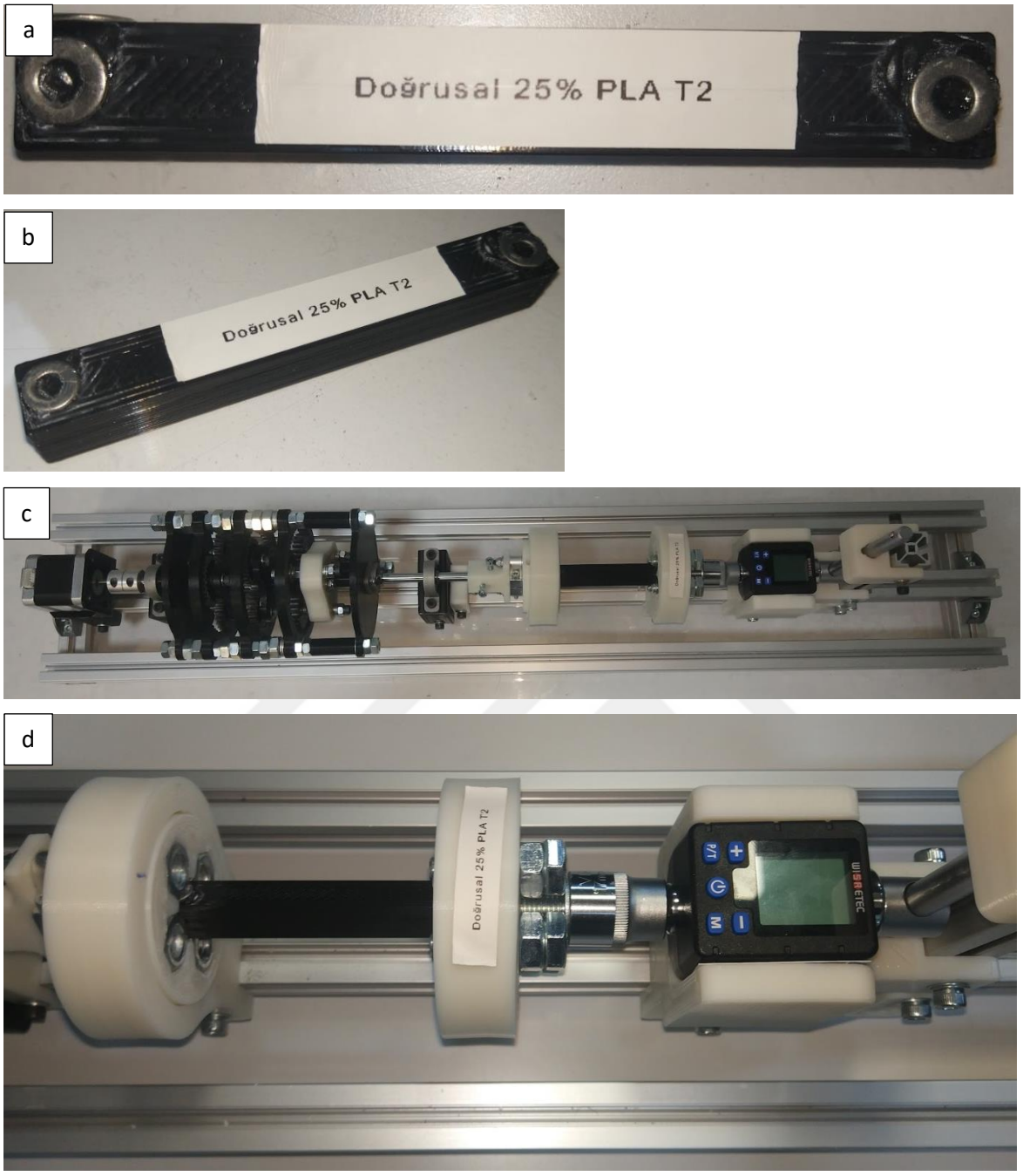
Doğrusal iç doluluk geometrisiyle %25 dolulukla ESUN PLA+ malzemeden üretilen 3 test parçasına burulma testi yapılmıştır. Resim 5.19'da ilk test parçasının, Resim 5.20'de ikinci test parçasının, Resim 5.21'de üçüncü test parçasının burulma testi prosedürü gösterilmiştir.



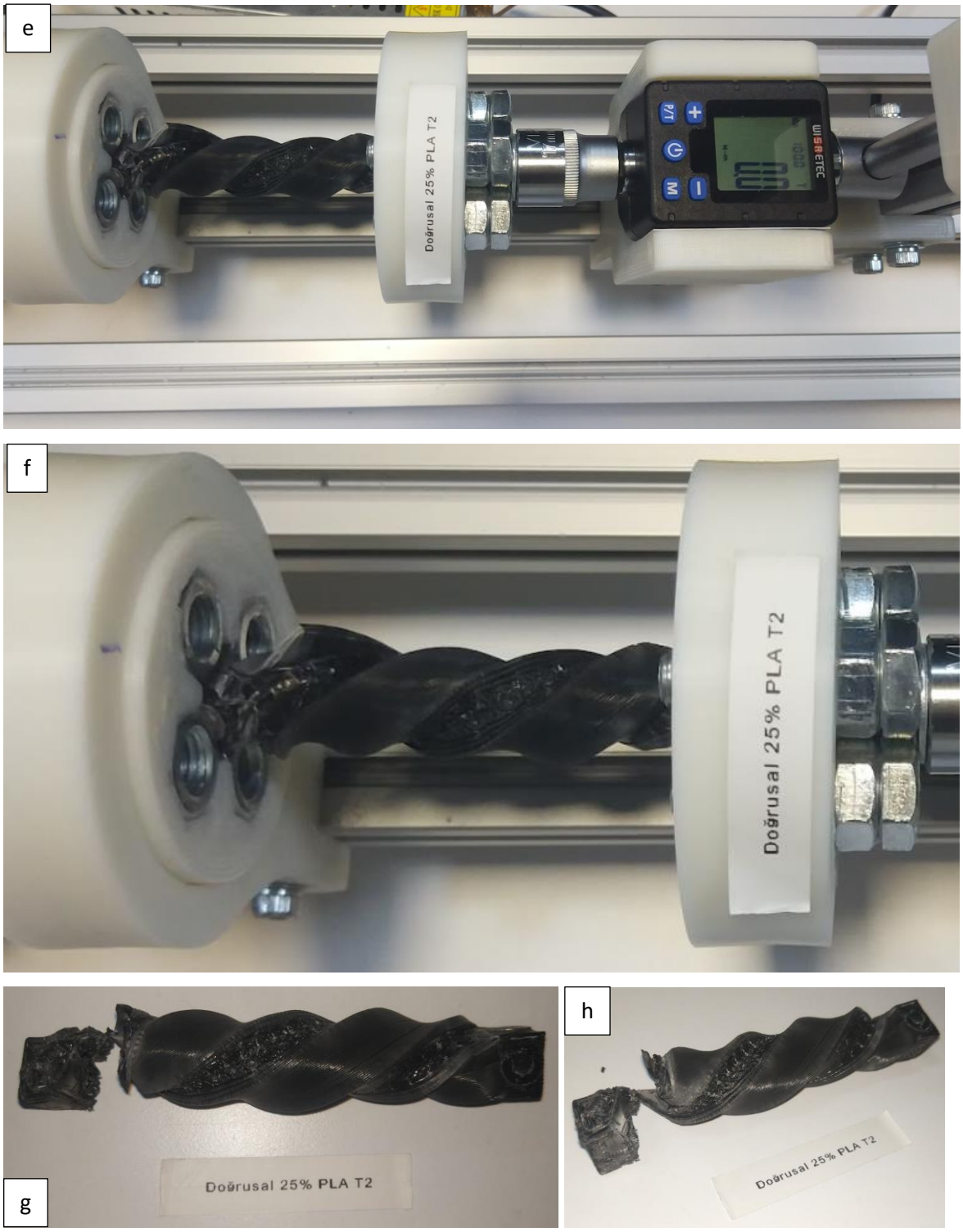
Resim 5.19. Doğrusal iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ilk test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü



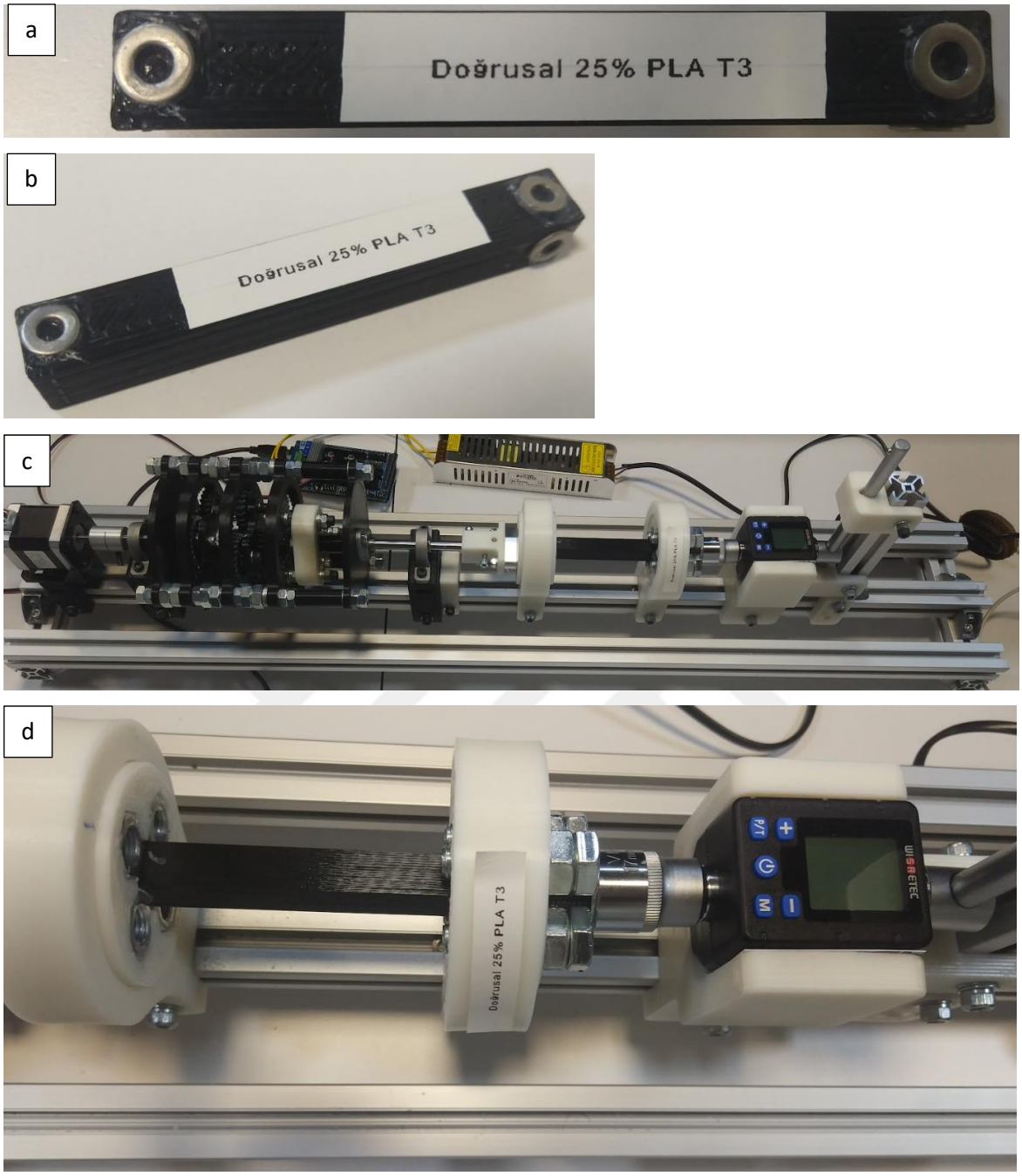
Resim 5.19. (devam) Doğrusal iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ilk test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü



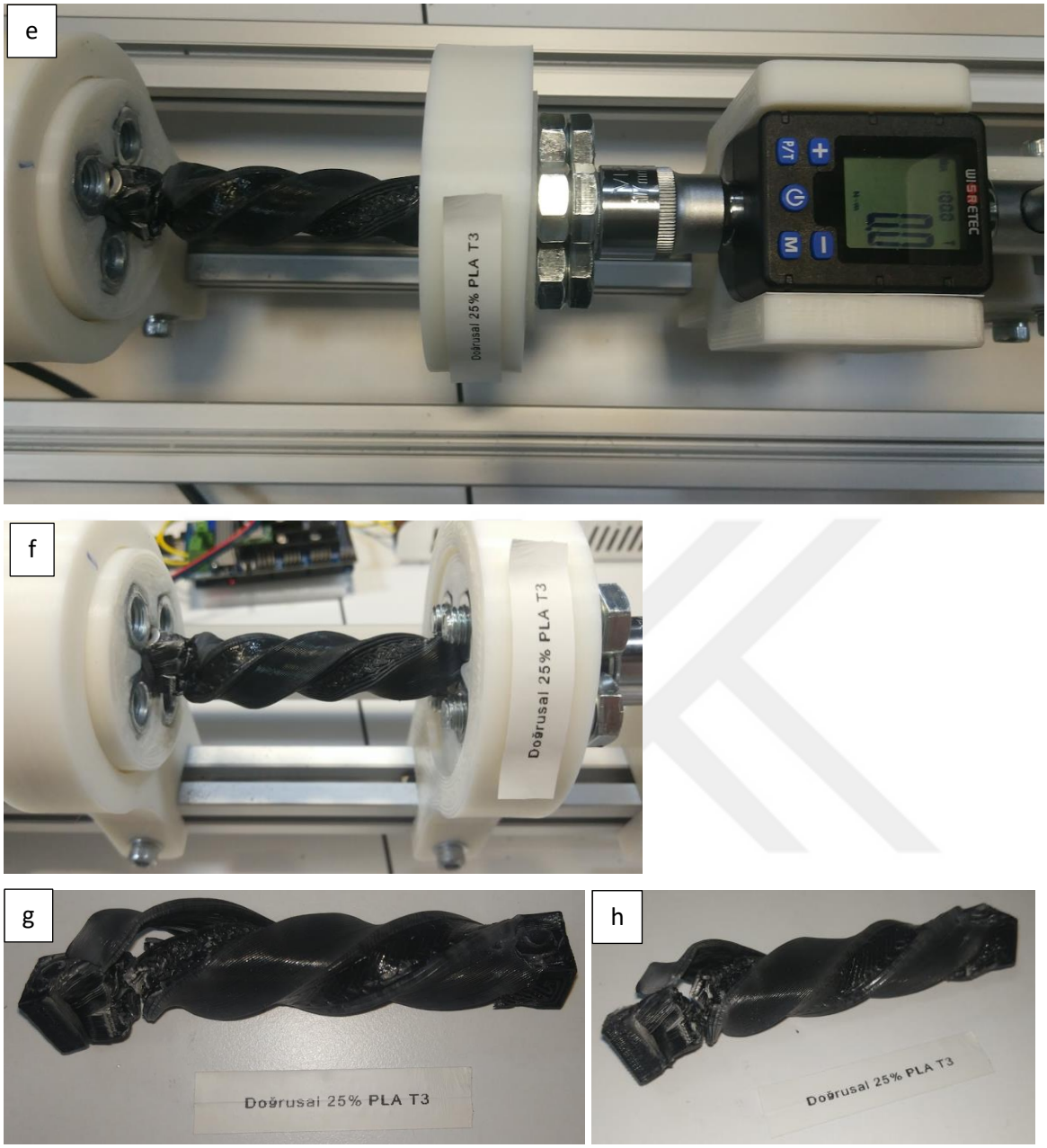
Resim 5.20. Doğrusal iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ikinci test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü



Resim 5.20. (devam) Doğrusal iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ikinci test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü



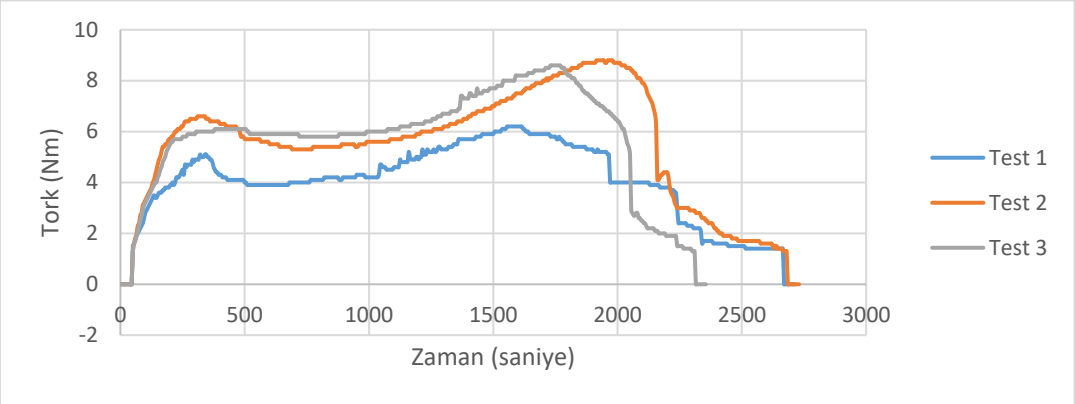
Resim 5.21. Doğrusal iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş üçüncü test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü



Resim 5.21. (devam) Doğrusal iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş üçüncü test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü

Şekil 5.7'de doğrusal iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında dayanımlarının tork-zaman değişim grafiği gösterilmiştir. Her 5 saniyede bir tork verisi alınmıştır. Grafik incelendiğinde parçaların 750-1000. saniye aralığında dayanımlarının azaldığı, bu aralıktan sonra arttığı

görülmektedir. Testler sırasında 1000. saniyeye kadar iç doluluk desen yapısının bozulmadığı gözlemlenmiştir. Geri kalan sürede iç doluluk deseni parça içinde sıkışmış ve parça tam dolu hale gelmiştir. İç doluluk deseninin etkisi araştırıldığı için 1000. saniyeye kadar olan aralıktaki veriler önem taşımaktadır ve değerlendirme için en yüksek tork değeri bu aralıktaki verilerden elde edilmiştir. Çizelge 5.7'de üç test parçalarının 0-1000 saniye aralığındaki maksimum tork değeri ve bu değerlerin ortalaması yer almaktadır.



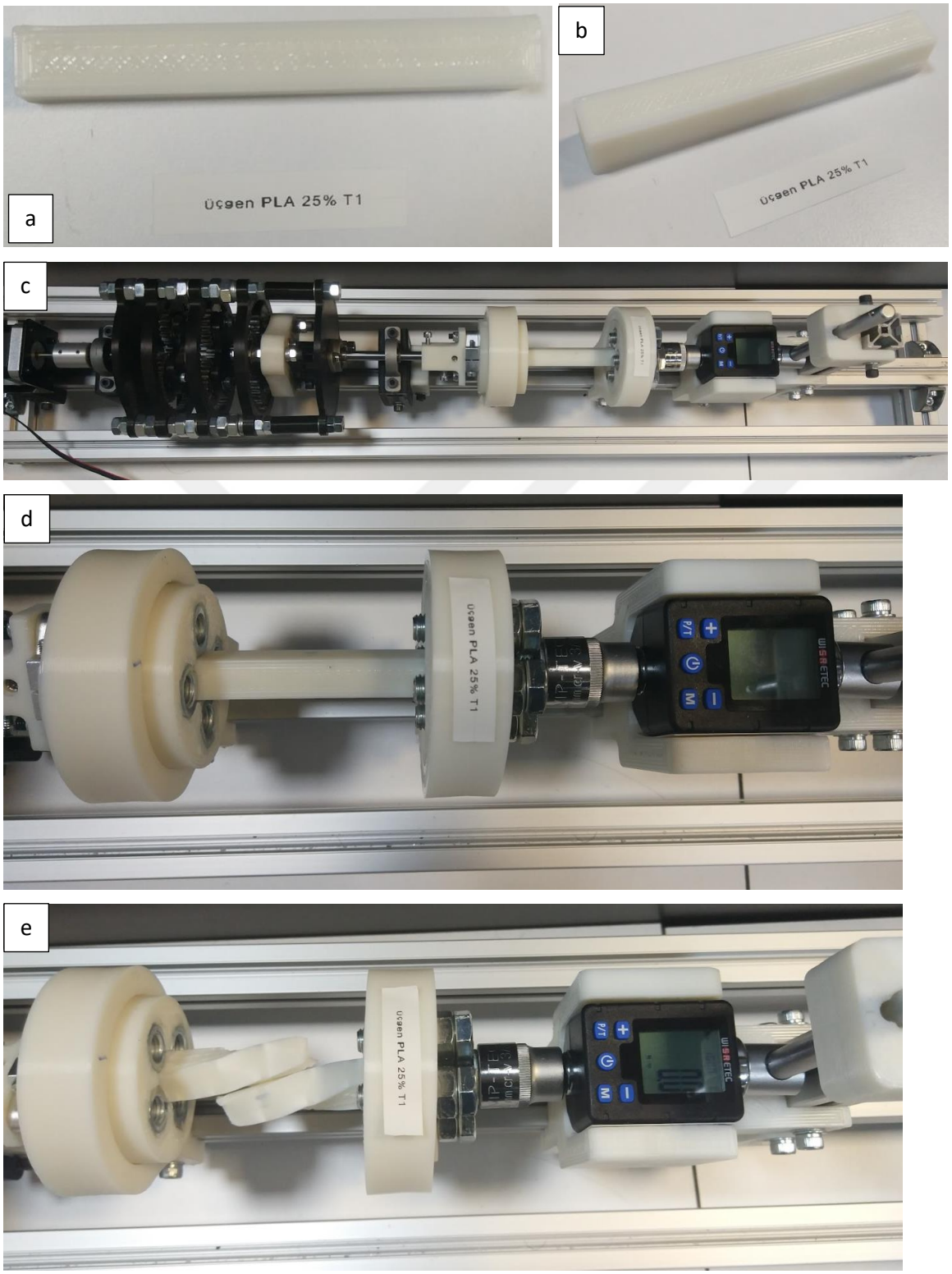
Şekil 5.7. Doğrusal iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında dayanımlarının tork-zaman değişim grafiği

Çizelge 5.7. Doğrusal iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında en yüksek tork dayanımları

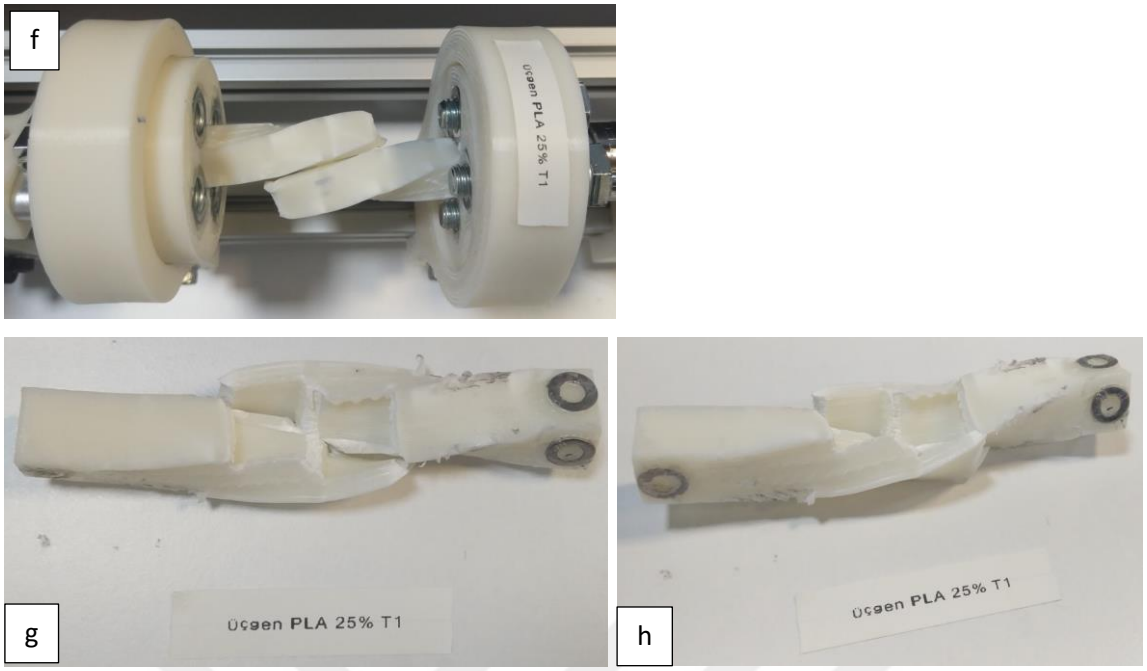
Tork	Nm
Test 1	5,1
Test 2	6,6
Test 3	6,1
Ortalama	5,93

Üçgen iç doluluk deseninin burulma testi sonuçları

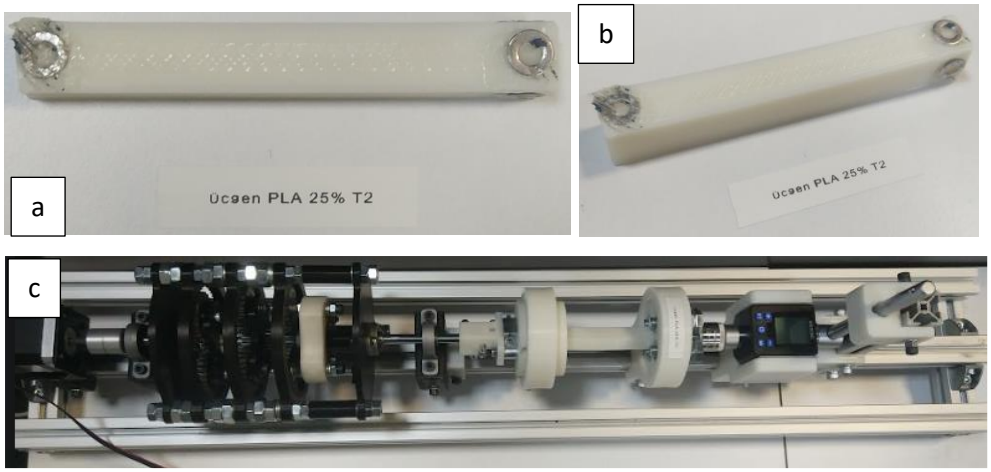
Üçgen iç doluluk geometrisiyle %25 dolulukla ESUN PLA+ malzemeden üretilen 3 test parçasına burulma testi yapılmıştır. Resim 5.22'de ilk test parçasının, Resim 5.23'te ikinci test parçasının, Resim 5.24'te üçüncü test parçasının burulma testi prosedürü gösterilmiştir.



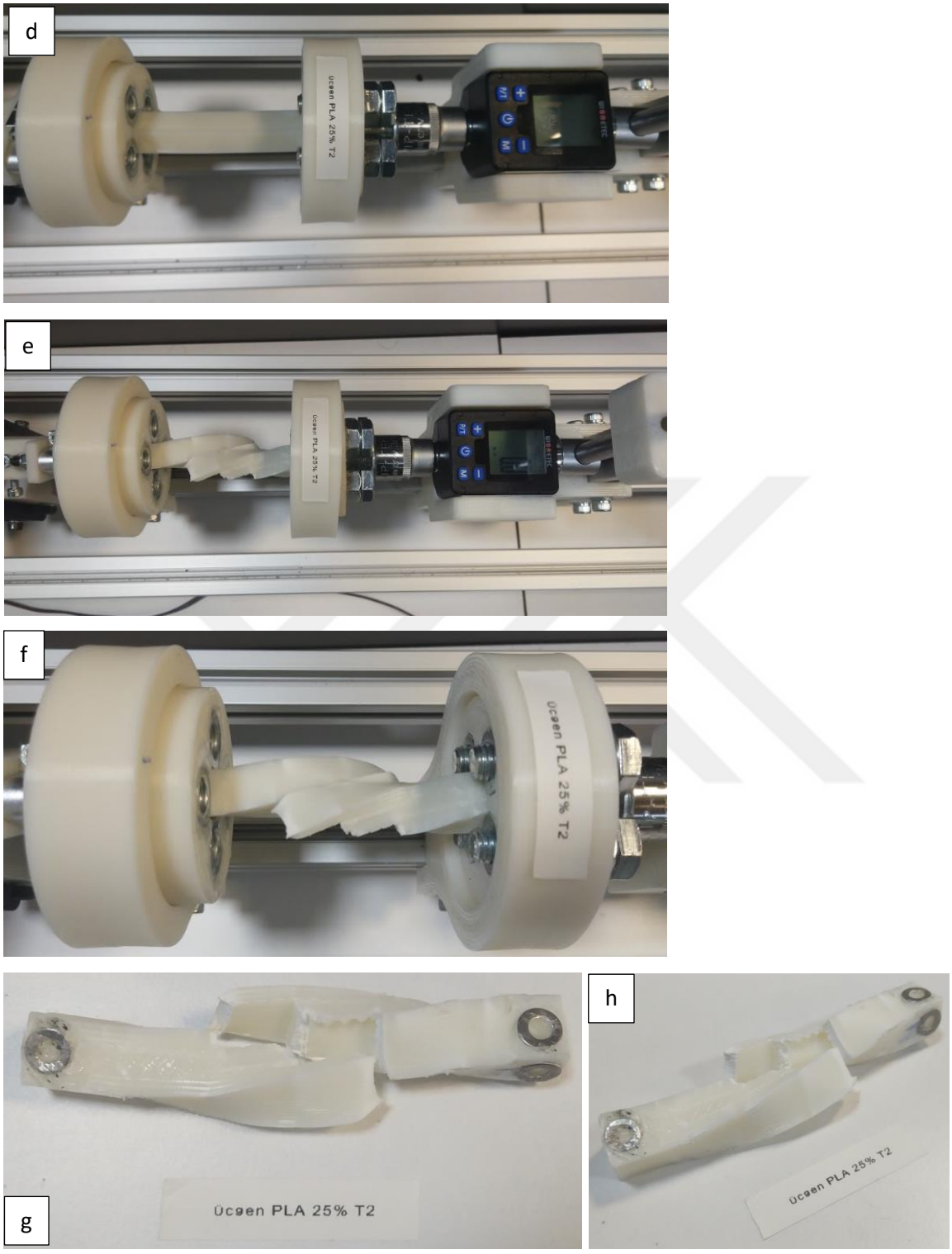
Resim 5.22. Üçgen iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ilk test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü



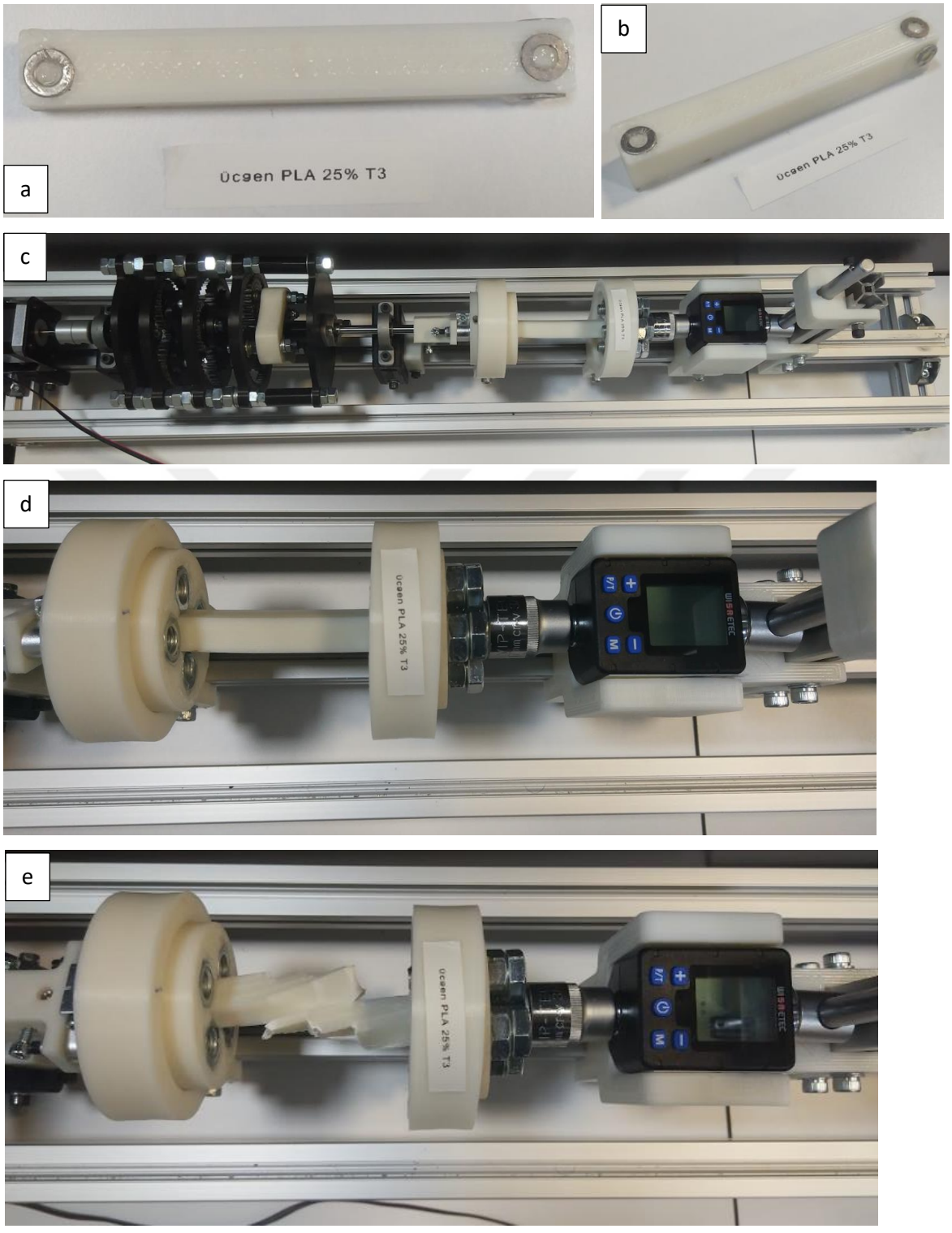
Resim 5.22. (devam) Üçgen iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ilk test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü



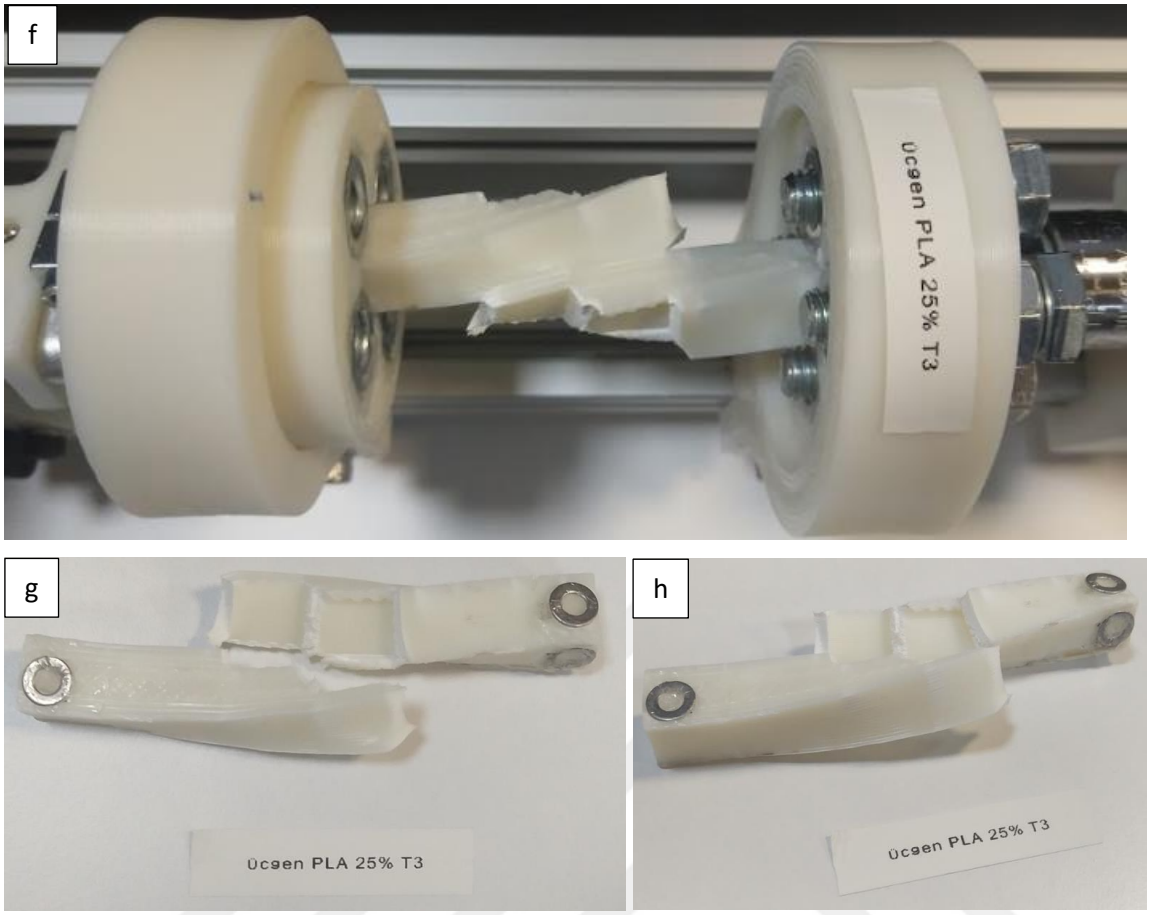
Resim 5.23. Üçgen iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ikinci test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; d. Testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü



Resim 5.23. (devam) Üçgen iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ikinci test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; d. Testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü



Resim 5.24. Üçgen iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş üçüncü test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü

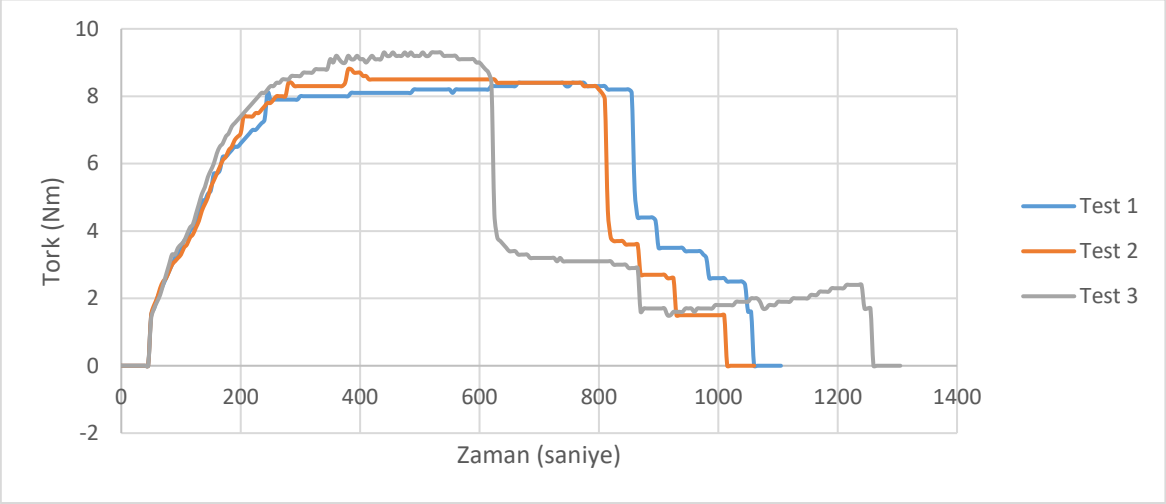


Resim 5.24. (devam) Üçgen iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş üçüncü test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü

Şekil 5.8'de üçgen iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında dayanımlarının tork-zaman değişim grafiği gösterilmiştir. Her 5 saniyede bir tork verisi alınmıştır. Grafik incelendiğinde parçaların 600-800. saniye aralığında dayanımlarının azaldığı, bu aralıktan sonra arttığı görülmektedir. Testler sırasında 800. saniyeye kadar iç doluluk desen yapısının bozulmadığı gözlemlenmiştir. Geri kalan sürede iç doluluk deseni parça içinde sıkışmış ve parça tam dolu hale gelmiştir. İç doluluk deseninin etkisi araştırıldığı için 800. saniyeye kadar olan aralıktaki veriler önem taşımaktadır ve değerlendirme için en yüksek tork değeri bu aralıktaki verilerden elde edilmiştir. Çizelge 5.8'de üç test parçalarının 0-800 saniye aralığındaki maksimum tork değeri ve bu değerlerin ortalaması yer almaktadır.

Çizelge 5.8. Üçgen iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında en yüksek tork dayanımları

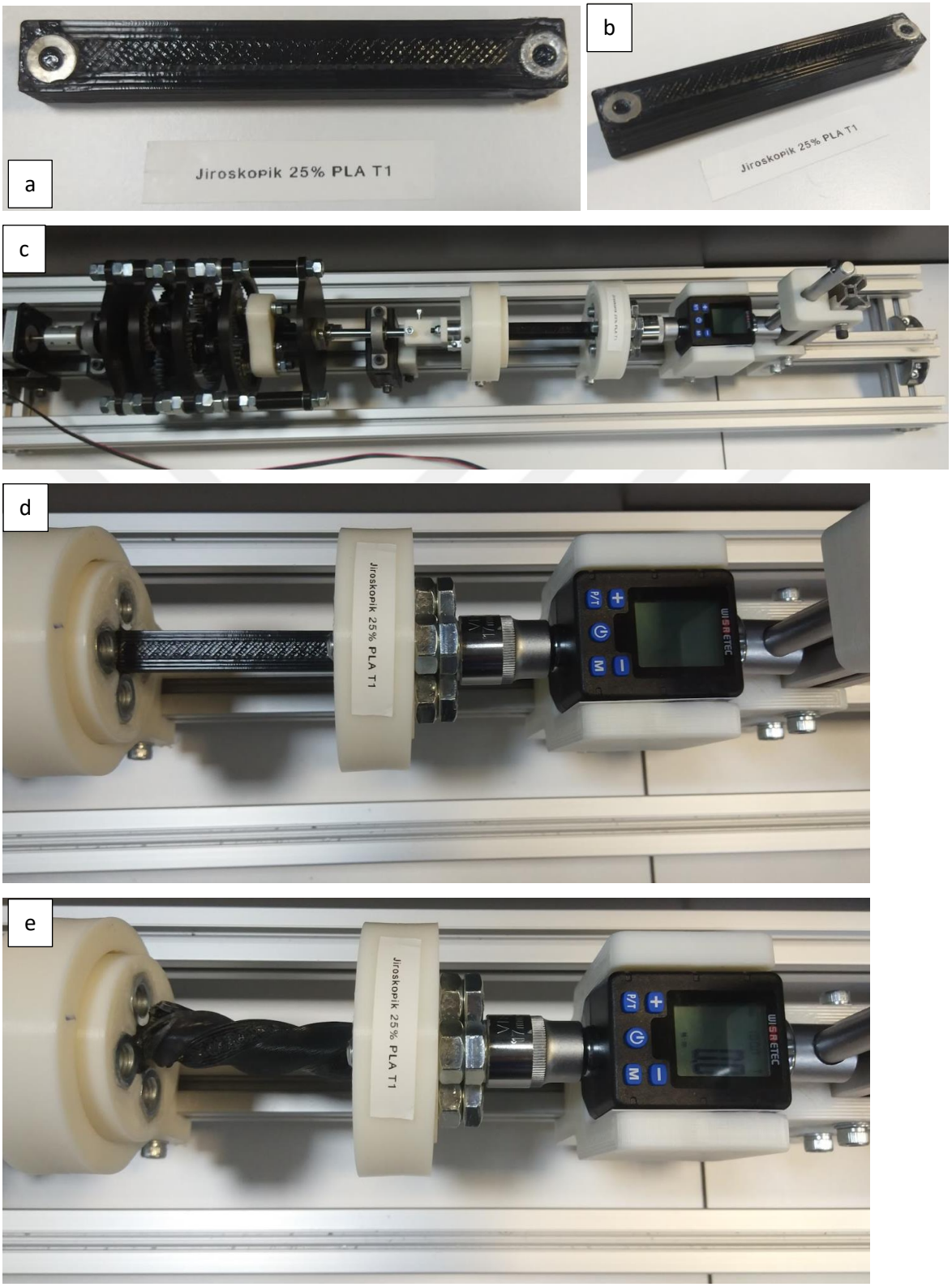
Tork	Nm
Test 1	8,4
Test 2	8,8
Test 3	9,3
Ortalama	8,83



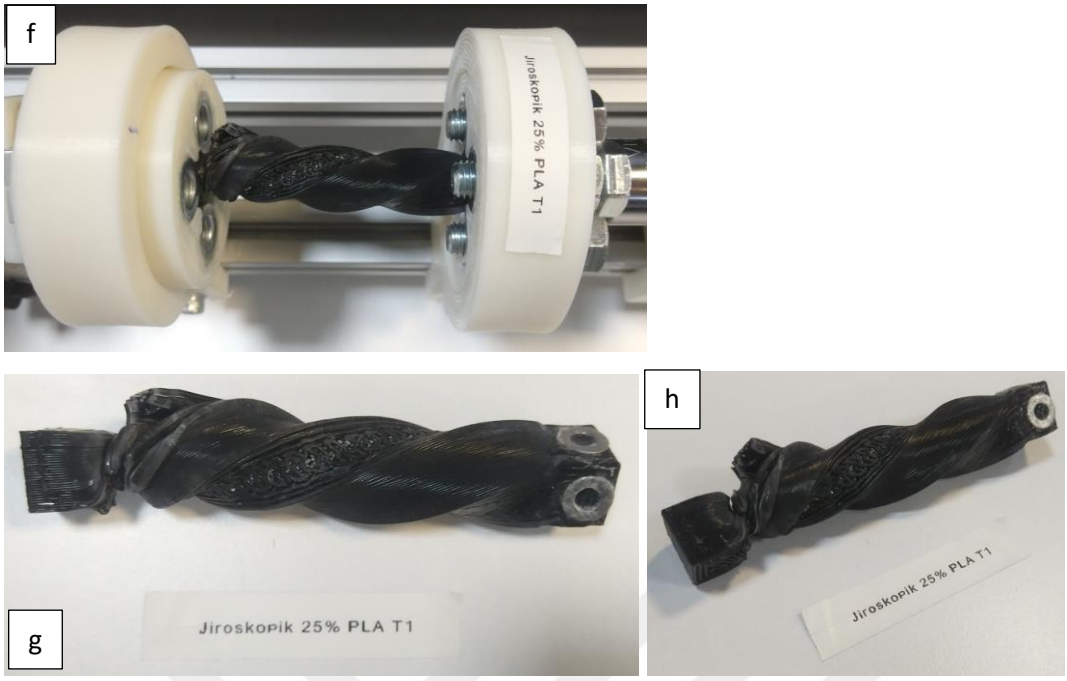
Şekil 5.8. Üçgen iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında dayanımlarının tork-zaman değişim grafiği

Jiroskopik iç doluluk deseninin burulma testi sonuçları

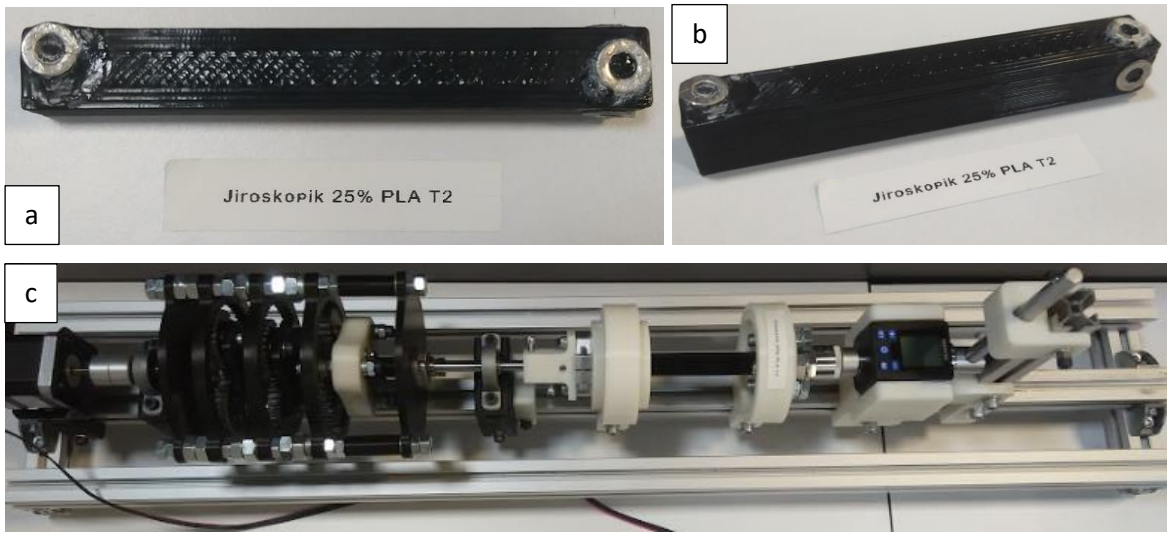
Jiroskopik iç doluluk geometrisiyle %25 dolulukla ESUN PLA+ malzemeden üretilen 3 test parçasına burulma testi yapılmıştır. Resim 5.25'te ilk test parçasının, Resim 5.26'da ikinci test parçasının, Resim 5.27'de üçüncü test parçasının burulma testi prosedürü gösterilmiştir.



Resim 5.25. Jiroskopik iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ilk test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü

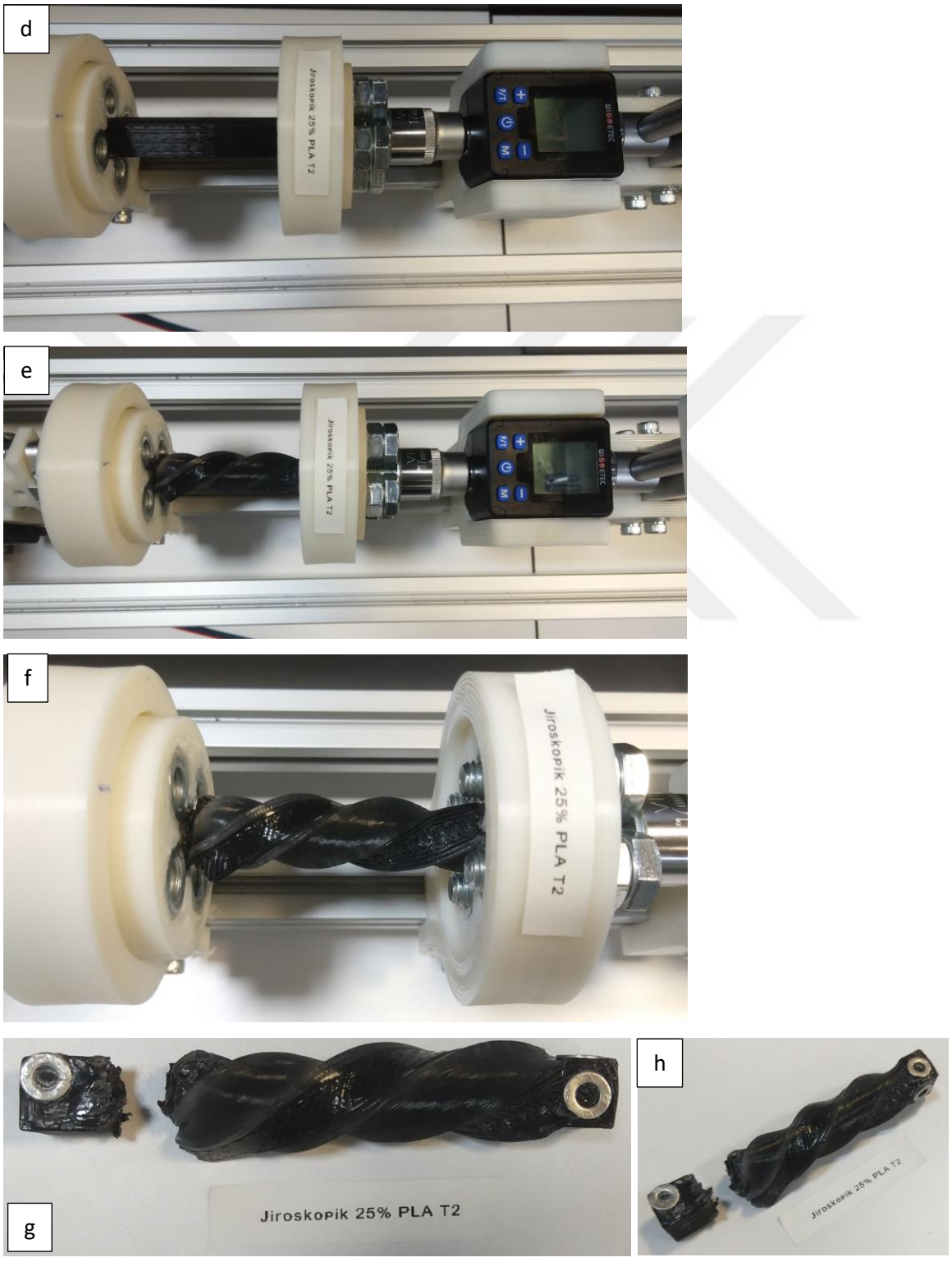


Resim 5.25. (devam) Jiroskopik iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ilk test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü



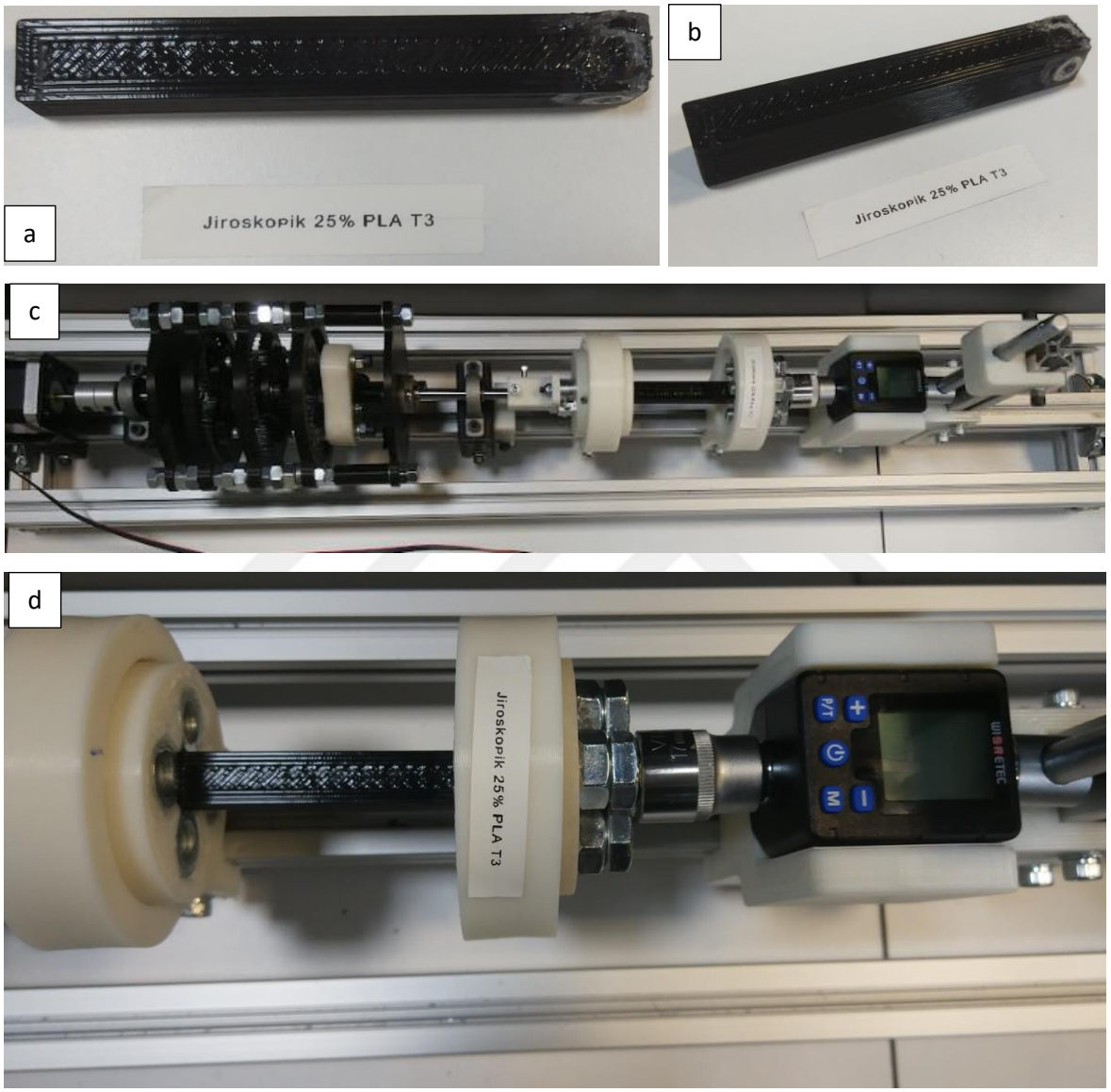
Resim 5.26. Jiroskopik iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ikinci test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın

üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü

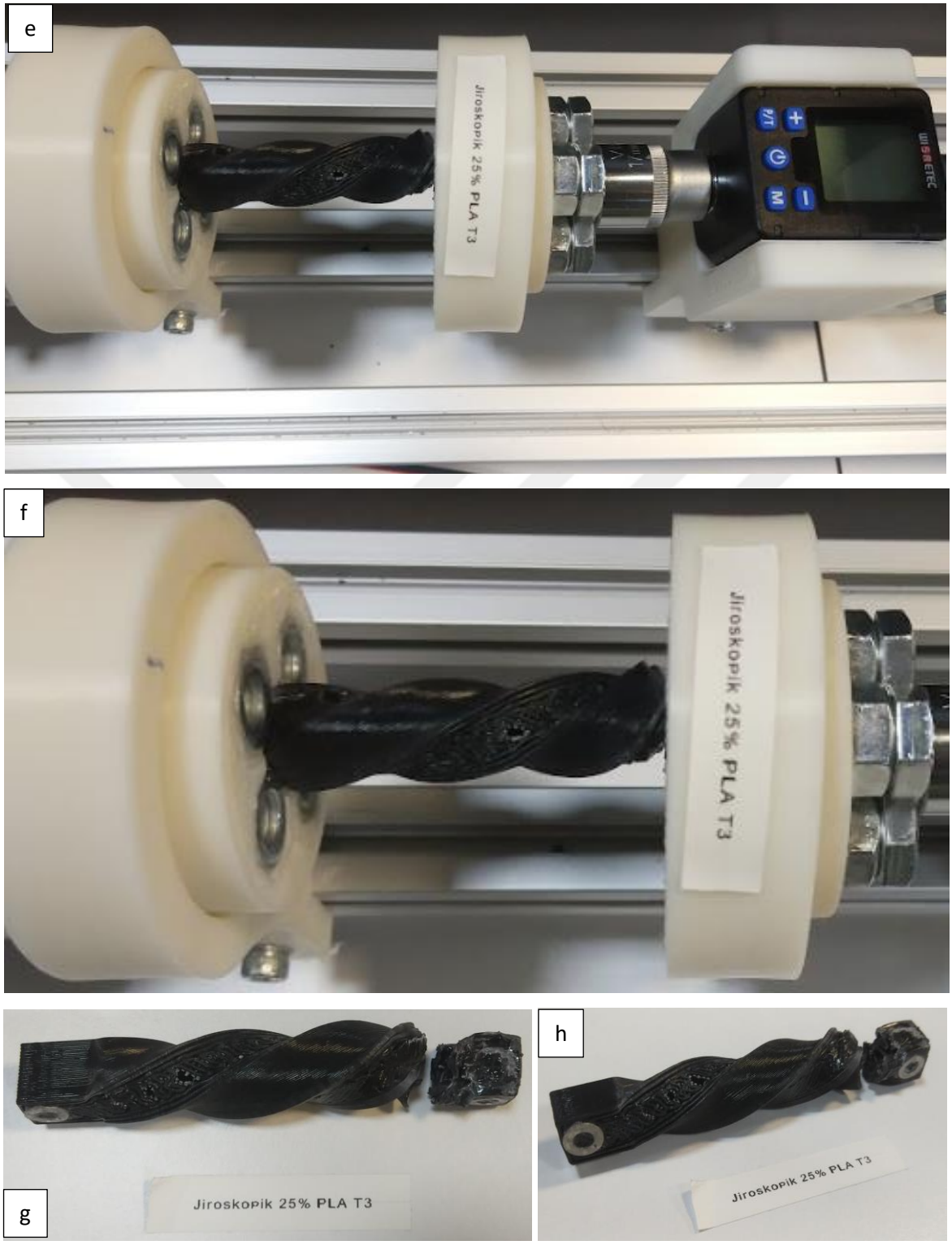


Resim 5.26. (devam) Jiroskopik iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ikinci test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik

görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü



Resim 5.27. Jiroskopik iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş üçüncü test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; e. testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü

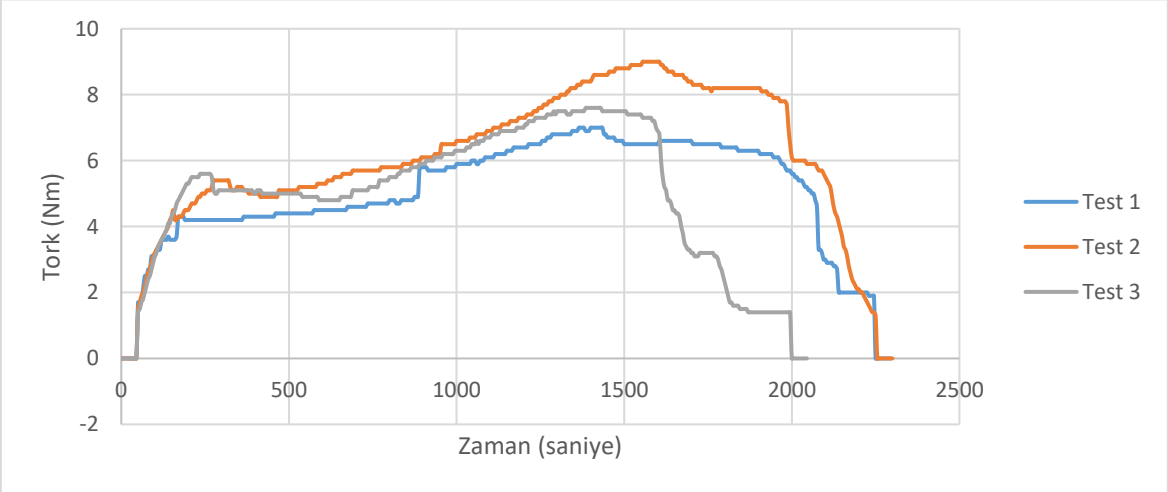


Resim 5.27. (devam) Jiroskopik iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş üçüncü test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; e. testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü

Şekil 5.9'da jiroskopik iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında dayanımlarının tork-zaman değişim grafiği gösterilmiştir. Her 5 saniyede bir tork verisi alınmıştır. Grafik incelendiğinde parçaların 250-500. saniye aralığında dayanımlarının azaldığı, bu aralıktan sonra arttığı görülmektedir. Testler sırasında 500. saniyeye kadar iç doluluk desen yapısının bozulmadığı gözlemlenmiştir. Geri kalan sürede iç doluluk deseni parça içinde sıkışmış ve parça tam dolu hale gelmiştir. İç doluluk deseninin etkisi araştırıldığı için 500. saniyeye kadar olan aralıktaki veriler önem taşımaktadır ve değerlendirme için en yüksek tork değeri bu aralıktaki verilerden elde edilmiştir. Çizelge 5.9'da üç test parçalarının 0-500 saniye aralığındaki maksimum tork değeri ve bu değerlerin ortalaması yer almaktadır.

Çizelge 5.9. Jiroskopik iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında en yüksek tork dayanımları

Tork	Nm
Test 1	4,3
Test 2	5,4
Test 3	5,6
Ortalama	5,1



Şekil 5.9. Jiroskopik iç doluluk deseniyle ve %25 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında dayanımlarının tork-zaman değişim grafiği

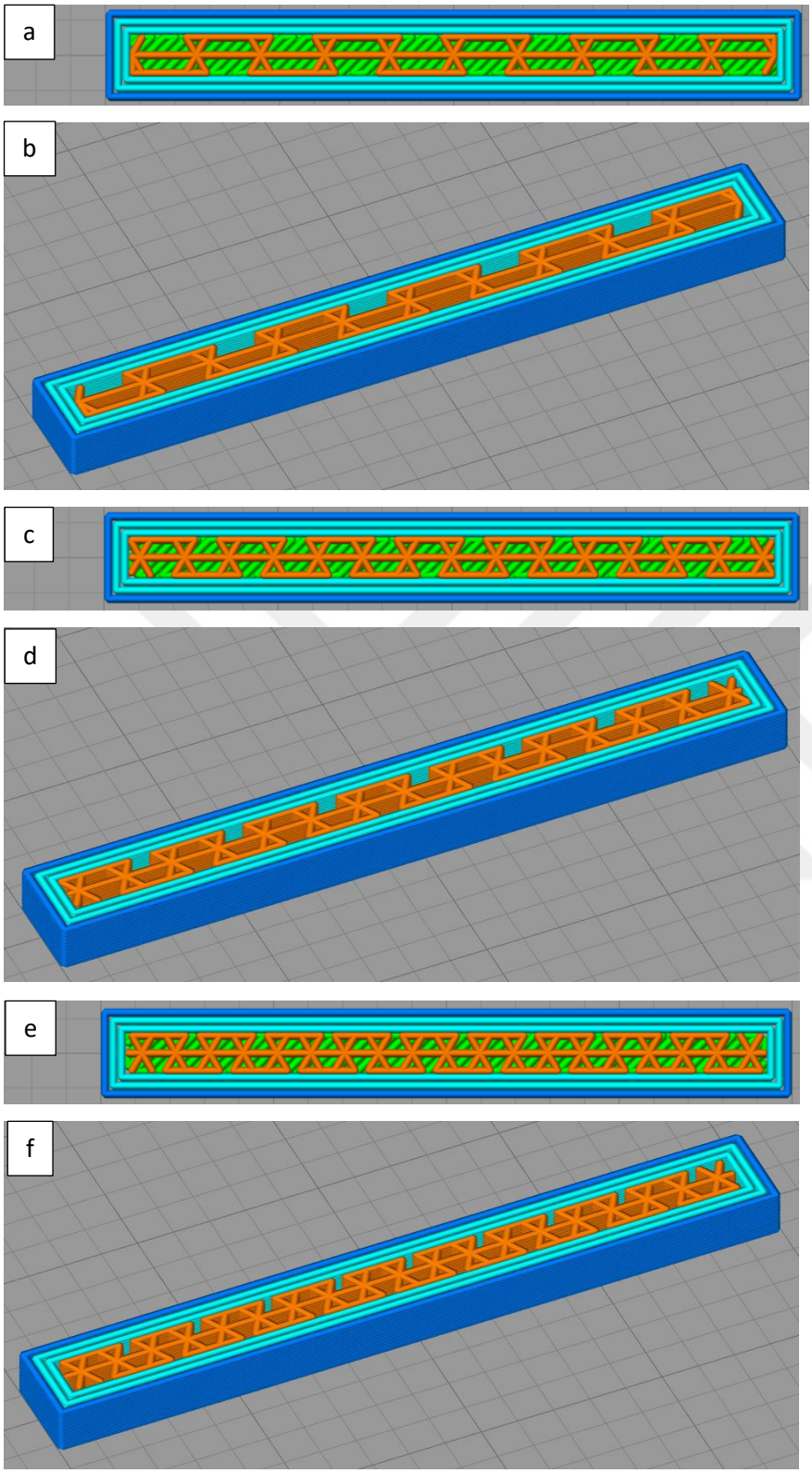
Çizelge 5.10'da ESUN PLA+ malzemeden %25 iç doluluk oranıyla farklı iç doluluk geometrileriyle üretilmiş parçaların burulma testinde en yüksek dayanım torklarının ortalamasını barından değerler belirtilmiştir. Bu değerlerden yola çıkarak üçgen iç doluluk deseninin burulma testinde en yüksek ortalama dayanım torkuna ulaştığı ve en dayanıklı geometri tipi olduğu sonucuna varılmıştır.

Çizelge 5.10. Burulma testinin ilk aşamasında iç doluluk geometrilerinin kırılma değerleri

İç Doluluk Geometri Tipi	Kırılma Değeri (Nm)
Grid (ızgara)	7,3
Octahedral (sekizgen)	7,07
Full honeycomb (tam petek)	6,1
Fast honeycomb (hızlı petek)	5,63
Sinusoid	6,23
Cubic (kübik)	5,73
Rectilinear (doğrusal)	5,93
Triangular (üçgen)	8,83
Gyroid (jiroskopik)	5,1

5.1.2. Burulma testi ile iç doluluk oranının belirlenmesi

İlk aşamada triangular (üçgen) iç yapısının burulmaya karşı en dayanıklı geometri yapısı olduğu belirlenmiştir. İkinci aşamada ESUN PLA+ malzeme ve triangular (üçgen) iç doluluk geometrisiyle farklı iç doluluk oranlarının her birinden üçer adet (%45, %65, %85) baskı alındı. Bu parçalarla burulma testi tekrarlandı. Bu testte de ilk aşamada olduğu gibi her 5 saniyede bir tork verisi alınmıştır. Şekil 5.10'da farklı iç doluluk oranlarıyla Simplify V5.0 programında baskı planı yapılan test parçasının görüntüleri; Çizelge 5.11'de baskı parametreleri belirtilmiştir.



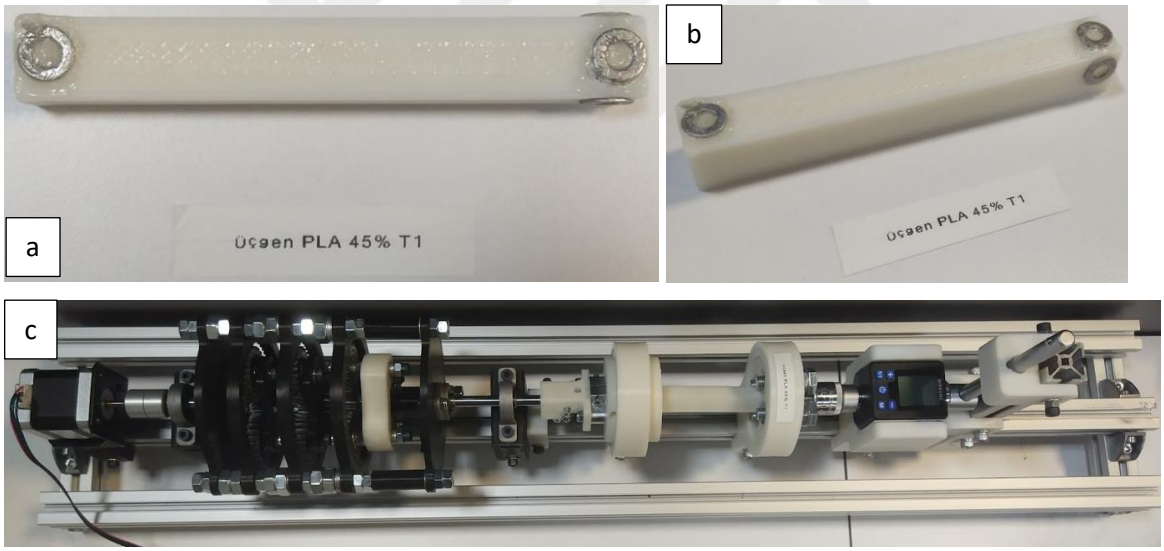
Şekil 5.10. Farklı iç doluluk oranlarıyla Simplify V5.0 programında üçgen iç doluluk deseniyle baskı planı yapılan test parçasının görüntüleri: (a) %45 iç doluluk oranlı parçanın üstten görüntüsü; (b) %45 iç doluluk oranlı parçanın izometrik görüntüsü; (c) %65 iç doluluk oranlı parçanın üstten görüntüsü; (d) %65 iç doluluk oranlı parçanın izometrik görüntüsü; (e) %85 iç doluluk oranlı parçanın üstten görüntüsü; (f) %85 iç doluluk oranlı parçanın izometrik görüntüsü

Çizelge 5.11. Triangular (üçgen) iç doluluk geometrisiyle farklı iç doluluk oranlarının baskı parametreleri

Parametre	Triangular %45	Triangular %65	Triangular %85
Baskı Süresi (dakika)	25	26	27
Kullanılan filament uzunluğu (m)	6,78	7,05	7,30
Parça hacmi (mm^3)	16306	16961	17547
Parça ağırlığı (g)	20,38	21,20	21,93

Üçgen iç doluluk deseni ve %45 iç doluluk oranıyla basılan parçaların burulma testi sonuçları

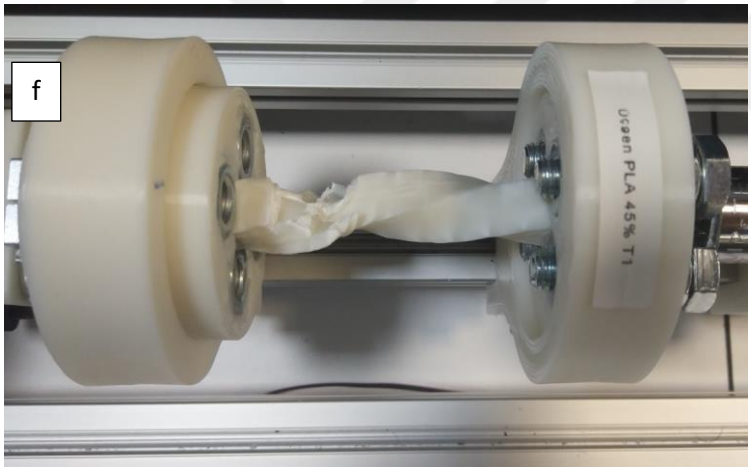
Üçgen iç doluluk geometrisiyle %45 dolulukla ESUN PLA+ malzemeden üretilen 3 test parçasına burulma testi yapılmıştır. Resim 5.28'de ilk test parçasının, Resim 5.29'da ikinci test parçasının, Resim 5.30'da üçüncü test parçasının burulma testi prosedürü gösterilmiştir.

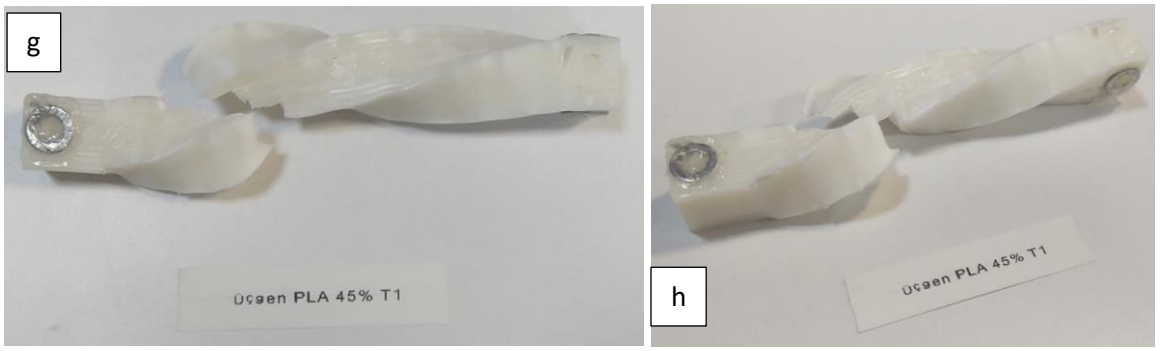


Resim 5.28. Üçgen iç doluluk deseniyle ve %45 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ilk test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü

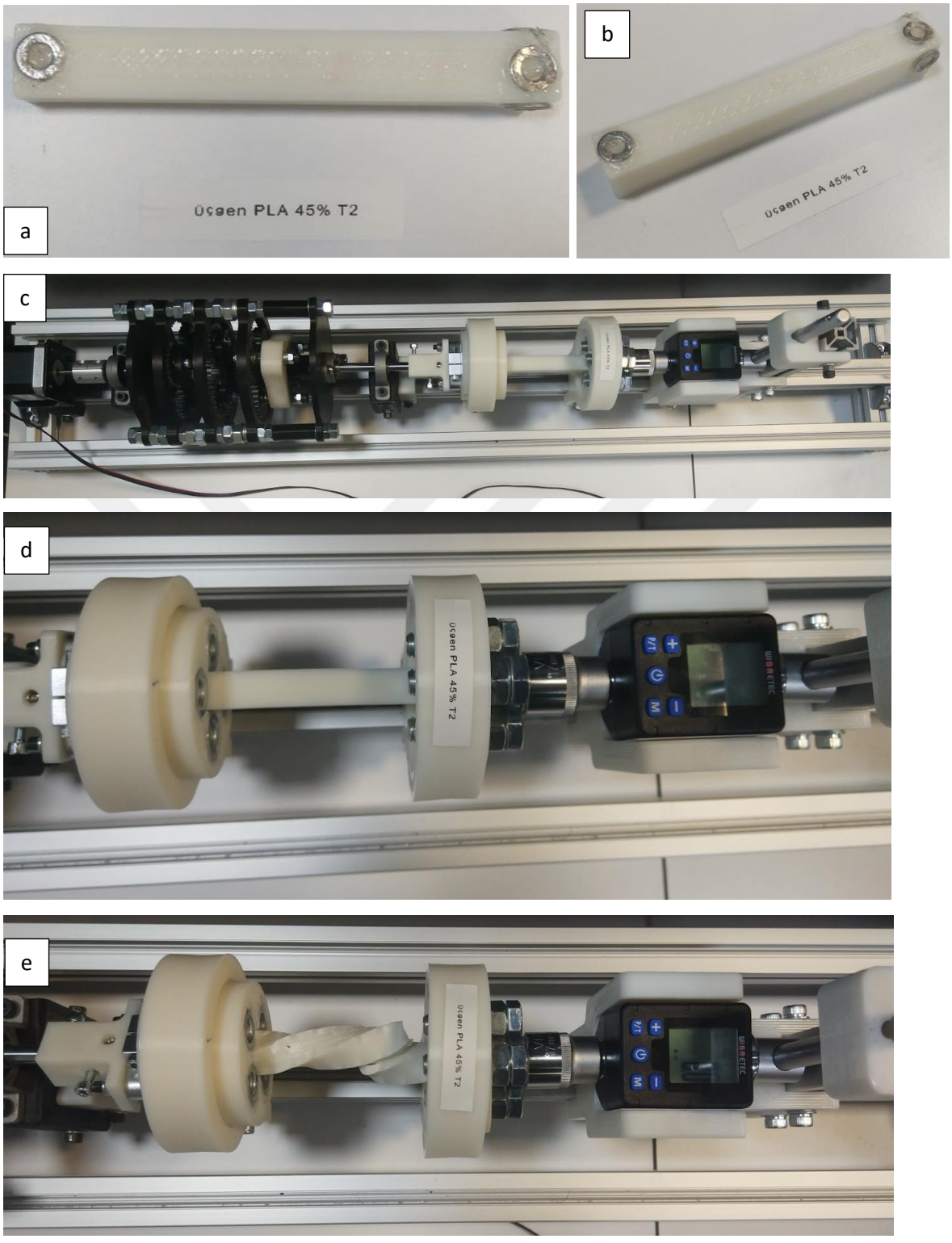




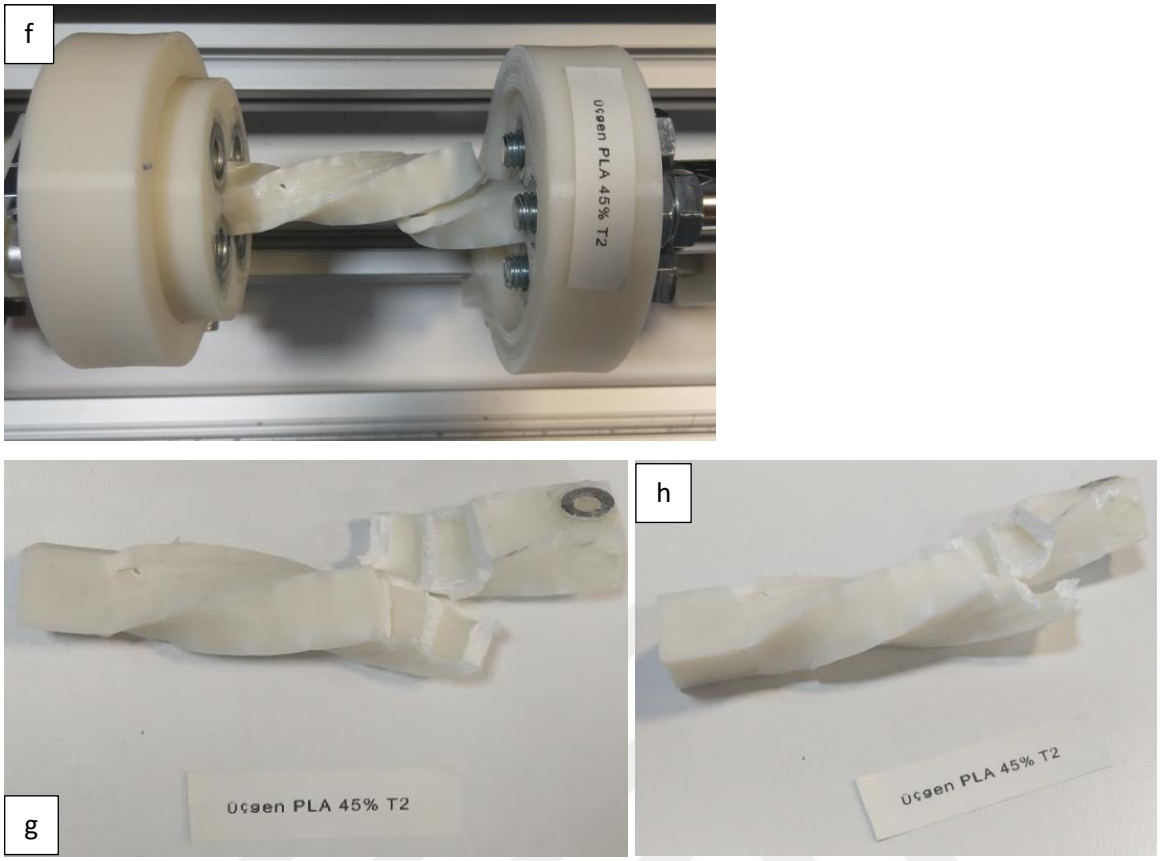




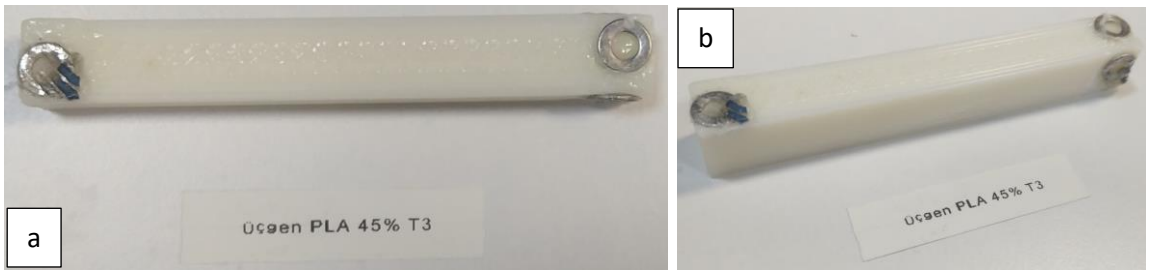
Resim 5.28. (devam) Üçgen iç doluluk deseniyle ve %45 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ilk test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü



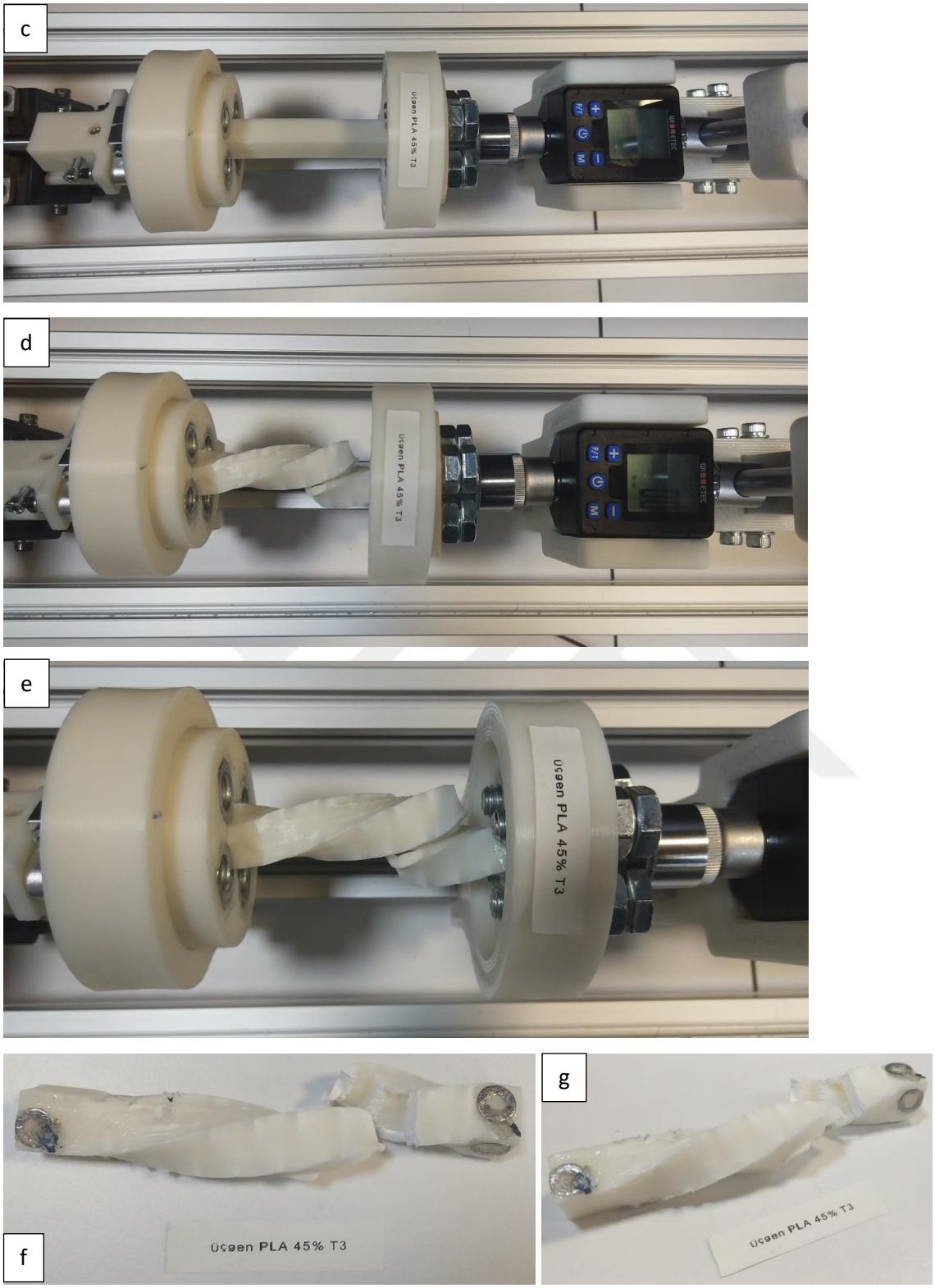
Resim 5.29. Üçgen iç doluluk deseniyle ve %45 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ikinci test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü



Resim 5.29. (devam) Üçgen iç doluluk deseniyle ve %45 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ikinci test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü

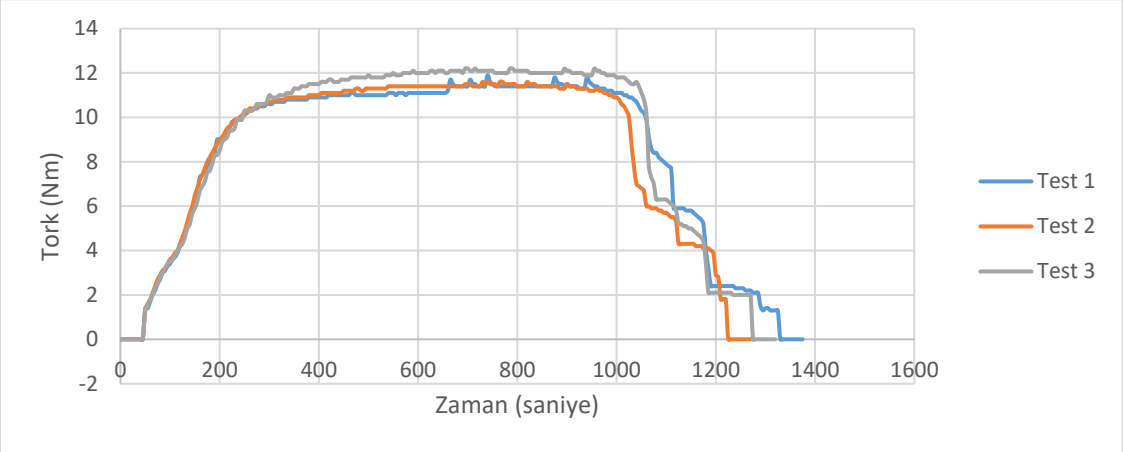


Resim 5.30. Üçgen iç doluluk deseniyle ve %45 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş üçüncü test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (d) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (f) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (g) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü



Resim 5.30. (devam) Üçgen iç doluluk deseniyle ve %45 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş üçüncü test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (d) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (f) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (g) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü

Şekil 5.11'de üçgen iç doluluk deseniyle ve %45 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında dayanımlarının tork-zaman değişim grafiği gösterilmiştir. Her 5 saniyede bir tork verisi alınmıştır. Grafik incelendiğinde parçaların 0-1000. saniye aralığında dayanımlarının arttığı, sonra giderek azaldığı gözlemlenmiştir. İç doluluk oranı arttıkça, 1000. saniyeye kadar iç doluluk deseni yapısını genellikle korumuştur. 1000. saniyeden sonra parçada ani yırtılmalar başlamış ve parça kopmuştur. İç doluluk deseninin etkisi araştırıldığı için 1000. saniyeye kadar olan aralıktaki veriler önem taşımaktadır ve değerlendirme için en yüksek tork değeri bu aralıktaki verilerden elde edilmiştir. Çizelge 5.12'de üç test parçalarının 0-1000 saniye aralığındaki maksimum tork değeri ve bu değerlerin ortalaması yer almaktadır.



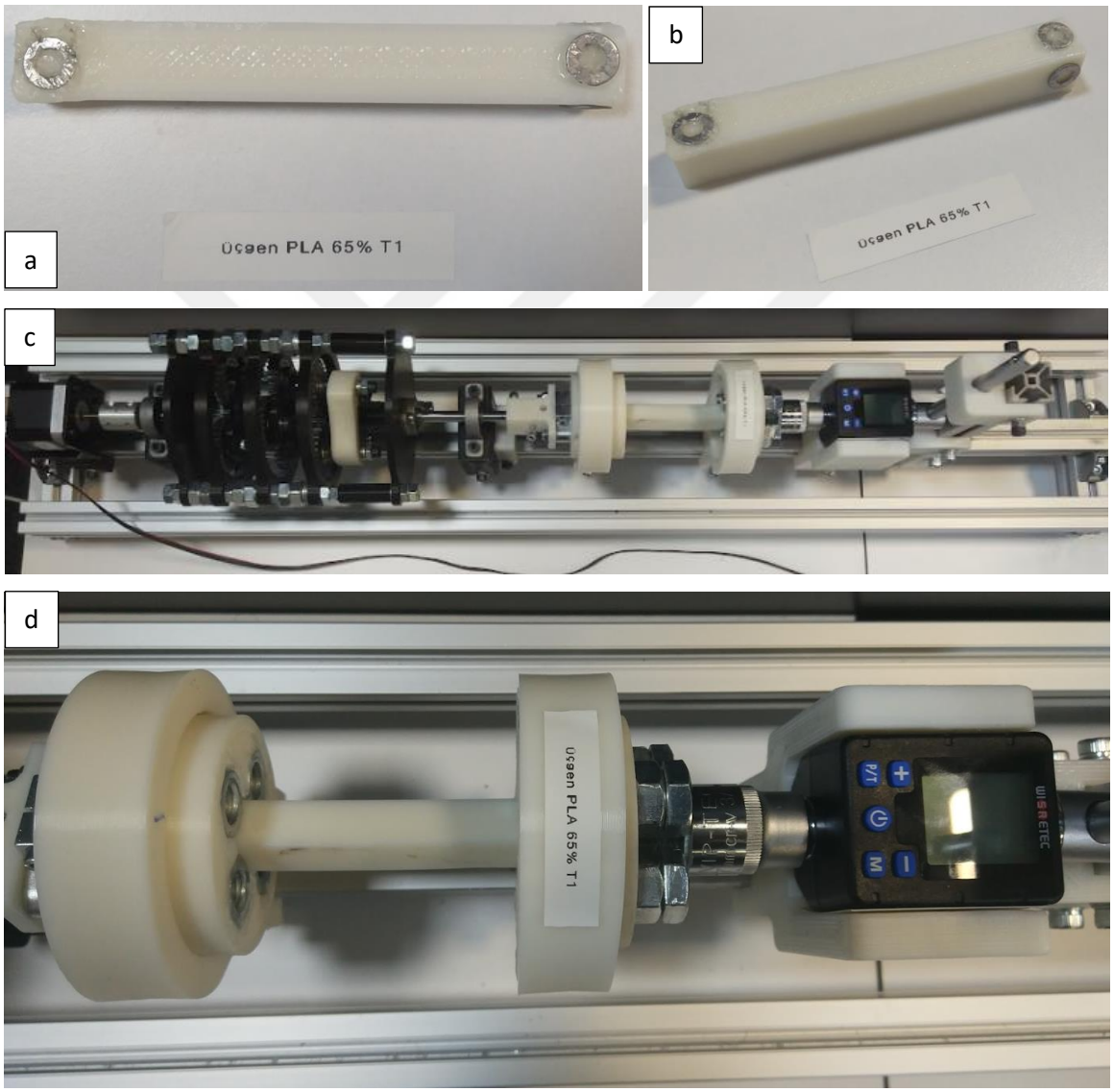
Şekil 5.11. Üçgen iç doluluk deseniyle ve %45 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında dayanımlarının tork-zaman değişim grafiği

Çizelge 5.12. Üçgen iç doluluk deseniyle ve %45 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında en yüksek tork dayanımları

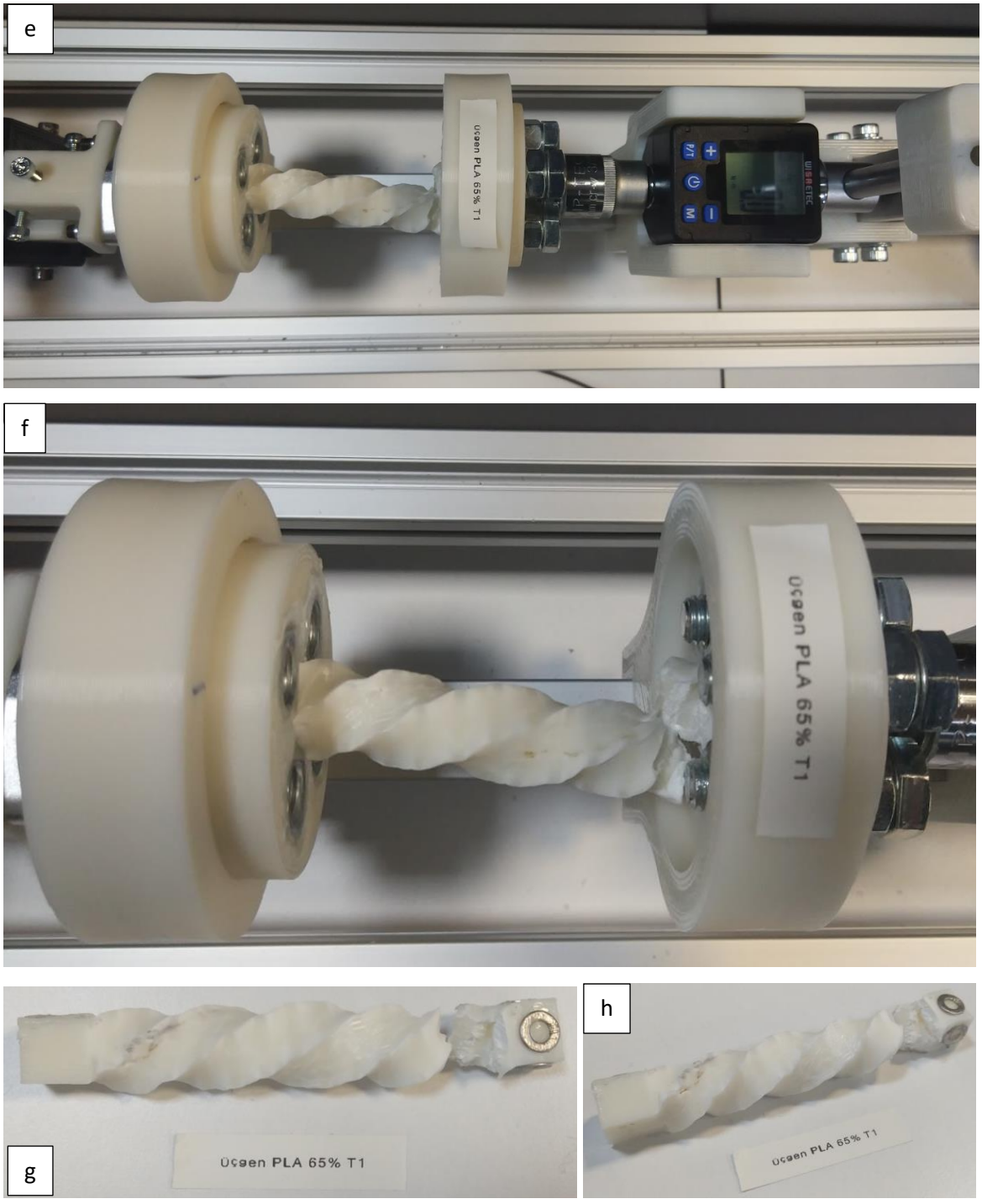
Tork	Nm
Test 1	11,9
Test 2	11,6
Test 3	12,2
Ortalama	11,9

Üçgen iç doluluk deseni ve %65 iç doluluk oranıyla basılan parçaların burulma testi sonuçları

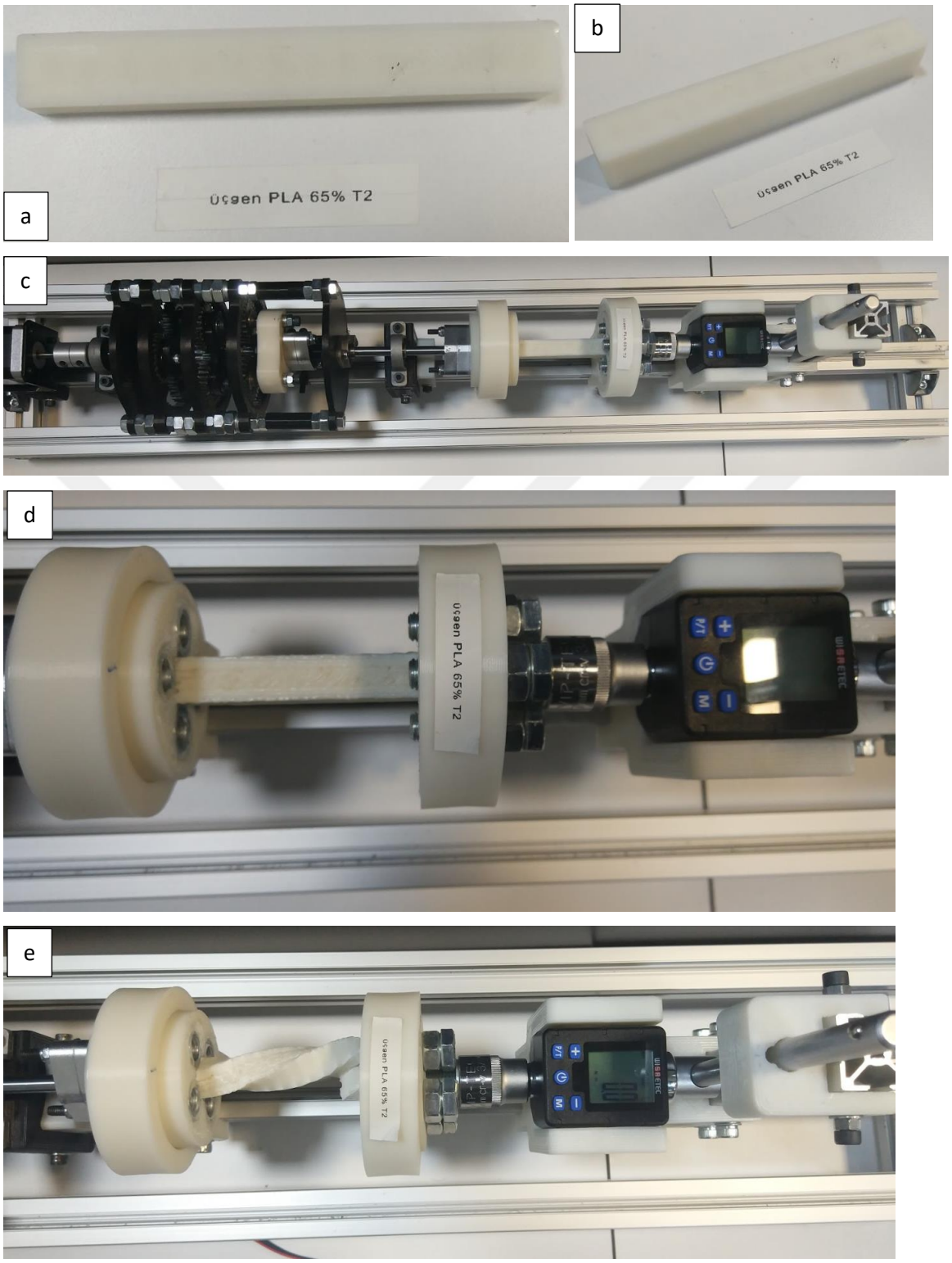
Üçgen iç doluluk geometrisiyle %65 dolulukla ESUN PLA+ malzemeden üretilen 3 test parçasına burulma testi yapılmıştır. Resim 5.31'de ilk test parçasının, Resim 5.32'de ikinci test parçasının, Resim 5.33'te üçüncü test parçasının burulma testi prosedürü gösterilmiştir.



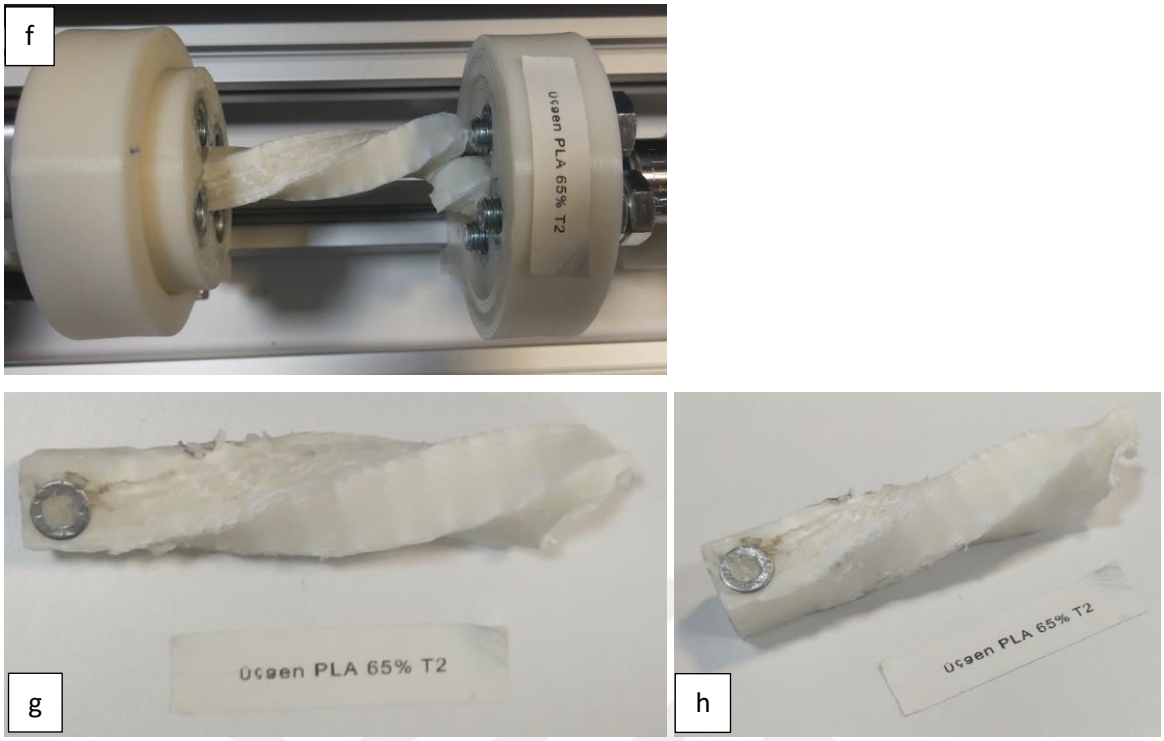
Resim 5.31. Üçgen iç doluluk deseniyle ve %65 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ilk test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü



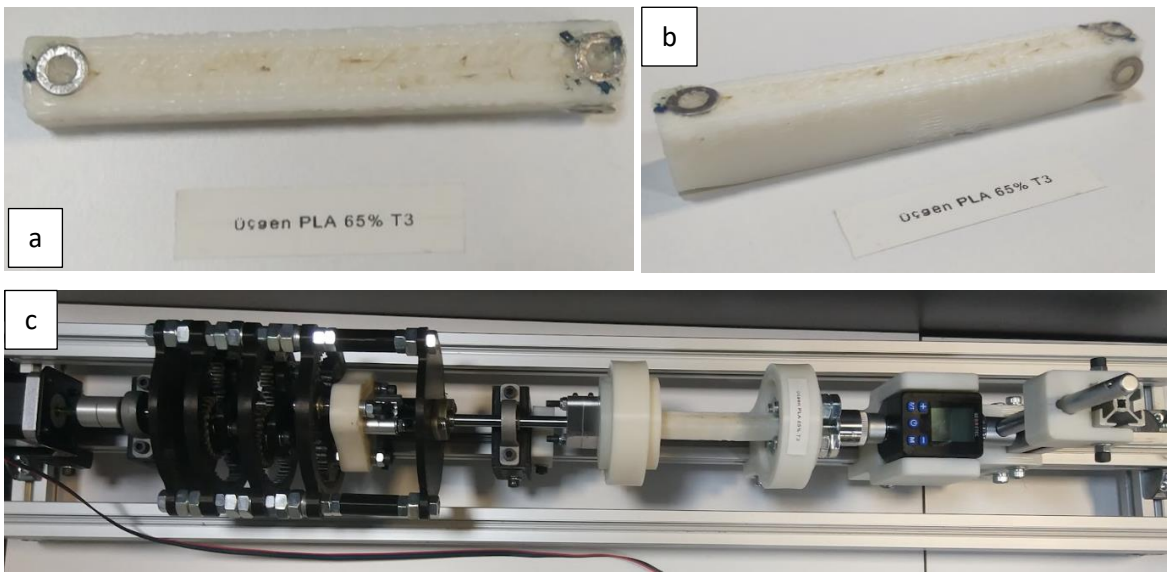
Resim 5.31. (devam) Üçgen iç doluluk deseniyle ve %65 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ilk test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü



Resim 5.32. Üçgen iç doluluk deseniyle ve %65 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ikinci test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü

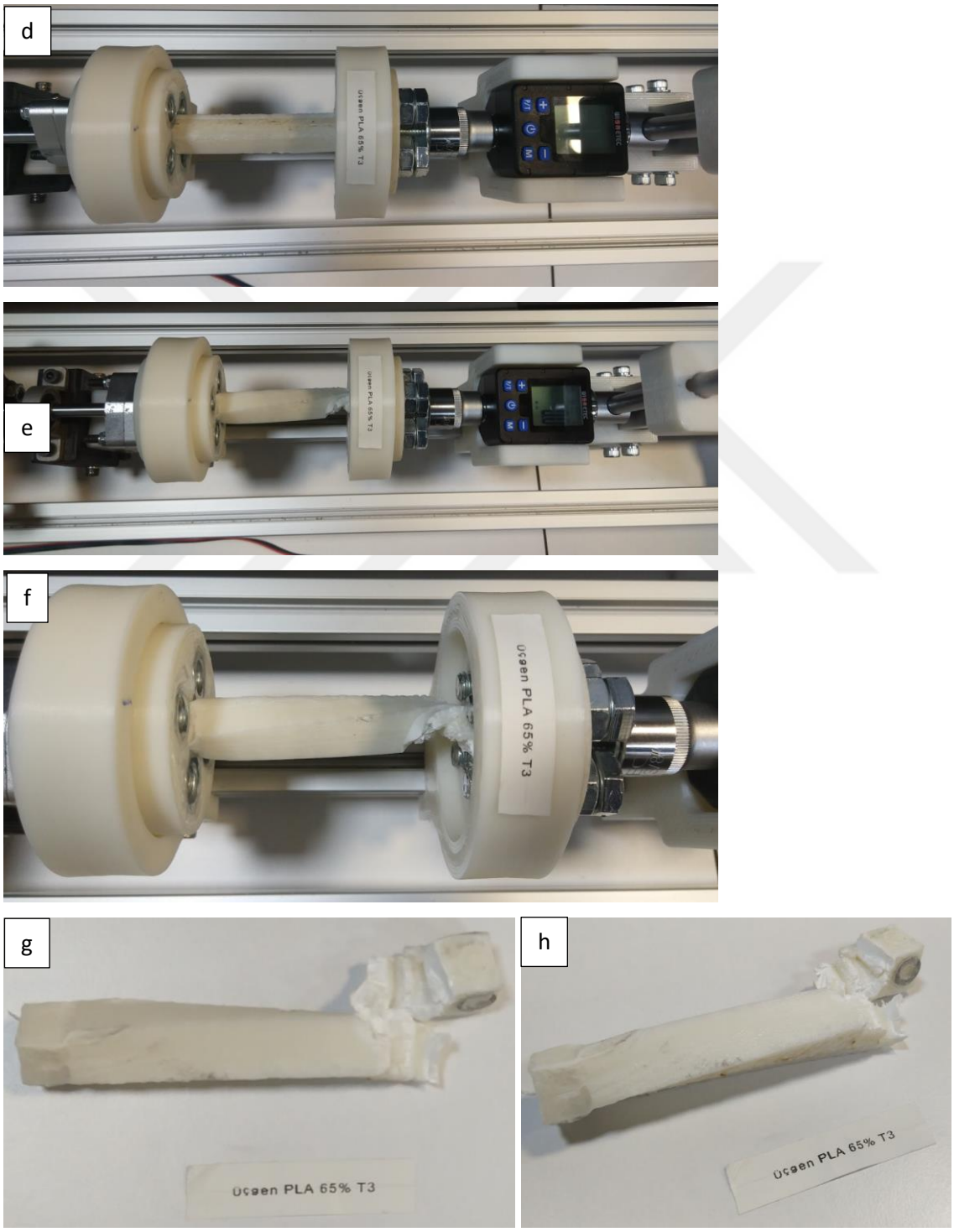


Resim 5.32. (devam) Üçgen iç doluluk deseniyle ve %65 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ikinci test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü



Resim 5.33. Üçgen iç doluluk deseniyle ve %65 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş üçüncü test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik

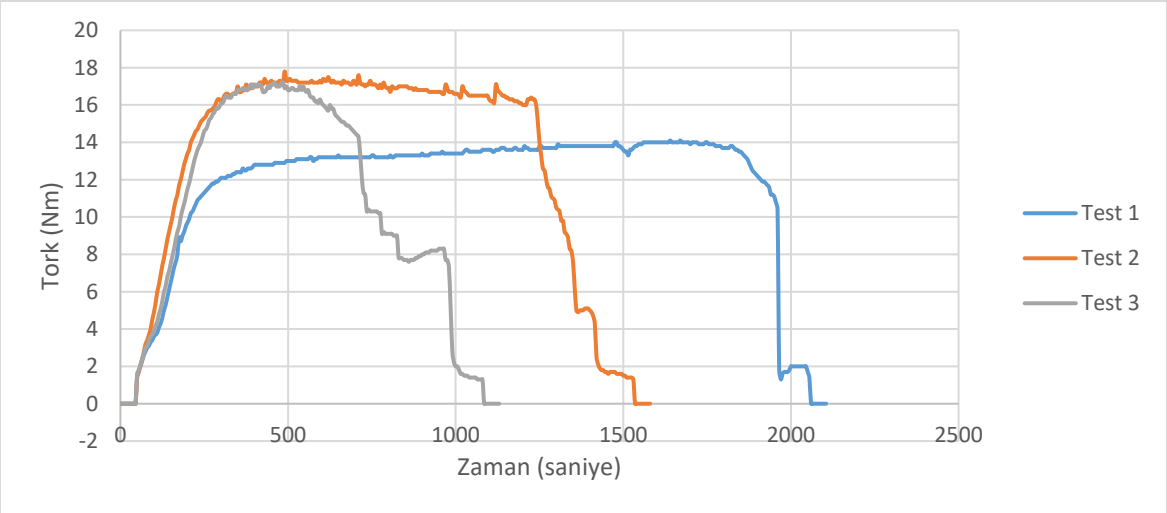
görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü



Resim 5.33. (devam) Üçgen iç doluluk deseniyle ve %65 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş üçüncü test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik

görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü

Şekil 5.12'de üçgen iç doluluk deseniyle ve %65 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında dayanımlarının tork-zaman değişim grafiği gösterilmiştir. Her 5 saniyede bir tork verisi alınmıştır. Grafik incelendiğinde parçaların 0-1000. saniye aralığında dayanımlarının arttığı, sonra giderek azaldığı gözlemlenmiştir. İç doluluk oranı arttıkça, ilk test parçası için 1800. saniyeye, ikinci test parçası için 1300. saniyeye, üçüncü test parçası için 500. saniyeye kadar iç doluluk deseni yapısını genellikle korumuştur. Her parça için belirtilem saniyeden sonra parçada ani yırtılmalar başlamış ve parça kopmuştur. İç doluluk deseninin etkisi araştırıldığı için her test parçası için yukarıda belirtilen saniyeye kadar olan aralıktaki veriler önem taşımaktadır ve değerlendirme için en yüksek tork değeri bu aralıktaki verilerden elde edilmiştir. Çizelge 5.13'te üç test parçalarının belirtilen aralıklardaki en yüksek tork değeri ve bu değerlerin ortalaması yer almaktadır.



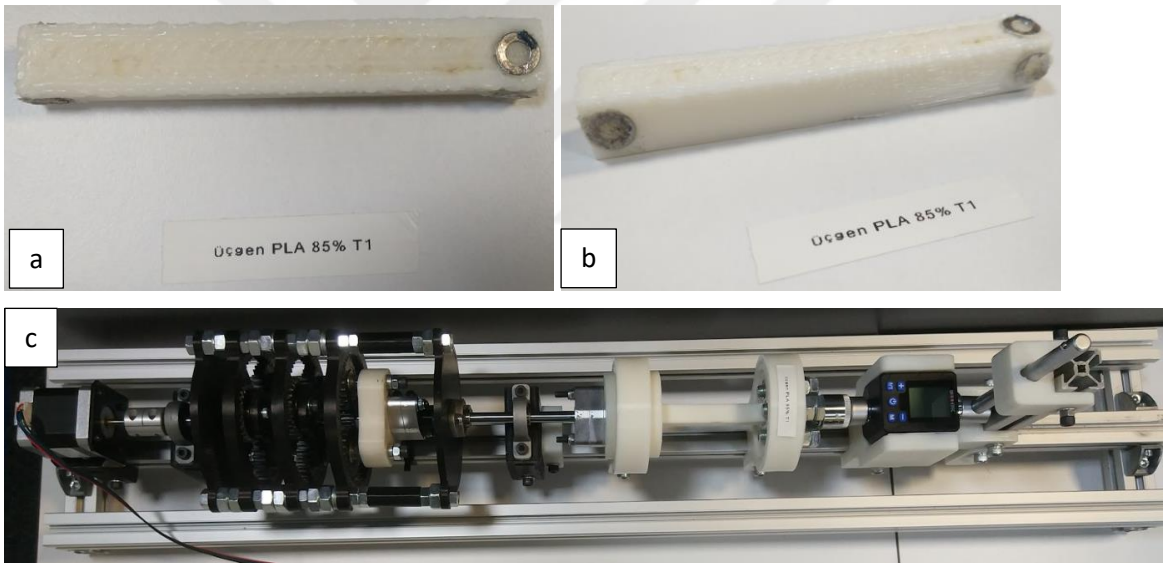
Şekil 5.12. Üçgen iç doluluk deseniyle ve %65 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında dayanımlarının tork-zaman değişim grafiği

Çizelge 5.13. Üçgen iç doluluk deseniyle ve %65 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında en yüksek tork dayanımları

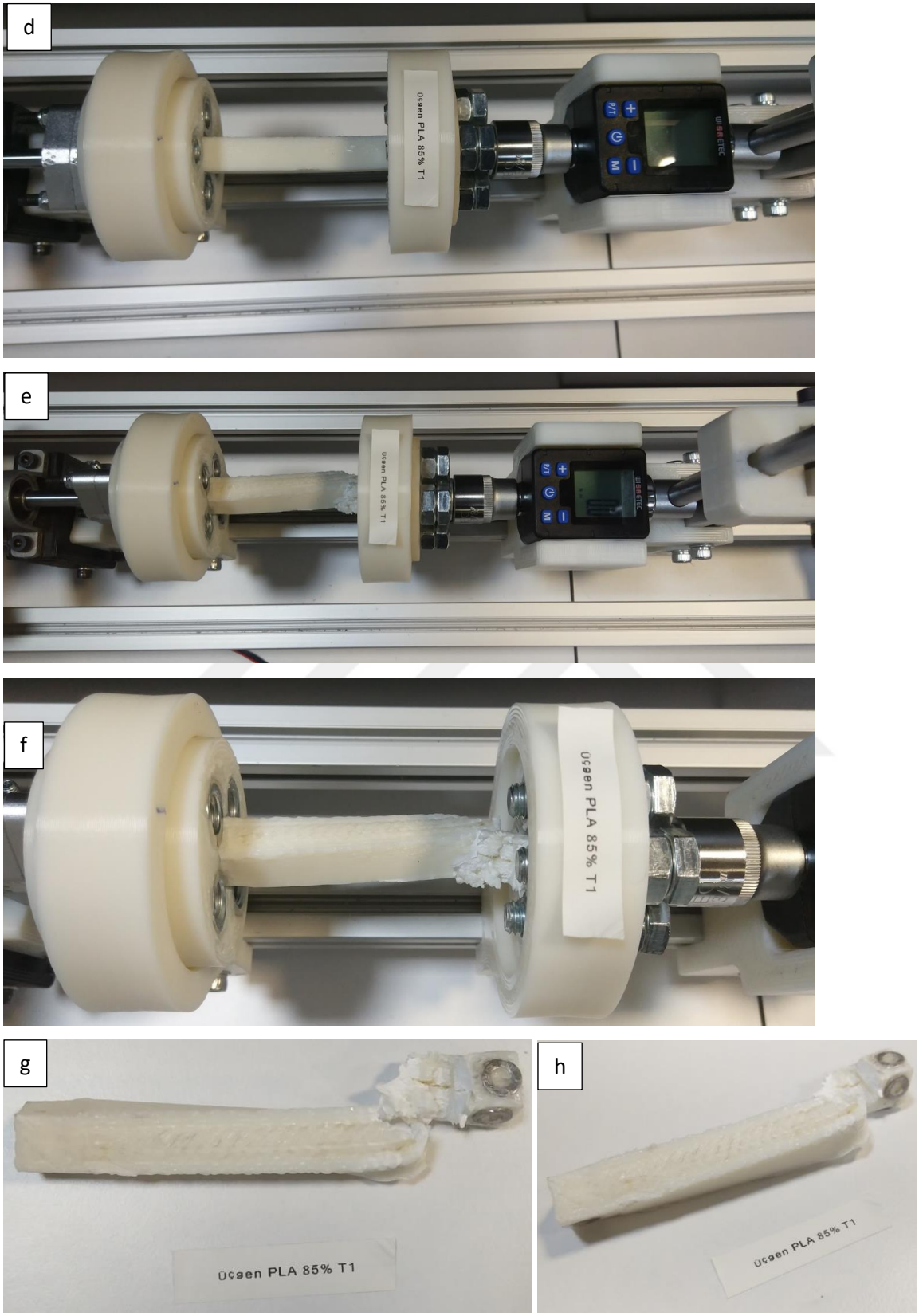
Tork	Nm
Test 1	14,1
Test 2	17,8
Test 3	17,2
Ortalama	16,37

Üçgen iç doluluk deseni %85 iç doluluk oranıyla basılan parçaların burulma testi sonuçları

Üçgen iç doluluk geometrisiyle %85 dolulukla ESUN PLA+ malzemeden üretilen 3 test parçasına burulma testi yapılmıştır. Resim 5.34'te ilk test parçasının, Resim 5.35'te ikinci test parçasının, Resim 5.36'da üçüncü test parçasının burulma testi prosedürü gösterilmiştir.

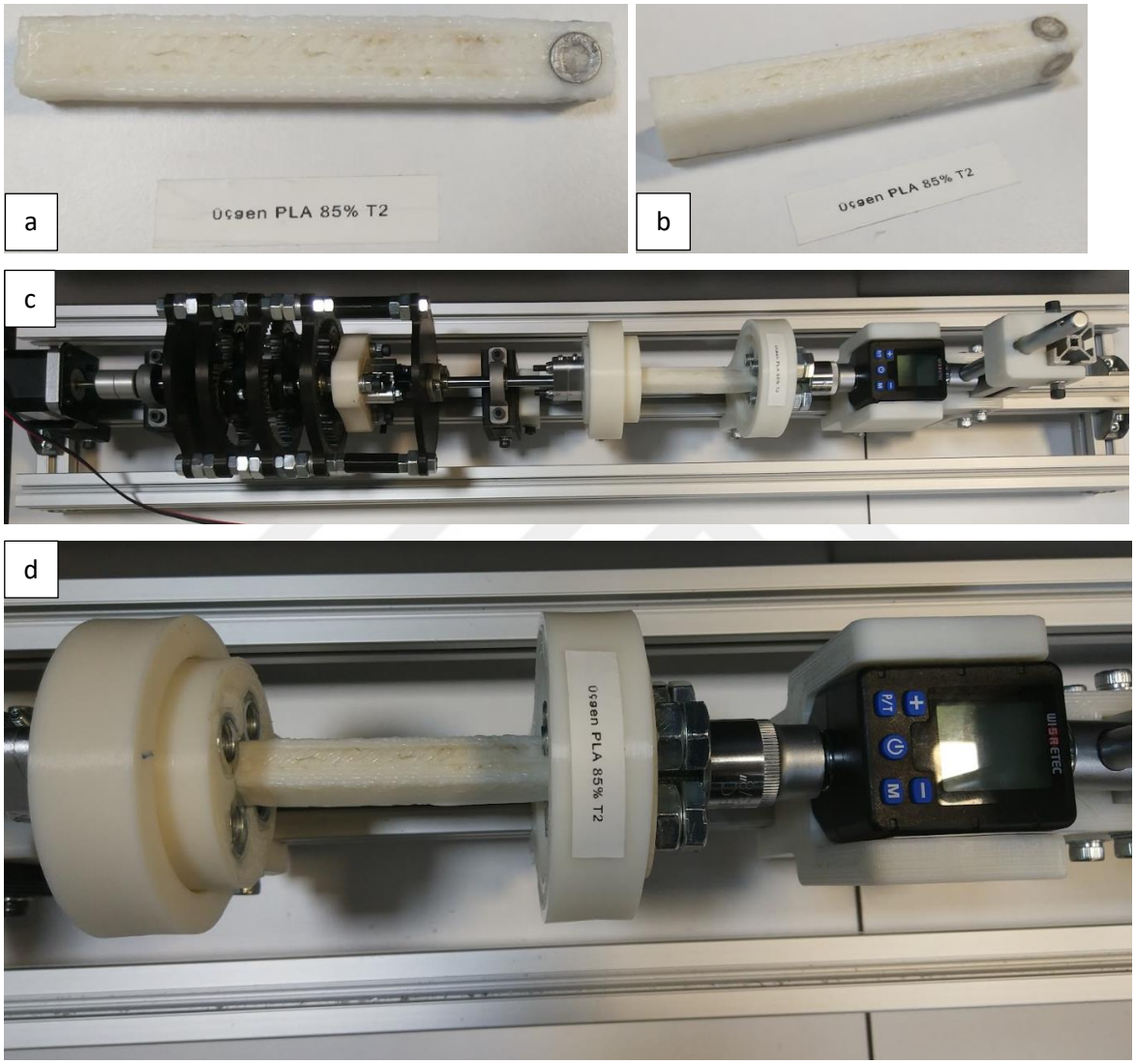


Resim 5.34. Üçgen iç doluluk deseniyle ve %85 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ilk test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü

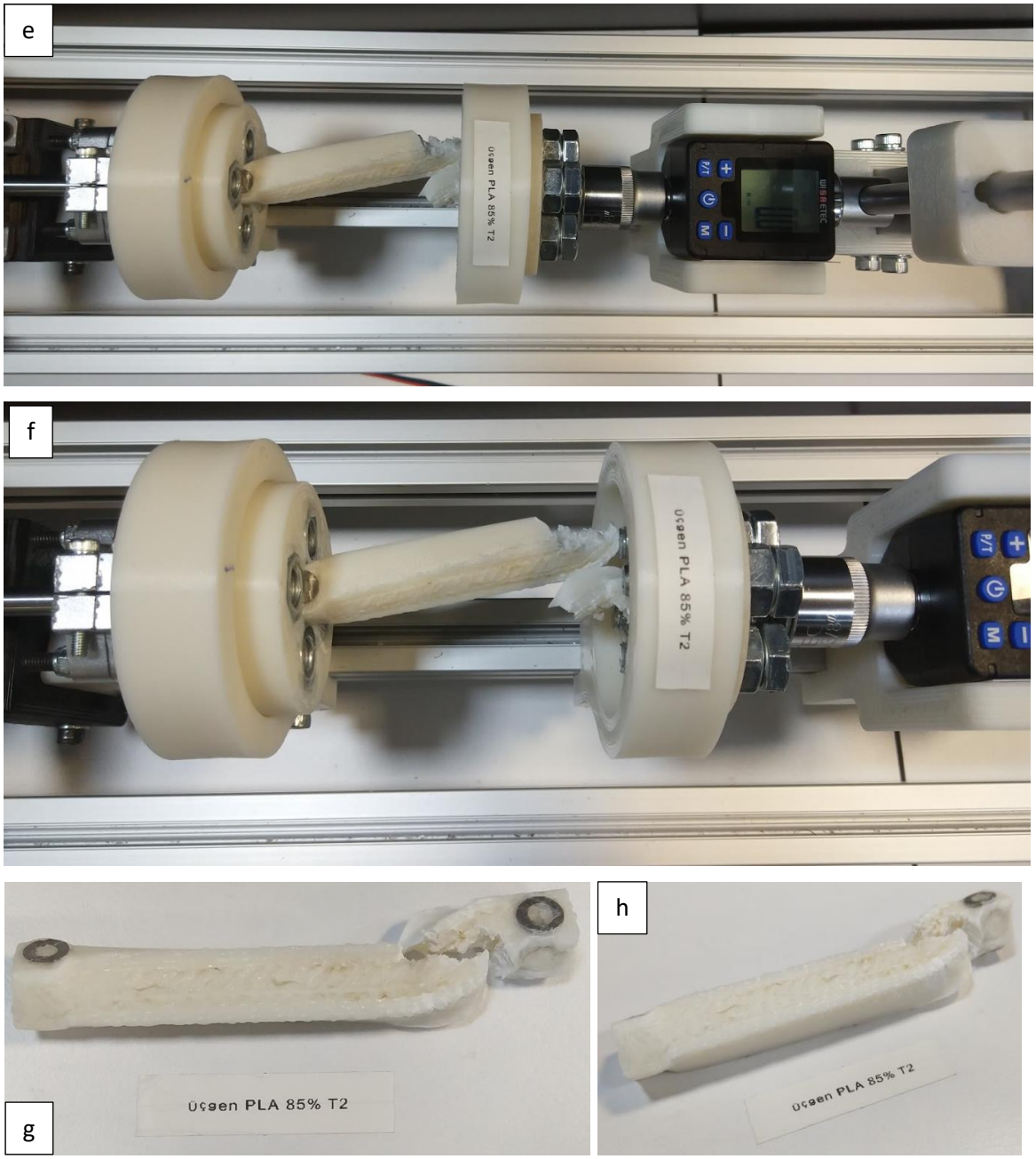


Resim 5.34. (devam) Üçgen iç doluluk deseniyle ve %85 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ilk test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü;

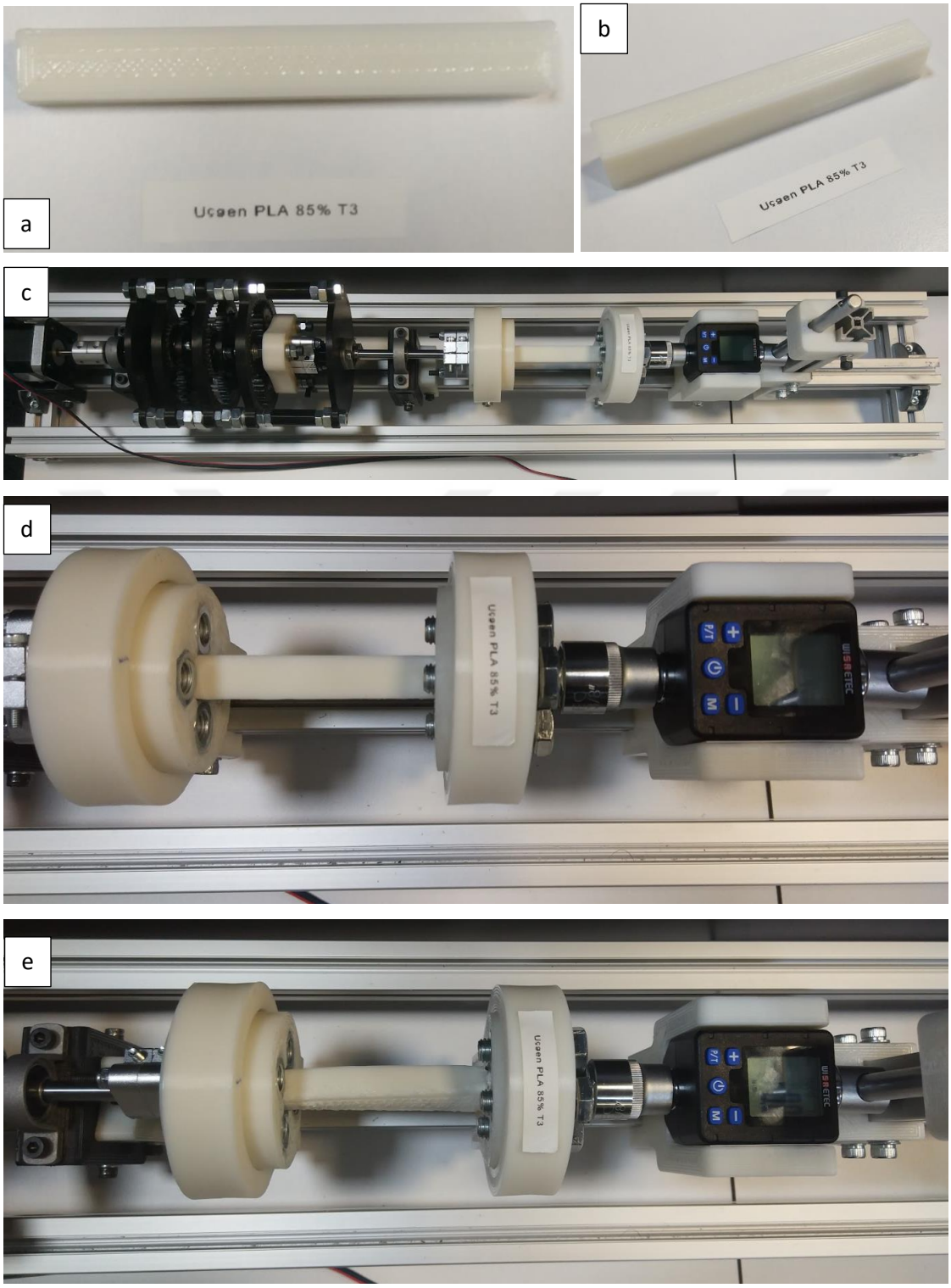
(c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü



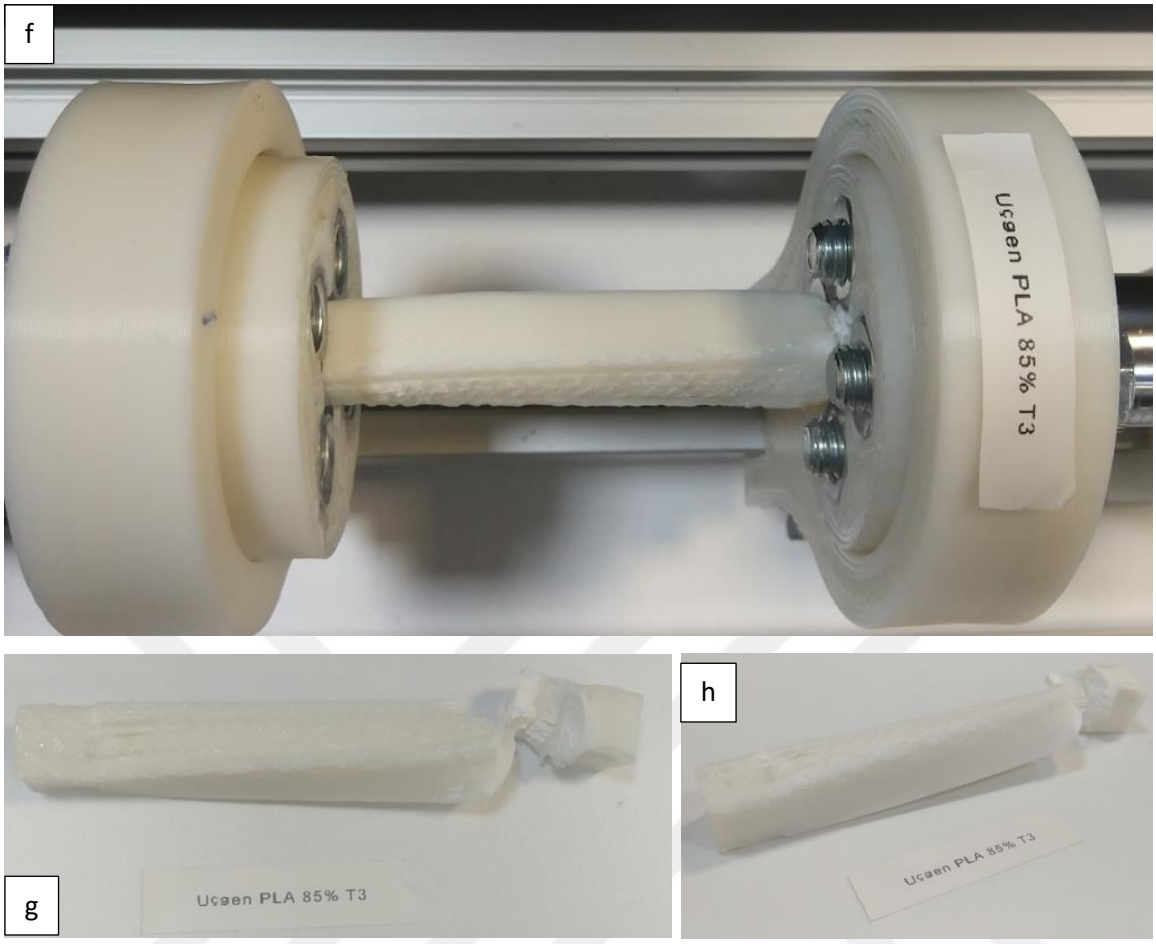
Resim 5.35. Üçgen iç doluluk deseniyle ve %85 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ikinci test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü



Resim 5.35. (devam) Üçgen iç doluluk deseniyle ve %85 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş ikinci test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü



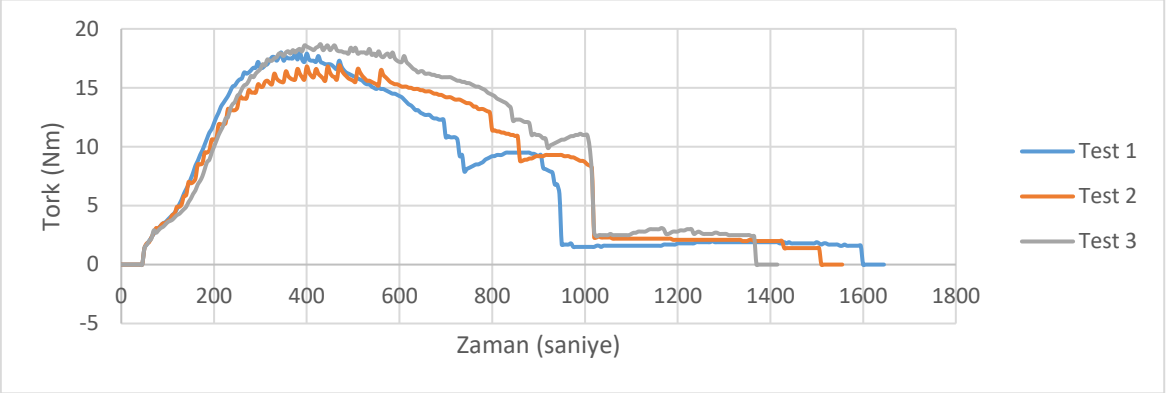
Resim 5.36. Üçgen iç doluluk deseniyle ve %85 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş üçüncü test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü



Resim 5.36. (devam) Üçgen iç doluluk deseniyle ve %85 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş üçüncü test parçasının burulma testi prosedürü: (a) testten önce parçanın üstten görüntüsü; (b) testten önce parçanın izometrik görüntüsü; (c) testten önce parça bağlıyken cihazın genel görüntüsü; (d) testten önce parça bağlıyken cihazın üstten yakın görüntüsü; (e) testten sonra cihazın üstten yakın görüntüsü; (f) testten sonra parçanın bağlıyken görüntüsü; (g) testten sonra parçanın üstten görüntüsü; (h) testten sonra parçanın izometrik görüntüsü

Şekil 5.13'te üçgen iç doluluk deseniyle ve %85 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında dayanımlarının tork-zaman değişim grafiği gösterilmiştir. Her 5 saniyede bir tork verisi alınmıştır. Grafik incelendiğinde parçaların 0-400. saniye aralığında dayanımlarının arttığı, sonra giderek azaldığı gözlemlenmiştir. İç doluluk oranı arttıkça, 400. saniyeye kadar iç doluluk deseni yapısını genellikle korumuştur. 400. saniyeden sonra parçada ani yırtılmalar başlamış ve parça kopmuştur. İç doluluk deseninin etkisi araştırıldığı için 400. saniyeye kadar olan aralıktaki veriler önem taşımaktadır ve değerlendirme için en yüksek tork değeri bu aralıktaki

verilerden elde edilmiştir. Çizelge 5.14'te üç test parçalarının 0-400 saniye aralığındaki maksimum tork değeri ve bu değerlerin ortalaması yer almaktadır.



Şekil 5.13. Üçgen iç doluluk deseniyle ve %85 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında dayanımlarının tork-zaman değişim grafiği

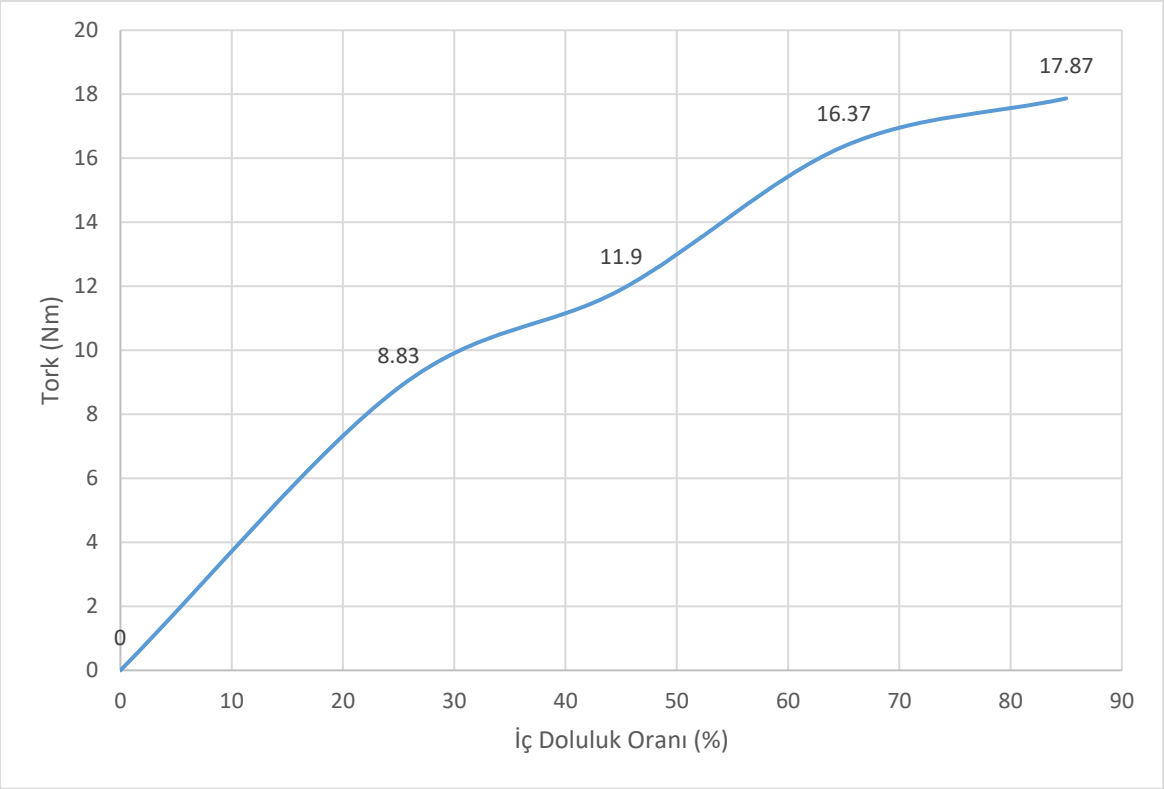
Çizelge 5.14. Üçgen iç doluluk deseniyle ve %85 iç doluluk oranıyla ESUN PLA+ malzemeden üretilmiş test parçalarının burulma testi sonrasında en yüksek tork dayanımları

Tork	Nm
Test 1	18
Test 2	16,9
Test 3	18,7
Ortalama	17,87

Çizelge 5.15'te ilk ve ikinci aşamada ESUN PLA + malzemesinde %25, %45, %65 ve %85 iç doluluk oranları ve üçgen deseniyle üretilmiş test parçalarının burulma testinde en yüksek tork dayanımlarının ortalaması belirtilmiştir. İç doluluk oranı arttıkça parçaların tork dayanımı da artmaktadır. Şekil 5.14'te Çizelge 5.15'teki değerler grafik şeklinde gösterilmiştir.

Çizelge 5.15. Burulma testinin ikinci aşamasında iç doluluk oranlarının kopma torku değerleri

İç Doluluk Oranı	Ortalama Kopma Torku Değeri (Nm)
%25	8,83
%45	11,9
%65	16,37
%85	17,87



Şekil 5.14. Burulma testinin ikinci aşamasında kopma torku değerlerinin iç doluluk oranlarına göre değişim grafiği

İkinci aşamadaki testler sonucunda triangular (üçgen) iç geometrisinin %85 dolulukla burulmaya karşı daha dayanıklı olduğu gözlemlenmiştir. Dolayısıyla çekme ve basma testlerinde farklı malzemelerin dayanıma olan etkilerinin araştırılması için %85 iç doluluk oranı ve üçgen deseniyle baskısı alınan test parçaları kullanılmıştır.

5.2. Çekme Testi Sonuçları

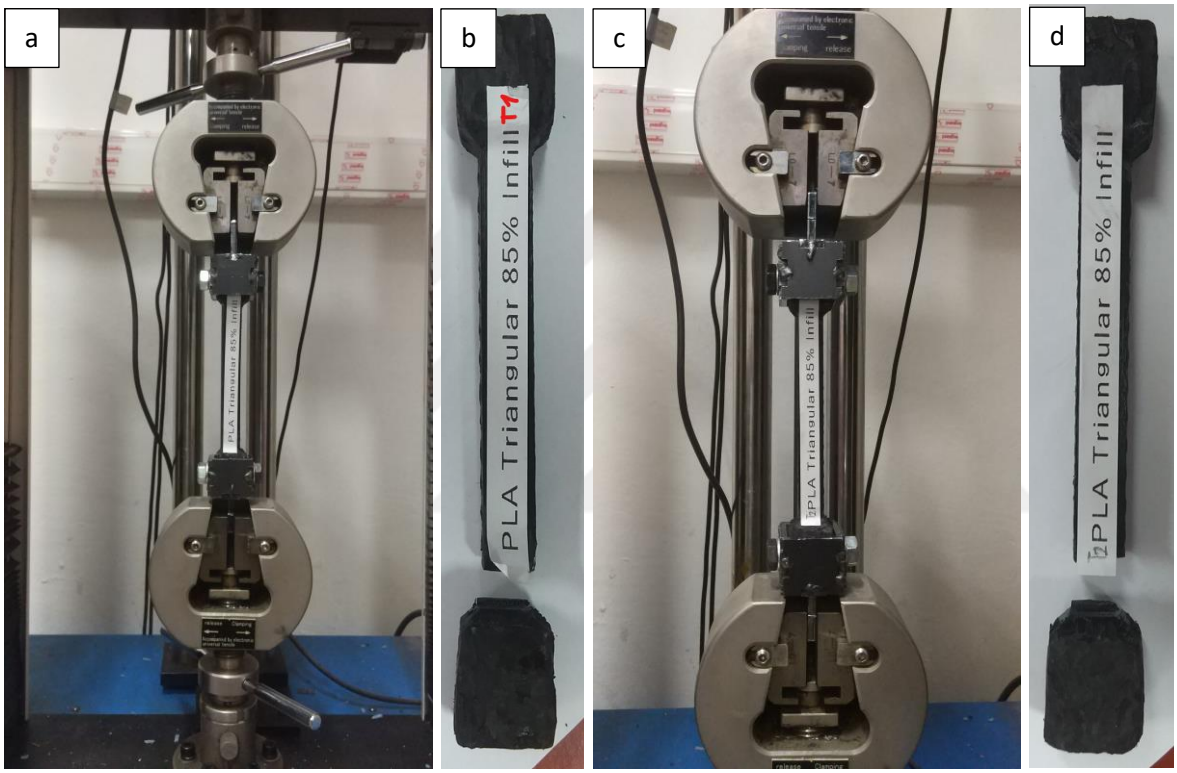
Triangular (üçgen) iç doluluk geometrisi ile ve %85 dolulukla PLA, PETG, ABS ve ASA malzemelerinin her birinden 2 adet test parçası üretilmiştir. Parçalar test edilmiş ve kopma dayanımları belirlenmiştir.

5.2.1. PLA+ malzemesiyle üretilen parçanın çekme testi

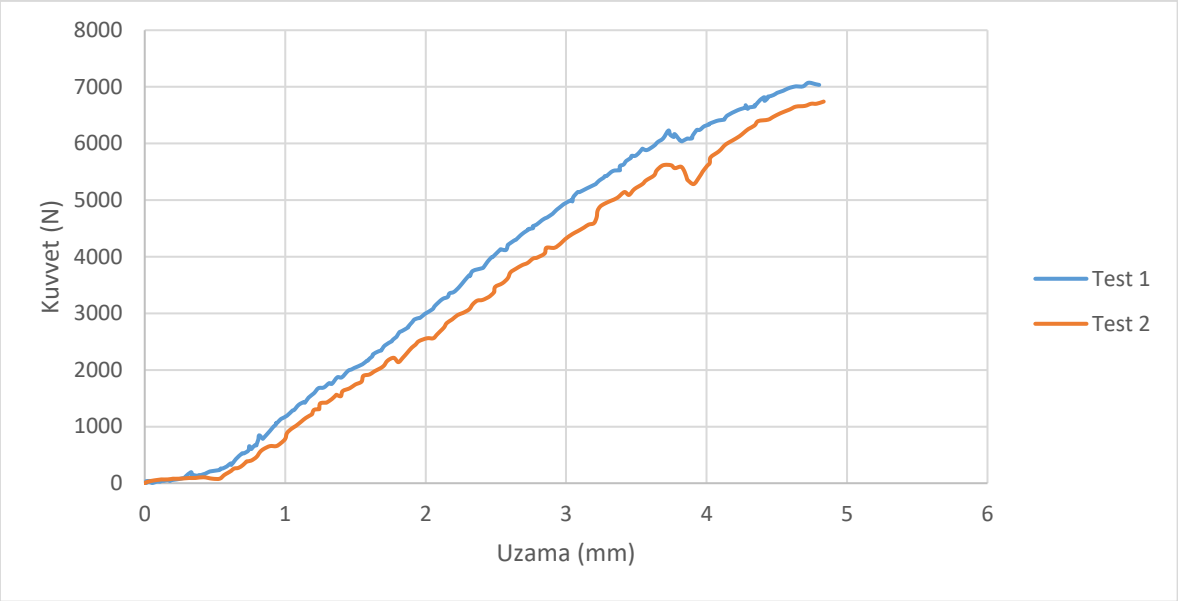
PLA malzemesiyle üretilen 2 adet parça ayrı ayrı test edilmiştir. Sonuçlar Çizelge 5.16'da belirtilmiştir. Parçaların çekme testi prosedürü Resim 5.37'de belirtilmiştir. Şekil 5.15'te test parçalarının yük-uzama grafiği yer almaktadır.

Çizelge 5.16. PLA+ malzemeden üretilen parçaların çekme testi sonuçları

Parametre	Parça 1	Parça **2**	Ortalama
Maksimum yük (N)	7042,0	6740,0	6891,0
Akma yükü (N)	4621,0	4429,0	4525,0
Kopma yükü (N)	7038,0	6733,0	6885,5
Gerilme dayanımı (N/mm^2)	31,30	29,96	30,63
Akma dayanımı (N/mm^2)	20,54	19,68	20,11
Kopma dayanımı (N/mm^2)	31,28	29,92	30,6



Resim 5.37. PLA+ malzemesinden üretilen parçaların çekme testi: (a) parça 1 testten önce; (b) parça 1 testten sonra; (c) parça 2 testten önce; (d) parça 2 testten sonra



Şekil 5.15. PLA+ malzemesinden üretilen parçaların çekme testi grafiği:
(1) parça 1; (2) parça 2

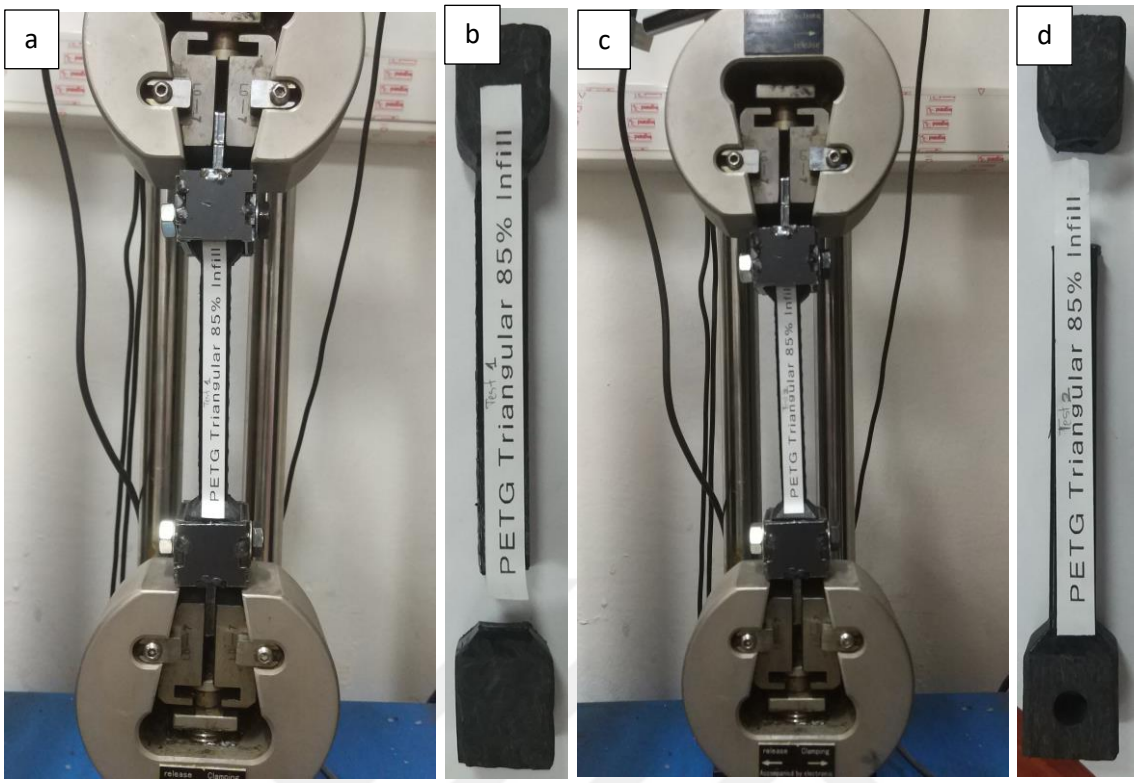
5.2.2. PETG malzemesiyle üretilen parçanın çekme testi

PETG malzemesiyle üretilen 2 adet parça ayrı ayrı test edilmiştir. Sonuçlar Çizelge 5.17'de belirtilmiştir. Parçaların çekme testi prosedürü Resim 5.38'de belirtilmiştir. Şekil 5.16'da test parçalarının yük-uzama grafiği yer almaktadır.

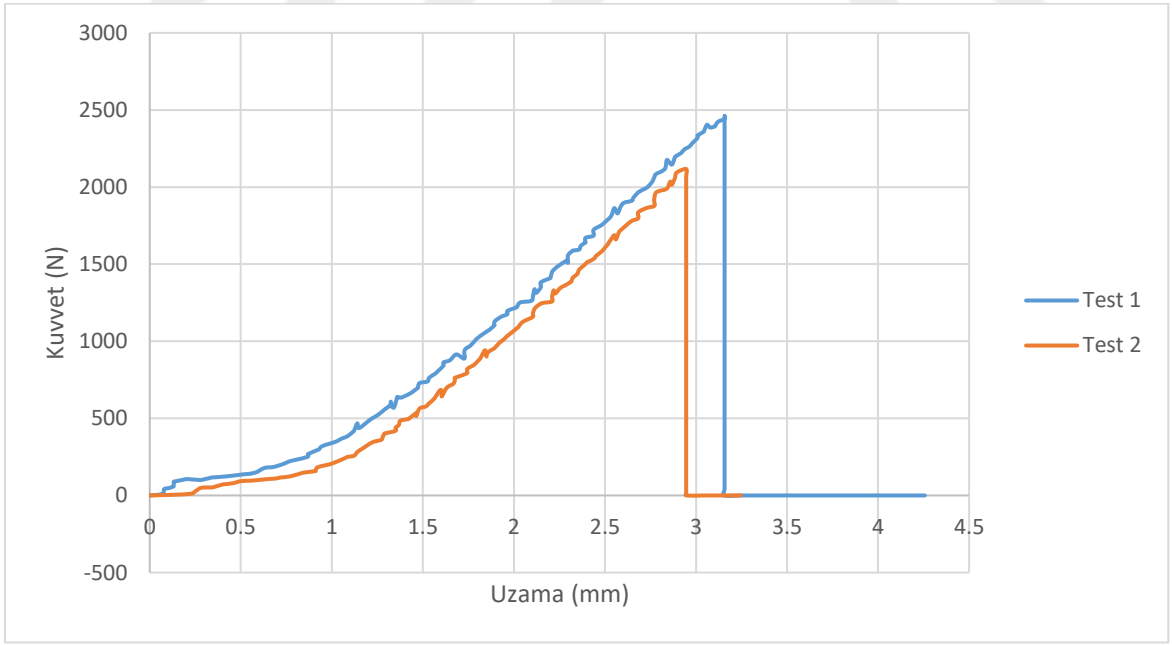
Çizelge 5.17. PETG malzemeden üretilen parçaların çekme testi sonuçları

Parametre	Parça 1	Parça 2	Ortalama
Maksimum yük (N)	2463,0	2117,0	2290,0
Akma yükü (N)	1600,95	1376,05	1488,5
Kopma yükü (N)	4,0	1,0	2,5
Gerilme dayanımı (N/mm^2)	10,95	9,41	10,18
Akma dayanımı (N/mm^2)	7,12	6,12	6,62
Kopma dayanımı (N/mm^2)	0,018	0,004	0,011

Kopma dayanımının düşük çıkma sebebi katmanlı yapının aynı anda değil, farklı aşamalarda kopmasıdır. En son kopan kısım parça genişliğinin %10'unu geçmediği için kopma dayanımı da düşük çıkmıştır.



Resim 5.38. PETG malzemesinden üretilen parçaların çekme testi: (a) parça 1 testten önce; (b) parça 1 testten sonra; (c) parça 2 testten önce; (d) parça 2 testten sonra



Şekil 5.16. PETG malzemesinden üretilen parçaların çekme testi grafiği: (1) parça 1; (2) parça 2

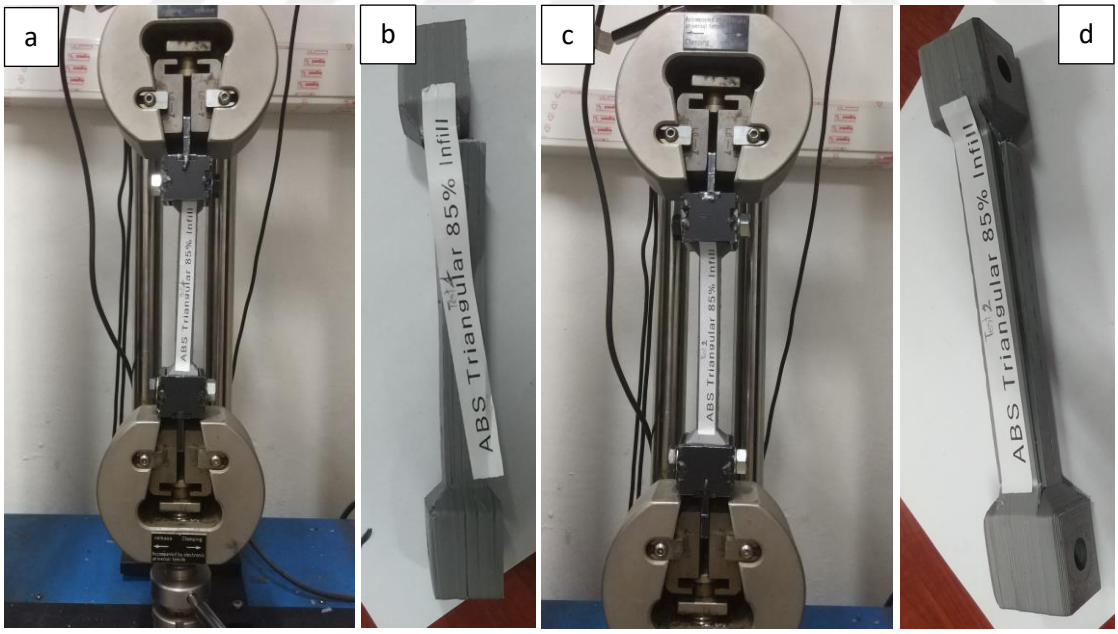
5.2.3. ABS malzemesiyle üretilen parçanın çekme testi

ABS malzemesiyle üretilen 2 adet parça ayrı ayrı test edilmiştir. Sonuçlar Çizelge 5.18'de belirtilmiştir. Parçaların çekme testi prosedürü Resim 5.39'da belirtilmiştir. Şekil 5.17'de test parçalarının yük-uzama grafiği yer almaktadır.

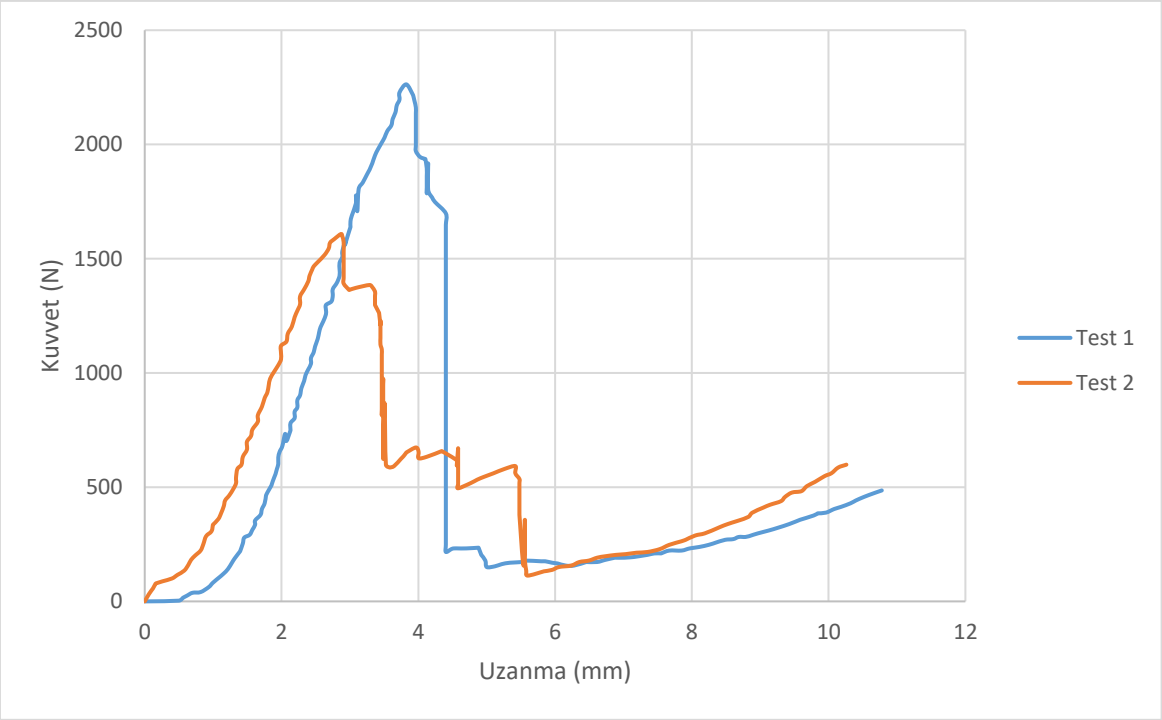
Çizelge 5.18. ABS malzemeden üretilen parçaların çekme testi sonuçları

Parametre	Parça 1	Parça 2	Ortalama
Maksimum yük (N)	1608,0	2263,0	1935,5
Akma yükü (N)	1172,0	1543,0	1357,5
Kopma yükü (N)	482,0	594,0	538,0
Gerilme dayanımı (N/mm^2)	7,15	10,06	8,61
Akma dayanımı (N/mm^2)	5,21	6,86	6,04
Kopma dayanımı (N/mm^2)	2,14	2,64	2,39

Kopma dayanımının düşük çıkma sebebi katmanlı yapının aynı anda değil, farklı aşamalarda kopmasıdır. En son kopan kısım parça genişliğinin %20'sini geçmediği için kopma dayanımı da düşük çıkmıştır.



Resim 5.39. ABS malzemesinden üretilen parçaların çekme testi: (a) parça 1 testten önce; (b) parça 1 testten sonra; (c) parça 2 testten önce; (d) parça 2 testten sonra



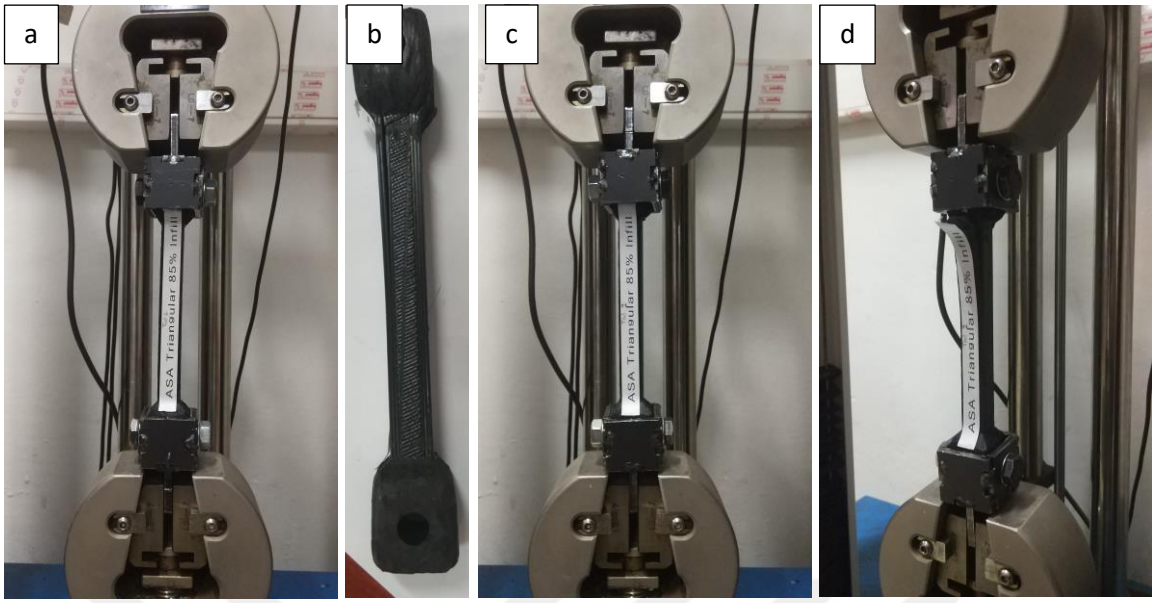
Şekil 5.17. ABS malzemesinden üretilen parçaların çekme testi grafiği:
(1) parça 1; (2) parça 2

5.2.4. ASA malzemesiyle üretilen parçanın çekme testi

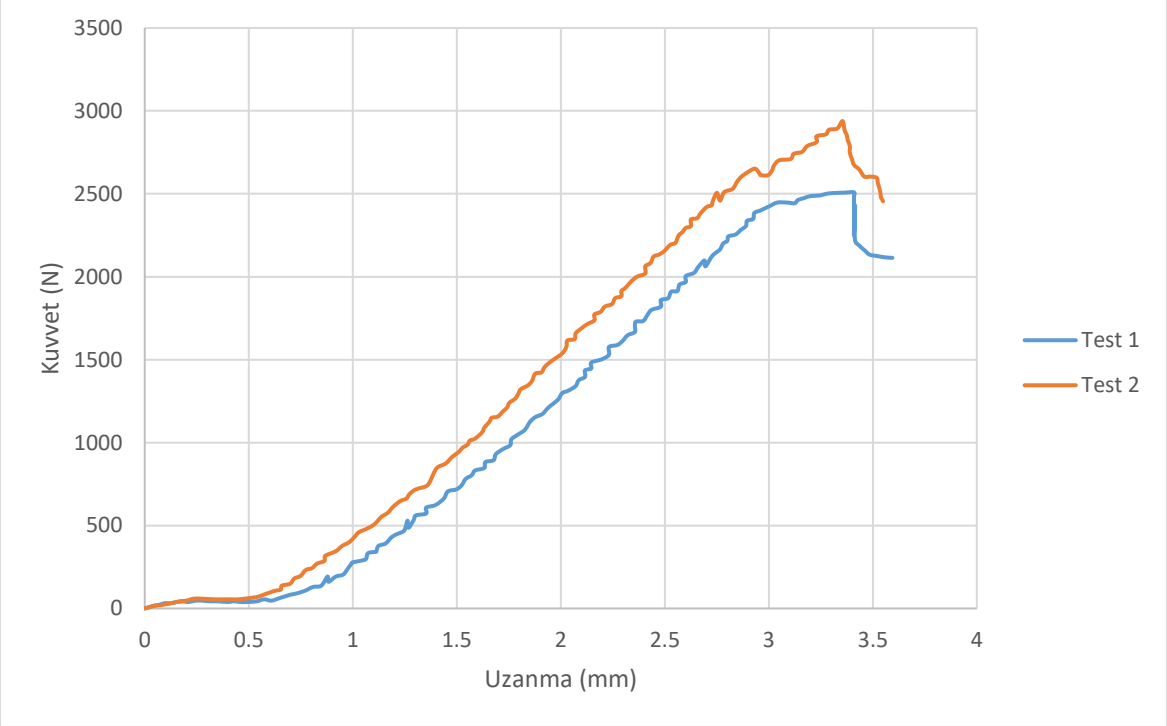
ASA malzemesiyle üretilen 2 adet parça ayrı ayrı test edilmiştir. Sonuçlar Çizelge 5.19'da belirtilmiştir. Parçaların çekme testi prosedürü Resim 5.40'da belirtilmiştir. Şekil 5.18'de test parçalarının yük-uzama grafiği yer almaktadır.

Çizelge 5.19. ASA malzemeden üretilen parçaların çekme testi sonuçları

Parametre	Parça 1	Parça 2	Ortalama
Maksimum yük (N)	2509,0	2939,0	2724,0
Akma yükü (N)	1630,85	2310,0	1970,43
Kopma yükü (N)	2107,0	2451,0	2279,0
Gerilme dayanımı (N/mm^2)	11,15	13,06	12,11
Akma dayanımı (N/mm^2)	7,25	10,27	8,76
Kopma dayanımı (N/mm^2)	9,36	10,89	10,13



Resim 5.40. ASA malzemesinden üretilen parçaların çekme testi: (a) parça 1 testten önce; (b) parça 1 testten sonra; (c) parça 2 testten önce (d) parça 2 testten sonra



Şekil 5.18. ASA malzemesinden üretilen parçaların çekme testi grafiği: (1) parça 1; (2) parça 2

Çizelge 5.20'de çekme testlerinde her malzeme için kullanılan 2 adet test parçasının ortalama değerleri yer almaktadır. Sonuçlar incelendiğinde en yüksek dayanım değerlerine PLA+ malzemesiyle ulaşıldığı anlaşılmaktadır.

Çizelge 5.20. Çekme testlerinde farklı malzemelerle denenen test parçalarının sonuçlarının ortalaması

Parametre	PLA+	PETG	ABS	ASA
Maksimum yük (N)	6891,0	2290,0	1935,5	2724,0
Akma yükü (N)	4525,0	1488,5	1357,5	1970,43
Kopma yükü (N)	6885,5	2,5	538,0	2279,0
Gerilme dayanımı (N/mm^2)	30,63	10,18	8,61	12,11
Akma dayanımı (N/mm^2)	20,11	6,62	6,04	8,76
Kopma dayanımı (N/mm^2)	30,6	0,011	2,39	10,13

5.3. Basma Testi Sonuçları

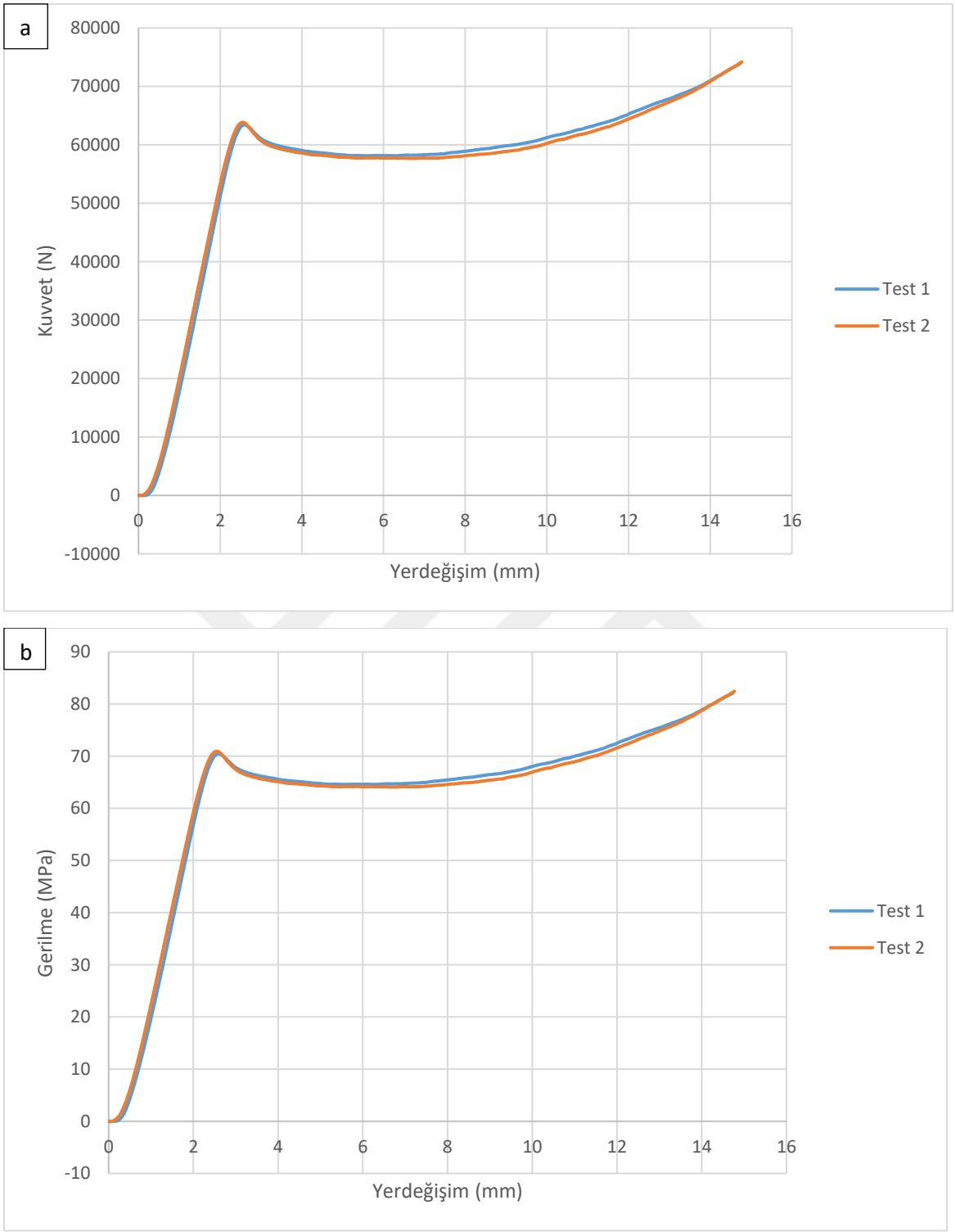
Triangular (üçgen) iç doluluk geometrisi ile ve %85 dolulukla PLA, PETG, ABS ve ASA malzemelerinin her birinden 2 adet parça üretilmiştir. Parçalar test edilmiş ve basma dayanımları belirlenmiştir.

5.3.1. PLA+ malzemesiyle üretilen parçaların basma testi

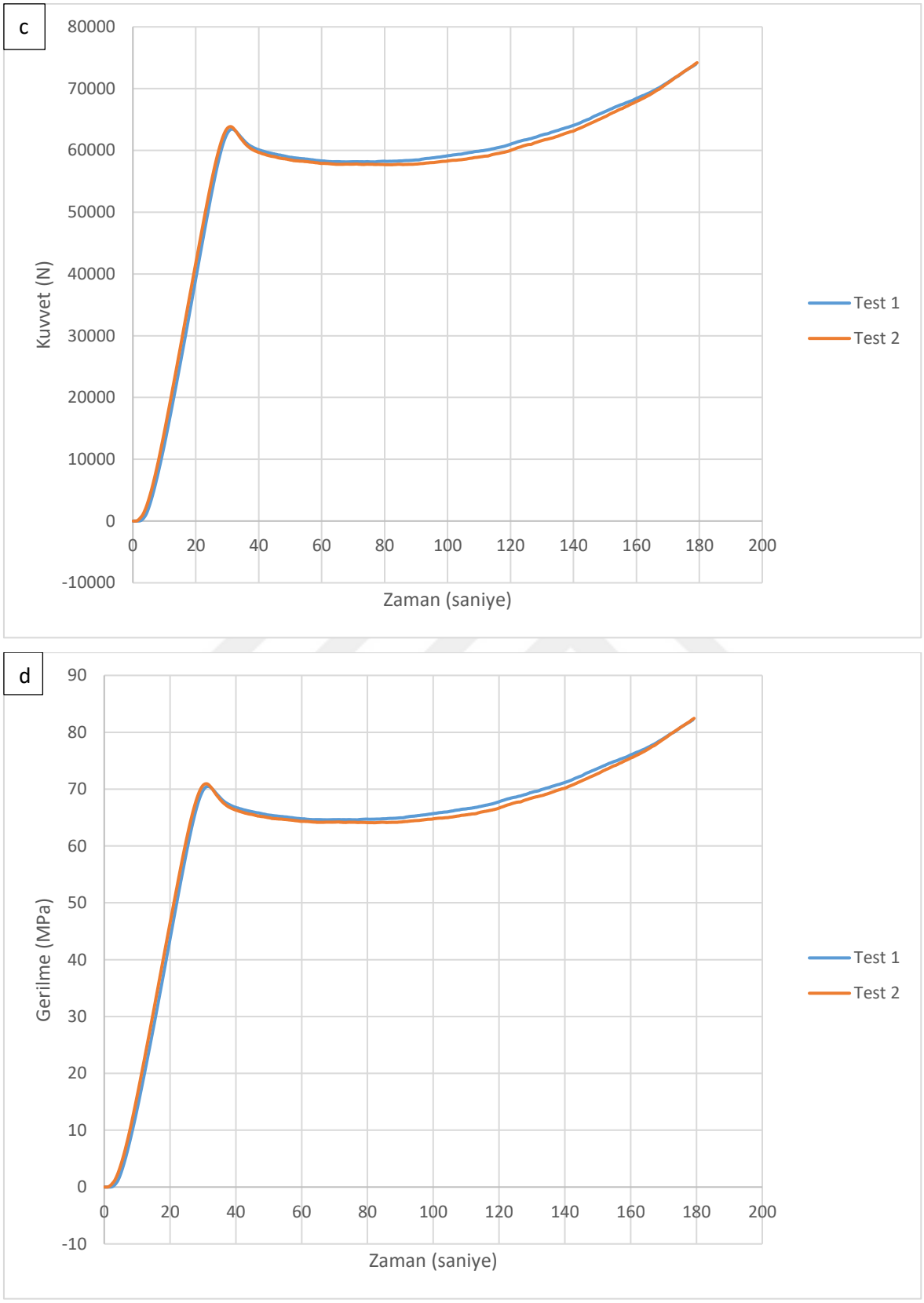
PLA+ malzemesiyle üretilen 2 adet parça ayrı ayrı test edilmiştir. Sonuçlar Çizelge 5.21'de belirtilmiştir. Grafiğe dikkat edilirse kuvvet ortalama 7,5 mm yerdeğişimden sonra giderek artmaktadır. Bunun sebebi iç doluluk deseninin tamamen sıkışıp katmanların üst üste binmesi ve baskıyı arttırmasıdır. Dolayısıyla 0-7,5 mm arası yerdeğişimde iç doluluk deseni özelliğini kaybetmediği için bu aralıktaki kuvvetlerin en yüksek değeri veri olarak alınmıştır. Parçaların basma testi prosedürü Resim 5.41'de belirtilmiştir. Şekil 5.19'da test parçalarının gerilim-zaman ve kuvvet-zaman grafiği yer almaktadır.

Çizelge 5.21. PLA+ malzemeden üretilen parçaların basma testi sonuçları

Parametre	Parça 1	Parça 2	Ortalama
Maksimum yük (N)	63437,82	63849,43	63643,63
Gerilme dayanımı (N/mm^2)	70,49	70,94	70,72

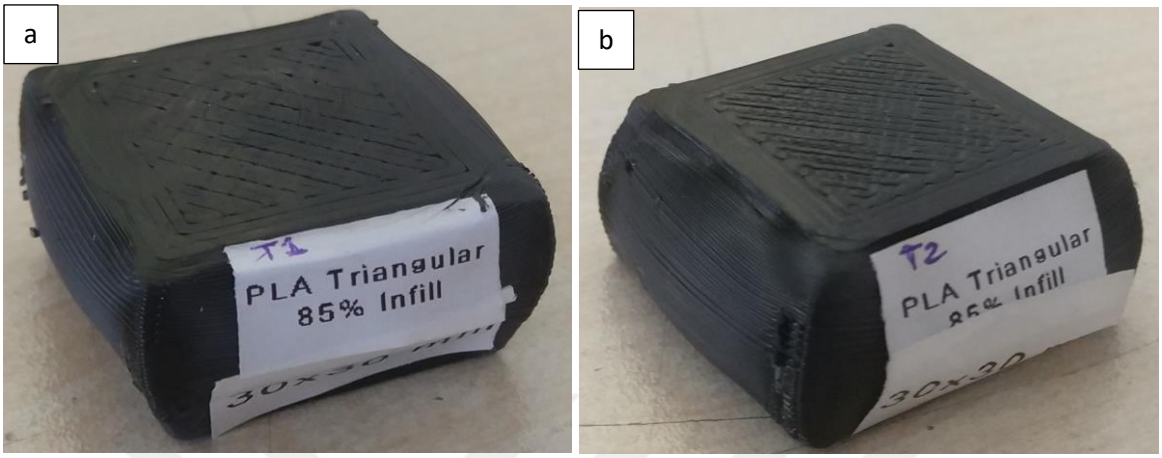


Şekil 5.19. PLA+ malzemesinden üretilen parçaların basma testi grafiği: (a) test parçalarının kuvvet-yerdeğişim grafiği; (b) test parçalarının gerilme-yerdeğişim grafiği; (c) test parçalarının kuvvet-zaman grafiği; (d) test parçalarının kuvvet-zaman grafiği



Şekil 5.19. (devam) PLA+ malzemesinden üretilen parçaların basma testi grafiği: (a) test parçalarının kuvvet-yerdeğişim grafiği; (b) test parçalarının gerilme-yerdeğişim

grafiği; (c) test parçalarının kuvvet-zaman grafiği; (d) test parçalarının kuvvet-zaman grafiği



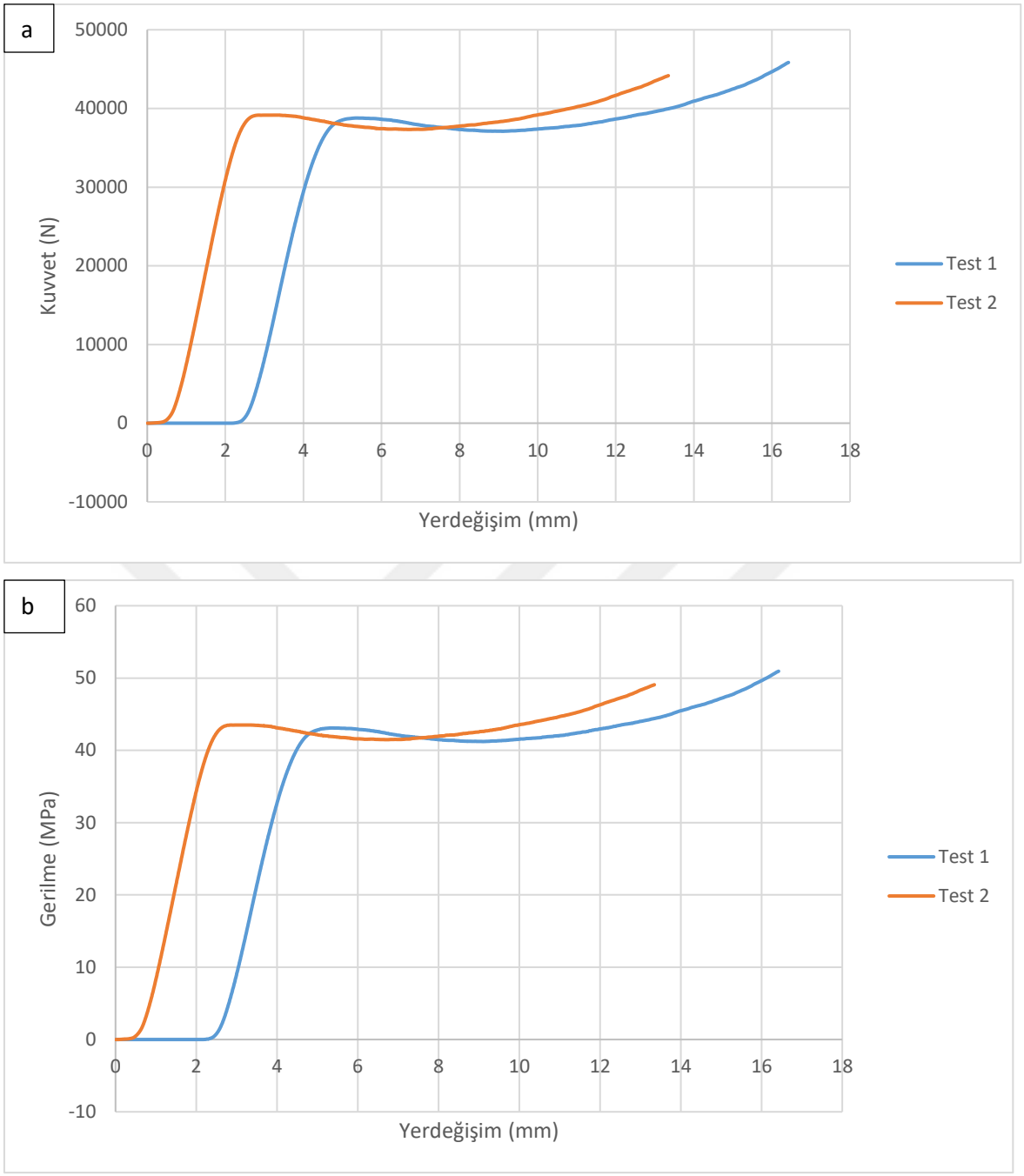
Resim 5.41. PLA+ malzemesinden üretilen parçaların basma testi: (a) parça 1 testten sonra; (b) parça 2 testten sonra

5.3.2. PETG malzemesiyle üretilen parçaların basma testi

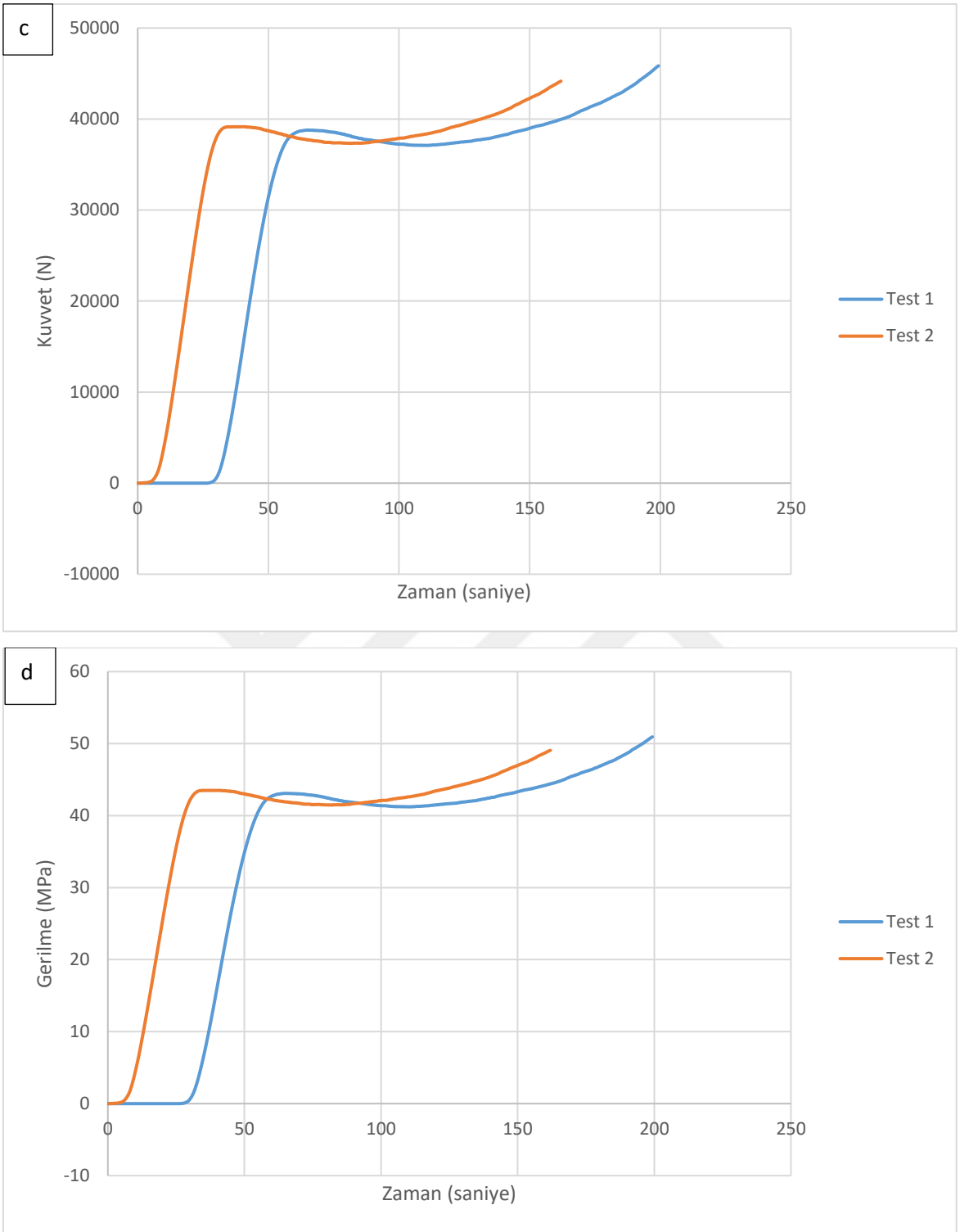
PETG malzemesiyle üretilen 2 adet parça ayrı ayrı test edilmiştir. Sonuçlar Çizelge 5.22'de belirtilmiştir. Grafiğe dikkat edilirse kuvvet ortalama 6,0 mm yerdeğişimden sonra giderek artmaktadır. Bunun sebebi iç doluluk deseninin tamamen sıkışıp katmanların üst üste binmesi ve baskıyı arttırmasıdır. Dolayısıyla 0-6,0 mm arası yerdeğişimde iç doluluk deseni özelliğini kaybetmediği için bu aralıktaki kuvvetlerin en yüksek değeri veri olarak alınmıştır. Parçaların basma testi prosedürü Resim 5.42'de belirtilmiştir. Şekil 5.20'de test parçalarının gerilim-zaman ve kuvvet-zaman grafiği yer almaktadır.

Çizelge 5.22. PETG malzemeden üretilen parçaların basma testi sonuçları

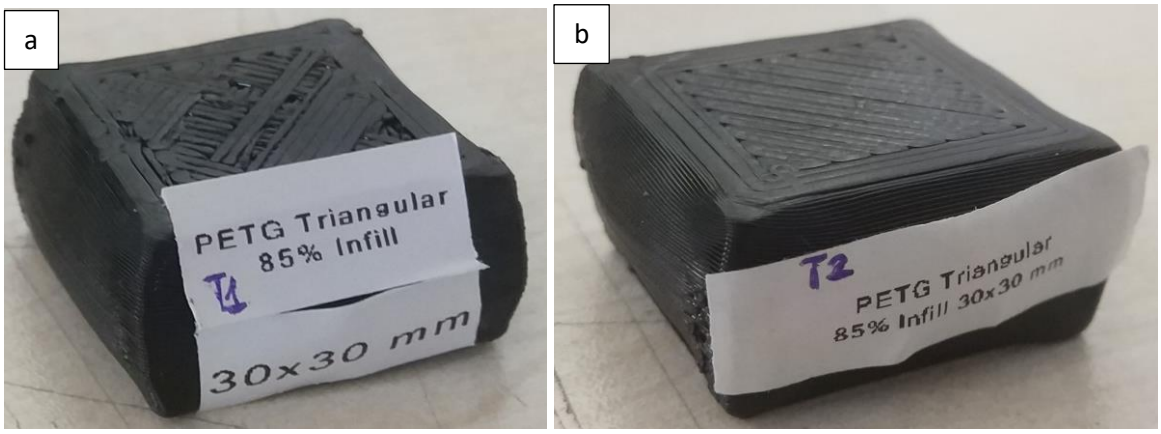
Parametre	Parça 1	Parça 2	Ortalama
Maksimum yük (N)	38785,45	39153,35	38969,4
Gerilme dayanımı (N/mm^2)	43,09	43,5	43,3



Şekil 5.20. PETG malzemesinden üretilen parçaların basma testi grafiği: (a) test parçalarının kuvvet-yerdeğişim grafiği; (b) test parçalarının gerilme-yerdeğişim grafiği; (c) test parçalarının kuvvet-zaman grafiği; (d) test parçalarının kuvvet-zaman grafiği



Şekil 5.20. (devam) PETG malzemesinden üretilen parçaların basma testi grafiği: (a) test parçalarının kuvvet-yerdeğişim grafiği; (b) test parçalarının gerilme-yerdeğişim grafiği; (c) test parçalarının kuvvet-zaman grafiği; (d) test parçalarının kuvvet-zaman grafiği



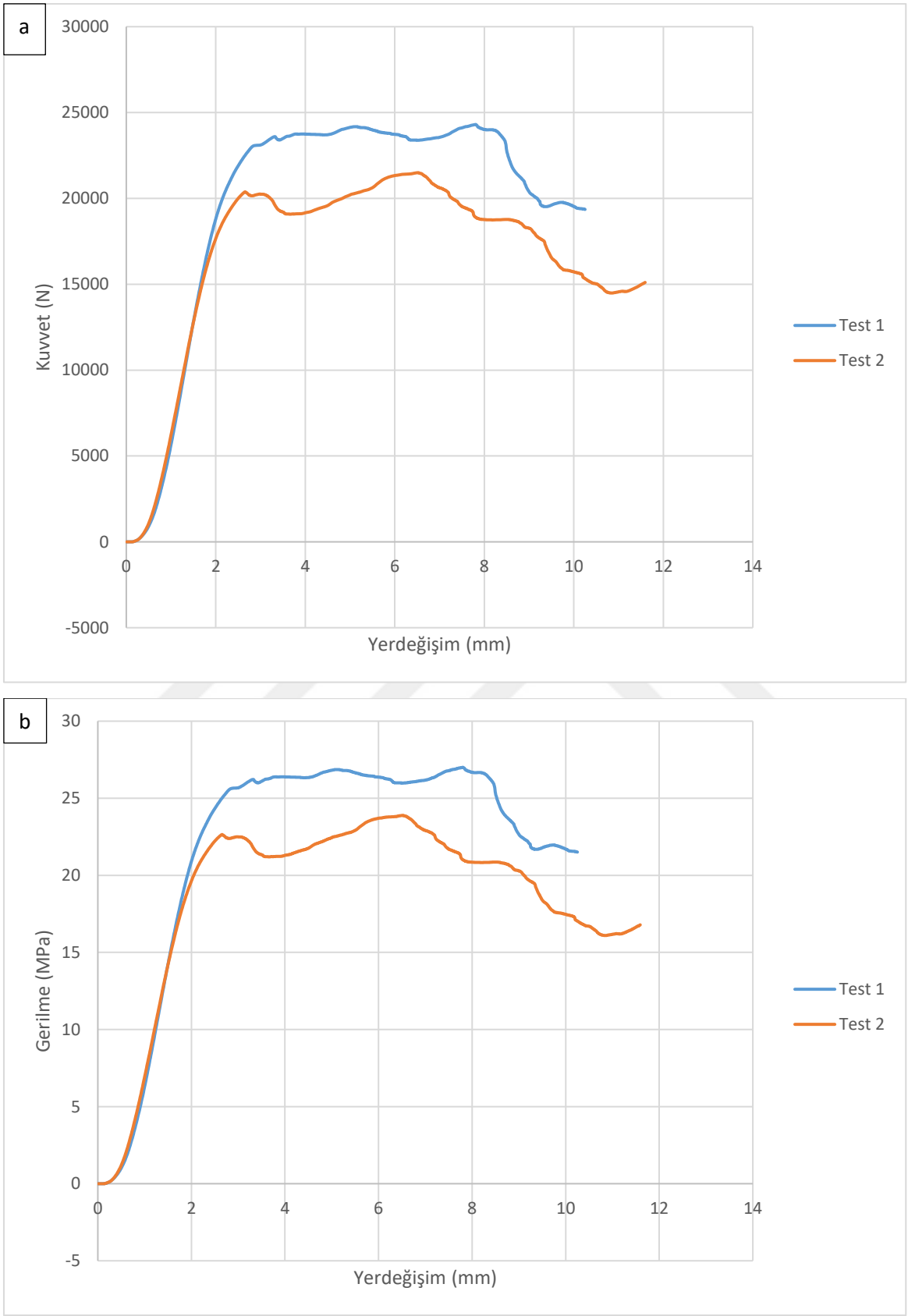
Resim 5.42. PETG malzemesinden üretilen parçaların basma testi: (a) parça 1 testten sonra; (b) parça 2 testten sonra

5.3.3. ABS malzemesiyle üretilen parçaların basma testi

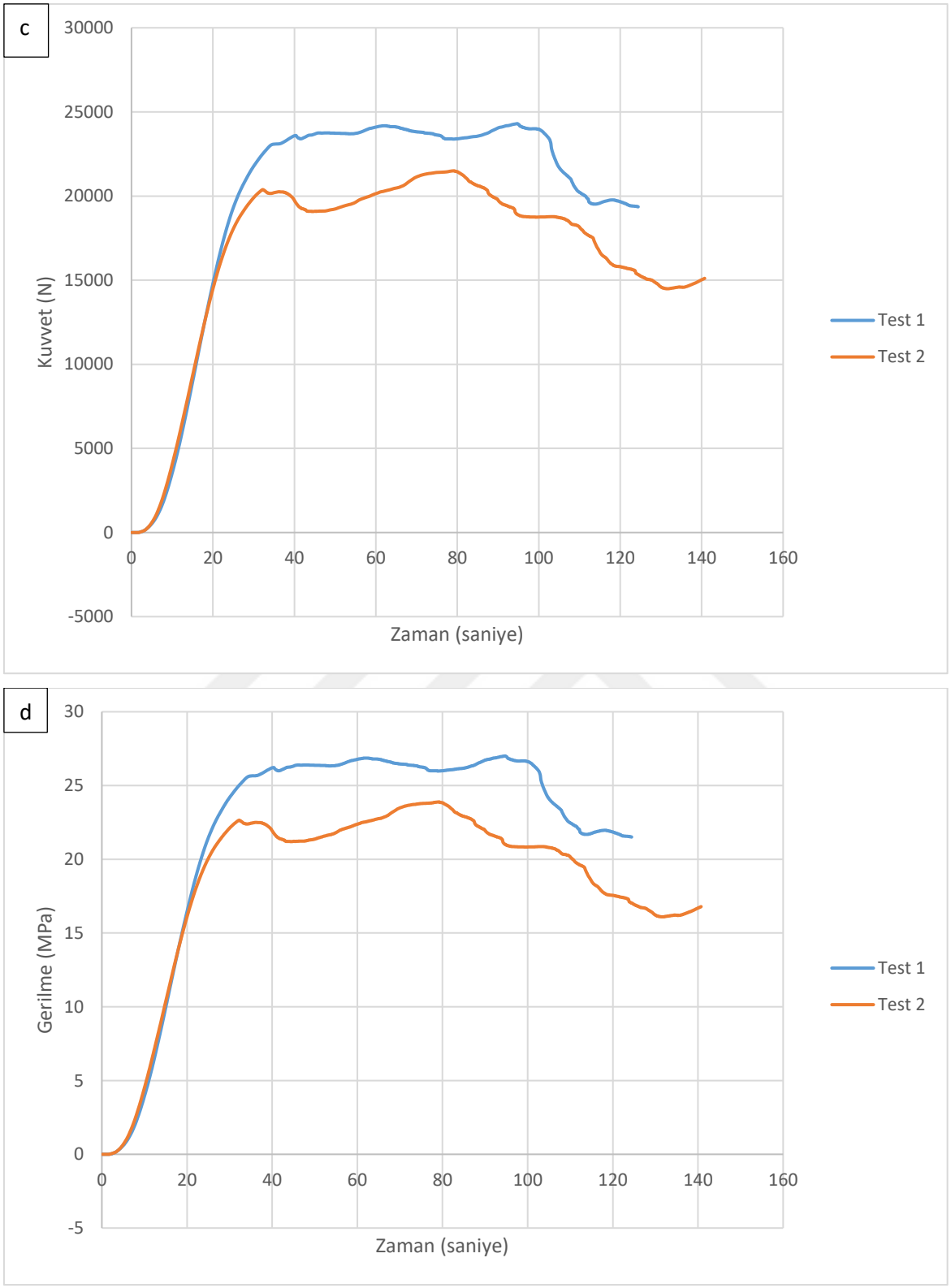
ABS malzemesiyle üretilen 2 adet parça ayrı ayrı test edilmiştir. Sonuçlar Çizelge 5.23'te belirtilmiştir. Grafiğe dikkat edilirse kuvvet ilk testte ortalama 7,0 mm, ikinci testte 3,8 mm yerdeğişimden sonra giderek artmaktadır. Bunun sebebi iç doluluk deseninin tamamen sıkışıp katmanların üst üste binmesi ve baskıyı arttırmasıdır. Dolayısıyla ilk testte 0-7,0 mm, ikinci testte 0-3,8 mm arası yerdeğişimde iç doluluk deseni özelliğini kaybetmediği için bu aralıktaki kuvvetlerin en yüksek değeri veri olarak alınmıştır. Parçaların basma testi prosedürü Resim 5.43'te belirtilmiştir. Şekil 5.21'de test parçalarının gerilim-zaman ve kuvvet-zaman grafiği yer almaktadır.

Çizelge 5.23. ABS malzemeden üretilen parçaların basma testi sonuçları

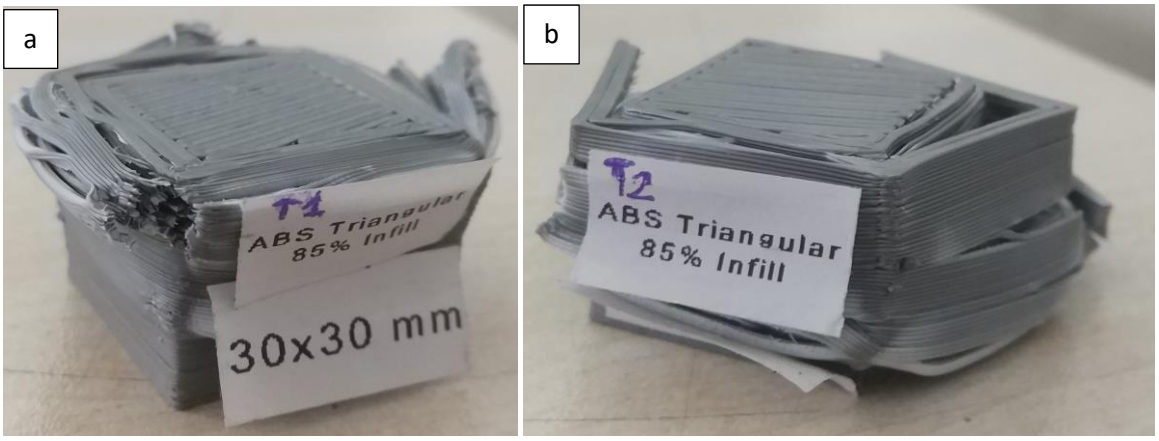
Parametre	Parça 1	Parça 2	Ortalama
Maksimum yük (N)	24305,2	21498,81	22902,01
Gerilme dayanımı (N/mm^2)	27,01	23,89	25,45



Şekil 5.21. ABS malzemesinden üretilen parçaların basma testi grafiği: (a) test parçalarının kuvvet-yerdeğişim grafiği; (b) test parçalarının gerilme-yerdeğişim grafiği; (c) test parçalarının kuvvet-zaman grafiği; (d) test parçalarının kuvvet-zaman grafiği



Şekil 5.21. (devam) ABS malzemesinden üretilen parçaların basma testi grafiği: (a) test parçalarının kuvvet-yerdeğişim grafiği; (b) test parçalarının gerilme-yerdeğişim grafiği; (c) test parçalarının kuvvet-zaman grafiği; (d) test parçalarının kuvvet-zaman grafiği



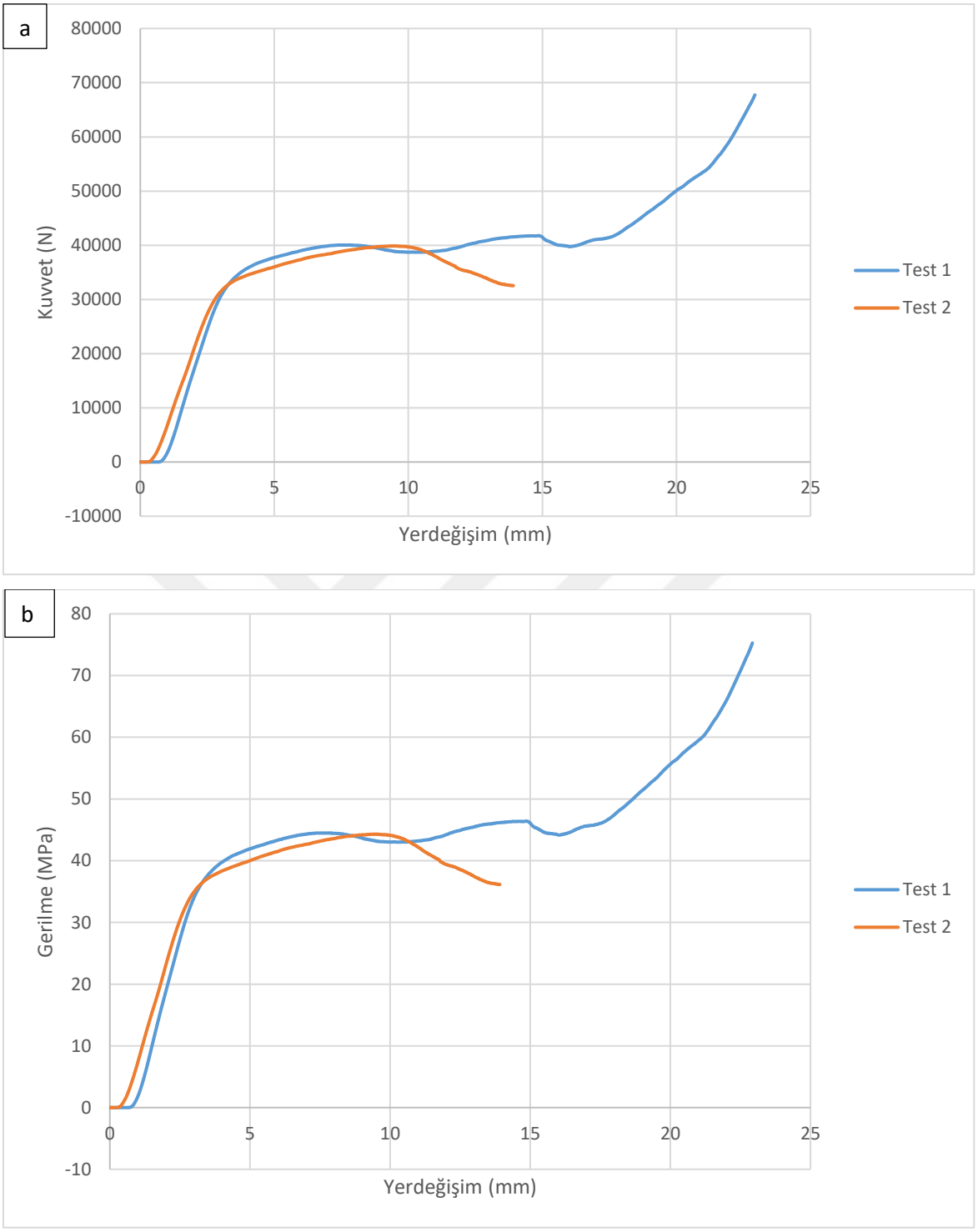
Resim 5.43. ABS malzemesinden üretilen parçaların basma testi: (a) parça 1 testten sonra; (b) parça 2 testten sonra

5.3.4. ASA malzemesiyle üretilen parçaların basma testi

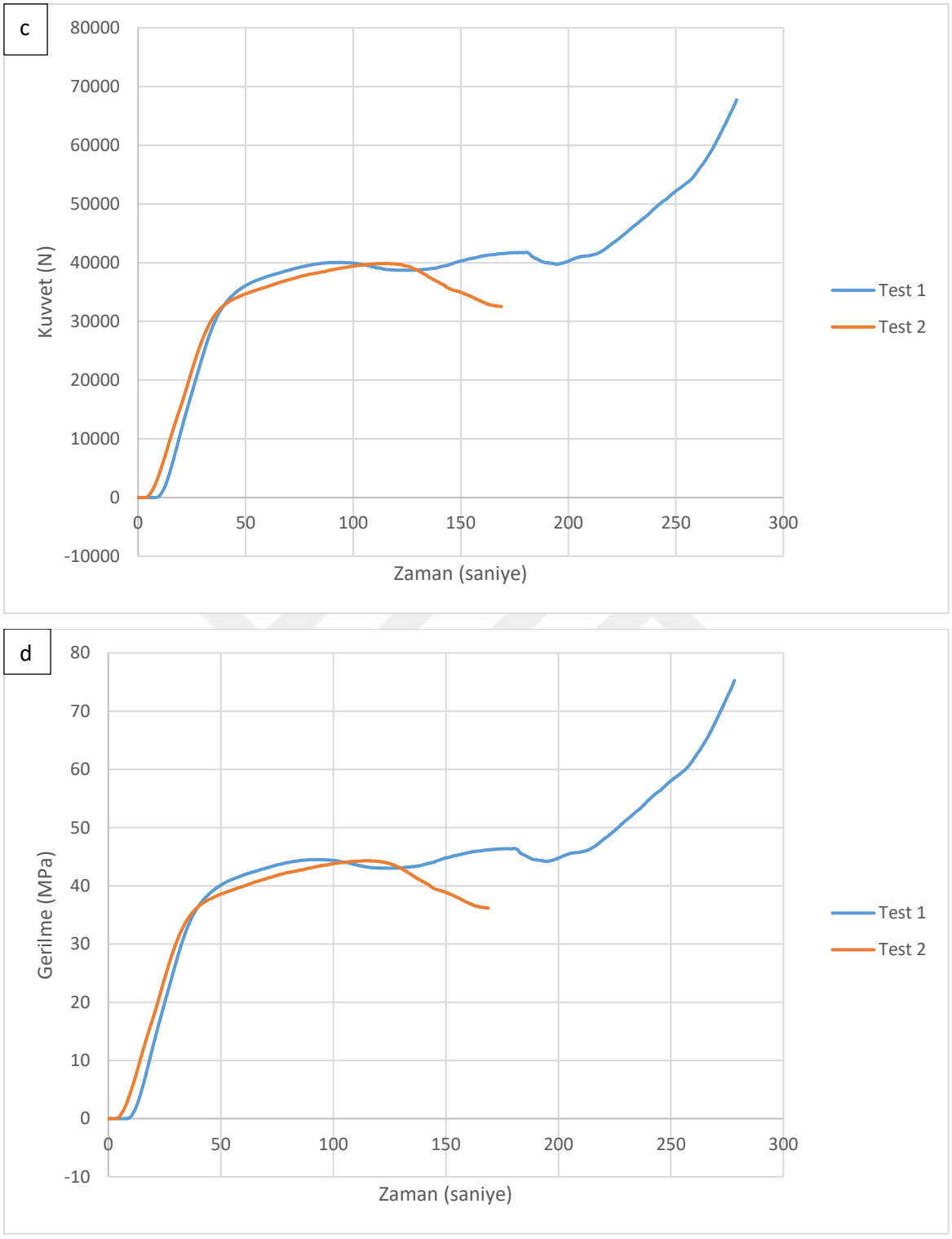
ASA malzemesiyle üretilen 2 adet parça ayrı ayrı test edilmiştir. Sonuçlar Çizelge 5.24'te belirtilmiştir. Grafiğe dikkat edilirse kuvvet ilk testte ortalama 10,0 mm yerdeğişimden sonra giderek artmaktadır. Bunun sebebi iç doluluk deseninin tamamen sıkışıp katmanların üst üste binmesi ve baskıyı arttırmasıdır. Dolayısıyla 0-10,0 mm arası yerdeğişimde iç doluluk deseni özelliğini kaybetmediği için bu aralıktaki kuvvetlerin en yüksek değeri veri olarak alınmıştır. İkinci testte de veriler 0-12 mm yerdeğişim aralığında önemlidir. Parçaların basma testi prosedürü Resim 5.44'te belirtilmiştir. Şekil 5.22'de test parçalarının gerilim-zaman ve kuvvet-zaman grafiği yer almaktadır.

Çizelge 5.24. ASA malzemeden üretilen parçaların basma testi sonuçları

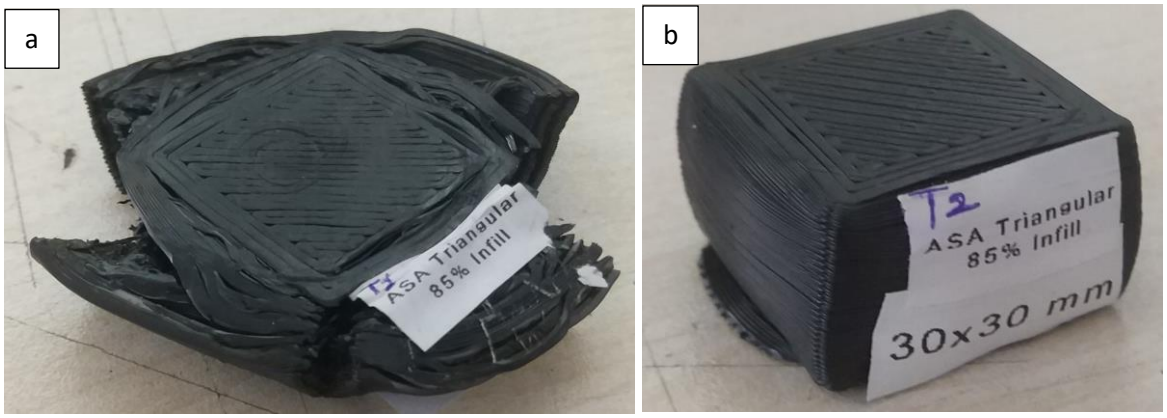
Parametre	Parça 1	Parça 2	Ortalama
Maksimum yük (N)	40500,0	39875,75	40187,88
Gerilme dayanımı (N/mm^2)	45,0	44,31	44,66



Şekil 5.22. ASA malzemesinden üretilen parçaların basma testi grafiği: (a) test parçalarının kuvvet-yerdeğişim grafiği; (b) test parçalarının gerilme-yerdeğişim grafiği; (c) test parçalarının kuvvet-zaman grafiği; (d) test parçalarının kuvvet-zaman grafiği



Şekil 5.22. (devam) ASA malzemesinden üretilen parçaların basma testi grafiği: (a) test parçalarının kuvvet-yerdeğişim grafiği; (b) test parçalarının gerilme-yerdeğişim grafiği; (c) test parçalarının kuvvet-zaman grafiği; (d) test parçalarının kuvvet-zaman grafiği



Resim 5.44. ASA malzemesinden üretilen test parçalarının basma testi: (a) parça 1 testten sonra; (b) parça 2 testten sonra

Çizelge 5.25'te basma testlerinde her malzeme için kullanılan 2 adet test parçasının ortalama değerleri yer almaktadır. Sonuçlar incelendiğinde en yüksek dayanım değerlerine PLA+ malzemesiyle ulaşıldığı anlaşılmaktadır.

Çizelge 5.25. Basma testlerinde farklı malzemelerle denenen test parçalarının sonuçlarının ortalaması

Parametre	PLA+	PETG	ABS	ASA
Maksimum yük (N)	63643,63	38969,4	22902,01	40187,88
Gerilme dayanımı (N/mm^2)	70,72	43,3	25,45	44,66

5.4. Birleşik Gerilme Hesaplaması

Torsiyon ve çekme testlerinin sonuçları kullanılarak AB oranı (aspect ratio) burulma ve birleşik gerilmeyi hesaplamak için kullanılabilir. Burada, birleşik gerilme genellikle von Mises gerilmesi olarak da adlandırılır.

Burulma testinde sadece PLA+ malzemesi kullanıldığı için birleşik gerilme sadece %85 iç doluluk oranı ve üçgen iç doluluk geometrisiyle basılan parçaların basma ve çekme test sonuçları üzerinden hesaplanıştır.

Kare kesit alanı için burulmada maksimum kesme gerilmesi aşağıdaki formül ile hesaplanabilir:

$$\tau_{max} = \frac{16T_{max}}{3\pi d^2} = \frac{16 * 17{,}87}{3 * 3{,}14 * 13^2} = 0{,}18\ {}^{N}/_{mm^2} = 0{,}18\ MPa$$

Burada:

τ_{max} = Kare kesit alanında maksimum kesme gerilmesi

T_{max}= Maksimum tork

d = Kare kesit alanının uzunluğu

Birleşik gerilme hesaplaması için genellikle aşağıdaki denklem kullanılır:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{\sigma^2 + 3{\tau_{max}}^2}{2}} = \sqrt{\frac{30{,}6^2 + 3 * 0{,}18^2}{2}} = 21{,}64\ {}^{N}/_{mm^2} = 21{,}64\ MPa$$

Burada:

σ_{VM} = von Mises gerilmesi

σ = Normal gerilme (çekme testinde kopma gerilmesi) değeri

τ_{max} = Kesme gerilmesi değeri

Birleşik gerilme basma testi sonucundaki gerilme değeri kullanılarak hesaplandığında:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{\sigma^2 + 3{\tau_{max}}^2}{2}} = \sqrt{\frac{70{,}72^2 + 3 * 0{,}18^2}{2}} = 50{,}01\ {}^{N}/_{mm^2} = 50{,}01\ MPa$$

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Gittikçe gelişen 3B baskı teknolojisiyle ilgili her geçen gün yapılan tez, araştırma ve makale çalışmaları artmaktadır. Bu tezin de ilgili alanda var olan araştırmalara deneysel açıdan katkı sağlaması hedeflenmektedir.

Tez kapsamında yapılan testlerden önce literatür araştırması yapılmıştır. Literatür araştırmasında 3B FDM baskı teknolojisiyle ilgili çok çeşitli çalışmaların olduğu ortaya çıkmıştır. Araştırma kapsamında değerlendirilen çalışmalar genellikle 3B baskı parametrelerinin üretilen parçaların yapısal dayanımını nasıl etkilediğine dair bilgiler içermektedir. Bu araştırmalar sayesinde 3B FDM baskıyla üretilen parçaların mekanik etkileyen ana parametreler belirlenmiştir. Bu parametreleri özet olarak sıralandığında:

- Tabla sıcaklığı
    - 3B FDM baskıda tabla sıcaklığı, yapısal dayanımı önemli ölçüde etkileyebilir. Tabla sıcaklığı, tablaya bağlı olan ilk katmanın malzeme ile sağlam bir şekilde yapışmasını sağlar. Doğru tabla sıcaklığı, katmanların istenen şekilde birleşmesini ve malzemenin tablaya sıkıca bağlanmasını sağlar, bu da daha güçlü ve daha dayanıklı parçaların üretilmesine yardımcı olur. Ancak yanlış tabla sıcaklığı, tablaya yetersiz yapışma veya malzemenin yeterince düzgün bir şekilde birleşmemesi gibi sorunlara neden olabilir, bu da parçanın yapısal dayanımını azaltabilir. Dolayısıyla, uygun tabla sıcaklığının belirlenmesi ve kontrol edilmesi, istenilen yapısal dayanımın elde edilmesi için kritiktir.

      Literatür araştırmasında Aliheidari, N. ve arkadaşlarının yaptıkları “The impact of nozzle and bed temperatures on the fracture resistance of FDM printed materials” isimli çalışmadan elde edilen sonuçlar dikkate alınarak tez kapsamında malzemeye uygun en yüksek tabla sıcaklığı ayarlanmıştır.

- Baskı hızı
    - 3B FDM baskıda baskı hızı, yapısal dayanımı etkileyebilir. Baskı hızı, malzemenin katmanlar arasında birleşme sürecini ve soğuma sürecini doğrudan etkiler. Daha yavaş bir baskı hızı genellikle daha iyi bir birleşme ve daha homojen bir yapı

oluşturur, bu da daha yüksek yapısal dayanım sağlayabilir. Ancak daha yavaş bir baskı hızı, baskı süresini artırarak üretim süresini uzatabilir ve maliyeti artırabilir. Öte yandan, daha hızlı bir baskı hızı, üretim süresini azaltabilir ancak malzemenin katmanlar arasındaki birleşme kalitesini etkileyebilir ve dolayısıyla yapısal dayanımı azaltabilir. Bu nedenle, baskı hızının dikkatli bir şekilde ayarlanması, istenilen yapısal dayanımın elde edilmesinde önemlidir.

Literatür araştırmasında Dave Harshit ve arkadaşlarının yaptıkları "Compressive Strength of PLA based Scaffolds: Effect of Layer Height, Infill Density and Print Speed" isimli çalışmadan elde edilen sonuçlar dikkate alınarak tez kapsamında malzemeye uygun ortalama baskı hızı tercih edilmiştir.

- Nozul çapı
  - 3B FDM baskıda nozul çapı, yapısal dayanımı belirgin şekilde etkiler. Nozul çapı, malzemenin tabaka kalınlığını ve dolayısıyla parçanın iç doluluğunu ve yüzey kalitesini doğrudan etkiler. Daha geniş bir nozul çapı, daha kalın tabakaların oluşturulmasına neden olabilir, bu da parçanın iç doluluğunu artırabilir ancak yüzey kalitesini azaltabilir. Dar bir nozul çapı ise daha ince tabakaların oluşturulmasına olanak sağlar, bu da daha pürüzsüz yüzeyler ve daha ince detaylar elde edilmesine imkan tanır, ancak yapısal dayanımı azaltabilir. Dolayısıyla, nozul çapının doğru seçimi, parçanın yapısal dayanımını etkileyebilir ve baskı sonucunu önemli ölçüde belirleyebilir.

    Literatür araştırmasında Kiński, W. ve arkadaşlarının yaptıkları "Influence of the printing nozzle diameter on tensile strength of produced 3B models in FDM Technology" isimli çalışmanın sonucu baz alındığında nozul çapı 0.5 mm'den büyük olmalıdır. Nozul çapı büyüdükçe yapısal dayanım etkisi de artmaktadır. Ama bu artış %100 doluluk oranında gözlemlenmemektedir. 3.1.1 kısmındaki sonuçtan yola çıkarak iç doluluk oranı %65-%85 arası değişeceği için bu tez çalışmasında nozul çapı sabit 1 mm olarak kabul edilmiştir.

- Nozul sıcaklığı
  - 3B FDM baskıda nozul sıcaklığı, yapısal dayanımı önemli ölçüde etkiler. Nozul sıcaklığı, malzemenin erime ve birleşme sürecini doğrudan etkiler. Doğru nozul

sıcaklığı, malzemenin yeterince erimesini ve birleşmesini sağlar, bu da daha güçlü ve daha dayanıklı parçaların üretilmesine imkan tanır. Ancak yanlış nozul sıcaklığı, malzemenin düzgün bir şekilde birleşmemesine veya erime derecesinin dengesiz olmasına neden olabilir, bu da parçanın yapısal dayanımını azaltabilir. Optimum nozul sıcaklığı, kullanılan malzemenin özelliklerine, parçanın geometrisine ve istenen mekanik özelliklere bağlı olarak değişir. Deneme yanılma yoluyla, en iyi yapısal dayanımı elde etmek için uygun nozul sıcaklığını bulmak önemlidir.

Literatür araştırmasında Behzadnasab Morteza ve arkadaşlarının yaptıkları "Effects of 3B printer nozzle head temperature on the physical and mechanical properties of PLA based product" isimli çalışmanın sonucuna dayanarak yüksek sıcaklıkta baskı almak katmanların bir birine daha iyi tutunmasını sağladığı belirlenmiştir. Dolayısıyla bu tez çalışmasında kullanılan her malzemeye uygun daha yüksek baskı sıcaklığı tercih edilmiştir.

- İç doluluk deseni
  - 3B FDM baskıda iç doluluk deseninin yapısal dayanımı oldukça etkiler. İç doluluk deseni, parçanın dayanıklılığını doğrudan etkiler. İyi tasarlanmış bir iç doluluk deseni, parçanın yükleri daha iyi dağıtmasına ve böylece daha yüksek bir yapısal dayanım sağlamasına olanak tanır. Bununla birlikte, yanlış veya zayıf bir iç doluluk deseni, parçanın dayanıklılığını azaltabilir ve istenmeyen zayıf noktalara neden olabilir. İç doluluk deseni, baskı maliyetlerini ve sürelerini de etkileyebilir. Bu nedenle, yapısal dayanımı optimize etmek için iç doluluk deseninin doğru bir şekilde seçilmesi önemlidir.

    Literatür araştırmasında farklı makaleler bu konuyla ilgili incelenmiştir:

    - Marton Tamas Birosz, Daniel Ledenyak, Matyas Ando'nun (2022) yapmış olduğu "Effect of FDM infill patterns on mechanical properties" isimli çlaışmada honeycomb (bal peteği) doluluk geometrisinin en yüksek mukavemet ve en düşük elastik deformasyon modülüne sahip olduğu tespit edilirken, gyroid (jiroskopik) doluluk geometrisinin en yüksek elastik deformasyon modülüne sahip olduğu bulunmuştur. Grid (ızgara) doluluk geometrisi ise en düşük mukavemete sahip olmuştur.

- S. Kain, J.V.Ecker, A. Haider, M. Musso, A. Petutschnigg'in (2019) yaptığı "Effects of the infill pattern on mechanical properties of fused layer modeling (FLM) 3B printed wood/polylactic acid (PLA) composites" isimli makalede hücresel ve kare doluluk geometrileri, en yüksek çekme dayanımı ve elastisite modülüne sahip olurken, çizgi ve üçgen doluluk geometrileri en düşük çekme dayanımı ve elastisite modülüne sahip olmuştur.
- Ma, Q., Rejab, M., Kumar, A. P., Fu, H., Kumar, N. M., & Tang, J.'nin (2020) yaptığı "Effect of infill pattern, density and material type of 3B printed cubic structure under quasi-static loading" isimli makale kapsamında yapılan testlerde bal peteği iç doluluk deseni üçgen, doğrusal ve çizgi desenine kıyasla daha dayanıklı sonuçlar vermiştir.
- M. Shams, Z. Mansurov, C. Daulbayev ve B. Bakbolat'ın (2021) yaptığı "Effect of Lattice Structure and Composite Precursor on Mechanical Properties of 3B-Printed Bone Scaffolds" isimli makalenin sonucuna göre Kelvin kafesi ve jiroskopik iç doluluk deseni, farklı yükleme ve çekme kuvvetlerine karşı daha fazla direnç gösteren en iyi yapılardır.
- Cristian Dudescu ve Laszlo Racz'ın (2017) yaptığı "Effects of raster orientation, infill rate and infill pattern on the mechanical properties of 3B printed materials" isimli makalede, ABS malzemesi kullanılarak farklı dolgu desenleri (lineer, çapraz, dalgalı) test edilmiştir. Makalenin sonucunda dalgalı dolgu deseninin çapraz ve lineer dolgu desenlerine göre daha yüksek dayanıklılık ve sertlik değerleri verdiği tespit edilmiştir.
- Miguel Fernandez-Vicente, Wilson Callen, Santiago Ferrandiz ve Andres Conejero'nun (2016) yaptığı "Effect of Infill Parameters on Tensile Mechanical Behavior in Desktop 3B Printing" isimli makale kapsamında dolgu desenleri olarak "honeycomb" (arı peteği), "rectangular" (diktörtgen) ve "triangular" (üçgen) seçilmiştir. Testler, ASTM D638 standardına göre gerilme-gerinim testleri ile gerçekleştirilmiştir. Sonuçlara göre honeycomb dolgu deseni, diğer dolgu desenlerine göre daha düşük bir gerilme dayanımı gösterirken, en yüksek gerinme dayanımına sahiptir.
- S. Ganeshkumar ve arkadaşlarının (2022) yaptığı "Investigation of Tensile Properties of Different Infill Pattern Structures of 3B-Printed PLA Polymers: Analysis and Validation Using Finite Element Analysis in ANSYS" isimli

makalede yapılan araştırmaların sonucuna göre üçgen dolgu deseninin en yüksek gerilme dayanımı ve modülüne sahip olduğu tespit edilmiştir.

- Pradeep Kumar Mishra, P. Senthil, S. Adarsh ve M.S. Anoop'un (2021) yaptığı "An investigation to study the combined effect of different infill pattern and infill density on the impact strength of 3B printed polylactic acid parts" isimli makalede yapılan testlerin sonucuna göre bazı dolgu desenleri (örneğin honeycomb, yani arı peteği) diğerlerine (örneğin rectilinear, yani doğrusal) göre daha yüksek darbe dayanımı sağlamaktadır.

Yukarıda belirtilen literatür araştırmaları incelenerek her birinden 3 adet olacak şekilde ızgara, sekizgen, tam petek, hızlı petek, sinusoid, kübik, doğrusal, üçgen ve jiroskopik iç doluluk desenleri ile ESUN PLA+ malzemesi kullanılarak %25 iç doluluk oranıyla test parçalarının baskısı alınmıştır. Bu test parçaları tez kapsamında tasarlanan ve üretilen özel bir cihazla torsiyon testine tabi tutulmuştur. Parçaların kopma torklarının ortalama değerleri Çizelge 5.10'da yer almaktadır. Bu değerler incelendiğinde burulma torkuna karşı en dayanıklı sonuçlar üçgen iç doluluk deseninde elde edilmiştir. Bu bulgular S. Ganeshkumar ve arkadaşlarının (2022) yaptığı "Investigation of Tensile Properties of Different Infill Pattern Structures of 3B-Printed PLA Polymers: Analysis and Validation Using Finite Element Analysis in ANSYS" isimli makalenin sonuçlarıyla örtüşmektedir.

- İç doluluk oranı
  - 3B FDM baskıda iç doluluk oranı yapısal dayanımı belirgin bir şekilde etkiler. İç doluluk oranı arttıkça parçanın dayanımı genellikle artar. Bu, malzemenin daha homojen bir yapı oluşturması ve yüklerin daha iyi dağılması ile açıklanabilir. Daha yüksek iç doluluk oranları genellikle daha sağlam ve dayanıklı parçalar üretirken, düşük iç doluluk oranları daha az dayanıklı olabilir. Ancak iç doluluk oranını artırmak, malzeme miktarını ve baskı süresini artırarak baskı maliyetlerini de artırabilir. Dolayısıyla, iç doluluk oranının artırılması ile yapısal dayanım arasında bir denge kurulmalıdır, bu da parçanın belirli uygulamalar için gereksinimlerine ve maliyet toleransına bağlı olacaktır.

Literatür araştırmasında farklı makaleler bu konuyla ilgili incelenmiştir:

- Ma, Q., Rejab, M., Kumar, A. P., Fu, H., Kumar, N. M., & Tang, J.'nin (2020) yaptığı "Effect of infill pattern, density and material type of 3B printed cubic structure under quasi-static loading" isimli makale kapsamında yapılan testler sonucunda yapı yoğunluğunun artırılmasının yapısal özellikleri değiştirdiği ve malzeme tipinin yapısal performansı da etkilediği tespit edilmiştir.
- M. Shams, Z. Mansurov, C. Daulbayev ve B. Bakbolat'ın (2021) yaptığı "Effect of Lattice Structure and Composite Precursor on Mechanical Properties of 3B-Printed Bone Scaffolds" isimli makalede yüksek örgü yoğunluğuna sahip greftlerin, yüksek mukavemet, düşük elastisite modülü ve yüksek enerji emilimi gösterdiği bulunmuştur.
- Gökhan Aydın, B. Çağrı Sarar, M. Erden Yıldızdağ ve B. Emek Abali'nin (2022) yaptığı "Investigating infill density and pattern effects in additive manufacturing by characterizing metamaterials along the strain-gradient theory" isimli çalışmada iç yoğunluğunun artmasıyla metamalzemelerin sertliğinde ve gerilme dayanımında artış olduğu gözlemlenmiştir.
- Adnan A.Ahmed ve Luca Susmel'in (2018) yaptığı "Static assessment of plain/notched polylactide (PLA) 3B-printed with different infill levels: Equivalent homogenised material concept and Theory of Critical Distances" isimli makalelerinde sonuçlar iç dolgu seviyelerinin numunelerin mekanik davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.
- Nadir Ayrılmıs, Mirko Kariz, Milan Sernek ve Manja Kitek Kuzman'ın (2021) yaptığı "Effects of sandwich core structure and infill rate on mechanical properties of 3B-printed wood/PLA composites" isimli makalenin sonuçlarına göre, dolu sandviç çekirdek yapısı, içi boş sandviç çekirdek yapısına göre daha yüksek mekanik özelliklere sahiptir. Ayrıca, artan iç doluluk oranı ile birlikte, numunelerin bükülme dayanımı ve esneklik modülü artmaktadır. Ancak, bu orandaki artış numunelerin darbe dayanımını azaltmaktadır.
- L. Bergonzi, M. Vettori, L. Stefanini ve L. D'Alcamo'nun (2021) yaptığı "Different infill geometry influence on mechanical properties of FDM produced PLA" isimli makale kapsamında yapılan araştırma sonucunda tam dolu desenin diğer desenlere kıyasla en yüksek basınç dayanımına ve kırılma gerilmesine sahip olduğu bulunmuştur.

- Irene Buj-Corral, Ali Bagheri, Alejandro Dominguez-Fernandez ve Ramon Casado-Lopez'in (2019) yaptığı "Influence of infill and nozzle diameter on porosity of FDM printed parts with rectilinear grid pattern" isimli makale sonucunda dolgu yoğunluğu arttıkça, parçaların mekanik özelliklerinde de bir artış görülmüştür.
- Cristian Dudescu ve Laszlo Racz'ın (2017) yaptığı "Effects of raster orientation, infill rate and infill pattern on the mechanical properties of 3B printed materials" isimli makalenin sonuçları, dolgu oranının artmasıyla dayanıklılık ve sertliğin arttığını göstermiştir.
- Miguel Fernandez-Vicente, Wilson Callen, Santiago Ferrandiz ve Andres Conejero'nun (2016) yaptığı "Effect of Infill Parameters on Tensile Mechanical Behavior in Desktop 3B Printing" isimli makale kapsamında yapılan araştırmalarda yüksek dolgu oranları, daha yüksek gerilme dayanımı ve elastikiyet modülü ile sonuçlanırken, düşük dolgu oranları daha düşük gerilme dayanımı ve elastikiyet modülü ile sonuçlanmıştır.
- Kyoung-SU Seol, Panxi Zhao, Byoung-Chul Shin ve Sung-Uk Zhang'ın (2018) yaptığı "Infill Print Parameters for Mechanical Properties of 3B Printed PLA Parts" isimli makale kapsamında yapılan araştırmanın sonuçlarına göre, iç doluluk yoğunluğu arttıkça parçaların mekanik özellikleri de artmaktadır.
- Arda Özen, Dietmar Auhl, Christina Völlmecke, Josef Kiendel ve Bilen Emek Abali'nin (2021) yaptığı "Optimization of Manufacturing Parameters and Tensile Specimen Geometry for Fused Deposition Modeling (FDM) 3B-Printed PETG" isimli makale kapsamında yapılan çalışmalar sonucunda, en iyi sonuçların, %100 dolgu yoğunluğunda ve daha yüksek tabaka kalınlığına sahip numunelerde elde edildiği belirlenmiştir.
- Kavita Mathur , S. M. Fijul Kabir ve Abdel-Fattah M. Seyam'ın (2020) yaptığı "Tensile properties of 3B printed continuous fiberglass reinforced cellular composites" isimli makale kapsamında elde edilen sonuçlara göre iç doluluk yoğunluğunun artmasıyla birlikte, çekme dayanımı ve modülü de artmaktadır.
- Pradeep Kumar Mishra, P. Senthil, S. Adarsh ve M.S. Anoop'un (2021) yaptığı "An investigation to study the combined effect of different infill pattern and infill density on the impact strength of 3B printed polylactic acid parts" isimli makale kapsamında yapılan çalışmaların sonuçlarına göre, yüksek dolgu yoğunluğu,

yüksek darbe dayanımı ile sonuçlanmaktadır. Dolgu desenlerinin darbe dayanımına etkisi, dolgu yoğunluğundan daha az belirgindir.

- Catarina Silva, Ana Isabel Pais, Gabriela Caldas, Barbara P. P. A. Gouveia, Jorge Lino Alves ve Jorge Belinha'nın (2021) yaptığı "Study on 3B printing of gyroid-based structures for superior structural behaviour" isimli makale kapsamında elde edilen bulgulara göre iç doluluk yoğunluğunun artırılmasının yapısal performansı arttırdığı görülmüştür.

Yukarıda belirtilen literatür araştırmaları incelenerek her birinden 3 adet olacak şekilde %45, %65 ve %85 iç doluluk oranlarıyla ve üçgen iç doluluk desniyle ESUN PLA+ malzemesinden test parçaları üretilmiş ve burulma testi uygulanmıştır. Testin sonuçları Çizelge 5.15'te yer almaktadır. Değerlere bakıldığında iç doluluk oranı arttıkça tork dayanımı da artmaktadır. Bu bulgular literatür araştırmasında belirtilen makalelerin sonuçlarıyla örtüşmektedir.

- Baskı malzemesi
  - 3B FDM baskıda baskı malzemesi, yapısal dayanımı belirgin şekilde etkiler. Farklı baskı malzemeleri farklı mekanik özelliklere sahiptir ve bu da parçaların dayanıklılığını etkiler. Doğru malzeme seçimi, istenilen yapısal dayanım düzeyini sağlamak için önemlidir. Örneğin, bazı malzemeler daha yüksek mukavemet ve sertlik sunarken, diğerleri daha esnek veya hafif olabilir. Bu nedenle, baskı malzemesinin seçimi, parçanın belirli uygulamalar için gereksinimlerine ve yapısal dayanımına bağlı olarak yapılmalıdır.

    Literatür araştırmasında farklı makaleler bu konuyla ilgili incelenmiştir:

    - Elena Provaggi, Claudio Capelli, Benyamin Rahmani, Gaetano Burriesci ve Deepak M. Kalaskar'ın (2019) yaptığı "3B printing assisted finite element analysis for optimising the manufacturing parameters of a lumbar fusion cage" isimli makalede üç farklı 3B yazıcı teknolojisi (FDM, SLA ve SLS) ve malzeme (PLA, ABS ve PA) değerlendirilmiştir. Sonuçlar, PLA'nın FDM tekniğiyle en iyi sonuçları veren malzeme olduğunu göstermektedir.
    - Juan Naranjo-Lozada, Horacio Ahuett-Garza, Pedro Orta-Castañón, Wilco M.H. Verbeeten ve Daniel Sáiz-González'in (2019) yaptıkları "Tensile properties and failure behavior of chopped and continuous carbon fiber composites produced by

additive manufacturing” isimli makale kapsamında CFRP numuneleri iki farklı yöntemle üretilmiştir: sürekli elyaf takviyeli kompozitler (CFRP-CC) ve kesikli elyaf takviyeli kompozitler (CFRP-SC). CFRP-CC numuneleri, karbon elyafın 3 boyutlu yazıcı ile doğrudan baskılanması yoluyla üretilirken, CFRP-SC numuneleri ise daha önce hazırlanmış bir karbon elyaf takviyeli filamanın kullanımıyla üretilmiştir. Numuneler farklı lif uzunluklarına ve oryantasyonlarına sahip olacak şekilde tasarlanmış ve üretilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, uzun elyaf takviyeli CFRP numuneleri, kısa elyaf takviyeli numunelere göre daha yüksek maksimum gerilmeye ve daha düşük gerilme değerlerine sahip olmuştur. Ayrıca, uzun elyaf takviyeli numuneler daha yüksek elastik modül ve daha yüksek enerji emilimi kapasitesine sahiptir. Sonuçlar ayrıca, numunelerin gerilme-yoğunluk eğrisinin, malzeme tiplerine ve takviye yöntemlerine bağlı olarak farklılıklar gösterdiğini göstermiştir.

Burulma testleri tamamlanmş, üçgen iç doluluk deseni ve %85 iç doluluk oranıyla diğerlerine kıyasla daha dayanıklı parçaların üretilebildiği sonucuna varılmıştır. Bu bulgular basma ve çekme testi cihazlarında da test edilerek tekrar doğrulanmıştır. Aynı iç doluluk oranı ve deseniyle burulma testinde kullanılan PLA+ malzemeden ve ek olarak PETG, ABS, ASA malzemelerinden ikişer adet test parçaları üretilmiş ve bu parçalara çekme ve basma testleri uygulanmıştır. Çizelge 5.20’de çekme testinin, Çizelge 5.25’te basma testinin sonuçları bulunmaktadır. Çekme ve basma testleri ayrı ayrı cihzalarda yapılmıştır. Her iki testin sonuçları değerlendirildiğinde mekanik özellikler ABS < PETG < ASA < PLA+ şeklinde sonuçlanmıştır. Çizelge 3.6, 3.7, 3.8 ve 3.9’da üretici tarafından incelendiğinde malzeme özelliklerinden çekme dayanımı ABS < ASA < PETG < PLA+ şeklinde artmaktadır. Tez kapsamında yapılan testlerde ulaşılan sonuçlarla bu veriler sıra olarak benzer niteliktedir. Denenen bütün malzemeler için basma testinin gerilme dayanımı çekme testinden daha fazla hesaplanmıştır.

Bu tezin amacı 3B FDM baskı teknolojisinde 3 en etkili parametrenin, iç doluluk deseni, iç doluluk oranı ve malzeme seçiminin etkilerinin araştırmak ve deneylerle daha önce yapılan çalışmalara katkı sağlamaktır. Tez kapsamında bu etkenler burulma, çekme ve basma testleriyle araştırılmış, bulgularla en dayanıklı malzemenin denenenler arsında PLA+, en

dayanıklı iç doluluk deseninin üçgen geometrisi, en ideal iç doluluk oranının da %85 olduğu sonucuna varılmıştır. Bu bilgilerin bilimin gelişmesine katkı sağlaması umulmaktadır.

KAYNAKLAR

Ahmed, A. A., & Susmel, L. (2018). Static assessment of Plain/notched polylactide (PLA) 3B-printed with different infill levels: Equivalent homogenised material concept and theory of critical distances. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 42(4), 883–904. https://doi.org/10.1111/ffe.12958

Alarifi, I. M. (2023). Mechanical properties and numerical simulation of FDM 3B printed PETG/Carbon Composite Unit Structures. *Journal of Materials Research and Technology*, 23, 656–669. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.01.043

Aliheidari, N., Tripuraneni, R., Hohimer, C., Christ, J., Ameli, A., & Nadimpalli, S. (2017). The impact of nozzle and bed temperatures on the fracture resistance of FDM printed materials. *SPIE Proceedings*. https://doi.org/10.1117/12.2260105

Aydin, G., Sarar, B. C., Yildizdag, M. E., & Abali, B. E. (2022). Investigating infill density and pattern effects in additive manufacturing by characterizing metamaterials along the strain-gradient theory. *Mathematics and Mechanics of Solids*, 27(10), 2002–2016. https://doi.org/10.1177/10812865221100978

Ayrilmis, N., Kariz, M., Šernek, M., & Kuzman, M. K. (2021). Effects of sandwich core structure and infill rate on mechanical properties of 3B-printed wood/PLA composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 115(9–10), 3233–3242. https://doi.org/10.1007/s00170-021-07382-y

Behzadnasab, M. & Yousefi, A. A. (2016). Effects of 3B printer nozzle head temperature on the physical and mechanical properties of PLA based product.

Bergonzi, L., Vettori, M., Stefanini, L., & D'Alcamo, L. (2021). Different infill geometry influence on mechanical properties of FDM produced PLA. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1038(1), 012071. https://doi.org/10.1088/1757-899x/1038/1/012071

Birosz, M. T., Ledenyák, D., & Andó, M. (2022). Effect of FDM infill patterns on mechanical properties. *Polymer Testing*, 113, 107654. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107654

Buj-Corral, I., Bagheri, A., Domínguez-Fernández, A., & Casado-López, R. (2019). Influence of infill and nozzle diameter on porosity of FDM printed parts with rectilinear grid pattern. *Procedia Manufacturing*, 41, 288–295. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.09.011

Chen, J. V., Tanaka, K. S., Dang, A. B., & Dang, A. (2020). Identifying a commercially-available 3B printing process that minimizes model distortion after annealing and autoclaving and the effect of steam sterilization on mechanical strength. *3B Printing in Medicine*, 6(1). https://doi.org/10.1186/s41205-020-00062-9

Clausen, A., Aage, N., & Sigmund, O. (2016a). Exploiting additive manufacturing infill in topology optimization for improved buckling load. *Engineering*, 2(2), 250–257. https://doi.org/10.1016/j.eng.2016.02.006

Dave, H., Rajpurohit, S., Patadiya, N., Dave, S., Kumar S. S., Thambad, S., Prathapam S. V. & Sheth, K. (2019). Compressive Strength of PLA based Scaffolds: Effect of Layer Height, Infill Density and Print Speed. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, 2067-3604.

Dilberoglu, U. M., Simsek, S., & Yaman, U. (2019). Shrinkage compensation approach proposed for ABS material in FDM Process. *Materials and Manufacturing Processes*, 34(9), 993–998. https://doi.org/10.1080/10426914.2019.1594252

Dudescu, C., & Racz, L. (2017). Effects of raster orientation, infill rate and infill pattern on the mechanical properties of 3B printed materials. *ACTA Universitatis Cibiniensis*, 69(1), 23–30. https://doi.org/10.1515/aucts-2017-0004

Elmrabet, N., & Siegkas, P. (2020). Dimensional Considerations on the mechanical properties of 3B printed polymer parts. *Polymer Testing*, 90, 106656. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106656

Fernandez-Vicente, M., Calle, W., Ferrandiz, S., & Conejero, A. (2016). Effect of infill parameters on tensile mechanical behavior in desktop 3B printing. *3B Printing and Additive Manufacturing*, 3(3), 183–192. https://doi.org/10.1089/3Bp.2015.0036

Ganeshkumar, S., Kumar, S. D., Magarajan, U., Rajkumar, S., Arulmurugan, B., Sharma, S., Li, C., Ilyas, R. A., & Badran, M. F. (2022). Investigation of tensile properties of different infill pattern structures of 3B-printed PLA polymers: Analysis and validation using finite element analysis in Ansys. *Materials*, 15(15), 5142. https://doi.org/10.3390/ma15155142

García-Dominguez, A., Claver, J., & Sebastián, M. A. (2020). Integration of additive manufacturing, parametric design, and optimization of parts obtained by Fused Deposition Modeling (FDM). A methodological approach. *Polymers*, 12(9), 1993. https://doi.org/10.3390/polym12091993

Gonabadi, H., Yadav, A., & Bull, S. J. (2020). The effect of processing parameters on the mechanical characteristics of PLA produced by a 3B FFF Printer. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 111(3–4), 695–709. https://doi.org/10.1007/s00170-020-06138-4

İnternet: Pla+. https://www.esun3B.com/. (n.d.). URL 1: https://www.esun3B.com/pla-pro-product/ Son erişim tarihi: 05.06.2023

İnternet: ePetg. https://www.esun3B.com/. (n.d.). URL 2: https://www.esun3B.com/petg-product/ Son erişim tarihi: 05.06.2023

İnternet: Abs+. https://www.esun3B.com/. (n.d.). URL 3: https://www.esun3B.com/abs-pro-product/ Son erişim tarihi: 05.06.2023

İnternet: eAsa. https://www.esun3B.com/. (n.d.). URL 4: https://www.esun3B.com/easa-product/ Son erişim tarihi: 05.06.2023

İnternet: Robolink Market. (n.d.). 17HS8401 NEMA 17 Step Motor. [https://www.robolinkmarket.com/].URL5:https://www.robolinkmarket.com/17hs8401-nema-17-step-motor?_sgm_campaign=product&_sgm_source=5321&_sgm_action=search&_sgm_term=nema+17&_sgm_pinned=false Son erişim tarihi: 2023-11-16

İnternet: Robolink Market. (n.d.). Arduino Mega 2560 R3 Orjinal Yeni Versiyon. [https://www.robolinkmarket.com/].URL6:https://www.robolinkmarket.com/arduino-mega-2560-r3-orjinal-yeni-versiyon Son erişim tarihi: 2023-11-16

İnternet: Robolink Market. (n.d.). RepRap RAMPS v1.6 3B Printer Kontrol Kartı. [https://www.robolinkmarket.com/].URL7:https://www.robolinkmarket.com/reprap-ramps-v16-3B-printer-kontrol-karti Son erişim tarihi: 2023-11-16

İnternet: Robolink Market. (n.d.). A4988 Step Motor Sürücü Kartı (Yeşil). [https://www.robolinkmarket.com/].URL8:https://www.robolinkmarket.com/a4988-step-motor-surucu-karti-yesil Son erişim tarihi: 2024-03-25

İnternet: Robolink Market. (n.d.). 12V 10A T-Power Slim Adaptör. [https://www.robolinkmarket.com/]. URL 9: https://www.robolinkmarket.com/12v-10a-t-power-slim-adaptor Son erişim tarihi: 2023-11-16

Kain, S., Ecker, J. V., Haider, A., Musso, M., & Petutschnigg, A. (2019). Effects of the infill pattern on mechanical properties of fused layer modeling (FLM) 3B printed wood/polylactic acid (PLA) composites. *European Journal of Wood and Wood Products*, 78(1), 65–74. https://doi.org/10.1007/s00107-019-01473-0

Kiński, W., & Pietkiewicz, P. (2020). Influence of the printing nozzle diameter on tensile strength of produced 3B models in FDM Technology. *Agricultural Engineering*, 24(3), 31–38. https://doi.org/10.1515/agriceng-2020-0024

Ma, Q., Rejab, M., Kumar, A. P., Fu, H., Kumar, N. M., & Tang, J. (2020). Effect of infill pattern, density and material type of 3B printed cubic structure under quasi-static loading. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 235(19), 4254–4272. https://doi.org/10.1177/0954406220971667

Mathur, K., Kabir, S. M., & Seyam, A.-F. M. (2020). Tensile properties of 3B printed continuous fiberglass reinforced cellular composites. *The Journal of The Textile Institute*, 113(1), 60–69. https://doi.org/10.1080/00405000.2020.1863567

Mishra, P. K., Senthil, P., Adarsh, S., & Anoop, M. S. (2021). An investigation to study the combined effect of different infill pattern and infill density on the impact strength of 3B printed polylactic acid parts. *Composites Communications*, 24, 100605. https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.100605

Naranjo-Lozada, J., Ahuett-Garza, H., Orta-Castañón, P., Verbeeten, W. M. H., & Sáiz-González, D. (2019). Tensile properties and failure behavior of chopped and continuous carbon fiber composites produced by additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 26, 227–241. https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.12.020

Özen, A., Auhl, D., Völlmecke, C., Kiendl, J., & Abali, B. E. (2021). Optimization of manufacturing parameters and tensile specimen geometry for fused deposition modeling (FDM) 3B-printed PETG. *Materials*, 14(10), 2556. https://doi.org/10.3390/ma14102556

Podroužek, J., Marcon, M., Ninčević, K., & Wan-Wendner, R. (2019). Bio-inspired 3B infill patterns for Additive Manufacturing and Structural Applications. *Materials*, 12(3), 499. https://doi.org/10.3390/ma12030499

Provaggi, E., Capelli, C., Rahmani, B., Burriesci, G., & Kalaskar, D. M. (2019). 3B printing assisted finite element analysis for optimising the manufacturing parameters of a lumbar fusion cage. *Materials & Design*, 163, 107540. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.107540

Seol, K.-S., Zhao, P., Shin, B.-C., & Zhang, S.-U. (2018). Infill print parameters for mechanical properties of 3B printed PLA parts. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, 17(4), 9–16. https://doi.org/10.14775/ksmpe.2018.17.4.009

Shams, M., Mansurov, Z., Daulbayev, C., & Bakbolat, B. (2021). Effect of lattice structure and composite precursor on mechanical properties of 3B-printed bone scaffolds. *Eurasian Chemico-Technological Journal*, 23(4), 257. https://doi.org/10.18321/ectj1129

Silva, C., Pais, A. I., Caldas, G., Gouveia, B. P., Alves, J. L., & Belinha, J. (2021). Study on 3B printing of gyroid-based structures for superior structural behaviour. *Progress in Additive Manufacturing*, 6(4), 689–703. https://doi.org/10.1007/s40964-021-00191-5

Webbe Kerekes, T., Lim, H., Joe, W. Y., & Yun, G. J. (2019). Characterization of process–deformation/damage property relationship of Fused Deposition Modeling (FDM) 3B-printed specimens. *Additive Manufacturing*, 25, 532–544. https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.11.008



Gazili olmak ayrıcalıktır