

**CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ ARTIŞLI ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİĞİNİN  
İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Makine Mühendisi Halil BAYRAM**

**Anabilim Dalı : Makina Mühendisliği**

**Programı : Konstrüksiyon ve İmalat**

**MANİSA 2014**

**CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ ARTIŞLI ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİĞİNİN  
İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Makine Mühendisi Halil BAYRAM**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 08.07.2014**

**Tezin Savunulduğu Tarih : 22.07.2014**

**Tez Danışmanı : Doç.Dr. N. Sinan KÖKSAL**  
**Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Bekir Sadık ÜNLÜ**  
**Yrd. Doç. Dr. Elif MALYER**

**MANİSA 2014**

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                 |      |
|---------------------------------------------------------------------------------|------|
| İÇİNDEKİLER.....                                                                | iii  |
| ŞEKİL LİSTESİ.....                                                              | v    |
| ÇİZELGE LİSTESİ.....                                                            | xi   |
| KISALTMALAR LİSTESİ .....                                                       | xii  |
| TEŞEKKÜR .....                                                                  | xiii |
| ÖZET .....                                                                      | xiv  |
| ABSTRACT .....                                                                  | xv   |
| 1. GİRİŞ.....                                                                   | 1    |
| 2. ŞEKİLLENDİRME YÖNTEMLERİ .....                                               | 6    |
| 2.1. Sac Metal Şekillendirme Yöntemleri .....                                   | 6    |
| 2.1.1. Bükerek Şekillendirme Yöntemi .....                                      | 6    |
| 2.1.2. Derin Çekme ile Şekillendirme Yöntemi.....                               | 7    |
| 2.1.3. Sıvama Kalıplama İle Şekillendirme.....                                  | 7    |
| 2.1.4. Şişirme Yöntemiyle Şekillendirme.....                                    | 8    |
| 2.1.5. Çok Noktalı Derin Çekme Yöntemiyle Şekillendirme .....                   | 8    |
| 2.2. Artışlı Şekillendirme Yöntemi .....                                        | 9    |
| 2.2.1. Derin Çekme ile Artışlı Şekillendirme Yönteminin Karşılaştırılması.....  | 10   |
| 2.3. Şekillendirilebilirliği Etkileyen Faktörler .....                          | 11   |
| 2.3.1. Uzama .....                                                              | 11   |
| 2.3.2. Akma Uzaması .....                                                       | 12   |
| 2.3.3. Anizotropi Faktörü .....                                                 | 13   |
| 2.3.4. Tane Büyüklüğü .....                                                     | 17   |
| 2.3.5. Kalıntı Gerilmeler.....                                                  | 17   |
| 2.4. Al Malzemeler ve Özellikleri .....                                         | 17   |
| 2.4.1. Isıl İşlem Uygulanamayan Alüminyum Alaşımları (1xxx, 3xxx ve 5xxx) ..... | 17   |
| 2.4.2. Isıl İşlem Uygulanabilen Alüminyum Alaşımları (2xxx, 6xxx ve 7xxx).....  | 18   |
| 3. DENEYSEL ÇALIŞMA .....                                                       | 20   |

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| 3.1. Malzemeler .....                | 20  |
| 3.2. Yöntem .....                    | 21  |
| 3.2.1. Isıl İşlem .....              | 21  |
| 3.2.2. Takım Çapı .....              | 22  |
| 3.2.3. Takım Kaplaması .....         | 22  |
| 3.2.4. Yatay İlerleme .....          | 23  |
| 3.2.5. Devir .....                   | 23  |
| 3.2.6. Takım yolu .....              | 23  |
| 3.2.7. Dikey İlerleme .....          | 27  |
| 3.2.8. Yağlama .....                 | 27  |
| 4. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA ..... | 28  |
| 5. TEST VE ÖLÇÜM .....               | 49  |
| 5.1. Üç Boyutlu Lazer Tarama .....   | 49  |
| 5.2. Metalografik İnceleme .....     | 102 |
| 5.3. Çekme Deneyi .....              | 103 |
| 6. MALİYET ANALİZİ .....             | 104 |
| 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....        | 105 |
| KAYNAKLAR .....                      | 107 |
| ÖZGEÇMİŞ .....                       | 111 |

## ŞEKİL LİSTESİ

|                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1. Bükerek şekillendirme yöntemi.....                                                                                         | 7  |
| Şekil 2.2. Derin çekme işlemi .....                                                                                                   | 7  |
| Şekil 2.3. Sıvama işlemi ve tertibatı .....                                                                                           | 8  |
| Şekil 2.4. a) Negatif şekillendirme b) Pozitif şekillendirme .....                                                                    | 9  |
| Şekil 2.5. Derin çekme ile artışı şekillendirme yönteminin işlem basamaklarının karşılaştırılması                                     | 10 |
| Şekil 2.6. Takım ve destek parçası .....                                                                                              | 11 |
| Şekil 2.7. Sacların çekme deneyinde büzülmesi .....                                                                                   | 12 |
| Şekil 2.8. Akma uzaması ve Lüders-hartmann bantları .....                                                                             | 13 |
| Şekil 2.9. Bükme ve haddeleme doğrultusu .....                                                                                        | 14 |
| Şekil 2.10. Anizotrop bir sacın, bükme kıvrımının haddeleme doğrultusu olmaması halinde çatlaması .....                               | 15 |
| Şekil 2.11. Haddeleme doğrultusu ve farklı doğrultudaki alınan numuneler ile anizotropi faktörünün incelenmesi .....                  | 15 |
| Şekil 2.12. Al-Cu denge diyagramda, çözeltiye alma tavlama ve çökeltme işleminin yapıldığı sıcaklık aralıkları belirtilmektedir ..... | 19 |
| Şekil 3.1. Çözündürme ve yaşlanma aşamalarını içeren çökeltme sertleşmesi işlemini gösteren şematik diyagram. ....                    | 21 |
| Şekil 3.2. a) Kaplamasız karbür b) Krom-nitrür kaplamalı takım .....                                                                  | 22 |
| Şekil 3.3. 1 Nolu takım yolunun a) Perspektif b) Yan c) Üst Görünüşü .....                                                            | 24 |
| Şekil 3.4. 2 Nolu takım yolunun a) Perspektif b) Yan c) Üst Görünüşü .....                                                            | 25 |
| Şekil 3.5. 3 Nolu takım yolunun a) Perspektif b) Yan c) Üst Görünüşü .....                                                            | 26 |
| Şekil 3.6. Sıvama yağı      Şekil 3.7. Bor Yağı Emülsiyonu.....                                                                       | 27 |
| Şekil 4.1. Deneylerde Kullanılan First MCW300 CNC Freze Tezgahı .....                                                                 | 28 |
| Şekil 4.2. Deneylerde Kullanılan Protherm PLF 120/7 Tav Fırını .....                                                                  | 29 |
| Şekil 4.3. a) Takım dönmeden (0 dev/dak) b) 50 dev/dak hasara uğramış numune .....                                                    | 29 |
| Şekil 4.4. a) 600 devir/dak b) 675 devir/dak hasara uğramış numune .....                                                              | 30 |
| Şekil 4.5. a) 750 devir/dak b) 1000 devir/dak hasara uğramış numune .....                                                             | 30 |
| Şekil 4.6.a) 0,2 mm Dikey ilerleme b) 0,5 mm Dikey ilerleme başarılı numune.....                                                      | 31 |

|                                                                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.7. a) 0,3 mm Dikey ilerleme b) 0,7 mm Dikey ilerleme hasara uğramış numune .....                                                      | 31 |
| Şekil 4.8. Sıvama yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmemiş malzeme ve 1. takım yolu parametrelerine sahip numunenin görünüşleri.....  | 33 |
| Şekil 4.9. Bor yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmemiş malzeme ve 1. takım yolu parametrelerine sahip numunenin görünüşleri.....     | 34 |
| Şekil 4.10. Sıvama yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmüş malzeme ve 1. takım yolu parametrelerine sahip numunenin görünüşleri.....   | 35 |
| Şekil 4.11. Bor yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmüş malzeme ve 1. takım yolu parametrelerine sahip numunenin görünüşleri.....      | 36 |
| Şekil 4.12. Sıvama yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmemiş malzeme ve 1. takım yolu parametrelerine sahip numunenin görünüşleri..... | 37 |
| Şekil 4.13. Bor yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmemiş malzeme ve 1. takım yolu parametrelerine sahip numunenin görünüşleri.....    | 38 |
| Şekil 4.14. Sıvama yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmüş malzeme ve 1. takım yolu parametrelerine sahip numunenin görünüşleri.....   | 39 |
| Şekil 4.15. Bor yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmüş malzeme ve 1. takım yolu parametrelerine sahip numunenin görünüşleri.....      | 40 |
| Şekil 4.16. Sıvama yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmemiş malzeme ve 2. takım yolu parametrelerine sahip numunenin görünüşleri..... | 41 |
| Şekil 4.17. Bor yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmemiş malzeme ve 2. takım yolu parametrelerine sahip numunenin görünüşleri.....    | 42 |
| Şekil 4.18. Sıvama yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmüş malzeme ve 2. takım Yolu parametrelerine sahip numunenin görünüşleri.....   | 43 |
| Şekil 4.19. Bor yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmüş malzeme ve 2. takım yolu parametrelerine sahip numunenin görünüşleri.....      | 44 |
| Şekil 4.20. Sıvama yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmemiş malzeme ve 3. takım yolu parametrelerine sahip numunenin görünüşleri..... | 45 |
| Şekil 4.21. Bor yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmemiş malzeme ve 3. takım yolu parametrelerine sahip numunenin görünüşleri.....    | 46 |
| Şekil 4.22. Sıvama yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmüş malzeme ve 2. takım yolu parametrelerine sahip numunenin görünüşleri.....   | 47 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.23. Bor yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmüş malzeme ve 2. takım yolu parametrelerine sahip numunenin görünüşleri.....                                                                                                                         | 48 |
| Şekil 5.1. Tüm deney parametreleri için kullanılan geometrinin üstten, önden ve sağ yandan görünüşleri.....                                                                                                                                                      | 50 |
| Şekil 5.2. Sıvama yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmemiş malzeme ve 1. takım yolu parametrelerinde işlem gören numunenin lazer tarama sonucu elde edilen a) Üstten, önden ve sağ yandan görünüşleri b-c) Geometrik tamlık sonuçları.....               | 52 |
| Şekil 5.3. Sıvama yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmemiş malzeme ve 1. takım yolu parametrelerine sahip numunenin a) Eğik bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri b) Taban bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri ..... | 53 |
| Şekil 5.4. a) İstenilen geometride b) Elde edilen geometride $\beta$ açısı .....                                                                                                                                                                                 | 54 |
| Şekil 5.5. Bor Yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmemiş malzeme ve 1. Takım yolu parametrelerinde işlem gören numunenin lazer tarama sonucu elde edilen a) Üstten, önden ve sağ yandan görünüşleri b-c) Geometrik tamlık sonuçları.....                  | 56 |
| Şekil 5.6. Bor yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmemiş malzeme ve 1. takım yolu parametrelerine sahip numunenin a) Eğik bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri b) Taban bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri .....    | 57 |
| Şekil 5.7. Sıvama yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmüş malzeme ve 1. takım yolu parametrelerinde işlem gören numunenin lazer tarama sonucu elde edilen a) Üstten, önden ve sağ yandan görünüşleri b-c) Geometrik tamlık sonuçları.....                 | 59 |
| Şekil 5.8. Sıvama yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmüş malzeme ve 1. takım yolu parametrelerine sahip numunenin a) Eğik bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri b) Taban bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri .....   | 60 |
| Şekil 5.9. Bor yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmüş malzeme ve 1. takım yolu parametrelerinde işlem gören numunenin lazer tarama sonucu elde edilen a) Üstten, önden ve sağ yandan görünüşleri b-c) Geometrik tamlık sonuçları.....                    | 62 |
| Şekil 5.10. Bor yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmüş malzeme ve 1. takım yolu parametrelerine sahip numunenin a) Eğik bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri b) Taban bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri .....     | 63 |
| Şekil 5.11. Sıvama yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmemiş malzeme ve 1. takım yolu parametrelerinde işlem gören numunenin lazer tarama sonucu elde edilen a) Üstten, önden ve sağ yandan görünüşleri b-c) Geometrik tamlık sonuçları.....              | 65 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 5.12. Sıvama yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmemiş malzeme ve 1. takım yolu parametrelerine sahip numunenin a) Eğik bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri b) Taban bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri ..... | 66 |
| Şekil 5.13. Bor yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmemiş malzeme ve 1. takım yolu parametrelerinde işlem gören numunenin lazer tarama sonucu elde edilen a) Üstten, önden ve sağ yandan görünüşleri b-c) Geometrik tamlık sonuçları.....                  | 68 |
| Şekil 5.14. Bor yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmemiş malzeme ve 1. takım yolu parametrelerine sahip numunenin a) Eğik bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri b) Taban bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri .....    | 69 |
| Şekil 5.15. Sıvama yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmüş malzeme ve 1. takım yolu parametrelerinde işlem gören numunenin lazer tarama sonucu elde edilen a) Üstten, önden ve sağ yandan görünüşleri b-c) Geometrik tamlık sonuçları.....                 | 71 |
| Şekil 5.16. Sıvama yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmüş malzeme ve 1. takım yolu parametrelerine sahip numunenin a) Eğik bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri b) Taban bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri .....   | 72 |
| Şekil 5.17. Bor yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmüş malzeme ve 1. takım yolu parametrelerinde işlem gören numunenin lazer tarama sonucu elde edilen a) Üstten, önden ve sağ yandan görünüşleri b-c) Geometrik tamlık sonuçları.....                    | 74 |
| Şekil 5.18. Bor yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmüş malzeme ve 1. takım yolu parametrelerine sahip numunenin a) Eğik bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri b) Taban bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri .....      | 75 |
| Şekil 5.19. Sıvama yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmemiş malzeme ve 2. takım yolu parametrelerinde işlem gören numunenin lazer tarama sonucu elde edilen a) Üstten, önden ve sağ yandan görünüşleri b-c) Geometrik tamlık sonuçları.....               | 77 |
| Şekil 5.20. Sıvama yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmemiş malzeme ve 2. takım yolu parametrelerine sahip numunenin a) Eğik bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri b) Taban bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri ..... | 78 |
| Şekil 5.21. Bor yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmemiş malzeme ve 2. takım yolu parametrelerinde işlem gören numunenin lazer tarama sonucu elde edilen a) Üstten, önden ve sağ yandan görünüşleri b-c) Geometrik tamlık sonuçları.....                  | 80 |
| Şekil 5.22. Bor yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmemiş malzeme ve 2. takım yolu parametrelerine sahip numunenin a) Eğik bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri b) Taban bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri .....    | 81 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 5.23. Sıvama yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmüş malzeme ve 2. takım yolu parametrelerinde işlem gören numunenin lazer tarama sonucu elde edilen a) Üstten, önden ve sağ yandan görünüşleri b-c) Geometrik tamlık sonuçları.....                 | 83 |
| Şekil 5.24. Sıvama yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmüş malzeme ve 2. takım yolu parametrelerine sahip numunenin a) Eğik bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri b) Taban bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri .....   | 84 |
| Şekil 5.25. Bor yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmüş malzeme ve 2. takım yolu parametrelerinde işlem gören numunenin lazer tarama sonucu elde edilen a) Üstten, önden ve sağ yandan görünüşleri b-c) Geometrik tamlık sonuçları.....                    | 86 |
| Şekil 5.26. Bor yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmüş malzeme ve 2. takım yolu parametrelerine sahip numunenin a) Eğik bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri b) Taban bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri .....      | 87 |
| Şekil 5.27. Sıvama yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmemiş malzeme ve 3. takım yolu parametrelerinde işlem gören numunenin lazer tarama sonucu elde edilen a) Üstten, önden ve sağ yandan görünüşleri b-c) Geometrik tamlık sonuçları.....               | 89 |
| Şekil 5.28. Sıvama yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmemiş malzeme ve 3. takım yolu parametrelerine sahip numunenin a) Eğik bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri b) Taban bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri ..... | 90 |
| Şekil 5.29. Bor yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmemiş malzeme ve 3. takım yolu parametrelerinde işlem gören numunenin lazer tarama sonucu elde edilen a) Üstten, önden ve sağ yandan görünüşleri b-c) Geometrik tamlık sonuçları.....                  | 92 |
| Şekil 5.30. Bor yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmemiş malzeme ve 3. takım yolu parametrelerine sahip numunenin a) Eğik bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri b) Taban bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri .....    | 93 |
| Şekil 5.31. Sıvama yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmüş malzeme ve 2. takım yolu parametrelerinde işlem gören numunenin lazer tarama sonucu elde edilen a) Üstten, önden ve sağ yandan görünüşleri b-c) Geometrik tamlık sonuçları.....                 | 95 |
| Şekil 5.32. Sıvama yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmüş malzeme ve 2. takım yolu parametrelerine sahip numunenin a) Eğik bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri b) Taban bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri .....   | 96 |
| Şekil 5.33. Bor yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmüş malzeme ve 2. takım yolu parametrelerinde işlem gören numunenin lazer tarama sonucu elde edilen a) Üstten, önden ve sağ yandan görünüşleri b-c) Geometrik tamlık sonuçları.....                    | 98 |

|                                                                                                                                                                                                                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 5.34. Bor yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmüş malzeme ve 2. takım yolu parametrelerine sahip numunenin a) Eğik bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri b) Taban bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri ..... | 99  |
| Şekil 5.35. a) Isıl işlem görmüş b) Isıl işlem görmemiş numunenin içyapısı .....                                                                                                                                                                             | 102 |
| Şekil 5.36. a) Isıl işlem görmüş b) Isıl işlem görmemiş numunenin içyapısı .....                                                                                                                                                                             | 102 |
| Şekil 5.37. Çekme numunesinin boyutları .....                                                                                                                                                                                                                | 103 |
| Şekil 6.1. AŞY ve kalıpla üretim için Fiyat-Adet grafiği .....                                                                                                                                                                                               | 104 |

## ÇİZELGE LİSTESİ

|                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Çizelge 2.1. Çeşitli malzemelerin anizotropi parametreleri (Kalpakjian,1991).....       | 16  |
| Çizelge 3.1. AA 2024 malzemesinin kimyasal bileşimi .....                               | 20  |
| Çizelge 3.2. Deneyde kullanılan AA 2024 numunesinin spektral analiz sonuçları .....     | 20  |
| Çizelge 3.3. AA 2024 malzemesinin mekanik özellikleri .....                             | 21  |
| Çizelge 3.4. Deneyde kullanılan AA 2024 numunesinin mekanik özellikleri .....           | 21  |
| Çizelge 3.5. CrN kaplama özellikleri (Titanit,2007) .....                               | 23  |
| Çizelge 3.6. Sıvama ve bor yağlarının teknik özellikleri .....                          | 27  |
| Çizelge 4.1. Deneysel Çalışma Parametre Dağılım Tablosu .....                           | 32  |
| Çizelge 5.1. Deney sonuçlarına ait aritmetik ortalama ve standart sapma değerleri ..... | 100 |
| Çizelge 5.2. Çekme Dayanımı Deney Sonuçları .....                                       | 103 |

## KISALTMALAR LİSTESİ

ADSIF Birikmiş Çift Taraflı Artışlı Şekillendirme Yöntemi: Accumulative Double Sided Incremental Forming

AŞY Artışlı Şekillendirme Yöntemi

FEA Sonlu Elemanlar Metodu: Finite Element Method

FLD Şekillendirilebilirlik Sınır Diyagramı: Forming Limits Diagram

PVC Polivinil Klorür : Polyvinylchloride

SPIF Tek Noktalı Artışlı Şekillendirme Yöntemi: Single Point Incremental Sheet Forming

TPIF İki Noktalı Artışlı Şekillendirme Yöntemi: Two Point Incremental Sheet Forming

## TEŞEKKÜR

“Alüminyum alaşımlarının artışı şekillendirilebilirliğinin incelenmesi” konulu tez çalışmasının seçiminde, yürütülmesinde, sonuçlandırılmasında ve sonuçlarının değerlendirilmesinde maddi ve manevi destek ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Doç. Dr. N.Sinan KÖKSAL’ a teşekkür ederim.

Yapılan Cad-Cam analizlerinde her türlü yardımı yapan, zaman harcayan, emek veren, tecrübesini paylaşan hocam Yrd. Doç. Dr. Elif MALYER’ e ve Öğr. Gör. Hikmet Sadi MÜFTÜOĞLU’ na teşekkür ederim.

Tez çalışması boyunca bana verdiği manevi destek, göstermiş olduğu sabır ve anlayıştan dolayı anne, baba ve kız kardeşime teşekkür ederim.

## ÖZET

Ürün ve tüketim hacmi geniş olan sac metal şekillendirme sektörü, ürün başına maliyeti düşürmesi sebebiyle geleneksel sac metal şekillendirme yöntemlerini kullanmaktadır. Ancak sac metal sektöründeki giderek artan ve farklılık gösteren az sayıdaki talepleri daha ekonomik bir şekilde karşılayabilmek için artışı şekillendirme yöntemi son yıllarda ön plana çıkmaktadır. Bu çalışmada artışı şekillendirme yönteminin alüminyum alaşımlarıyla olan ilişkisi incelenmiştir. Malzeme olarak AA 2024 alüminyum levhalar tercih edilmiştir. 1 mm kalınlığındaki bu levhalar tedarik şekli olan T3 temper hali ve çökelme sertleştirme işlemi uygulanmış hali olmak üzere iki farklı şekilde artışı şekillendirme yöntemi deneyinde kullanılmıştır. Artışı şekillendirme yönteminde seçilen sabit parametreler devir olarak 500 d/dk, takımın çapı olarak 10 mm ve yatay ilerleme olarak 1000 mm/dk'dır. Artışı şekillendirme yönteminde değişken parametreler ise takım yolları, dikey ilerlemeler ve yağlama çeşitleridir. Tüm bu parametreler alüminyum malzemelerimizin fabrikasyon hali olan T3 temper haline ve ısıtma işlem görmüş haline uygulanmış ve optimum parametre değerleri elde edilerek, her bir parametre için dörder adet olmak üzere deneyler yapılmıştır.

Deneylerde kullanılan numunelerin fabrikasyon ve ısıtma işlemli halinin seçilmesindeki amaç; farklı sertlik değerlerindeki alüminyum levhaların artışı şekillendirilebilme yeteneğini inceleyebilmektir.

Artışı şekillendirme deneyinin optimum parametre değerlerini belirlemeye ise yapılan literatür araştırmaları da göz önünde bulundurularak takım çapı 10 mm ve yatay ilerleme 1000 mm/dk sabit alınarak başlandı. 0.2 ve 0.5 mm/tur değerleri artışı şekillendirmede dikey ilerleme parametresinin etkilerini incelemek üzere seçildi. Bir diğer parametre olan takım yolu ise iki farklı şekilde seçildi. Son olarak yağlama faktörünün artışı şekillendirme yöntemine etkilerinin de incelenmesi için CNC freze tezgahının soğutma sıvısı olan bor yağı ve sıvama yağı kullanıldı. Yapılan çalışma sonucunda 3B lazer tarama verileri göz önüne alınarak 1. takım yolu, 0,5 mm dikey ilerleme, sıvama yağı parametrelerinin ve ısıtma işlem görmüş numunelerin artışı şekillendirme yönteminde diğer parametrelere göre daha elverişli olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Artışı Şekillendirme Yöntemi, AA 2024, Çökelme Sertleştirme

## ABSTRACT

Sheet metal forming industries which have a large product and consumption volume use conventional sheet metal forming techniques due to low production cost per unit. However, in order to afford increasing economical demands and demands which has few differences in more economical way, incremental sheet forming stand out in recent years in the sheet metal industry. In this study, incremental sheet forming relationship with the aluminum alloys has been investigated. AA 2024 aluminum sheets as the material are preferred. These sheets which are 1 mm thickness are used in two different ways in the incremental forming method: supply form market and heat-treated form. Selected fixed parameters in the incremental forming method are 500 cycle/min as the cycle, 10 mm as the set diameter, 1000mm/min as the horizontal progression. Variable parameters in the incremental forming method are set paths, vertical progressions and lubrications types. All these parameters are applied to T3 temper form which is the default state and heat-treated form and, optimum parameter values are obtained. Then, for each parameter, four experiments are carried out.

The aim of selecting the samples in fabrication and heat-treated state for experiments is to analyze the incremental forming ability of aluminum sheets which have different hardness values.

Taking into account literature review, the set diameter and the horizontal progress are set to 10mm and 1000mm/min, respectively to define the optimum parameters of the incremental forming experiment. The values, 0.2 mm/cycle and 0.5 mm/cycle, are selected to analyze the effects of the vertical progress parameter in the incremental forming. Another parameter which is the set path is selected in two different ways. Finally, to investigate the effect of the lubrication factor to the incremental forming method, boron oil which is the cooling liquid for CNC milling machine and machine oil are used. As a result of those studies, taking into consideration 3D lazer scanning datas, the first set path, 0.5 mm vertical progress, machine oil parameters and heat-treated samples are more suitable than the other parameters in the incremental forming method was observed.

**Keywords:** Incremental Sheet Forming, AA 2024, Precipitation Hardening

## 1. GİRİŞ

Geleneksel sac metal şekillendirme yöntemlerinin maliyet ve zaman yönünden parçaya bağımlılığı yüksektir. Sac metal şekillendirme yönteminde artan parça çeşitliliği esnek imalat gereksinimlerinin doğmasına neden olmuştur. Artışlı şekillendirme yöntemi (AŞY) bu esnek imalatı zaman ve maliyet yönünden ekonomik bir şekilde karşılayabilen yöntemlerden biridir.

Sac metal parça üretiminde en çok tercih edilen yöntem kalıpla üretimdir. Özellikle ürün hacmi yüksek olan üretimlerde birim parça üzerine düşen maliyet azalacağından dolayı bu yöntem oldukça verimlidir. Ancak son zamanlarda müşterilerin artan özel ve az sayıdaki taleplerini daha ekonomik bir şekilde mal edebilmek için yeni üretim yöntemleri üzerinde çalışılmaktadır. Bu yöntemlerin başında ise artışlı şekillendirme yöntemi gelmektedir.

Artışlı şekillendirme yöntemi ürün hacmi düşük üretimleri yeni parça ve makinelere ihtiyaç duyulmadan gerçekleştirebilmesiyle dikkatleri üzerine çekmiştir. Bu çalışmanın temel odağı ise Bilgisayarlı Sayısal Kontrol (BSK) daha yaygın kullanımıyla Computer Numerical Control (CNC) makinelerini artışlı şekillendirme yönteminde kullanma gibi büyük bir avantaja çevirmektir. Artışlı şekillendirme yöntemi için bir CNC dik işleme merkezi, yapılacak şeklin negatif yada pozitif şablonu, şekillendirme işlemi boyunca levhayı sabit tutabilmek için bir levha tutucu kalıp ve şekillendirmeyi gerçekleştirecek olan iş miline takılmış uygun boyutta bir takım yeterlidir. Parçanın karmaşık geometrisi ve boyutsal dayanıklılığını sağlayabilmek için parçanın altına konulan kalıp malzemesi çelikler, polimerik malzemeler, termoset reçineler ve sert ağaçlar gibi malzemeler olabilir (Ceretti et al,2004).

Artışlı şekillendirme yönteminde sonlu elemanlar analiz yöntemleri kullanılarak şekil verme işlemi öncesinde hataların önüne geçilebilir. Bu sayede zaman ve para tasarrufu sağlanmış olur (Le Van Sy,2009).

Artışlı şekillendirme yöntemi fikri ilk olarak 1967 yılında ortaya atılmıştır fakat CNC freze ve katı modelleme imkanı olmayışından dolayı o yıllarda kullanılamamıştır. Bu yöntem için ilk olarak 'dieless' terimi adı altında patent alınmıştır (Nimbalkar et al, 2013).

Artışlı şekillendirme yöntemi hem bu yöntem için özel olarak tasarlanmış makinelerde hem de birçok imalat olanağı sağlayan CNC freze tezgahlarında uygulanabilir. Ayrıca artışlı şekillendirme yöntemi tek noktalı artışlı şekillendirme yöntemi (SPIF: Single Point Incremental Sheet Forming) ve iki noktalı artışlı şekillendirme yöntemi (TPIF: Two Point Incremental Sheet

Forming) olmak üzere iki kategoriye ayrılır. Sırasıyla pozitif şekillendirme ve negatif şekillendirme olarak da adlandırılırlar (Le Van Sy,2009).

İki noktalı artışı şekillendirme yönteminde takım merkezden şekil vermeye başlarken, tek noktalı artışı şekillendirme yönteminde takım merkeze doğru şekil verir (Nimbalkar et al, 2013).

Artışlı şekillendirme yönteminin deformasyon mekanizması Kathryn Jackson tarafından özel hazırlanmış bakır levhalar ile deneysel yollarla incelenmiştir. Artışlı şekillendirme yönteminin gerilme dağılımlar her iki yöntem içinde (SPIF ve TPIF) ölçülmüştür. Bu ölçümler SPIF ve TPIF' nin gerilme, takımın dikey düzlemdeki kaymasını ve takımın paralel düzlemdeki kaymasının deformasyon mekanizmalarını göstermektedir. Artan gerilme ve takım yönündeki dikey kayma, SPIF ve TPIF için ölçülen duvar kalınlığı arasındaki farkları açıklar. SPIF ve TPIF' nin gözlemlenmiş mekanizmalarının daha önce varsayılan saf kayma mekanizmalarından farklılık gösterdiği kabul edilmiştir (Nimbalkar et al, 2013).

Rajiv Malhotra şekillendirmeye en derin bölgeden başlayıp adım adım yukarı doğru çıkan birikmiş çift taraflı artışı şekillendirme yöntemi (ADSIF: Accumulative Double Sided Incremental Forming) adında bir strateji önermiştir. ADSIF ve SPIF' de kullanılan takım yolları karşılaştırıldığında, bu strateji büyük ölçüde geometrik doğruluğu ve şekillenebilirliği arttırmıştır (Malhotra et al, 2012).

Park ve Kim alüminyum alaşımları kullanarak tek noktalı ve iki noktalı artışı şekillendirme yöntemi deneyleri yapmıştır. Ayrıca simülasyon programlarıyla elde edilen sonuçlarla deneyden elde edilen sonuçları karşılaştırmışlardır. Keskin kenar ve köşeli geometrilerde tek noktalı artışı şekillendirme yönteminin iki noktalı artışı şekillendirme yöntemine göre daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir (Park et al,2003).

Artışlı şekillendirme yönteminde kullanılan takımlar yarım küre ve bilyeli olarak farklı şekillerde kullanılır. Takımın boyutsal özellikleri verilen geometriye göre belirlenir. Bilyeli takımlarda çok dik açılı şekillendirme işlemlerinde takımın sap kısmının şekil verilen malzemeye temas etmemesi için bilye şeklindeki baş kısmından küçük olması istenir. Ayrıca sürtünmeyi azaltmak ve takım ömrünü uzatmak için takımlara kaplama yapılabilir (Le Van Sy,2009).

Takımların kafa çapları 6 mm 'den başlar ve büyük parçalar için 100 mm 'ye kadar çıkabilir. Buna ek olarak takım çapı seçilirken elde edilmek istenen geometrinin en düşük içbükeyine bakılır (Nimbalkar et al, 2013).

Park ve Kim alüminyum malzemeler kullanarak takım boyutu ve takım tipinin artışı şekillendirme yöntemine etkilerini araştırmışlar ve bilyeli takımların küre takımdan verimli olduğunu belirtmişlerdir. Boyut olarak ise 10 mm çapın etkili olduğunu öne sürmüşlerdir (Park et al,2002).

Artışlı şekillendirme yönteminde takım yolu; boyut doğruluğuna, şekillenebilirliğe, yüzeylerin son haline, kalınlık değişimine ve işlem süresine doğrudan etki eder. Spiral takım yolu diğer takım yollarına göre daha üniform bir kalınlık dağılımına sahiptir. En yaygın kullanılan takım yolu ise geleneksel frezeleme takım yoludur. Takım yolunun yanı sıra takım çapı, dikey adım boyutu, eğim açısı, yağlama ve takım hızı yüzey kalitesinde etkili olan parametrelerdir (Jeswiet et al, 2005).

G. Hussain, duvar açıları maksimum noktaya yaklaştığında incelme bandı bölgelerinin oluştuğunu belirtmiştir (Hussain et al, 2008).

Şekillendirilebilirliği ölçmek amacıyla kesik koni çalışmalarıyla çatlama olmaksızın dayanabileceği maksimum duvar eğim açısına tanımlanmıştır (Hussain et al, 2007).

M. Durante, artışlı şekillendirme yöntemi üzerinde takımın dönme etkisini araştırmıştır. Ayrıca artışlı şekillendirme yönteminde genlik ve yüzey pürüzlülüğü için takım yarıçapı, dikey adım ve bileşenlerinin eğim açısına bağlı olduğunu öne sürmüştür (Durante et al,2010).

Ambregio 1 mm kalınlığında AL1050-0 malzeme kullanarak tepesi kesilmiş koni ve piramit olmak üzere iki farklı geometri kullanmış ve parçaların duvar kalınlıklarını ölçerek analiz programlarındaki elde ettikleri değerler ile karşılaştırmıştır (Ambregio et al,2005).

Şekillendirilebilirlik sınır diyagramı (FLD:Forming Limits Diagram) şekillendirmenin sınır limitlerini belirleyen en yaygın faktördür. Bu faktör güvenli ve riskli bölgeleri gösterir. SPIF' yi etkileyen en önemli faktörler malzeme tipi, malzeme kalınlığı, oluşturulan şeklin geometrisi, takım boyutu (çapı) ve artışlı şekillendirme tipi olarak tespit edilmiştir. M. Ham' ın deneysel çalışmaları şekillendirilebilirliğin tüm kritik faktörlerinde yeni sonuçlar sunmuştur (Ham et al,2006).

Joost Duflou sac metal oluşturulabilmesi için gerekli kuvveti etkileyen en yaygın dört işlem parametresini araştırmış ve takım çapı, dikey ilerleme, parça duvar veya duvar açısının dikliği ve levha metal kalınlığı olarak belirlemiştir (Duflou et al,2007).

Deneysel kanıtlar ve analizler artışı şekillendirme yöntemini dört ana faktörün etkilediği sonucuna varmıştır: dikey ilerleme, takım hızı, takım çapı ve sac kalınlığı. Takım hızından kasıt besleme ve devirdir. Takım çapı ise genellikle gerilmenin yoğunlaştığı temas alanı için açıklanmıştır (Martins et al, 2008, Jackson et al,2009).

Artışlı şekillendirme yöntemiyle şekillendirilen sac metalin duvar eğimi ve köşe radüsleri arasındaki çatlak geçişleri tek noktalı artışlı şekillendirme yönteminin temellerini anlamak için en önemli bilgidir. Bu duvar eğimleri ve köşe radüsleri arasındaki çatlak geçişlerindeki malzeme hasarını anlayabilmek için tek noktalı artışlı şekillendirme için kapalı analitik form modeli ilk kez M.B. Silva ve P.A.F. Martins tarafından ortaya çıkmıştır. Bu model zar analizleri üzerine yapılmış ve takım ve sac yüzeyi arasındaki deneysel gözlemlere dayanmıştır (Martins et al,2008, Silva et al,2008).

Dai artışlı şekillendirme yönteminde ideal bir şekil elde etmek için şekillendirmeye başlama yerinin optimizasyonu konusunda çalışmalar yapmıştır. Farklı şekillendirme yerlerinin seçilmesi ile sac parça üzerinde farklı gerilme dağılımları oluştuğunu ortaya koymuşlardır (Dai et al,2000).

Rajiv Malhotra son zamanlarda geliştirilmiş çatlak modeli ile sonlu elemanlar analizlerini birleştirerek koni ve huni şekilleriyle SPIF de çatlak oluşumunu öngörmüştür. Deneyler şekillenebilme zorlanmasını, kalınlığı ve çatlak derinliğini FEA ile doğrulamak için yapılmıştır (Malhotra et al,2012).

Polimer parçaları üretmek için geleneksel teknolojiler ısıtma-şekillendirme-soğutma üretim yollarına dayanır ve ekonomik sınırlamalar için büyük üretimle yakından bağlantılıdır. Aynı şekilde artışlı şekillendirme yönteminde de soğuk ve sıcak şekillendirme yöntemleri mevcuttur. P.A.F. Martins SPIF ile oda sıcaklığında düşük üretim ve küçük grup polimer sac bileşenlerini üretme olasılığını değerlendirmiştir. Deneysel sonuçlar oda sıcaklığındaki SPIF ticari sac polimerlerinin çok yüksek derinliklere sahip kompleks parçaları üretebilme potansiyelleri olduğunu doğrulamıştır. Ayrıca S. Alkas Yonan termoplastikler için lineer olmayan visko plastik sonlu yamulma modeli geliştirmiştir ve bunun uygulamasını PVC' nin (polyvinylchloride) artışlı soğuk şekillendirmesinin simülasyonu olarak gerçekleştirmiştir (Martins et al,2009, Franzena et al,2009, Alkas et al, 2014).

G. Ambrogio magnezyum alaşımlarının sıcak artışlı şekillendirilebilirliğini araştırmıştır. Isıtma işlemini sürekli bir akım sağlayarak gerçekleştirmiştir. Sonuç olarak ise çeşitli alaşımlar üzerinde yaptığı deneylere dayanarak sıcak artışlı şekillendirme yönteminin soğuk olana göre daha iyi bir performans sağladığını belirtmiştir (Ambrogio et al,2012).

C. Bouffieux havacılık alanına çok iyi uyum sağlamış ve az bilinen son zamanlarda geliştirilen AlMgSc alaşımı üzerinde çalışmıştır. SPIF' nin bu malzeme üzerindeki uygulanabilirliğini incelemiştir. Kesik konileri birçok değişik geometriyle birlikte oluşturmuş ve maksimum bir şekillendirme açısı belirlemiştir. Buna ek olarak sayısal bir model geliştirerek sürecin güç dağılımını ve son geometrik şeklin tahminlerini doğrulamıştır (Bouffieux et al,2011).

C. Bulut AA5754 malzemesi kullanarak dikey ilerleme, takım kaplaması, yağlama ve takım çapı parametrelerini kullanarak bir çalışma yapmıştır. Simülasyon programlarıyla parçanın simülasyonunu yapmış ve bunu deney sonuçlarıyla karşılaştırmıştır. Takım çapı olarak 10 mm, dikey ilerleme olarak 0,7 mm ve takım kaplaması olarak TiAlN kaplamasının artışı şekillendirme işlemi için uygun olduğunu belirtmiştir. Kullanılan yağ olarak ise makine ve gres yağının bor yağına göre daha elverişli olduğu sonucuna varmıştır (Bulut, 2008).

Guoqiang Fan takım çapı, besleme oranı ve adım boyutu gibi parametrelerin AZ31 magnezyum üzerindeki potansiyelleri alanında çalışmıştır (Fan et al,2008).

G. Hussain derinlik boyunca değişen eğim, alüminyum sac metallerde derinlik ve parçalarda değişen çeşitli eğimleri karşılaştıran bir çalışma yapmıştır (Hussain et al,2007).

Artışlı şekillendirmede uygun takım ve yağlama seçimi sadece başarılı bir şekillendirme için önemli değildir, ayrıca eşit bir yüzey kalitesi içinde önemlidir. G. Hussain ticari olarak artışlı şekillendirme uygulanan saf titanyum levhalara (CP Ti) uygun takım ve yağlama çalışmasını mercek altına almıştır. Farklı takım ve yağlama kombinasyonları denemiştir. Her bir takım ve yağlama kombinasyonunun yüzey işleme kalitesine etkisini bir yüzey pürüzlülüğü ölçme cihazıyla ölçmüş ve SEM ile tarayarak da yüzey incelemesi çalışmaları yapmıştır (Hussain et al,2008).

Qinglai Zhang sıcak negatif artışlı şekillendirme yöntemiyle AZ31 magnezyum alaşımı için uygun yağlama ve yağlama metodları geliştirmek için çalışmalar yapmıştır (Zhang et al,2010).

Bu tez çalışmasında, geleneksel sac metal şekillendirme yöntemlerine alternatif olması nedeniyle artışlı şekillendirme yöntemi kullanılarak AA 2024-T3 malzemelere şekillendirme yapılmıştır. Yapılan bu taramalar ışığında optimum deney parametreleri belirlenmiş ve bu parametrelerin uygulamaları yapılmıştır. Yapılan deneyler sonrasında ise deney numuneleri üç boyutlu lazer tarama yöntemi ile ölçülmüş ve geometrik doğrulukları incelenerek yorumlanmış, ideal artışlı şekillendirme için bulunan deney parametreleri belirtilmiştir. Ayrıca artışlı şekillendirme yönteminin fiyat avantajını belirlemek için firmalardan fiyat teklifleri alınıp ve bu fiyatlar geleneksel sac metal şekillendirme yöntemlerinin fiyatlarıyla karşılaştırılmıştır.

## 2. ŞEKİLLENDİRME YÖNTEMLERİ

### 2.1. Sac Metal Şekillendirme Yöntemleri

Günümüz piyasa şartlarındaki rekabet ortamına ayak uydurabilmek için seri üretim oldukça önemlidir. Seri üretimin birden fazla yöntemi mevcuttur ve bunlardan en önemlisi kalıpla üretimdir. Kalıpla üretimde; üretim sayısı artar ve iş gücü ve iş zamanı azalır.

Kalıpla Üretimin Avantajları;

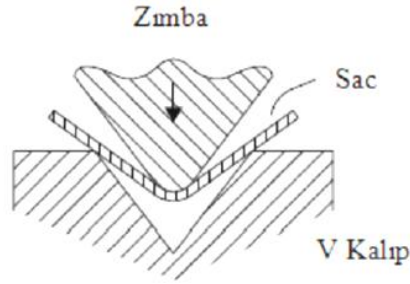
- Seri üretimi artırır.
- Üretilen parçalar ölçü tamlığı içerisinde özdeştir.
- Kalıplanacak parçalar için üretim kolaylığı sağlar.
- Kullanma yerlerine göre kalıplanan parçaların yeniden işlenmesine gerek yoktur.
- Değişik yöntemlerle üretilmeyen çok küçük parçaların üretimine kolaylık sağlar.
- Biçim ve boyutları değişik (simetrik olmayan) parçaların üretimi ekonomiktir.

Kalıpla Üretimin Dezavantajları;

- Üretimi yapılacak kalıbın maliyeti yüksektir.
- Kalıbın yapımında kullanılan takım tezgâhları ve avadanlıkları pahalıdır.
- Genellikle kalıplarla üretilen parçaların kontrolü ve üretimin kontrolü zordur.
- Her konuda bilgi sahibi olan iyi bir kalıpcının kısa zamanda yetiştirilmesi kolay değildir.
- Bazı hallerde bozulan kalıbın bakım ve onarımı zordur. (Erişkin ve Uzun, 2002).

#### 2.1.1. Bükerek Şekillendirme Yöntemi

Bükerek şekillendirmede iş parçası eğme kuvvetleri vasıtasıyla plastik olarak şeklini değiştirir. Bu yöntem, sacları, boruları, telleri, profilleri ve çubuk malzemeleri şekillendirmek için uygulanır. Bükme işlemi esnasında iş parçasının dış yüzey lifleri uzar, buna karşılık iç yüzey lifleri kısalır (Şekil 2.1). İkisinin arasında bulunan bir lif gerilmemiş kalır ve boyu eğme işlemi esnasında değişmez (Kulaksız ve diğerleri, 1995).

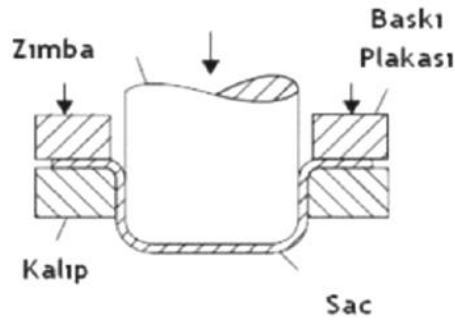


Şekil 2.1. Bükerek şekillendirme yöntemi (Marciniak et al, 2002)

### 2.1.2. Derin Çekme ile Şekillendirme Yöntemi

Derin çekme yönteminde daha önce kesilmiş olan bir sac parçası, sac kalınlığında tasarlanan bir değişiklik yapılmadan bir veya çok kademeli çekme işlemleri halinde çukur bir gövde oluşturulur (Şekil 2.2.). Kalıplama kuvvetinin etkisi altında iş parçası plastik olarak şekil değiştirir ve çekme kenarları çekme yönünde akar. Bu esnada malzemede, çekme yönünde uzayan ve buna dik yönde çoğalan basınç kuvvetleri meydana gelir.

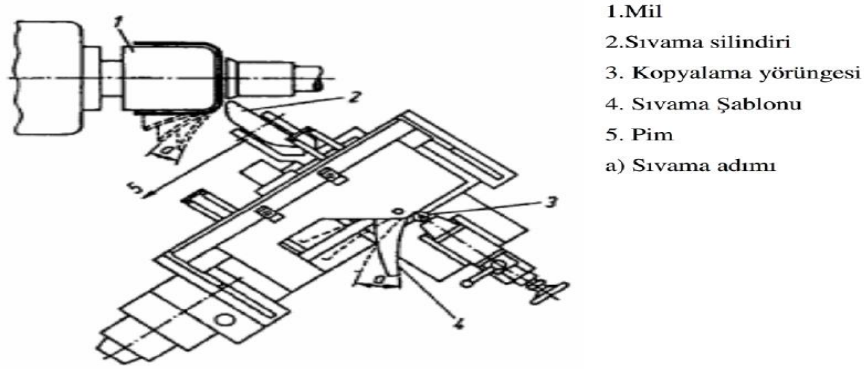
Derin çekme işlemi esnasında uygun yağlama maddeleri kullanmak suretiyle sac ve kalıp arasındaki sürtünme azaltılır. Çekme kenarlarındaki aşınma düşürülür ve malzemelerin zorlanması azaltılır (Kulaksız vd., 1995).



Şekil 2.2. Derin çekme işlemi (Marciniak et al, 2002)

### 2.1.3. Sıvama Kalıplama İle Şekillendirme

Sıvama metodunda daha önce kesilmiş olan bir sac malzeme bir sıvama kalıbının üzerine bastırılır; bu esnada iş parçası ve sıvama kalıbı döner. Sac malzemede bir buruşma meydana gelmesinden sakınmak için bir karşı tutucu parça ile sırt tarafından desteklenir (Şekil 2.3.). Basit sıvama işlemleri genellikle torna tezgahlarında yapılmaktadır (Kulaksız vd., 1995).



Şekil 2.3. Sıvama işlemi ve tertibatı (Marciniak et al, 2002)

#### 2.1.4. Şişirme Yöntemiyle Şekillendirme

Daha önce çekme kalıplarıyla üretilmiş silindirik kap şeklindeki parçalar, şişirme kalıpları yardımıyla istenilen şekilde biçimlendirilir. Şişirme kalıplama işlemiyle üretilcek parça, önce çekme ve sıvama kalıplarıyla ön biçimlendirmeye tabi tutulur. Daha sonra şişirme kalıplarıyla parçaya son şekil verilir (Erişkin ve Uzun, 2002).

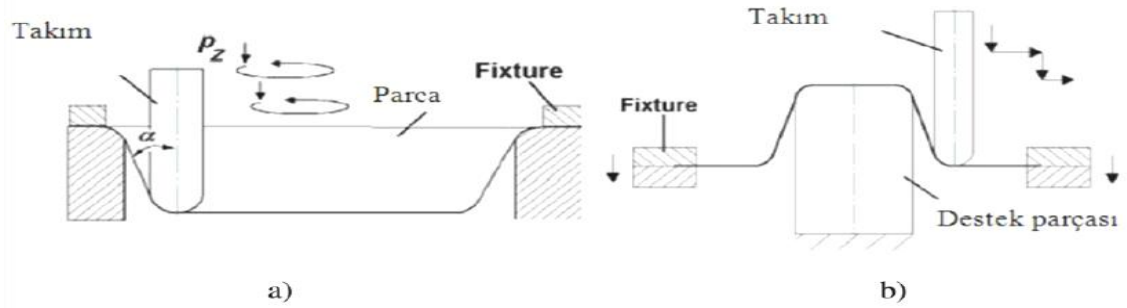
#### 2.1.5. Çok Noktalı Derin Çekme Yöntemiyle Şekillendirme

Sac metallerden üç boyutlu karmaşık parçaların en az malzeme kullanılarak derin çekme yöntemiyle imalatı daima etkili bir üretim yöntemi olarak kullanılmaktadır. Bu geleneksel yöntemde, zimba ve kalıp tek parçalı olarak yapılır ve sac malzeme kalıp boşluğunda şekillendirilir. Bazen bir parçanın üretimi birden fazla kalıp setini gerektirdiğinden kalıp maliyeti, dolayısıyla parça maliyeti artar. Çok noktalı derin çekme yönteminde ise zimba ve kalıp çok sayıdaki zimbalarından meydana gelir. Sadece zimba çok noktalı yapılabileceği gibi aynı zamanda kalıp da aynı sistemle üretilir ve her bir zimbanın hareketi bilgisayarlı kontrol sistemleri ile ayrı ayrı kontrol edilebilir. Bu sistemde, zimbalar ne kadar küçük çaplı ve aralarındaki mesafe ne kadar az olursa, şekillendirilen yüzey de o kadar kusursuz olur. Ayrıca, bu sistemde kısmi şekillendirme tekniği uygulanarak büyük parçalar küçük preslerle ve kalıplarla kolayca şekillendirilebilir. Değişken şekilli zimba ve kalıp üretimi kalıp maliyetlerinin azaltılması, her bir zimba hareketinin ayrı ayrı kontrol edilebilmesi ve zimbaların daha kolayca değiştirilebilmesi açısından daima cazip bir üretim yöntemi olmuştur (Korkmaz ve Gavas, 2005).

## 2.2. Artışlı Şekillendirme Yöntemi

Değişik ebat ve tiplerde takımlar kullanılarak, sac metalden talaş kaldırmadan ardışık bir şekilde zorlayarak şekillendirilmesine artışlı şekillendirme yöntemi denir. Bu yöntem, kalıpla üretim gibi büyük hacimlerdeki üretimlerden ziyade çok düşük miktardaki üretim taleplerini ekonomik bir şekilde karşılamak için kullanılmaktadır.

Artışlı şekillendirme yöntemi hem CNC freze tezgahlarında hem de bu yöntem için özel olarak tasarlanmış makinelerde uygulanabilir. Bu yöntem tek noktalı artışlı şekillendirme yöntemi ve iki noktalı artışlı şekillendirme yöntemi olmak üzere ikiye ayrılır. Ayrıca sırasıyla pozitif şekillendirme ve negatif şekillendirme diye de adlandırılırlar.



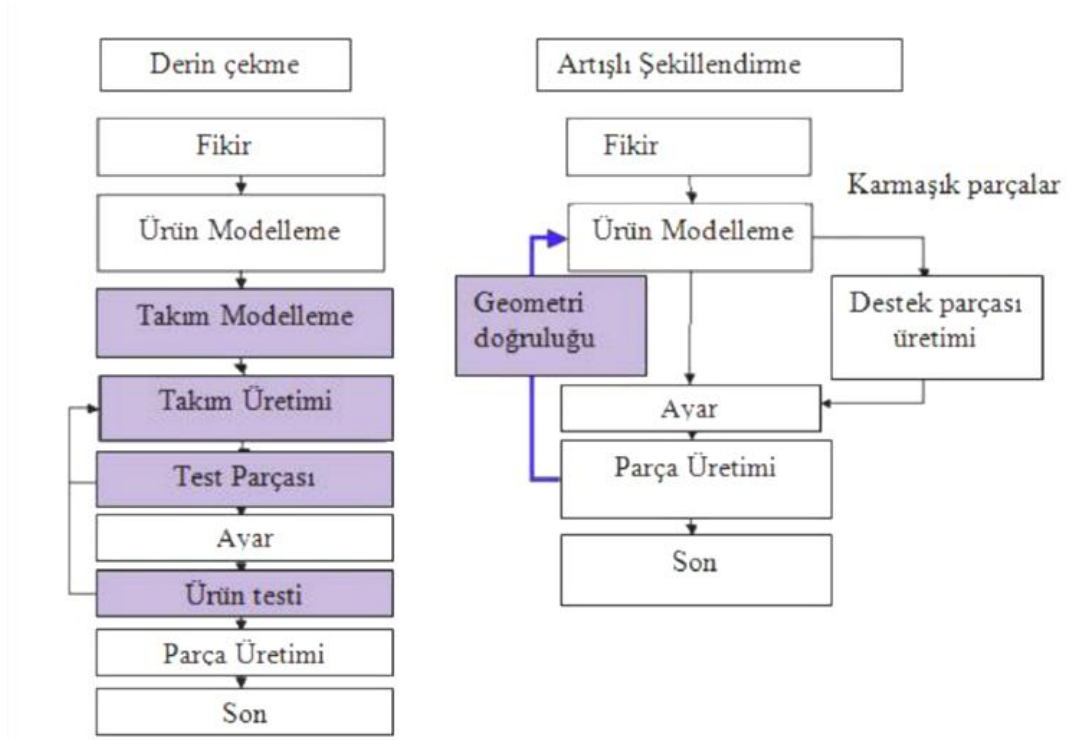
Şekil 2.4. a) Negatif şekillendirme b) Pozitif şekillendirme (Pohlak et al, 2007)

Artışlı şekillendirme yönteminin avantajları;

- İşlemin her adımında müdahale edilebilir.
- Bilgisayar ortamında katı modeli oluşturularak direk üretime geçilebilir ve bu şekilde hızlı bir üretim sağlanır.
- Analiz programlarıyla işlem öncesi hatalar görülebilir.
- Kalıp maliyeti olmadığı için az sayıdaki üretimlerde çok ekonomiktir.
- İşlemler diğer yöntemlere göre güvenli ve gürültüsüzdür.
- Parça geometri aralığı destek parçalar sayesinde geniştir.
- Artışlı şekillendirme yönteminin dezavantajları;
- Yüksek hacimli üretimler için çok maliyetlidir.
- Üretim alanında uzman kişiler tarafından yapılmalıdır.

### 2.2.1. Derin Çekme ile Artışlı Şekillendirme Yönteminin Karşılaştırılması

Şekil 2.5' de görüldüğü gibi derin çekme ile artışlı şekillendirme kıyaslandığında artışlı şekillendirmenin derin çekme işlemine göre; zaman, işçilik, malzeme tasarrufu, enerji tasarrufu yönünden daha avantajlı olduğu görülmektedir.

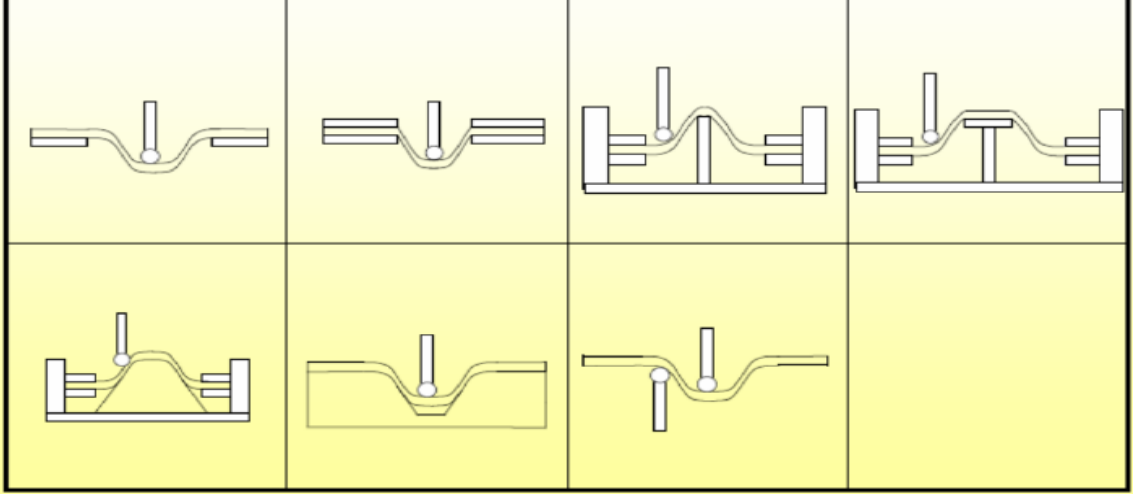


Şekil 2.5. Derin çekme ile artışlı şekillendirme yönteminin işlem basamaklarının karşılaştırılması (Tuomi ve Lamminen,2004)

Artışlı şekillendirme yöntemi üretim işlemleri geleneksel üretim yöntemlerinin işlemlerinden daha kısadır. Üretim yolu doğrudan üç boyutlu bilgisayar destekli tasarım dosyalarından çıkartılır ve sık sık takımlara ihtiyaç duyulmaz. Eğer destek parçasına ihtiyaç duyulursa üç boyutlu bilgisayar destekli tasarım dosyasından destek takımı için takım yolu üretilerek parça üretimi gerçekleştirilir. Bazı durumlarda destek parçalarına ihtiyaç duyulmaz ve işlemler çok kısadır. Aynı zamanda parça üzerinde değişiklik yapılması istenildiği takdirde gerekli değişiklikler yapılarak parça üretimi yapılabilir ancak diğer üretim yöntemlerinde bu işlem çok maliyetli olmaktadır (Bulut, 2008).

Artışlı şekillendirmede üretilecek basit parçalar için Şekil 2.6 de görüldüğü gibi basit kılavuz kalıplar kullanılacağı gibi şeklin destek kalıbı da kullanılabilir.

Ancak kılavuz kalıp iyi hazırlanmadığı takdirde sorunlarla karşılaşılabilir. Hazırlanan kalıplar işleme zamanından ve maliyetten tasarrufta bulunmak için polyamid, sert tahta vb. malzemelerden üretilir.



Şekil 2.6. Takım ve destek parçası (Jackson, 2005)

### 2.3. Şekillendirilebilirliği Etkileyen Faktörler

#### 2.3.1. Uzama

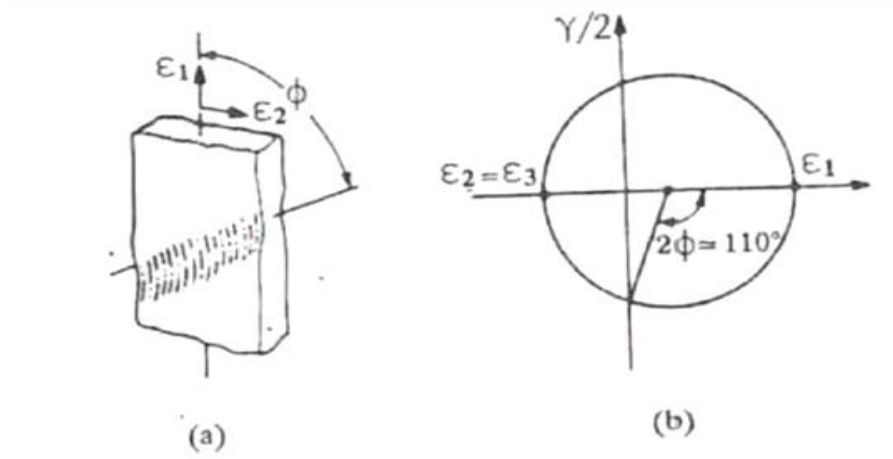
Çekme deneyinde, deney parçası, en büyük yüke kadar tüm ölçü boyunda üniform olarak şekil değiştirir. Çekme kuvvetinin en büyük değeri almasıyla yerel kesit daralması (büzülme) başladığı için uzama da üniform olmaktan çıkar. Saçların şekillendirilmesinde malzemenin üniform uzama yüzdesinin yüksek olması istenir. Gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme davranışı

$$\sigma = K \cdot \epsilon^n \quad (2.1)$$

ile gösterilebilen bir malzemenin çekme deneyinde maksimum yükte  $s = n$  olduğundan plastik şekil verilecek bir saçın pekleşme üstelinin yüksek olmasında fayda vardır. Saçların çekme deneyinde, büzülme çekme doğrultusu ile  $\Phi$  açısı yaparak oluşur. İzotrop malzeme için,

$$\epsilon_1 = \epsilon_3 = -\epsilon_2 / 2 \quad (2.2)$$

ve Poisson oranının plastik alanda 0,5 olduğu göz önüne alınarak Mohr dairesinden  $\Phi$  açısı yaklaşık olarak  $55^\circ$  bulunur.

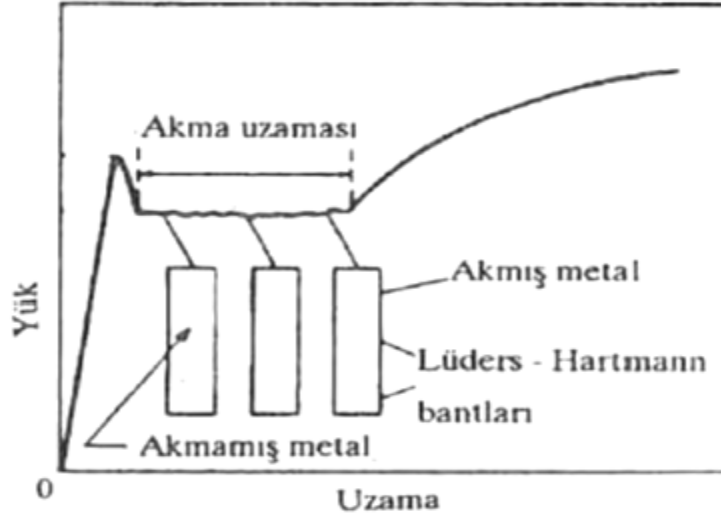


Şekil 2.7. Sacların çekme deneyinde büzülmesi (Çapan,2003)

Çekme deneyinde kopma uzaması üniform uzama ile büzülme uzamasının toplamıdır. Üniform uzamaya malzemenin pekleşme üsteli  $n$ , büzülme uzamasına ise şekil değiştirme duyarlılığı üsteli  $m$  etki eder. Yüksek  $m$  değeri kırılmadan önce oluşan büzülme uzamasının büyük olmasını sağlar. Dolayısıyla  $n$  ve  $m$  değerleri arttıkça toplam uzamada artar. Bu nedenden dolayı  $n$  ve  $m$  değeri yüksek olan saçlar şekillendirmeye en uygun saçlardır (Kalpakjian, 1991).

### 2.3.2. Akma Uzaması

Belirgin akma gösteren malzemelerde, gerilme üst akma sınırından alt akma sınırına düştükten sonra, alt akma sınırı boyunca gerilme yeniden yükselmeye başlayana kadar uzamaya akma uzaması denir. Üst akma sınırında, gerilme yığılması olan bir noktada, malzeme plastik şekil değişimine uğramış bir bant oluşur (Şekil 2.8). Gözle görülebilen bu bantın oluşmasıyla birlikte gerilme alt akma sınırına düşer ve akma uzaması boyunca bant deney çubuğu üzerinde yayılır. Çoğunlukla, çeşitli noktalarda gerilme yığılması olduğu için oluşan bant sayısı da birden fazla olur. Genel olarak çekme doğrultusu ile yaklaşık  $45^\circ$  açı yapan bu bantlara Lüders-Hartmann bantları denir. Lüders-Hartmann bantları ürünün yüzey görünümünü bozdukları için malzemenin belirgin akma göstermesi önlenmeli veya akma uzaması küçültülmelidir. Bu amaçla saç soğuk haddelenerek kalınlığı çok az ( $\%0,5 \dots 1,5$ ) düşürülür. Bu işleme temper haddelenmesi denir.



Şekil 2.8. Akma uzaması ve Lüders-Hartmann bantları (Kalpakjian, 1991)

Temper haddesinden sonra saçlar şekil değişimi yaşanmasına uğramadan imalata alınmalıdır. Aksi halde, depolamada belirli bir süre (kaynar çelik için 1-3 hafta) aşılırsa belirgin akma ve dolayısıyla Lüders-Hartmann bantları yeniden görülür.

### 2.3.3. Anizotropi Faktörü

Çok kristalli metalik malzemelerin anizotropi olmaları malzemenin anizotropik olan kristal yapısından kaynaklanmaktadır. Tercihli yönelmenin yol açtığı ve kristalografik anizotropi ve bantlı (lifli) yapının oluşturduğu anizotropi olmak üzere iki çeşit izotropi durumu vardır. Çok kristalli malzemelerde, kristallerin veya tanelerin rastgele yönelmeye karşı olarak tercihli yönelme durumu gösterdikleri durumda malzemenin yapısal anizotropisi söz konusu olur.

Tercihli yönelme durumu metalik bir parçanın plastik alanda yüklenmesi halinde, tanelerin kafes doğrultularının yüklemeye bağlı olarak belirli ve ortak doğrultuda dönmesidir. Bu durumda malzemede anizotropi gözlemlenir. Örneğin haddelenmiş çelik saçtan farklı doğrultularda alınan numunelerin enine doğrultuda (haddelenme doğrultusuna dik) akma sınırının boyuna doğrultudaki (haddelenme doğrultusu) akma sınırından daha yüksek olduğu saptanmıştır. Bantlı yapının oluşturduğu anizotropi durumu ise malzemedeki segregasyonlu bölgelerin ve şekil verilebilen kalıntıların uzaması, şekil verilemeyen kalıntıların da kırılarak şekil verme doğrultusunda sıralanması sonucu oluşur. Bantlı içyapı, şekil değiştirme doğrultusuna dik doğrultuda çok sık tekrarlanan süreksizliklerden dolayı anizotropiktir. Çok kristalli malzemelerin yapı dokusu ısıtılma işlemi, döküm ve deformasyon durumlarında meydana gelir. Bu durumda malzemenin mekanik özellikleri belli bir yöne anizotropi gösterir (Anon).

Malzemelerde, üretim sırasında anizotropi oluşumu, bu malzemelerin daha sonraki kullanımları bakımından önemlidir. Örneğin soğuk haddelenmiş saclarda enine doğrultudaki süneklik, boyuna doğrultudakine (haddeme doğrultusu) kıyasla düşüktür. Dolayısıyla anizotrop bir sac kullanılarak yapılacak herhangi bir üretimde, örneğin bükmede, bu durum göz önüne alınmalı ve bükme kıvrımının haddeme doğrultusuna dik olması sağlanmalıdır (Şekil 2.9). Aksi halde sac çatlayacaktır (Çapan, 2003).



Haddeme Doğrultusu

Şekil 2.9. Bükme ve haddeme doğrultusu (Çapan,2003)

Metal sacların plastik karakteristiklerinin anizotropi ölçümü R değeri ile ifade edilir. Bu değer gerilme testlerinde olduğu gibi en ve kalınlık boyunca olan değişim oranıdır.

$$R = \phi b / \phi s = [\ln ( b_0 / b)] / ( s_0 / s) \quad (\text{Dikey Anizotropi}) \quad (2.3)$$

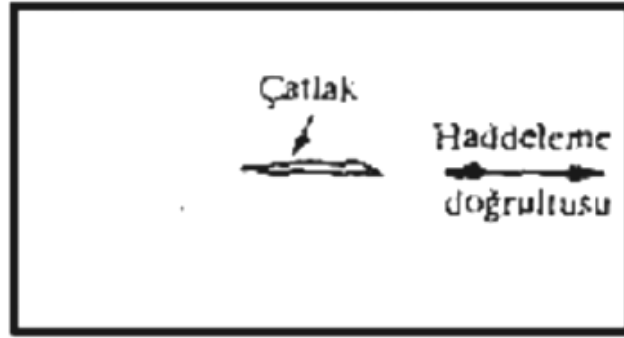
$b_0$ : İlk En Değeri

$s_0$ : İlk Kalınlık Değeri

$b$ : Numunenin Gerilme Altındaki Herhangi Bir Anında Ölçülen En Değeri

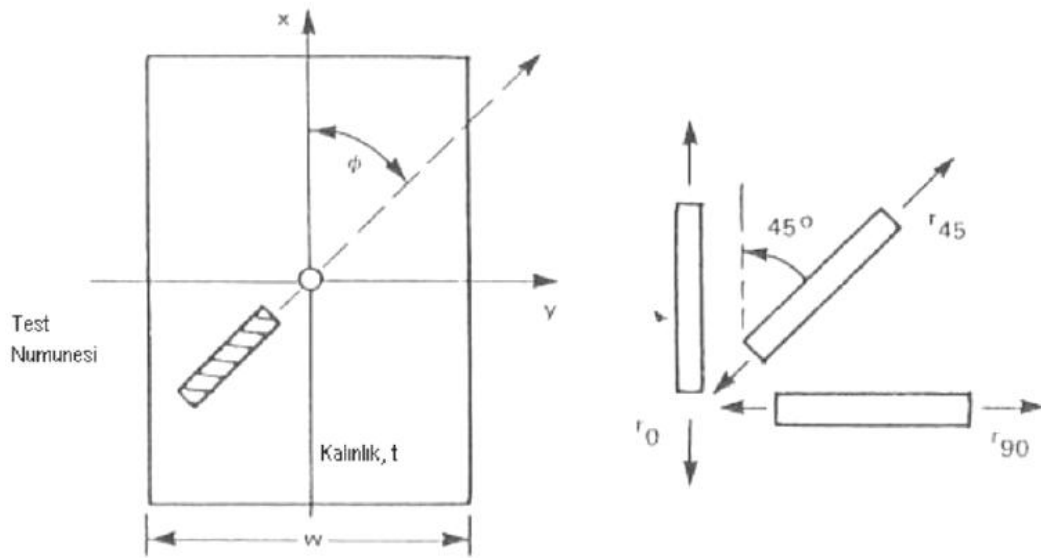
$s$ : Numunenin Gerilme Altındaki Herhangi Bir Anında Ölçülen Kalınlık Değeri

R: Bu değer (Normal Anizotropi) genellikle sac düzleminde sabit değildir. Fakat haddeme doğrultusundan çeşitli açılar doğrultusunda farklılıklar gösterir. Düzlemsel anizotropideki değişim  $\Delta R'$  dir.



Şekil 2.10. Anizotrop bir sacın, bükme kıvrımının haddeleme doğrultusu olmaması halinde çatlaması (Çapan, 2003)

Çatlağın boyu haddeleme doğrultusundadır.  $\Delta R$  değeri sac düzlemindeki farklı  $R$  değerlerinden hesaplanır.  $\Delta R$  değerini hesaplamak için haddeleme doğrultusuna  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  ve  $90^\circ$  lik açılarda çeşitli sac numuneler kesilir.



Şekil 2.11. Haddeleme doğrultusu ve farklı doğrultudaki alınan numuneler ile anizotropi faktörünün incelenmesi (Anon)

X: Haddeleme Doğrultusu

$$\Delta R = \frac{1}{2} (R_0 + R_{90} - 2R_{45}) \quad (\text{Düzlemsel Anizotropi}) \quad (2.4)$$

Normal anizotropi değeri de farklı doğrultuda kesilmiş numunelerden hesaplanabilir.

Buna göre;

$$R = \frac{1}{4} (R_0 + R_{90} - 2R_{45}) \quad (\text{Ortalama Dikey Anizotropi}) \quad (2.5)$$

$R = 1$  ise malzeme izotropdur.

$R \neq 1$  ise ve aynı zamanda bir plaka sactan farklı doğrultularda alınan çekme deneyi örnekleriyle yapılan deneylerde elde edilen  $r$  değeri farklılık göstermiyorsa malzemede dikey anizotropi ve düzlemsel izotropi bulunduğu söylenebilir.

$R \neq 1$  ise ve aynı zamanda sac düzleminde doğrultuya bağlı olarak değişiyorsa malzemede dikey ve düzlemsel anizotropi vardır (Çapan,2003).

Çizelge 2.1.' de bazı malzemelerin  $r$  değerleri verilmiştir.

Çizelge 2.1. Çeşitli malzemelerin anizotropi parametreleri (Kalpakjian,1991)

| Malzeme                 | Dikey Anizotropi Parametresi |
|-------------------------|------------------------------|
| Çinko                   | 0,20                         |
| Sıcak Haddelenmiş Çelik | 0,8...1,0                    |
| Soğuk Haddelenmiş Çelik | 1,35...1,8                   |
| Alüminyum               | 0,6...0,8                    |
| Bakır ve Pirinç         | 0,8...1,0                    |
| Titanyum                | 4...6                        |

$R$  normal anizotropi değeri sacın derin çekme işlemi sırasında davranışını belirlemek için kullanılabilir. Pekleşme üsteline ' $n$ ' ek olarak anizotropi faktörü  $r$  sınır çekme oranını  $\beta_{max}$ ' da etkiler.  $R$  ve  $\beta_{max}$  değerleri arttıkça derin çekilen kabın dip noktasının yırtılması için gereken kuvvet de artar ve toplam çekme kuvveti düşer. Anizotropinin metal sac şekillendirmesinde en bilinen etkileri derin çekme işleminde kulak oluşumu, sac cidar kalınlığındaki değişimlerdir. Derin çekmeye en uygun sacın yüksek  $R$  değeri, düşük düzlemsel anizotropisi ( $\Delta R$ ) olmalıdır.

Derin çekme ve gererek şekillendirme işlemleri kombine olarak uygulanacak sacların hem normal anizotropi hem de pekleşme üstelleri yüksek olmalıdır. Derin çekme ve gererek şekillendirme işlemlerinde rol oynayan ana faktörlere göre pekleşme üstelinin anizotropi değerleri malzemenin işlemlerinde davranışlarını belirlemede en büyük öneme sahiptir (Bulut, 2008).

#### 2.3.4. Tane Büyüklüğü

Saçlarda tane büyüklüğü malzemenin mekanik özelliklerine ve ürün yüzey görünümüne etkileri bakımından önem taşır. Oda sıcaklığında tane büyüklüğü arttıkça akma sınırı, çekme dayanımı ve sertlik düşer süneklik artar. İri taneli metal soğuk şekil değiştirildiği zaman yüzeyi portakal görünümünde pürüzlü olur. Bu nedenle iri taneli saçlar derin çekme, gererek şekillendirme bükme gibi şekillendirme işlemleri için uygun değildir. Genel olarak plastik şekil verilecek saçlarda ASTM tane büyüklüğünün yedi veya malzemenin daha ince taneli olması tercih edilir (Kalpakjian, 1991).

#### 2.3.5. Kalıntı Gerilmeler

Saçların şekillendirilmeleri sırasında üniform olmayan şekil değişimi nedeniyle üründe kalıntı gerilmeler doğar. Dengeleri bozulduğunda kalıntı gerilmeler parçanın çarpılmasına neden olur. Yüzeydeki çekme kalıntı gerilmeleri ise, giderilmedikleri takdirde, gerilmeli korozyon çatlamasına neden olabilir (Çapan, 2003).

#### 2.4. Al Malzemeler ve Özellikleri

Alüminyumun sahip olduğu özelliklerin birleşimi onu son derece faydalı bir mühendislik malzemesi haline getirmiştir. Alüminyum düşük yoğunluğu nedeniyle özellikle taşıt parçaları yapımında tercih edilir. Saf haldeki alüminyum düşük dayanımına rağmen, alaşımlandırılarak dayanımı 690 MPa' a kadar çıkabilir. Alüminyumun yoğunluğu 2,7g /cm<sup>3</sup> olup çelik (7,83 g/cm<sup>3</sup>) ve bakır (8,93 g/cm<sup>3</sup>) yoğunluğunun yaklaşık üçte biri kadardır. Doğru yapılan bir yapı tasarımında alaşımsız çelik yerine alüminyum kullanmak konstrüksiyon üzerine %50 den fazla hafifleme sağlar. 1xxx, 3xxx ve 5xxx serisi alaşımlar ısıtıl işlem uygulanamayan alaşımlardır. 2xxx, 6xxx ve 7xxx serisi alaşımlar ise ısıtıl işlem uygulanabilen alaşımlardır.

##### 2.4.1. Isıl İşlem Uygulanamayan Alüminyum Alaşımları (1xxx, 3xxx ve 5xxx)

1xxx serisi alaşımlar minimum %99,0 alüminyum, empürite olarak da silisyum ve demir içerirler. Bu alaşımlar yüksek oranda haddelenerek levha veya folyo haline getirilerek kullanılırlar. 1100 alaşımlarının tavllanmış durumda çekme mukavemeti 90 MPa' dır. Başlıca elektrik ve kimya sektörlerinde kullanılmaktadır.

3xxx serisi alaşımlarının en önemli alaşımı 3003 tür. Bu alaşım 1100 alaşımına %1,25 mangan ilavesi ile oluşturulur. 3003 alaşımının tavllanmış durumda çekme dayanımı 110 MPa' dır. Bu serinin alaşımları iyi işlenebilirliğin gerektirdiği yerlerde kullanılabilen genel amaçlı alaşımlardır. Manganlı alaşımlar mimari uygulamalarda tercih edilirler.

5xxx serisi alaşımlarının ana alaşım elementi olan magnezyum katı eriyik mukavemetleşmesi sağlar ve miktarı %5' e kadar çıkabilir. Bu serinin endüstride kullanılan en önemli alaşımı 5052'dir. Bu alaşım %52,5 Mg, %0,2 Cr içerir ve tavllanmış durumdaki çekme dayanımı 193 MPa' dır. Magnezyumlu alaşımlar özellikle denizcilik sektöründe tercih edilirler.

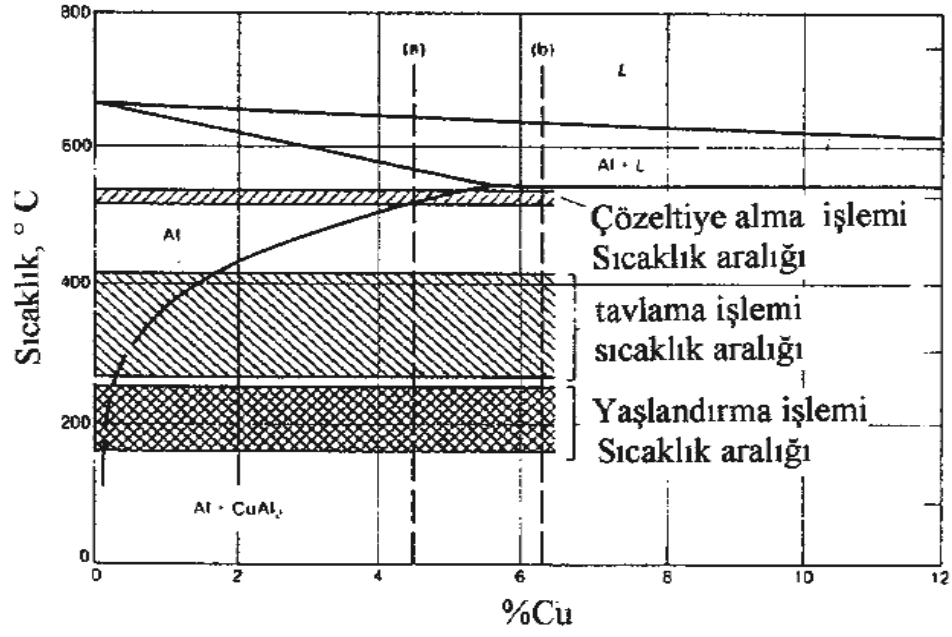
#### **2.4.2. Isıl İşlem Uygulanabilen Alüminyum Alaşımları (2xxx, 6xxx ve 7xxx)**

2xxx serisi alaşımlarının birçoğuna bakırın yanında magnezyum ve düşük miktarda diğer elementler eklenir. 2xxx serisi alaşımları birim ağırlık dayanımının yüksek olması gereken uçak sanayi gibi alanlarda kullanılır. Bu alaşımlar katı eriyik mukavemetlenmesi ve çökelti sertleşmesiyle dayanım kazanırlar. Endüstriyel uygulama alanı bulabilmiş en önemli alaşım 2024 alaşımıdır.

6xxx serisi alaşımlarının  $Mg_2Si$  intermetalik bileşikler, çökelti sertleştirilmesi ile dayanım artışı sağlar. En yaygın kullanılan alaşım 6061 alaşımıdır ve bu alaşım %1 magnezyum, %0,6 silisyum %0,3 bakır içerir. 6061 alaşımının çekme mukavemeti 290 MPa'dır. Bu seri, otomotiv sektöründe genel amaçlı yapı elemanı olarak kullanılır.

7xxx serisi alaşımlar, temel çöktiller  $MgZn_2$  intermetalik bileşiğinden oluşur. Çinkonun ve magnezyumun alüminyum içerisinde yüksek çözünübilirliği yüksek yoğunluklu çöktillerin oluşmasını, bu da dayanımın oldukça yükselmesini sağlar. Bu serinin en önemli alaşımı 7075' tir. Bu çalışmada incelenecek olan alaşım da 7075' tir. Bu alaşım %5,6 çinko, %2,5 magnezyum, %1,6 bakır, %0,25 krom ihtiva eder. 7075-T6 alaşımının çekme dayanımı 504 MPa' dır. Bu seri yüksek dayanımın gerekli olduğu yerlerde kullanılır (Kafalı, 2009).

Çözeltiye alma işleminde  $Al_2Cu$  fazının tamamen çözünmesi için ısıtma yavaş yapılmalıdır. Buna karşılık ısıtma hızlı yapılırsa bu faz tamamen çözünemez. Bu yapıdaki alaşım, ötektik sıcaklığına veya üzerine ısıtıldığında matris ile  $Al_2Cu$  fazının ara yüzeyinde ergime meydana gelecektir. Bu durumda alaşıma su verildiğinde yapıda ince ötektik rozetleri oluşur. Çözeltiye alma sıcaklığı normalden düşük tutulduğunda ikinci fazın tamamen çözünmesi mümkün olmayacak ve alaşım yumuşayacaktır.



Şekil 2.12. Al-Cu denge diyagramda, çözeltiye alma tavlama ve çökelme işleminin yapıldığı sıcaklık aralıkları belirtilmektedir (Geçkinli, 2002, Yılmaz, 2002)

### 3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışmada numunelerin bir kısmına ısıtma işlemi uygulanarak hem alüminyum alaşımlarının artışı şekillendirilebilirliğini hem de ısıtma işleminin artışı şekillendirilebilirliğe etkisi araştırılmıştır. Yapılan ısıtma işlemi ise çökelme sertleşmedir. Bu işlemde başlıca parametreler; çözeltiye alma (solüsyona alma), su verme ve çökelme işlemleridir. Alüminyum alaşımlarında çözeltiye alma sıcaklığı tipik olarak 465-565 °C'dir.

#### 3.1. Malzemeler

Artışı şekillendirme yönteminde alüminyum alaşımlarıyla ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde ağırlıklı olarak AA 5754 malzemesi kullanılmıştır. Bu çalışmada ise, 2xxx alüminyum alaşımı serisinden AA 2024-T3 kullanılmıştır. Deney numunesinin boyutları 200x200x1 mm' dir. AA 2024' ün literatürdeki kimyasal bileşimi Çizelge 3.1' de, çalışmada kullanılan AA 2024' ün kimyasal bileşimi Çizelge 3.2' de, AA 2024' in mekanik özellikleri Çizelge 3.3' de ve çalışmada kullanılan AA 2024' ün mekanik özellikleri Çizelge 3.4 de verilmiştir.

Çizelge 3.1. AA 2024 malzemesinin kimyasal bileşimi

| Element | Cu      | Mg      | Si  | Mn      | Cr  | Zn   | Ti   | Fe  | Al     |
|---------|---------|---------|-----|---------|-----|------|------|-----|--------|
| %       | 3.8–4.9 | 1.2–1.8 | 0.5 | 0.3–0.9 | 0.1 | 0.25 | 0.15 | 0.5 | Kalanı |

Çizelge 3.2. Deneyde kullanılan AA 2024 numunesinin spektral analiz sonuçları

| Element | Si    | Fe    | Cu    | Mn     | Mg    | Zn    | Ni    | Cr    | Pb     |
|---------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|
| %       | 0.073 | 0.102 | 4.59  | 0.54   | 1.46  | 0.020 | 0.009 | 0.002 | 0.009  |
| Element | Sn    | Ti    | B     | Bi     | V     | Cd    | Ga    | P     | Al     |
| %       | 0.007 | 0.022 | 0.005 | <0.002 | 0.008 | 0.004 | 0.008 | 0.001 | 93.141 |

Çizelge 3.3. AA 2024 malzemesinin mekanik özellikleri

|         | Akma Mukavemeti<br>(MPa) | Çekme Mukavemeti<br>(MPa) | Uzama<br>(%50) | Sertlik<br>(Vickers) |
|---------|--------------------------|---------------------------|----------------|----------------------|
| AA 2024 | 370                      | 481                       | 18             | 152                  |

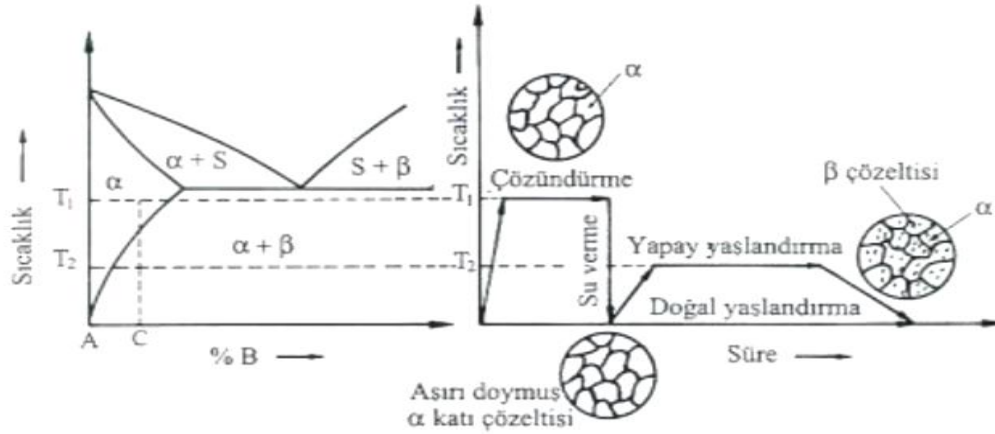
Çizelge 3.4. Deneyde kullanılan AA 2024 numunesinin mekanik özellikleri

|         | Sertlik (Vickers)    |                        | Yüzde uzama (% 50)   |                        | Çekme Dayanımı (MPa) |                        |
|---------|----------------------|------------------------|----------------------|------------------------|----------------------|------------------------|
|         | Isıl işlem<br>Görmüş | Isıl işlem<br>Görmemiş | Isıl işlem<br>Görmüş | Isıl işlem<br>Görmemiş | Isıl işlem<br>Görmüş | Isıl işlem<br>Görmemiş |
| AA 2024 | 164,50               | 116,50                 | 6,30                 | 15,00                  | 304,44               | 422,75                 |

### 3.2. Yöntem

#### 3.2.1. Isıl İşlem

Bu çalışmada ısıtıl işlem parametresinin artışlı şekillendirme yöntemine etkisini görebilmek için çalışmada kullanılan ısıtıl işlem kabiliyetine sahip AA 2024 malzemesine çökelme sertleşmesi ısıtıl işlemi uygulanmıştır.



Şekil 3.1. Çözündürme ve yaşlanma aşamalarını içeren çökelme sertleşmesi işlemini gösteren şematik diyagram (Savaşkan, 1999).

Deneylerde, 1 mm kalınlığında, AA 2024 alüminyum levha kullanılmıştır. Numunelerin sıcaklığı 510 °C' ye çıkarılmış ve bu sıcaklığa ulaştığı andan itibaren 5 dakikalık tav süresinden sonra fırından çıkarılmış ve 15 °C sıcaklıktaki suda soğutulmuştur. Malzemelerin fırından çıkarılıp suya daldırılincaya kadar geçen sürenin 5 saniyeyi geçmemesine özen gösterilmiştir. Parçalar, katı eriyiğe alma işlemi sonrasında yaşlanma ısıl işlemine (yapay yaşlandırmaya) tabi tutulmuştur. Numunelere yaşlanma ısıl işlemi, 190 °C'de 4 saat olarak uygulanmıştır.

### 3.2.2. Takım Çapı

Artışlı şekillendirme yönteminde takım çaplarının şekillendirme üzerindeki etkilerini araştırmak için takım çapı olarak 10 mm' lik çaplarda takımlar kullanılmıştır.

### 3.2.3. Takım Kaplaması

Deneyde çapı 10 mm olan kaplamasız karbür takım kullanıldı. Ancak parametrelerin birinde yaşanan yırtılmayı ortadan kaldırmak için krom nitrür kaplamalı takım kullanılarak kaplamanın artışlı şekillendirme yöntemine olan etkisi kısmen gözlemlenmiştir.



Şekil 3.2. a) Kaplamasız karbür b) Krom-nitrür kaplamalı takım

Çizelge 3.5. CrN kaplama özellikleri (Titanit,2007)

|                           |           |
|---------------------------|-----------|
| Kimyasal Bileşimi         | CrN       |
| Sertlik (HV 0,05)         | 2800±400  |
| Oksidasyon Sıcaklığı (C°) | 700       |
| Sürtünme Katsayısı        | 0,55      |
| Yüzey Pürüzlülüğü (Ra µm) | 0,20      |
| Kalınlık (µm)             | 3-5       |
| Renk                      | Gümüş Gri |

#### 3.2.4. Yatay İlerleme

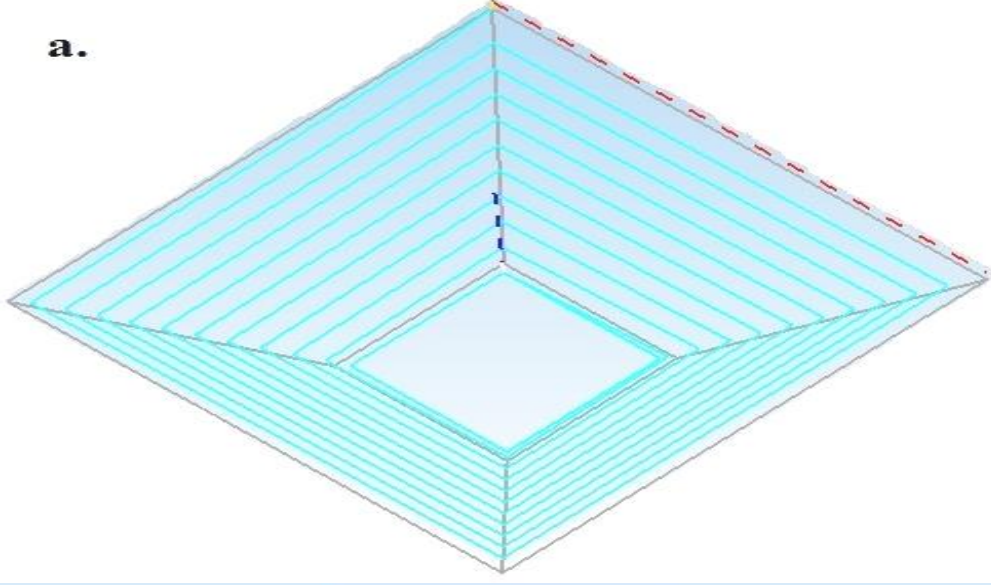
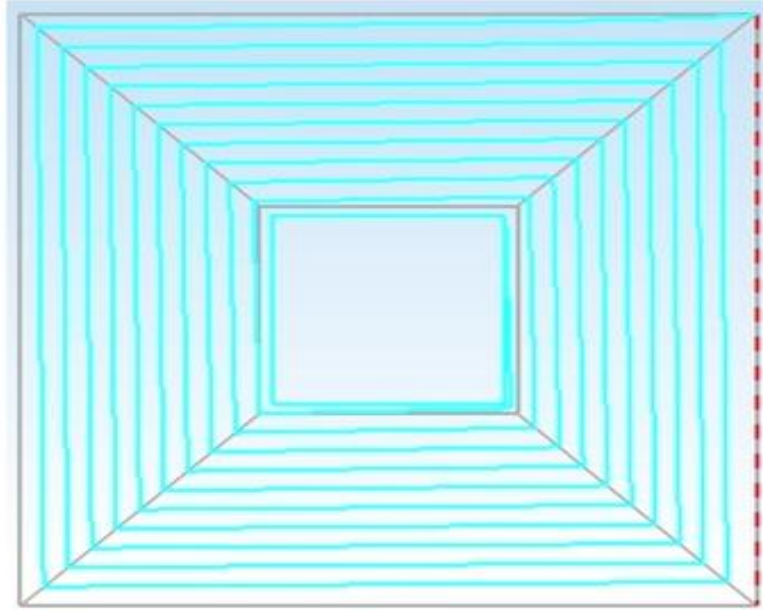
Artışlı şekillendirme yöntemiyle ilgili yapılan literatür araştırmasında 1000 mm/dakika yatay ilerlemenin optimum değer olduğu görülmüş ve bu değer kullanılmıştır (Nimbalkar et al, 2013).

#### 3.2.5. Devir

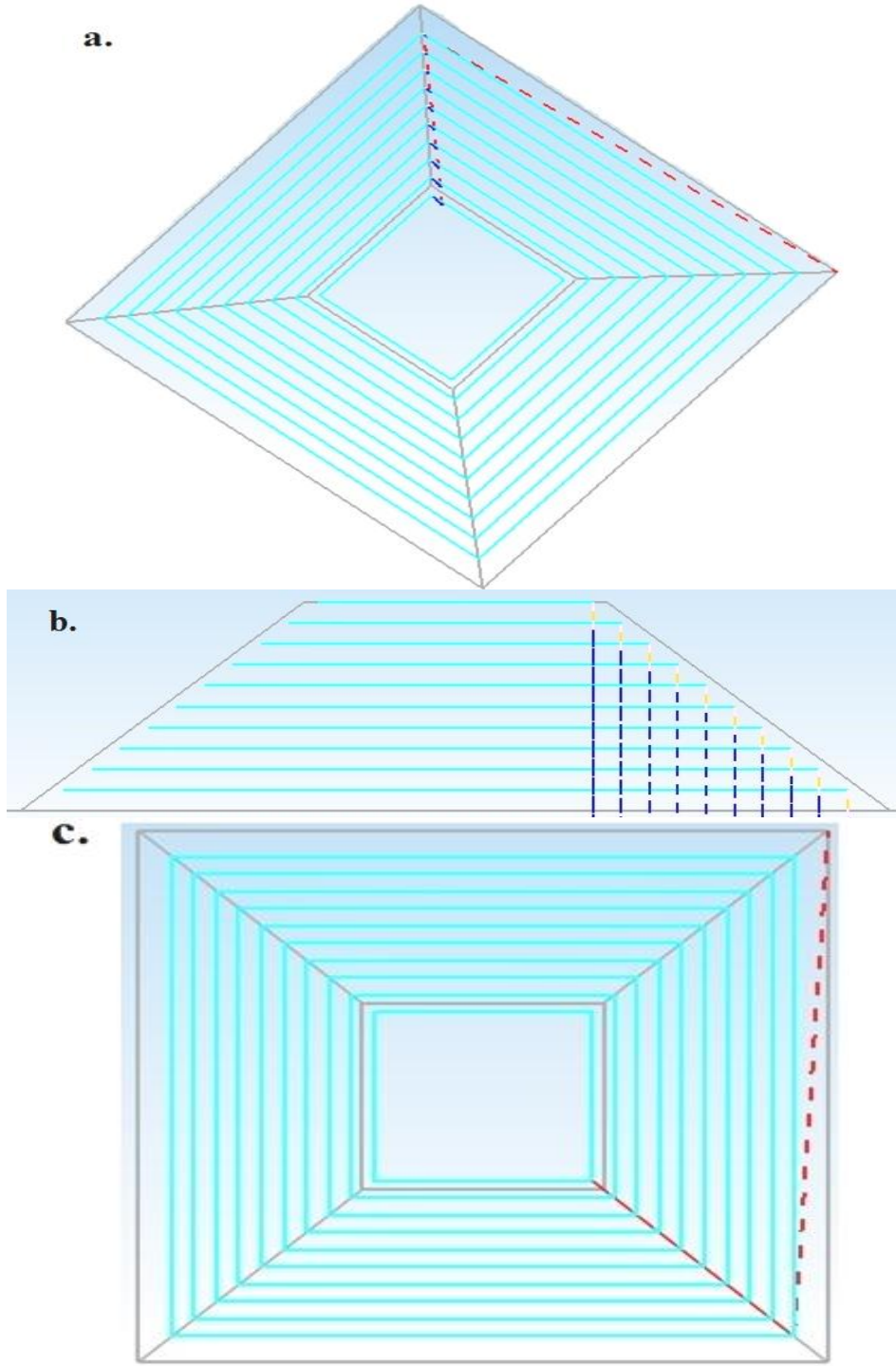
Yapılan çalışmada devir olarak 500 devir/dakika sabit tutulmuştur. Bu değeri belirleme aşamasında ise öncelikle daha önce yapılan çalışmalara bakılmış, bu çalışmalar gölgesinde 0; 5; 500; 600; 675; 750 ve 1000 devir/dakika değerleri denenmiştir. Sonuç olarak gözle yapılan muayene sonucu AA 2024 malzemesi için 500 devir/dakika optimum değer olarak kabul edilmiştir.

#### 3.2.6. Takım yolu

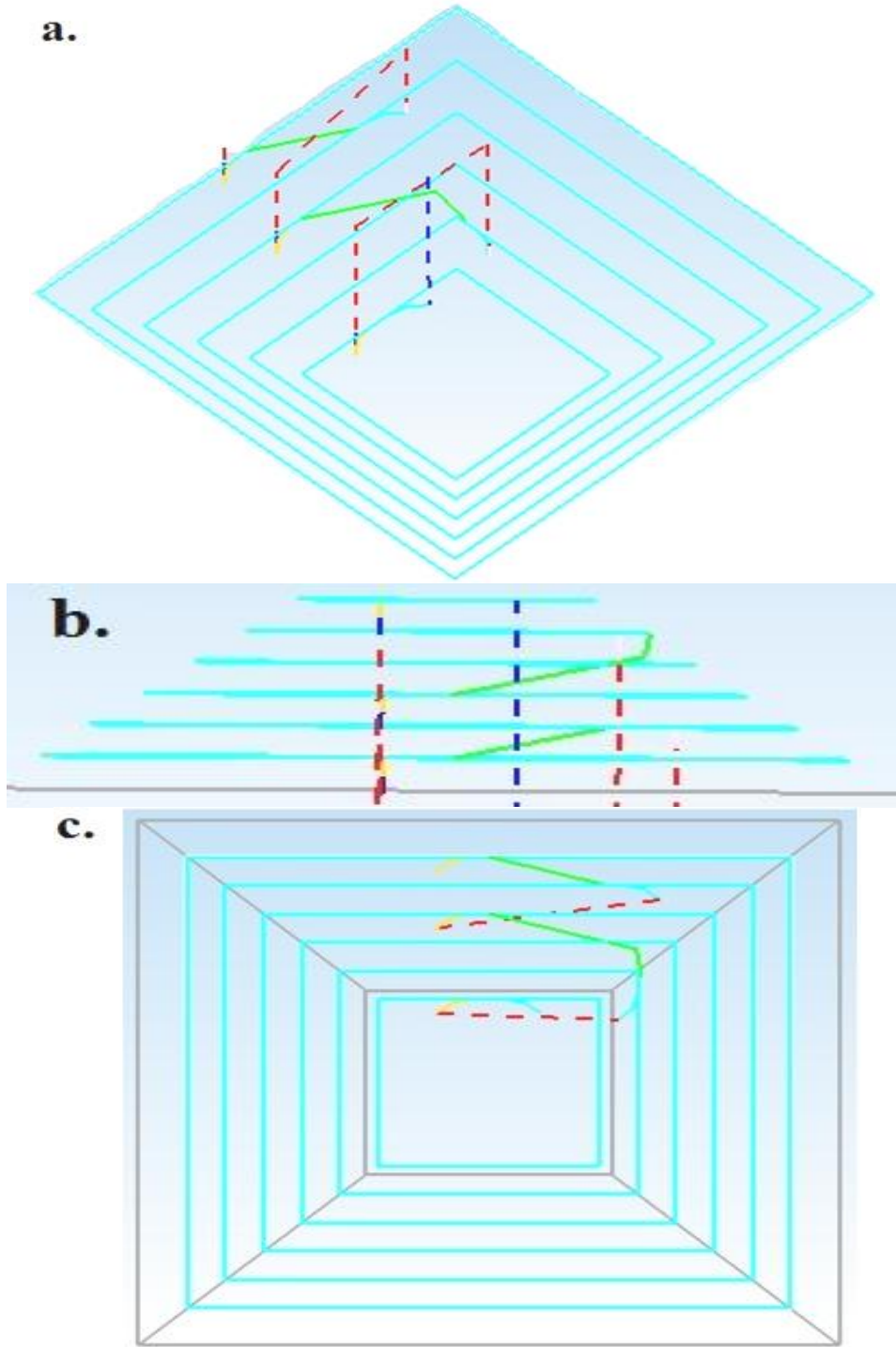
Modeller için NX Unigraphics CAM programında farklı takım yolları denenerek, takım yolunun artışlı şekillendirme yöntemi üzerine etkisi incelenmek amaçlanmıştır. Bu takım yolları ise dikey ilerlemeyi spiral şeklinde yapan ve dikey ilerlemeyi daima aynı noktadan tek seferde verip yatayda sabit olarak bir turu tamamlayıp tekrar aynı yerden dikey ilerleme yapan şeklinde olmak üzere iki tanedir. Deneyler esnasında yırtılan bir parça için üçüncü bir takım yolu kullanarak alternatif bir takım yolu denenmiştir. Bu yeni takım yolu ise daha önceki iki takım yolunun karışımı şeklinde belirlenmiştir. Denenen yeni takım yolunda yırtılma ortadan kalkmış ve diğer takım yollarıyla karşılaştırma yapılmıştır.

**a.****b.****c.**

Şekil 3.3. 1 Nolu takım yolunun a) Perspektif b) Yan c) Üst Görünüşü



Şekil 3.4. 2 Nolu takım yolunun a) Perspektif b) Yan c) Üst Görünüşü



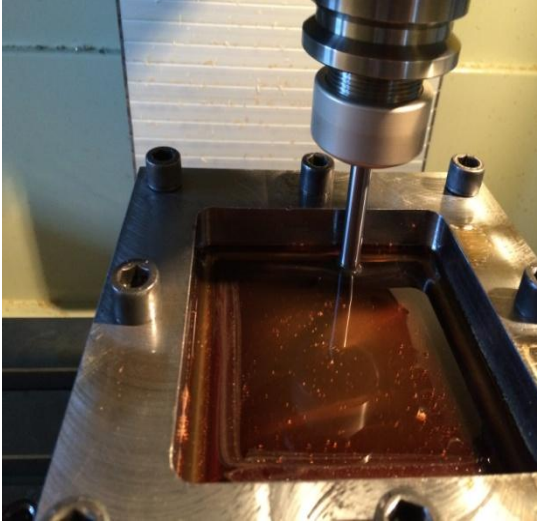
Şekil 3.5. 3 Nolu takım yolunun a) Perspektif b) Yan c) Üst Görünüşü

### 3.2.7. Dikey İlerleme

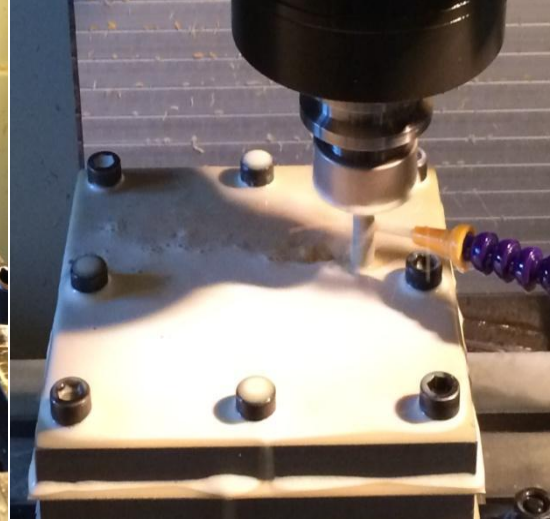
Şekillendirme esnasında şeklin yüzeyinin düzgün çıkması ve numunede yırtılmaları minimuma indirmesi için 0,2; 0,3; 0,5 ve 0,7 mm değişik dikey ilerleme parametreleri denenmiş ve 0,2 mm ve 0,5 mm dikey ilerleme parametreleri seçilmiştir.

### 3.2.8. Yağlama

Yağlamanın artışı şekillendirmeye etkisinin araştırılması ve sac plaka ile takım arasındaki sürtünmeyi en aza indirmek için iki farklı yağlama tercih edilmiştir. Bunlardan ilki geleneksel talaşlı imalat soğutma sıvısı olan bor yağı emülsiyonudur. İkinci seçenek olarak ise Drawtex AC marka sıvama ve çekme yağı seçilmiştir.



Şekil 3.6. Sıvama yağı



Şekil 3.7. Bor Yağı Emülsiyonu

Çizelge 3.6. Sıvama ve bor yağlarının teknik özellikleri

|                                                     | Drawtex AC Sıvama Yağı | Bor Yağı Emülsiyonu |
|-----------------------------------------------------|------------------------|---------------------|
| Kinematik Viskozite (40°C, cSt- mm <sup>2</sup> /s) | 115-135                | 25-35               |
| Emülsiyon Ph, 20°C                                  | -                      | 8,9                 |
| Parlama Noktası (°C, min)                           | 230                    | -                   |

#### 4. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Artışlı Şekillendirme deneyleri Celal Bayar Üniversitesi Turgutlu Meslek Yüksekokulu Atölyesinde bulunan First MCW300 CNC freze tezgahında yapılmıştır. Isıl işlem deneyleri de aynı yerde bulunan Protherm PLF 120/7 tav fırınında gerçekleştirildi.



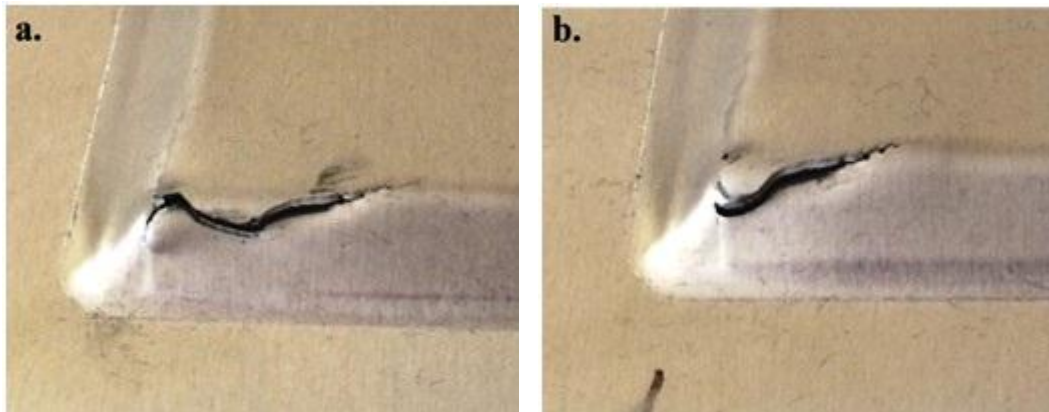
Şekil 4.1. Deneylerde Kullanılan First MCW300 CNC Freze Tezgahı



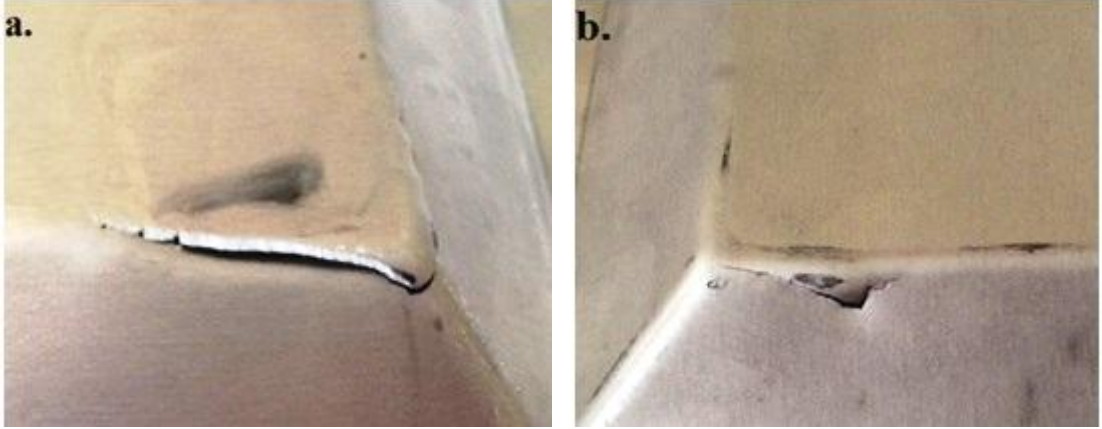
Şekil 4.2. Deneylerde Kullanılan Protherm PLF 120/7 Tav Fırını

Seçilen parametrelere göre deneyin yapılabilmesi için; artışı şekillendirme için özel imal edilmiş olan tutucu kalıp komparatör ile paralelliği sağlanıp tezgâha bağlanmıştır. Kalıba bağlanacak şekilde (200x200x1 mm) lazer kesim yapılan AA 2024 numuneler 8 adet M10 cıvata yardımıyla şekillendirme esnasında en ufak bir kayma olmaması için iyice sıkılarak numune sabitlendi. Modellediğimiz parça simetrik olduğu için tutucu kalıba bağlanırken hadde yönüne bakılmaksızın bağlandı (Ceretti et al,2004).

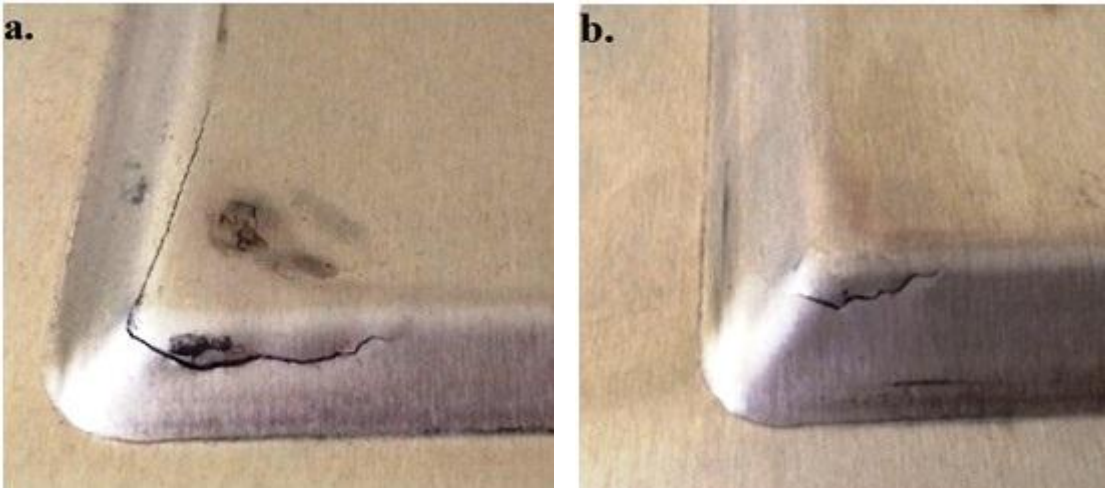
Deneylere başlamadan önce takım devri için bir ön çalışma yapıldı. Sırasıyla 0; 50; 500; 600; 675; 750 ve 1000 devir/dakika değerleri her iki takım yolunda da, ısıtıl işlem görmüş ve görmemiş malzemede de, 0,2 mm dikey ilerleme adımıyla denendi. 500 ve 600 d/dk haricinde tüm devir değerlerinde farklı parametreler içinde yırtılmalar yaşandı ve 500 d/dk AA 2024 için artışı şekillendirme yöntemi çalışmasında sabit değer olarak kabul edildi.



Şekil 4.3. a) Takım dönmeden (0 dev/dak) b) 50 dev/dak hasara uğramış numune



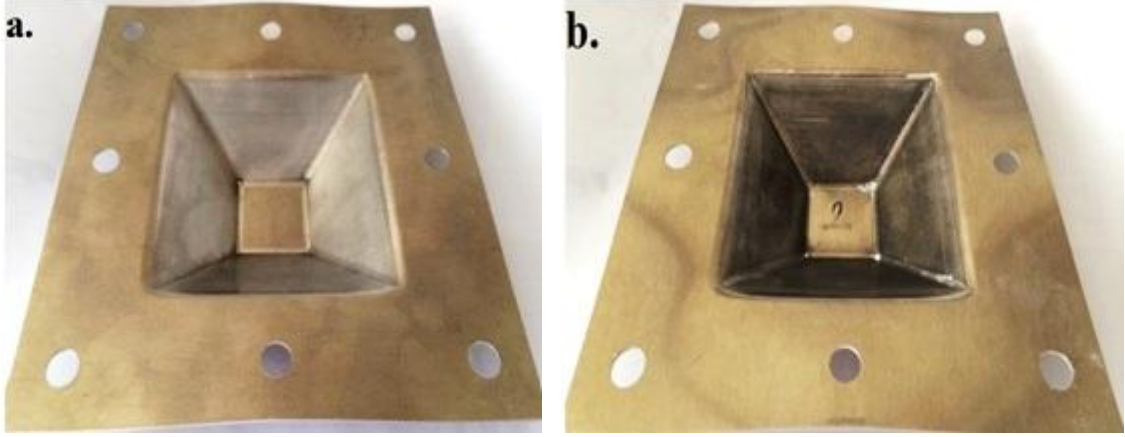
Şekil 4.4. a) 600 devir/dak b) 675 devir/dak hasara uğramış numune



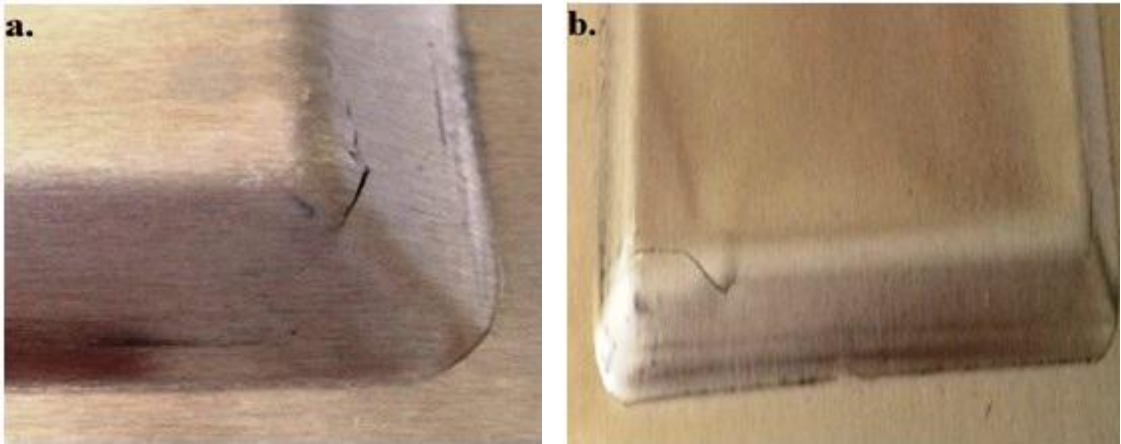
Şekil 4.5. a) 750 devir/dak b) 1000 devir/dak hasara uğramış numune

İlk olarak yağlama parametresi sabit tutulmuş ve sıvama yağı seçildi. Sabit tutulan yağ parametresi eşliğinde dikey ilerleme parametreleri 0,2 mm, 0,3 mm, 0,5 mm ve 0,7 mm sırasıyla denendi ve 0,7 mm' de yırtılmalar gözlemlendi. Bu dikey ilerleme sonuçlarına bakılarak 0,2 mm ve 0,5 mm dikey ilerleme adımları ısıtılmış AA 2024 deney numunelerinde denendi. Daha sonra aynı işlemler ısıtılmış malzemelere de uygulandı. Bu işlemde bittikten sonra takım yolu değiştirilip ikinci takım yoluyla tüm işlemler tekrarlandı. Alınan başarılı sonuçlara müteakip yağlama faktörü değiştirilerek tüm parametreler bor yağı kullanarak gerçekleştirildi. İkinci yağlama faktöründe de gözlemlenen olumlu sonuçlar neticesinde tüm parametreler her biri üçer tekrar olmak üzere denendi. İkinci takım yolunun 0,5 mm dikey ilerleme deneyinde yaşanan yırtılmayı gidermek için üçüncü bir takım yolu ve kaplamalı takım

denendi. Bu alternatif çözümlerden yeni takım yolu başarı gösterirken krom nitrür kaplamalı takım yırtılmaların önüne geçemedi. Çizelge 4.1' de yapılan tüm deneyler bir tablo şeklinde gösterilmiştir.



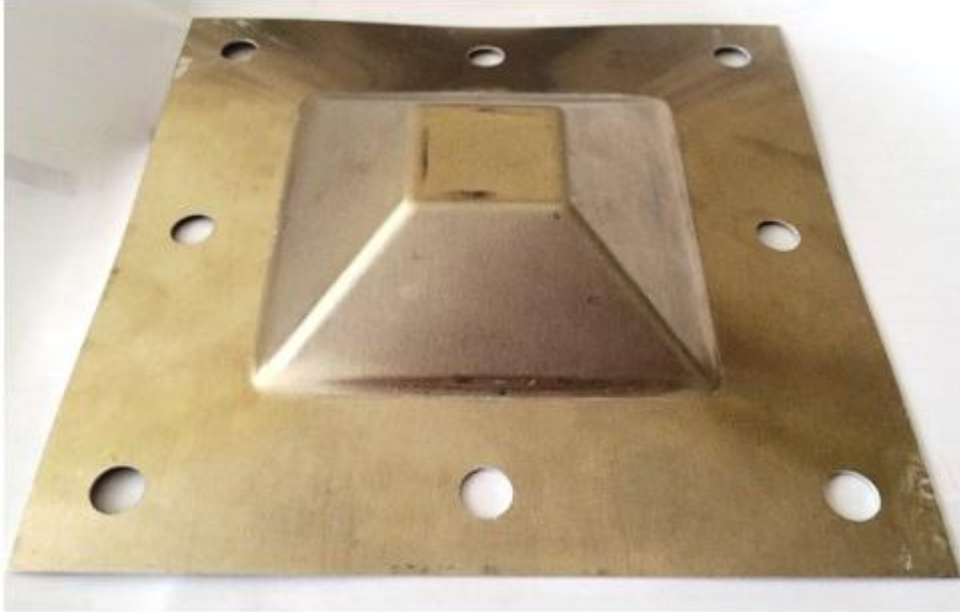
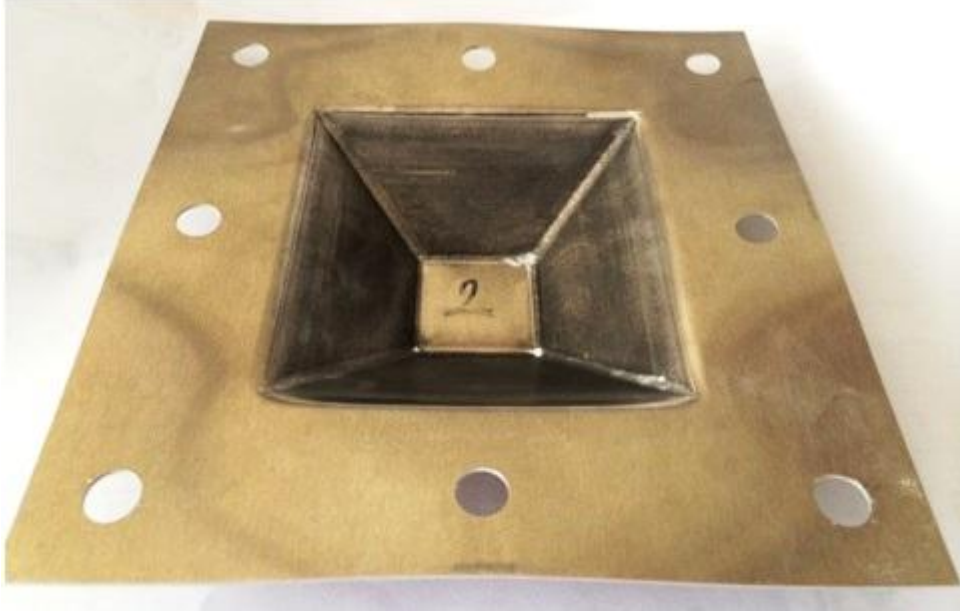
Şekil 4.6.a) 0,2 mm Dikey ilerleme b) 0,5 mm Dikey ilerleme başarılı numune



Şekil 4.7. a) 0,3 mm Dikey ilerleme b) 0,7 mm Dikey ilerleme hasara uğramış numune

Çizelge 4.1. Deneysel Çalışma Parametre Dağılım Tablosu

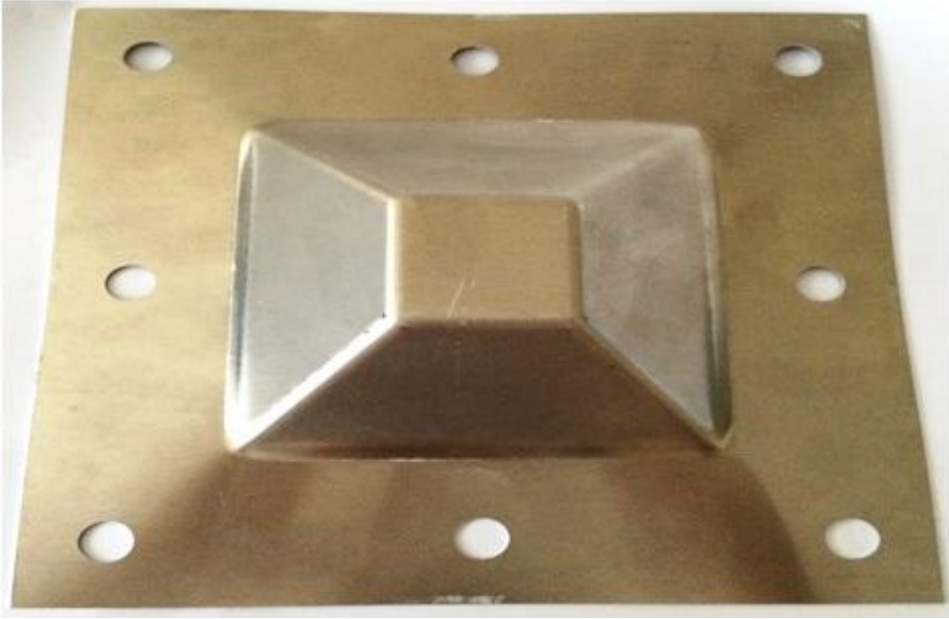
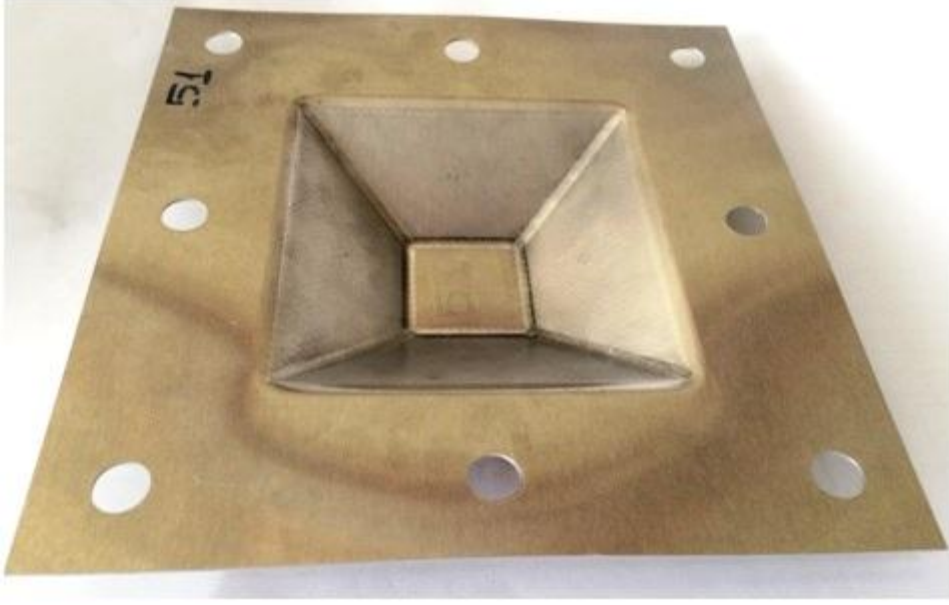
| Deney No | Isıl İşlem Durumu   | Takım Yolu | Dikey ilerleme | Yağlama     |
|----------|---------------------|------------|----------------|-------------|
| 1        | Isıl İşlem Görmemiş | 1          | 0,2            | Bor yağı    |
| 2        | Isıl İşlem Görmemiş | 1          | 0,2            | Makine Yağı |
| 3        | Isıl İşlem Görmemiş | 1          | 0,5            | Bor yağı    |
| 4        | Isıl İşlem Görmemiş | 1          | 0,5            | Makine Yağı |
| 5        | Isıl İşlem Görmemiş | 2          | 0,2            | Bor yağı    |
| 6        | Isıl İşlem Görmemiş | 2          | 0,2            | Makine Yağı |
| 7        | Isıl İşlem Görmemiş | 3          | 0,5            | Bor yağı    |
| 8        | Isıl İşlem Görmemiş | 3          | 0,5            | Makine Yağı |
| 9        | Isıl İşlem Görmüş   | 1          | 0,2            | Bor yağı    |
| 10       | Isıl İşlem Görmüş   | 1          | 0,2            | Makine Yağı |
| 11       | Isıl İşlem Görmüş   | 1          | 0,5            | Bor yağı    |
| 12       | Isıl İşlem Görmüş   | 1          | 0,5            | Makine Yağı |
| 13       | Isıl İşlem Görmüş   | 2          | 0,2            | Bor yağı    |
| 14       | Isıl İşlem Görmüş   | 2          | 0,2            | Makine Yağı |
| 15       | Isıl İşlem Görmüş   | 2          | 0,5            | Bor yağı    |
| 16       | Isıl İşlem Görmüş   | 2          | 0,5            | Makine Yağı |



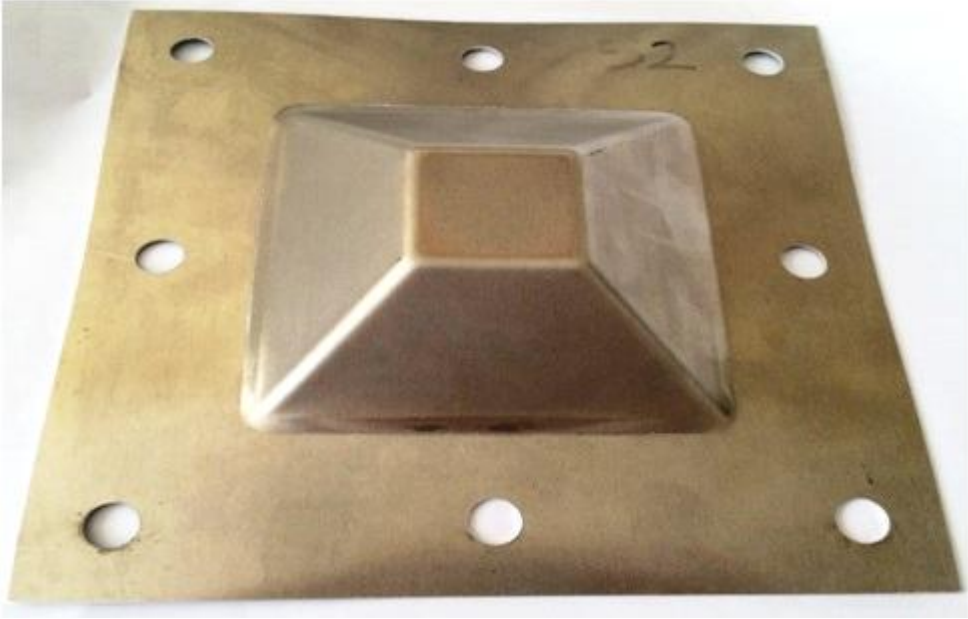
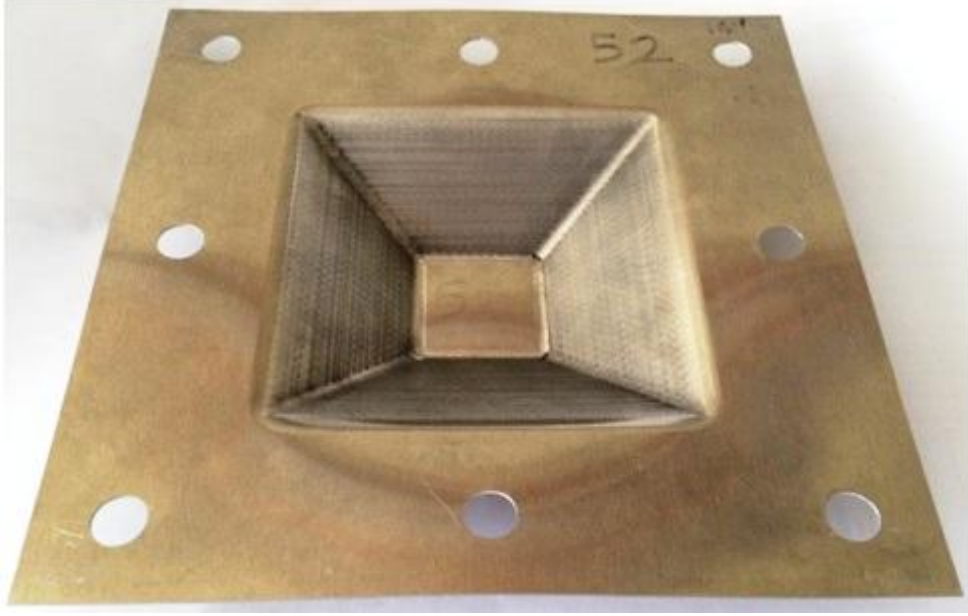
Şekil 4.8. Sıvama yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmemiş malzeme ve 1. takım yolu parametrelerine sahip numunenin görüşleri



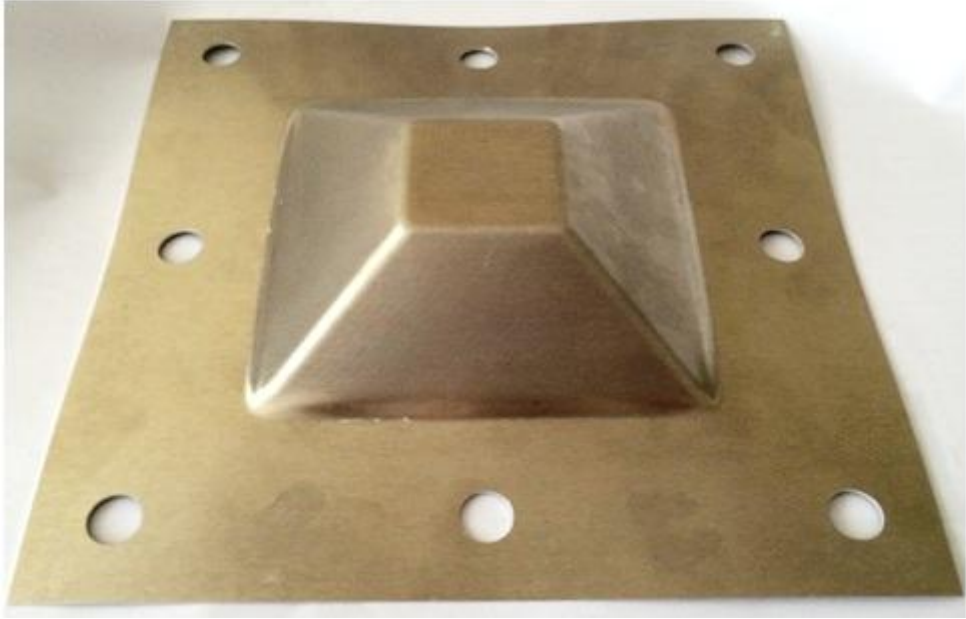
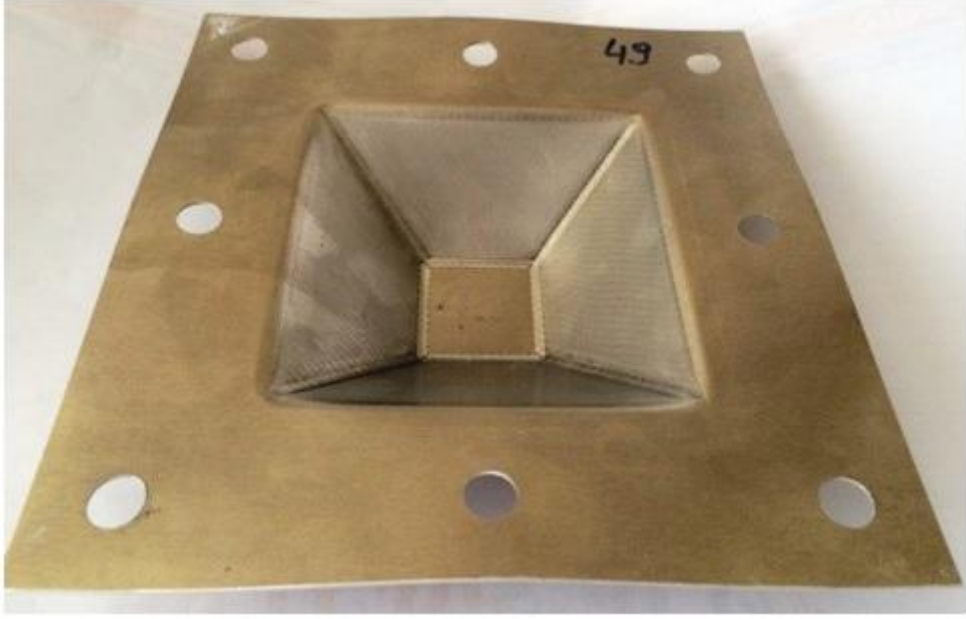
Şekil 4.9. Bor yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmemiş malzeme ve 1. takım yolu parametrelerine sahip numunenin görüşleri



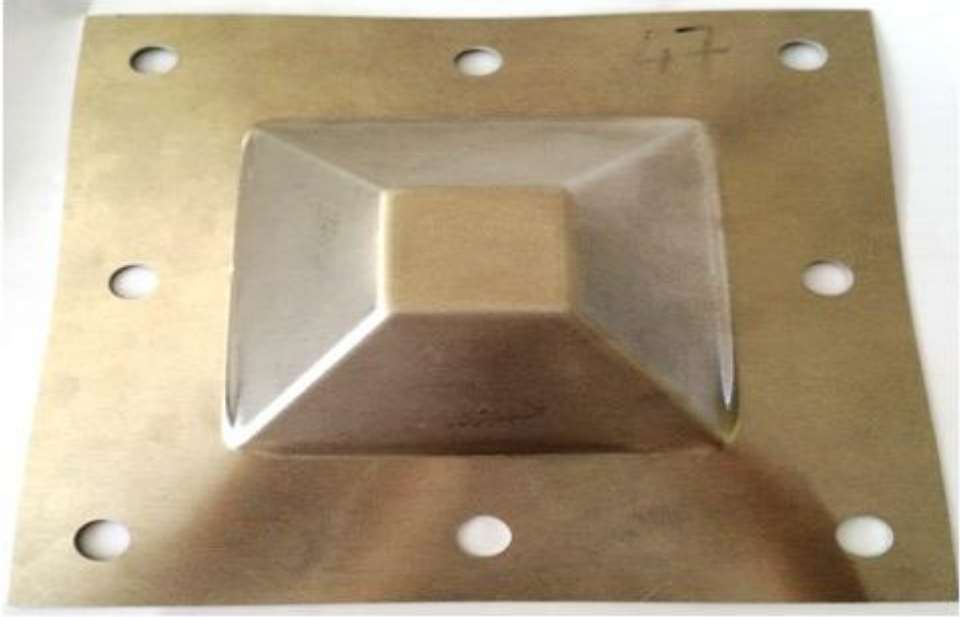
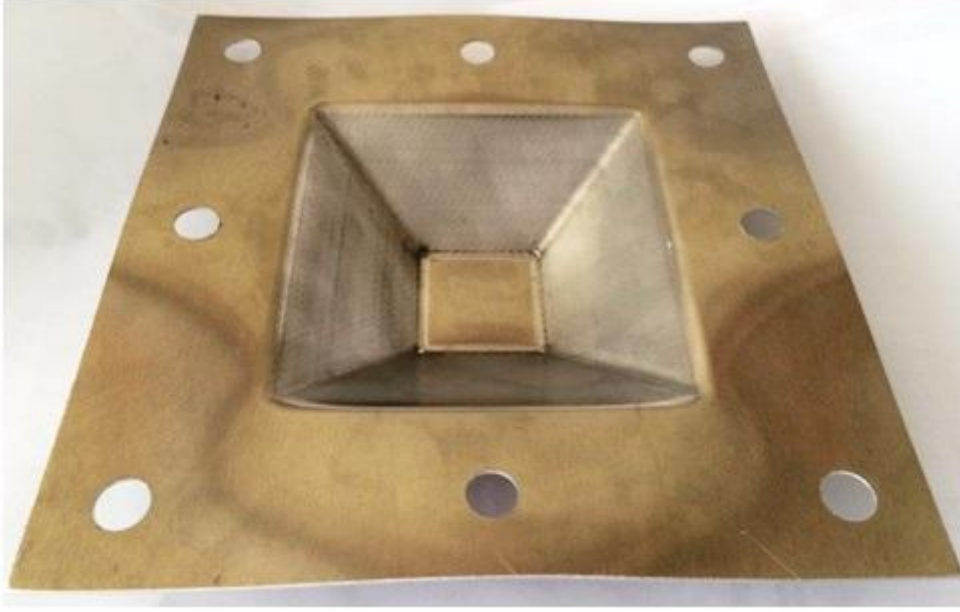
Şekil 4.10. Sıvama yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmüş malzeme ve 1. takım yolu parametrelerine sahip numunenin görüşleri



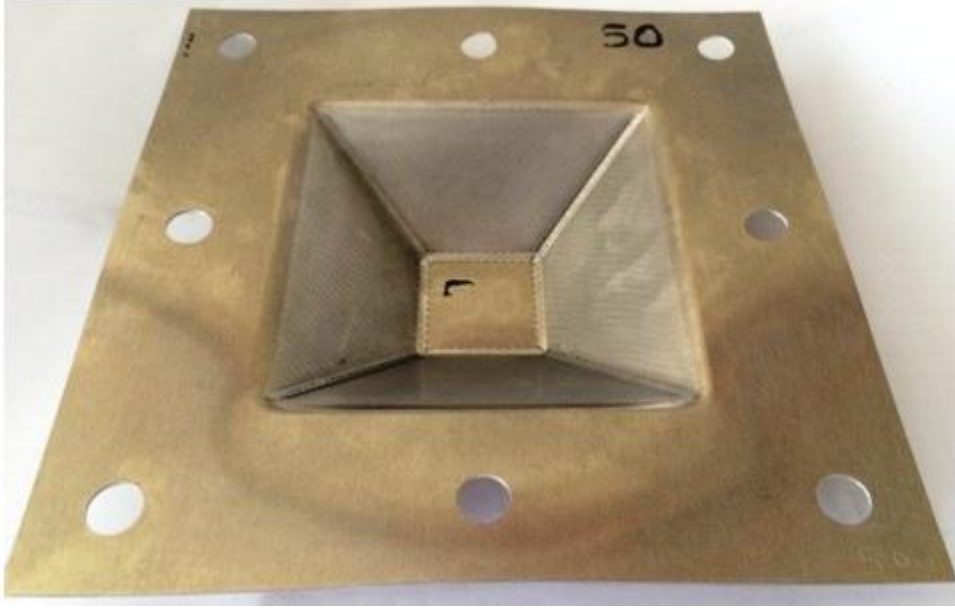
Şekil 4.11. Bor yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıtılmış malzeme ve 1. takım yolu parametrelerine sahip numunenin görünüşleri



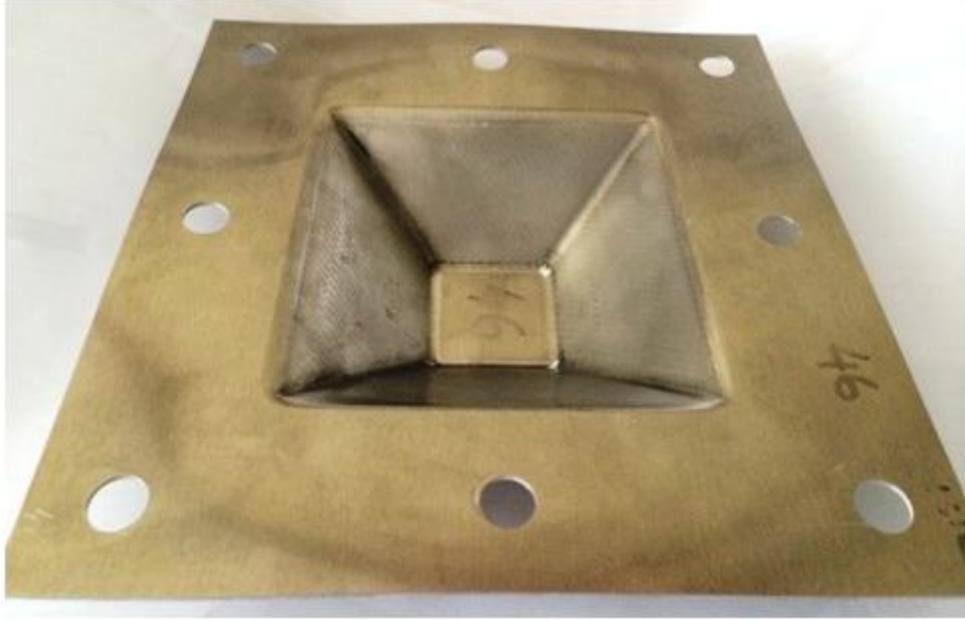
Şekil 4.12. Sıvama yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmemiş malzeme ve 1. takım yolu parametrelerine sahip numunenin görüşleri



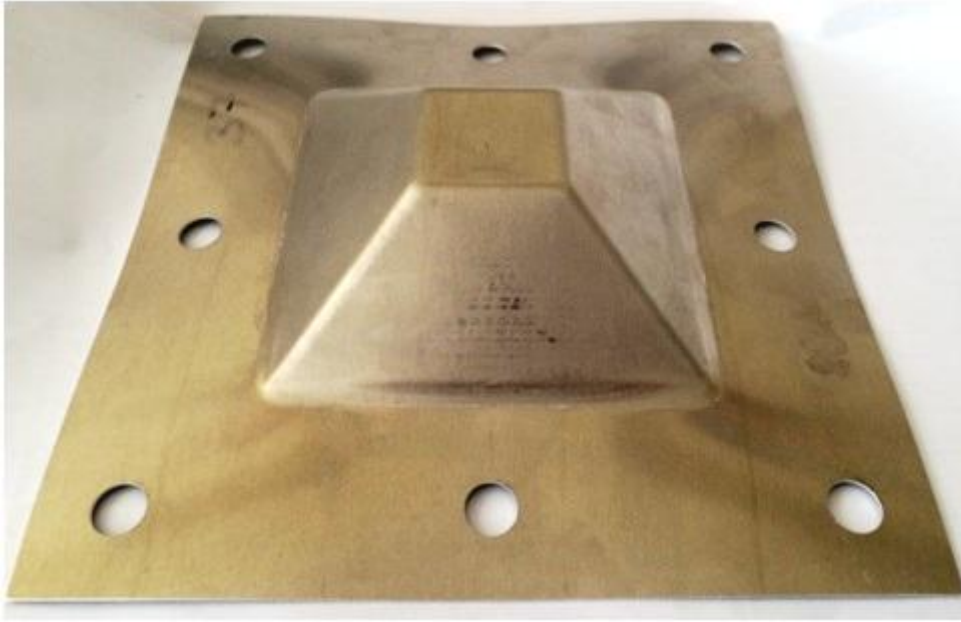
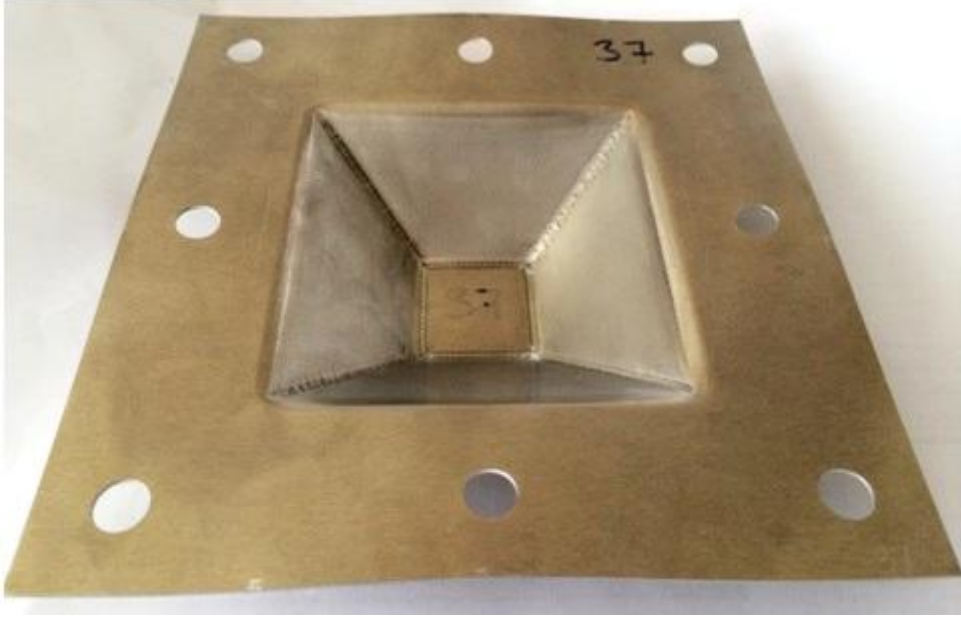
Şekil 4.13. Bor yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmemiş malzeme ve 1. takım yolu parametrelerine sahip numunenin görünüşleri



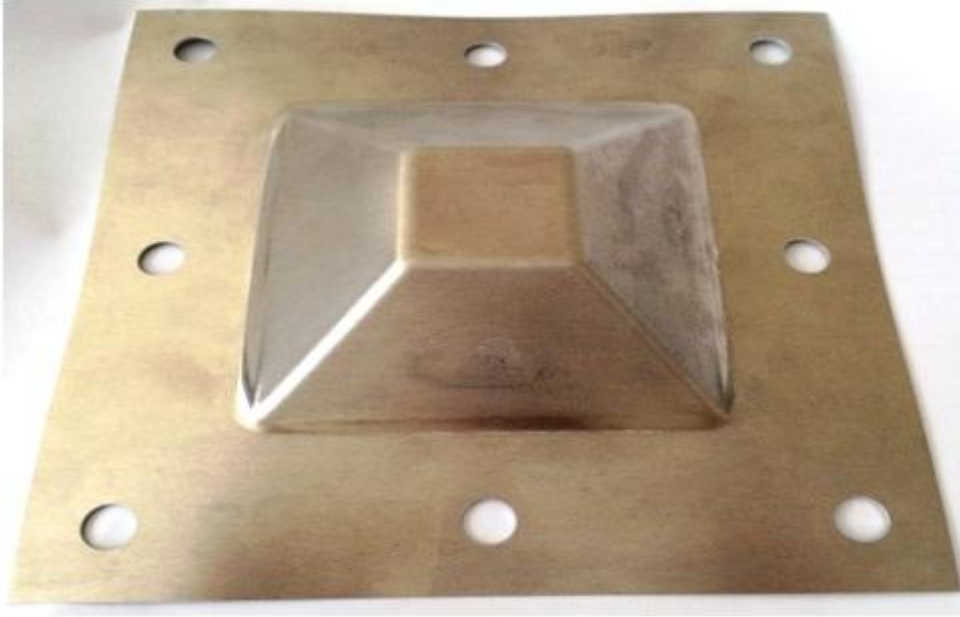
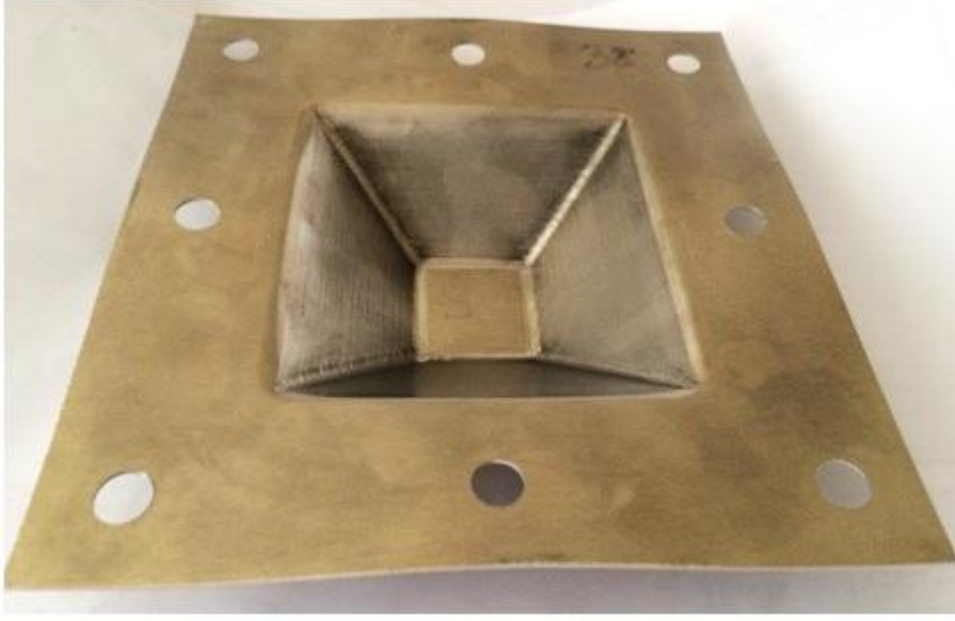
Şekil 4.14. Sıvama yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmüş malzeme ve 1. takım yolu parametrelerine sahip numunenin görünüşleri



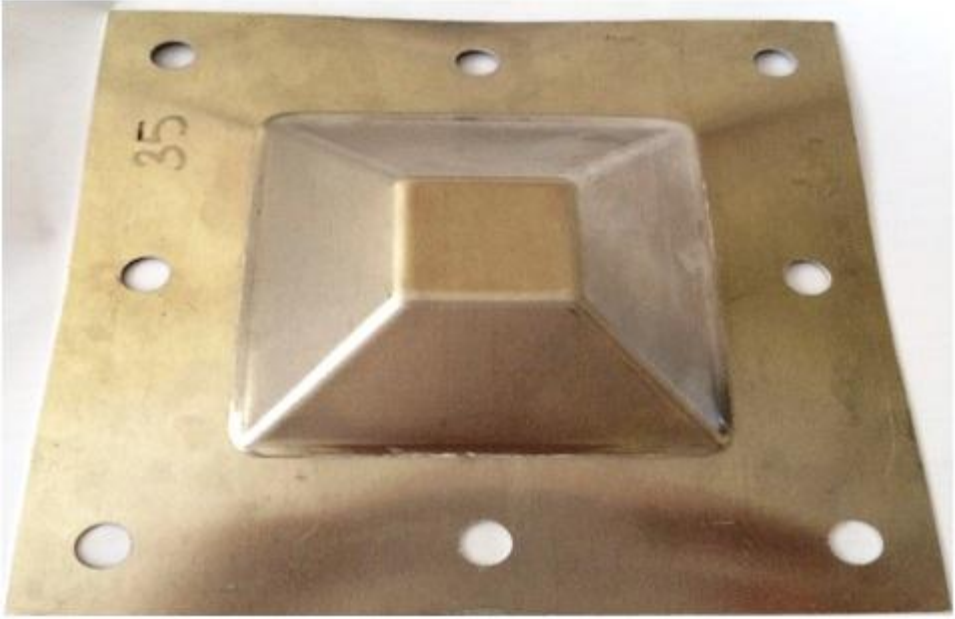
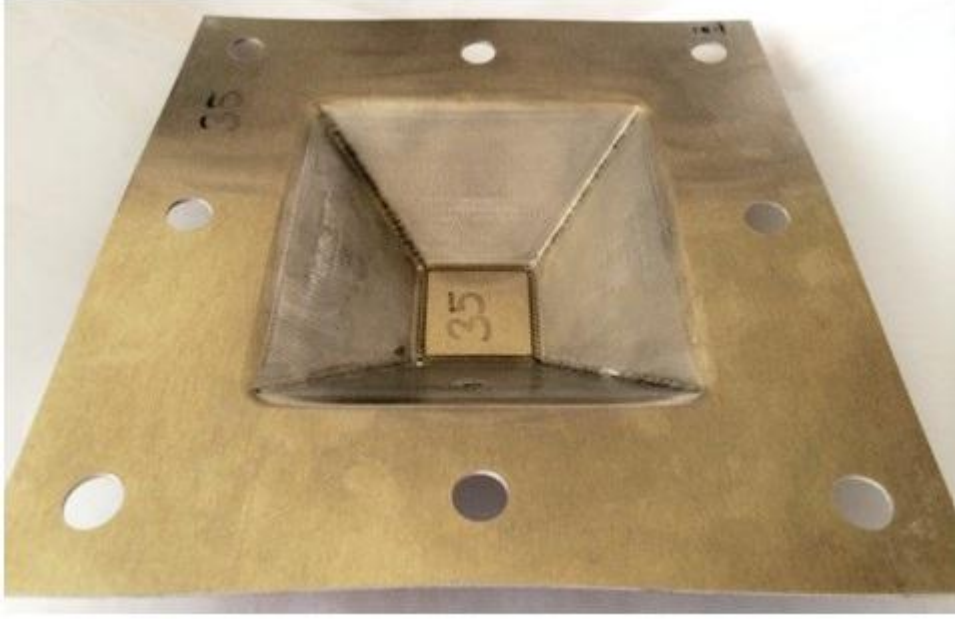
Şekil 4.15. Bor yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmüş malzeme ve 1. takım yolu parametrelerine sahip numunenin görünüşleri



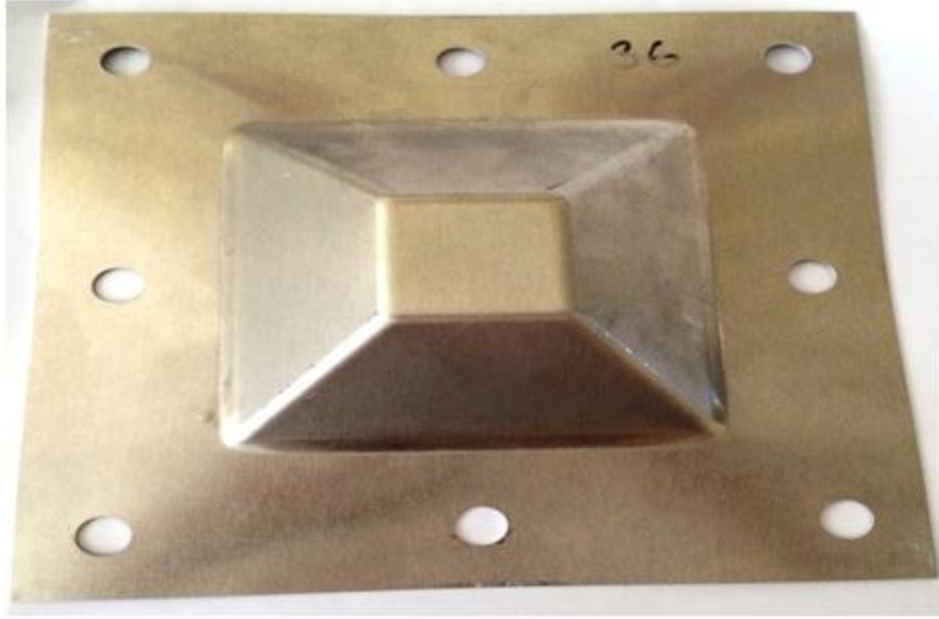
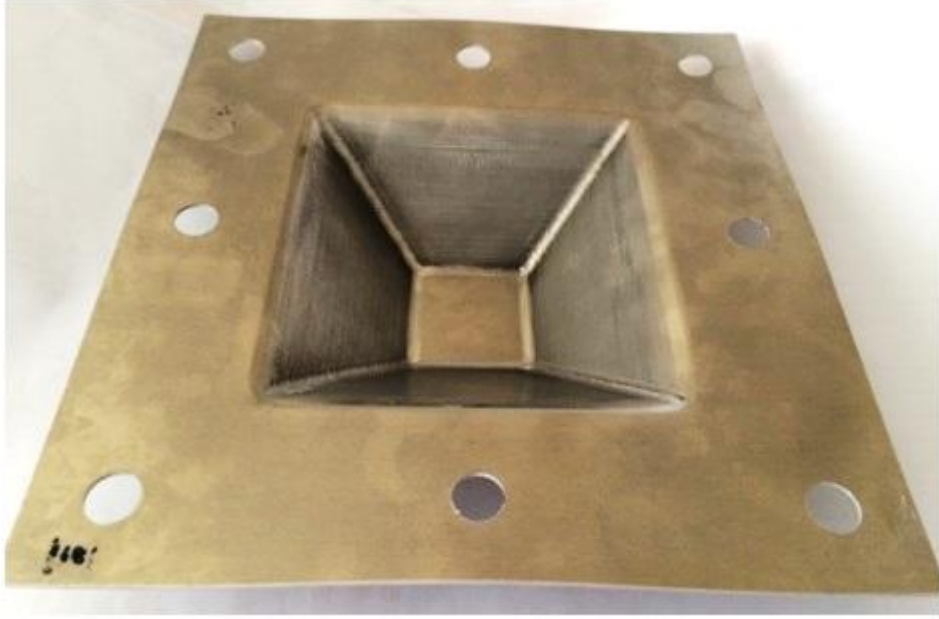
Şekil 4.16. Sıvama yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmemiş malzeme ve 2. takım yolu parametrelerine sahip numunenin görünüşleri



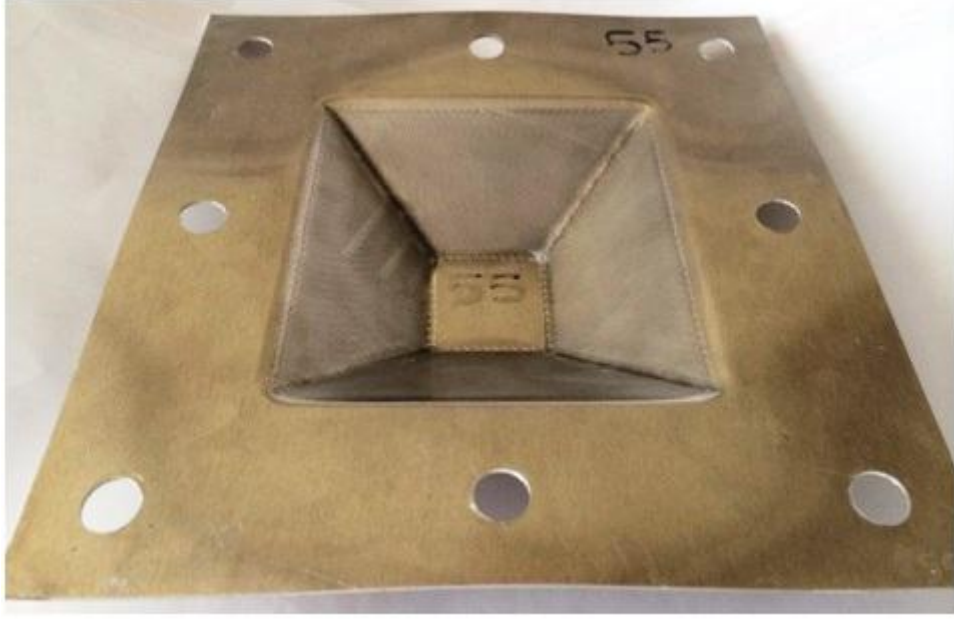
Şekil 4.17. Bor yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmemiş malzeme ve 2. takım yolu parametrelerine sahip numunenin görüşleri



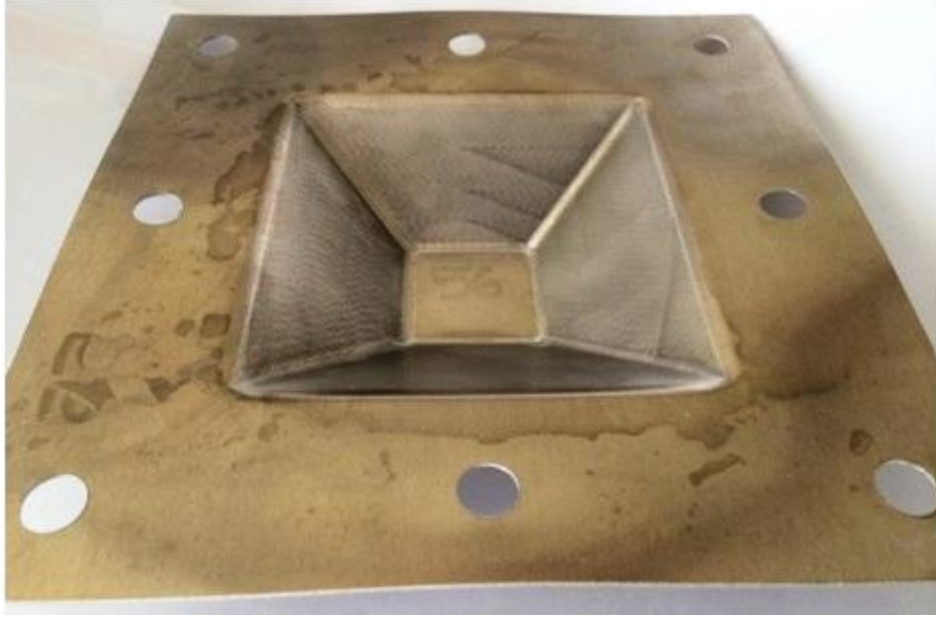
Şekil 4.18. Sıvama yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıtma işlemi görmüş malzeme ve 2. takım Yolu parametrelerine sahip numunenin görünüşleri



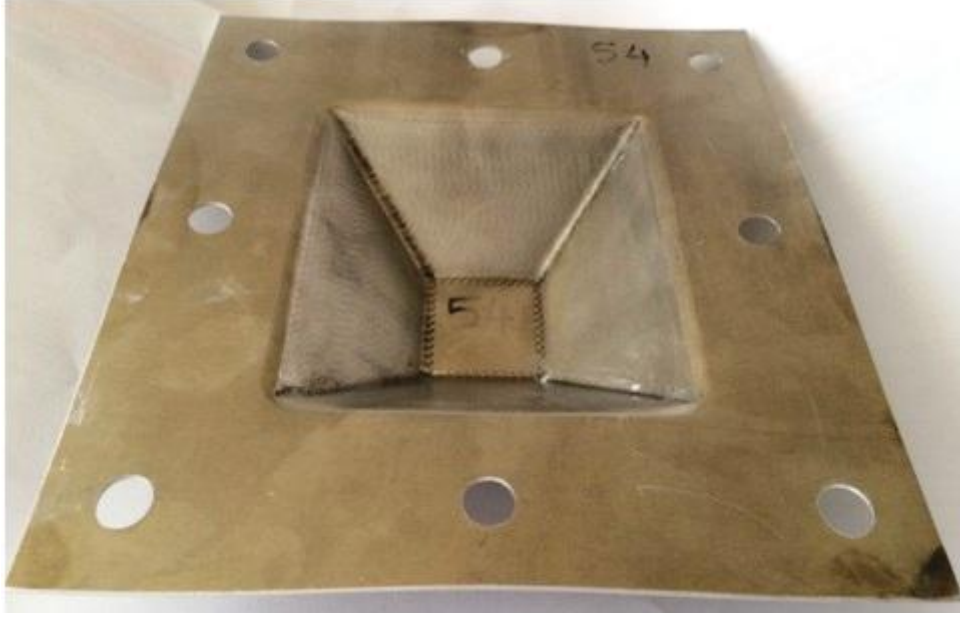
Şekil 4.19. Bor yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmüş malzeme ve 2. takım yolu parametrelerine sahip numunenin görünüşleri



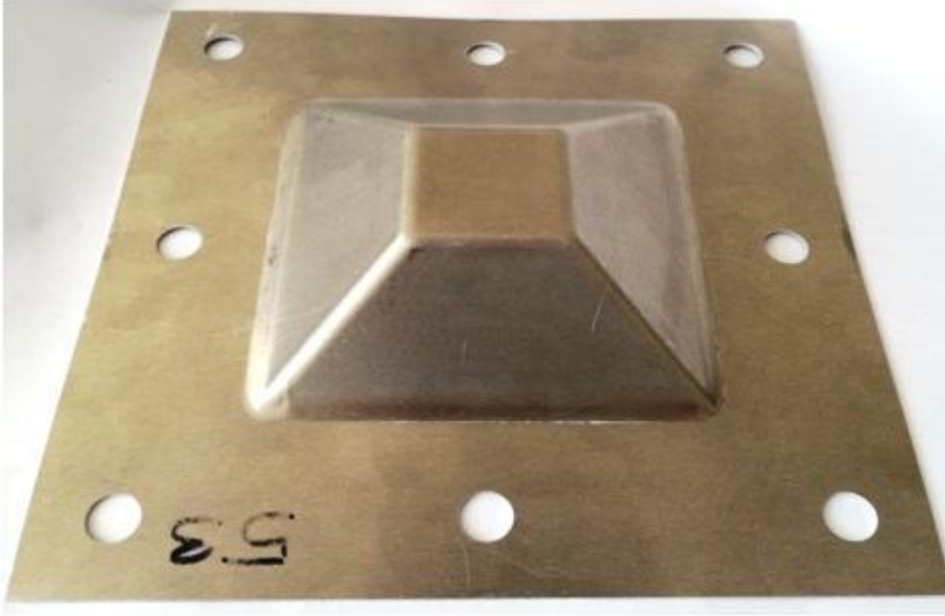
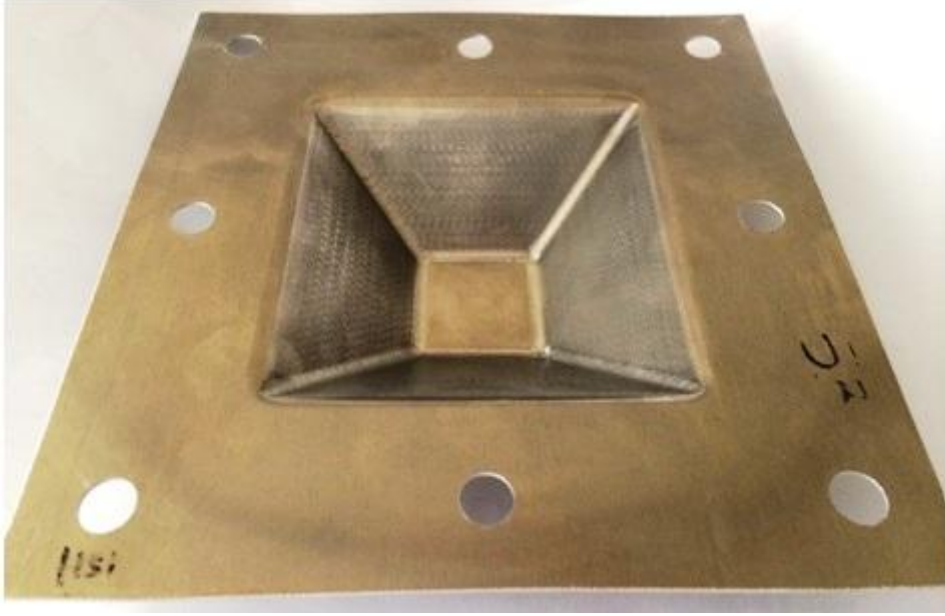
Şekil 4.20. Sıvama yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmemiş malzeme ve 3. takım yolu parametrelerine sahip numunenin görüşleri



Şekil 4.21. Bor yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmemiş malzeme ve 3. takım yolu parametrelerine sahip numunenin görünüşleri



Şekil 4.22. Sıvama yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmüş malzeme ve 2. takım yolu parametrelerine sahip numunenin görünüşleri



Şekil 4.23. Bor yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmüş malzeme ve 2. takım yolu parametrelerine sahip numunenin görünüşleri

## 5. TEST VE ÖLÇÜM

### 5.1. Üç Boyutlu Lazer Tarama

Herhangi bir üç boyutlu fiziksel obje, parça veya herhangi bir sistem (kalıp, fiktür, ürün, montajlı sistemler, metal, plastik, formlu yüzeyli parçalar vb.) üç boyutlu tarama cihazlarımızla taranarak bunların nokta bulutu şeklindeki dijital verileri elde edilir. Elde edilen bu nokta bulutu verileri sistemler tarafından poligon mesh yapıya (üçgen polygon data) dönüştürülerek .stl formatında yüzey bilgisi olarak kullanılabilir. Böylece hedef parçaya ya da sisteme ait veri nokta bulutu/.stl olarak komple bilgisayar ortamına atılarak üzerinde istenilen herhangi bir değişiklik yapılabilecek bir 3 boyutlu veri haline gelir. Bu yöntem lazer ve optik sistemler olmak üzere iki farklı şekilde uygulanmaktadır.

Genel olarak yapılan tüm taramalarda detayların çokluğu ve yüzey pürüzlülüğü, yapılacak taramanın sonucunu ve süresini etkileyen faktörlerdir. (Komplike parçalardaki detaylar ve pürüzler arttıkça yapılan taramada tüm detaylar çıkmayabilir, böylece kaliteli bir sonuç için tarama süresi uzamış olur.)

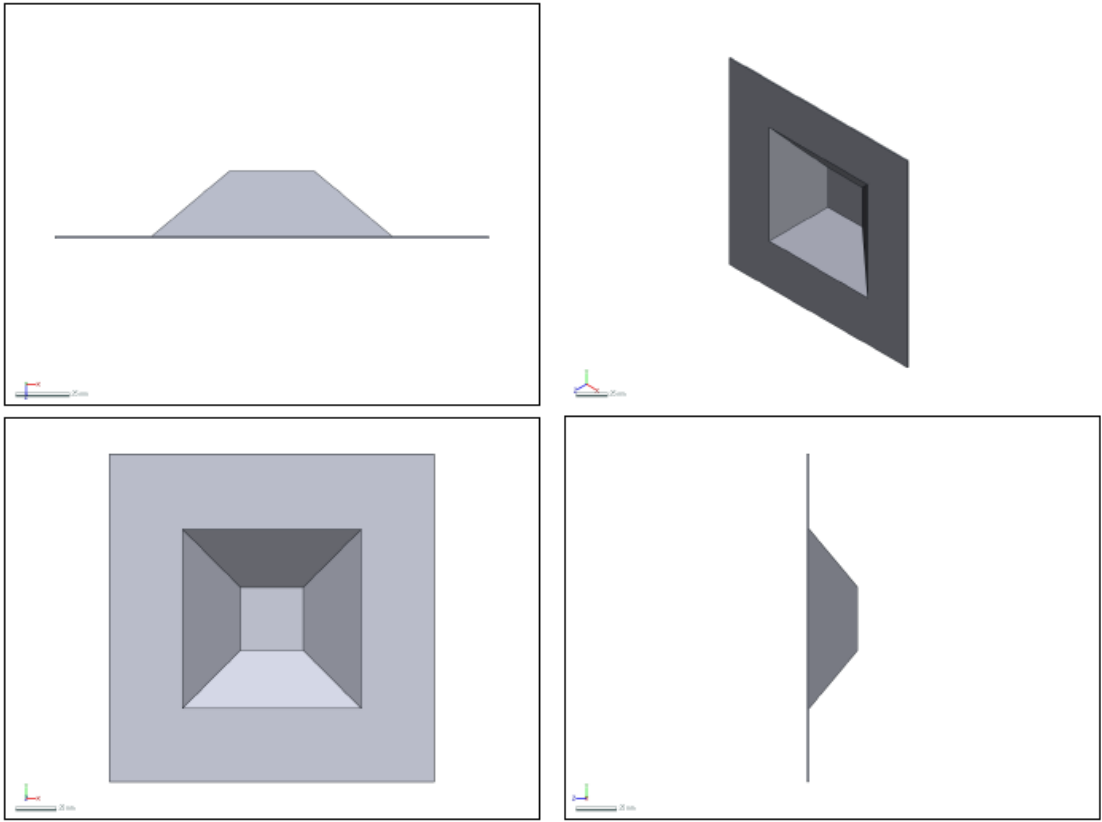
Parlak ya da şeffaf parçalarda ve benzer şekilde fazla ışıklı ortamlarda gerektiği takdirde taranacak yüzey temizlenebilen toz boya ile mat beyaz hale getirilir ve bu şekilde daha kaliteli bir tarama verisi elde edilir.

3 boyutlu tarama sonrası elde edilen .stl verileriyle; tersine mühendislik, hızlı prototipleme, CAM programları ile takım yolu oluşturma ve sonrasında imalata geçiş, parça ölçümü ve kalite kontrol gibi işlemler yapılabilir. Detaylı olarak incelenecek olursa bu .stl verileriyle;

- Bilgisayar ortamında CAD datası (katı modeli) olmayan parçaların CAD datasının elde edilmesinde (tersine mühendislik - reverse engineering) kullanılabilir.
- Bu data üzerinden hızlı prototipleme sistemlerinden numune parçanın birebir kopyası alınabilir.
- Elde edilen nokta bulutu STL formatında (Poligon Mesh) yüzey bilgisi olarak kullanılabilir. Bazı CAM programları bu data üzerinden takım yolları oluşturabilmektedir. Böylelikle tarama datasından direk olarak imalata geçmek mümkündür.
- Üretilen - imal edilen parça ile bilgisayar ortamındaki 3 boyutlu CAD modelinin karşılaştırılmasında kullanılabilir.
- Uzun süre çalışan kalıplarda yıpranmaları - deformasyonları belirlemek için kullanılabilir.
- Sac metal kalıplarında saclarda oluşan geri yayılmanın tespitinde kullanılabilir.

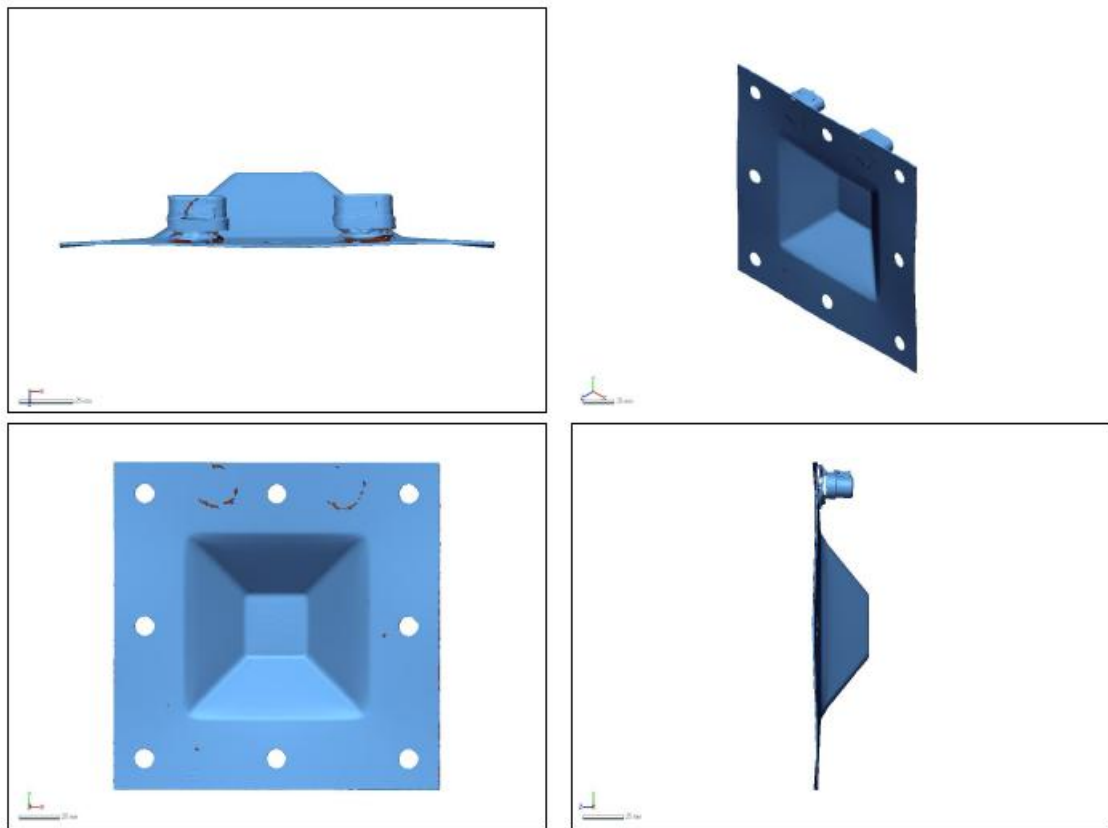
Artışlı şekillendirme yöntemiyle hedeflenen tüm parametrelerin deneyleri tamamlandığında, numuneler 3 boyutlu lazer tarama işlemi uygulanmak üzere Infotron isimli özel bir firmaya gönderildi. Firmada gerekli ölçümler yapıldıktan sonra parçaların STL formatındaki dataları temin edildi.

Elde edilen bu .stl dataları 1 mm aralıklarla taranarak kalınlık değişimleri incelendi. Bu incelemeler yapılırken ise numunelerin geometrileri simetrik olduğu için sadece yarısı tarandı ve bu kısımlardan kalınlık dataları elde edildi. Örneğin Şekil 5.3 a' da üstteki şekil elde edilen kalınlık datalarını, alttaki ise bu dataların numune üzerinde tekabül ettiği yerleri göstermektedir.

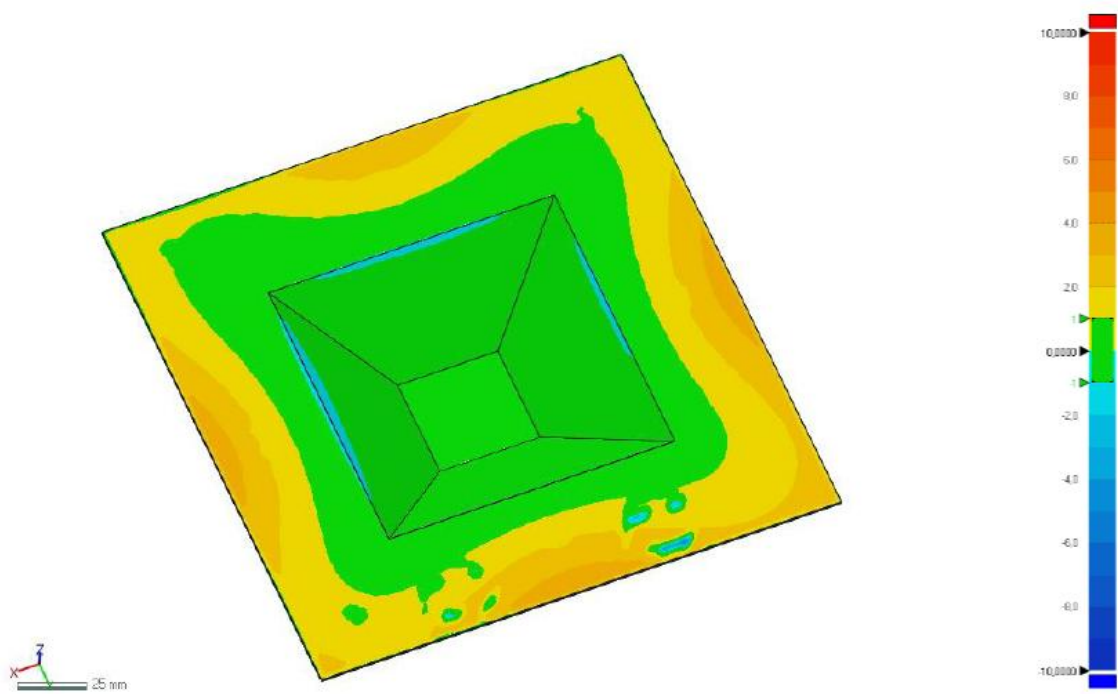


Şekil 5.1. Tüm deney parametreleri için kullanılan geometrinin üstten, önden ve sağ yandan görüşleri

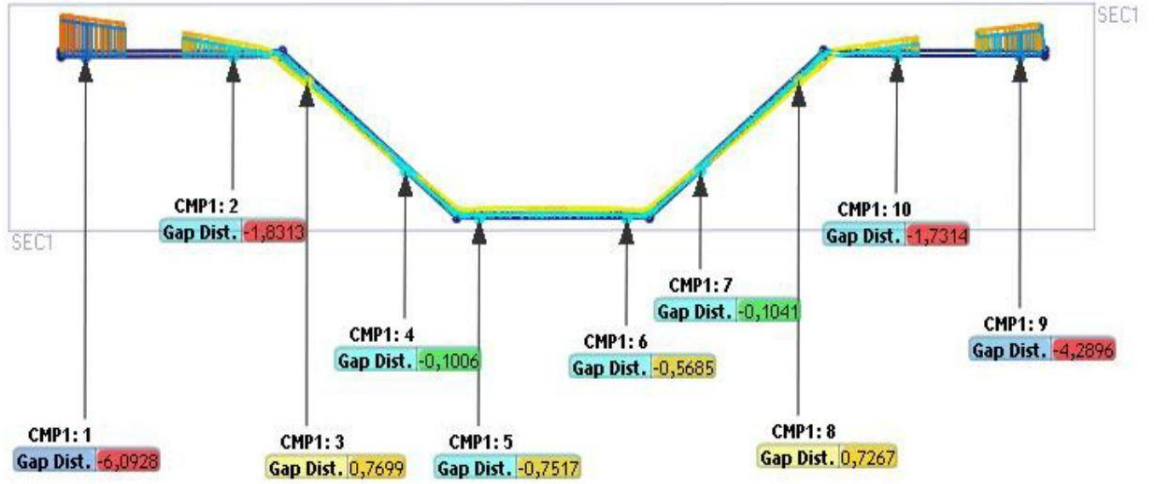
Deneysel çalışmada kullanılan geometri simetrik bir yapıya sahip olduğu için 3 boyutlu lazer tarama sonucunda oluşan katı model yüzeylerinin sadece yarısı ölçülmüş (Şekil 5.3 a ve b) ve değerlendirmeye alınmıştır.



a.

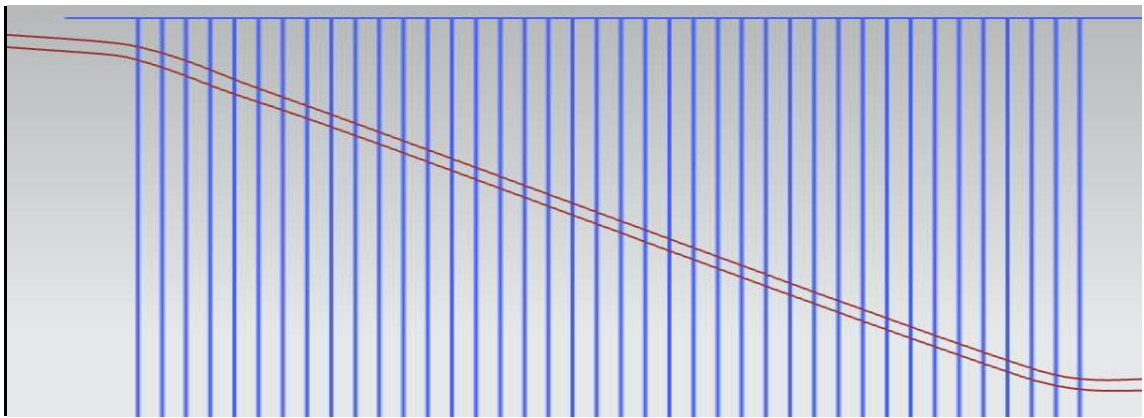
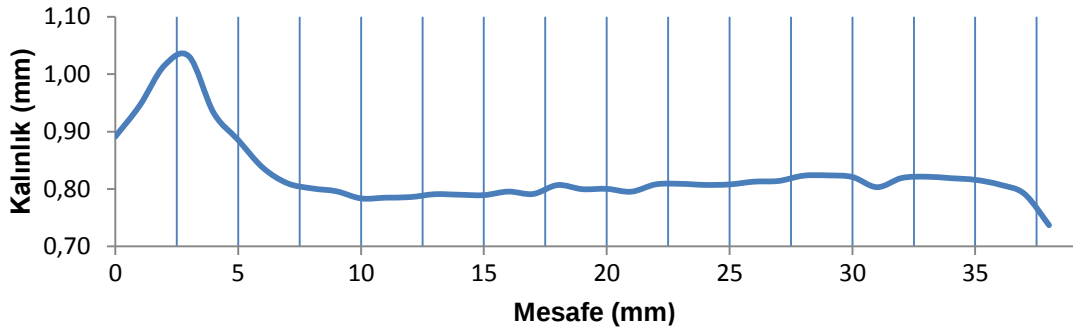


b.

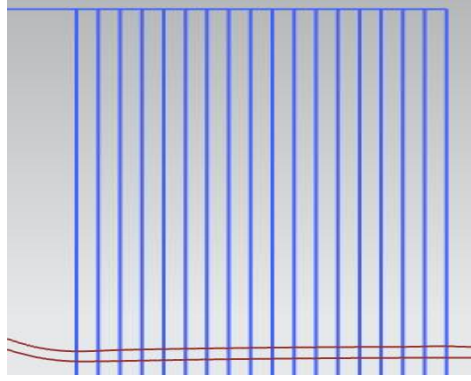
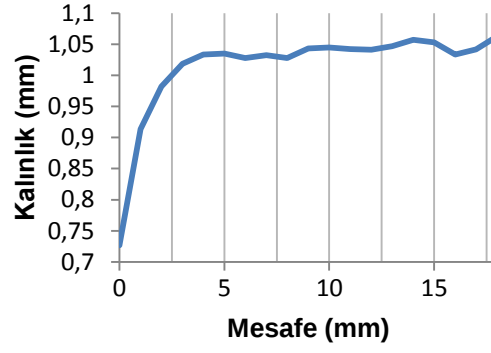


C.

Şekil 5.2. Sıvama yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıl işlem görmemiş malzeme ve 1. takım yolu parametrelerinde işlem gören numunenin lazer tarama sonucu elde edilen a) Üstten, önden ve sağ yandan görüşleri b-c) Geometrik tamlık sonuçları



a.

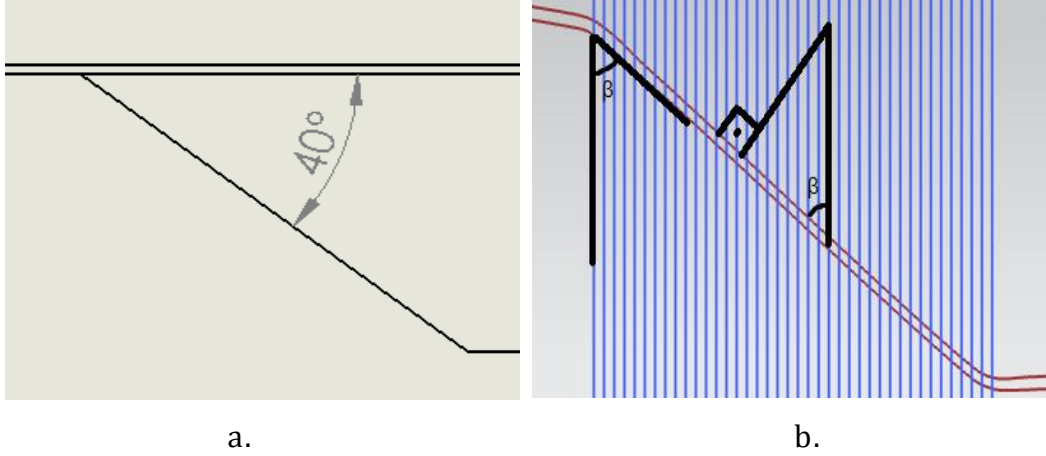


b.

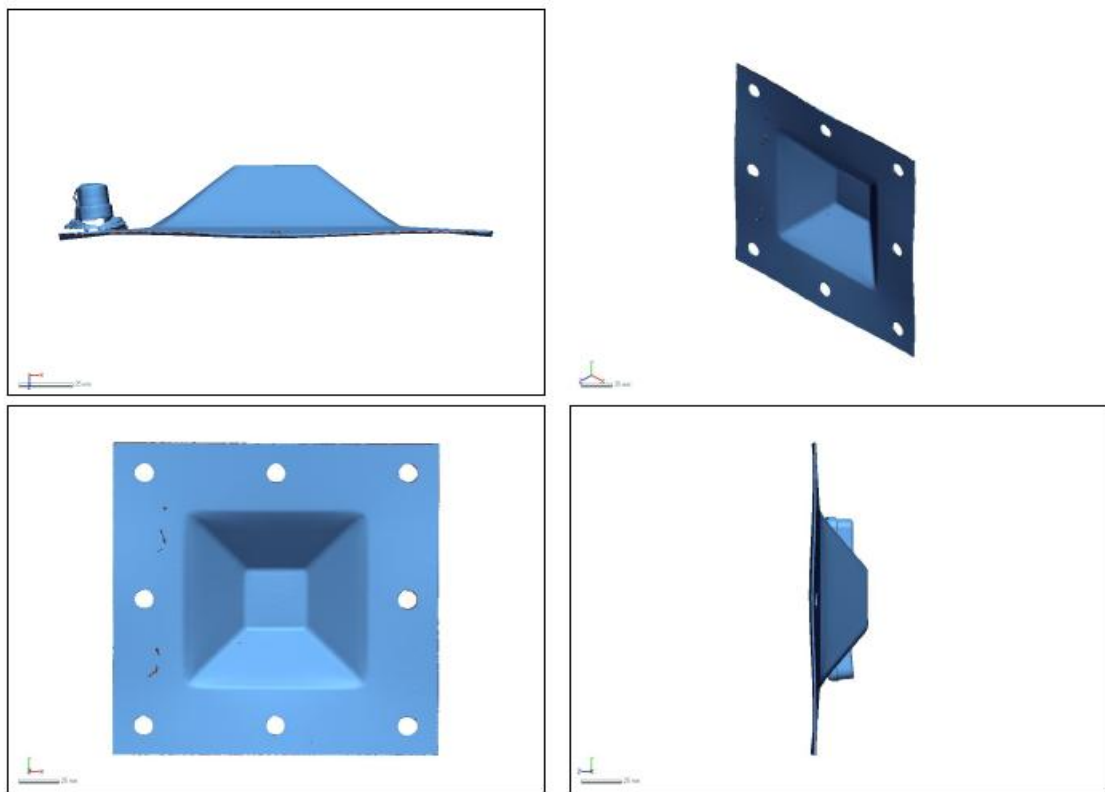
Şekil 5.3. Sıvama yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıtılmış işlem görmemiş malzeme ve 1. takım yolu parametrelerine sahip numunenin a) Eğik bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri  
b) Taban bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri

Not: Eğik bölgedeki kalınlık ölçümlerini hesaplamada; eğimden kaynaklanan açı durumunu hesaba katmak amacıyla yapılan ölçümler  $\sin\beta$  ile çarpılmıştır (  $x \cdot \sin\beta = \Delta x$  ).

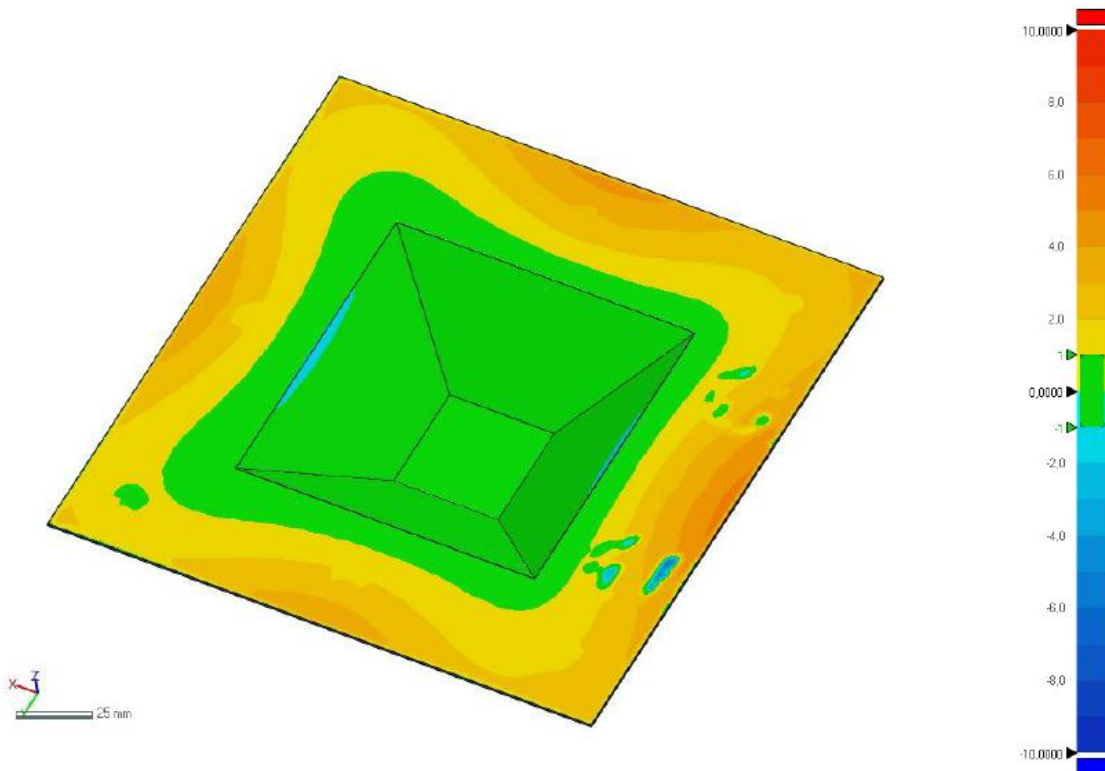
Burada  $\beta$  ise eğik bölgede dikey ölçüm ile gerçek ölçüm arasındaki bağlantıyı kuran açıdır ve  $50''$  dir. Dikey olarak ölçülen değerler  $\sin\beta$  ile çarpıldığı takdirde eğik bölgenin gerçek kalınlığı ortaya çıkar. Bu çarpım ise tüm eğik bölge ölçümlerinde gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalarda açıda oluşan çok küçük değişimler dikkate alınmamıştır.



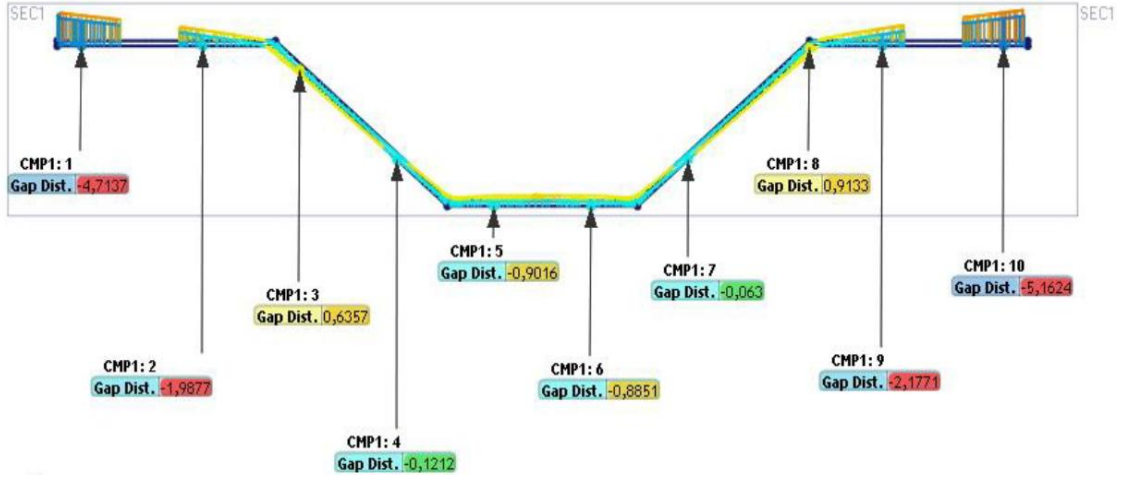
Şekil 5.4. a) İstenilen geometride b) Elde edilen geometride  $\beta$  açısı



a.

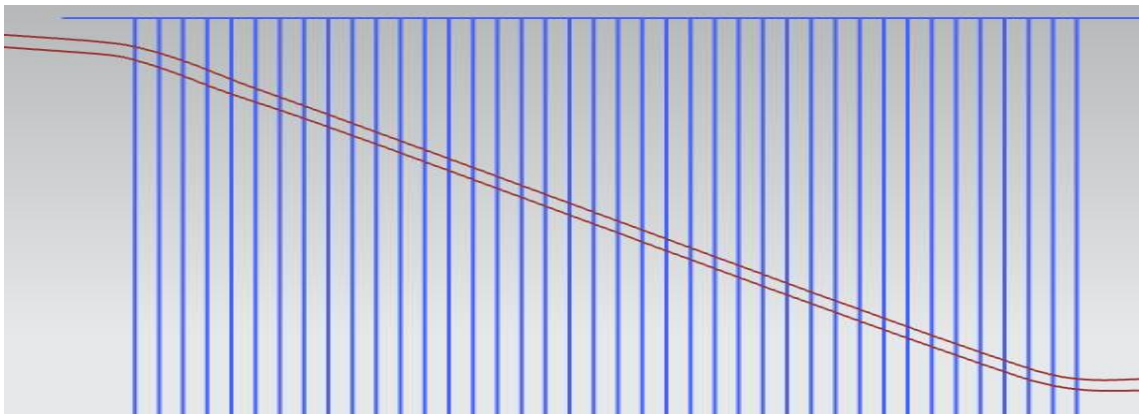
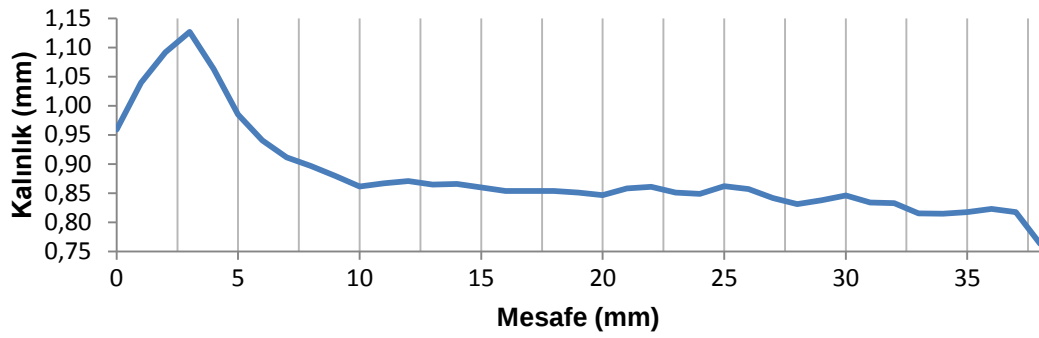


b.

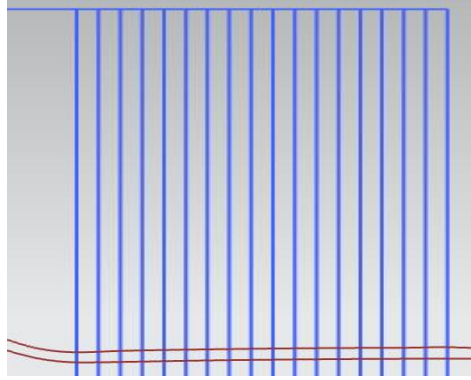
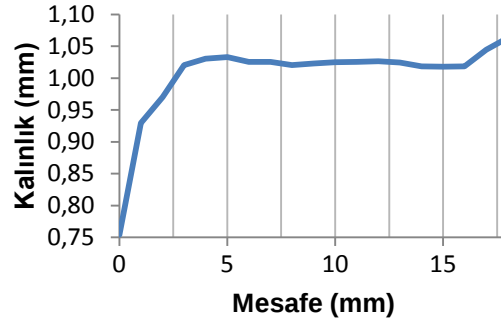


C.

Şekil 5.5. Bor Yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıtılmış malzeme ve 1. Takım yolu parametrelerinde işlem gören numunenin lazer tarama sonucu elde edilen a) Üstten, önden ve sağ yandan görüşleri b-c) Geometrik tamlik sonuçları

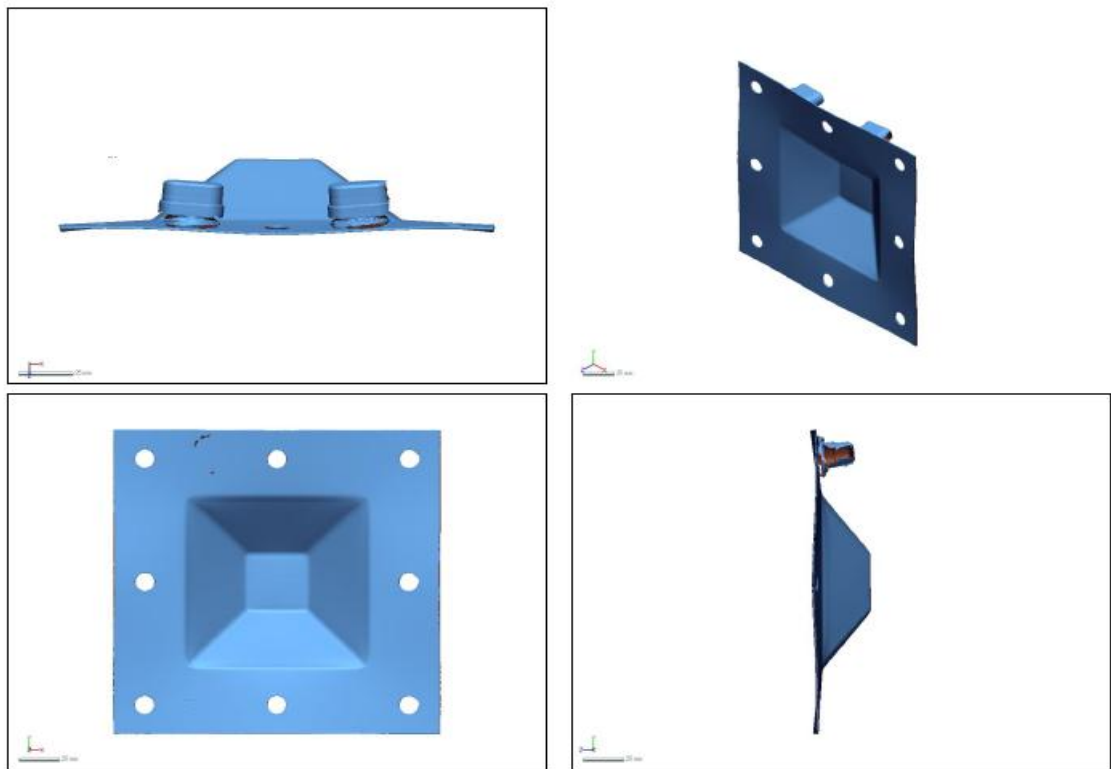


a.

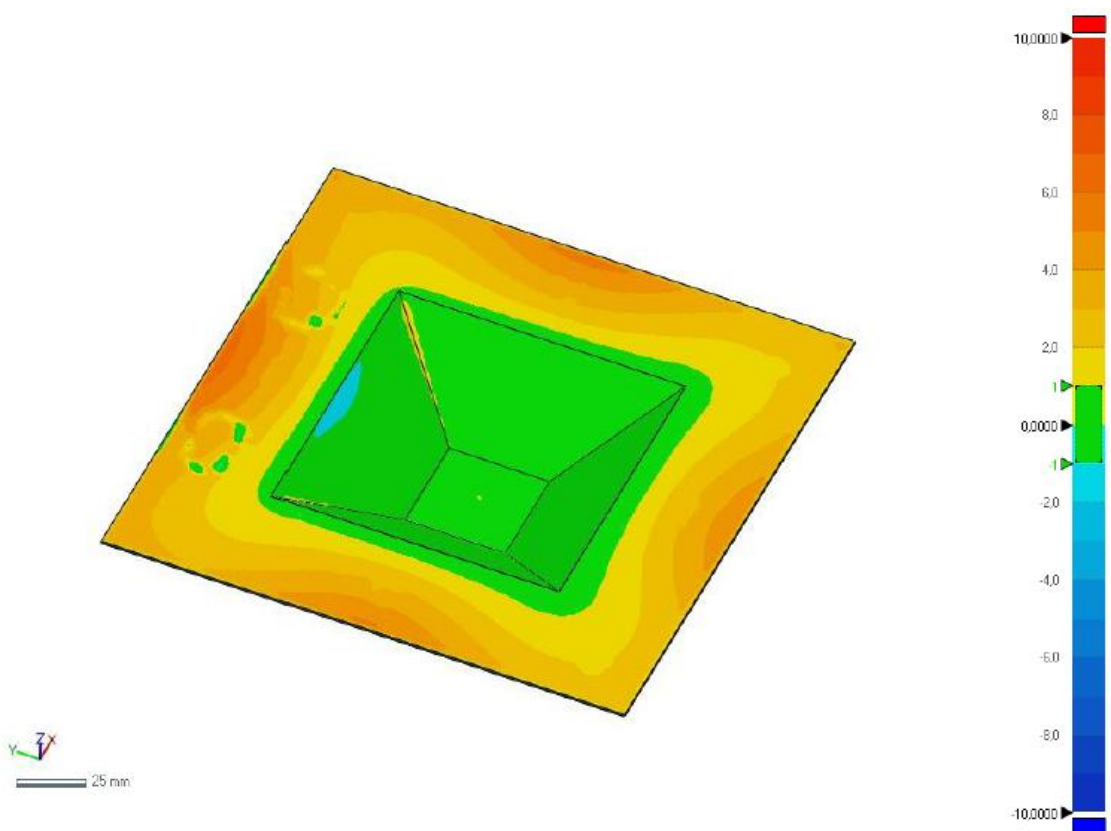


b.

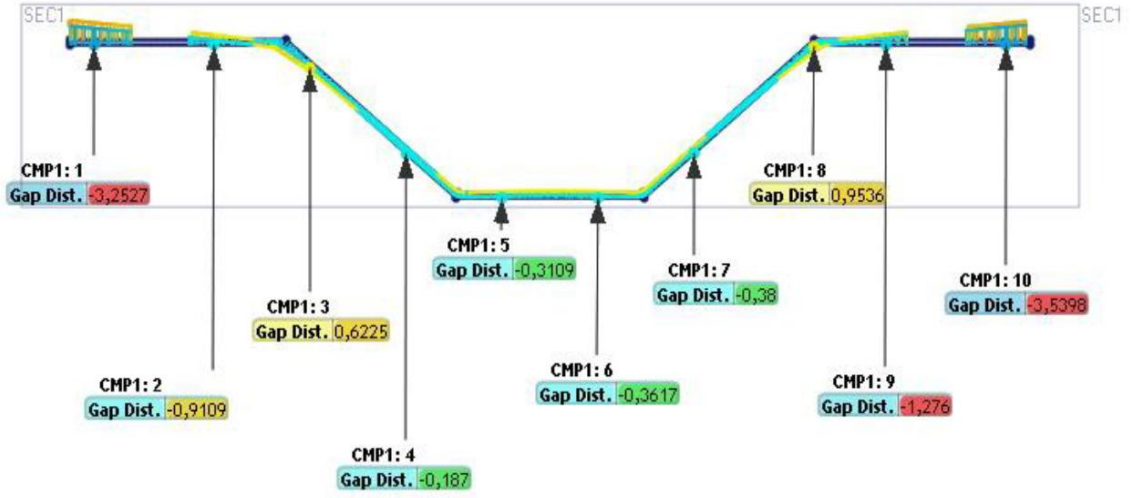
Şekil 5.6. Bor yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıtılmış işlem görmemiş malzeme ve 1. takım yolu parametrelerine sahip numunenin a) Eğik bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri b) Taban bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri



a.

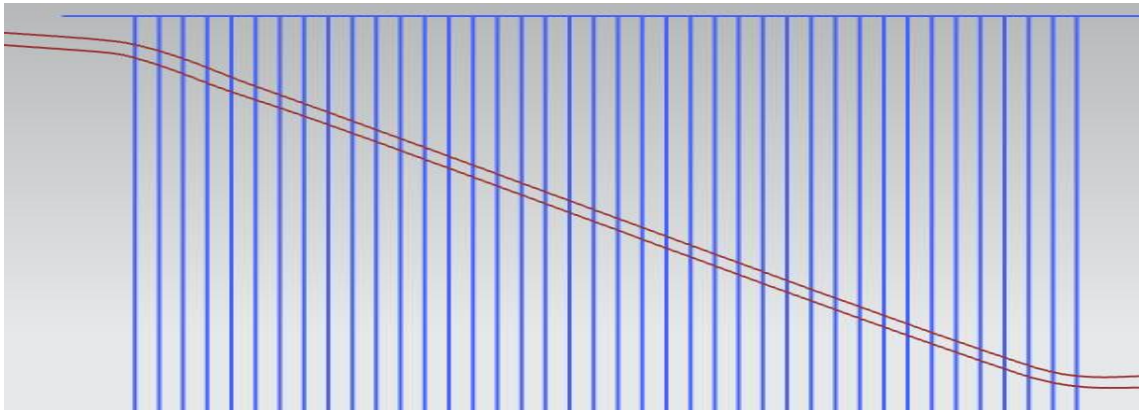
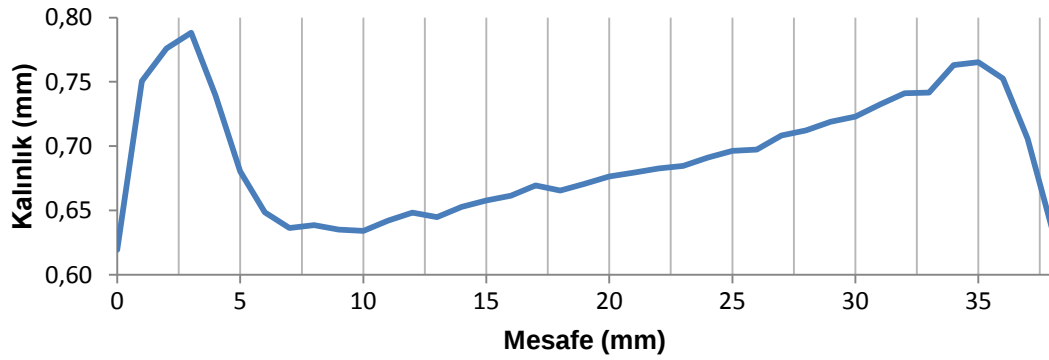


b.

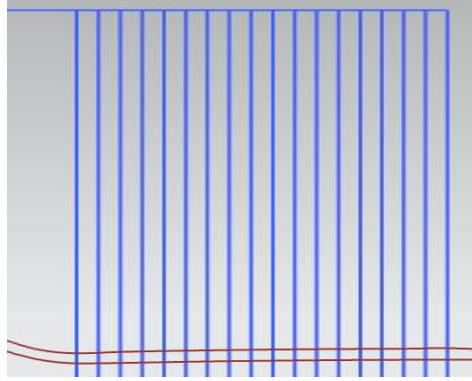
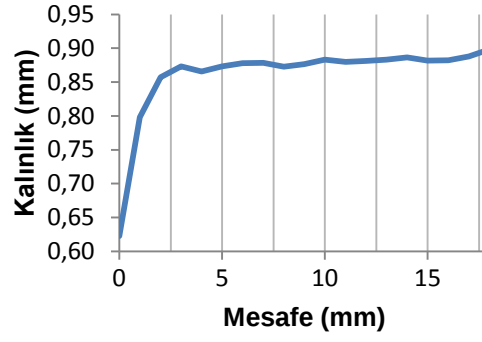


c

Şekil 5.7. Sıvama yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıtılmış malzeme ve 1. takım yolu parametrelerinde işlem gören numunenin lazer tarama sonucu elde edilen a) Üstten, önden ve sağ yandan görüşleri b-c) Geometrik tamlik sonuçları

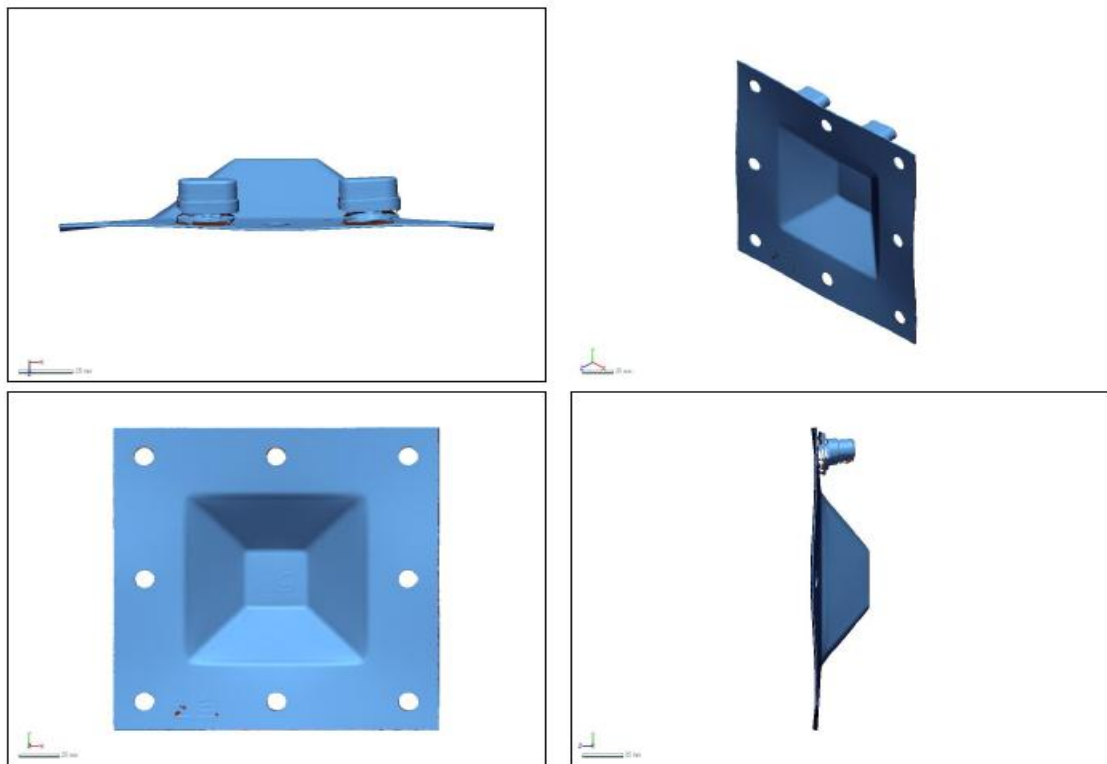


a.

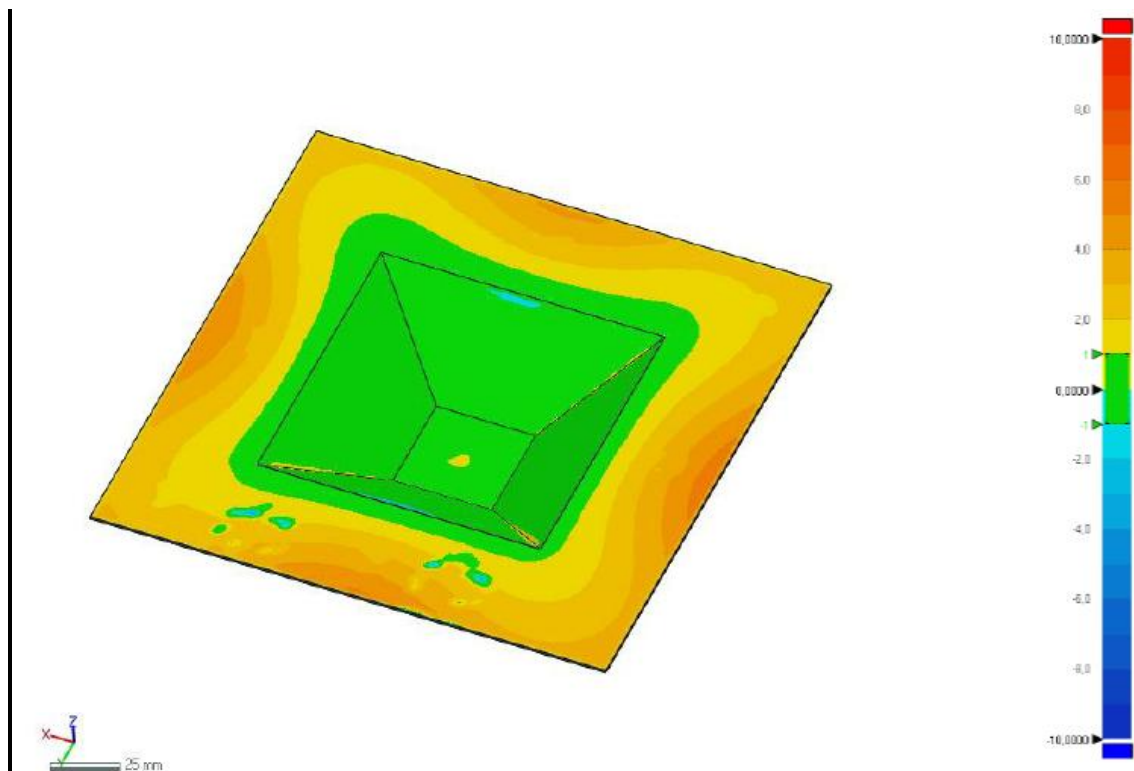


b.

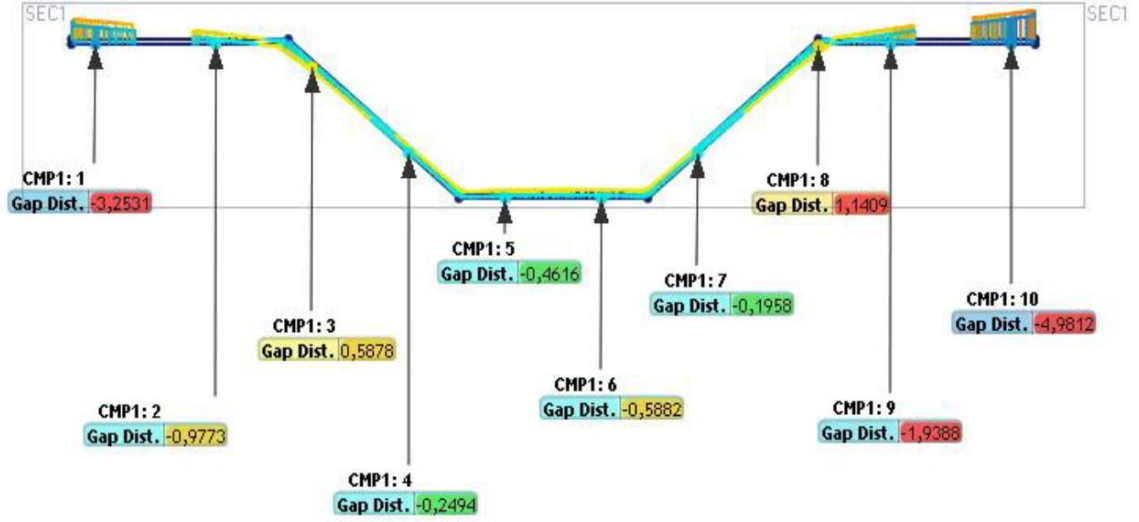
Şekil 5.8. Sıvama yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıtılmış malzeme ve 1. takım yolu parametrelerine sahip numunenin a) Eğik bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri  
b) Taban bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri



a.

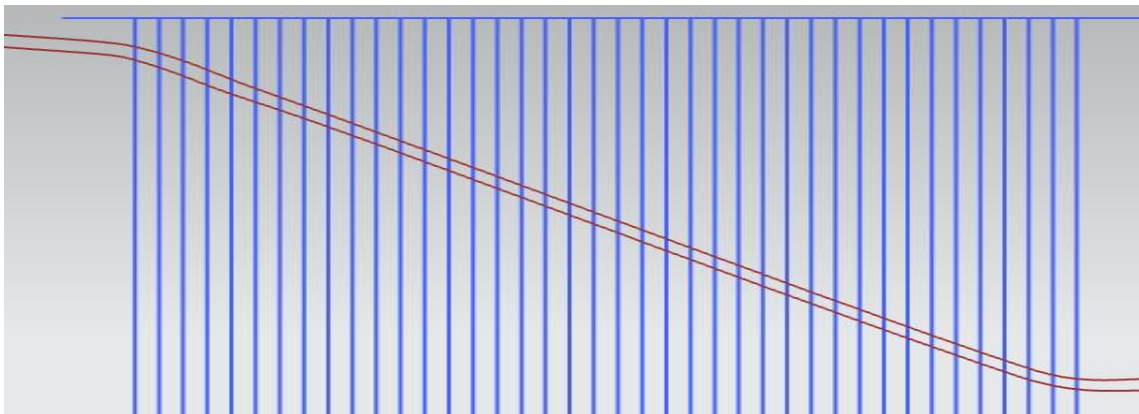
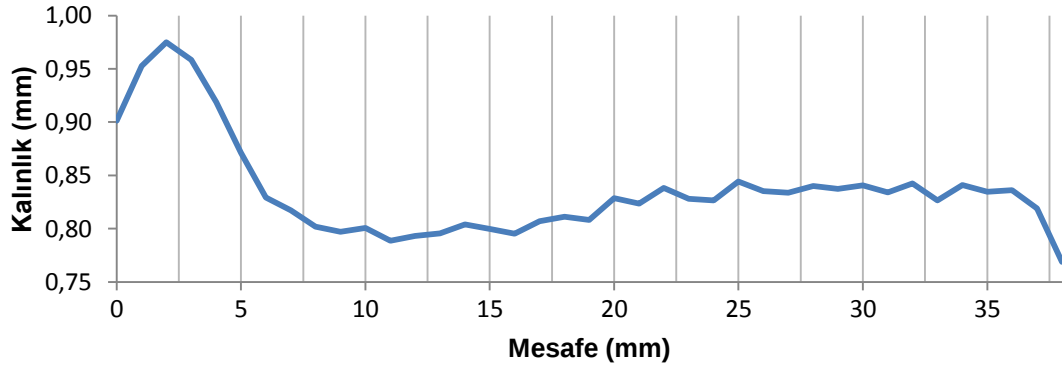


b.

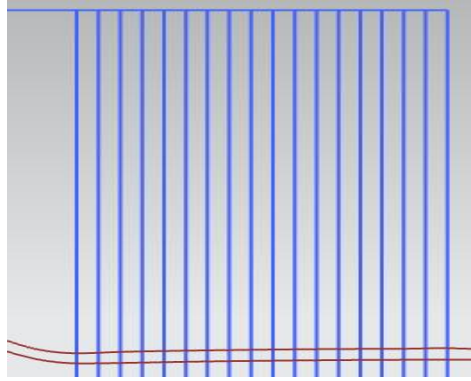
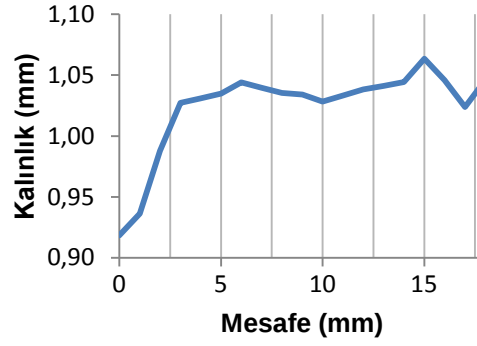


C.

Şekil 5.9. Bor yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıtılmış malzeme ve 1. takım yolu parametrelerinde işlem gören numunenin lazer tarama sonucu elde edilen a) Üstten, önden ve sağ yandan görüşleri b-c) Geometrik tamlik sonuçları

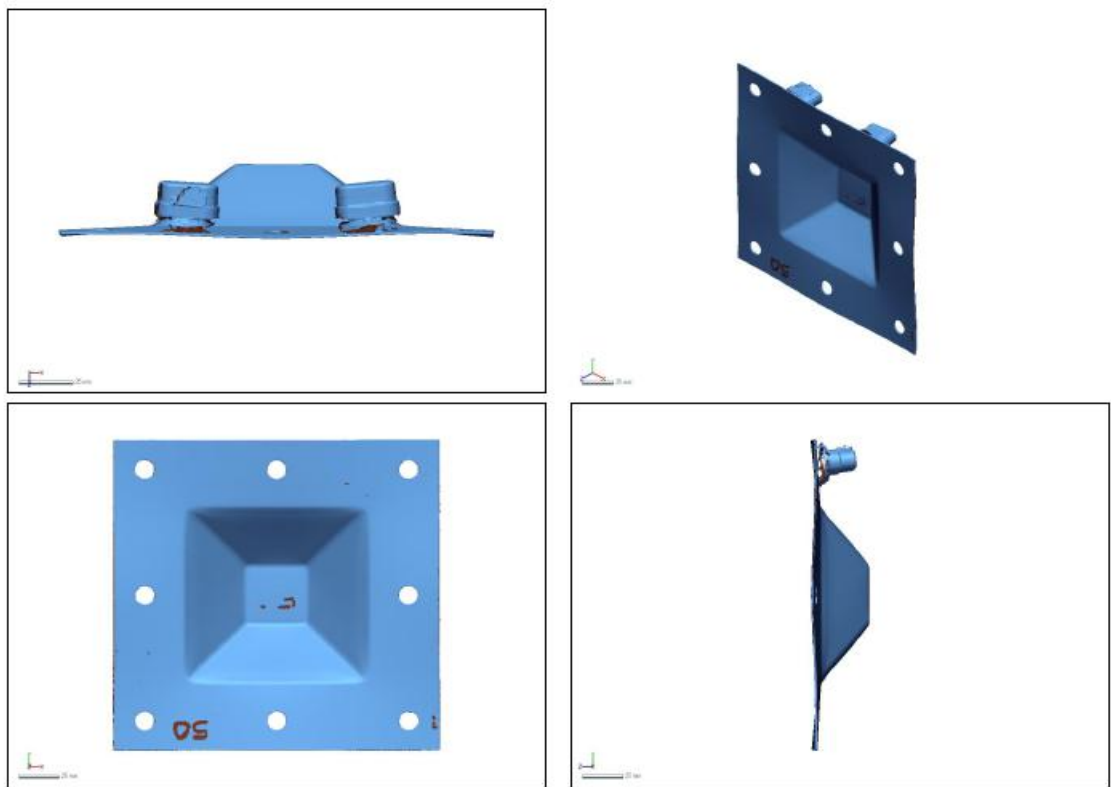


a.

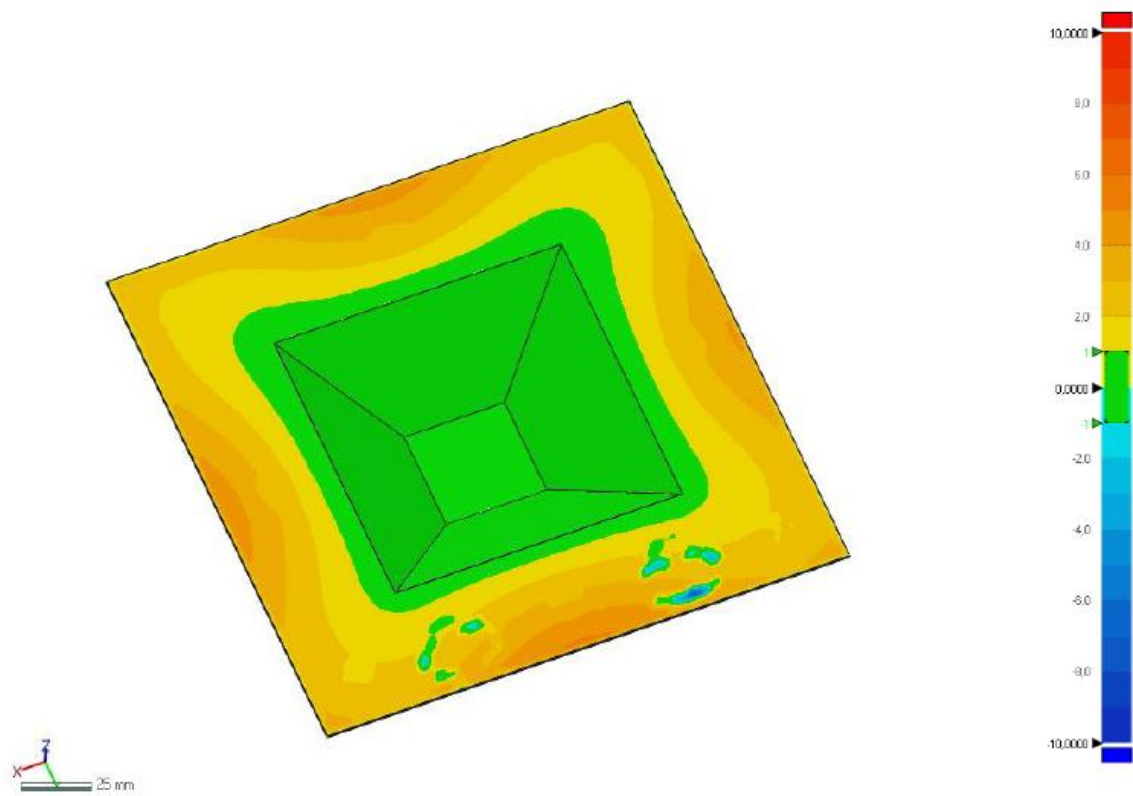


b.

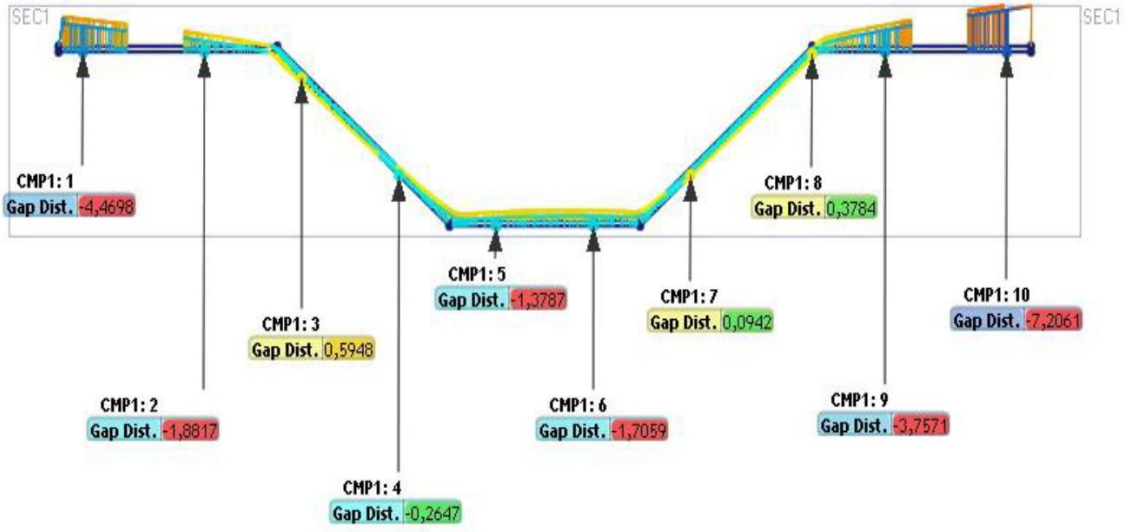
Şekil 5.10. Bor yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıtılmış malzeme ve 1. takım yolu parametrelerine sahip numunenin a) Eğik bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri  
b) Taban bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri



a.

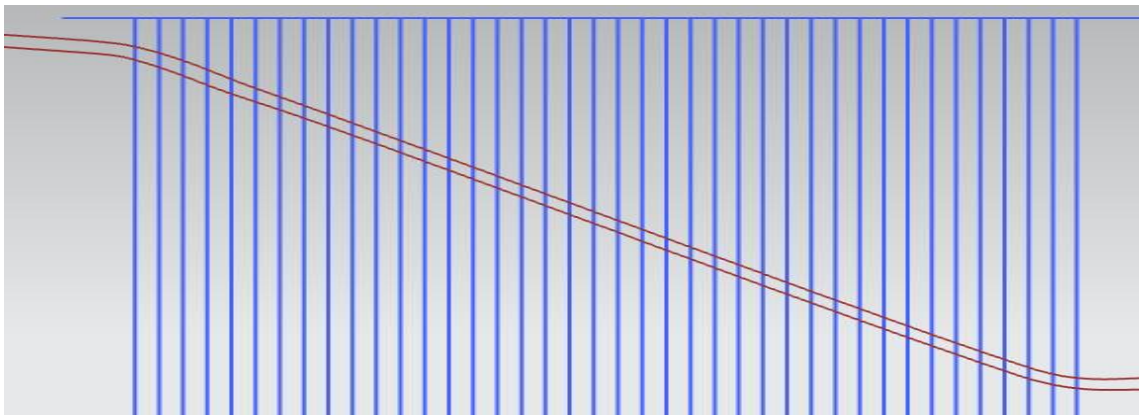
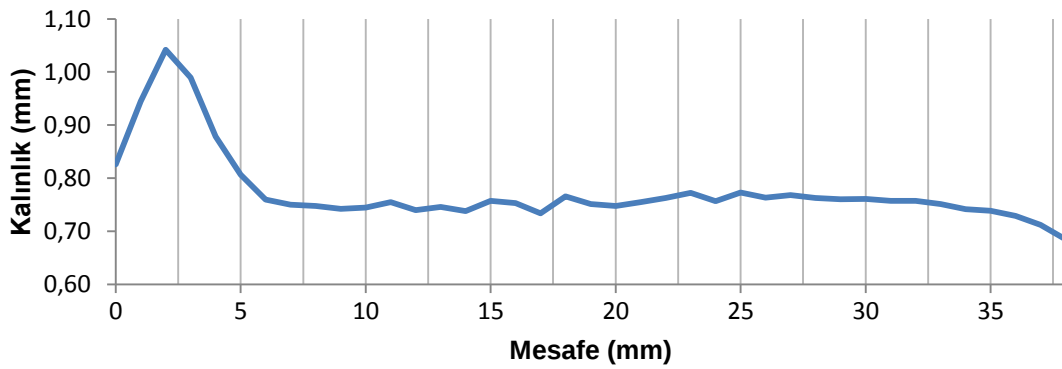


b.

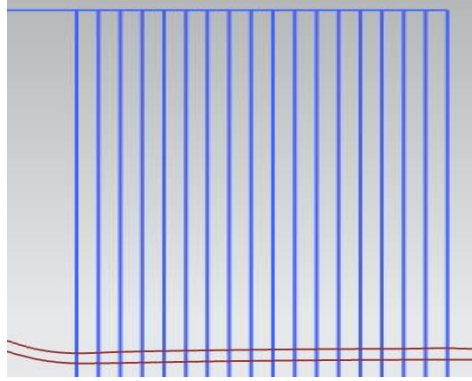
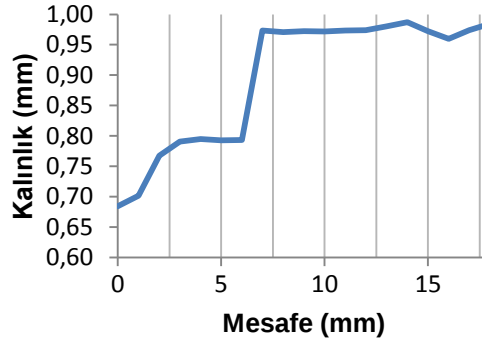


C.

Φ 5.11. Sıvama yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıtılmış malzeme ve 1. takım yolu parametrelerinde işlem gören numunenin lazer tarama sonucu elde edilen a) Üstten, önden ve sağ yandan görüşleri b-c) Geometrik tamlık sonuçları

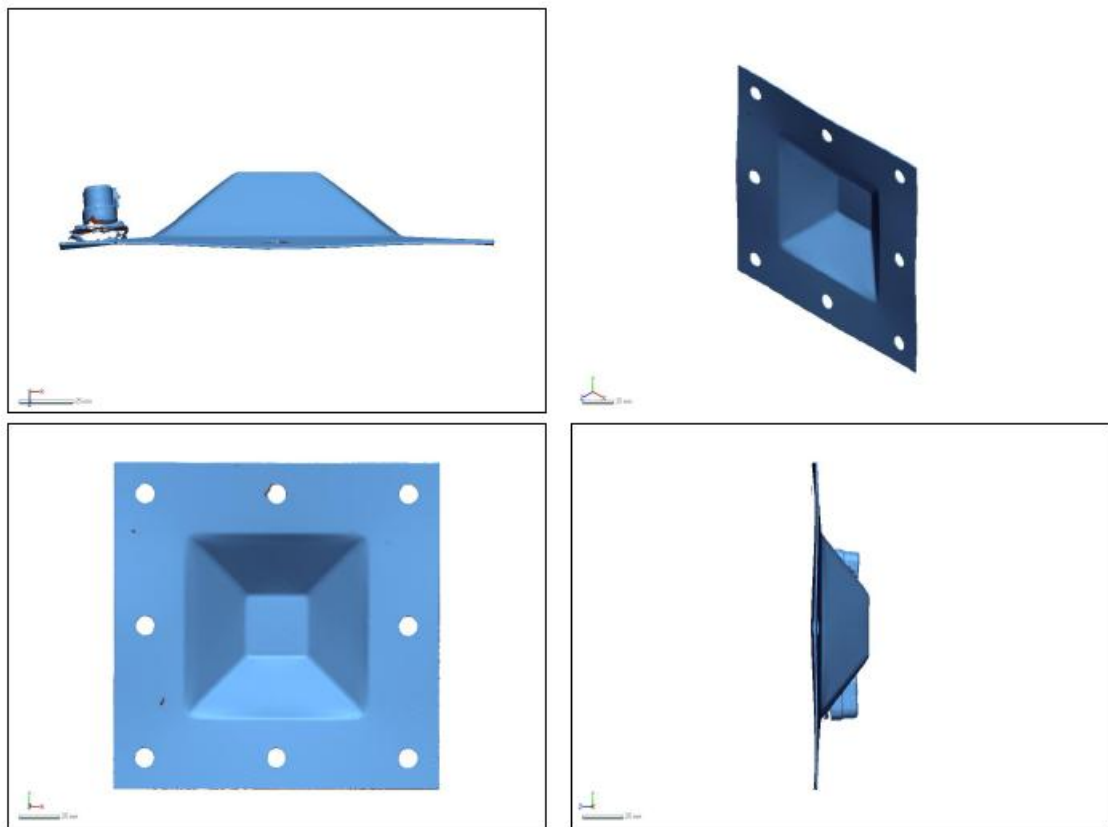


a.

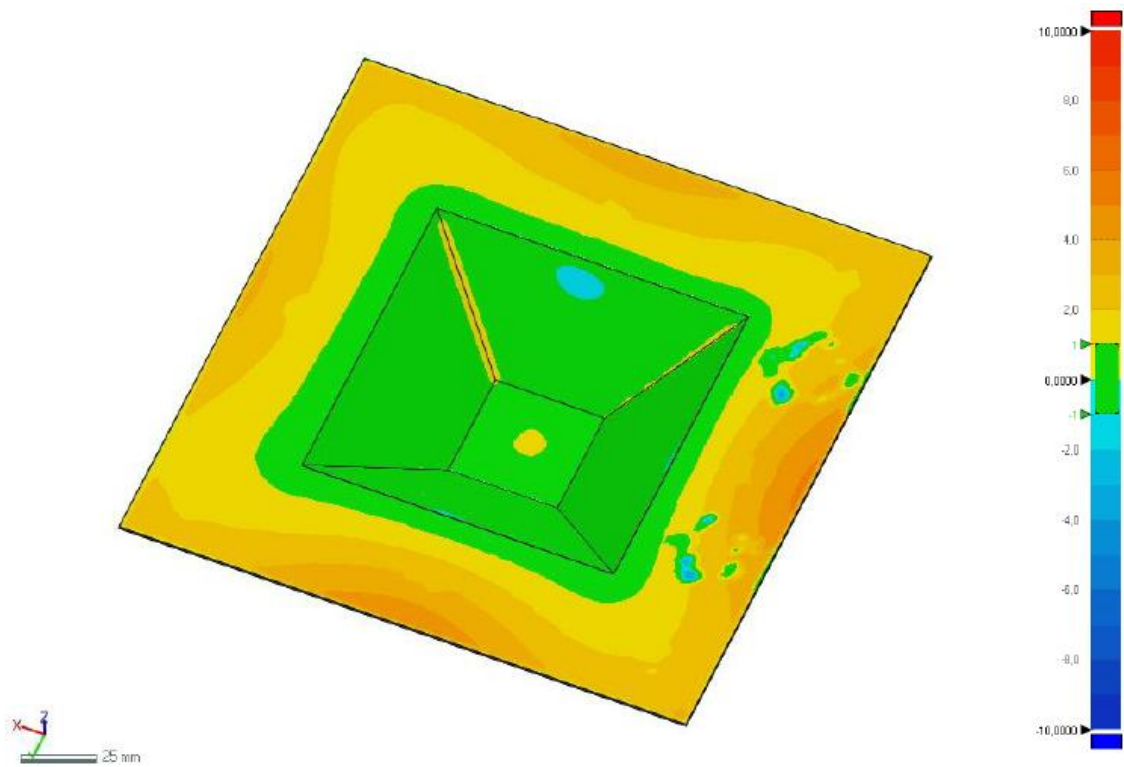


b.

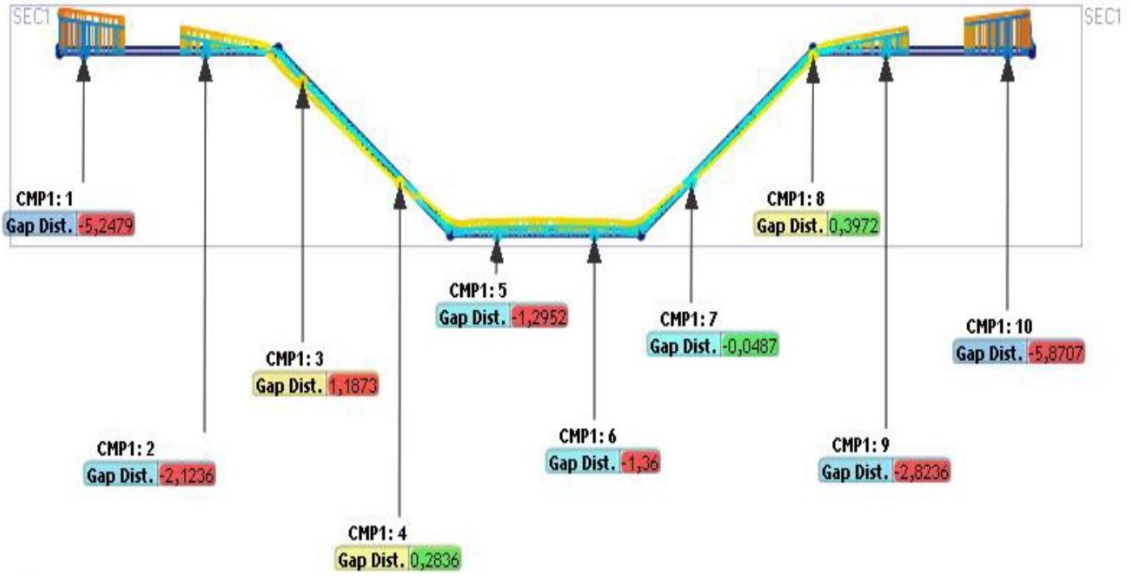
Şekil 5.12. Sıvama yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıtılmış işlem görmemiş malzeme ve 1. takım yolu parametrelerine sahip numunenin a) Eğik bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri  
b) Taban bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri



a.

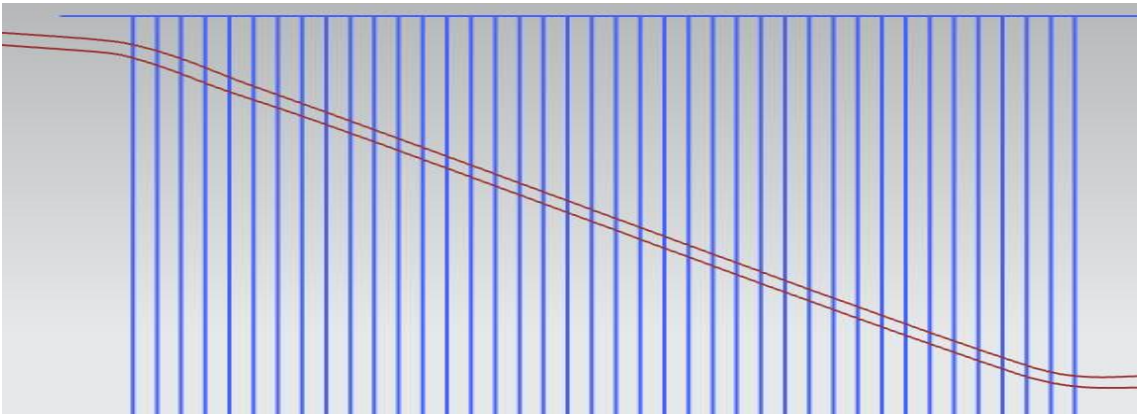
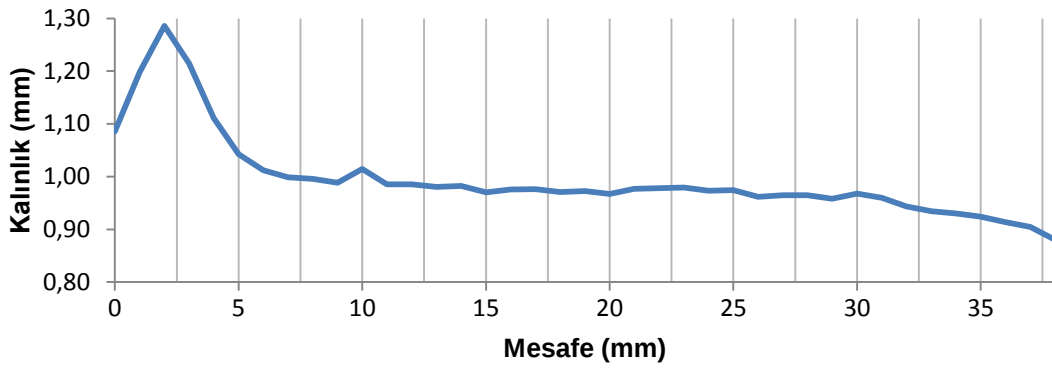


b.

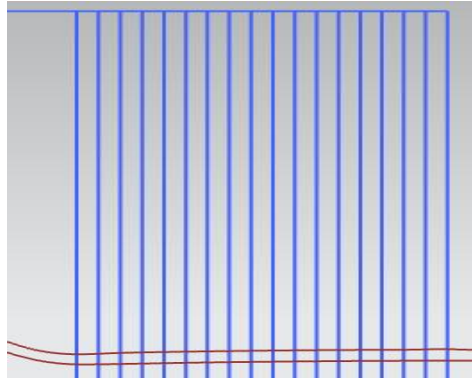
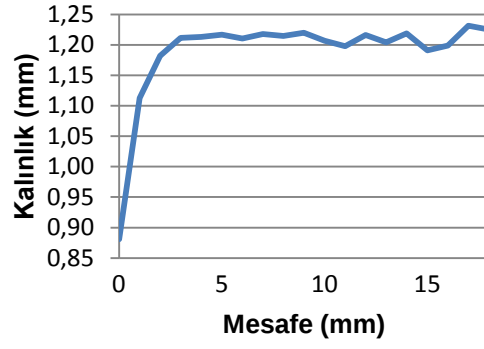


c.

Şekil 5.13. Bor yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıtılmış işlem görmemiş malzeme ve 1. takım yolu parametrelerinde işlem gören numunenin lazer tarama sonucu elde edilen a) Üstten, önden ve sağ yandan görüşleri b-c) Geometrik tamlık sonuçları

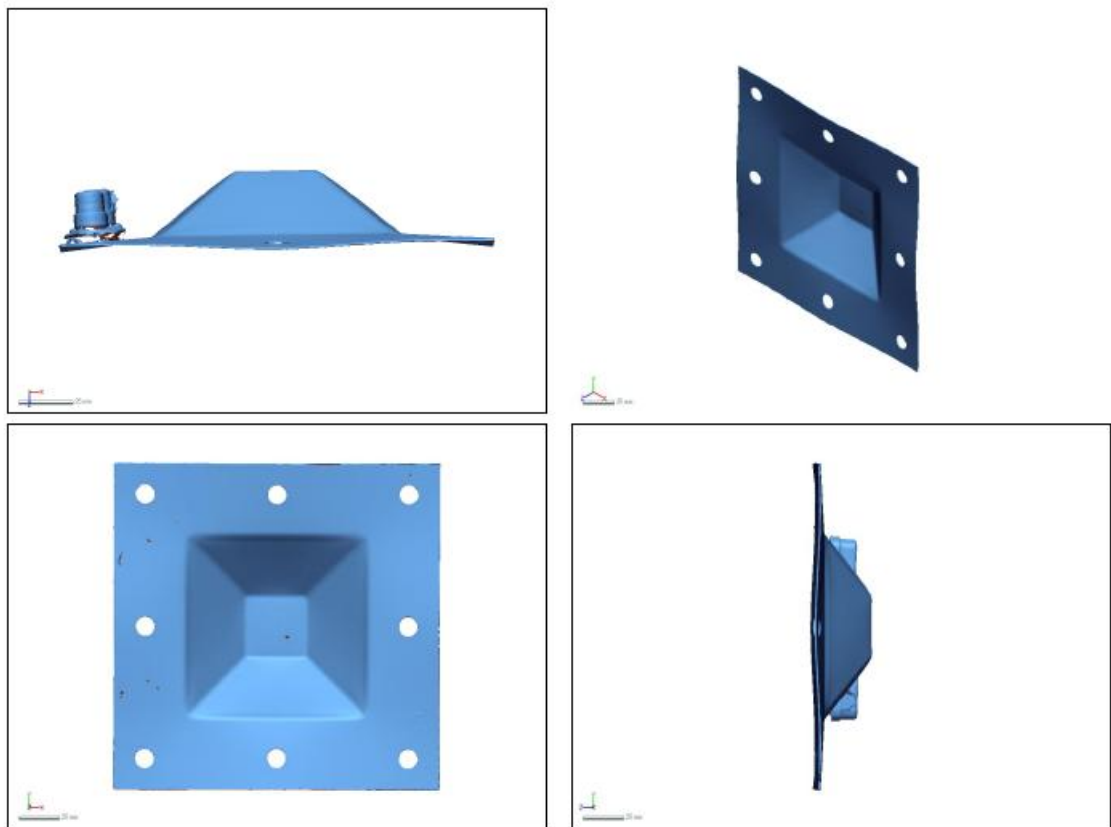


a.

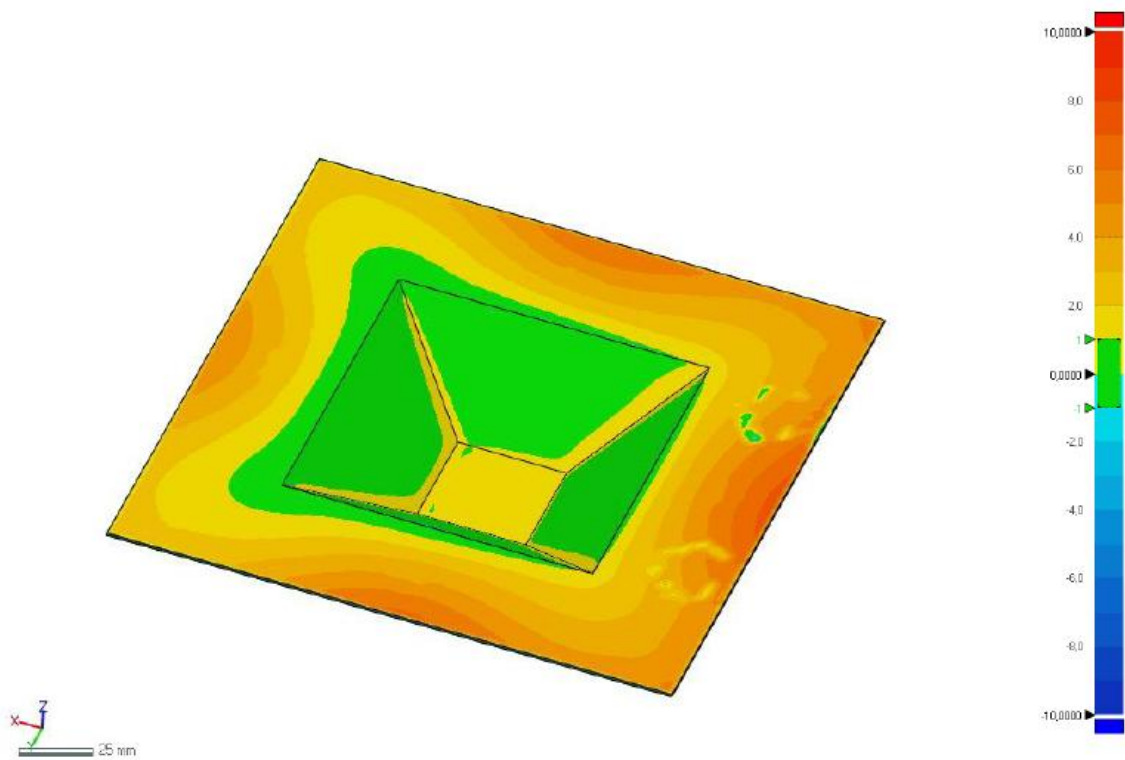


b.

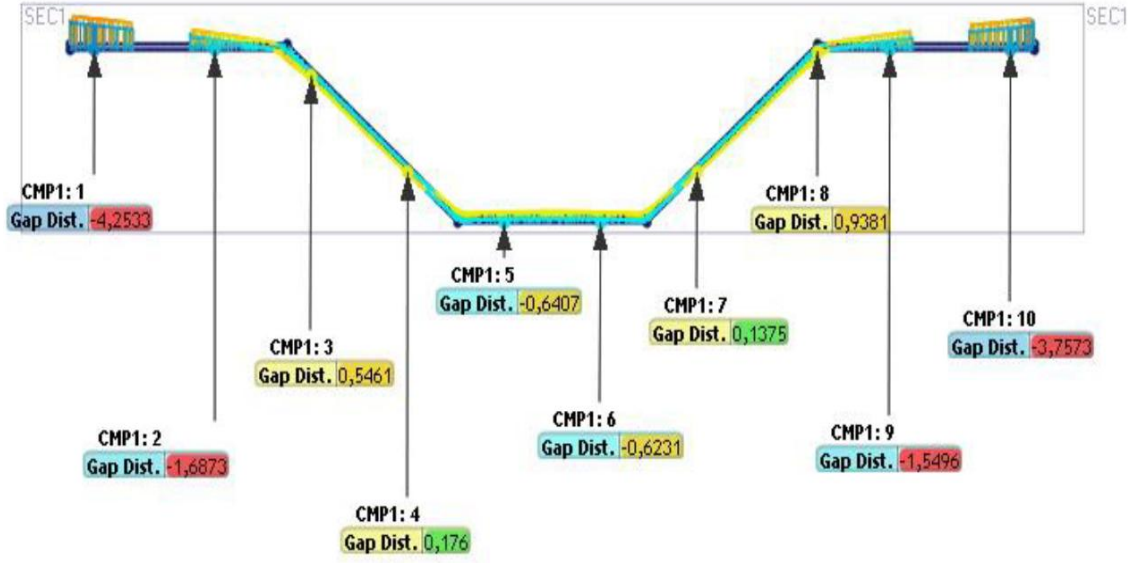
Şekil 5.14. Bor yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıtılmış işlem görmemiş malzeme ve 1. takım yolu parametrelerine sahip numunenin a) Eğik bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri  
b) Taban bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri



a.

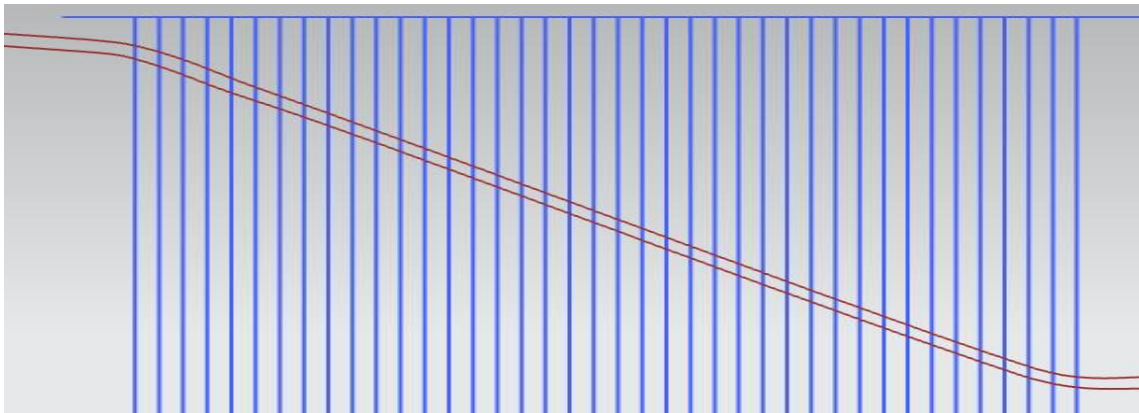
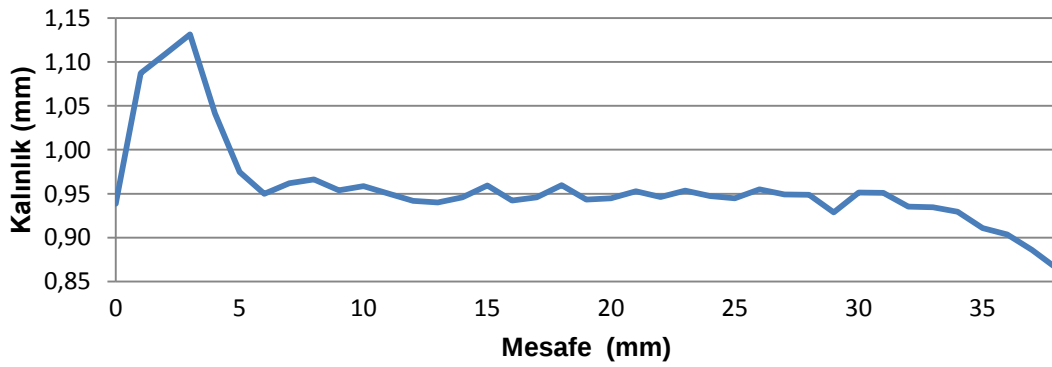


b.

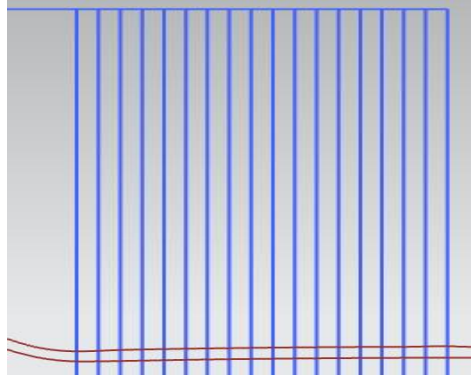
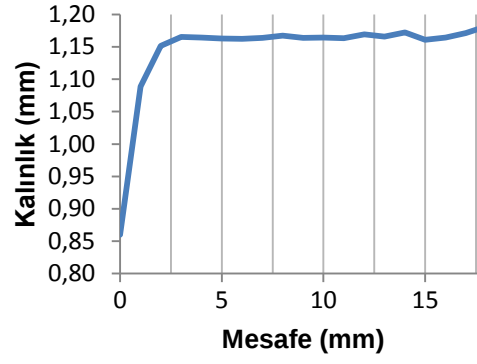


c.

Şekil 5.15. Sıvama yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıtılmış malzeme ve 1. takım yolu parametrelerinde işlem gören numunenin lazer tarama sonucu elde edilen a) Üstten, önden ve sağ yandan görüşleri b-c) Geometrik tamlik sonuçları

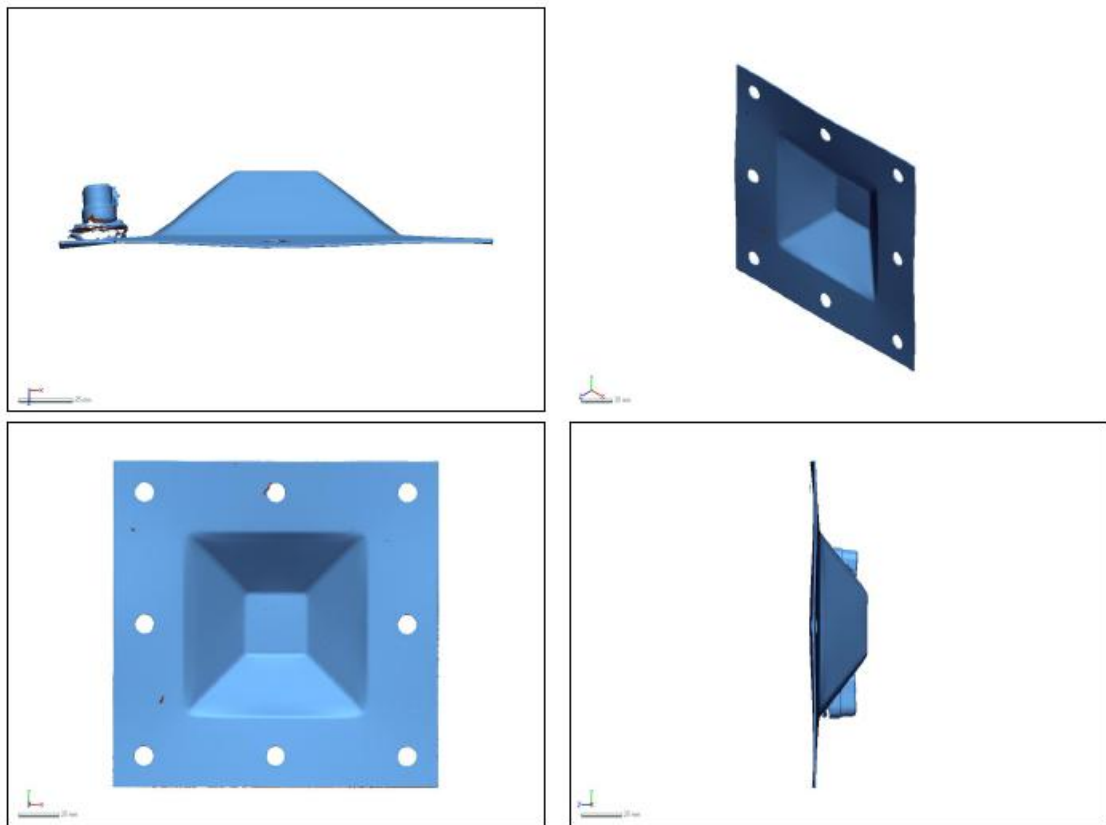


a.

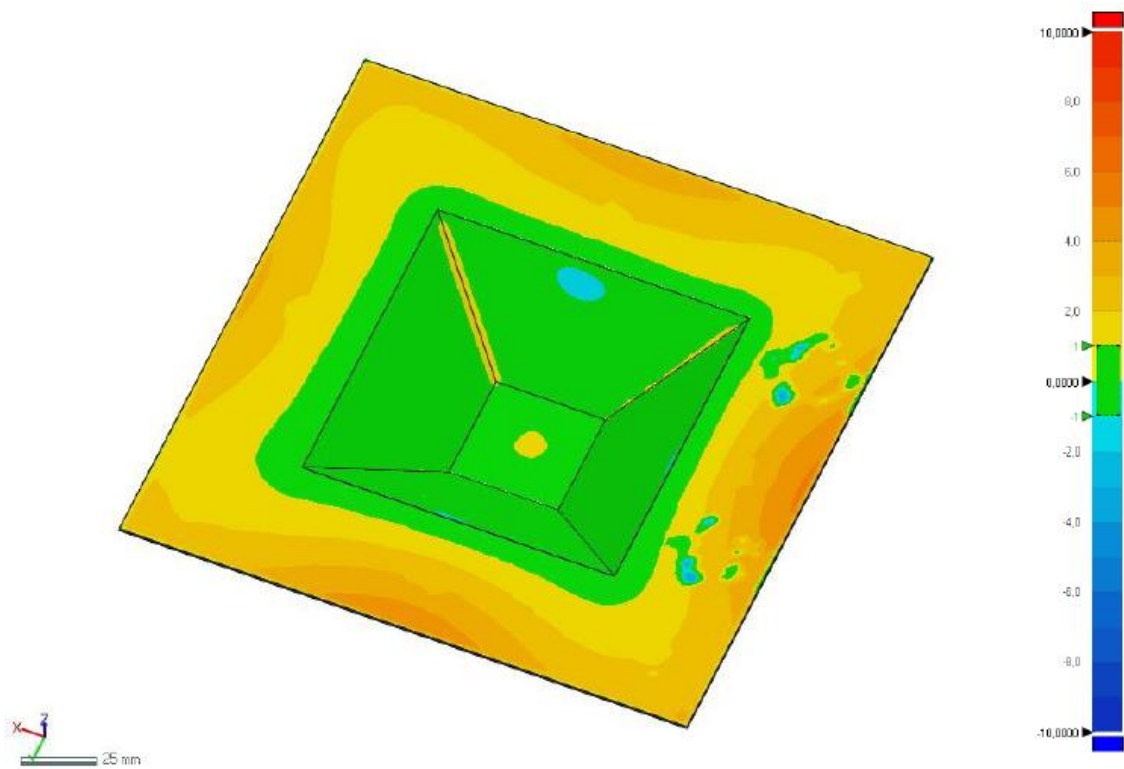


b.

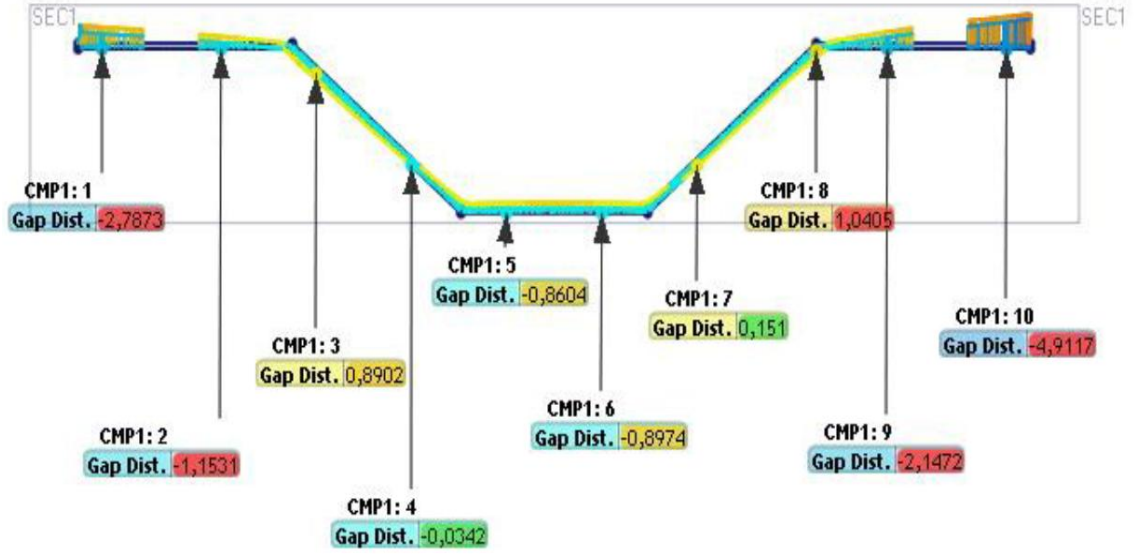
Şekil 5.16. Sıvama yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıtılmış malzeme ve 1. takım yolu parametrelerine sahip numunenin a) Eğik bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri  
b) Taban bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri



a.

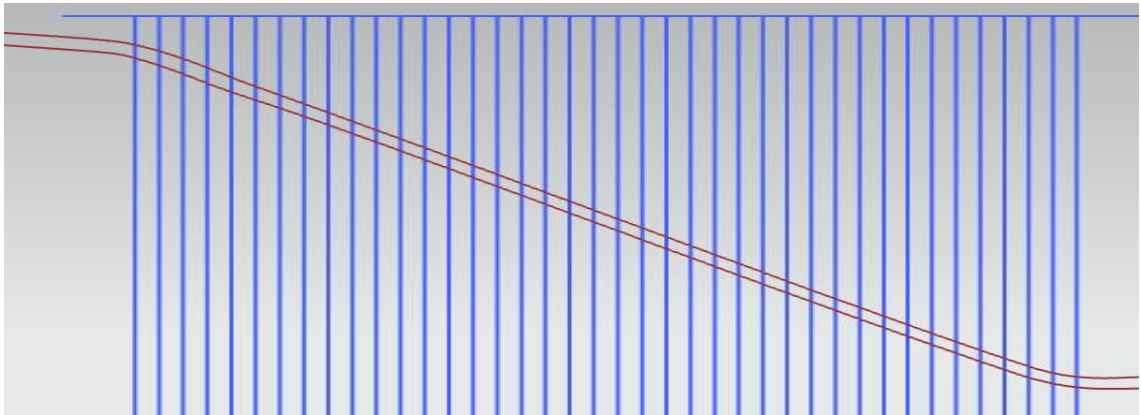
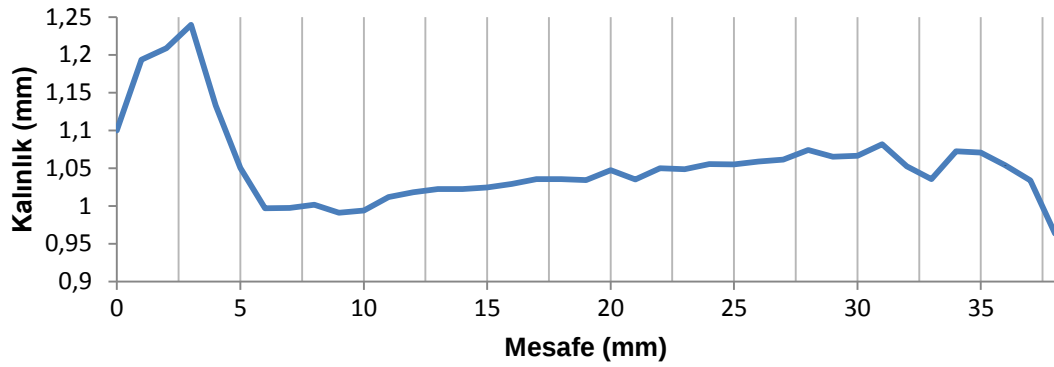


b.

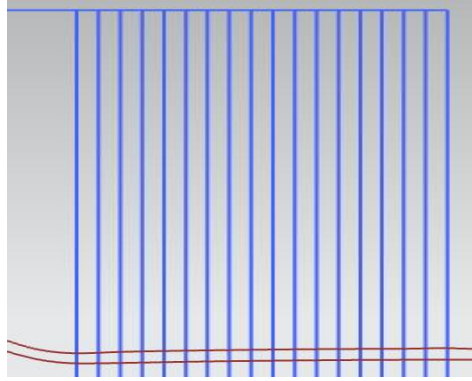
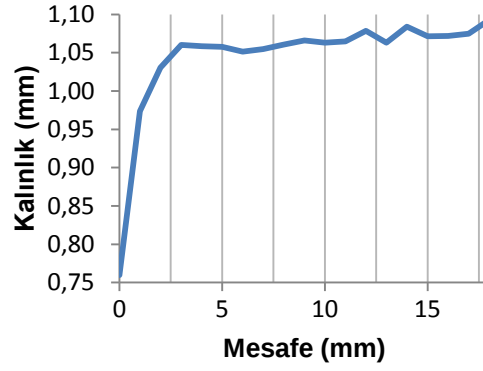


C.

Şekil 5.17. Bor yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıtılmış malzeme ve 1. takım yolu parametrelerinde işlem gören numunenin lazer tarama sonucu elde edilen a) Üstten, önden ve sağ yandan görüşleri b-c) Geometrik tamlik sonuçları

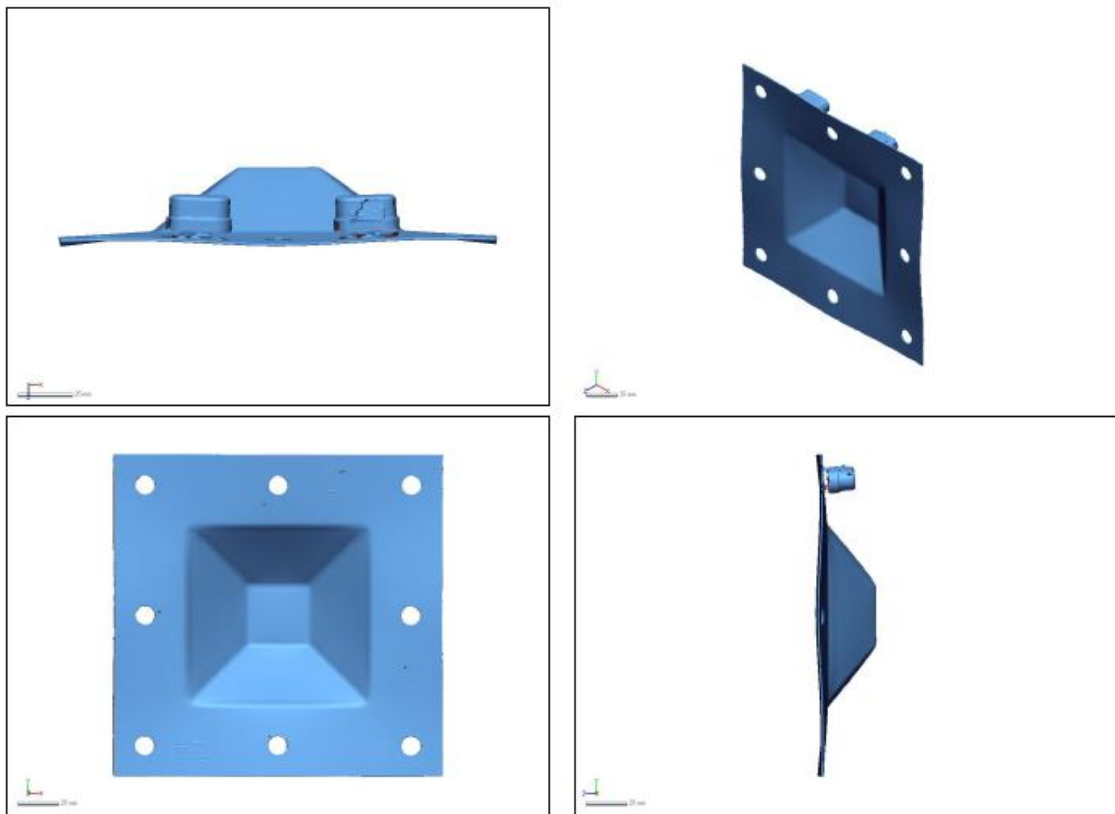


a.

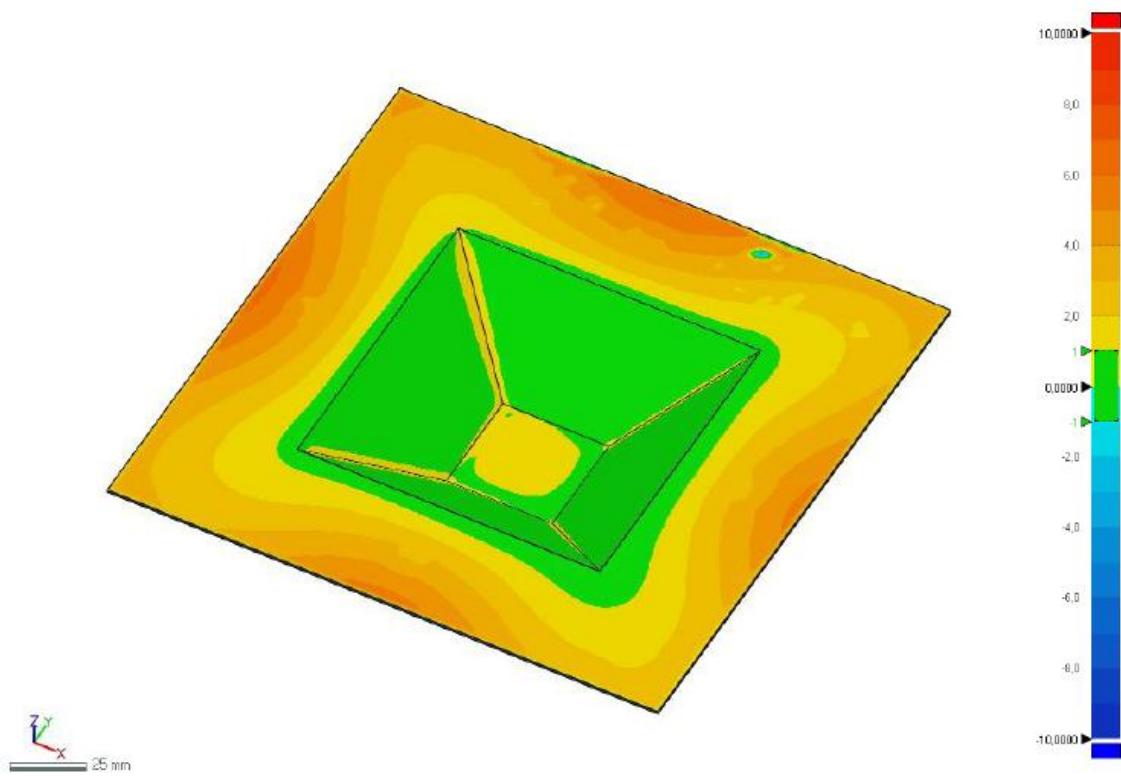


b.

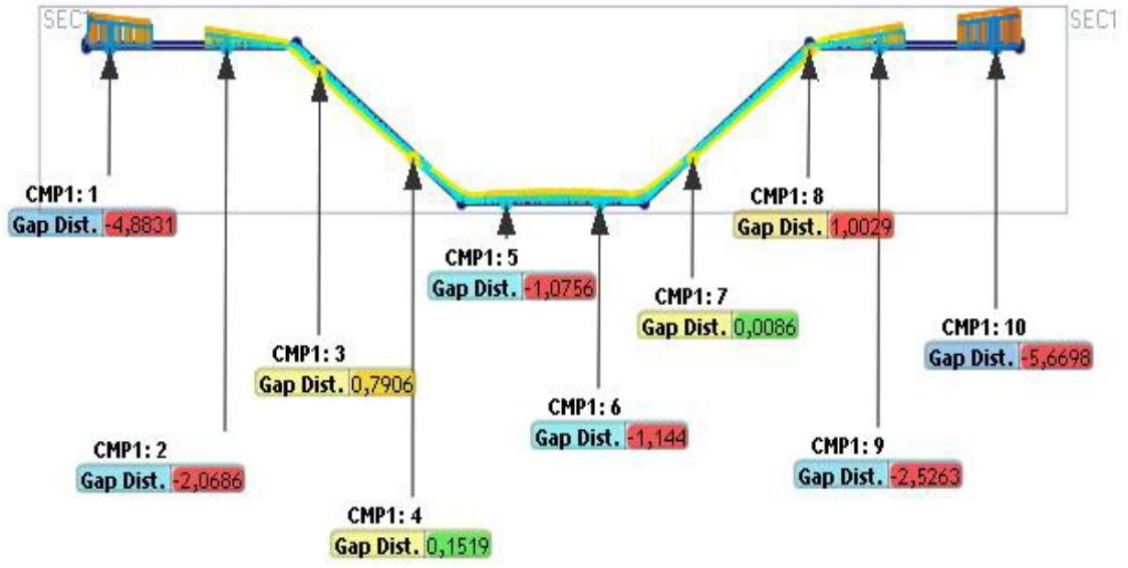
Şekil 5.18. Bor yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıtılmış malzeme ve 1. takım yolu parametrelerine sahip numunenin a) Eğik bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri  
b) Taban bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri



a.

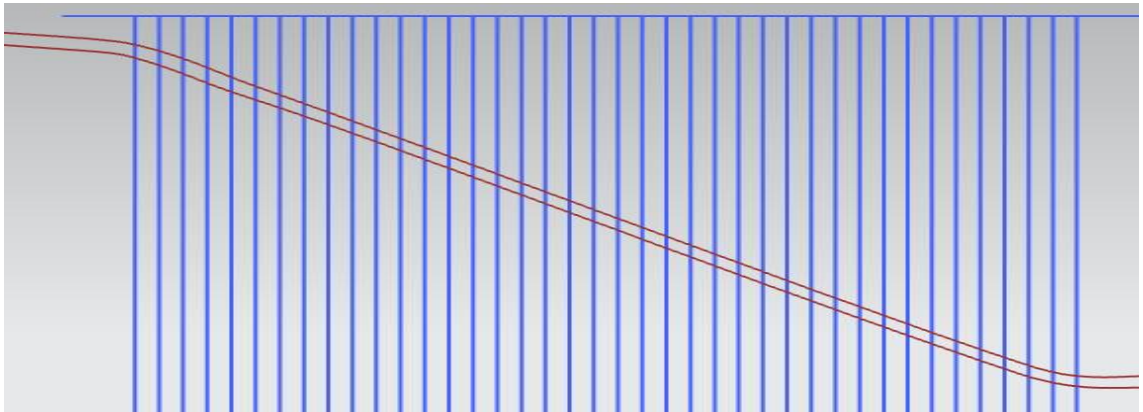
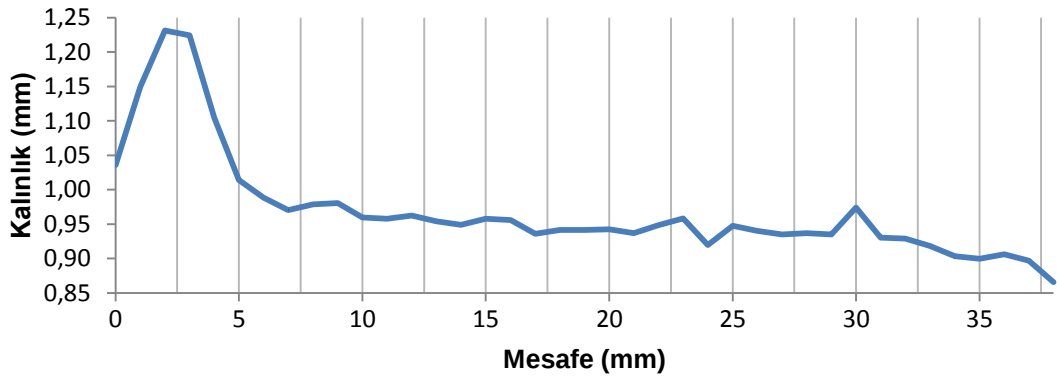


b.

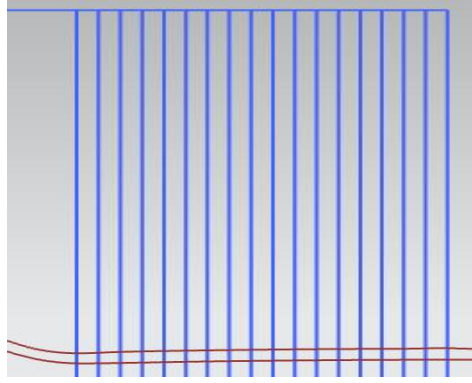
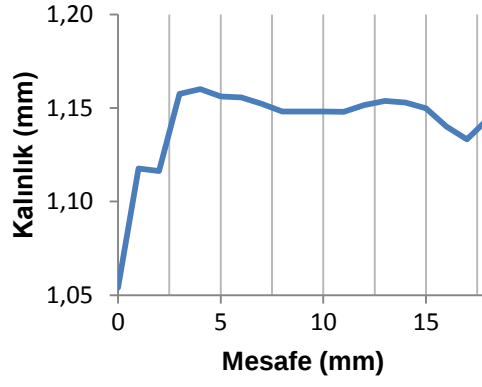


C.

Şekil 5.19. Sıvama yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıtılmış işlem görmemiş malzeme ve 2. takım yolu parametrelerinde işlem gören numunenin lazer tarama sonucu elde edilen a) Üstten, önden ve sağ yandan görüşleri b-c) Geometrik tamlık sonuçları

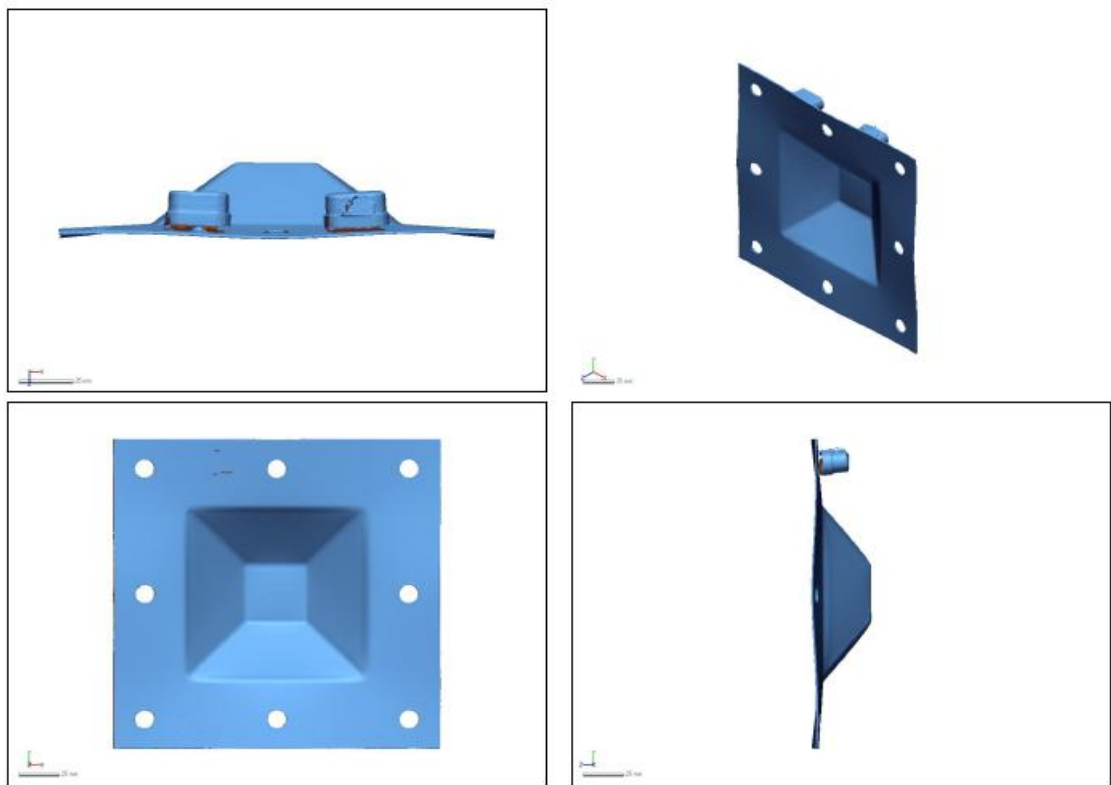


a.

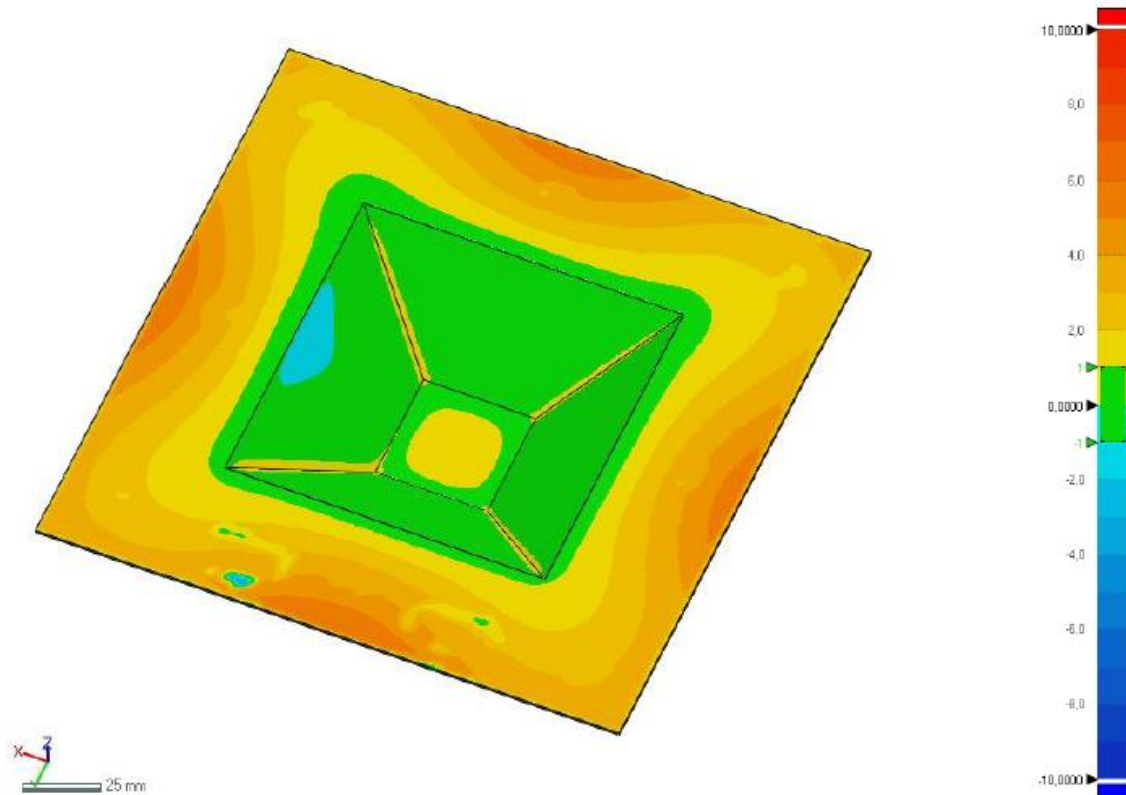


b.

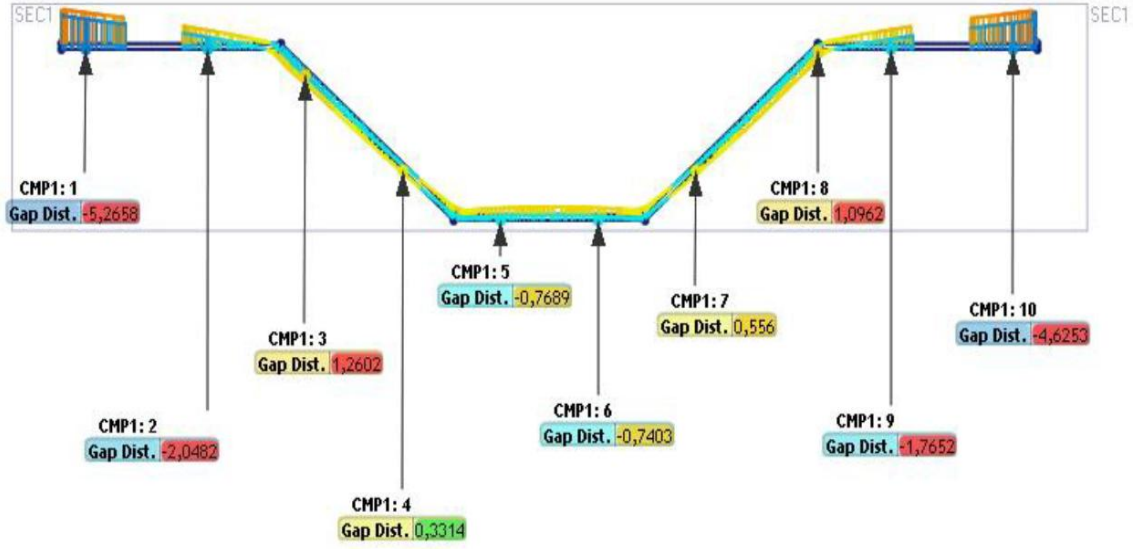
Şekil 5.20. Sıvama yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıtılmış malzeme ve 2. takım yolu parametrelerine sahip numunenin a) Eğik bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri  
b) Taban bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri



a.

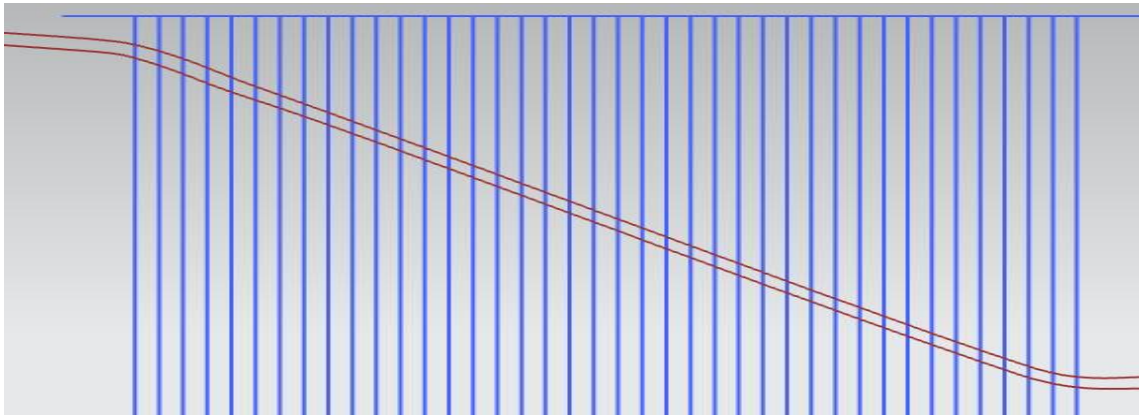
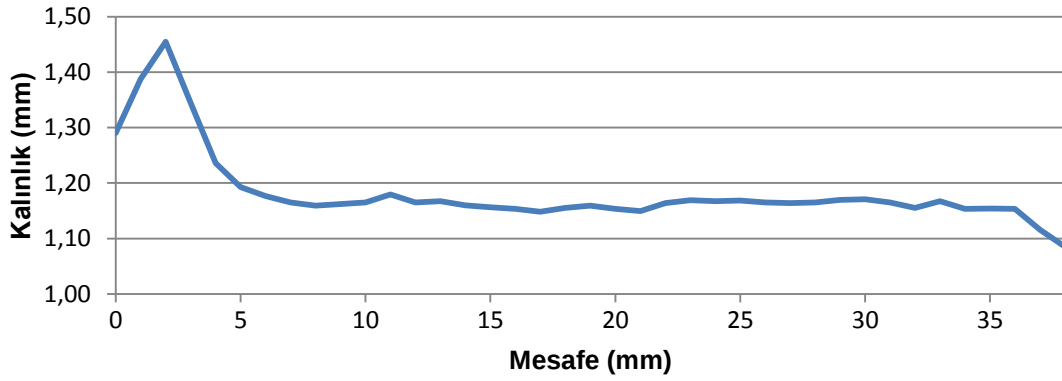


b.

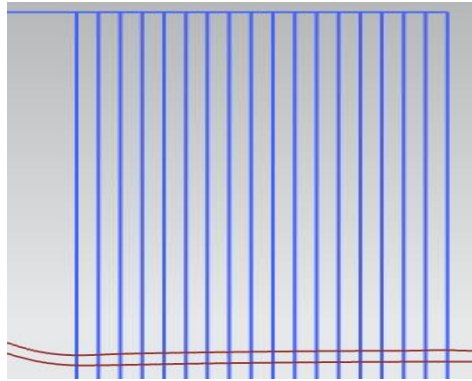
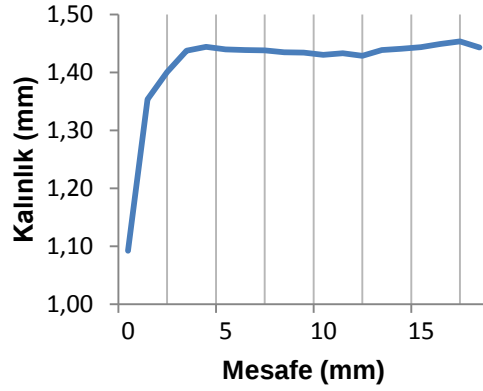


c.

Şekil 5.21. Bor yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıtılmış işlem görmemiş malzeme ve 2. takım yolu parametrelerinde işlem gören numunenin lazer tarama sonucu elde edilen a) Üstten, önden ve sağ yandan görüşleri b-c) Geometrik tamlık sonuçları

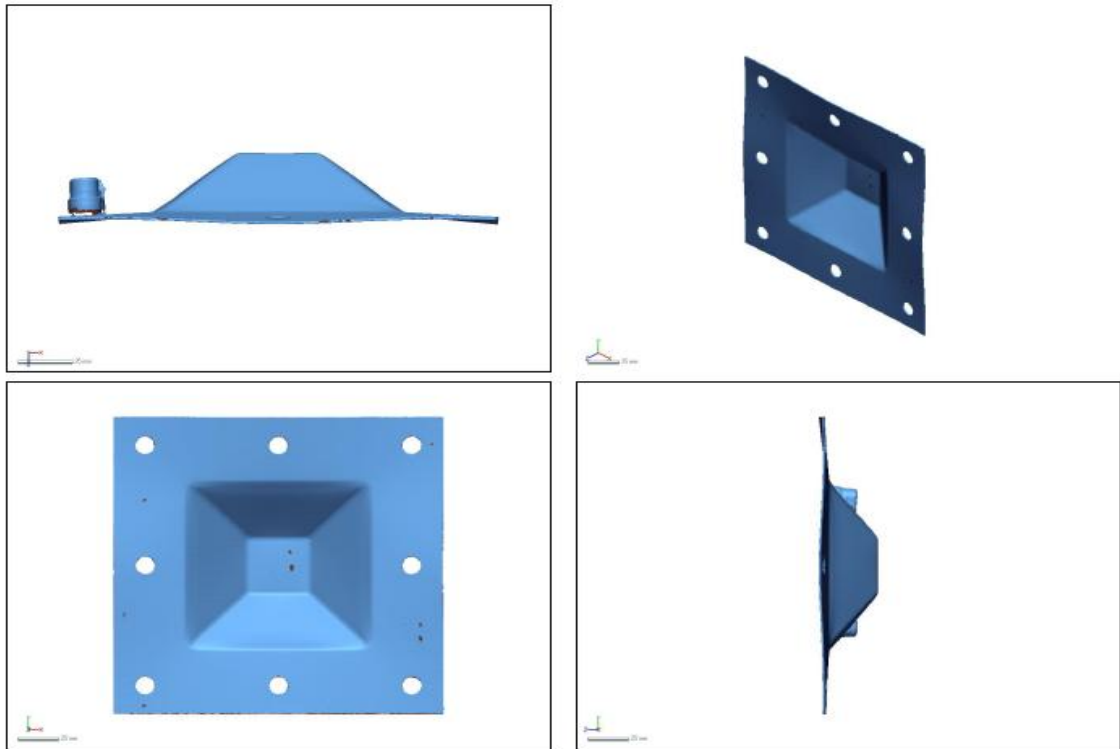


a.

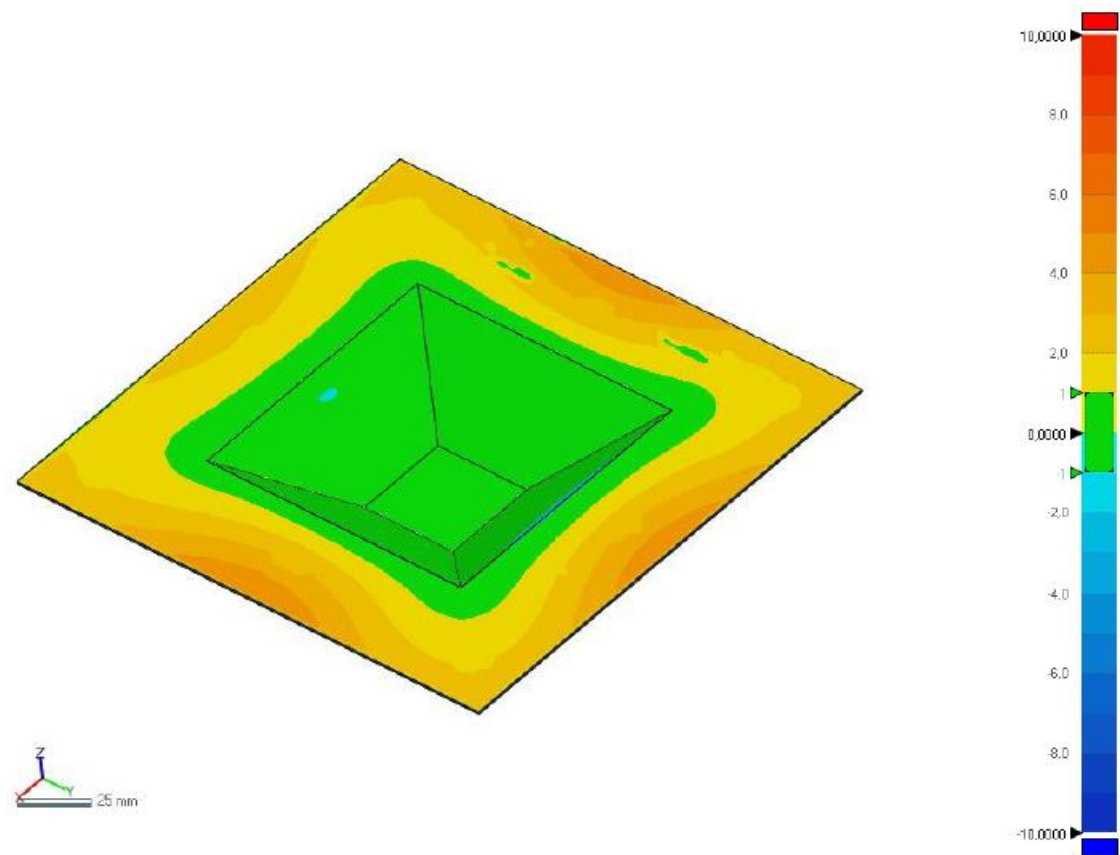


b.

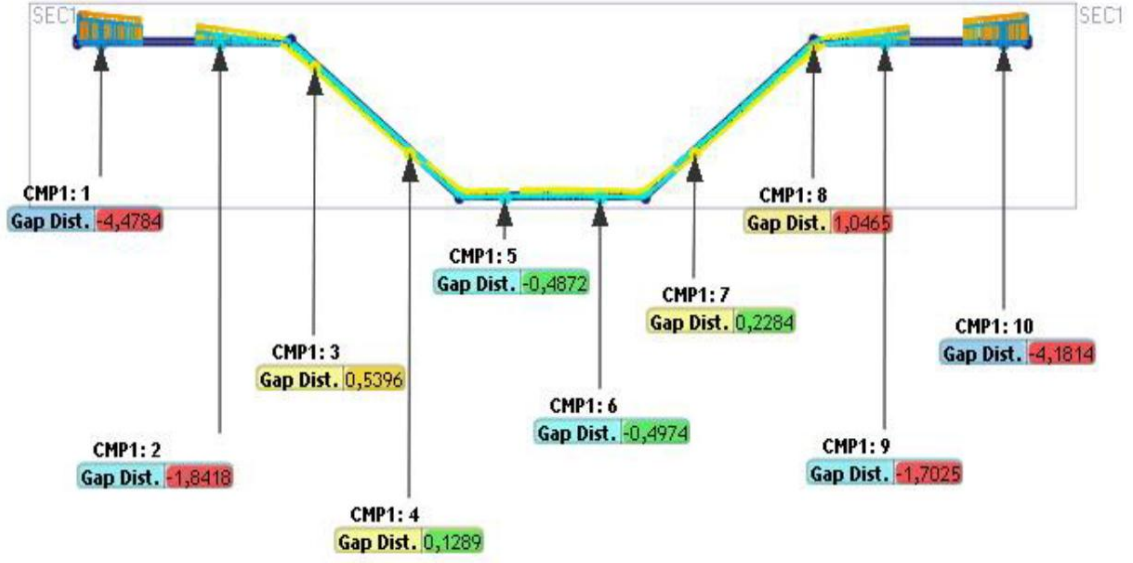
Şekil 5.22. Bor yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıtılmış işlem görmemiş malzeme ve 2. takım yolu parametrelerine sahip numunenin a) Eğik bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri b) Taban bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri



a.

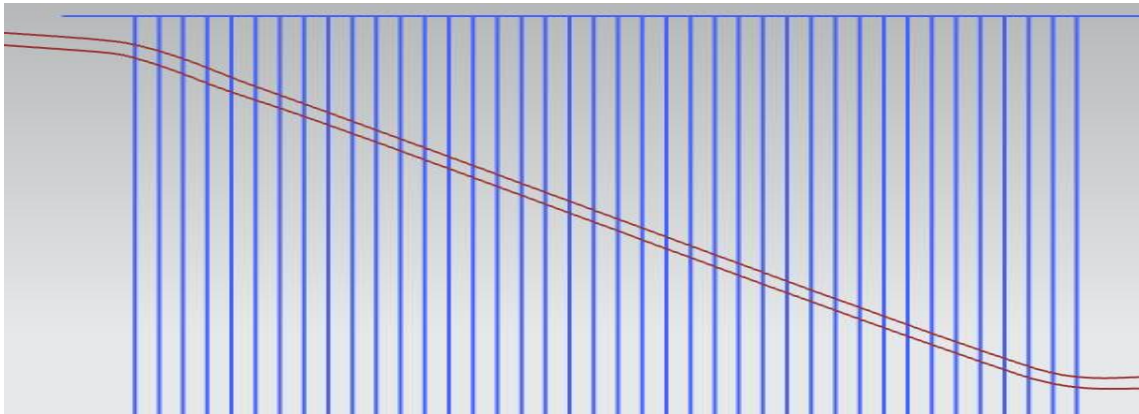
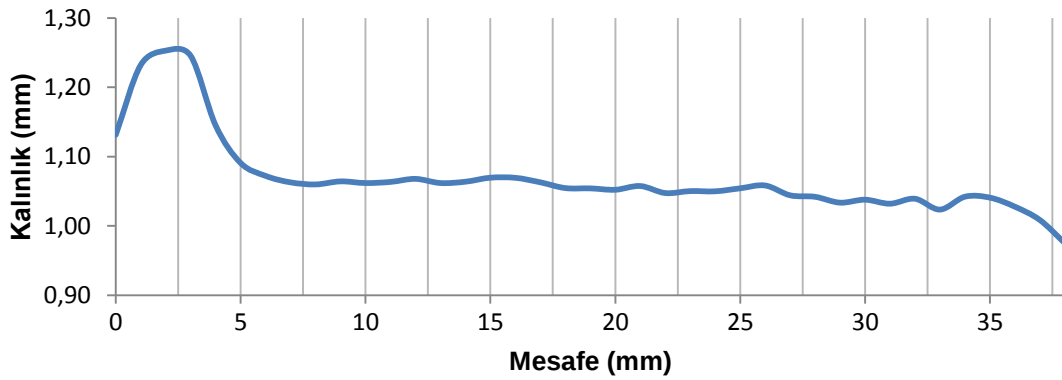


b.

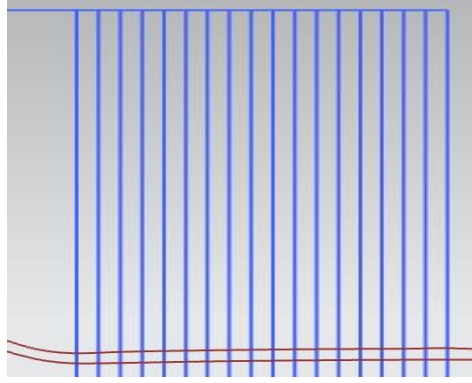
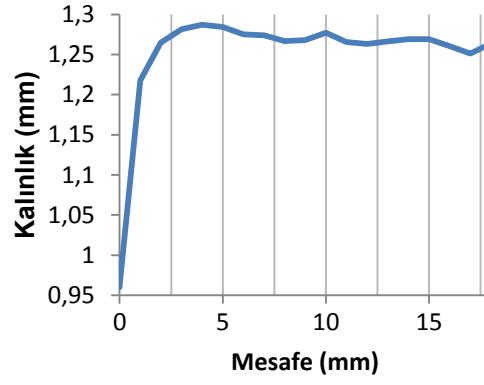


c.

Şekil 5.23. Sıvama yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıtılmış malzeme ve 2. takım yolu parametrelerinde işlem gören numunenin lazer tarama sonucu elde edilen a) Üstten, önden ve sağ yandan görüşleri b-c) Geometrik tamlık sonuçları

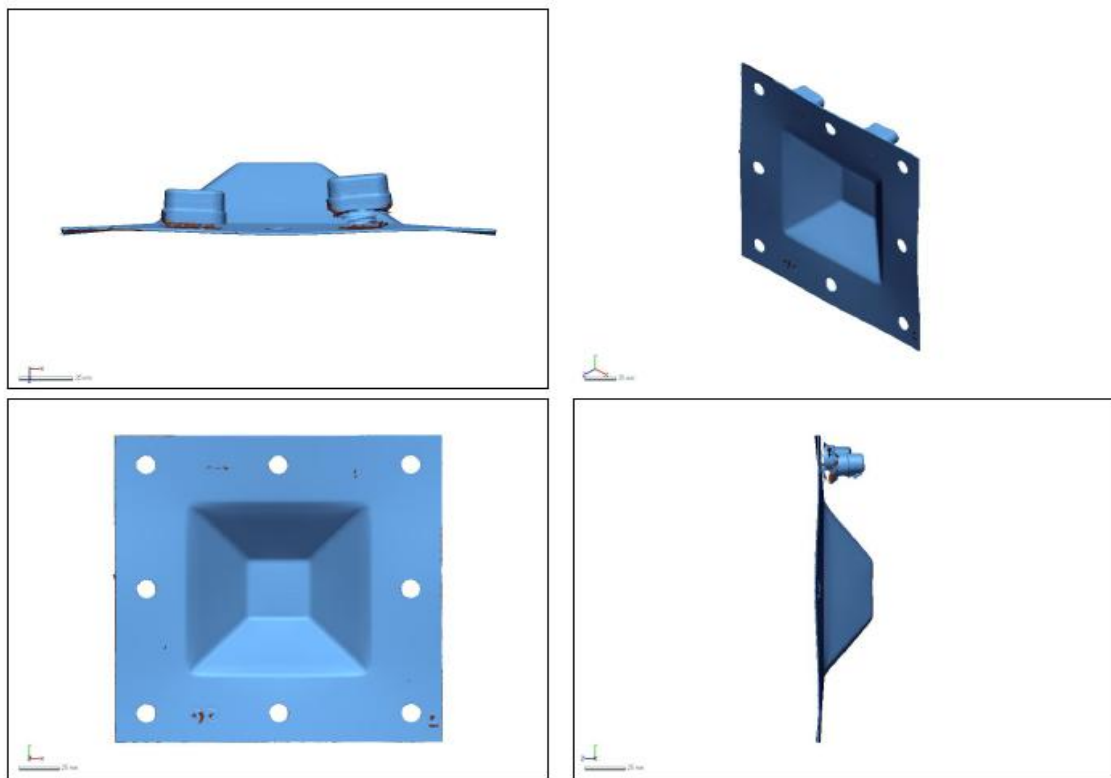


a.

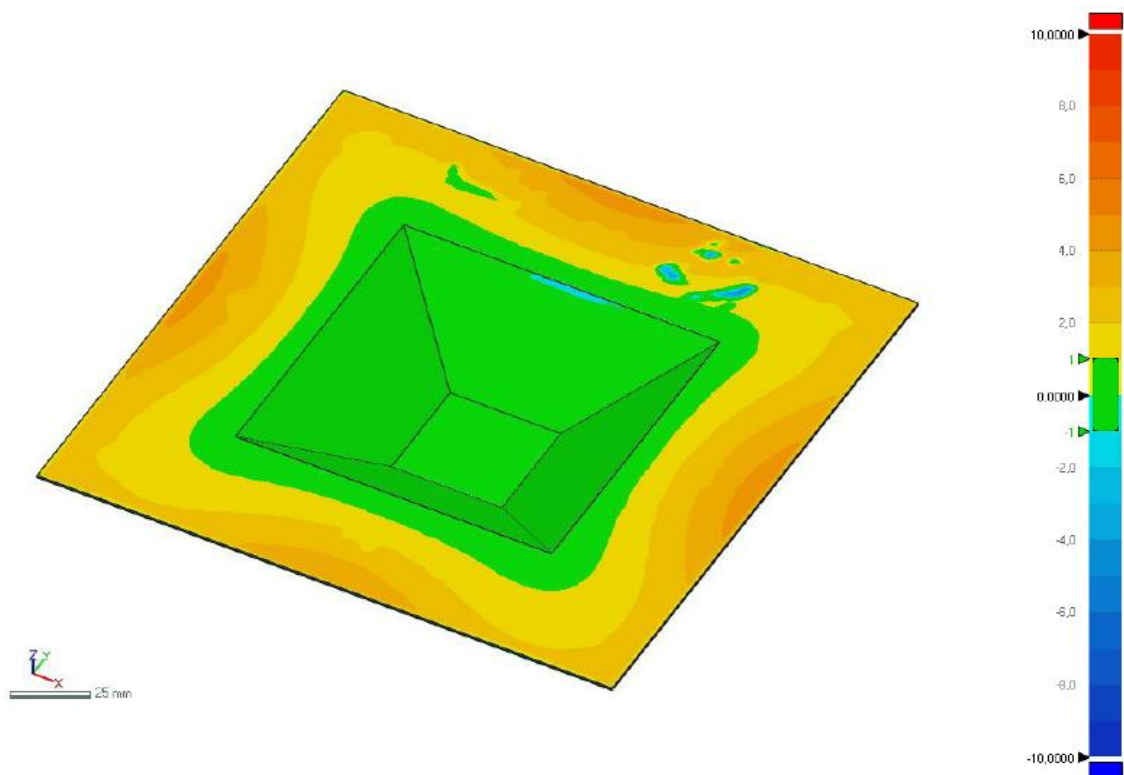


b.

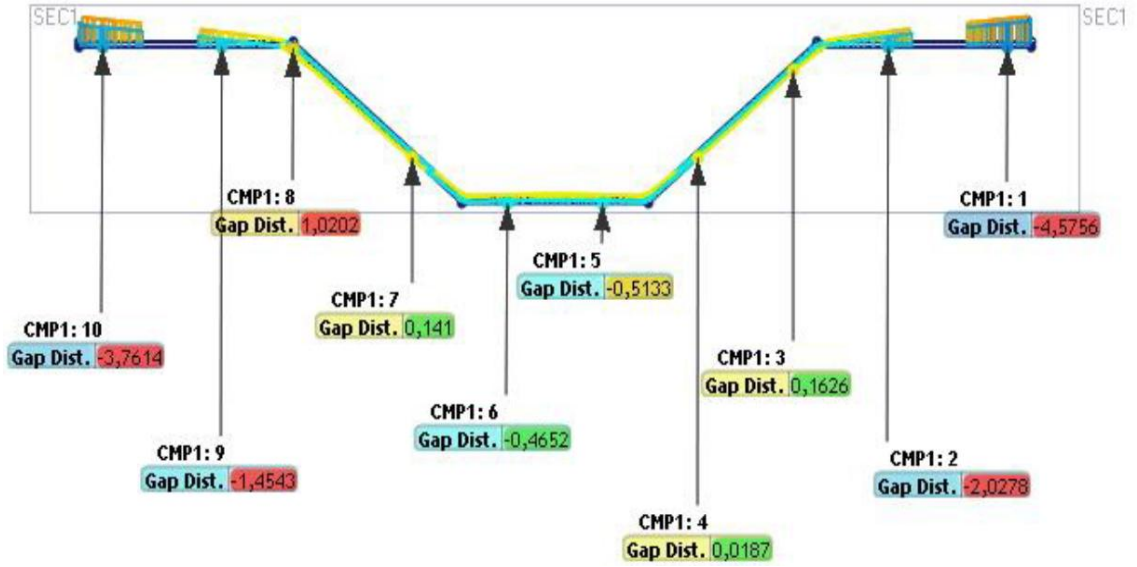
Şekil 5.24. Sıvama yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıtılmış malzeme ve 2. takım yolu parametrelerine sahip numunenin a) Eğik bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri  
b) Taban bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri



a.

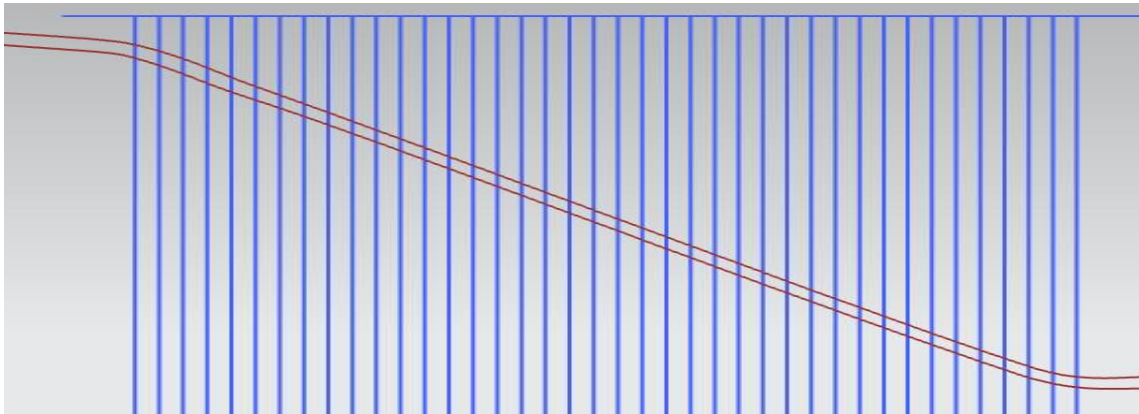
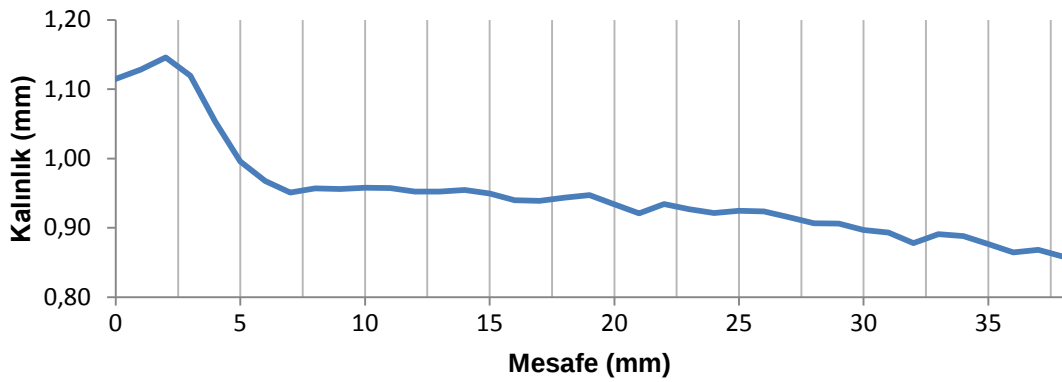


b.

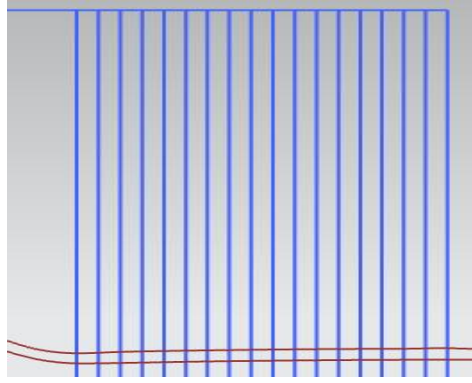
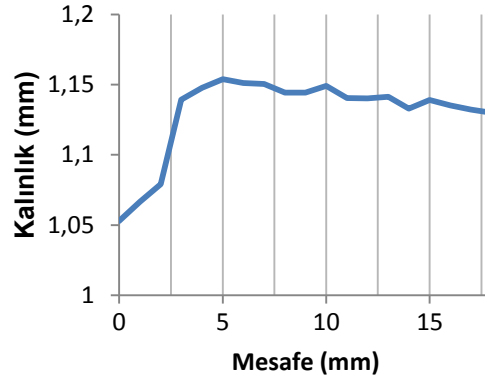


C.

Şekil 5.25. Bor yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıtılmış malzeme ve 2. takım yolu parametrelerinde işlem gören numunenin lazer tarama sonucu elde edilen a) Üstten, önden ve sağ yandan görüşleri b-c) Geometrik tamlik sonuçları

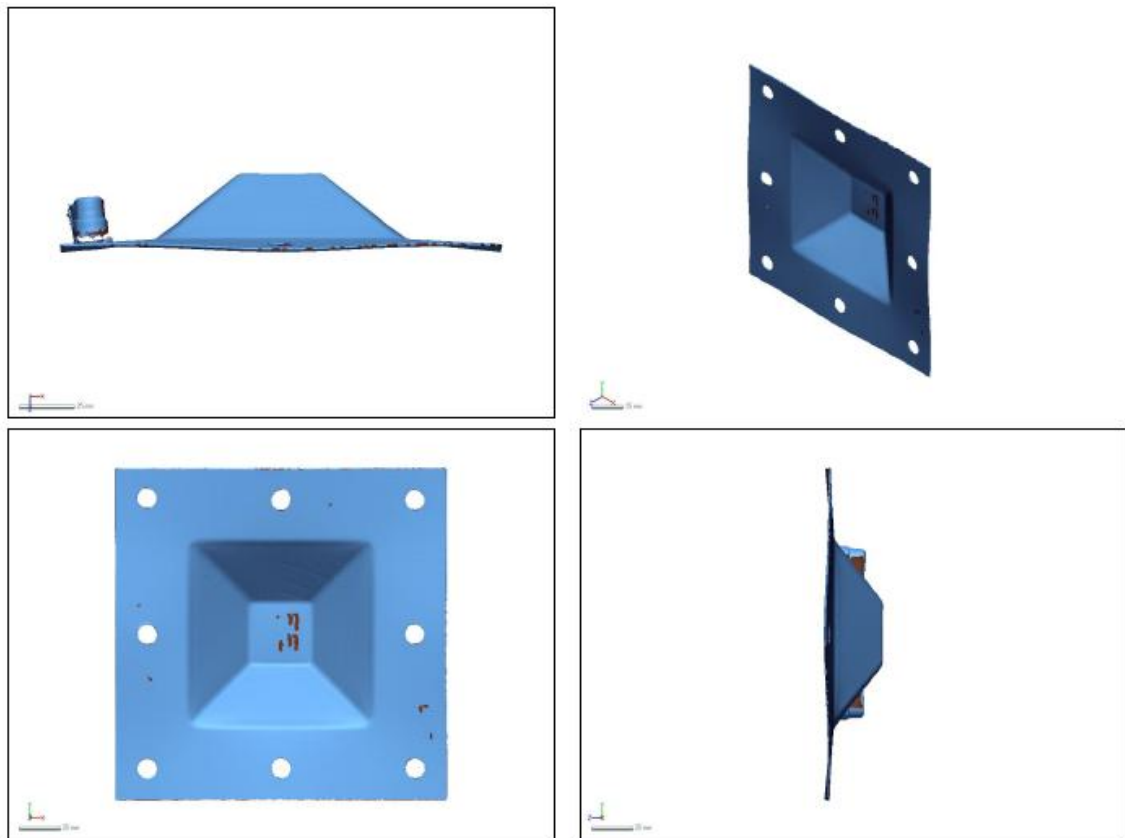


a.

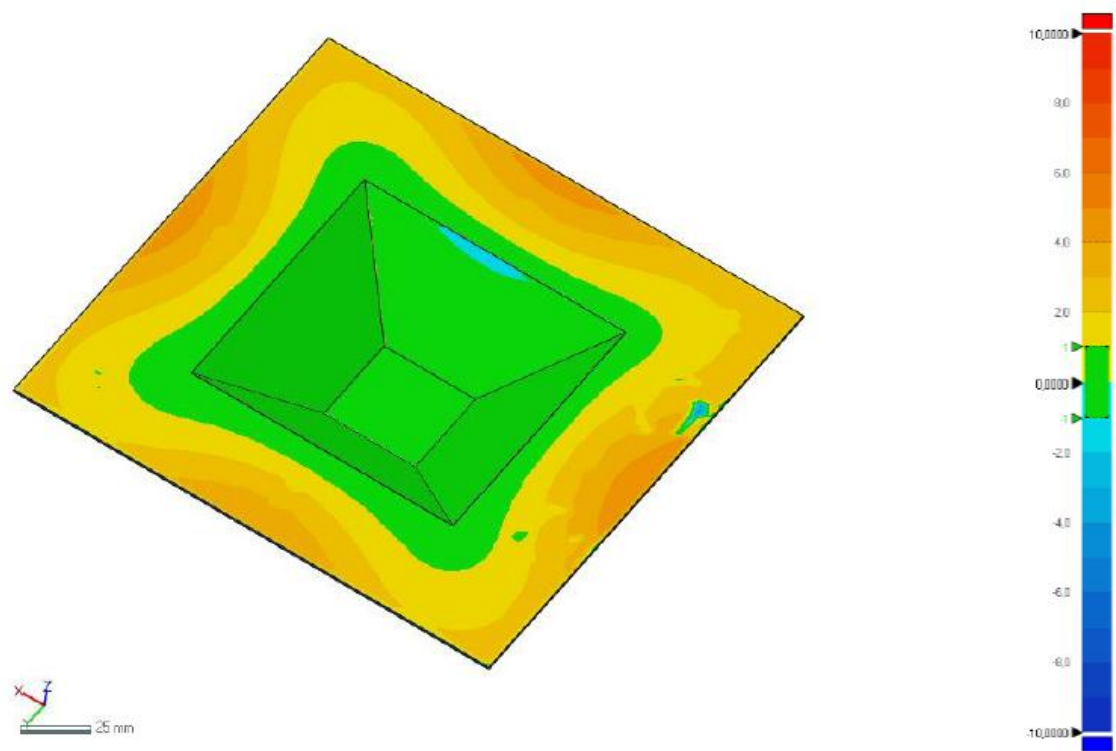


b.

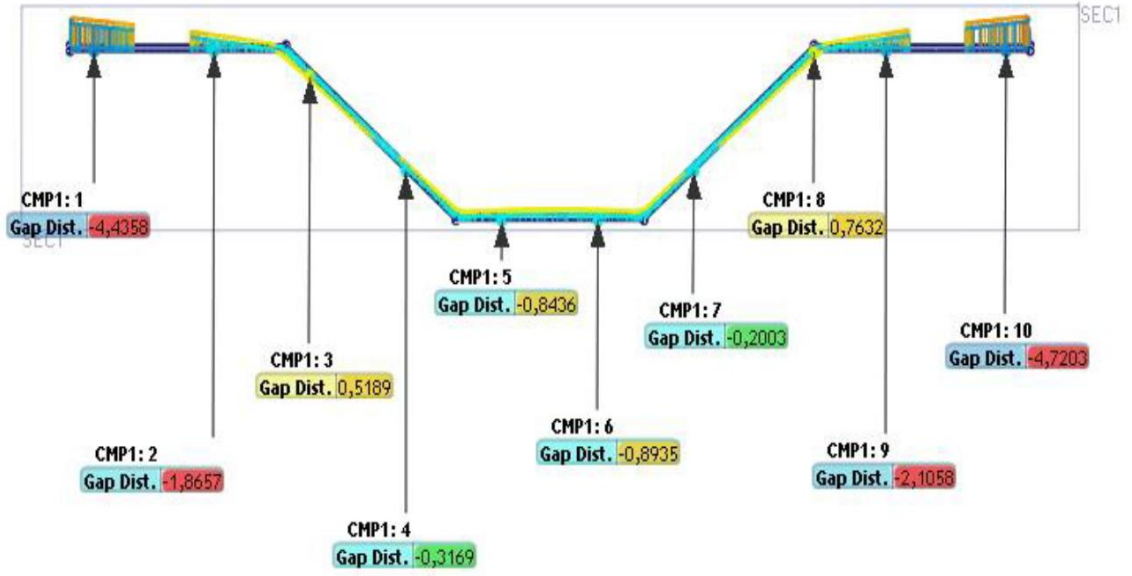
Şekil 5.26. Bor yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıtılmış malzeme ve 2. takım yolu parametrelerine sahip numunenin a) Eğik bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri  
b) Taban bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri



a.

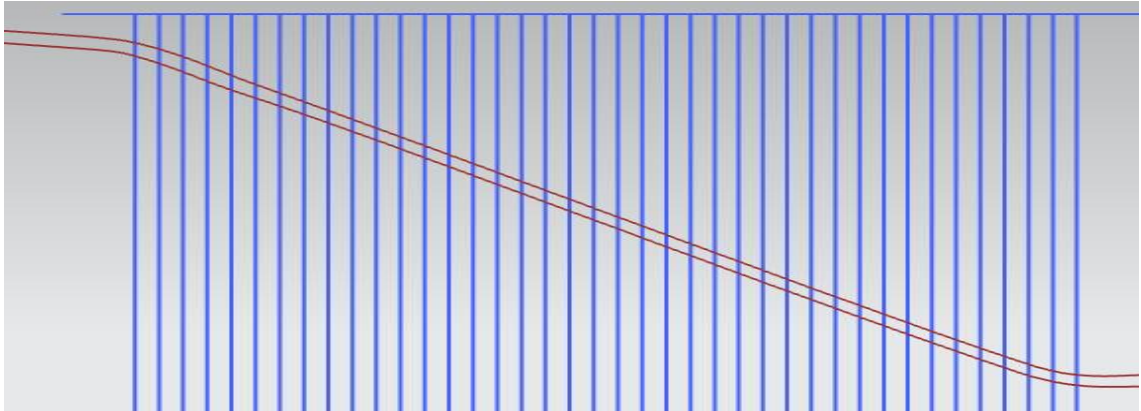
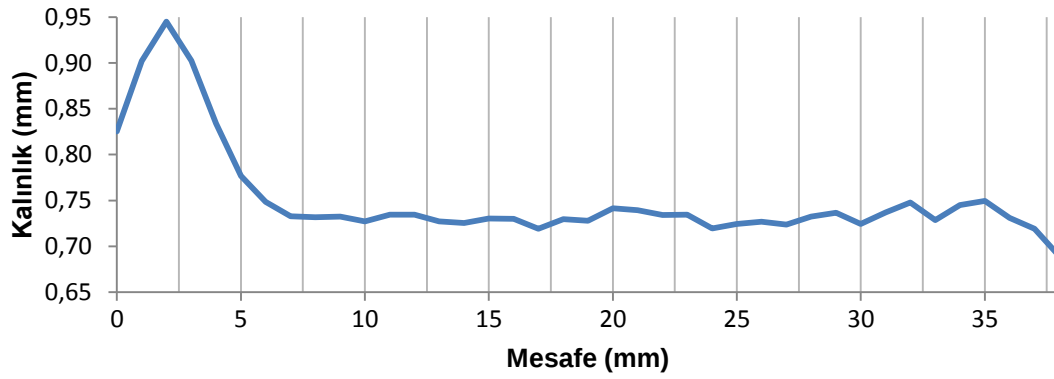


b.

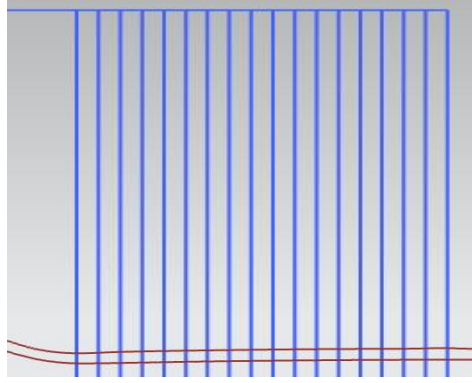
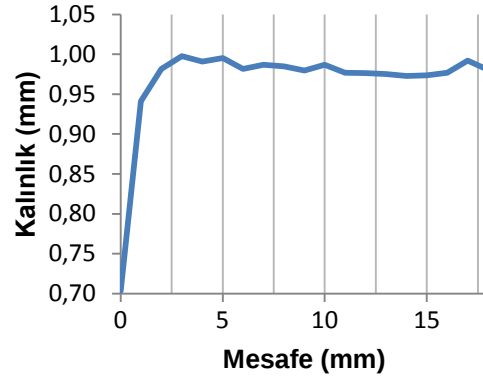


C.

Şekil 5.27. Sıvama yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıtılmış işlem görmemiş malzeme ve 3. takım yolu parametrelerinde işlem gören numunenin lazer tarama sonucu elde edilen a) Üstten, önden ve sağ yandan görüşleri b-c) Geometrik tamlık sonuçları

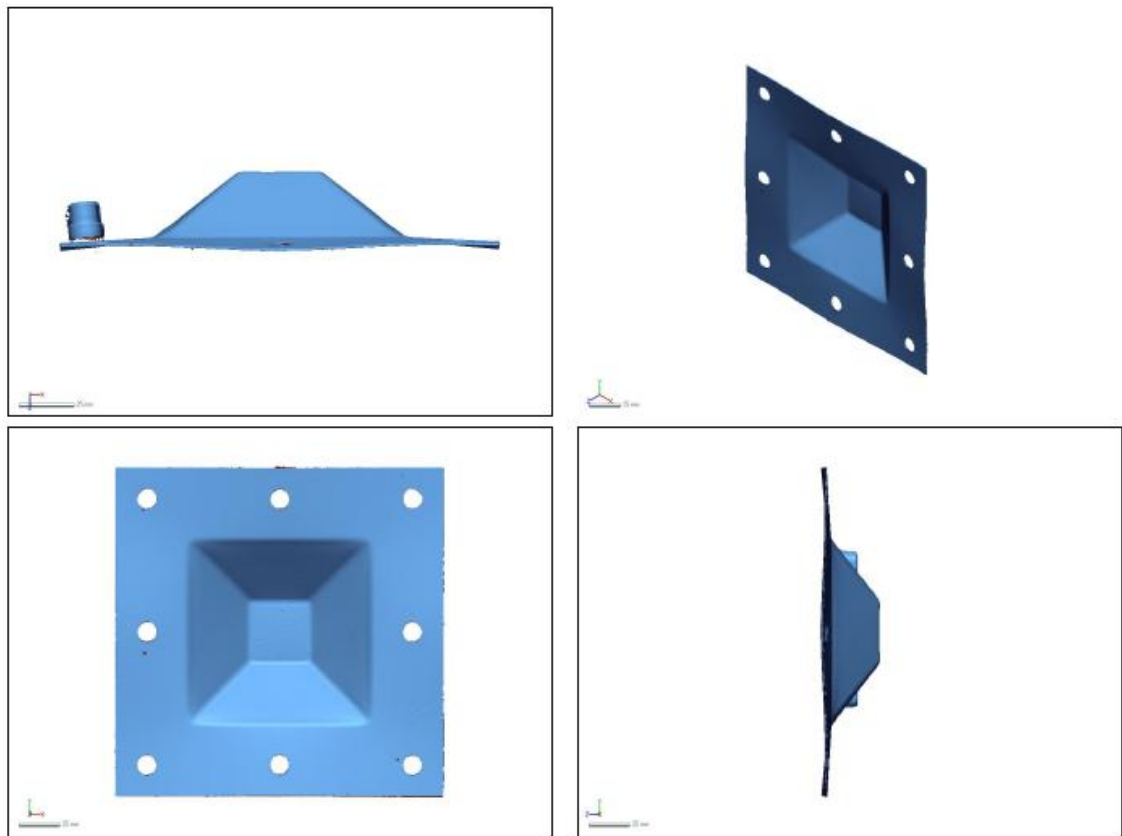


a.

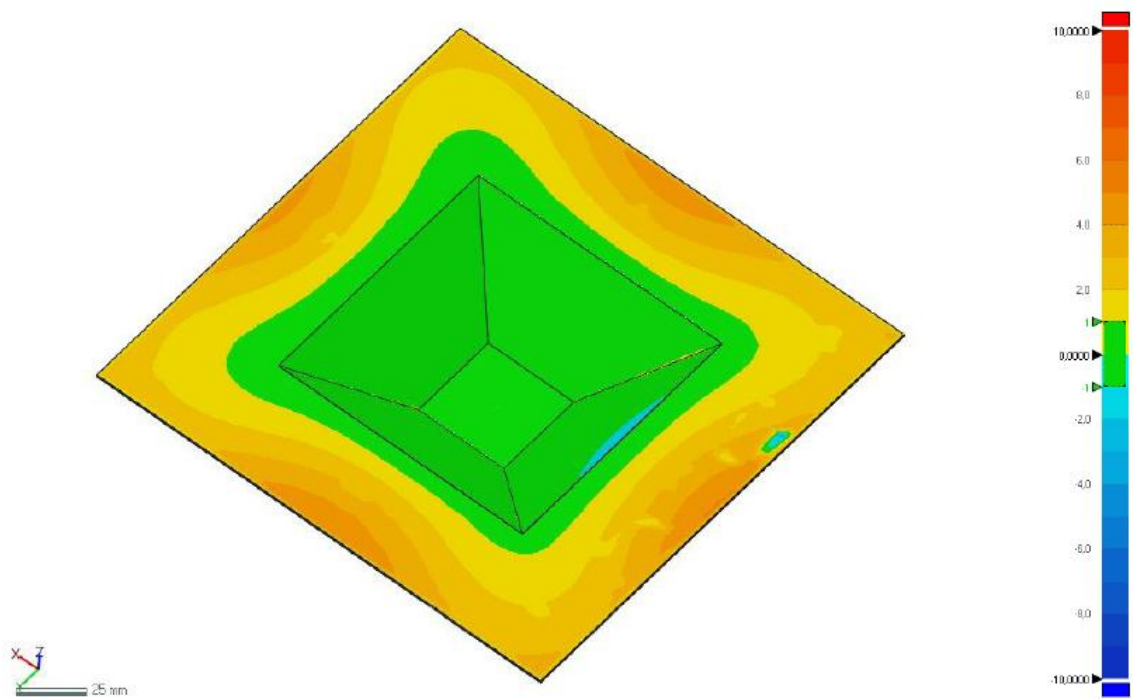


b.

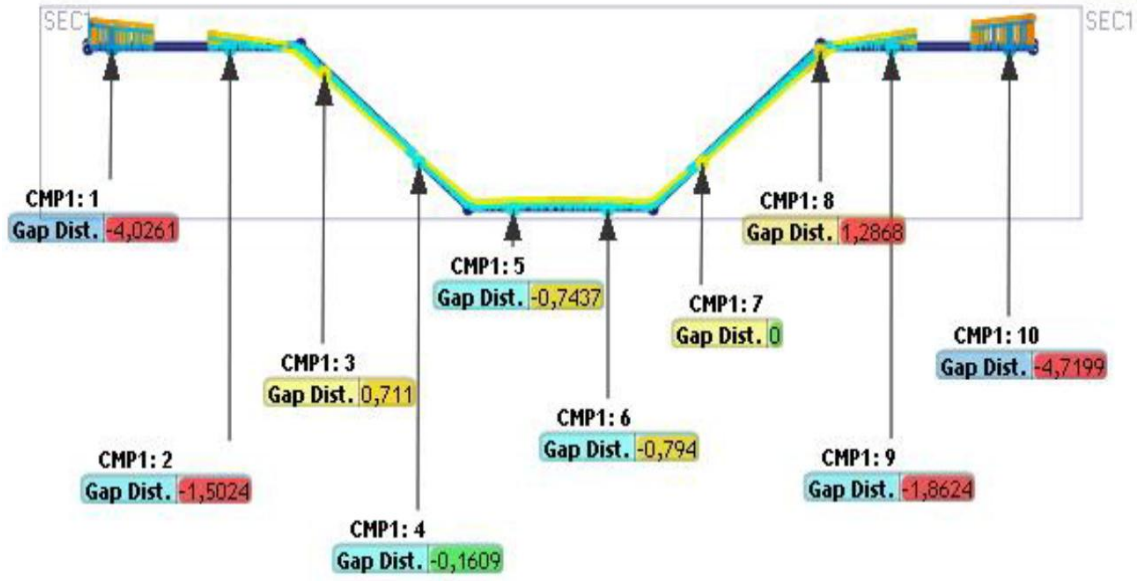
Şekil 5.28. Sıvama yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıtılmış malzeme ve 3. takım yolu parametrelerine sahip numunenin a) Eğik bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri  
b) Taban bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri



a.

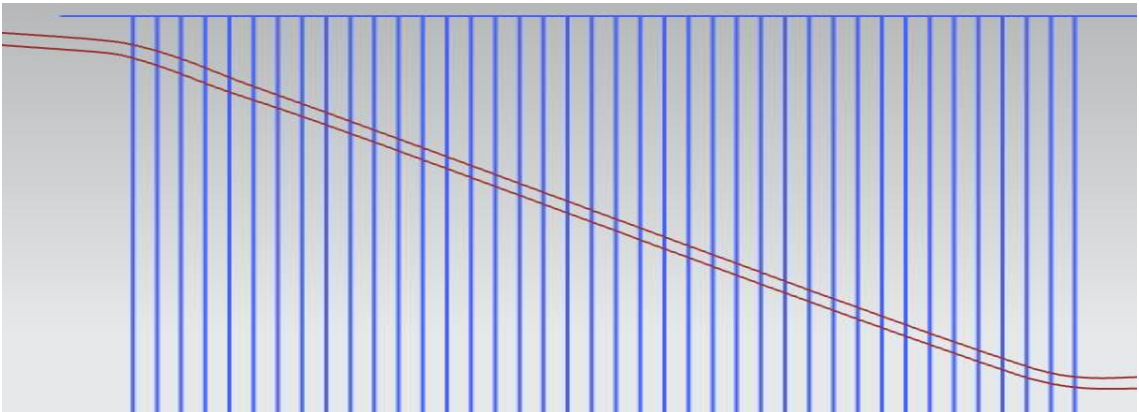
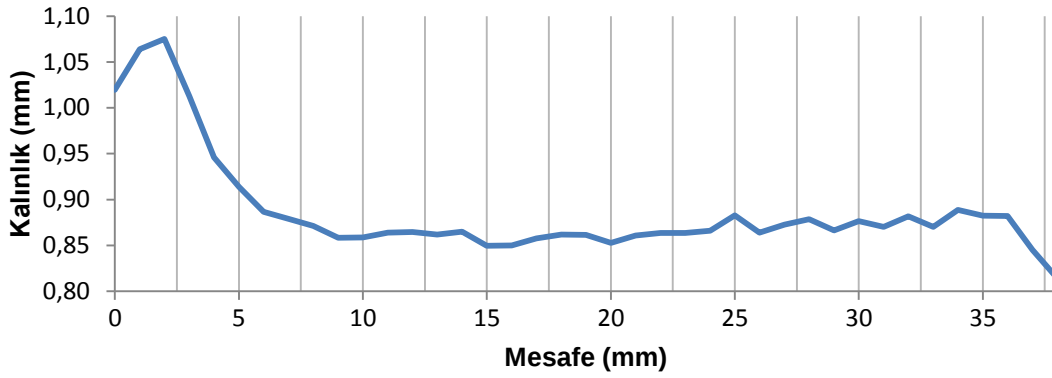


b.

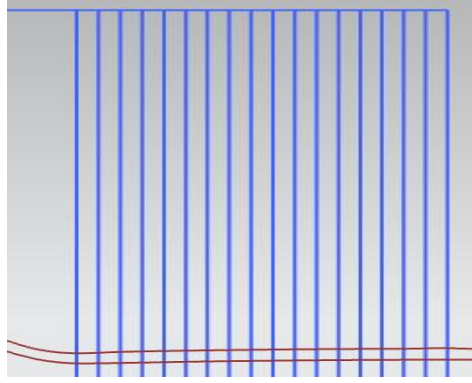
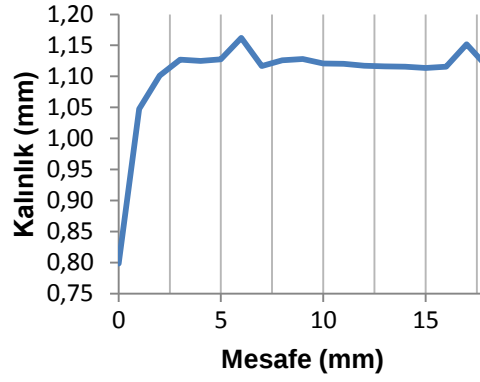


c.

Şekil 5.29. Bor yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıtılmış işlem görmemiş malzeme ve 3. takım yolu parametrelerinde işlem gören numunenin lazer tarama sonucu elde edilen a) Üstten, önden ve sağ yandan görüşleri b-c) Geometrik tamlik sonuçları

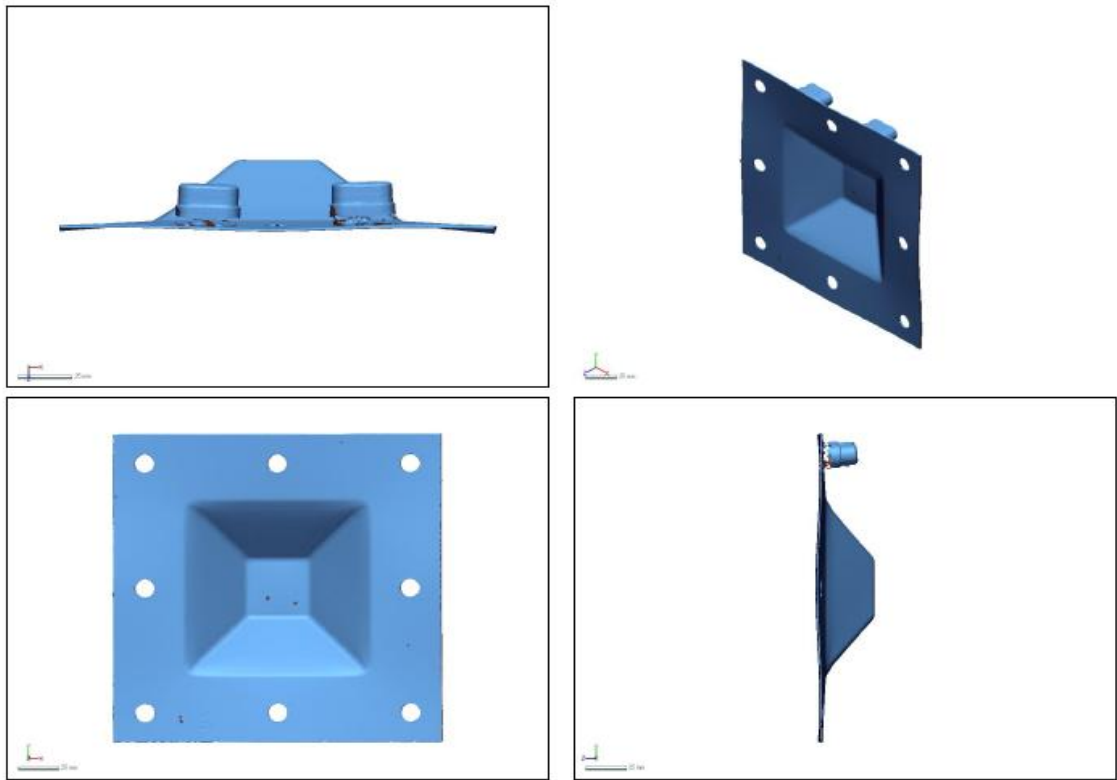


a.

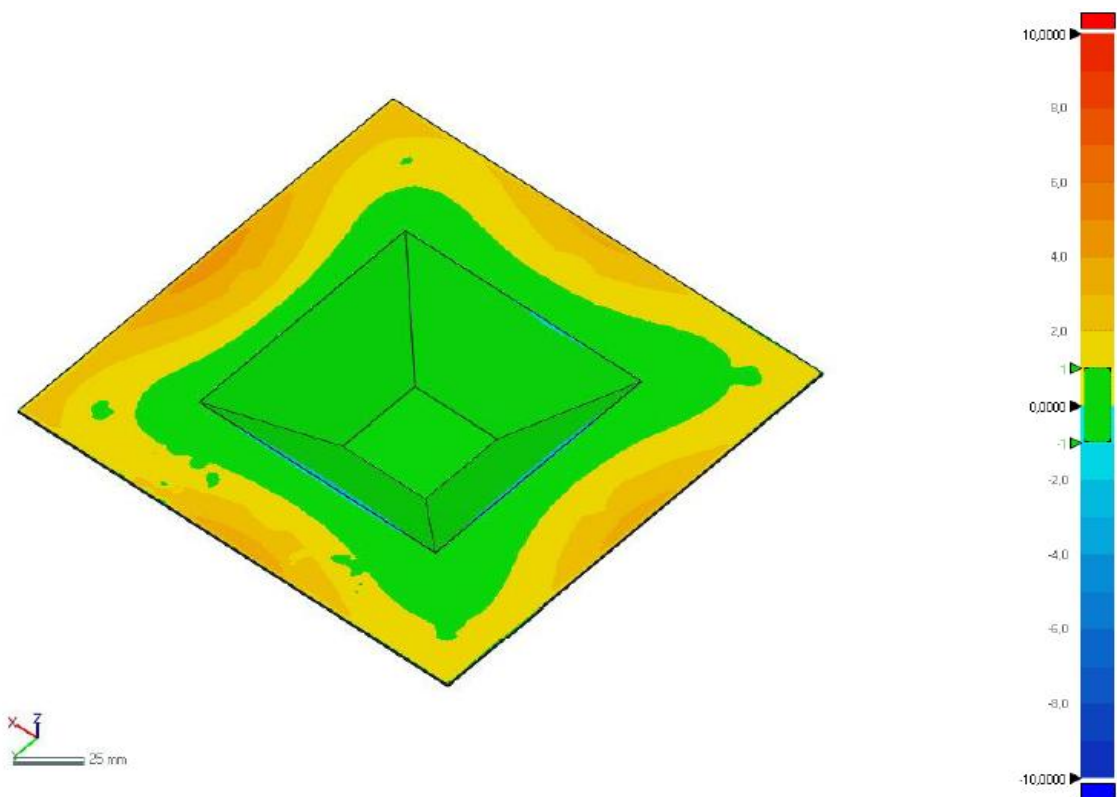


b.

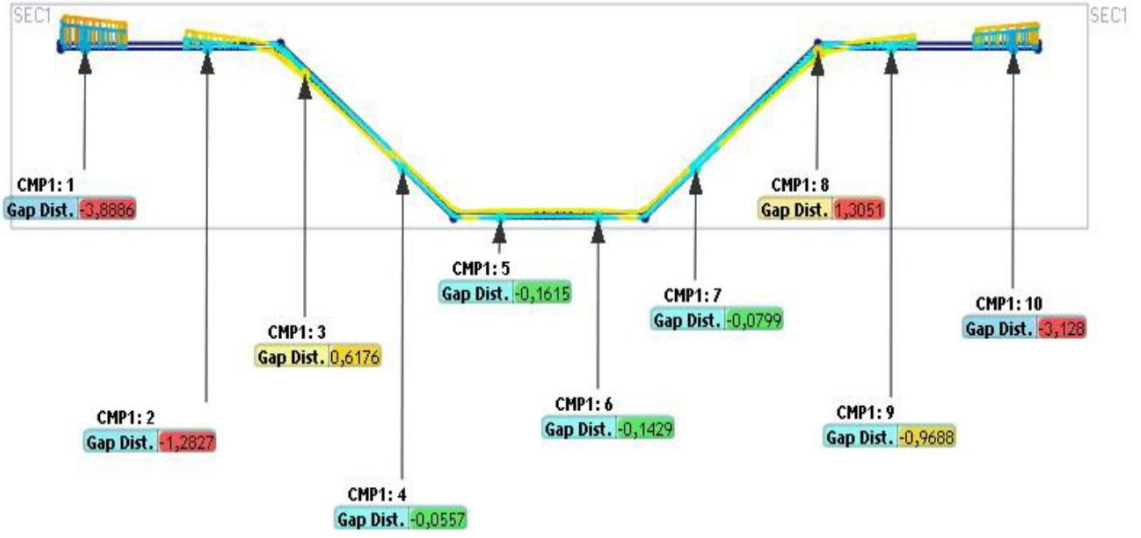
Şekil 5.30. Bor yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıtılmış işlem görmemiş malzeme ve 3. takım yolu parametrelerine sahip numunenin a) Eğik bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri  
b) Taban bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri



a.

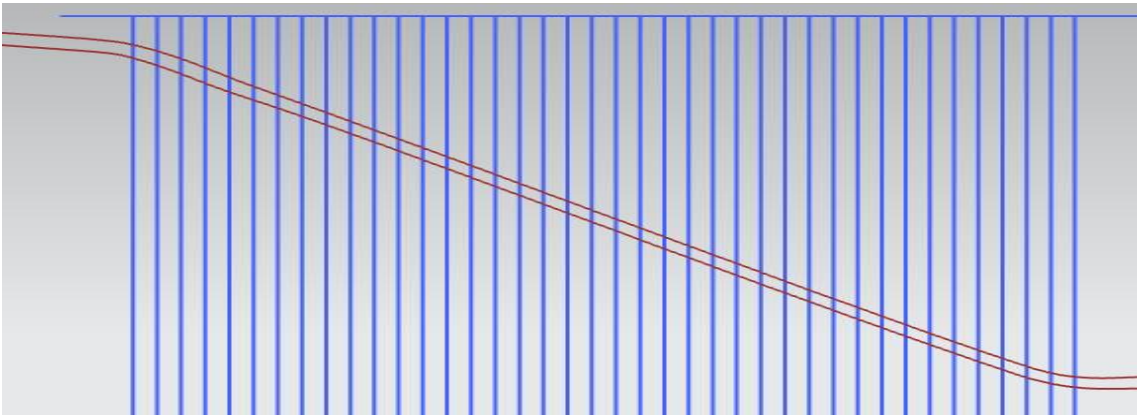
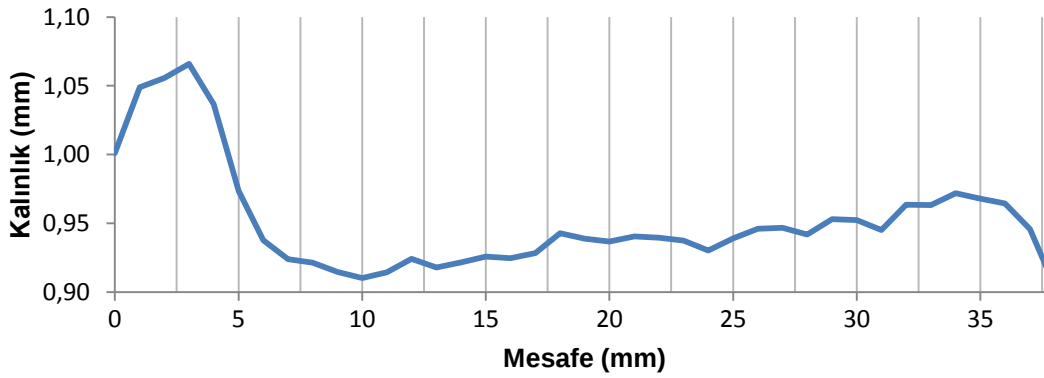


b.

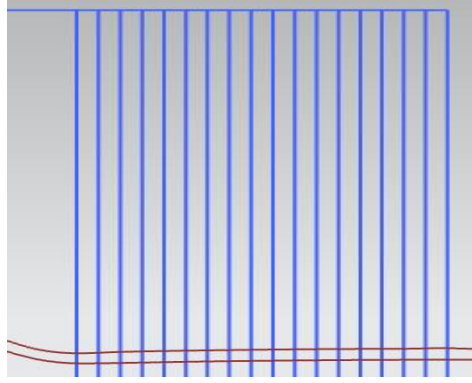
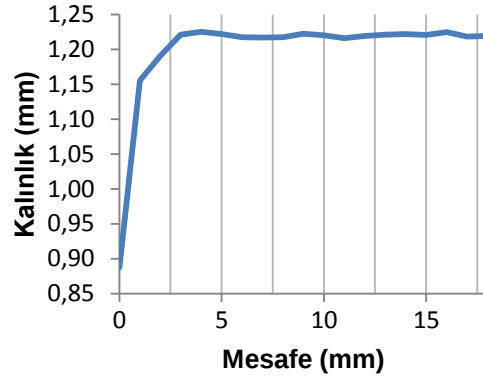


C.

Şekil 5.31. Sıvama yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıtılmış malzeme ve 2. takım yolu parametrelerinde işlem gören numunenin lazer tarama sonucu elde edilen a) Üstten, önden ve sağ yandan görüşleri b-c) Geometrik tamlik sonuçları

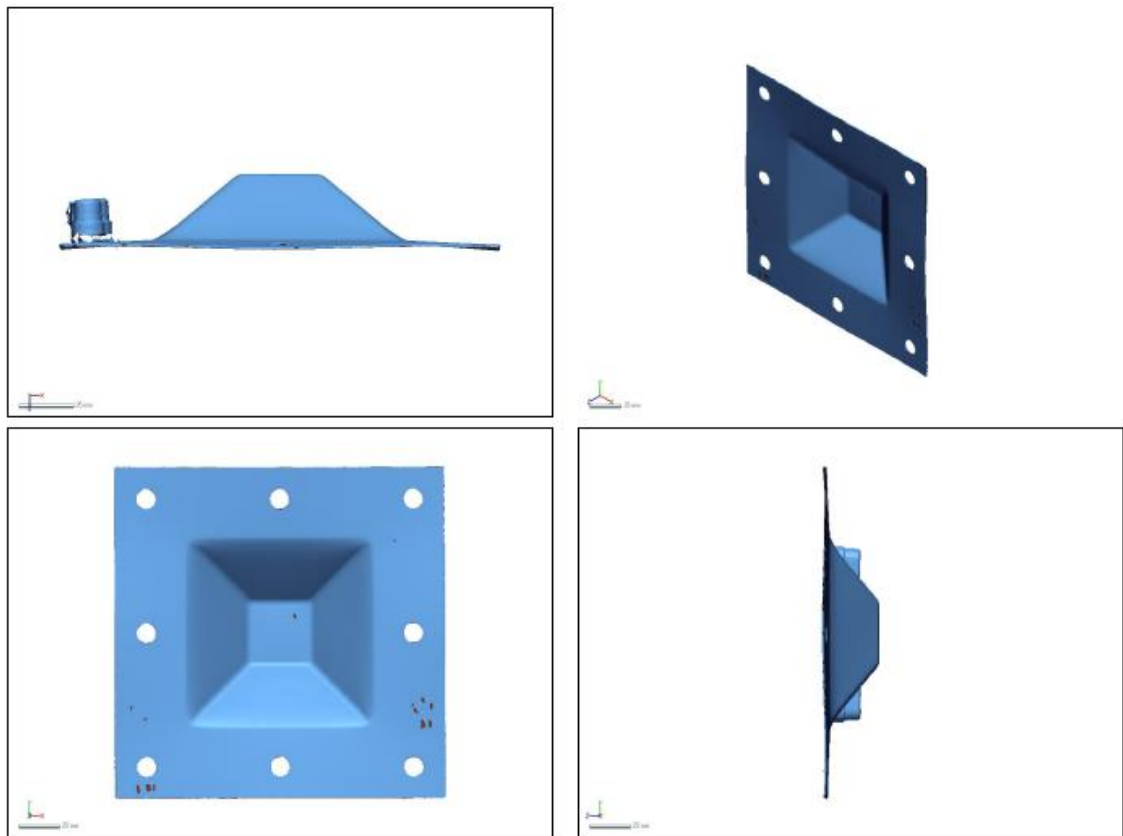


a.

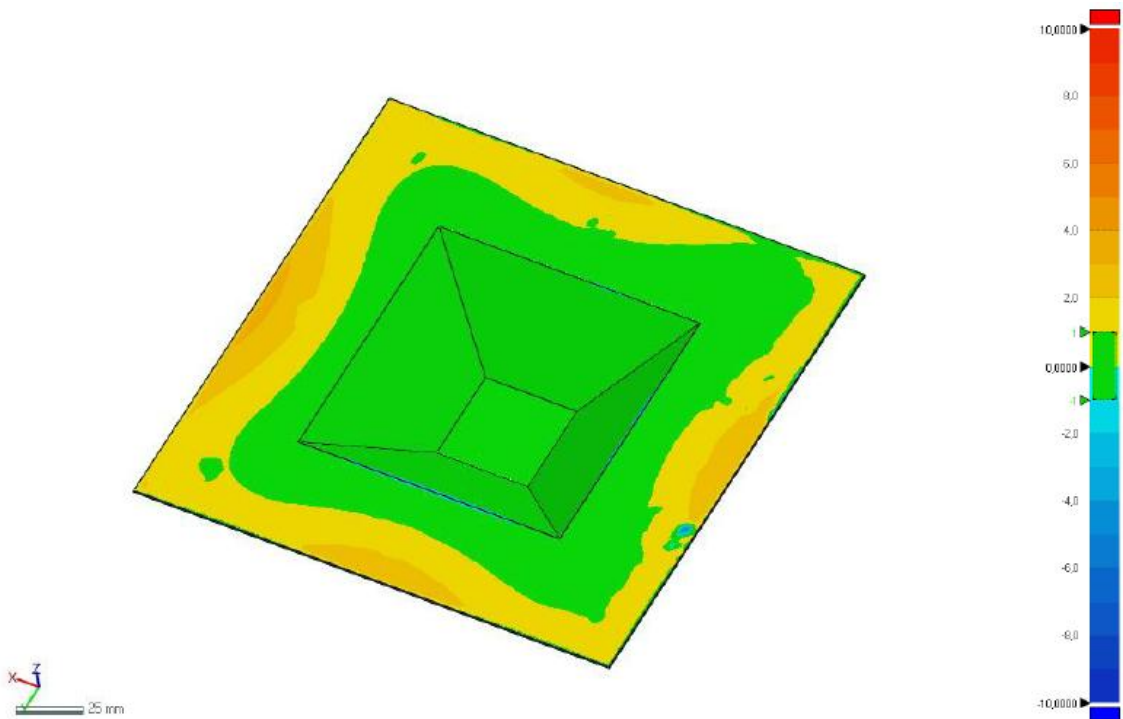


b.

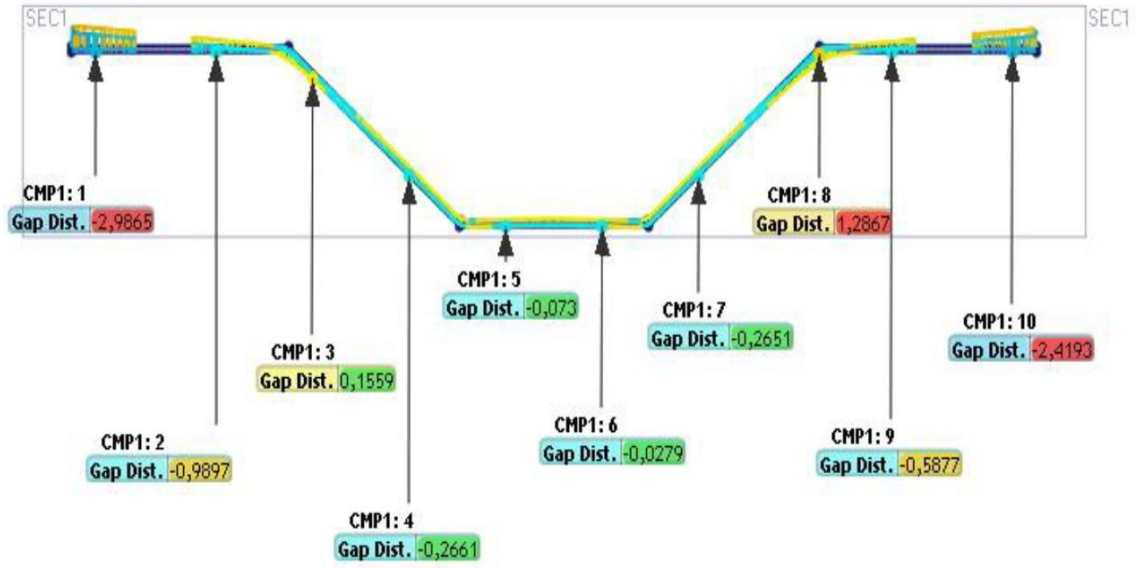
Şekil 5.32. Sıvama yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıtılmış malzeme ve 2. takım yolu parametrelerine sahip numunenin a) Eğik bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri  
b) Taban bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri



a.

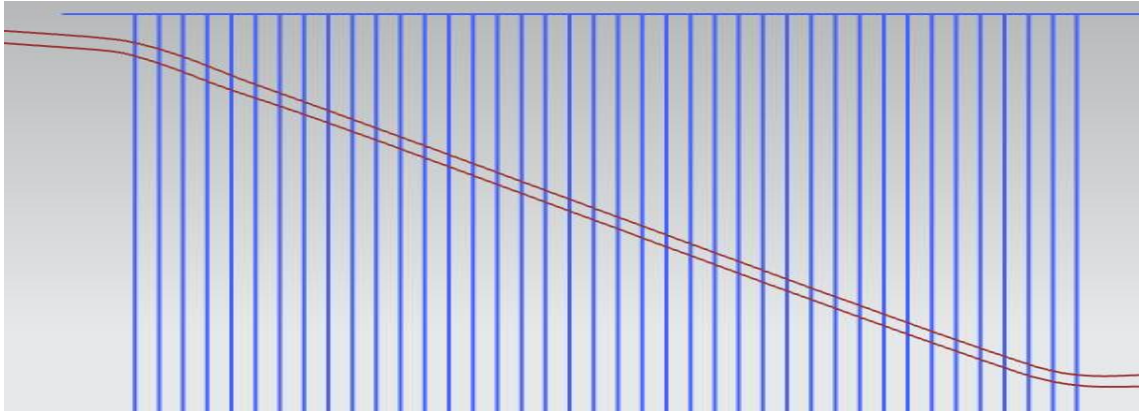
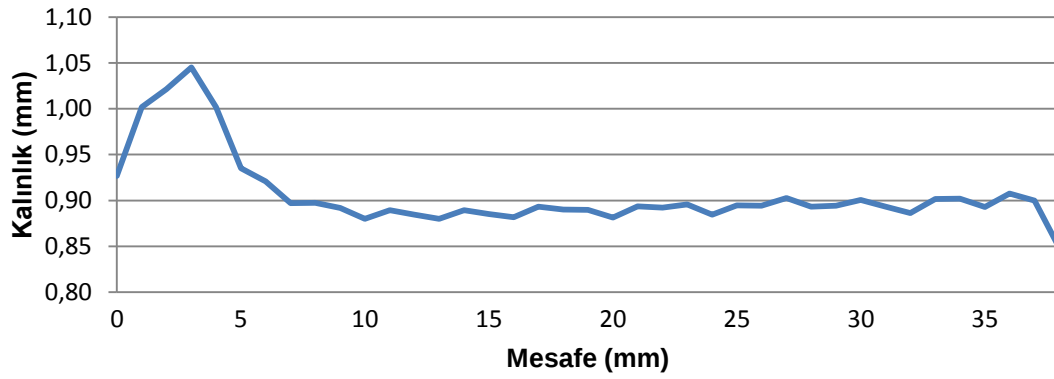


b.

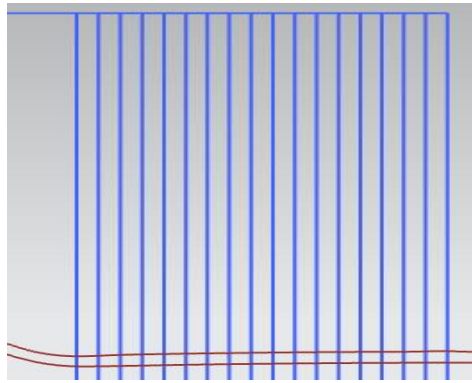
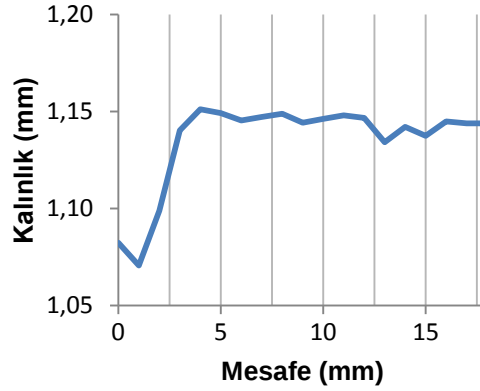


c.

Şekil 5.33. Bor yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıtılmış malzeme ve 2. takım yolu parametrelerinde işlem gören numunenin lazer tarama sonucu elde edilen a) Üstten, önden ve sağ yandan görüşleri b-c) Geometrik tamlık sonuçları



a.



b.

Şekil 5.34. Bor yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıtma işlemi görmüş malzeme ve 2. takım yolu parametrelerine sahip numunenin a) Eğik bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri b) Taban bölge kalınlık dağılım sonuçları ve numunedeki yerleri

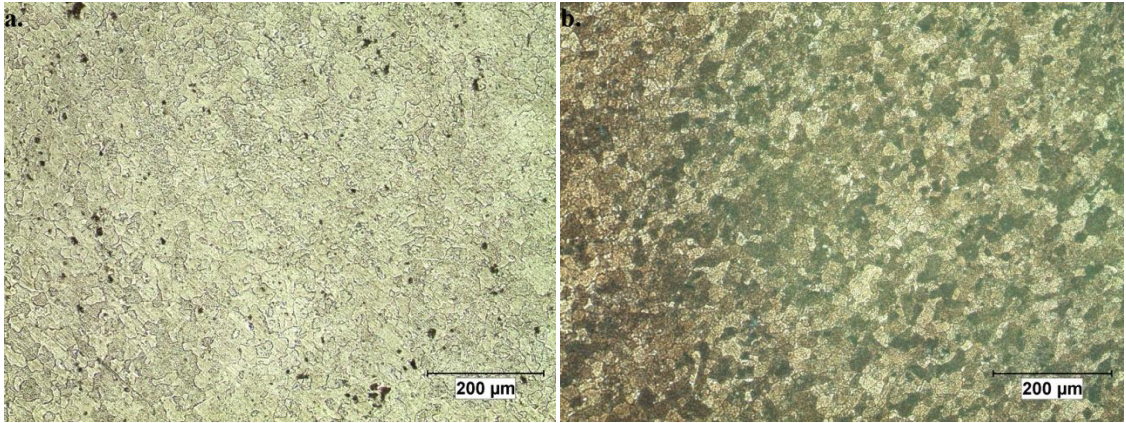
Çizelge 5.1. Deney sonuçlarına ait aritmetik ortalama ve standart sapma değerleri

| İşlem Sembolü | İşlem                                                                            | Bölge       | Aritmetik Ortalama | Standart Sapma |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------------|-------------|--------------------|----------------|
| <b>A</b>      | Sıvama yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmemiş malzeme ve 1. takım yolu | Eğik Bölge  | 0,8257             | 0,0603         |
|               |                                                                                  | Yatay Bölge | 1,0137             | 0,0768         |
| <b>B</b>      | Bor Yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmemiş malzeme ve 1. Takım yolu    | Eğik Bölge  | 0,8807             | 0,0794         |
|               |                                                                                  | Yatay Bölge | 1,0049             | 0,0667         |
| <b>C</b>      | Sıvama yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmüş malzeme ve 1. takım yolu   | Eğik Bölge  | 0,6914             | 0,0461         |
|               |                                                                                  | Yatay Bölge | 0,8609             | 0,0612         |
| <b>D</b>      | Bor yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmüş malzeme ve 1. takım yolu      | Eğik Bölge  | 0,8360             | 0,0464         |
|               |                                                                                  | Yatay Bölge | 1,0238             | 0,0371         |
| <b>E</b>      | Sıvama yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmemiş malzeme ve 1. takım yolu | Eğik Bölge  | 0,7752             | 0,0708         |
|               |                                                                                  | Yatay Bölge | 0,8957             | 0,1095         |
| <b>F</b>      | Bor yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmemiş malzeme ve 1. takım yolu    | Eğik Bölge  | 0,9949             | 0,0817         |
|               |                                                                                  | Yatay Bölge | 1,1878             | 0,0785         |
| <b>G</b>      | Sıvama yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmüş malzeme ve 1. takım yolu   | Eğik Bölge  | 0,9574             | 0,0516         |
|               |                                                                                  | Yatay Bölge | 1,1453             | 0,0715         |
| <b>H</b>      | Bor yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmüş malzeme ve 1. takım yolu      | Eğik Bölge  | 1,0543             | 0,0566         |
|               |                                                                                  | Yatay Bölge | 1,0440             | 0,0731         |
| <b>I</b>      | Sıvama yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmemiş malzeme ve 2. takım yolu | Eğik Bölge  | 0,9696             | 0,0794         |
|               |                                                                                  | Yatay Bölge | 1,1414             | 0,0243         |
| <b>J</b>      | Bor yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmemiş malzeme ve 2. takım yolu    | Eğik Bölge  | 1,1828             | 0,0698         |
|               |                                                                                  | Yatay Bölge | 1,4143             | 0,0809         |
| <b>K</b>      | Sıvama yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmüş malzeme ve 2. takım yolu   | Eğik Bölge  | 1,0693             | 0,0580         |
|               |                                                                                  | Yatay Bölge | 1,2507             | 0,0719         |

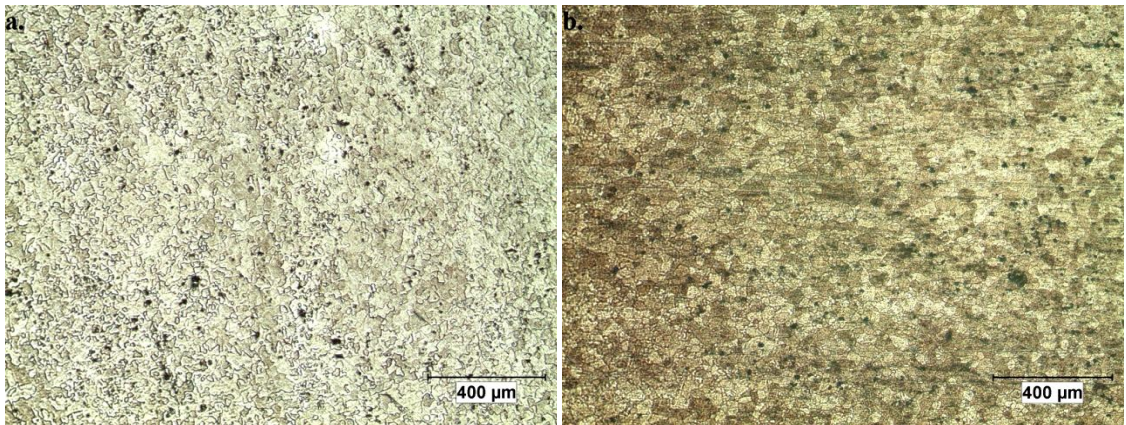
| <b>İşlem Sembolü</b> | <b>İşlem</b>                                                                     | <b>Bölge</b> | <b>Aritmetik Ortalama</b> | <b>Standart Sapma</b> |
|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------|---------------------------|-----------------------|
| <b>L</b>             | Bor yağı, 0,2 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmüş malzeme ve 2. takım yolu      | Eğik Bölge   | 0,9489                    | 0,0715                |
|                      |                                                                                  | Yatay Bölge  | 1,1299                    | 0,0294                |
| <b>M</b>             | Sıvama yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmemiş malzeme ve 3. takım yolu | Eğik Bölge   | 0,7513                    | 0,0546                |
|                      |                                                                                  | Yatay Bölge  | 0,9659                    | 0,0646                |
| <b>N</b>             | Bor yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmemiş malzeme ve 3. takım yolu    | Eğik Bölge   | 0,8872                    | 0,0574                |
|                      |                                                                                  | Yatay Bölge  | 1,1023                    | 0,0768                |
| <b>O</b>             | Sıvama yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmüş malzeme ve 2. takım yolu   | Eğik Bölge   | 0,9517                    | 0,0396                |
|                      |                                                                                  | Yatay Bölge  | 1,1975                    | 0,0768                |
| <b>P</b>             | Bor yağı, 0,5 mm dikey ilerleme, ısıt işlem görmüş malzeme ve 2. takım yolu      | Eğik Bölge   | 0,9067                    | 0,0407                |
|                      |                                                                                  | Yatay Bölge  | 1,1349                    | 0,0235                |

## 5.2. Metalografik İnceleme

Numunelere yapılan ısıtıl işlemin etkisini görebilmek için metalografik inceleme yapılarak içyapıları incelenmiştir. Bu işlemde dağlayıcı olarak farklı karışımlar hazırlanmıştır. Bunların başında alüminyum ve alüminyum alaşımları için kullanılan tanınmış bir reaktif olan Keller reaktifi gelmektedir. İçerisinde; 2,5 ml  $\text{HNO}_3$ , 1,5 ml  $\text{HCl}$ , 1,0 ml  $\text{HF}$  ve 95 ml saf su bulunmaktadır. Dağlama işlemi 10-20 saniye arasında değişik sürelerde daldırılarak yapılmıştır. Isıl işlem görmemiş numunelerin içyapısını görebilmek için ılık suda yıkandıktan sonra konsantre  $\text{HNO}_3$  içinde de bir miktar dağlanmıştır ve ancak yeterli sonuç alınamamıştır. Alternatif olarak 15,5 ml  $\text{HNO}_3$ , 0,5 ml  $\text{HF}$ , 3 gr  $\text{CrO}_3$  ve 84 ml saf su karışımı denenmiş ve içyapılar başarılı bir şekilde görülmüştür. Yapılan incelemeler sonucu elde edilen içyapı görüntüleri Şekil 5.35-Şekil 5.36 'da verilmiştir.



Şekil 5.35. a) Isıl işlem görmüş b) Isıl işlem görmemiş numunenin içyapısı



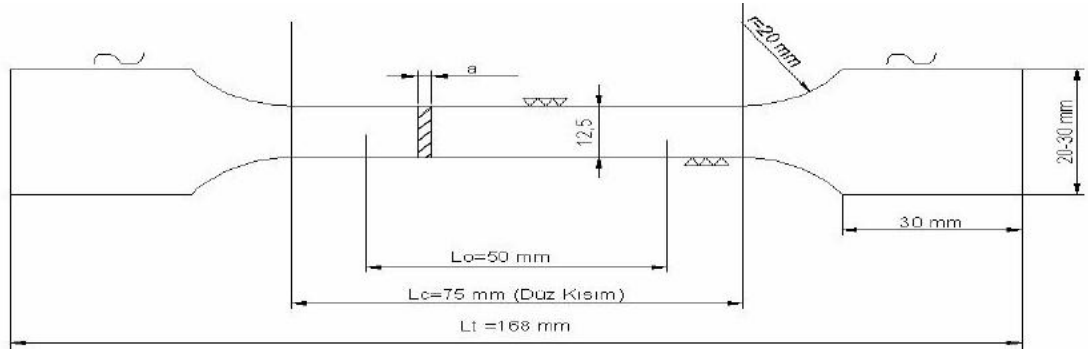
Şekil 5.36. a) Isıl işlem görmüş b) Isıl işlem görmemiş numunenin içyapısı

İçyapı incelemelerinde ısıtıl işleme bağlı olarak tane boyutundaki artış görülmüş ve şekil değiştirme miktarında artışlar elde edilmiştir.

### 5.3. Çekme Deneyi

Çekme deneyleri Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesinde bulunan Shimadzu Autograph (Yük kapasitesi: maksimum 100 kN= 100 ton, Hız aralığı: 0.001 to 800 mm/dk) marka çekme cihazıyla, 1 mm/dk hızla oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.

Çekme dayanımı deneyine tabi tutulan kalınlığı 0,1 ile 3 mm arasında değişen numunelerin şekil ve boyutları Şekil 5.37. 'de verilmiştir. Numuneler iki kısımdan ibarettir. Numunenin baş kısımları; yük tatbik edilmek için tutulan kısımlardır ve diğer bölgeye göre daha büyük boyutludur. Numunenin orta kısmı; yük tatbik edildiğinde deformasyonun yer alması arzu edilen daha küçük boyutlu bölgedir. Deney sonuçları bu kısımda yapılan ölçmelerle tespit edilir. Numunenin bu kısmında, kesit ile uzunluk arasında belli bir ilişki vardır.



Şekil 5.37. Çekme numunesinin boyutları

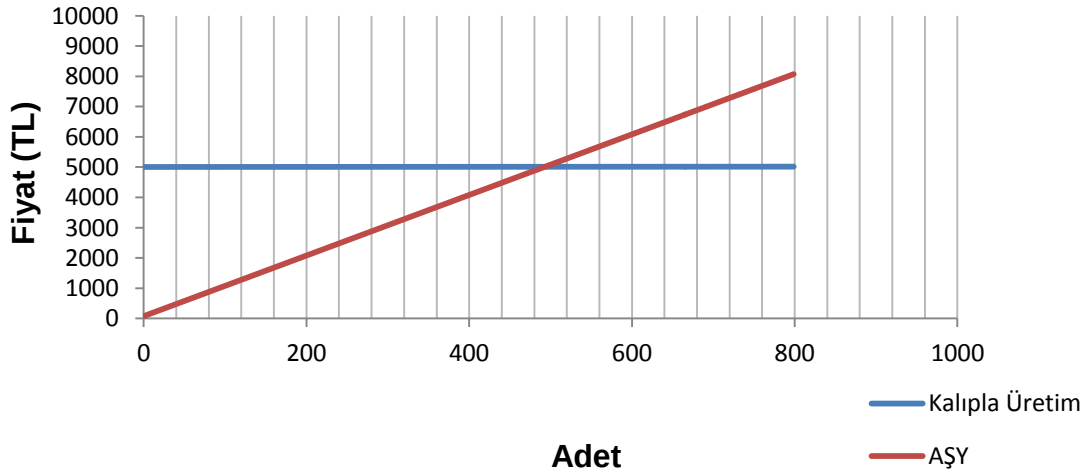
Çizelge 5.2. Çekme Dayanımı Deney Sonuçları

| Isıl İşlem Görmemiş Numuneler |                      | Isıl İşlem Görmüş Numuneler |                      |
|-------------------------------|----------------------|-----------------------------|----------------------|
| Numune No                     | Çekme Dayanımı (MPa) | Numune No                   | Çekme Dayanımı (MPa) |
| 1                             | 431,50               | 1                           | 279,00               |
| 2                             | 398,00               | 2                           | 332,25               |
| 3                             | 411,75               | 3                           | 297,25               |
| 4                             | 424,00               | 4                           | 389,25               |
| 5                             | 425,00               | 5                           | 269,25               |
| 6                             | 444,75               | 6                           | 272,25               |
| 7                             | 414,75               | 7                           | 285,75               |
| 8                             | 435,75               | 8                           | 302,25               |
| 9                             | 419,25               | 9                           | 312,75               |
| Ortalama                      | <b>422,75</b>        | Ortalama                    | <b>304,44</b>        |

## 6. MALİYET ANALİZİ

Maliyet analizi açısından klasik yöntem ve AŞY karşılaştırılması yapıldığında, yöntemin avantajı daha belirgin olacaktır. Bu yöntem; özel sipariş, özel ürün vb. üretimlerde genellikle tercih edilebilmektedir.

Örneğin; basit bir geometriye sahip olan deney numuneleri için Manisa Muradiye orta ölçekli sanayi bölgesinde yapılan fiyat araştırması sonucu ortalama 5000 TL kalıp maliyeti teklif edilmiştir. Aynı geometri, artışı şekillendirme yöntemiyle ortalama 20 dakikada imal edilmektedir. Takım maliyeti ortalama 80 TL, CNC tezgahının 20 dakika işletme ücreti ise 10 TL civarındadır. Kalıpla üretimde bir adet işletme ücreti ise 2 kuruş olarak belirlenmiştir. Her iki yöntemde diğer masraflar göz ardı edilip Şekil 6.1 'deki fiyat-adet grafiği elde edilmiştir.



Şekil 6.1. AŞY ve kalıpla üretim için Fiyat-Adet grafiği

## 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada AA 2024-T3 malzemenin artışı şekillendirme yöntemi ile şekil alabilirliği incelenmiştir. Literatür araştırmalarına bağlı olarak, dikey ilerleme, yağlama, ısıl işlem ve takım yolu değişken parametre değerleri olarak seçilmiştir.

Deneylerde yağlamanın etkisini incelemek için, Çizelge 3.6 da özellikleri verilen bor yağı ve sıvama yağı olmak üzere iki çeşit yağ kullanılmıştır. Sonuçlarda, takım yolu, dikey ilerleme ve ısıl işlemin açısından bu iki yağ arasında önemli bir fark olmadığı elde edilmiştir.

Şekillendirme sırasında kullanılan takım yolu olarak Şekil 3.3- Şekil 3.5 de verilen üç farklı yol izlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda 1. takım yolunun (Şekil 3.3) birçok değişken (ısıl işlem, yağlama, dikey ilerleme) için en başarılı olduğu (standart sapma değerleri 0,0461 ve 0,0612 – İşlem sembolü: C) sonucuna varılmıştır. 2. ve 3. takım yolları ise başarılı olmakla beraber (az hasar oluşumu) geometrik doğruluk ve kalınlık dağılımında 1. takım yolu kadar etkin olamamışlardır.

Dikey ilerlemenin artışı şekillendirme yöntemine etkisi, yağlama, ısıl işlem ve takım yolu parametreleri açısından karşılaştırıldığında ise 0,5 mm dikey ilerlemenin 0,2 mm' ye göre daha fazla geometrik doğruluk ve kalınlık dağılımı (İşlem sembolü G-K) oluşturduğu görülmüştür.

Isıl işlemin etkisini incelemek için, literatüre ve malzeme yapısına uygun olarak numunelere (numunelerin sıcaklığı 510°C' ye çıkarılıp 5 dakikalık tav süresinden sonra suda soğutulmuş ve 190°C' da 4 saat yapay yaşlandırılmıştır) çökeltme sertleşmesi uygulanmıştır. Geometrik doğruluk ve kalınlık dağılımında (İşlem sembolü C ve N) ısıl işlem uygulanmış numunelerin diğerlerine göre daha başarılı olduğu görülmüştür.

Hasarlı malzemelerin durumu incelendiğinde, ısıl işlem görmemiş numunelerde 0,5 mm dikey ilerleme ve 2. takım yolu parametrelerinde yırtılmalar görülmüştür. Bu yırtılmanın önüne geçmek için takım kaplaması (Krom nitrür kaplamanın-Çizelge 3.5) ve takım yolu parametreleri değiştirilmiş olup ve sadece yeni takım yolunda yırtılma oluşmadığı görülmüş ve şekillendirmede başarı sağlanmıştır.

Şekillendirme sonrasında numunelerde oluşan kalınlık değişimi üç boyutlu lazer tarama yöntemi ile ölçülmüştür. En homojen kalınlık dağılımı ise 0,5 mm dikey ilerleme, 1. takım yolu, bor yağı parametrelerinde ısıl işlem görmüş numunede gözlemlenmiştir (İşlem sembolü D).

Geometrik doğruluk açısından incelendiğinde, 0,5 mm dikey ilerleme, 2. takım yolu, bor yağı parametrelerinde ısıtıl işlem görmüş numunede en iyi sonuç gözlemlenmiştir (İşlem sembolü P).

Artışlı şekillendirme yönteminde parametrelerin malzeme seçimine etkileri önem sırasıyla; dikey ilerleme, ısıtıl işlem, takım yolu, yağlama olarak belirlenmiştir.

Maliyet analizi açısından, yapılan fiyat araştırmasına göre, yaklaşık 500 adet altındaki üretimlerde artışlı şekillendirme yöntemi kalıpla üretim yöntemine göre daha ekonomiktir. Ancak adet sayısı 500' ü aştığında artışlı şekillendirme yöntemi fiyat avantajını kaybetmektedir. Özel üretim veya şekil gibi taleplerde bu yöntem avantajlı olmaktadır.

## KAYNAKLAR

1. Ambrogio, G., De Napoli, L., Filice, L., Gagliardi, F., Muzzupappa, M. (2005a) "Application of incremental forming process for high customized medical product manufacturing", *Journal of Materials Processing Technology*, 162-163:156-162.
2. Ambrogio, G., Filice, L., Gagliardi, F., Micari, F. (2005b) "Three-dimensional FE simulation of single point incremental forming: experimental evidences and process design improving", VIII International conference on computational plasticity COMP LAS VIII, Barcelona.
3. Ambrogio G. , Filice L., Gagliardi F. "Formability of lightweight alloys by hot incremental sheet forming", *Materials and Design* 34 (2012) 501–508
4. Bambach M. "A geometrical model of the kinematics of incremental sheet forming for the prediction of membrane strains and sheet thickness", *Journal of Materials Processing Technology* 210 (2010) 1562–1573
5. Bouffieux C., Lequesne C., Vanhove H., Duflou J.R., Pouteau P., Duchene L., Habraken A.M. "Experimental and numerical study of an AlMgSc sheet formed by an incremental proces", *Journal of Materials Processing Technology* 211 (2011) 1684– 1693.
6. Bulut C. "Artışlı Şekillendirme ile AA 5754 Sacın Biçimlendirilmesi ve Teorik Modellenmesi", Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Bilim Uzmanlığı Tezi, 2008
7. Ceretti, E., Giardini, C., Attanasio, A. (2004) "Experimental and simulative results in sheet incremental forming on CNC machines", *Journal of Materials Processing Technology*, 152:176-18.
8. Çapan, L. (2003) "Metallere Plastik şekil verme, 4.baskı", Çağlayan Basımevi, İstanbul
9. Duflou J., Tunçkol Y., Szekeres A., Vanherck P. "Experimental study on force measurements for single point incremental forming", *Journal of Materials Processing Technology* 189 (2007) 65–72.
10. Durante M., Formisano A., Langell A. "Comparison between analytical and experimental roughness values of components created by incremental forming", *Journal of Materials Processing Technology* 210 (2010) 1934–1941

11. Erişkin Y., Uzun İ. (2002) Sac Metal Kalıpcılığı, 3.baskı, Milli Eğitim Basımevi, Ankara, 5,339.
12. Franzena V., Kwiatkowskia L., Martinsb P.A.F., Tekkayaa A.E. "Single point incremental forming of PVC", journal of materials processing technology 209 (2009) 462–469
13. Guoqiang Fan, L. Gao , G. Hussain , Zhaoli Wu "Electric hot incremental forming: A novel technique", International Journal of Machine Tools & Manufacture 48 (2008) 1688–1692
14. Ham M., Jeswiet J. "Single Point Incremental Forming and the Forming Criteria for AA3003", Annals of the CIRP Vol. 55/1/2006
15. Hussain G., Dar N.U., Gao L., Chen M.H. "A comparative study on the forming limits of an aluminum sheet-metal in negative incremental forming", Journal of Materials Processing Technology 187–188 (2007) 94–98
16. Hussain G., Hayat N., Gao L. "An experimental study on the effect of thinning band on the sheet formability in negative incremental forming" International Journal of Machine Tools & Manufacture 48 (2008) 1170–1178.
17. Jeswiet J., Micari F., Hirt G., Bramley A., Duflou J., Allwood J. "Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal", CIRP Annals manufacturing technology, 2005,54 (2), 623-649
18. Kafalı H. "AA 2024 Al alaşıminın sürtünme karıştırma kaynağında kaynak parametrelerinin birleşmeye etkilerinin incelenmesi", Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 2009
19. Kalpakjian S., Manufacturing processes for engineering materials, second edition, addison Wesley world student series (1991)
20. Kim, Y.H., Park, J.J., (2002) "Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal", Journal of Materials Processing Technology, 130-131.
21. Kulaksız Ö., Çakır Ö., Ulusoy O., (1995) Metal Meslek Bilgisi, 51. baskı, Ajans-Türk Matbaacılık sanayi A.Ş., Ankara.
22. Le Van Sy "Modeling of Single Point Incremental Forming Process For Metal and Polymeric Sheet", PhD thesis University Of Pauda-2009

23. Liu Z., Chong P.H., Butt A.N., Skeldon P., Thompson G.E. "Corrosion mechanism of laser-melted AA 2014 and AA 2024 alloys", *Applied Surface Science* 247 (2005) 294–299
24. Malhotra R., Xue L., Belytschko T., Cao J. "Mechanics of fracture in single point incremental forming", *Journal of Materials Processing Technology* 212 (2012) 1573–1590
25. Marciniak, Z., Duncan, J.L., Hu, S.J., (2002) "Mechanics of sheet metal forming", Butterworth-Heinemann An imprint of Elsevier Science Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP 225 Wildwood Avenue, Woburn, MA 01801-2041
26. Martins P.A.F., Bay N., Skjoedt M., Silva M.B. "Theory of single point incremental forming", *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 57 (2008) 247–252
27. Nimbalkar D.H., Nandedkar V.M. "Review of Incremental Forming of Sheet Metal Components", *Int. Journal of Engineering Research and Applications* Vol. 3, Issue 5, Sep-Oct 2013, pp.39-51
28. Park J.J., Kim, Y.H. "Fundamental studies on the incremental sheet metal forming technique", *Journal of Materials Processing Technology*, (2003) 140: 447-453
29. Pohlak M. "Rapid prototyping of sheet metal components with incremental sheet forming technology", PhD Thesis.. Tallinn University Of Technology, Estonia, 2007
30. Pohlak M., Mlajak, J. and Küttner, R. (2007) "Manufacturability and limitations in incremental sheet forming", *Proc. Estonian Acad. Sci. Eng.*, 13, 2, 129-139
31. Silva M.B., Skjoedt M., Martins P.A.F., Bay N. "Revisiting the fundamentals of single point incremental forming by means of membrane analysis", *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 48 (2008) 73–83
32. Titanit (2007) Ultra Sert Kaplamalar Merkezi Zeytinburnu/İstanbul
33. Yonan S.A., Soyarslan C., Haupt P., Kwiatkowski L., Tekkayaa A. E. "Simple Finite Strain Non-linear Visco-plastic Model for thermoplastics and Its Application to the Simulation of Incremental Cold Forming of Polyvinylchloride (PVC)" 204 (2008) 290–303
34. Yonan S. A., Silva M. B., Martins P. A. F., Tekkaya A. E. "Plastic flow and failure in single point incremental forming of PVC sheets" 5 (2014) 301-311

35. Zhang Q., Xiao F., Guo H., Li C., Gao L., Guo X., Hand W., Bondarev A.B. "Warm negative incremental forming of magnesium alloy AZ31 Sheet: Newlubricating method", Journal of Materials Processing Technology 210 (2010) 323–329.

## **ÖZGEÇMİŞ**

Doğum Tarihi : 30 Mayıs 1989

Doğum Yeri : Manisa

Lise : Dündar Çiloğlu Anadolu Lisesi – Manisa

Lisans : Celal Bayar Üniversitesi Makine Mühendisliği – Manisa

İş Tecrübeleri : 6 ay özel bir firmada tasarımdan sorumlu mühendis (2012-2013)

Halen Amasya Üniversitesi'nde Araştırma Görevlisi (2013- )

### **İletişim Bilgileri :**

Mail Adresi : halilbayram4345@gmail.com

Cep Telefonu : 0555 560 9529