

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TALAŞLI İMALAT VE AŞINDIRICILI SU JETİ İŞLEMLERİNİN KOMPOZİT
BALİSTİK MALZEMELER ÜZERİNDE KARŞILAŞTIRMALI DENEYSEL
ÇALIŞMASI VE ENİYİLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emre DOĞANKAYA

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Hakkı Özgür ÜNVER

Temmuz 2020



TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.



Emre DOĞANKAYA



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TALAŞLI İMALAT VE AŞINDIRICILI SU JETİ İŞLEMLERİNİN KOMPOZİT
BALİSTİK MALZEMELER ÜZERİNDE KARŞILAŞTIRMALI DENEYSEL
ÇALIŞMASI VE ENİYİLENMESİ

Emre DOĞANKAYA

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Hakkı Özgür ÜNVER

Tarih: Temmuz 2020

Kompozit malzemelerin tüm dünyada, özellikle havacılık ve savunma sanayilerindeki kullanımları gün geçtikçe artmaya devam etmektedir. Sivil havacılıkta önde gelen hedef, yakıt ekonomisini artırmak olup, bu hedefe ulaşım uçak gövdelerinde her geçen gün daha fazla kompozit esaslı malzemelerin kullanılması olarak ilerlemektedir. Savunma sanayinde ise kompozitlerin çeşitli yapısal elemanlar ve zırh malzemeleri olarak kullanımını artarak devam etmektedir. Bu sanayide dayanım-ağırlık oranını artırmak, yani ürünlerdeki mukavemeti artırırken aynı zamanda ağırlıklarını azaltmak en önemli motivasyondur. Ülkemizde Ankara bölgesinde bulunan pek çok havacılık ve savunma sanayi firmasının kompozit malzeme kullanımının, dünyadaki bu gelişmelere paralel olarak sürekli arttığı izlenmektedir. Bu malzemelerin ilk işlemlerinden sonra, havacılık ve savunma sanayilerinin ihtiyacı olan hassas boyutsal isterlere göre net-şekle getirilmeleri kritik önem taşımakta olup, bu alanda talaşlı imalat ve aşındırıcılı su jeti rekabet eden iki ana teknoloji olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında savunma sanayisinde hafif balistik zırh malzemesi olarak sıklıkla kullanılan Aramid Fiber Takviyeli Polimer Matris (AFRP) ve Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen (UHMWPE) üzerinde, trim, delik ve cep operasyonları gerçekleştirmek suretiyle, talaşlı imalat ve aşındırıcı su jeti teknolojileri kullanımı sırasında, parametrelerin performans ölçütleri üzerindeki etkilerini anlamak için pek çok sayıda deney yapılmıştır. Bu deneyler, deney tasarımı yöntemi ile tasarlanmış ve sonuçları varyans analizi ve yanıt yüzey metotları ile incelenmiştir. Ayrıca örnek işlemlerden alınan numuneler, SEM mikroskopu ile incelenerek kesim yüzeylerinin morfolojileri araştırılmıştır.

Deneyler sonucunda elde edilen regresyon bağlantıları kullanılarak, seçilen operasyonlar üzerinde Parçacık Sürü yöntemi (PSO) ve Bastırılmamış Sınıflandırılmalı Genetik Algoritma (NSGA-III) ile çok-amaçlı eniyileme çalışmaları yapılmış. Bu çalışmalarda özellikle çelişen performans ölçütlerinin ödünleşmelerini gösteren 3-Boyutlu Pareto optimal çözüm setleri elde edilmiştir.

Son aşamada, elde edilen tüm sonuçlar, talaşlı imalat ve aşındırıcı su jeti işlemlerinin avantaj ve dezavantajları karşılaştırabilmek için değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Aramid fiber takviyeli polimer, Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen, Talaşlı imalat, Aşındırıcı su jeti, Çok amaçlı parçacık sürü optimizasyonu, Çok amaçlı bastırılmamış sınıflandırılmalı genetik algoritma

ABSTRACT

COMPARATIVE EXPERIMENTAL STUDY AND OPTİMİZATION OF MACHINING AND ABRASIVE WATER JET PROCESS ON COMPOSITE BALISTIC MATERIALS

Emre DOĞANKAYA

**TOBB University of Economics and Technology
Institute of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Science Programme**

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Hakkı Özgür ÜNVER

Date: July 2020

Use of Polymer Matrix Composites (PMC) has been an increasing trend in Defense and Aviation industries. In aviation, recent top objective is improving fuel economy that leads to use of more composites because of their lightweight structure. In Defense industry, PMCs are mostly use as structural components and shields. Similarly, composites are preferred because of their superior strength-to-weight ratio properties compared to conventional metal alloys. In Ankara region, it can be observed that, use of PMCs has been increasing considerably by major defense companies and their primary suppliers.

In this thesis, Aramid Fiber Reinforced Fiber (AFRP) and Ultra-High Modulus Polyethylene (UHMWPE) which used in defence industry as soft ballistic armour used as specimens for trimming, drilling and pocketing experiments using machining and abrasive water jet technology (ASJ) in order to lay out parameter effects on performance measures. Design of experiments (DOE) method has been used for all experiments and results are analyzed with Analysis of Variance (ANOVA) and Response Surface Method (RSM). Also, for selected specimens, cutting surfaces have

been imaged by Scanning Electron Microscopy (SEM) to investigate surface morphology.

Furthermore, a novel evolutionary optimization method known as Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO) and Nondominated Sorting Genetic Algorithm technique has been applied to find out trade-offs between conflicting performance measures to selected operations and resulting 3D Pareto optimal solutions sets have been generated.

As the last stage, all regression-based relations obtained from experiment have been evaluated in order to compare machining and ASJ technologies and their advantages and disadvantages.

Keywords: Aramid fiber reinforced polymer, Ultra high molecular weight polyethylen, machining, Abrasive water jet, Multi objective particle swarm optimization, Nondominated sorting genetic algorithm

TEŞEKKÜR

Tez danışmanım, değerli hocam Doç.Dr. Hakkı Özgür ÜNVER'e ve tüm alışmalarımda desteklerini benden esirgemeyen ve her zaman çalışmalarıma yardımda bulunan Müge Kahya'ya, çalışmalarıma buldukları katkılardan dolayı Doç. Dr. Zarife Göknur BÜKE ve Ömer CAYLAN ve yüksek lisans kariyerim süresince çalışmalarımı her zaman destekleyen Sn. Çağla Pınar Turunoğlu'na teşekkür ederim.

Deneylerin gerçekleştirilebilmesi için çalışmanın en başından sonuna kadar destek veren CES İleri Kompozit ve Savunma Teknolojileri A.Ő.'ne sağladıkları bütün imkanlardan dolayı teşekkür ederim.

Bu tez alışması TUBİTAK ARDEB 1002 Programı tarafından 118M027 proje numarası ile desteklenmiştir.



İÇİNDEKİLER

| | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| ÖZET | v |
| ABSTRACT | vii |
| TEŞEKKÜR | ix |
| İÇİNDEKİLER | xi |
| ŞEKİL LİSTESİ | xv |
| ÇİZELGE LİSTESİ | xix |
| KISALTMALAR | xxiii |
| SEMBOL LİSTESİ | xxv |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI | 3 |
| 2.1 Talaş Kaldırma Yöntemi ile Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin İşlenmesi..... | 3 |
| 2.1.1 Talaş Kaldırma Yöntemi Teorik Çalışmalar | 4 |
| 2.1.2 Talaş Kaldırma Yöntemi Deneysel Çalışmalar | 12 |
| 2.2 Aşındırıcılı Su Jeti Yöntemi ile Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin İşlenmesi..... | 15 |
| 2.2.1 Aşındırıcılı Su Jeti Yöntemi Teorik Çalışmalar | 16 |
| 2.2.2 Aşındırıcılı Su Jeti Yöntemi Deneysel Çalışmalar | 19 |
| 2.3 Kullanılan Malzemeler | 21 |
| 2.3.1 Aramid Fiber Takviyeli Polymer Kompozit (AFRP)..... | 21 |
| 2.3.2 Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen (UHMWPE) | 22 |
| 2.4 Çok Amaçlı Eniyileme Yöntemleri | 24 |
| 2.4.1 Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) | 24 |
| 2.4.1.1 Çok Amaçlı Parçacık Sürü Optimizasyonu (ÇAPSO) | 25 |
| 2.4.2 Bastırılmamış Sınıflandırılmış Genetik Algoritma (NSGA-III)..... | 27 |
| 3 DENEY DÜZENİĞİNİN HAZIRLANMASI, DENEYLERİN YAPILMASI VE ANALİZLER | 29 |
| 3.1 Numunelerin hazırlanması..... | 29 |
| 3.1.1 AFRP Numunelerin Hazırlanması..... | 30 |
| 3.1.2 UHMWPE Numunelerin Hazırlanması | 33 |
| 3.2 Talaşlı İmalat Deneyleri ve Analizleri | 34 |
| 3.2.1 AFRP Talaşlı İmalat Deneyleri ve Analizleri | 37 |
| 3.2.1.1 AFRP Trim Operasyonu | 37 |
| 3.2.1.2 AFRP Cep Açma Operasyonu | 41 |
| 3.2.1.3 AFRP Delik Delme Operasyonu | 47 |
| 3.2.2 UHMWPE Talaşlı İmalat Deneyleri ve Analizleri | 53 |
| 3.2.2.1 UHMWPE Trim Operasyonu | 53 |
| 3.2.2.2 UHMWPE Cep Açma Operasyonu | 55 |
| 3.2.2.3 UHMWPE Delik Delme Operasyonu | 56 |
| 3.3 Aşındırıcılı Su Jeti Deneyleri ve Analizleri..... | 60 |
| 3.3.1 AFRP Aşındırıcılı Su Jeti Deneyleri ve Analizleri | 65 |

| | |
|---|------------|
| 3.3.1.1 AFRP Trim Operasyonu..... | 65 |
| 3.3.1.2 AFRP Cep Açma Operasyonu..... | 69 |
| 3.3.1.3 AFRP Delik Delme Operasyonu | 74 |
| 3.3.2 UHMWPE Aşındırıcılı Su Jeti Deneyleleri ve Analizleri..... | 79 |
| 3.3.2.1 UHMWPE Trim Operasyonu | 79 |
| 3.3.2.2 UHMWPE Cep Açma Operasyonu | 83 |
| 3.3.2.3 UHMWPE Delik Delme Operasyonu | 88 |
| 3.4 SEM Analizleri..... | 93 |
| 3.4.1 Talaşlı İmalat Numuneleri..... | 94 |
| 3.4.1.1 AFRP Talaşlı İmalat SEM Anazlizleri | 94 |
| 3.4.2 Aşındırıcılı Su Jeti Numuneleri..... | 98 |
| 3.4.2.1 AFRP Aşındırıcılı Su Jeti SEM Analizleri | 98 |
| 4. ENİYİLEME VE DOĞRULAMA ÇALIŞMALARI | 107 |
| 4.1 Talaşlı İmalat Eniyilemesi ve Doğrulanması..... | 107 |
| 4.1.1 AFRP Talaşlı İmalat işlemleri PSO ile Eniyileme..... | 107 |
| 4.1.2 AFRP Eniyilemesinin Doğrulanması | 109 |
| 4.2 Aşındırıcılı Su jeti Eniyilemesi..... | 110 |
| 4.2.1 AFRP Bastırılmamış Sınıflandırılmış Genetik Algoritma ile Eniyilenmesi..... | 110 |
| 4.2.2 AFRP Eniyilemesinin Doğrulanması ve Endüstriyel Uygulamalar | 112 |
| 4.2.3 UHMWPE Aşındırıcılı Su Jeti İşlemleri Parçacık Sürü Optimizasyonu ile Eniyilenmesi..... | 114 |
| 4.2.4 UHMWPE Cep Açma ve Delik Delme Doğrulama ve Endüstriyel Uygulamalar | 116 |
| 5. DEĞERLENDİRMELER | 119 |
| 5.1 Talaşlı İmalat İşlemleri Değerlendirmeler..... | 119 |
| 5.1.1 Trim Operasyonu..... | 119 |
| 5.1.1.1 Güç | 119 |
| 5.1.1.2 Yüzey Pürüzlülüğü | 120 |
| 5.1.1.3 Sıcaklık | 120 |
| 5.1.2 Cep Açma Operasyonu..... | 121 |
| 5.1.2.1 Güç | 121 |
| 5.1.2.2 Yüzey Pürüzlülüğü | 121 |
| 5.1.2.3 Sıcaklık | 121 |
| 5.1.2.4 Boyutsal Hata ve Çapak | 122 |
| 5.1.3 Delik Delme Operasyonu | 122 |
| 5.1.3.1 Güç | 122 |
| 5.1.3.2 Yüzey Pürüzlülüğü | 122 |
| 5.1.3.3 Sıcaklık | 122 |
| 5.1.3.4. Delaminasyon | 122 |
| 5.1.3.5 Çap Hata | 123 |
| 5.2 Aşındırıcılı Su Jeti İşlemleri Değerlendirmeler..... | 123 |
| 5.2.1 Trim Operasyonu..... | 123 |
| 5.2.1.1 Yüzey Pürüzlülüğü | 123 |
| 5.2.1.2 Kerf Açısı ve Kerf Oranı | 124 |
| 5.2.2 Delik Delme Operasyonu | 126 |
| 5.2.2.1 Yüzey Pürüzlülüğü | 126 |
| 5.2.2.2 Çap Hata | 126 |
| 5.2.2.3 Delaminasyon | 127 |
| 5.2.3 Cep Açma Operasyonu..... | 127 |

| | |
|---|------------|
| 5.2.3.1 Yüzey Pürüzlülüğü..... | 128 |
| 5.2.3.2 Boyutsal Hata (En-Boy)..... | 128 |
| 5.3 Talaşlı İmalat ve Aşındırıcı Su Jeti Karşılaştırmalı Değerlendirmesi..... | 128 |
| 5.3.1 İşlem Çıktılarının Karşılaştırmalı Değerlendirilmesi..... | 128 |
| 5.3.1.1 Yüzey Pürüzlülüğü..... | 130 |
| 5.3.1.2 Harcanan Güç ve Eneri Tüketimi..... | 131 |
| 5.3.1.3 Sıcaklık..... | 132 |
| 5.3.1.4 İşlem Süresi..... | 133 |
| 5.3.1.5 Delaminasyon Faktörü..... | 133 |
| 5.3.1.6 Boyutsal Hatalar..... | 134 |
| 5.3.1.7 Kerf Açısı..... | 136 |
| 6. SONUÇLAR..... | 137 |
| 6.1. Önerilen Gelecek Çalışmalar..... | 140 |
| KAYNAKLAR..... | 143 |
| ÖZGEÇMİŞ..... | 151 |





ŞEKİL LİSTESİ

| | <u>Sayfa</u> |
|-------------------|---|
| Şekil 2.1.1 : | Kompozitlerde delaminasyon örneği..... 3 |
| Şekil 2.1.1.1 : | Frezelemede talaş kaldırma işleminin anlık geometrisi..... 4 |
| Şekil 2.1.1.2 : | Ortogonal talaşlı imalatta serim açılarına göre kesme mekanikleri..... 7 |
| Şekil 2.1.1.3 : | Delik delme esnasında (a) giriş / (b) çıkış delaminasyon oluşumu..... 11 |
| Şekil 2.1.2.1 : | Aramid kompozitlerde hasar ölçümü..... 14 |
| Şekil 2.2.1 : | Aşındırıcı su jeti işlemi, kontrol parametreleri ve kerf oluşumu..... 16 |
| Şekil 2.2.1.1 : | Aşındırıcı taneciklerin parçayı işleme mekaniği modeli..... 17 |
| Şekil 2.2.1.2 : | Üçüncü bölgenin görüldüğü örnek..... 19 |
| Şekil 2.2.2.1 : | Aşındırıcı Kum Oranının Delaminasyon Faktörüne Etkisi.... 20 |
| Şekil 2.2.2.2 : | Aşındırıcı Su Jeti İşlemi Girdi Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi..... 20 |
| Şekil 2.4.1.1 : | Parçacık Sürü Optimizasyonu algoritmasının temel mekanizması..... 25 |
| Şekil 2.4.1.1.1 : | Pareto optimal çözüm seti..... 26 |
| Şekil 2.4.1.1.2 : | ÇAPSO algoritması akış şeması..... 27 |
| Şekil 2.4.2.1 : | Bastırılmamış Sınıflandırılmış Genetik Algoritması Akış Şeması..... 28 |
| Şekil 3.1.1 : | Çözünmüş Pre-preglerin katman kesme işlemi..... 30 |
| Şekil 3.1.1.1 : | Serim işlemine hazır karbon ve cam pre-preg katmanlar..... 31 |
| Şekil 3.1.1.2 : | Final vakumlama işlemi tamamlanmış Pre-pregler..... 32 |
| Şekil 3.1.1.3 : | AFRP pre-preg için otoklav reçetesi..... 33 |
| Şekil 3.1.1.4 : | Otoklav işlemi tamamlanmış olan AFRP Kompozitler..... 33 |
| Şekil 3.2.1 : | Talaşlı imalat deneylerinin gerçekleştirildiği Robotek marka CNC işleme merkezi..... 34 |
| Şekil 3.2.2 : | k = 3 tasarım değişkeni için MKT örneklemeleri..... 35 |
| Şekil 3.2.3 : | Ortalama yüzey pürüzlülüğü gösterimi..... 36 |
| Şekil 3.2.4 : | İşlenen yüzeydeki sıcaklık ölçüm görseli..... 37 |
| Şekil 3.2.1.1.1 : | AFRP Trim operasyonu..... 37 |
| Şekil 3.2.1.1.2 : | AFRP Trim Operasyonuna ait yüzey pürüzlülüğü için yanıt yüzey grafikleri..... 39 |

| | | |
|-------------------|--|----|
| Şekil 3.2.1.1.3 : | AFRP Trim operasyonuna ait sıcaklık için yanıt yüzey grafikleri..... | 40 |
| Şekil 3.2.1.1.4 : | AFRP Trim operasyonuna ait güç için yanıt yüzey grafikleri..... | 41 |
| Şekil 3.2.1.2.1 : | (a) (b) AFRP Cep açma operasyonu..... | 42 |
| Şekil 3.2.1.2.2 : | AFRP Cep açma operasyonuna ait yüzey pürüzlülüğü için yanıt yüzey grafikleri..... | 43 |
| Şekil 3.2.1.2.3 : | AFRP Delik delme operasyonuna ait sıcaklık için yanıt yüzey grafiği..... | 44 |
| Şekil 3.2.1.2.4 : | AFRP Delik delme operasyonuna ait güç için yanıt yüzey grafiği..... | 45 |
| Şekil 3.2.1.2.5 : | AFRP Cep açma operasyonuna ait çıkış çapakları için yanıt yüzey grafikleri..... | 47 |
| Şekil 3.2.1.3.1 : | AFRP delik delme operasyonu..... | 48 |
| Şekil 3.2.1.3.2 : | AFRP Delik delme operasyonuna ait yüzey pürüzlülüğü için yanıt yüzey grafiği..... | 49 |
| Şekil 3.2.1.3.3 : | AFRP Delik delme operasyonuna ait sıcaklık için yanıt yüzey grafiği..... | 50 |
| Şekil 3.2.1.3.4 : | AFRP Delik delme operasyonuna ait güç için yanıt yüzey grafiği..... | 51 |
| Şekil 3.2.1.2.5 : | AFRP Delik delme operasyonuna ait giriş delaminasyonu için yanıt yüzey grafiği..... | 52 |
| Şekil 3.2.2.1.1 : | (a) UHMWPE Trim operasyonu (b) sıcaklık ölçümü..... | 54 |
| Şekil 3.2.2.2.1 : | UHMWPE cep açma operasyonu..... | 56 |
| Şekil 3.2.2.3.1 : | (a) UHMWPE Delik delme operasyonu (b) sıcaklık ölçümü..... | 56 |
| Şekil 3.2.2.3.2 : | UHMWPE Delik delme operasyonuna ait boyutsal sapma için yanıt yüzey grafiği..... | 58 |
| Şekil 3.2.2.3.3 : | UHMWPE Delik delme operasyonuna ait giriş delaminasyonu için yanıt yüzey grafiği..... | 59 |
| Şekil 3.3.1 : | Su jeti kesim operasyonlarında kullanılan Storma Marka tezgâh..... | 60 |
| Şekil 3.3.2 : | Aşındırıcı kum taneciklerinin optik mikroskoptan alınan görüntüleri..... | 61 |
| Şekil 3.3.3 : | Kütlesel kum debisinin, vana ayarına göre grafiği..... | 62 |
| Şekil 3.3.4 : | (a) Su jeti çıkış parça alt optik mikroskop görüntüsü (b) Su jeti çıkış parça üst optik mikroskop görüntüsü..... | 62 |
| Şekil 3.3.5 : | (a) Su jeti orta parça alt optik mikroskop görüntüsü (b) Su jeti orta parça üst optik mikroskop görüntüsü..... | 63 |
| Şekil 3.3.6 : | (a) Su jeti giriş parça alt optik mikroskop görüntüsü (b) Su jeti giriş parça üst optik mikroskop görüntüsü..... | 63 |
| Şekil 3.3.7 : | Kerf yapısı ve ölçütleri çizimi..... | 63 |
| Şekil 3.3.1.1.1 : | AFRP Trim operasyonu..... | 65 |
| Şekil 3.3.1.2 : | AFRP Trim cep açma operasyonuna ait kerf oranı için yanıt yüzey grafikleri..... | 67 |
| Şekil 3.3.1.1.3 : | AFRP Trim operasyonuna ait kerf açısı için yanıt yüzey grafikleri..... | 68 |

| | | |
|-------------------|---|----|
| Şekil 3.3.1.1.4 : | Aramid Trim operasyonuna ait yüzey pürüzlülüğü için yanıt yüzey grafikleri..... | 69 |
| Şekil 3.3.1.2.1 : | (a) AFRP Cep açma operasyonu (b) Yüzey pürüzlülüğü ölçümü..... | 70 |
| Şekil 3.3.3.2.2 : | AFRP Cep açma Operasyonuna ait yüzey pürüzlülüğü için yanıt yüzey grafikleri..... | 72 |
| Şekil 3.3.1.2.3 : | AFRP Cep açma operasyonuna ait boyutsal hata (boy) için yanıt yüzey grafikleri..... | 73 |
| Şekil 3.3.1.2.4 : | AFRP Cep açma operasyonuna ait boyutsal hata (en) için yanıt yüzey grafikleri..... | 74 |
| Şekil 3.3.1.3.1 : | (a) AFRP Delik delme operasyonu (b)Yüzey pürüzlülüğü ölçümü..... | 75 |
| Şekil 3.3.1.3.2 : | AFRP Delik delme operasyonuna ait yüzey pürüzlülüğü için yanıt yüzey grafikleri..... | 77 |
| Şekil 3.3.1.3.3 : | AFRP Delik delme operasyonuna ait iç çap hata için yanıt yüzey grafikleri..... | 78 |
| Şekil 3.3.2.1.1 : | UHMWPE Trim operasyonu..... | 79 |
| Şekil 3.3.2.1.2 : | UHMWPE Trim operasyonuna ait yüzey pürüzlülüğü için yanıt yüzey grafikleri..... | 81 |
| Şekil 3.3.2.1.3 : | UHMWPE Trim operasyonuna ait kerf oranı için yanıt yüzey grafikleri..... | 82 |
| Şekil 3.3.2.1.4 : | UHMWPE Trim operasyonuna ait kerf açısı için yanıt yüzey grafikleri..... | 83 |
| Şekil 3.3.2.2.1 : | (a) UHMWPE Cep açma operasyonu (b)Yüzey pürüzlülüğü ölçümü..... | 84 |
| Şekil 3.3.2.2.2 : | UHMWPE Cep açma operasyonuna ait boyutsal hata (boy) için yanıt yüzey grafikleri..... | 86 |
| Şekil 3.3.2.2.3 : | UHMWPE Cep açma operasyonuna ait boyutsal hata (en) için yanıt yüzey grafikleri..... | 87 |
| Şekil 3.3.2.2.4 : | UHMWPE Cep açma operasyonuna ait yüzey pürüzlülüğü için yanıt yüzey grafikleri..... | 88 |
| Şekil 3.3.2.3.1 : | (a) UHMWPE Delik delme operasyonu (b) yüzey pürüzlülüğü ölçümü..... | 89 |
| Şekil 3.3.2.3.2 : | UHMWPE Delik delme operasyonuna ait yüzey pürüzlülüğü için yanıt yüzey grafikleri..... | 91 |
| Şekil 3.3.2.3.3 : | UHMWPE delik delme operasyonuna ait iç çap hata için yanıt yüzey grafikleri..... | 92 |
| Şekil 3.3.2.3.4 : | UHMWPE Delik delme operasyonuna ait çıkış delaminasyon faktörü için yanıt yüzey grafikleri..... | 93 |
| Şekil 3.4.1 | SEM cihazına girmeden önce yapılan kaplama ve cihaza yerleştirme..... | 94 |
| Şekil 3.4.1.1.1 : | AFRP malzemenin (2) nolu delik açma operasyonuna ait SEM görüntüleri..... | 95 |
| Şekil 3.4.1.1.2 : | AFRP malzemenin (5) nolu delik açma operasyonuna ait SEM görüntüleri..... | 95 |
| Şekil 3.4.1.1.3 : | AFRP malzemenin (3) nolu deneye için cep açma operasyonuna ait SEM görüntüsü..... | 96 |
| Şekil 3.4.1.1.4 : | AFRP malzemenin (18) nolu deneye için cep açma operasyonuna ait SEM görüntüsü..... | 97 |

| | | |
|--------------------|--|-----|
| Şekil 3.4.1.1.5 : | AFRP (18) nolu deneye için cep açma operasyonuna ait SEM görüntüsü..... | 97 |
| Şekil 3.4.2.1.1 | AFRP malzemenin (1) nolu trim operasyonuna ait SEM görüntüsü..... | 98 |
| Şekil 3.4.2.1.2 : | AFRP malzemenin (1) nolu trim operasyonuna ait SEM görüntüsü..... | 99 |
| Şekil 3.4.2.1.3 : | AFRP malzemenin (29) nolu trim operasyonuna ait SEM görüntüsü..... | 99 |
| Şekil 3.4.2.1.4 : | AFRP malzemenin (29) nolu trim operasyonuna ait SEM görüntüsü..... | 100 |
| Şekil 3.4.2.1.5 : | AFRP malzemenin (10) nolu cep açma operasyonuna ait SEM görüntüsü..... | 101 |
| Şekil 3.4.2.1.6 : | AFRP malzemenin (10) nolu cep açma operasyonuna ait SEM görüntüsü..... | 101 |
| Şekil 3.4.2.1.7 : | AFRP malzemenin (29) nolu cep açma operasyonuna ait SEM görüntüsü..... | 102 |
| Şekil 3.4.2.1.8 : | AFRP malzemenin (29) nolu cep açma operasyonuna ait SEM görüntüsü..... | 102 |
| Şekil 3.4.2.1.9 : | AFRP malzemenin (1) nolu delik operasyonuna ait SEM görüntüsü..... | 103 |
| Şekil 3.4.2.1.10 : | AFRP malzemenin (1) nolu delik operasyonuna ait SEM görüntüsü..... | 104 |
| Şekil 3.4.2.1.11 : | AFRP malzemenin (30) nolu delik açma operasyonuna ait SEM görüntüsü..... | 104 |
| Şekil 3.4.2.1.12 : | AFRP malzemenin (30) nolu delik açma operasyonuna ait SEM görüntüsü..... | 105 |
| Şekil 4.1.1.1 : | AFRP Talaşlı imalat cep açma işlemi için Pareto optimal çözüm seti..... | 109 |
| Şekil 4.2.1.2 : | AFRP ASJ İşlemi için Pareto Optimal Çözüm Eğrileri..... | 112 |
| Şekil 4.2.3.1 : | Pareto Eğrileri ve Tanımlanmış Kümeler (a) Cep Açma (b) Delik Delme..... | 116 |
| Şekil 5.2.1.2.1 : | Kerf oluşumu ve sujetindeki kuvvet bölgeleri..... | 125 |
| Şekil 5.3.1.6.1 : | ISO 2768 toleransları düzlemsel geometriler için toleransları..... | 135 |

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

| | | |
|---------------------|---|----|
| Çizelge 2.3.1.1 : | AFRP Malzeme Mekanik Özellikler..... | 22 |
| Çizelge 2.3.2.1 : | UHMPE Malzeme Mekanik Özellikleri..... | 23 |
| Çizelge 3.1.1 : | Deney için kullanılan kompozit malzemelerin serim özellikleri..... | 29 |
| Çizelge 3.1.1.1 : | AFRP Pre-preg serim tablosu..... | 31 |
| Çizelge 3.2.1.1.1 | AFRP Trim operasyonuna ait deney tasarımı ve deney sonuçları..... | 38 |
| Çizelge 3.2.1.1.2 : | AFRP Trim operasyonuna ait yüzey pürüzlülüğü için varyans analizi tablosu..... | 39 |
| Çizelge 3.2.1.1.3 : | AFRP Trim Operasyonuna ait sıcaklık için varyans analizi tablosu..... | 40 |
| Çizelge 3.2.1.1.4 : | AFRP Trim operasyonuna ait güç için varyans analizi tablosu..... | 41 |
| Çizelge 3.2.1.2.1 : | AFRP Cep açma operasyonuna ait deney tasarımı ve deney sonuçları..... | 42 |
| Çizelge 3.2.1.2.2 : | AFRP Cep açma operasyonuna ait yüzey pürüzlülüğü için varyans analizi tablosu..... | 43 |
| Çizelge 3.2.1.2.3 : | AFRP Cep açma operasyonuna ait sıcaklık için varyans analizi tablosu..... | 44 |
| Çizelge 3.2.1.2.4 | AFRP Cep açma operasyonuna ait güç için varyans analizi tablosu..... | 45 |
| Çizelge 3.2.1.2.5 : | AFRP Cep açma operasyonuna ait boyutsal hata değeri için varyans analizi tablosu | 46 |
| Çizelge 3.2.1.2.6 : | AFRP Cep açma operasyonuna ait giriş çapakları için varyans analizi tablosu..... | 46 |
| Çizelge 3.2.1.2.7 : | AFRP Cep açma operasyonuna ait çıkış çapakları için varyans analizi tablosu..... | 47 |
| Çizelge 3.2.1.3.1 : | AFRP Delik delme operasyonuna ait deney tasarımı ve deney sonuçları..... | 48 |
| Çizelge 3.2.1.3.2 : | AFRP Delik delme operasyonuna ait yüzey pürüzlülüğü için varyans analizi tablosu..... | 49 |
| Çizelge 3.2.1.3.3 : | AFRP Delik delme operasyonuna ait sıcaklık için varyans analizi tablosu..... | 50 |
| Çizelge 3.2.1.3.4 : | AFRP Delik delme operasyonuna ait güç için varyans analizi tablosu..... | 51 |
| Çizelge 3.2.1.3.5 : | AFRP Delik delme operasyonuna ait giriş delaminasyonu için varyans analizi tablosu..... | 52 |

| | | |
|---------------------|---|----|
| Çizelge 3.2.1.3.6 : | AFRP Delik delme operasyonuna ait çıkış delaminasyonuna ait varyans analizi tablosu..... | 53 |
| Çizelge 3.2.1.3.7 : | AFRP Delik delme operasyonuna ait iç çap hata (%) değerine ait varyans analizi tablosu..... | 53 |
| Çizelge 3.2.2.1.1 : | UHMWPE Trim operasyonu için deney tasarımı ve deney sonuçları..... | 55 |
| Çizelge 3.2.2.3.1 : | UHMWPE Delik delme operasyonuna ait deney tasarımı ve deney sonuçları..... | 57 |
| Çizelge 3.2.2.3.2 : | UHMWPE Delik delme operasyonuna ait yüzey pürüzlülüğü için varyans analizi tablosu..... | 57 |
| Çizelge 3.2.2.3.3 : | UHMWPE Delik delme operasyonuna ait sıcaklık için varyans analizi tablosu..... | 58 |
| Çizelge 3.2.2.3.4 : | UHMWPE Delik delme operasyonuna ait boyutsal hata için varyans analizi tablosu..... | 58 |
| Çizelge 3.2.2.3.5 : | UHMWPE Delik delme operasyonuna ait giriş delaminasyonu için varyans analizi tablosu..... | 59 |
| Çizelge 3.2.2.3.6 : | UHMWPE Delik delme operasyonuna ait çıkış delaminasyonuna ait varyans analizi tablosu..... | 60 |
| Çizelge 3.3.1 : | Su jeti tezgahının pompa basıncına oranlı çektiği güç değerleri..... | 64 |
| Çizelge 3.3.1.1.1 : | AFRP trim operasyonuna ait deney tasarım tablosu ve deney sonuçları..... | 66 |
| Çizelge 3.3.1.1.2 : | AFRP Trim operasyonuna ait kerf oranı için varyans analizi tablosu..... | 67 |
| Çizelge 3.3.1.1.3 : | AFRP Trim operasyonuna ait kerf açısı için varyans analizi tablosu..... | 68 |
| Çizelge 3.3.1.1.4 : | AFRP trim operasyonuna ait yüzey pürüzlülüğü için varyans analizi tablosu..... | 69 |
| Çizelge 3.3.1.2.1 : | AFRP Cep açma operasyonuna ait deney tasarım tablosu ve deney sonuçları..... | 71 |
| Çizelge 3.3.1.2.2 : | AFRP Cep açma operasyonuna ait yüzey pürüzlülüğü için varyans analizi tablosu..... | 72 |
| Çizelge 3.3.1.2.3 : | AFRP Cep açma operasyonuna ait boyutsal hata (boy) için varyans analizi tablosu..... | 73 |
| Çizelge 3.3.1.2.4 : | AFRP Cep açma operasyonuna ait boyutsal hata (en) için varyans analizi tablosu..... | 74 |
| Çizelge 3.3.1.3.1 : | AFRP Delik delme operasyonuna ait deney tasarım tablosu ve deney sonuçları..... | 76 |
| Çizelge 3.3.1.3.2 : | AFRP Delik delme operasyonuna ait yüzey pürüzlülüğü için varyans analizi tablosu..... | 77 |
| Çizelge 3.3.1.3.3 : | AFRP Delik delme operasyonuna ait iç çap hata için varyans analizi tablosu..... | 78 |
| Çizelge 3.3.1.3.4 : | AFRP Delik delme operasyonuna ait giriş delaminasyonu için varyans analizi tablosu..... | 79 |
| Çizelge 3.3.2.1.1 : | UHMWPE Trim operasyonuna ait deney tasarım tablosu ve deney sonuçları..... | 80 |
| Çizelge 3.3.2.1.2 : | UHMWPE Trim operasyonuna ait yüzey pürüzlülüğü için varyans analizi tablosu..... | 81 |
| Çizelge 3.3.2.1.3 : | UHMWPE Trim operasyonuna ait kerf oranı için varyans analizi tablosu..... | 82 |

| | | |
|---------------------|--|-----|
| Çizelge 3.3.2.1.4 : | UHMWPE Trim operasyonuna ait kerf açısı için varyans analizi tablosu..... | 83 |
| Çizelge 3.3.2.2.1 : | UHMWPE Cep açma operasyonuna ait deney tasarım tablosu ve deney sonuçları..... | 85 |
| Çizelge 3.3.2.2.2 : | UHMWPE Cep açma operasyonuna ait boyutsal hata (boy) için varyans analizi tablosu..... | 86 |
| Çizelge 3.3.2.2.3 : | UHMWPE Cep açma operasyonuna ait boyutsal hata (en) için varyans analizi tablosu..... | 87 |
| Çizelge 3.3.2.2.4 : | UHMWPE Cep açma operasyonuna ait yüzey pürüzlülüğü için varyans analizi tablosu..... | 88 |
| Çizelge 3.3.2.3.1. | UHMWPE Delik delme operasyonuna ait deney tasarım tablosu ve deney sonuçları..... | 90 |
| Çizelge 3.3.2.3.3 : | UHMWPE Delik delme operasyonuna ait yüzey pürüzlülüğü için varyans analizi tablosu..... | 91 |
| Çizelge 3.3.2.3.4 : | UHMWPE Delik delme operasyonuna ait iç çap hata için varyans analizi tablosu..... | 92 |
| Çizelge 3.3.2.3.5 : | UHMWPE Delik delme operasyonuna ait delaminasyon faktörü için varyans analizi tablosu..... | 93 |
| Çizelge 3.4.1.1.1 : | AFRP Delik delme operasyonu numuneleri..... | 94 |
| Çizelge 3.4.1.1.2 : | AFRP Cep açma operasyonu numuneleri..... | 96 |
| Çizelge 3.4.2.1.1 : | AFRP Trim operasyonu numuneleri..... | 98 |
| Çizelge 3.4.2.1.2 : | AFRP Cep açma operasyonu numuneleri..... | 100 |
| Çizelge 3.4.2.1.3 : | AFRP Delik delme operasyonu numuneleri..... | 103 |
| Çizelge 4.1.1.1 : | AFRP Talaşlı cep açma işlemi parametrelerinin alt ve üst limitleri..... | 108 |
| Çizelge 4.1.2.1 : | AFRP Talaşlı İmalat Doğrulama Deneyleri..... | 109 |
| Çizelge 4.2.1.1 : | Girdi Parametreleri için Alt ve Üst Limitler..... | 111 |
| Çizelge 4.2.2.1 : | AFRP malzeme ASJ işlemi için doğrulama deneyleri sonuçları..... | 114 |
| Çizelge 4.2.3.1 : | ÇAPSO için cep ve delik açma parametrelerinin alt ve üst sınırları..... | 116 |
| Çizelge 4.2.4.1 : | Cep Açma ve Delik Delme Operasyonları Doğrulaması... | 118 |
| Çizelge 5.3.1.1.1 : | Karşılaştırmalı yüzey pürüzlülüğü..... | 130 |
| Çizelge 5.1.2.1 : | Karşılaştırmalı güç değerleri..... | 131 |
| Çizelge 5.1.2.2 : | Karşılaştırmalı enerji tüketimi..... | 131 |
| Çizelge 5.1.3.1 : | Karşılaştırmalı sıcaklık değerleri..... | 132 |
| Çizelge 5.1.4.1 : | Karşılaştırmalı işlem süreleri..... | 133 |
| Çizelge 5.1.5.1 : | Karşılaştırmalı delik için giriş ve çıkış delaminasyon faktörleri..... | 134 |
| Çizelge 5.1.6.1 : | Karşılaştırmalı cep açma operasyonu için boyutsal hatalar..... | 135 |



KISALTMALAR

| | |
|---------------|--|
| AFRP | : Aramid Fiber Takviyeli Polimer (Aramid Fiber Reinforced Polymer) |
| ANOVA | : Varyasın Analizi |
| ASJ | : Aşındırıcı Su Jeti (Abrasive Water Jet) |
| CAD | : Bilgisayar Destekli Tasarım (Computer Aided Design) |
| CAM | : Bilgisayar Destekli Üretim (Computer Aided Manufacturing) |
| CFRP | : Karbon Fiber Takviyeli Polimer (Carbon Fiber Reinforced Polymer) |
| CNC | : Bilgisayar Sayımlı Yönetim (Computer Numerical Control) |
| ÇAPSO | : Çok-Amaçlı Parçacık Sürü Optimizasyonu (Multi-Objective Particle Swarm Optimization) |
| DT | : Deney Tasarımı |
| FOD | : Yabancı Madde Hasarı (Foreign Object Damage) |
| FRP | : Fiber Takviyeli Polimer (Fiber Reinforced Polymer) |
| GA | : Genetik Algoritma |
| GFML | : Cam Elyaf Metal Lamine (Glass Fiber Metal Laminate) |
| GFRP | : Cam Fiber Takviyeli Polimer (Glass Fiber Reinforced Polymer) |
| KE | : Kinetik Enerji |
| MEK | : Metil Etil Keton |
| MKT | : Merkezi Kompozit Tasarım (Central Composite Design) |
| NSGA | : Bastırılmamış Sınıflandırılmalı Genetik Algoritma (Nondominated Sorting Genetic Algorithm) |
| PCD | : Çok Kristalli Elmas (Polycrystalline Diamond) |
| PSO | : Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization) |
| SEM | : Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscopy) |
| TiN | : Titanyum Nitrür (Titanium Nitride) |
| UHMWPE | : Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen (Ultra High Molecular Weight Polyethlen) |
| YYM | : Yüzey Yanıt Metodolojisi (Response Surface Methodology) |



SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

| Simgeler | Açıklama |
|--------------|--|
| c | Diş Başı İlerleme (mm/devir-diş) |
| φ | Anlık Kesme Açısı ($^{\circ}$) |
| h_{av} | Ortalama Talaş Kalınlığı (mm) |
| D_c | Kesici Takım Çapı (mm) |
| F_s | Fiber Yönünde Kesme Kuvveti (N) |
| N_s | Normal Kuvvet (N) |
| θ | Fiber Serim Açısı ($^{\circ}$) |
| F_c | Temel Kesme Kuvveti (N) |
| F_t | Teğelsel Kesme Kuvveti (N) |
| R_a | Yüzey Pürüzlülüğü (μm) |
| f_z | Diş Başı İlerleme (mm/devir-diş) |
| T_g | Camsı Geçiş Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$) |
| f | İlerleme Oranı (mm/rev) |
| D_0 | Matkap Çapı (mm) |
| D_{max} | En geniş Deformasyon Çapı (mm) |
| G_{IC} | Enerji Salınım Oranı |
| E | Eş değer Young Modülü |
| F_{kritik} | Kritik Kuvvet (N) |
| Ep | Aşındırıcı kum kinetik enerjisi (J) |
| d_p | Aşındırıcı kum çapı (mm) |
| ρ_A | Su – Kum karışımı özkütlesi (kg/m^3) |
| V_P | Su hızı (m/s) |
| ρ_K | Karışımın Özkütlesi (kg/m^3) |
| M_W | Suyun kütlesi (kg) |
| M_A | Aşındırıcı Kum Kütlesi (kg) |
| V_W | Suyun Hacmi (m^3) |
| V_A | Aşındırıcı Kum Hacmi (m^3) |
| V_j | Suyun Hızı Hızı (mm/dk) |
| P_w | Suyun Basıncı (MPa) |
| ρ_w | Suyun Özkütlesi (kg/m^3) |
| D_t | Kesme Derinliği (mm) |
| m_a | Aşındırıcı Kum Oranı (kg/dk) |
| P_w | Su Basıncı (MPa) |
| D_j | Orifis Çapı (mm) |
| U | İlerleme Hızı (mm/dk) |
| ρ_w | Suyun Özkütlesi (kg/m^3) |
| F_d | Delaminasyon Faktörü |

| | |
|---------------------|---|
| a_e | Kesme Genişliği (mm) |
| V_c | Kesme Hızı (mm/dk) |
| T | Sıcaklık ($^{\circ}$ C) |
| P | Güç (W) |
| t | İşlem Süresi (Sn) |
| E | Enerji Tüketimi (J) |
| N | Spindle Dönme Hızı (rpm) |
| K_a | Kerf Açısı ($^{\circ}$) |
| K_r | Kerf Oranı |
| Q_a | Kum Oranı (%) |
| P | Basınç (MPa) |
| SoD | Mesafe (mm) |
| f | İlerleme Hızı (mm/dk) |
| x_i | Parçacıkların konum vektörü |
| v_i | Parçacıkların hız vektörü |
| p_{best} | Parçacığın en iyi tecrübesi |
| g_{best} | Sürünün en iyi tecrübesi |
| w | Başlangıç ağırlığı |
| wf | Ağırlık indirme faktörü |
| c_1 | Kişisel öğrenme faktörü |
| c_2 | Sürüsel öğrenme faktörü |
| r_1 | Rasgele sayı |
| r_2 | Rasgele sayı |
| g_i | i 'ninci karar değişkeni |
| $AltLimit_i$ | i 'ninci karar değişkenin alt limiti |
| $ÜstLimit_i$ | i 'ninci karar değişkenin üst limiti |
| f_{Ra} | Yüzey pürüzlülüğü için amaç fonksiyonu |
| $F_{BoyutssalHata}$ | Boyutsal Hata için Amaç Fonksiyonu |
| $D_{s,ave}$ | Birim alandaki kum miktarı (g/mm^2) |
| m_a | Aşındırıcı Kum Oranı (g/s) |
| D_f | Orifis Çapı (mm) |

1. GİRİŞ

Dünyada ve ülkemizde, sağladığı avantajlardan dolayı kompozit malzemelerin kullanımını son yıllarda birçok sektörde özellikle havacılık ve savunma sanayinde hızla artmaktadır. Bu tez çalışmasındaki temel amaç özellikle savunma sanayinde zırh malzemesi olarak kullanılan AFRP ve UHMWPE malzemelerinin, net şekle getirilmesi için ikincil işlemler olarak kullanılmakta olan talaşlı imalat ve aşındırıcılı su jeti operasyonlarının deneylerinin yapılması ve sonuçlarının karşılaştırılmalı yorumlanmasıdır.

Havacılık ve savunma sanayiinde genellikle yapısal parça olarak kullanılan kompozit malzemelerin üretiminde sonra üretilen yapısal parçanın montaj operasyonu olağandır. Montaj operasyonu yapılacak kompozit malzemenler için hatasız olarak montaj işleminin gerçekleştirilebilmesi için ikinci işlemler gerekmektedir. Yapısal olarak kullanılmayan parçalarda ise (Kalıp) yapısal parçanın geometrik doğruluğunu etkilemesi sebebiyle hatasız olması önemlidir. Üretilen kompozit ürünün ikincil işlemleri genellikle trimleme (çapaklarının alınması ve boyutlama), delik delinmesi, cep veya yarı cep açılmasıdır. İkincil işlemler arasında görülen zorluklar genellikle aşağıdaki maddeler olarak özetlenebilir:

- Kesim sırasında ortaya çıkan sıcaklık matris malzemesi olan reçinenin kürlenme sıcaklığını aşmamalıdır. Ortaya çıkan yüksek sıcaklık polimer malzemenin yapısını bozmaktadır (**Mazumdar, 2002**).
- Kesimin hassas tolerans isterlerinde başarılı olabilmesi, matris malzemesi ve elyafın farklı genleşme katsayılarına sahip olmalarından kesimin hassas tolerans isterlerini karşılamasını zorlaştırmaktadır (**Konig ve diğ., 1984**).
- Kompozit malzemelerin heterojen yapılarından dolayı kullanılan kesici takım ömrü oldukça düşüktür (**Teti, 2002**).
- İkincil işlemlerde yaygın olarak kullanılan metot geleneksel el matkaplarıdır. El matkaplarında ortaya çıkan temel sorunlar; düşük kesim kalitesi, düşük verim ve düşük geometrik hassasiyettir (**Kloche ve diğ., 2015**).

Yukarıda belirtilen problemlerden dolayı, kompozit malzemelerin işlenmesi için alternatif metotlar araştırılmıştır. Bu metotlar arasında bir soğuk şekillendirme yöntemi olan aşındırıcılı su jeti kesimi öne çıkmaktadır (**Konig, 1985**).

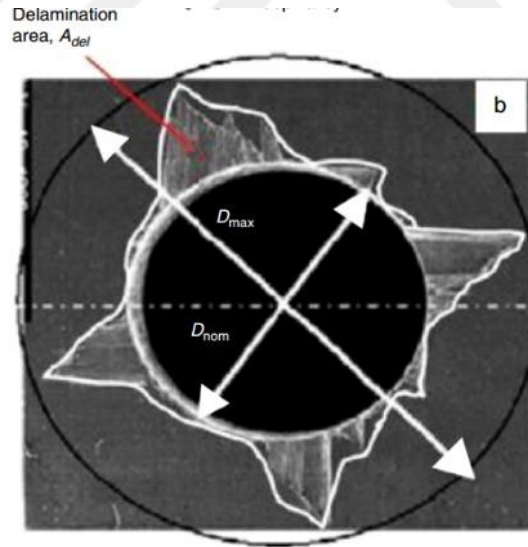


2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1 Talaş Kaldırma Yöntemi ile Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin İşlenmesi

Kompozitlerin heterojen yapıları, kesim sırasında ortaya çıkan kesici takım üzerindeki yüksek aşınma sonucu düşük kesici takım ömrü ve kesim sırasında ortaya çıkan sıcaklığın polimer matris yapısına zarar vermesinden kaynaklı olarak kompozit malzemeler işlenmesi zor malzemeler arasında gösterilmiştir (Konig, 1985).

Yüksek aşınma problemi sebebiyle kesici takım seçimi bu kesim için önemli bir girdi parametresidir (Reis ve diğ., 2005) (Shetty, 2017). Kompozit malzemelerin işlenmesi sırasında cep açma, trimleme ve delik delme operasyonları sıklıkla kullanılan operasyonlardır. Bu operasyonlarda en sık karşılaşılan problem ise delaminasyondur (Şekil 2.1.1.).



Şekil 2.1.1 : Kompozitlerde delaminasyon örneği (Panchagnula ve Palaniyandi, 2017).

Kompozit malzemelerin işlenmesi metal alaşımlardan farklıdır. Heterojen yapılarının yanı sıra malzemenin barındırdığı matris ve takviye malzemesinin farklı özelliklerine maruz kalan kesici takımdan farklı malzemeler için farklı geometri ve aşınma direnci beklenir (Teti, 2002). Bu ihtiyaçlar doğrultusunda, çoğunlukla elmas veya PCD

(Polycrystalline diamond) kaplama ve tırtık (knurl) geometrilerinin frezeleme takımlarında yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir (Gara ve Tsumarev, 2016).

2.1.1 Talaş Kaldırma Yöntemi Teorik Çalışmalar

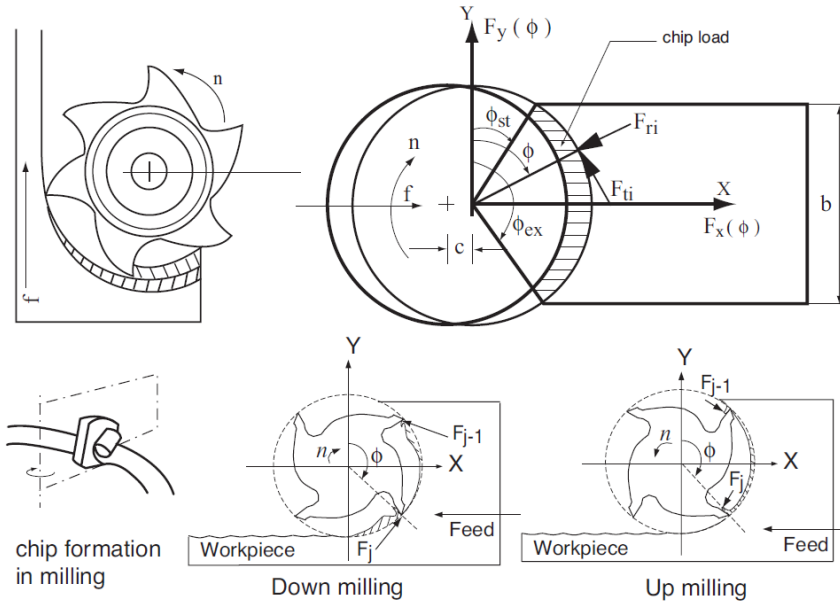
Kesme mekaniği, kesici takım ile kesilen malzeme arasında meydana gelene yüklerden faydalanarak deformasyonu açıklamak için kullanılır.

Frezeleme işlemi birden çok dişe sahip kesici takım ile gerçekleştirilen kesme işlemidir (Martellotti, 1941). Bu çalışmada parmak freze kullanılarak 3 eksen bir talaşlı imalat işlemi gerçekleştirilmiş ve temel frezeleme işlemleri için geliştirilen modeller üzerinden değerlendirilmiştir.

Hem yukarı(up) hem aşağı(down) frezeleme işlemleri çevresel veya uç freze işlemleri kapsamındadır. Frezeleme işleminde talaş oluşumu Şekil 2.1.1.1'de gösterilmiştir.

Tornalama işlemlerinden farklı olarak, frezeleme işleminde anlık talaş kalınlığının ($h(\text{mm})$), zamana göre değişen kesmenin bir fonksiyonu olarak periyodik olarak değişir. Talaş kalınlığı değişimi denklem 2.2.1.1 üzerinden gösterilebilir (Altıntaş, 2012).

$$h(\varphi) = c * \sin(\varphi) \quad (2.1.1.1)$$



Şekil 2.1.1.1. Frezelemede talaş kaldırma işleminin anlık geometrisi (Altıntaş, 2012).

Burada c ilerleme (mm/devir-diş) ve φ (°) ise anlık kesme açısıdır. İlk olarak, kesici uç ile gerçekleştirilen yüzey frezeleme işlemlerinde helezon açısı sıfır olarak kabul edilir. Teğetsel ($F_t(\varphi)$), radyal ($F_r(\varphi)$) ve eksenel ($F_a(\varphi)$) kesme kuvvetleri, kesilmemiş talaş alanı ($ah(\varphi)$) ve kenar temas uzunluğunun (a) fonksiyonları olarak aşağıdaki denklem 2.1.1.1, 2.1.1.2 ve 2.1.1.3 ile ifade edilir. K_{tc} , K_{rc} ve K_{ac} ise kesme hareketinin sırasıyla teğetsel, radyal ve eksenel yönde kesme olgusuna katkısı olan kesme kuvveti katsayılarıdır ve K_{te} , K_{re} ve K_{ae} kenar sabitleridir (Altıntaş, 2012).

$$F_t(\varphi) = K_{tc} ah(\varphi) + K_{te} a \quad (2.1.1.2)$$

$$F_r(\varphi) = K_{rc} ah(\varphi) + K_{re} a \quad (2.1.1.3)$$

$$F_a(\varphi) = K_{ac} ah(\varphi) + K_{ae} a \quad (2.1.1.4)$$

Denklem 2.1.1.1’de $h(\varphi)$, anlık kesme açısı ile hesaplanmıştır. Anlık kesme açısının kesme kuvvetlerindeki etkisi bu çalışma için kritik olmadığından, talaş kalınlığı için h_{av} (mm) olarak ortalama bir değer kullanmak yeterlidir. Bu bağlamda ortalama talaş kalınlığı denklem 2.1.1.5’te verilmiştir (Walter, 2017). Burada D_c (mm) ise kesici takım çapını temsil etmektedir.

$$h_{av} \approx f_z \sqrt{\frac{a_e}{D_c}} \quad (2.1.1.5)$$

Denklem 2.1.1.2, 2.1.1.3 ve 2.1.1.4’te talaş kalınlığının kesme kuvveti üzerindeki etkisi doğrudan görülmektedir. Denklem 2.1.1.5 incelendiğinde ise ilerleme (f_z (mm/rev)) kesme genişliğinin (a_e (mm)), takım çapına oranının talaş kalınlığı (h_{av} (mm)) üzerindeki etkisinin doğru orantılı olduğu görülmektedir. Bu bağlamda ilerleme ve kesme derinliği değerlerinin kesme kuvveti ile doğru orantılı olduğu sonucu çıkarılmaktadır. Altıntaş (2012), kesme kuvvetinin farklı açılardaki toplamaları (F_{tj} (N)) ve kesme hızını kullanarak (V_c (mm/dak)) mil motorunun kesme esnasında harcadığı gücü (P_t (W)) formülize etmiştir (Denklem 2.1.1.6). Kesme açısını anlık değil ortalama olarak kullanıldığı varsayımda, h_{av} ile bir kesme kuvveti hesaplandığında (F_{t-mean} (N)) denklem 2.1.1.7’de verilen güç denklemi ortaya çıkmaktadır. Dolayısı ile ilerleme ile kesme derinliğinin kesme gücü ile de doğru orantılı olduğu söylenebilmektedir. Denklem 2.1.1.8’de F_{t-mean} , ortalama talaş kalınlığı (h_{av}) için düzenlenmiştir. Bu durumda kesme genişliği, ilerleme ve kesme hızı parametrelerinin; harcanan güç ile doğru orantılı olduğu görülmektedir.

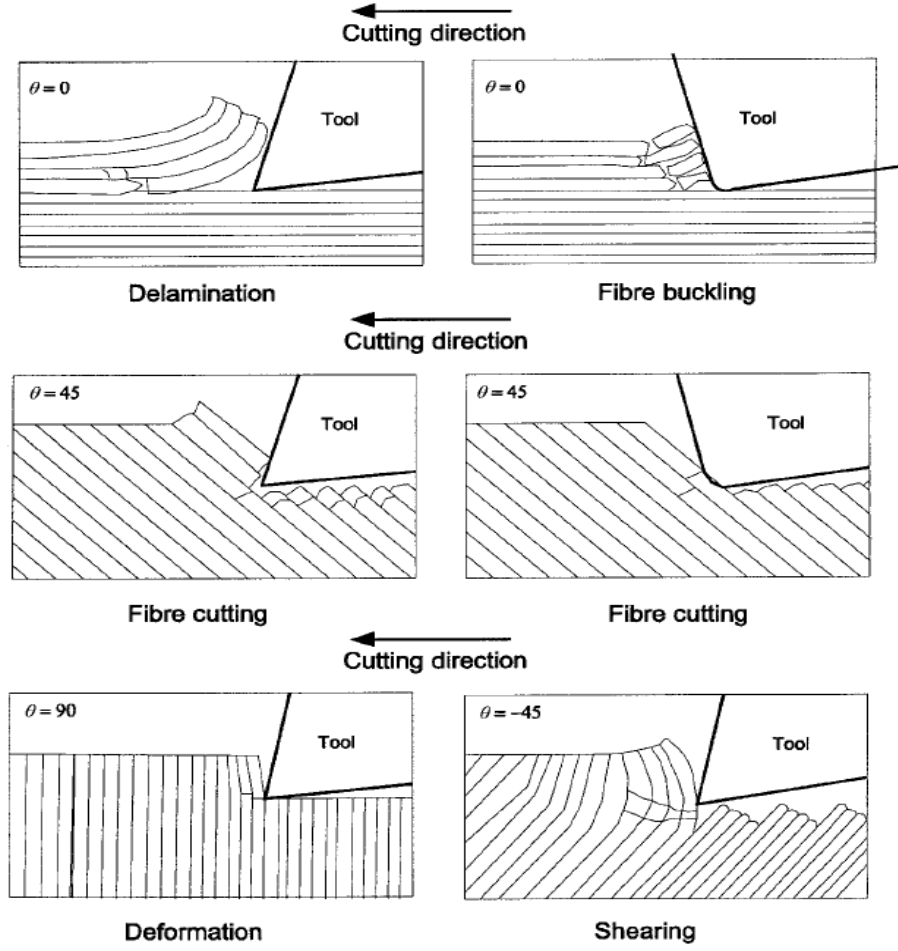
$$P_t = V_c * \sum_{j=1}^N F_{tj}(\varphi_j) \rightarrow \varphi_{st} \leq \varphi_j \leq \varphi_{ex} \quad (2.1.1.6)$$

$$P_{mean} = V_c * F_{t-mean} \quad (2.1.1.7)$$

$$F_{t-mean} = K_{tc} a h_{av} + K_{te} a \quad (2.1.1.8)$$

Kompozit malzemelerin kullanımının artması ve üretimin metodu sebebiyle ikincil işlemlere ihtiyaç duyması, kompozit malzemelerinin işlenmesini önemli bir konu haline getirmiştir. Süreci zorlaştıran etkenlerin başında takviye malzemenin kesici takım üzerindeki yüksek aşındırıcılığı gelmektedir (**Gara ve Tsoumarev, 2016**). Ayrıca fiber takviyeli polimer (FRP) için işlem sonrası karakterizasyonu talaşların yüzeyde bıraktığı deformasyondan dolayı oldukça zordur (**Zu ve Zhang, 2017**).

İşleme sırasında kompozit bir malzemenin davranışı, farklı fibere ve matris özelliklerine, fiber oryantasyonuna ve matris ve fiberlerin göreceli hacmine bağlıdır. İşleme sırasında fiber ve matris malzemesinin yanı sıra fiberlerin oryantasyonu da kesim performansını doğrudan etkilemektedir (**Komanduri, 2007**). Takım, işleme karşısında davranışı büyük ölçüde değişebilen alternatif matris ve fiber malzemelerle sürekli olarak karşılaşabilmektedir. Talaş oluşumu, elyaf oryantasyonuna ve takım geometrisine bağlı olarak kırılmaya veya kaymaya veya her ikisinin bir kombinasyonuna dayanabilmektedir (**Gordon ve Hillery, 2003**). Fiber takviyeli polimer kompozitlerin işlenmesi sırasında ortaya çıkan delaminasyon veya kötü yüzey kalitesine en büyük etkileyen biri de fiberlerin serim açısı yani fiber oryantasyonudur. Genellikle kullanılan serim açıları 0° , 30° , $\pm 45^\circ$, 60° , ve 90° 'dir. Şekil 2.1.1.2'de frezeleme işlemi esnasında, farklı serim açılına göre imal edilmiş kompozit malzemedeki elyaf katmanlarının kesme mekaniğine etkisi ve oluşan talaş formu şematize edilmiştir.



Şekil 2.1.1.2 : Ortogonal talaşlı imalatta serim açlarına göre kesme mekanikleri (Wang ve diğ., 1995).

Fiber oryantasyonuna 0° açıyla frezeleme yapıldığında, laminat, fiberlere paralel yönde gerilmelere maruz kalır. Ayrıca, kesici kenarın altındaki yüzey sıkıştırılır. Kesme kenarının önünde meydana gelen malzeme bozulması, delaminasyon, matris kırılması veya fiber-matris arayüzey hatasından kaynaklanmaktadır. Fiberlerde ve kesme kenarının altındaki matristeki her bir kırık da görülebilir ve işlenmiş yüzeyde kalır. Kesim yönü ile fiber oryantasyonu arasındaki açı arttıkça, fiberler sıkıştırılır ve fiber oryantasyonunun tersi yönde bükülür; bükülme ve basınç yükünün bir sonucu olarak fiber kopmasıyla sonuçlanır (Teti, 2002). Literatürde en kötü yüzey kalitesinin 30° ve 60° arasında gözlemlendiği yer almaktadır. Elyaf yönünde 90° 'de işlenen bir kompozitte, elyaflar bükülmeye maruz kalır ve ardından kopar. 0° elyaflı laminatların aksine, her bir elyaf ayrı ayrı kesilmelidir. Arayüzey kırıkları işlenmemiş yüzeye yayıldıkça, fiberlerin normalindeki basınç kaynaklı gerilme problem yaratmaktadır (Teti, 2002).

Bu bağlamda kompozit malzemelerde kesme kuvvetleri için (F_s , fiber yönünde) ve normal kuvvet (N_s) için denklem 2.1.1.9 ve 2.1.1.10'daki eşitlikler serim açısına bağlı olarak tanımlanmıştır (**Wang ve diğ. 1995**). Burada, θ ($^\circ$) fiber serim açısı, F_c (N) temel kesme kuvveti, F_t (N) ise teğetsel kesme kuvvetidir.

$$F_s = F_c \cos\theta - F_t \sin\theta \quad (2.1.1.9)$$

$$N_s = F_c \sin\theta + F_t \cos\theta \quad (2.1.1.10)$$

Çevresel koşulların kesme kuvvetine etkisinin incelendiği çalışmada, teğetsel kesme kuvvetinin, tek yönlü kompozit 35016IM6'nın işlenmesinde takım eğim açısına göre değişimi belirtilmiştir (**Arola ve diğ., 1996**). Aynı özelliğe çok yönlü bir kompozit için, teğetsel kesme kuvvetinin takım geometrisine ve kesme derinliğine bağlı olduğu belirtilmiştir (**Puw, 1999**). Kesme koşullarının, kesme işlemi üzerindeki etkisini araştıran, **Gara ve diğ (2017)** yaptığı çalışmada işlem parametrelerinin kesme kuvvetine etkisini incelemiş ve da, dış başı ilerleme arttıkça kesme kuvvetlerinin arttığı saptamıştır. İşlenmiş bir malzemenin yüzey bütünlüğünün; yüzey pürüzlülüğü, mikro çatlaklar ve kalıntı gerilmeleri dahil, malzemenin performansı üzerinde büyük bir etkisi vardır. Örneğin, bir iş parçasının yüzey pürüzlülüğü, iş parçası montajlı iken temas halinde bulunduğu parçalarla etkileşimini etkilemektedir. Pürüzlü bir yüzey genellikle daha hızlı aşınır ve daha yüksek sürtünme katsayısına sahip olduğundan temas ettiği yüzeyi de aşındırmaktadır. İşlenmiş bir malzemenin yüzeyindeki mikro çatlaklar erken deformasyona neden olabilir ve yüzey korozyonunu hızlandırabilmektedir. Yüzey pürüzlülüğü özellikle kompozit malzemelerin üretimi sonrasında ana parçaya montajında, montaj kalitesini montajın gerçekleştiği parçayla olan temasından dolayı doğrudan etkilemektedir. Yüksek yüzey pürüzlülüğünün olduğu yüzeylerde aşınma daha çabuk gerçekleşmektedir ve bu durumun sonucunda kırıklar veya çatlaklar görülebilmektedir (**Zu ve Zhang, 2017**). Bu nedenle, işlenmiş bir malzemenin yüzey bütünlüğü karakterizasyonu kritik öneme sahiptir.

Elyaf yapısı veya oryantasyonu nedeniyle, çapak oluşumu, delaminasyonun, alt yüzey hasarını ve matris polimer bozukluklarını içeren zayıf yüzey kalitesi, genellikle yanlış işleme koşullarının sonuçlarıdır (**Bhatnagar ve diğ., 2004**). Kesici takımdaki kesen yüzeylerin keskinliği, kesim sırasında fiberlerin kopmasında büyük öneme sahiptir. Keskinliğin yetmemesi sonucu fiberlerin kopmaması operasyon sırasında sıcaklığın artmasına sebep olmaktadır. (**Sheikh-Ahmad ve Sirdhar, 2002**). Bu durum sonucunda genişleyen ısı bölge ve artan sıcaklık polimer yapının bozulmasına sebep

olmaktadır. Bu sebeptendir ki, işlem sırasında kesici takım seçimi işlem performansı açısından önemlidir.

Bhatnagar ve diğ. (2004), cam fiber takviyeli polimer (GFRP) kompozit malzemede yaptıkları çalışmada, parmak freze ile gerçekleştirilen frezeleme işleminde ilerleme ve ayna devrinin R_a üzerinde doğrudan etkili olduğu saptamışlardır. İlerleme değerinin artırılmasıyla yüzey kalitesinin kötüleştiği; ayna devrinin artması ile daha iyi R_a değerleri elde edildiği, SEM görüntüleri ile de desteklenmiştir.

Ortogonal frezeleme işleminde, ortalama yüzey pürüzlülüğü denklem 2.1.1.11'deki gibi ifade edilmektedir (**Razfar ve Zadeh, 2009**). Burada, diş başı ilerlemenin (f_z (mm/diş)), yüzey pürüzlülüğü ($R_a(\mu m)$) değeri ile doğru orantılı olduğu görülmektedir. d (mm) ise kesici takım çapıdır.

$$R_a = 318 \frac{(f_z)^2}{4d} \quad (2.1.1.11)$$

Sıcaklık her operasyonda olduğu gibi burada da kesme karakteristiğini doğrudan etkilemektedir. Sıcaklık, polimer matrisli malzemelerde polimer yapısının bozulmasına sebep olduğu için, bu malzemelerin kesiminde daha büyük bir öneme sahiptir. İşlenmiş yüzey veya yüzey katmanı içerisinde sıcaklık yükselmesiyle reçinenin bozulması meydana gelmektedir. Isı iletkenliği, ısı akışı ile elyaf yönü arasındaki açıdaki artışla azalır ve sıcaklık, ısı iletkenliğinden büyük ölçüde etkilenir. Kesme sıcaklığı, kesme hızının artmasıyla artar. Önemli miktarda makine enerjisi, kesme hızının artmasıyla artacak olan iş parçasının plastik deformasyonu ve takım ile iş parçası arasında oluşacak olan sürtünme ile ısıl enerjiye dönüşür (**Wang ve diğ., 2016**). Kesme sıcaklığı, polimer malzemenin camsı geçiş sıcaklığını (T_g) aştığında, polimerde bozulmalar meydana gelir ve malzemenin mekanik özelliklerinde zayıflamalar gözlenir.

Kesme sıcaklığının ölçülmesi için farklı yöntemler vardır ve her yöntemin diğer yöntemlere göre avantajı ve dezavantajı vardır. CFRP levhanın freze işleminde sıcaklığın incelendiği bir çalışmada, sıcaklık ölçümleri üç tip ölçüm metodu kullanılarak yapılmıştır; takım-iş parçası kesme noktası sıcaklığı termokupl metodu kullanılarak; kesici takım yüzey sıcaklığı kızılötesi termo-grafik kullanılarak ve işlenen yüzeyin katmanlar arası sıcaklığı CFRP plakasında gömülü K-tipi termokupl kullanılarak incelenmiştir (**Yashiro ve diğ., 2013**). Deneyler süresince farklı kesme hızlarında 50-300°C arasında sıcaklık değerleri kaydedilmiştir. İncelemelerde kesici takım-iş parçası

temas noktasında 180°C sıcaklık ölçülürken, kesim yüzeyinin 0,3 mm içerisine yerleştirilen termokupl ise 104°C sıcaklık ölçmüştür. Bu durumda, kesim yüzeyine göre malzemenin 0,3 mm içerisindeki bir termokupl ile ölçüm aldıklarında kesim yüzeyine göre 76°C'lik bir farka rastladıkları görülmektedir. Bu farkın ise malzemenin ısı iletkenlik katsayısından kaynaklandığı belirtilmiştir. Özellikle havacılık sanayisinde kullanılan montaj yöntemleri incelendiği zaman kompozit malzemelere açılan delikler ve o deliklerden yapılan montajlar sonrasında taşınan yükler büyük bir öneme sahiptir. Deliklerde meydana gelen kesim hataları arasında en sık rastlanan ve en önemli yere sahip olan hata delaminasyon olarak karşımıza çıkmaktadır (**Abrao ve diğ., 2007**). **Brinksmeier ve diğ. (2011)** yaptıkları çalışmada alüminyum/CFRP/titanyum kompozit malzemelerinde yaptıkları çalışmada delik delinen yüzeylerdeki pürüzlülüğü incelemişler ve sıcaklığı yüksek olduğu deliklerde düşük yüzey kalitesine rastlamışlardır. Bu durum kesme hızının artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün arttığını göstermektedir. **Girot ve diğ.'nin (2017)** çalışmasında literatürde yer alan delaminasyon modelleri açıklanmış ve deneylerle desteklenmiştir. Bu çalışma neticesinde matkap geometrisinden dolayı (Sandvik R846), matkabın merkezinde bulunan ek bir yüke bağlı kesme ve keski kenarları boyunca basıncın üçgen bir dağılımı gösterilmiştir. Bu ilave yükün, ilerleme hızına net bir şekilde bağlı olduğu ve doğru orantılı değiştiği belirtilmiştir. Bu ilave kuvvetin, düşük ilerleme oranları için aksel itmenin % 8'ini temsil ettiği ve yüksek ilerleme oranları için % 48'e yükseldiği açıklanmıştır. **Won ve Dharan (2002)** çalışmalarında ise yer alan matkap ile delik delme işlemi için itme kuvveti ($F_t(N)$) ve kesme kuvveti ($F_c(N)$) olarak, Denklem 2.1.1.12 ve 2.1.1.13 ile gösterilen yarı emirik modelleri geliştirmişlerdir.

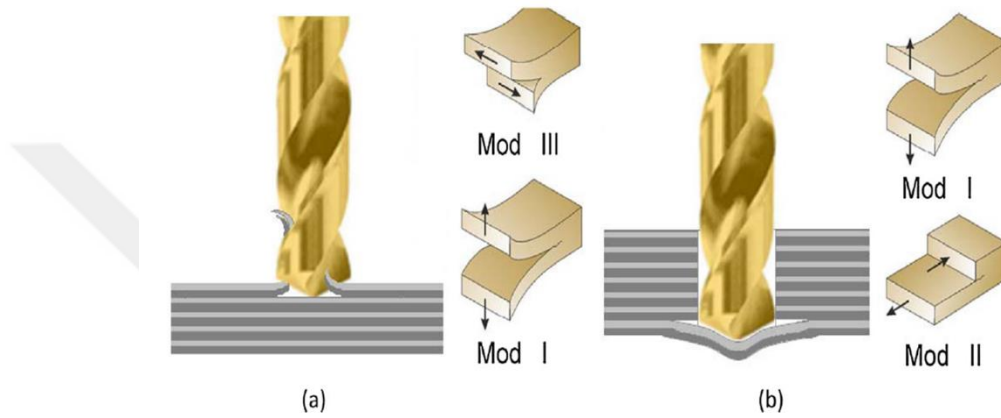
$$F_t = K_1(fd)^{1-a} + K_2d^2 \quad (2.1.1.12)$$

$$F_c = K_3(fd)^{1-a} \quad (2.2.1.13)$$

Burada K_1, K_2 ve K_3 malzemeye göre değişen ölçüler sabitlerdir, a değeri ise delik delme işleminin boyut-etki teorisinden çıkarılan malzemeye dayalı bir katsayıdır, d (mm) delik çapı, f (mm/rev) ise ilerlemedir. Bu denklemlere göre, ilerleme değerinin artmasının harcanan kuvvetleri ve dolayısıyla gücü artırdığı düşünülmektedir.

Delaminasyon oluşumunun temel ölçüt olan, delaminasyon faktörü (F_d) için kullanılan temel Denklem 2.1.1.14 verilmiştir. Burada D_0 (mm) matkap çapı, D_{max} (mm) ise delme işlemi sonrasında oluşan en geniş deformasyonun çapıdır.

$$F_d = \frac{D_{max}}{D_0} \quad (2.2.1.14)$$



Şekil 2.1.1.3 : Delik delme esnasında (a) giriş / (b) çıkış delaminasyon oluşumu (Girov ve diğ., 2017)

Delik delme işleminde delaminasyonu öngörebilmek adına birçok model geliştirilmiştir. İlk model **Ho-Cheng ve Dharan (1990)** tarafından geliştirilmiştir (Denklem 2.1.1.15). Modelde G_{IC} , Şekil 2.1.1.3'te gösterilen Mode I için enerji salım oranıdır. h (mm) matkabın altında kalan tabaka kalınlığı, E eşdeğer Young modülü ve ν ise plakanın homojenize Poisson katsayısıdır.

$$F_{kritik} = \pi \sqrt{\frac{8G_{IC}Eh^3}{3(1-\nu^2)}} \quad (2.1.1.15)$$

Ancak bu model malzemenin izotropik olduğunu ve eksenel kuvvetin deliğin orta noktasında olduğunu farzetmektedir. Fakat matkap ucunun ilerlemesiyle ortaya kuvvet farklılıkları gözardı edilmiştir. İlerleyen yıllarda anizotropik malzeme yapısına uygun kritik kuvvet modelleri de geliştirilmiştir. Bunlardan birisi, **Rahme ve diğ., (2011)** tarafından geliştirilen, denklem 2.1.1.16'da yer alan modeldir. Bu modelde kompozit malzemenin anizotropik olduğunu varsaymakta ve matkabın iki kesme kenarının

etkisini dairesel plaka üzerinde düzgün bir şekilde dağıtılmış bir yükleme ile modellemektedir.

$$F_{kritik} = 16\pi \sqrt{\frac{6G_{IC}D}{13}} \quad (2.1.1.16)$$

Bu modelde D, klasik laminant teorisinden hesaplanmaktadır. Delik delme esnasında F_{kritik} değere ulaşamadığı takdirde delaminasyon oluşmaması beklenmektedir. Bu sebeple delaminasyon oluşumunun önlemek için malzeme özelliklerine ve delik çapına uygun ilerleme değerleri kullanılmalıdır.

Ogawa ve diğ. (1997) yaptığı çalışmada delik delme operasyonunda ilerleme kesme hızı ve kesme kuvvetinin yüzey pürüzlülüğüne etkisini incelemiştir. Deney sonuçlarına göre ilerleme ve kesme hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğünün arttığı saptanmıştır.

2.1.2 Talaş Kaldırma Yöntemi Deneysel Çalışmalar

Yapılan literatür araştırması sonucunda CFRP ve GFRP üzerinde yapılan birçok çalışmaya rastlanmasına rağmen, sınırlı sayıda AFRP malzeme üzerinde çalışmaya bulunmuştur. UHMWPE malzeme üzerinde yapılan herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. İncelenen çalışmalarda ise, kompozit malzemelerin işleminde karşılaşılan delaminasyon ve kötü yüzey kalitesini minimize etmeye çalışıldığı görülmüştür.

Palanikumar'in (2008) yaptığı çalışmada ilerlemenin yüzey pürüzlülüğü üzerinde en büyük etkiye sahip olduğunu görmüştür. Yüksek kaliteli bir yüzey elde edebilmek için düşük ilerleme ve yüksek kesme hızı kullanılması gerektiğini göstermiştir. **Razfar ve Zadeh'in (2008)** GFRP üzerinde yaptığı çalışmada yüzey pürüzlülüğünün yüksek ilerleme ile arttığını, yüksek kesme hızı ile ise düştüğünü belirtmişlerdir. Aynı araştırmacılar, delaminasyon faktörünün ise, ilerleme değeri arttıkça arttığı ve kesme hızı düştükçe düştüğünü gözlemiştir. CFRP malzemelerin frezeleme işlemi sırasında yüzey pürüzlülüğünün ilerleme hızının artmasıyla birlikte arttığını, kesme hızının düşmesiyle birlikte azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca delaminasyon miktarının ilerleme hızıyla birlikte arttığı belirtilmiştir (**Reis ve Davim, 2005**). **Ghafarizadeh vd.'nin (2016)** CFRP'ler ile yaptığı incelemede, en düşük yüzey pürüzlülüğü değerlerinin fiber oryantasyonuna bağlı olarak elde edildiği ve kesme hızının sıcaklığı

en fazla etkilediği gözlenmiştir. CFRP üzerinde yapılan başka bir çalışmada ise kesme sıcaklığının malzemesinin camsı geçiş sıcaklığının üstüne çıkması sonucunda polimer yapının bozulduğu ve fiberlerin desteklenmediği belirtilmiştir (**Wang, 2016**). **Hintze ve Brüggmann (2018)** ise yaptıkları özgün bir çalışmada frezelemede eğim açısının delaminasyon üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Geliştirilen kinematik model ve deneysel doğrulama ile, yazarlar yaklaşma ve eğim açılarını laminelerin düzlemi ve fiber oryantasyonuna göre ayarlayarak, delaminasyonu azaltabileceklerini ispatlamışlardır.

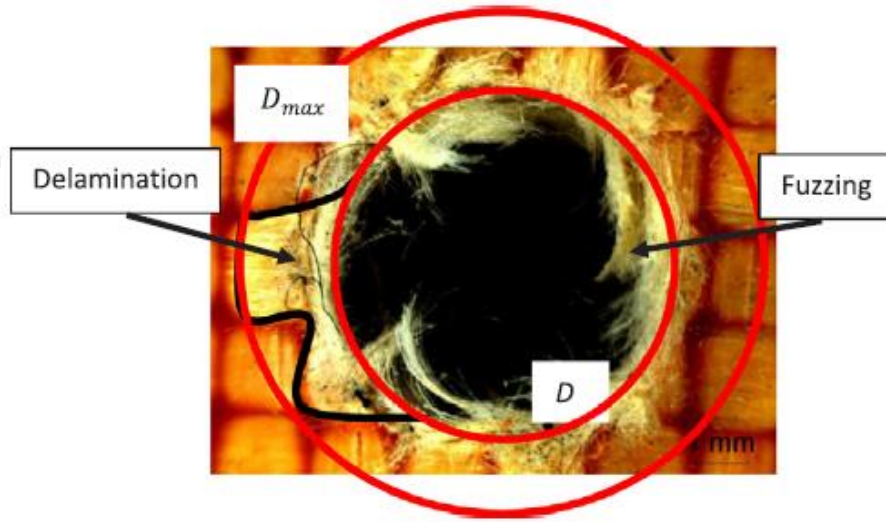
Montaj kalitesi ve doğruluğu için delik delme işleminin kalitesi büyük öneme sahiptir. Delaminasyon en sık görülen problemdir (**Abroa ve diğ., 2007**). Delaminasyon genellikle çıkışta, girişe göre daha fazladır ve matkap nokta açısı arttıkça, daha fazla artma eğilimi gösterir. Kesme parametreleri kadar, iş parçasının özelliklerinin (lamine oryantasyonu, kullanılan takviye malzemesi vb.) de delaminasyonu etkilediği bilinmektedir (**Panchagnula ve Palaniyandi, 2017**).

CFRP malzeme üzerindeki delik delme operasyonlarında kesme hızının artırılıp, besleme hızının düşürülmesi sonucunda delaminasyon miktarının düştüğü görülmüştür (**Gaitonde ve diğ., 2008**). Bazı çalışmalarda ise konvensiyonel delme ile orbital delmenin performansı karşılaştırılmış ve orbital delmenin giriş ve çıkışlarda daha kaliteli sonuç verdiği gözlenirken, işlem süresinin uzamasına dikkat çekilmiştir (**Voss ve diğ., 2016**). Bazı daha yeni çalışmalarda ise CFRP ile istiflenmiş, Alüminyum alaşımlarının delik delme performanslarının araştırılmaya başlandığı görülmektedir (**Zhang ve diğ., 2015**) (**Cheng ve diğ., 2017**). GFRP kompozitleri üzerinde de delaminasyonu araştıran çalışmalar yapılmıştır. **Mohan ve diğ. (2007)** yaptıkları öncü çalışmada, GFRP üzerinde kontrol parametrelerinin delaminasyona etkisini Taguchi yöntemi ile araştırmışlardır. Sonuç olarak numune kalınlığı ve kesme hızının yukarı yönde ve besleme hızının aşağı yönde delaminasyon üzerinde etkili olduğunu görmüşlerdir. **Khashaba ve El-Keran (2017)** GFRP üzerinde yaptıkları çalışmada, düşük kesme hızlarının yüksek tork ve yüksek delaminasyon faktörüne yol açtığını saptamışlardır. Bir diğer önemli saptamaları camın geçiş derecesine yakın sıcaklıklarda yapılan kesimin delaminasyonun azaltması olmuştur.

AFRP'nin işlenmesiyle ilgili literatürdeki çalışmalarda delik delme işlemi ağırlıklı olarak yer almaktadır. CFRP ve GFRP malzemeler standart kesici takımlarla başarılı

kesimler gerçekleştirilirken, AFRP malzemeler üzerinde bu başarıyı elde etmek oldukça zordur (Bhattacharyya ve diğ., 1998).

AFRP malzemenin delik delme operasyonu sonucu ortaya çıkan temel problemler delaminasyon, püskülleme (fuzzing), çapak (burr) ve termal hasardır ve literatürdeki araştırmalar, bu problemlerin minimize edilmesi ve yüksek kalitedeki kesimin sağlanması amacıyla yöneliktir. Bu çalışmalar aşağıdaki şekilde özetlenebilir (Şekil 2.1.2.1).



Şekil 2.1.2.1 : Aramid kompozitlerde hasar ölçümü (Díaz-Álvarez vd. 2018).

Díaz-Álvarez ve diğ. (2018), yaptığı çalışmada farklı kesici takımlar kullanmış ve sonuç olarak kesici takımın kesim performansını doğrudan etkilediği belirtmiştir. Ayrıca kaliteli kesim çıktılarını düşük ilerleme ve yüksek kesim hızıyla elde edilmiştir. Shuaib ve diğ. (2004), TiN kaplı kesici takım ile AFRP üzerinde delik delme işlemini gerçekleştirmiştir. Malzeme kalınlığı ve kesme parametrelerinin kesim performansını doğrudan etkilediği belirtmiştir Won ve Dharan (2002), AFRP ve CFRP malzemeler için delik delme operasyonunu incelemiş ve ilerlemenin artmasıyla kesme kuvvetlerinin arttığını belirtmiştir. Liu ve diğ. (2018), basma kuvvetinin çıkış delaminasyonuna sebep olduğunu belirtmiş ve yüksek ilerleme parametresiyle delaminasyonunun arttığını gözlemlemiştir. Ayrıca yüksek ilerlemenin püskülleme üzerinde artışa neden olduğunu incelemiştir. Shuaib ve diğ. (2004), yaptığı çalışmada, diğer araştırmalarda olduğu gibi, basma kuvvetinin ilerleme ile birlikte arttığını gözlemlemiş, ayrıca kesme hızının artmasıyla da basma kuvvetinin arttığını belirtmiştir. AFRP malzemenin kayrojenik koşullar altında delik delme

operasyonunu gerçekleştirmiş ve bu koşullar altında kesici takım ömründe olumlu sonuçlar elde etmiştir fakat kayrojenik koşullar altında yüksek thrust force gözlemlenmiş ve bu durumun delaminasyonu arttırdığı belirtilmiştir.

Bao ve diğ. (2018), çalışmasında AFRP malzeme üzerinde delik delme işlemini gerçekleştirmiş ve en yüksek kesim sıcaklığının Tg değerinin üstüne çıktığını ayrıca yüksek oranda çapak ile karşılaştığını belirtmiştir.

2.2 Aşındırıcılı Su Jeti Yöntemi ile Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin İşlenmesi

Aşındırıcılı su jeti işleminin bir çok farklı endüstride, işlenmesi zor malzemeler için kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Basınçlı su ve kum karışımının hedef malzemenin kesimi için kullanıldığı bir işlemin birçok farklı avantajı vardır.

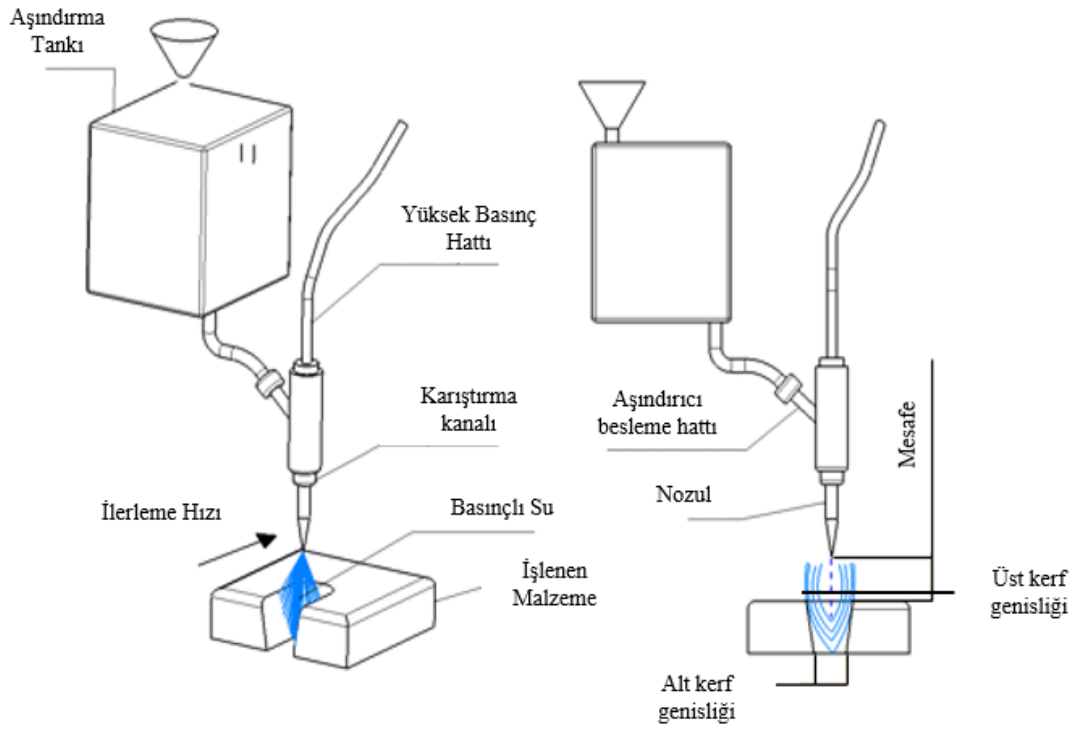
(Wang, 1999).

Bu işlem geleneksel kesim yöntemleriyle kıyaslandığı zaman birçok avantajı bulunan geleneksel olmayan kesim işlemidir **(El-Domiaty ve diğ., 1996):**

- 1- İşlem sırasında su kullanıldığı için ısı alan oluşmaz.
- 2- Doğada bulunan birçok farklı malzemenin kesimi için kullanılabilir.
- 3- Diğer işleme yöntemleriyle kıyaslandığı zaman yüksek yüzey kalitesi elde edilebilir.
- 4- Düşük maliyetli sarf malzeme kullanımından dolayı işlemin maliyeti de düşüktür.
- 5- Güvenli ve çevreci bir işlemdir.

Aşındırıcılı su jeti 4 temel alt bileşenden oluşmaktadır. Pompa, yüksek basınçlı su sağlar. Aşındırıcı kum iletim sistemi ve püskürtme sistemi su jetini oluşturur. CNC kontrol sistemi, nozıl ve işlenen malzeme arasındaki hareket kabiliyetini sağlar. Tezgâhın alt bölümünde bulunan yatak, su jeti kesim operasyonu sırasındaki akan enerjini emer **(Kulekci, 2002)**. İşlem kontrol parametreleri 3 ana gruptan oluşur. Hidrolik basınç ve aşındırıcı kumun akış oranı, malzemenin kesimi için gerekli olan kesim enerjini sağlar. İlerleme hızı, mesafe, orifis açısı birim hacimdeki kesim enerjisinin belirler. Nozıl çapı ve orifis çapı, nozıl montajından gelen sabit parametrelerdir. Aşındırıcı kumun sertliği ve kalitesi de özellikle işlenmesi zor

malzemelerin kesiminde işlemin başarılı olması ve malzemenin kesim kalitesinde rol oynayan parametrelerdir.



Şekil 2.2.1 : Aşındırıcı su jeti işlemi, kontrol parametreleri ve kerf oluşumu. Temel bir işlem şeması Şekil 2.2.1.'de verilmiştir. ASJ sistemlerindeki son gelişmelerin çoğunlukla kesim derinliğini artıran 400 MPA' dan daha fazla basınç sağlayabilen pompa teknolojisinin kapasitesi ve güvenilirliği üzerinde durmuştur (Folkes, 2009) (Hoogstarte ve diğ., 2006).

2.2.1 Aşındırıcı Su Jeti Yöntemi Teorik Çalışmalar

Momber ve Kovacevic'in (1998) yaptıkları çalışmalar sonucunda elde ettikleri aşındırıcı kum taneciklerinin kinetik enerjisi denklem 2.2.1.1'de verilmiştir.

$$Ep = \frac{\pi}{12} d_p^3 \rho_A V_P^2 \quad (2.2.1.1)$$

Yukarıda belirtilen enerji modelinde, Ep , aşındırıcı kum kinetik enerjisi (J), d_p , aşındırıcı kum çapı (mm), ρ_A , su-kum karışımı özkütlesi (kg/m^3) ve V_P , su hızını (m/s) göstermektedir. Modele göre aşındırıcı taneciklerin çapı, karışımın özkütlesi ve suyun hızının artması sonucunda kinetik enerjinin arttığı görülmektedir. Karışımın özkütlesinin hesabı, su ve kum karışımı için denklem 2.2.1.2'de verilmiştir.

$$\rho_K = \frac{M_W + M_A}{V_W + V_A} \quad (2.2.1.2)$$

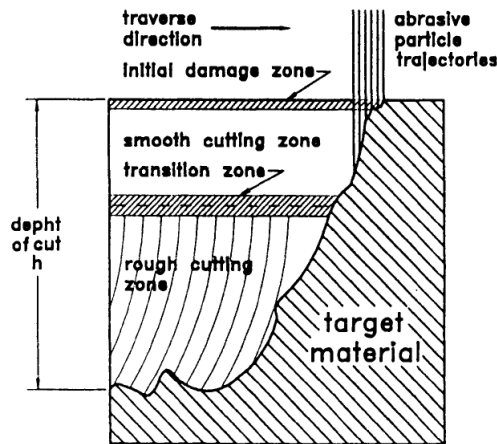
Denklem 2.2.1.2’de ρ_K , karışımın özkütlesi (kg/m^3), M_W suyun kütlesi (kg), M_A , aşındırıcı kum kütlesi (kg), V_W , suyun hacmi (m^3), V_A , aşındırıcı kum hacmi (m^3) olarak gösterilmiştir. Denklem 2.2.1.2’den anlaşıldığı üzere karışımın içerisindeki aşındırıcı kum miktarının artması sonucunda karışımın özkütlesi de artmaktadır ve bunun sonucunda karışımın kinetik enerjisi artmaktadır.

Denklem 2.2.1.3’de gösterilen diğer bir değişken ise suyun jet hızıdır. Akış halindeki suyun aşındırıcı tanecikleri taşıdığı göz önünde bulundurularak, suyun hızının aynı zamanda aşındırıcı taneciklerin hızına eşit olduğu kabul edilebilir ve bu hızın hesaplanabilmesi için **Wang (1999)**’ın çalışmasında, denklem 2.2.1.3’te verilen jet hızı modeline ulaşılmıştır.

$$V_j = \sqrt{\frac{2P_w}{\rho_w}} \quad (2.2.1.3)$$

Denklem 2.2.1.3’de V_j , suyun hızı (mm/dak), P_w , suyun basıncı (MPa), ρ_w , suyun özkütlesi (kg/m^3) olarak gösterilmiştir. Denklem 2.2.1.3’de anlaşıldığı üzere suyun çıkış basıncı arttırıldığında suyun hızı artmaktadır suyun hızının artması ise aynı zamanda aşındırıcı taneciklerin hızının da artması anlamına gelmektedir, bunun sonucu olarak da taneciklerin kinetik enerjisi artmaktadır.

Yüksek kinetik enerji ile çıkan aşındırıcı taneciklerin daha derin yüzeye nüfuz edebilecekleri, **Momber ve Kovacevic’ in (1998)** şekil 2.2.1.1’de gösterilen kesme modelini ile izah edilebilir.



Şekil 2.2.1.1 : Aşındırıcılı taneciklerin parçayı işleme mekaniği modeli (**Momber ve Kovacevic, 1998**).

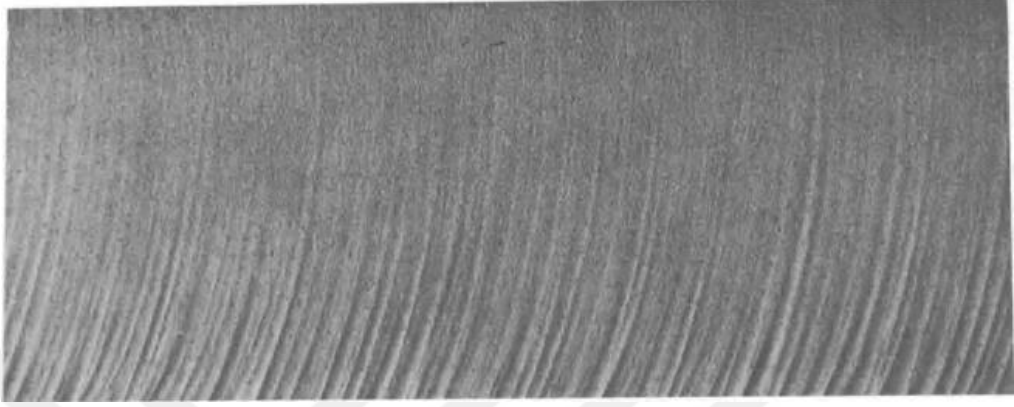
Şekil 2.2.1.1'deki modele göre işleme sırasında malzeme üzerinde 3 hasar bölgesi oluşmaktadır. İlk hasar bölgesi (initial damage zone) aşındırıcı taneciklerin parça yüzeyine çarpmasıyla aşındırma işleminin başladığı bölgedir. İkinci bölge olan düzgün bölge (smooth zone) aşınmanın başladığı yüzeyden sonra gelen ilk bölgedir ki bu bölgede yüzey pürüzlülüğü düşüktür ve bu bölgeye taneciklerin ulaşması zor olmamaktadır. Üçüncü ve son bölge olan kaba bölge (rough zone), taneciklerin hedef parçayı işlenen parçadan ayırdıkları son bölgedir ve bu bölgede oluşan dalga izleri (striations mark) yüzünden burada yüzey kalitesi iyice bozulmakta ve yüzey pürüzlülüğü yüksek çıkmaktadır. İkinci bölgeden üçüncü bölgeye taneciklerin geçebilmesi için aradaki bölgeye geçiş bölgesi (transition zone) denmektedir. Tüm bu bölgelerin sonunda ulaşılabilen en yüksek kesme derinliği elde edilmekte, taneciklerin kinetik enerjilerinin fazla olduğu oranda daha yüksek kesme derinliğine inilebileceği ve sonuçta her bölgenin genişleyeceği anlaşılmaktadır.

Diğer yandan **Wang (1999)**, yaptığı çalışmada teorik kesme derinliğini hesaplayabilmiştir. Denklem 2.2.1.4'te D_t , kesme derinliği (mm), m_a , aşındırıcı kum oranı (kg/dk), P_w , su basıncı (MPa), D_j , orifis çapı (mm), U , ilerleme hızı (mm/dk), ρ_w , suyun özkütlesi (kg/m³) olarak gösterilmiştir. Denklem 2.2.1.4'te verilen bu modele göre, teorik derinliği artırmak için parçacık debisini, su basıncını artırmak veya kesme hızını düşürmek gerekmektedir. Bu fiziksel bağlantı, **Momber ve Kovacevic'in (1998)** modeli ile birlikte düşünüldüğünde, bu projede yapıldığı gibi ince tabakalar üzerinde yapılan, boydan-boya kesimlerde (through cut), teorik derinliği artırmak, kesim yüzeyinin sadece düzgün bölge içinde kalarak daha düşük yüzey pürüzlülüğü oluşması ile sonuçlanacağı anlamına gelmektedir. Buna mukabil, teorik derinliğin düşük olması, boydan boya kesim başarılı olmuş olsa bile, kaba bölge oluşumuna sebep vereceği için yüzey pürüzlülüğü artacak ve kalite düşecektir.

$$D_t = k \frac{m_a P_w}{D_j U \rho_w} \quad (2.2.1.4)$$

Momber ve Kovacevic'in (1998) çalışmalarında, üçüncü bölge dahilinde ortaya çıkan yüzeylerin görselleri şekil 2.2.1.2'de sunulmuştur. Şekil 2.2.1.2'de de fiziksel olarak görülebileceği gibi üçüncü bölgede oldukça kötü yüzey kalitesi elde edilmektedir. Endüstride kesim parametreleri iyi ayarlanmadığı takdirde, buradaki gibi bir görüntüyle karşılaşılması sık rastlanılan bir durumdur.

Özetle, iyi yüzey kalitesi için özellikle sabit kalınlıktaki tabakaların boydan boya kesimlerinde, teorik parça kesme derinliğini değerin artırılması ve bunun sonucunda ikinci bölge alanının arttırılarak kesim yüzeyinin ikinci bölge (smooth zone) içerisinde kalması gerektiği yönünde bir genelleme yapılabilir. Bunun için de ilerleme değerin düşürülmesi, kum miktarının ve basıncın arttırılması gerekmektedir.

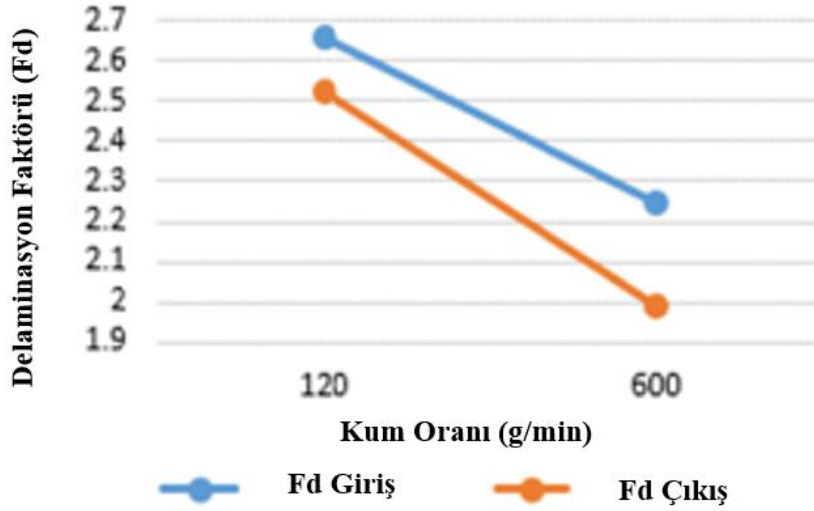


Şekil 2.2.1.2 : Üçüncü bölgenin görüldüğü örnek (**Momber ve Kovacevic,1998**).

2.2.2 Aşındırıcılı Su Jeti Yöntemi Deneysel Çalışmalar

Kerf oluşumu ve yüzey pürüzlülüğü aşındırıcılı su jeti işlemi için iki kalite çıktısıdır. Bazı araştırmacılar Mg bazlı nanokompozitler, Inconel 718, ASJ teknolojisine sahip Granit gibi çeşitli malzemelerin kesilmesini araştırmış ve kerf kalitesini ve işlem performansının diğer yönlerini etkileyen parametreleri incelemiştir (**Mardi ve diğ., 2017**) (**Ay ve diğ., 2010**) (**Karakurt ve diğ., 2012**).

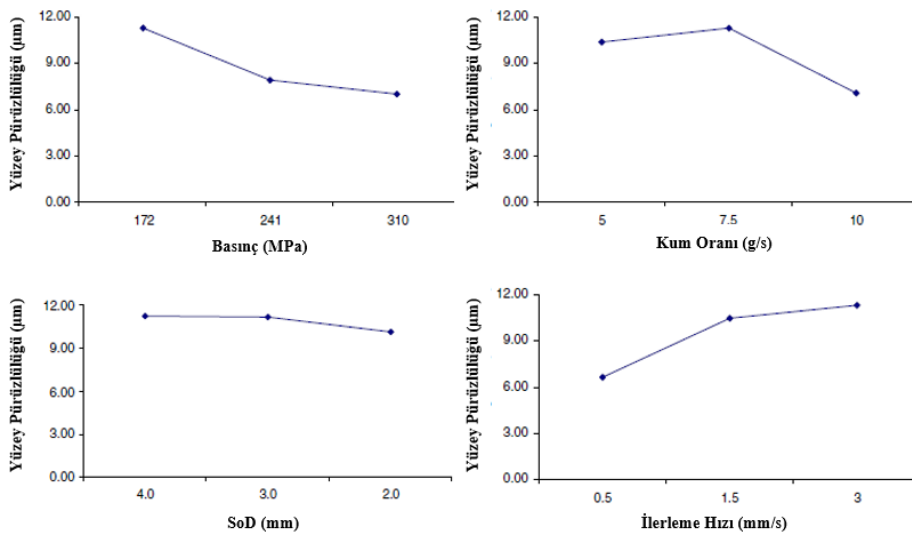
Son yıllarda ASJ çalışmalarının çoğunda, parametrelerin yüzey morfoloji üzerindeki etkileri araştırılmıştır. **Wong ve diğ., (2016)**, ANOVA ve RSM kullanarak, hidrolik basınç, aşındırıcı akış hızı, durma mesafesi ve travers oranının kerf oranı üzerindeki etkisi, hibrit karbon/cam takviyeli polimerlerde delaminasyon etkisini araştırmıştır. Bulguları mesafe, kerf oranını en aza indiren ve ardından ilerleme hızını belirleyen en önemli faktördür. Ayrıca aşındırıcı kum oranının, delaminasyon üzerindeki etkili faktördür, bunu ilerleme hızı ve basınç takip etmiştir. Şekil 2.2.2.1'de yaptıkları çalışma sonrası aşındırıcı kum oranının delaminasyon faktörüne olan etkisi gösterilmiştir.



Şekil 2.2.2.1 : Aşındırıcı Kum Oranının Delaminasyon Faktörüne Etkisi (Wong ve diğ., 2016).

Madhu ve Balasubramanian (2017) CFRP kompozitlerin işlenmesi için parametre etkilerini araştırmış ve yüksek basınç ve düşük mesafenin daha iyi yüzey çıktısına yol açtığı sonucuna varmıştır.

Bazı yazarlar, GFRP üzerinde ASJ kullanımını da incelemiştir. Azmir ve Ahsan (2009) kerf oranını ve yüzey pürüzlülüğünü araştırmış, aynı kerf oranı ve yüzey pürüzlülüğü cinsinde aşındırıcı malzemelerin basınç ve tipinin en önemli faktör olduğunu bulmuşlardır. Yaptıkları çalışma sonrasında parametrelerin yüzey pürüzlülüğüne olan etkilerini elde ettikleri sonuçlar şekil 2.2.2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2.2.2 : Aşındırıcı Su Jeti İşlemi Girdi Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi (Azmir ve Ahsan, 2009).

Ayrıca mesafenin ve ilerleme hızının azaltılmasının da kaliteyi arttırdığı sonucuna varmışlardır. **Paul ve diğ. (2002)**, çentik, çapak oluşumu vb. gibi çeşitli kalite özelliklerine ve cam elyaf metal laminelerde (GFML) doğrulanmış etkinliğe dayalı bir kesme kabiliyeti parametresi geliştirmiştir. Genel olarak, GFML'lerin de ASJ tarafından etkin bir şekilde işlenebileceği sonucuna varmışlardır. Ayrıca, bazı çalışmalar işlem performansı, parametre etkisinin araştırılmasından sonra optimizasyon yöntemleri ile iyileştirilmiştir. **Dhanawade ve Kumar (2018)**, CFRP' de yüzey pürüzlülüğünü en aza indirmek için Gray Rasyonel Analiz yöntemini kullanmıştır. **Chakraborty ve Mitra (2018)** ASJ operasyonu için Grey Wolf Hunting Algoritmasını kullanmıştır. **Ibraheem ve diğ. (2015)**, GFRP malzeme üzerinde yaptıkları çalışmada delik delme işlemi yapmışlardır ve bu işlemi çeşitli optimizasyon teknikleriyle iyileştirmişlerdir.

2.3 Kullanılan Malzemeler

Savunma sanayisinde ağırlık dayanım oranı her zaman önemli bir yere sahip olmuştur. Kompozit malzemelerin savunma sanayisinde kullanımının artmasındaki en önemli sebep budur. Havacılık, deniz ve kara savunmasında uygulanan zırh teknolojilerinde de düşük ağırlıkta yüksek seviyede balistik koruma en önemli amaçlardan biridir. Bu noktada akla gelen ilk malzemeler hafif balistik koruyucu malzemeler olan AFRP ve UHMWPE'dir.

2.3.1 Aramid Fiber Takviyeli Polymer Kompozit (AFRP)

Aramid ve diğer yüksek mukavemetli elyaflar ve kumaşlar, kurşun geçirmez yelekler gibi kişisel koruyucu ekipmanların yanı sıra savunma sanayisinde araç zırhlama ve yapısal yapısal parça olarak da kullanılmaktadır (**Zhu, 2014**). Aramid elyafları, 1970'lerin başında tanıtılan yüksek mukavemetli malzemelerdir. 1973 yılında Dupont firması tarafından patentli olarak geliştirilen bu malzemenin endüstrideki ismi Kevlar'dır. Aramid elyafları çoğunlukla polimer matrisleri olan kompozitlerde kullanılır; yaygın matris malzemeleri epoksiler ve polyesterlerdir. Aramid kompozitlerin sıklıkla kullandığı ürünler arasında tipik balistik koruyucular (kurşun geçirmez yelek ve zırh), spor malzemeleri, lastikler, halatlar, basınçlı kaplar olarak sıralanabilir (**Callister, 2006**). Özellikle, düşük ısı iletkenliği ve yüksek gerilme

mukavemeti, aramid fiberleri birçok farklı uygulamada için çok uygun hale getirir **(Bersani, 2012)**.

Aramid fiberler enerji emilimi, sıkıştırma yetenekleri ve sıcaklık koruması yönünden üstün özelliklere sahiptir. Bu nedenle balistik koruyucularda kullanılır. Balistik koruyucu olarak kullanılan aramid, metal balistik malzemelerle kıyaslandığı zaman düşük ağırlık ile üstün mekanik özellikleri ile öne çıkmaktadır. **(Omidvar, 2013)**.

Aramid elyaflar kayrojenik ortamlarda üstün mekanik özellikleri sebebiyle kullanılırlar, özellikle dayanım gerektiren halatlar yapısal malzeme kullanımları bulunmaktadır **(Ventura ve Martelli, 2009)**.

Şu anda, motor muhafaza sistemlerinde yaygın olarak kullanılan tek dokuma kumaş DuPont tarafından geliştirilen Kevlar 49'dur **(Liu ve diğ., 2018)**.

Aramid takviyeli kompozit malzemelerde, matris malzemesi olarak kullanılan epoksi reçineler, çok çeşitli özellikler sağlayan çok yönlü bir reçine sistemidir. Epoksiler en yaygın kullanılan reçine malzemeleridir ve havacılıktan uzaya kadar birçok uygulamada kullanılır.

Farklı uygulama ihtiyaçlarını karşılamak için farklı seviyelerde performansa sahip çeşitli epoksiler mevcuttur. Belirli bir performans ihtiyacını karşılamak için başka malzemelerle formüle edilebilirler veya diğer epoksilerle karıştırılabilirler **(Mazumdar, 2002)**. Bu mekanik ve operasyonel avantajlar nedeniyle aramid elyaf ve epoksi, AFRP pre-preg sistemlerinde birlikte kullanılmaktadır. Otoklav kütleme işleminden sonra AFRP'nin mekanik özellikleri Çizelge 2.3.1.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.3.1.1 : AFRP Malzeme Mekanik Özellikler **(Callister, 2006)**.

| Özellik | Aramid Fiber Takviyeli Polimer Matrix Kompozit (Fiber Oranı is 0.6) |
|---------------------------------|---|
| Density (gr/cm ³) | 1.4 |
| Maksimum Çekme Dayanımı (MPa) | 3600 |
| Maksimum Tensile Modulüsü (GPa) | 124 |
| Tg (°C) | 190-210 |

2.3.2 Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen (UHMWPE)

UHMWPE, hafiflik ve mukavemet gerektiren uygulamalarda kullanılan üçüncü nesil bir fiber türüdür. UHMWPE, yüksek mekanik mukavemet ve kimyasal direnç, düşük

yoğunluk ve üretim maliyetleri gibi üstün özelliklere sahiptir (**Li ve diğ., 2016**). Bu nedenle savunma ve biyomedikal endüstrilerinde giderek daha fazla kullanılmaktadır. UHMWPE'nin malzeme özellikleri Çizelge 1'de sunulmaktadır.

Bir Alman şirketi 1950'lerde geliştirilen UHMWPE1990'ların sonlarından beri ticari kullanım için hem elyaf olarak hem de kombine formda (çubuklar ve levhalar) mevcuttur (**Kurtz, 2015**). UHMWPE aşınmaya ve darbelere karşı dayanıklı olduğundan, kullanılabileceği birçok yeni uygulama alanı vardır. Bu uygulamalar arasında oltalar, vücut zırhı, tırmanma kordonları ve yelken ekipmanları bulunmaktadır (**Chen, 2016**). UHMWPE, uzun karbon bağları sayesinde tribolojik uygulamalarda önemli bir role sahiptir (**Liu ve diğ., 2013**). Tıp endüstrisinde de implant olarak başarıyla kullanılmıştır. Son zamanlarda, eklemlerde esnekliği arttıran düşük yüzey sürtünmesine sahip olduğundan kalça ve diz protezlerinde daha popüler hale gelmiştir (**Çolak ve diğ., 2019**).

Çizelge 2.3.2.1 : UHMWPE Malzeme Mekanik Özellikleri (**Kurtz, 2015**).

| Özellik | Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen |
|--------------------------------|---|
| Density (gr/cm ³) | 0.97 |
| Maksimum Çekme Dayanımı (MPa) | 3500 |
| Maksimum Tensile Modülüs (GPa) | 123 |
| Tg (°C) | 180 |
| Darbe Dayanımı, izod (J/m) | >1070 (no break) |

UHMWPE'nin en büyük potansiyeli, kişisel vücut zırhı olarak savunma endüstrisinde (**Liu ve diğ., 2018**) (**Giray ve Bailey, 2019**). Bu endüstrideki kullanımı için gerekli, UHMWPE malzemenin sahip olduğu mekanik özellikleri arasında yüksek çekme mukavemeti, uzun vadeli yapısal stabilite, enerji emme yetenekleri, ve hafiflik sıralanabilir (**Mahfuz ve diğ., 2011**) (**Karahan ve diğ., 2014**).

UHMWPE ile yapılan ve balistik uygulamalarda kullanılan kasklar, darbe enerjisini emme kapasitesi ve hafifliğini nedeniyle birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir (**Lee ve diğ., 2018**)

Bitlisli ve Yazici (2019) yaptıkları çalışmada, EN1522 standardına göre çeşitli kompozitler üzerinde balistik performans deneyleri gerçekleştirdiler ve UHMWPE ile en yüksek sonucun gözlemlenmişlerdir (EN 1522, 1998).

2.4 Çok Amaçlı Eniyileme Yöntemleri

2.4.1 Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO)

Parçacık sürü optimizasyonu (PSO) günlük hayatta karşılaşılan problemlerin çözümünde sürü halinde hareket eden hayvanların kaçma veya yiyecek bulma durumlarında gerçekleştirdiği rastgele davranışlarla amaçlarına ulaşabildikleri olguları taklit edilerek kullanılan sezgisel algoritmalarıdır (**Kennedy, 2011**).

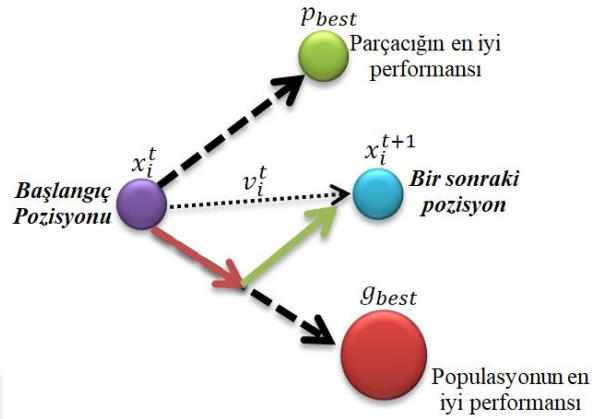
PSO algoritmasında popülasyon sürüyü, parçacık ise sürüdeki her bir bireyi temsil etmektedir. Her parçacığın bir pozisyonu ve hızı vardır. Parçacıkların pozisyonları arama uzayındaki konumlarını temsil ederken, hız değeri ise her bir iterasyonda gerçekleştirecekleri ilerleme miktarını gösteren bir değişkendir. PSO algoritmasında, $f: S \rightarrow \mathbb{R}$ optimizasyon probleminin amaç fonksiyonu olsun. S , d-boyutlu arama uzayı ve n sürüdeki parçacık sayısı olsun. Bu durumda arama uzayı $S = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ şeklinde gösterilir. Her bir parçacığın pozisyon vektörü $X_i = \{x_{i,1}, x_{i,2}, x_{i,3}, \dots, x_{i,d}\} \in S$ ile gösterilir. Her bir parçacığın hız vektörü $V_i = \{x_{i,1}, x_{i,2}, x_{i,3}, \dots, x_{i,d}\} \in S$ ile gösterilmektedir. Her iterasyonda parçacığın en iyi amaç fonksiyonu değerine sahip pozisyon değeri (pbest) kaydedilir. Benzer şekilde sürünün en iyi amaç fonksiyonu değerine sahip amaç fonksiyonu (gbest)da kaydedilir. Parçacıkların bir sonraki iterasyonda ilerleyecekleri yön, pbest ve gbest ile hesaplanır. Parçacıkların hız ve pozisyon denklemleri sırasıyla Denklem (4.1.1.1) ve Denklem (4.1.1.2)'de gösterilmiştir.

$$v_i^{t+1} = w * v_i^t + c_1 * r_1 * (pbest_i^t - x_i^t) + c_2 * r_2 * (gbest_i^t - x_i^t) \quad (4.1.1.1)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (4.1.1.2)$$

Denklemlerde $i = 1, 2, 3, \dots, n$ şeklindedir. Her i parçacığının t iterasyonunda sahip olduğu hız ve konum değerleri ırasıyla v_i^t ve x_i^t şeklinde gösterilmiştir. w başlangıç ağırlığı, c_1 ve c_2 ise öğrenme faktörleridir. c_1 parçacığın kendi geçmiş tecrübesinden etkilenmesi ile ilgili iken ve c_2 popülasyonun tecrübesinin etkisi üzerinedir. r_1 ve r_2

(0,1) aralığında rasgele sayılardır. Bu sayede parçacıklar Şekil 4.1.1.1'de şematize edildiği gibi, kendi tecrübeleri ve popülasyonun tecrübesi üzerinden hareket etmektedirler (Poli ve diğ., 2007).



Şekil 2.4.1.1 : Parçacık Sürü Optimizasyonu algoritmasının temel mekanizması (Kahya, 2018).

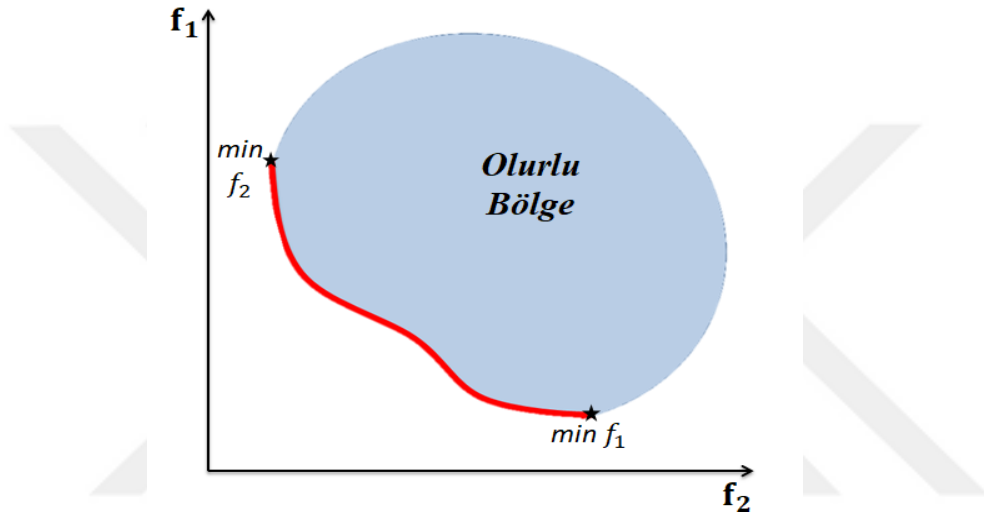
2.4.1.1 Çok Amaçlı Parçacık Sürü Optimizasyonu (ÇAPSO)

Günlük hayatta karşılaşılan problemlerde sadece tek bir çıktı üzerinden iyi sonuçlar alınırken diğer çıktılar göz ardı edilmesi sonucunda tam olarak istenilen sonuca ulaşılamamaktadır.

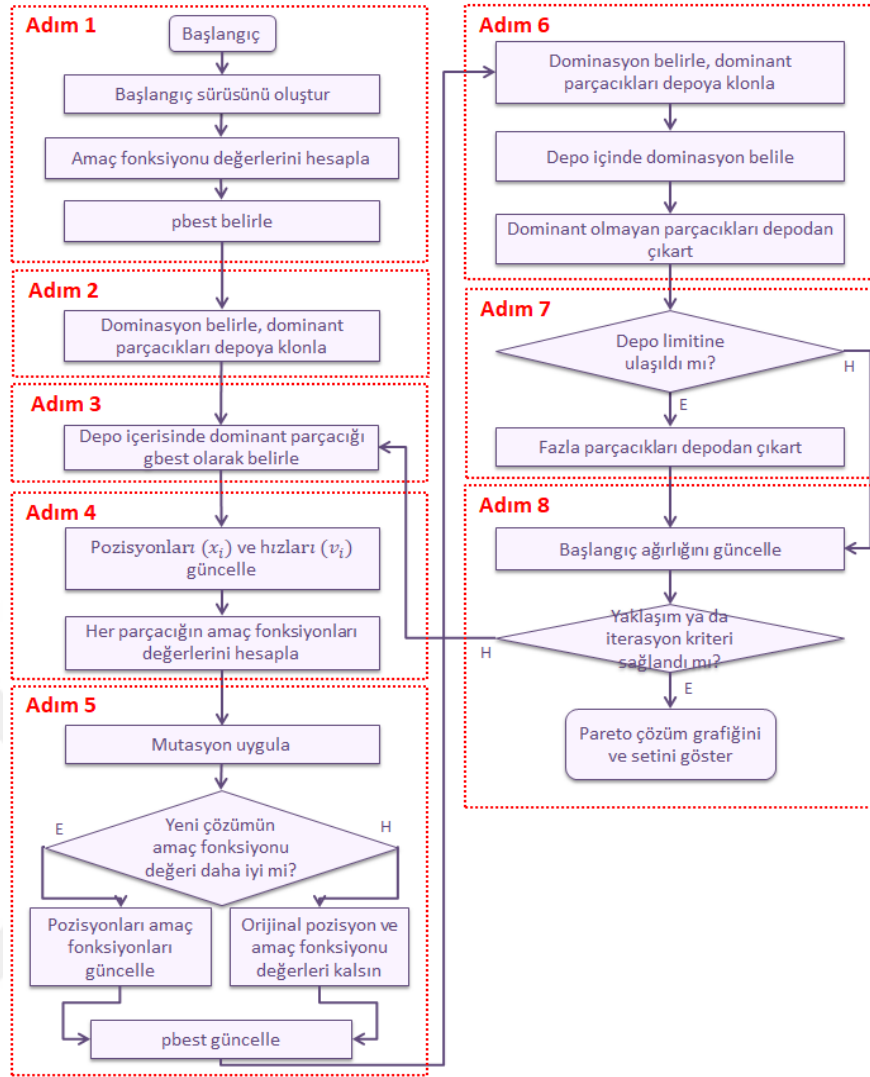
Özellikle imalat problemleri düşünüldüğünde birden fazla çıktı üzerinde iyileştirmeler yapılması gerekmektedir ve çok amaçlı optimizasyon birden fazla çıktı üzerinde yapılacak iyileştirmelerin tek bir çatı altında toplanmasını sağlamaktadır.

Çok amaçlı optimizasyon sonucunda tek bir optimal sonuca ulaşılabilmesi için çıktıların ağırlıklandırılması veya sıralanması gibi seçenekler kullanılmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında tek bir sonuç yerine birden fazla işlem çıktısı için en iyi değerlerin elde edilebileceği optimal çözüm setleri elde edilmesi amaçlanmıştır. Bahsi geçen optimal çözüm seti her çıktı için amaç fonksiyonu değerinin iyileştirildiği doğrultuda toplanmış olan, Pareto optimal olarak adlandırılan verilerdir. Şekil 4.1.2.1'de Pareto optimal veri seti şematize edilmiştir. Mavi boyalı alan olurlu bölgeyi temsil ederken kırmızı çizgi üzerindeki her bir nokta ise Pareto optimal setin bir üyesidir.

Çok-Amaçlı Parçacık Sürü Optimizasyonu ilk kez 2004 yılında Coello vd. tarafından geliştirilmiştir (Coello ve diğ., 2004). Tez çalışması kapsamında kullanılan ÇAPSO algoritmasının çalışma prensibi temelde PSO algoritması gibidir. Ancak lider birey seçimi sırasında tek bir lider seçmek yerine depo olarak adlandırılan bir alanda birden fazla sayıda lider parçacık seçilir. Popülasyondaki diğer parçacıklar ise bu lider parçacıklar önderliğinde hareket ederler. Şekil 2.4.1.1.1.'de örnek Pareto optimal çözüm seti ve Şekil 2.4.1.1.2'de ise Kahya'nın (2018) yüksek lisans tez çalışmalarında geliştirilen ÇAPSO algoritmasının akış şeması yer almaktadır.



Şekil 2.4.1.1.1 : Pareto optimal çözüm seti (Kumar ve Minz, 2014).



Şekil 2.4.1.1.2 : ÇAPSO algoritması akış şeması (Kahya, 2018).

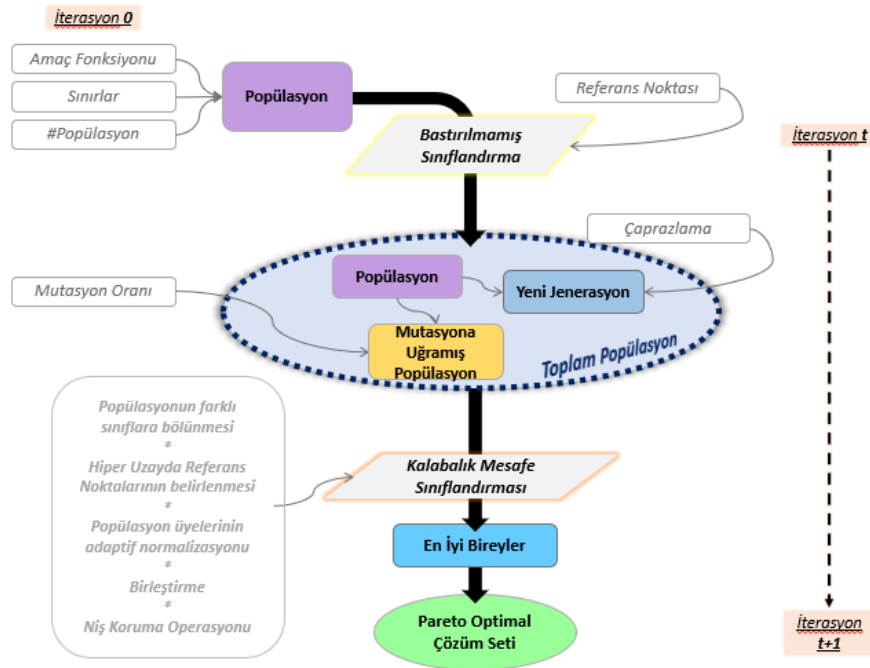
Amaç fonksiyonu olarak deney sonuçları ile elde edilen regresyon modelleri kullanılmıştır. Karar değişkenleri olarak işlem parametreleri atanmıştır. Problemin kısıtlarını ise işlem parametrelerinin alt ve üst limitleri oluşturmaktadır.

2.4.2 Bastırılmamış Sınıflandırılmış Genetik Algoritma (NSGA-III)

Bilinen bir evrimsel optimizasyon algoritması olan Genetik Algoritma (GA), Turing (1950) tarafından bu fikrin ilk ortaya konduğu 19. yüzyılın ortalarından bu yana her yıl kullanılmaktadır. GA'lar, doğada gözlemlenen doğal seçilimden esinlenen etkili evrimsel arama ve optimizasyon yöntemleridir. Karmaşık çok boyutlu arama alanında en iyinin hayatta kalması ilkesine göre en iyi çözümü arar (Beasley ve diğ., 1993). GA, benzersiz bir optimum çözüm yerine en iyi çözümleri içeren bir çözüm seti

ürettiğinden, uygulanabilir bölgedeki birçok çözüm tek bir çalışma ile değerlendirilebilir. Bu çözümler seti de Pareto optimal çözüm seti olarak kullanılabilir.

Orijinal NSGA-II'ye benzeyen NSGA-III, modern genetik algoritmaların bir üyesi olarak adlandırılır ve hızlı baskın olmayan arama mekanizmasının imkanına sahiptir. Ayrıca, NSGA-III, iyi yayılmış referans noktalarının sağlanması ve adaptif olarak güncellenmesi ile farklılık gösterir (Deb, 2014). Bu prosedür, çözümlerin çeşitliliğini sağlar.



Şekil 2.4.2.1 : Bastırılmamış Sınıflandırılmış Genetik Algoritması Akış Şeması.

3 DENEY DÜZENİĞİNİN HAZIRLANMASI, DENEYLERİN YAPILMASI VE ANALİZLER

3.1 Numunelerin hazırlanması

Bu tez çalışmasında savunma sanayinde, yapısal ve zırh malzemesi olarak kullanılan 2 kritik malzeme üzerinde talaşlı imalat ve ASJ kesiminin avantaj ve dezavantajlarını ortaya çıkarmak için karşılaştırmalı deneysel analiz ve eniyileme çalışması yapılmıştır. Bu malzemeler, Aramid Fiber Takviyeli Polimer (Aramid, Ticari isim: Kevlar™) ve Ultra Yüksek Modulus Polietilen (UHMWPE) olarak seçilmiştir (Çizelge 3.1.1). Bu malzemelerden, UHMWPE kara savunma araçlarında, AFRP pilot kaskları ve benzeri kişisel koruma ürünlerinde kullanıldığı için firma açısından istenilen boyut doğruluğu, yüzey kalitesi ile maliyet verimli olarak üretilmesi büyük önem taşımaktadır.

Çizelge 3.1.1 : Deneysel için kullanılan kompozit malzemelerin serim özellikleri.

| Pre-preg | Reçine | Elyaf | Kalınlık(mm) | Örgü Tipi | Katman Miktarı |
|----------|------------|------------|--------------|-----------|----------------|
| AFRP | Epoksi | Aramid | 4 | Twill | 22 |
| UHMWPE | Polietilen | Polietilen | 4 | Twill | 20 |

Tez çalışması kapsamında 2 farklı tipte pre-preg malzeme kullanılmış ve 2 farklı tipte elyaf takviyesine sahip kompozit numunelerin üretimi yapılmıştır. Üretimi yapılmış olan farklı kompozit malzemenin öncelikli olarak 3D CAD verileri oluşturulmuştur. Oluşturulan CAD verileri kullanılarak pre-preglerin istenilen boyutlarda üretilmesi için gerekli olan katmanların kesiminde kullanılacak olan katma kesme makinesi için girdi CAM verileri oluşturulmuştur ve Şekil 3.1.1 katman kesme operasyonu görseli gösterilmiştir. Pre-preg numuneler -18 °C soğuk odadan 12 saat öncesinde çözülebilmeleri için çıkarılmıştır. Katmanlarının kesiminin tamamlanmasının ardından serim işlemi için hazırlıklar başlamıştır.



Şekil 3.1.1 : Çözünmüş pre-preglerin katman kesme işlemi.

Pre-preg malzemelerin serimi nem, sıcaklık ve basınç parametrelerinin kontrollü olduğu temiz odada (clean room) gerçekleştirilmiştir. Pre-preg serim işlemlerinin temiz odalarda yapılmasının nedeni üretim esnasında katmanlar arasında herhangi bir impürite oluşmasına engel olmaktır. Ayrıca pre-preglerde kullanılan reçinelerin kürlenmemiş haldeyken maruz kalacakları sıcaklık ve basınç değerleri kürlenme öncesinde kimyasal yapılarında bozulmalara sebep olabilmekte ve bunun doğal sonucu olarak kürlenme sonrasında hazırlanan kompozit malzemenin mekanik özellikleri etkilenebilmektedir.

3.1.1 AFRP Numunelerin Hazırlanması

Öncelikli olarak Aramid fiber takviyeli epoksi matris kompozit malzemenin serim işlemi gerçekleştirilmiştir. Serimin yapılacağı plaka (kalıp) üzerinde yüzey işlemlerini gerçekleştirilmiştir. Yüzey hazırlığı işlemi için kalıp yüzeyi MEK (Metil Etil Keton) ile silinmiş hemen ardından kuru bez ile temizlenmiştir. Yüzey temizliğinin yapılmasının ardından serimi tamamlanan pre-preg'in kalıptan çıkarılabilmesi için kalıba 2 kat freekote 700NC kalıp ayırıcı uygulanmıştır. Uygulanan her kat arasında 15 dk beklenmiştir. Hazırlanan kalıplar daha sonra sıcaklık, basınç ve havanın kontrollü olduğu temiz odada serime alınmıştır. Aramid epoksi pre-preg'in tek katman kalınlığı 0,18 mm'dir. 4 mm kalınlık için Çizelge 3.1.1.1'de gösterilen serim tablosuna göre 22 kat serim yapılmıştır (Şekil 3.1.1.1).



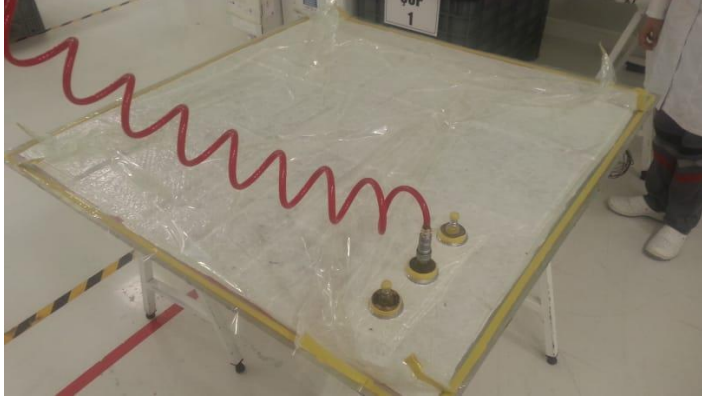
Şekil 3.1.1.1 : Serim işlemine hazır aramid fiber pre-preg katmanlar.

Çizelge 3.1.1.1 : AFRP Pre-preg serim tablosu

| Katman | Malzeme | Oryantasyon |
|-----------|---------------|-------------|
| P1 | ARAMİD/EPOKSİ | 0/90 |
| ARA VAKUM | | |
| P2 | ARAMİD/EPOKSİ | 0/90 |
| P3 | ARAMİD/EPOKSİ | 0/90 |
| P4 | ARAMİD/EPOKSİ | 0/90 |
| P5 | ARAMİD/EPOKSİ | 0/90 |
| P6 | ARAMİD/EPOKSİ | 0/90 |
| ARA VAKUM | | |
| P7 | ARAMİD/EPOKSİ | 0/90 |
| P8 | ARAMİD/EPOKSİ | 0/90 |
| P9 | ARAMİD/EPOKSİ | 0/90 |
| P10 | ARAMİD/EPOKSİ | 0/90 |
| P11 | ARAMİD/EPOKSİ | 0/90 |
| ARA VAKUM | | |
| P12 | ARAMİD/EPOKSİ | 0/90 |
| P13 | ARAMİD/EPOKSİ | 0/90 |
| P14 | ARAMİD/EPOKSİ | 0/90 |
| P15 | ARAMİD/EPOKSİ | 0/90 |
| P16 | ARAMİD/EPOKSİ | 0/90 |
| ARA VAKUM | | |
| P17 | ARAMİD/EPOKSİ | 0/90 |
| P18 | ARAMİD/EPOKSİ | 0/90 |
| P19 | ARAMİD/EPOKSİ | 0/90 |
| P20 | ARAMİD/EPOKSİ | 0/90 |
| P21 | ARAMİD/EPOKSİ | 0/90 |
| P22 | ARAMİD/EPOKSİ | 0/90 |

Serim esnasında ilk katmanın serilmesinin ardından herhangi bir boşluk kalmaması, ilk katmanın kalıp yüzeyine homojen olarak serilmiş olması için ara vakum işlemi uygulanması gerekmektedir. Ara vakum işleminde, serim yapılan kalıp yüzeyi ve serimi yapılan pre-preg'i kaplayacak şekilde vakum poşeti sarılır. Daha sonra bu

vakum poşetinin sızdırmazlığı sağlanır ve vakum poşetin üstüne açılan bir delikten vakum portu geçirilerek, vakumlama işlemi uygulanır (Şekil 3.1.1.2.).

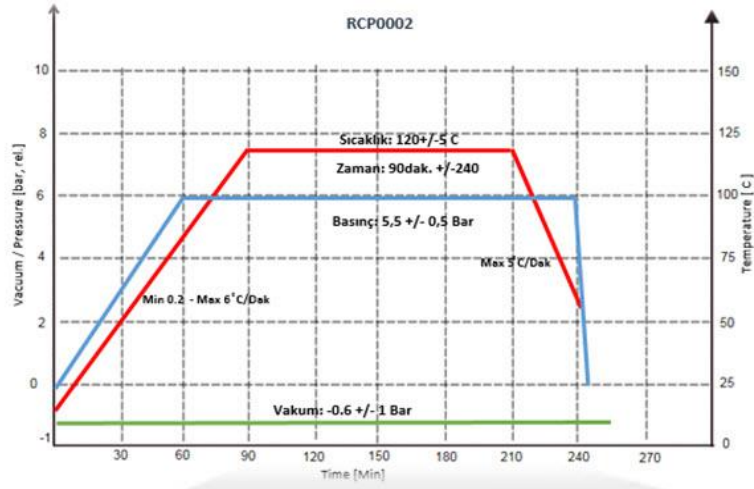


Şekil 3.1.1.2 : Final vakumlama işlemi tamamlanmış pre-pregler.

Ara vakum işleminde, parçanın vakumlanabilmesi için en az 15 dakika beklemek gerekmektedir. 15 dakika sonra vakum poşeti parça üzerinden çıkarılarak serim işlemi devam eder. Katmanlar arasında da boşluk olmaması için her 5 katmandan sonra ara vakum işlemi uygulanmıştır. 22 kat serimin tamamlanmasının ardından serilecek olan vakum torbasının parça üzerine yapışmaması için parçanın en az 2,5 cm dışarısından ayırıcı film serilmiştir. Ayırıcı filmin ardından ise vakum poşetleme işleminde uygulanacak olan vakumun parça yüzeyine homojen olarak dağılabilmesi için vakum keçesinin serimi yapılmıştır.

Bu işlemlerin tamamlanmasının ardından final vakum poşetleme işlemine geçilmiştir. Final vakum poşetleme işlemi ara vakum poşetleme işlemine göre çok daha kritiktir. Bunun sebebi parça otoklav fırınına final vakum poşetleriyle birlikte girmesinden kaynaklanmaktadır. Otoklav fırınında kaldığı süre boyunca parça vakum poşetiyle birlikte polimerizasyon işlemine girmiştir. Otoklav işlemi sırasında parça ve kalıp üzerindeki sıcaklık miktarının takip edilebilmesi için hem parçaya hem de kalıba termokupullar takılmıştır. Vakum poşetleme işleminde uygulanmış olan vakum poşeti, otoklav reçetesinde parçanın maruz kalacağı en yüksek sıcaklık değeri olan 180°C uygun Airtech WL7400 olarak seçilmiştir. Vakum poşetinin yanı sıra sızdırmazlığın sağlanması için kullanılacak olan dolgu macunları (sealant) da 120 °C 'ye uygun olarak seçilmiştir. Vakum poşetinin kapatılmasının ardından minimum vakum değerinin 0,7 bar aralığında olması beklenmiştir. Vakum kaçak testinde 0,05 bar/2 dakika limit kabul edilmiştir. Uygun değerlerin sağlanmasının ardından otoklav işlemine geçilmiştir. Epoksi reçinenin polimerizasyon işleminin gerçekleştirilebilmesi için otoklav fırınında

serimi tamamlanan numune plaka sıcaklık ve basınca maruz bırakılmıştır. Şekil 3.1.1.3'te uygulanan olan sıcaklık ve basınç reçetesi gösterilmiştir.



Şekil 3.1.1.3 : AFRP pre-preg için otoklav reçetesi.

Otoklav işlemi sonrasında, talaşlı imalat ve ASJ operasyonları için hazır olan AFRP plakları şekil 3.1.1.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.1.1.4 : Otoklav işlemi tamamlanmış olan AFRP kompozitler.

3.1.2 UHMWPE Numunelerin Hazırlanması

Bu numunenin özelliklerinin farklı olması sebebi ile üretimin temiz odada yapılması gerekmemektedir. Ayrıca serim işleminin temiz odada yapılmaması maliyeti önemli ölçüde düşürmektedir. UHMWPE malzemesinin, FOD (Foreign Object Damage)

kontrollü ortamın sağlandığı üretim alanında, serimlerin yapılması yeterlidir. Tek katman kalınlığının 0,2 mm olduğu UHMWPE'den elde edilen son ürün için de diğer numunelerde olduğu gibi 4 mm kalınlık belirlenmiştir. 20 kat serilen malzeme için kesimler yapılmış sonrasında serim işlemi tamamlanmıştır. Serim işleminin tamamlanmasının ardından uygun parametre değerleri ile 270 ton ve 123 °C – 127 °C arasında sıcak presleme işlemi yapılmıştır. 270 ton sıcak pres uygulama sırasında, numuneye oluşan kimyasal tepkimelerden çıkan gazların uzaklaştırılması için gaz alma işlemi uygulanmıştır. Bu işlemlerin tamamlanmasının ardından UHMWPE malzemeden elde edilen numune hazır hale getirilmiştir. Bu malzeme ile ilgili daha fazla detay, firma için ticari sır niteliğinde olup paylaşılamamaktadır.

3.2 Talaşlı İmalat Deneyleri ve Analizleri

Talaşlı imalat deneylerinin gerçekleştirildiği ROBOTEK VMC 514 marka CNC işleme merkezi Şekil 3.2.1'de yer almaktadır. Bu işleme merkezi özellikle büyük hacme sahip parçaların işlenebildiği geniş bir alan sunmaktadır. Bunun yanı sıra kompozit malzemelerin işlenmesi sırasında ortaya çıkan tozların, tezgaha zarar vermemesi için gerekli önlemler alınmıştır.

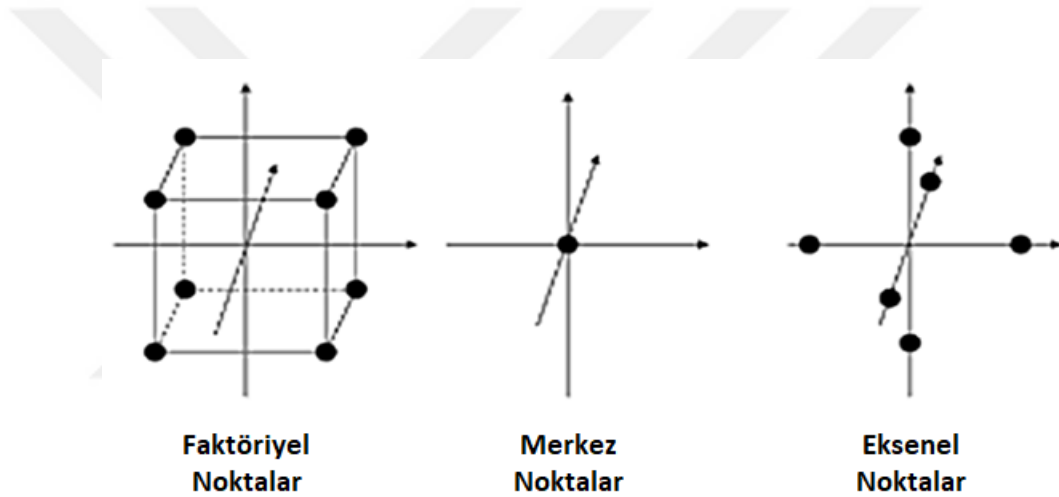


Şekil 3.2.1 : Talaşlı imalat deneylerinin gerçekleştirildiği Robotek marka CNC işleme merkezi

Talaşlı imalat ve su jeti denelerinde yapılan her operasyon için Deney Tasarım (DT) yöntemi kullanılmıştır. Bu çalışmada bir Deney tasarımı alt yöntemi olan Merkezi Kompozit Tasarım kullanılmıştır. Merkezi Kompozit Tasarım (MKT), Box ve Wilson tarafından 1951 yılında 3k faktöriyel tasarımlara alternatif olarak öne sürülmüştür

(Box ve Wilson, 1951). Şekil 3.2.2.'de üç faktörlü bir MKT tasarımının örneklem noktaları yer almaktadır. Her operasyon için tasarımlar, MINITAB™ adlı istatistiksel çalışmalarda güçlü bir ticari yazılım ile oluşturulmuştur.

MKT ile tasarlanan deneylerin çıktıları ile işlem parametreleri arasındaki bağıntıyı ortaya koyabilmek için Yanıt Yüzey Metodolojisi (YYM) kullanılmıştır. Yanıt Yüzey Metodolojisi (YYM) istatistiki ve matematiksel yöntemlerin bir araya gelmesiyle oluşmuş, süreçlerin geliştirilmesi, iyileştirilmesi ve optimizasyonunda kullanılan bir yöntemdir. YYM ilk kez Box ve Wilson (1951) tarafından yayımlanan “Optimum koşullar için deneysel başarı” isimli yayınında tanıtılmıştır. YYM, hali hazırda kullanılan ürünlerin geliştirilmesi ya da yeni ürün tasarım, geliştirme ve formülasyon fazlarında kullanılan bir yöntemdir (Khuri ve Cornell, 1996).



Şekil 3.2.2 : k = 3 tasarım değişkeni için MKT örneklemeleri (Fukuda ve diğ., 2018).

YYM'de İşlem parametreleri bağımsız değişkenler olarak adlandırılmaktadır. İşlemin çıktıları ise yanıtlar olarak nitelendirilmektedir. Deneyler sonucunda işlem parametreleri ile çıktılar arasındaki bağıntı ikinci dereceden regresyon modelleri ile elde edilmiştir. Bu regresyon modeli ile yanıt yüzey grafikleri oluşturulmuştur. Regresyon modelleri işlem girdileri ile çıktıların tahmininde kullanılmak üzere optimizasyon aşamasında kullanılmıştır.

YYM metodolojisinin bir çıktısı olarak Varyans Analizinden (Analysis of Variance-ANOVA) de faydalanılmıştır. Varyans Analizi ile işlem parametrelerinin çıktılar üzerindeki etkisi incelenmiştir. YYM ile oluşturulan modeller %95 güven aralığında oluşturulmuştur. Bu bağlamda varyans analizi tablosunda yer alan f-değeri ve p-değerinin anlamları şu şekildedir: p-değeri, f-değeri üzerinden hesaplanmaktadır. Eğer

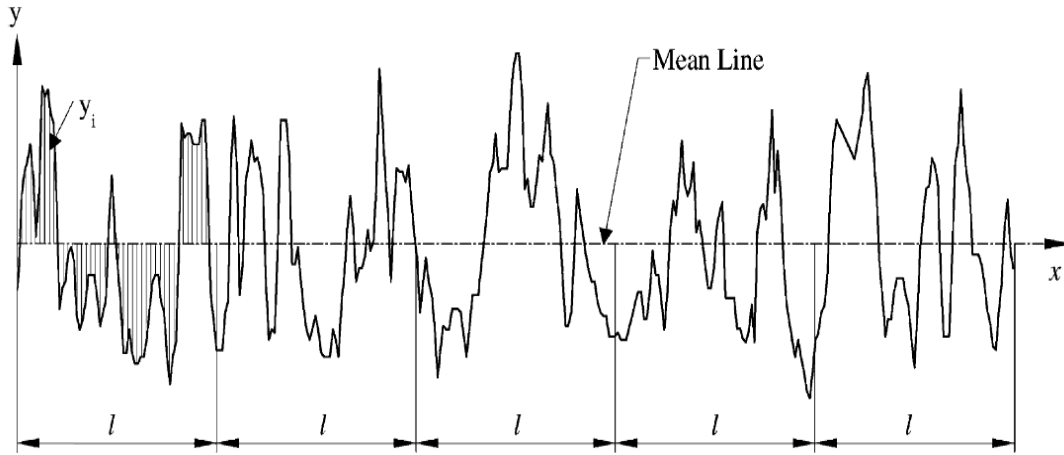
bir işlem parametresinin p-değeri 0,05'ten küçük ise o işlem parametresi söz konusu çıktı üzerinde etkili bir parametredir. Ve de p-değeri ne kadar küçük ise parametre o kadar fazla etkilidir. P-değerlerinin eşit olduğu durumda ise f-değerleri incelenir. F-değeri büyük olan parametrenin daha etkili olduğu yorumu yapılabilmektedir (Myers ve Montgomery, 2016).

Deneylerin tamamlanmasının ardından, bu çalışmada işlenen yüzeylerin kalitesi, ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) ölçülerek belirlenmiştir. R_a , aritmetik ortalama yükseklik parametresi olarak da adlandırılmaktadır. Bunun sebebi, yüzeydeki örneklem uzunluğu boyunca bulunan çukur ve tümseklerin ortalama çizgisine mutlak mesafelerinin ortalaması olarak hesaplanmasıdır (Şekil 3.2.3). Matematiksel tanımı ve uygulamsal formülasyonu sırasıyla Denklem (3.2.1) ve Denklem (3.2.2) ile gösterilmiştir.

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad (3.2.1)$$

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (3.2.2)$$

Denklem (3.2.1)'de, l örneklem uzunluğunu, y(x) ise yüzey çizgisini göstermektedir. Denklem (3.2.2)'de, n örneklem uzunluğu içerisindeki veri sayısını göstermektedir.



Şekil 3.2.3 : Ortalama yüzey pürüzlülüğü gösterimi (Quintana ve diğ., 2010).

Bu çalışmada ortalama yüzey pürüzlülüğünün ölçümü Mitutoyo SurfTest SJ-210 markalı bir yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

Sıcaklık değerlerin ölçümünde ise kızılötesi sıcaklık ölçüm cihazı kullanılmıştır. Deneyin tamamlanmasını hemen ardından kızılötesi ölçüm cihazı işlenen yaklaştırılmış ve sıcaklıklar ölçülmüştür.



Şekil 3.2.4 : İşlenen yüzeydeki sıcaklık ölçüm görseli.

3.2.1 AFRP Talaşlı İmalat Deneyleri ve Analizleri

3.2.1.1 AFRP Trim Operasyonu

AFRP Trim operasyonunda takım yolu 50 mm'dir. Yapılan deney tasarımı sonrasında 20 adet deney için şekil 450 mm x 50 mm boyutlarında numune plaka kullanılmıştır. Operasyona ait görüntüler Şekil 3.2.1.1.1'de verilmiştir.



Şekil 3.2.1.1.1 : AFRP Trim operasyonu.

Aramid elyafla güçlendirilmiş polimer reçineli kompozit malzemenin, trim operasyonuna ait, kesme genişliği (a_e), ilerleme (f_z), kesme hızı (V_c) parametrelerinden oluşan deney tasarımı; yüzey pürüzlülüğü (R_a), sıcaklık (T), güç (P), işlem süresi (t) ve enerji tüketimi (E) parametrelerinden oluşan deney sonuçları Çizelge 3.2.2.1.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2.1.1.1 : AFRP Trim operasyonuna ait deney tasarımı ve deney sonuçları.

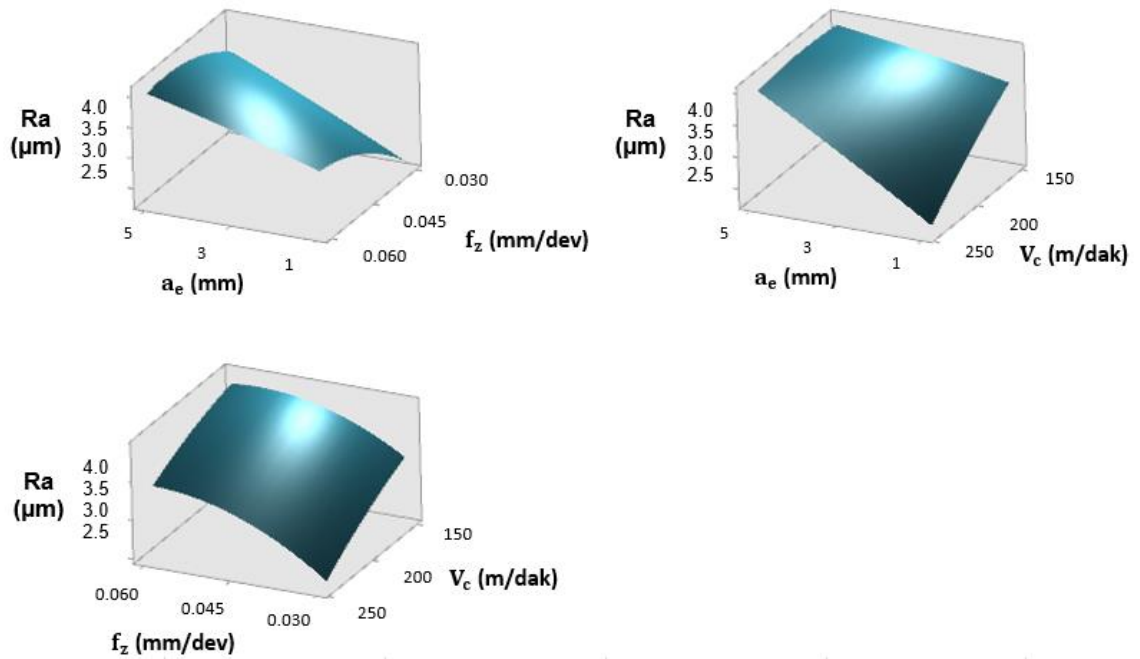
| Deney No. | a_e (mm) | f_z (mm/dev) | V_c (mm/dak) | R_a (μm) | T ($^{\circ}\text{C}$) | P (W) | t (sn) | E (J) |
|------------------|------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--|---|---------------------------|----------------------------|---------------------------|
| 1 | 5,0 | 0,045 | 195 | 3,874 | 20,07 | 4628 | 1,7 | 7883 |
| 2 | 4,2 | 0,036 | 222 | 3,616 | 20,93 | 4504 | 1,9 | 8414 |
| 3 | 4,2 | 0,054 | 168 | 3,966 | 16,73 | 4582 | 1,6 | 7550 |
| 4 | 4,2 | 0,036 | 168 | 3,771 | 17,80 | 4462 | 2,5 | 10986 |
| 5 | 4,2 | 0,054 | 222 | 3,843 | 18,00 | 4887 | 1,3 | 6108 |
| 6 | 3,0 | 0,045 | 195 | 3,670 | 18,73 | 4353 | 1,7 | 7414 |
| 7 | 3,0 | 0,045 | 195 | 3,772 | 17,90 | 4413 | 1,7 | 7516 |
| 8 | 3,0 | 0,045 | 195 | 3,524 | 17,77 | 4378 | 1,7 | 7456 |
| 9 | 3,0 | 0,045 | 240 | 3,042 | 21,40 | 4660 | 1,4 | 6449 |
| 10 | 3,0 | 0,060 | 195 | 3,723 | 19,30 | 4493 | 1,3 | 5739 |
| 11 | 3,0 | 0,045 | 195 | 3,309 | 17,57 | 4328 | 1,7 | 7371 |
| 12 | 3,0 | 0,045 | 195 | 3,509 | 18,57 | 4393 | 1,7 | 7482 |
| 13 | 3,0 | 0,045 | 150 | 3,717 | 16,60 | 4123 | 2,2 | 9128 |
| 14 | 3,0 | 0,030 | 195 | 2,738 | 18,97 | 4115 | 2,6 | 10514 |
| 15 | 3,0 | 0,045 | 195 | 3,290 | 16,57 | 4315 | 1,7 | 7350 |
| 16 | 1,8 | 0,054 | 222 | 3,080 | 16,57 | 4118 | 1,3 | 5147 |
| 17 | 1,8 | 0,036 | 168 | 3,254 | 16,00 | 4015 | 2,5 | 9886 |
| 18 | 1,8 | 0,036 | 222 | 2,602 | 17,90 | 4213 | 1,9 | 7869 |
| 19 | 1,8 | 0,054 | 168 | 3,566 | 15,83 | 4208 | 1,6 | 6932 |
| 20 | 1,0 | 0,045 | 195 | 2,943 | 16,57 | 4298 | 1,7 | 7320 |

AFRP malzemenin trim operasyonuna ait yüzey pürüzlülüğü için varyans analizi Çizelge 3.2.1.1.2’de verilmiştir. Deney tasarım parametrelerinden kesme genişliği, ilerleme, kesme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi incelendiğinde; en etkili

parametrenin kesme genişliği olduğu görülmektedir. Diş başı ilerleme ve kesme hızı da yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkilidir.

Çizelge 3.2.1.1.2 : AFRP Trim operasyonuna ait yüzey pürüzlülüğü için varyans analizi tablosu.

| Kaynak | Serbestlik Derecesi | Kareler Toplamı | Kareler Ortalaması | F-değeri | P-değeri |
|---------------|---------------------|-----------------|--------------------|----------|----------|
| ae (mm) | 1 | 1,3291 | 1,3291 | 41,31 | 0 |
| fz (mm/dev) | 1 | 0,6024 | 0,6024 | 18,72 | 0,001 |
| Vc (mm/dak) | 1 | 0,4763 | 0,4763 | 14,8 | 0,003 |
| Hata | 16 | 0,5118 | 0,0322 | | |
| Toplam | 19 | 2,9196 | | | |



Şekil 3.2.1.1.2 : AFRP Trim Operasyonuna ait yüzey pürüzlülüğü için yanıt yüzey grafikleri.

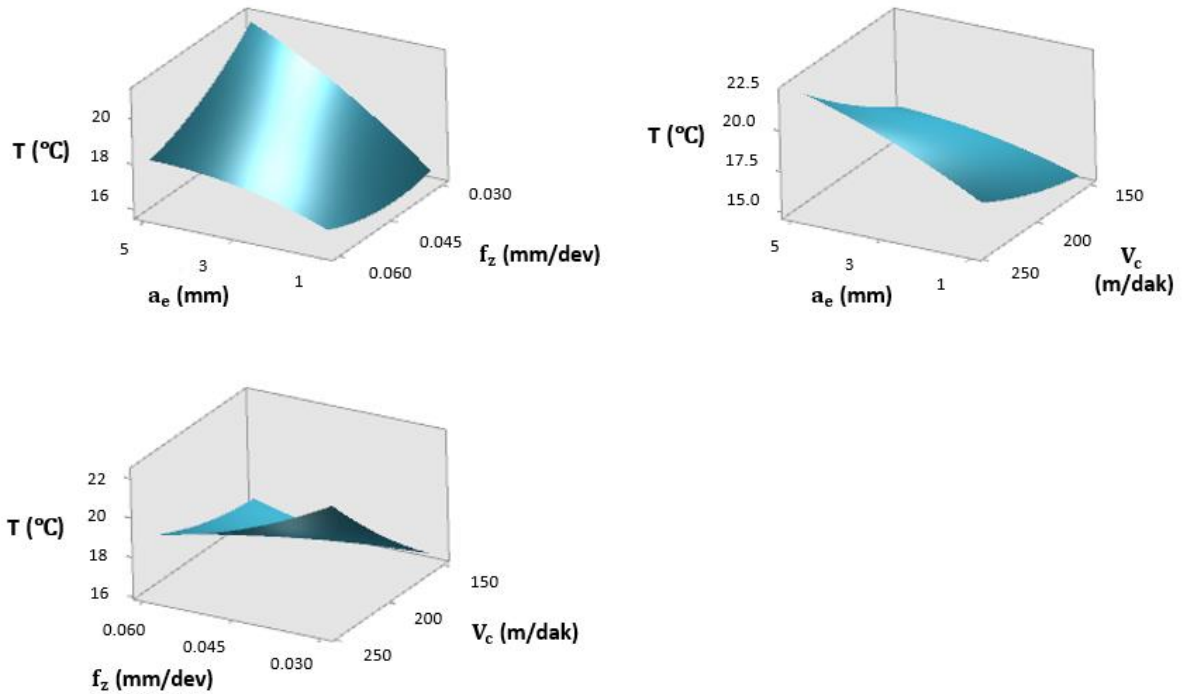
Yüzey pürüzlülüğünün ilerleme, kesme genişliği ve kesme hızı parametrelerine göre değişimini gösteren yanıt yüzey grafikleri Şekil 3.2.1.1.2’de verilmiştir. Varyans analizi tablosuna göre, yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametre olan kesme genişliğinin artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün de arttığı görülmektedir.

AFRP malzemenin trim operasyonuna ait sıcaklık için varyans analizi Çizelge 3.2.1.1.3’te verilmiştir. Deney tasarım parametrelerinden kesme genişliği, diş başı ilerleme, kesme hızının, sıcaklığa olan etkisi incelendiğinde; en etkili parametrenin

kesme hızı olduğu görülmektedir. Kesme genişliği parametresi de sıcaklık üzerinde etkili ikinci parametredir.

Çizelge 3.2.1.1.3 : AFRP Trim Operasyonuna ait sıcaklık için varyans analizi tablosu.

| Kaynak | Serbestlik Derecesi | Kareler Toplamı | Kareler Ortalaması | F-değeri | P-değeri |
|---------------|---------------------|-----------------|--------------------|----------|----------|
| ae (mm) | 1 | 12,4757 | 12,4757 | 9,98 | 0,01 |
| fz (mm/dev) | 1 | 1,7865 | 1,7865 | 1,43 | 0,26 |
| Vc (mm/dak) | 1 | 16,7088 | 16,7088 | 13,36 | 0,004 |
| Hata | 16 | 15,6696 | 1,2506 | | |
| Toplam | 19 | 46,6406 | | | |



Şekil 3.2.1.1.3 : AFRP Trim operasyonuna ait sıcaklık için yanıt yüzey grafikleri.

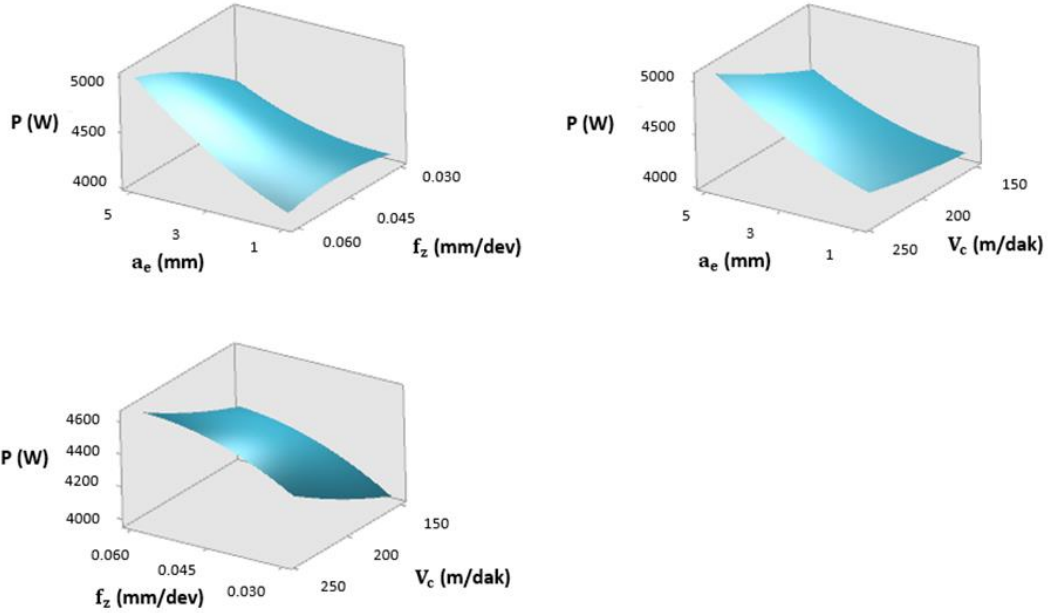
Sıcaklığın ilerleme, kesme genişliği ve kesme hızı parametrelerine göre değişimini gösteren yanıt yüzey grafikleri Şekil 3.2.1.1.3'te verilmiştir. Varyans analizi tablosuna göre, sıcaklık üzerinde en etkili parametre olan kesme hızının artmasıyla, sıcaklık değerinin artış gösterdiği görülmektedir.

AFRP malzemenin trim operasyonuna ait güç değeri için varyans analizi Çizelge 3.2.1.1.4'te verilmiştir. Deney tasarım parametrelerinden kesme genişliği, diş başı ilerleme, kesme hızının, güç değerine olan etkisi incelendiğinde; en etkili parametrenin

kesme genişliği olduğu görülmektedir. İlerleme parametresi de güç değeri için ikinci etkili parametredir.

Çizelge 3.2.1.1.4 : AFRP Trim operasyonuna ait güç için varyans analizi tablosu.

| Kaynak | Serbestlik Derecesi | Kareler Toplamı | Kareler Ortalaması | F-değeri | P-değeri |
|---------------|---------------------|-----------------|--------------------|----------|----------|
| ae (mm) | 1 | 435487 | 435487 | 29,51 | 0 |
| fz (mm/dev) | 1 | 111690 | 111690 | 7,57 | 0,02 |
| Vc (mm/dak) | 1 | 135062 | 135062 | 9,15 | 0,013 |
| Hata | 16 | 201689 | 14756 | | |
| Toplam | 19 | 883928 | | | |



Şekil 3.2.1.1.4 : AFRP Trim operasyonuna ait güç için yanıt yüzey grafikleri.

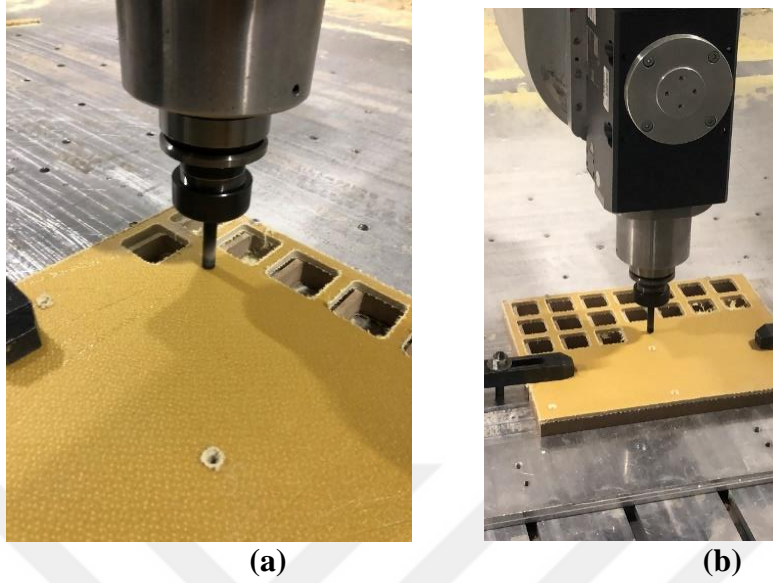
Güç değerinin dış başı ilerleme, kesme genişliği ve kesme hızı parametrelerine göre değişimini gösteren yanıt yüzey grafikleri Şekil 3.2.1.1.4'de verilmiştir. Varyans analizi tablosuna göre, güç değeri üzerinde en etkili parametre olan kesme genişliğinin artmasıyla, güç değeri artmaktadır.

3.2.1.2 AFRP Cep Açma Operasyonu

AFRP cep açma operasyonuna ait görüntüler Şekil 3.2.1.2.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.2.1.2.1'de, AFRP malzemesi için kesme genişliği (ae), ilerleme (fz) ve kesme hızından (Vc) oluşan deney tasarımı; yüzey pürüzlülüğü (Ra), sıcaklık (T), güç

(P), boyutsal hata(%) ve \dot{c} apak (\dot{c} ıkış) (mm) parametrelerinden oluşan deney sonuçları tablosu görülmektedir.



şekil 3.2.1.2.1 : (a) (b) AFRP Cep açma operasyonu

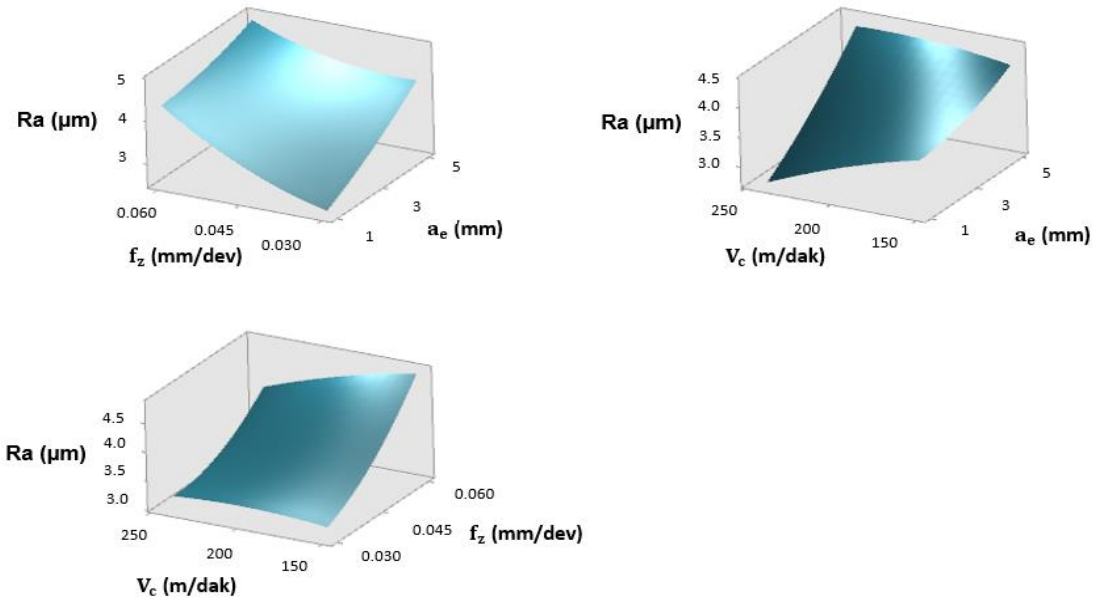
Çizelge 3.2.1.2.1 : AFRP Cep açma operasyonuna ait deney tasarımı ve deney sonuçları.

| Deney No. | ae (mm) | fz (mm/dev) | Vc (mm/dak) | Ra (μ m) | T ($^{\circ}$ C) | P (W) | Boyutsal Hata (%) | apak (Giriş) | apak (ıkış) |
|-----------|---------|-------------|-------------|---------------|-------------------|-------|-------------------|---------------|---------------|
| 1 | 3,0 | 0,045 | 240 | 3,705 | 30,00 | 4403 | 1,70% | 3,18 | 2,18 |
| 2 | 4,2 | 0,054 | 222 | 4,446 | 36,83 | 4664 | 1,02% | 3,73 | 4,34 |
| 3 | 1,8 | 0,036 | 222 | 2,707 | 41,57 | 4282 | 1,18% | 4,59 | 3,05 |
| 4 | 1,8 | 0,054 | 222 | 3,352 | 48,93 | 4388 | 1,08% | 5,83 | 3,55 |
| 5 | 4,2 | 0,036 | 222 | 3,518 | 30,78 | 4475 | 1,20% | 2,91 | 8,69 |
| 6 | 3,0 | 0,045 | 195 | 3,560 | 30,03 | 4594 | 1,33% | 3,19 | 3,9 |
| 7 | 3,0 | 0,060 | 195 | 4,443 | 28,37 | 4638 | 1,43% | 2,36 | 4,63 |
| 8 | 3,0 | 0,045 | 195 | 3,918 | 30,70 | 4451 | 1,35% | 3,33 | 3,94 |
| 9 | 3,0 | 0,030 | 195 | 3,704 | 33,73 | 4301 | 1,25% | 3,68 | 17,14 |
| 10 | 5,0 | 0,045 | 195 | 4,360 | 28,13 | 4805 | 0,92% | 3,17 | 9,46 |
| 11 | 3,0 | 0,045 | 195 | 3,766 | 31,33 | 4417 | 1,23% | 3,49 | 4,41 |
| 12 | 1,0 | 0,045 | 195 | 3,556 | 36,47 | 4224 | 1,20% | 4,2 | 2,72 |
| 13 | 3,0 | 0,045 | 195 | 3,832 | 34,27 | 4545 | 1,37% | 3,24 | 2,27 |
| 14 | 3,0 | 0,045 | 195 | 3,798 | 29,47 | 4533 | 1,08% | 4,97 | 0 |
| 15 | 3,0 | 0,045 | 195 | 3,131 | 26,70 | 4445 | 1,50% | 3,86 | 1,59 |
| 16 | 4,2 | 0,036 | 168 | 3,804 | 29,00 | 4695 | 1,18% | 6,19 | 0 |
| 17 | 1,8 | 0,036 | 168 | 2,704 | 41,83 | 4623 | 1,25% | 3,61 | 10,03 |
| 18 | 4,2 | 0,054 | 168 | 4,350 | 30,60 | 4767 | 0,60% | 3,06 | 2,61 |
| 19 | 1,8 | 0,054 | 168 | 4,277 | 32,23 | 4696 | 1,33% | 2,18 | 9,17 |
| 20 | 3,0 | 0,045 | 150 | 3,873 | 32,43 | 4682 | 1,18% | 3,07 | 4,27 |

AFRP malzemesinin cep açma operasyonuna ait yüzey pürüzlülüğü değeri için varyans analizi, Çizelge 3.2.1.2.2’de verilmiştir. Deney tasarım parametrelerinden kesme genişliği, ilerleme ve kesme hızı parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi incelendiğinde; en etkili parametrenin ilerleme olduğu görülmektedir. Ayrıca, kesme genişliği değeri de yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkili bir parametredir.

Çizelge 3.2.1.2.2 : AFRP Cep açma operasyonuna ait yüzey pürüzlülüğü için varyans analizi tablosu.

| Kaynak | Serbestlik Derecesi | Kareler Toplamı | Kareler Ortalaması | F-değeri | P-değeri |
|---------------|---------------------|-----------------|--------------------|----------|----------|
| ae (mm) | 1 | 0,96542 | 0,96542 | 7,63 | 0,02 |
| fz (mm/dev) | 1 | 1,8806 | 1,8806 | 14,86 | 0,003 |
| Vc (mm/dak) | 1 | 0,01723 | 0,01723 | 0,14 | 0,72 |
| Hata | 16 | 1,94364 | 0,12652 | | |
| Toplam | 19 | 4,80689 | | | |



Şekil 3.2.1.2.2 : AFRP Cep açma operasyonuna ait yüzey pürüzlülüğü için yanıt yüzey grafikleri.

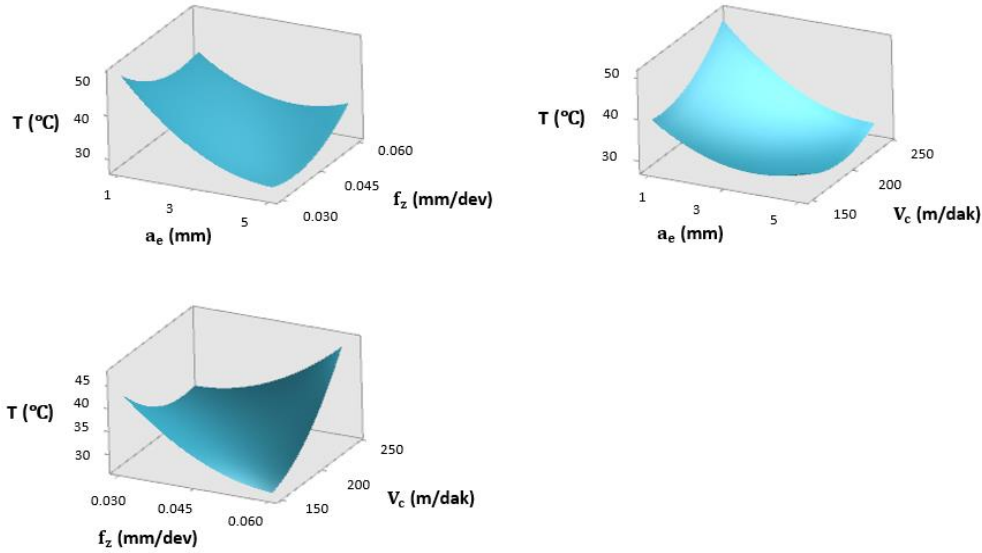
Yüzey pürüzlülüğü değerinin; kesme genişliği, ilerleme, kesme hızı parametrelerine göre değişimini gösteren yanıt yüzey grafikleri Şekil 3.2.1.2.2’de verilmiştir. Varyans analizi tablosuna göre, yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametre olan ilerlemenin artmasıyla giriş delaminasyonu değeri de artmaktadır.

AFRP malzemenin cep açma operasyonuna ait sıcaklık değeri için varyans analizi, Çizelge 3.2.1.2.3’te verilmiştir. Deney tasarım parametrelerinden kesme genişliği,

ilerleme ve kesme hızı parametrelerinin sıcaklık üzerindeki etkisi incelendiğinde; tek etkili parametrenin kesme genişliği olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.2.1.2.3 : AFRP Cep açma operasyonuna ait sıcaklık için varyans analizi tablosu.

| Kaynak | Serbestlik Derecesi | Kareler Toplamı | Kareler Ortalaması | F-değeri | P-değeri |
|---------------|---------------------|-----------------|--------------------|----------|----------|
| ae (mm) | 1 | 193,189 | 193,189 | 9,35 | 0,012 |
| fz (mm/dev) | 1 | 0,954 | 0,954 | 0,05 | 0,834 |
| Vc (mm/dak) | 1 | 30,346 | 30,346 | 1,47 | 0,254 |
| Hata | 16 | 359,846 | 20,672 | | |
| Toplam | 19 | 584,335 | | | |



Şekil 3.2.1.2.3 : AFRP Cep açma operasyonuna ait sıcaklık için yanıt yüzey grafikleri.

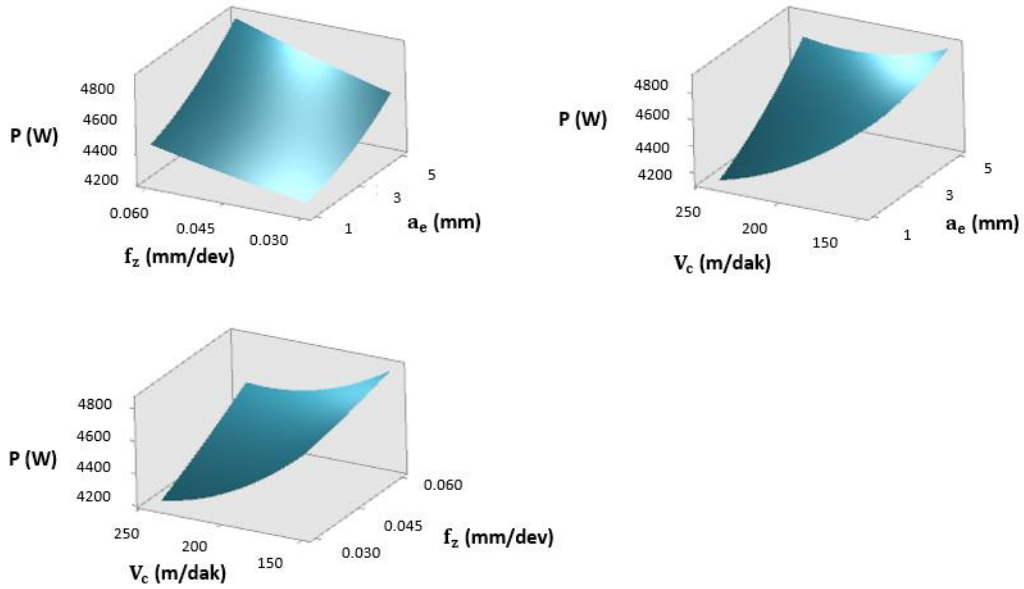
Sıcaklık değerinin; kesme genişliği, ilerleme, kesme hızı parametrelerine göre değişimini gösteren yanıt yüzey grafikleri Şekil 3.2.1.2.3’de verilmiştir. Varyans analizi tablosuna göre, sıcaklık değeri üzerinde tek etkili parametre olan kesme genişliğinin artmasıyla sıcaklık değeri azalmaktadır.

AFRP malzemenin cep açma operasyonuna ait güç değeri için varyans analizi, Çizelge 3.2.1.2.4’de verilmiştir. Deney tasarım parametrelerinden kesme genişliği, ilerleme ve kesme hızı parametrelerinin güç değeri üzerindeki etkisi incelendiğinde; en etkili parametrenin kesme genişliği olduğu görülmektedir. Kesme hızı parametresi de kesme

genişliği parametresine yakın etkiye sahiptir. Ayrıca, ilerleme değerinin de güç değeri üzerinde etkili olduğu görölmektedir.

Çizelge 3.2.1.2.4 : AFRP Cep açma operasyonuna ait güç için varyans analizi tablosu.

| Kaynak | Serbestlik Derecesi | Kareler Toplamı | Kareler Ortalaması | F-değeri | P-değeri |
|---------------|---------------------|-----------------|--------------------|----------|----------|
| ae (mm) | 1 | 184911 | 184911 | 22,92 | 0,001 |
| fz (mm/dev) | 1 | 74217 | 74217 | 9,2 | 0,013 |
| Vc (mm/dak) | 1 | 152093 | 152093 | 18,86 | 0,001 |
| Hata | 16 | 114152 | 8066 | | |
| Toplam | 19 | 525373 | | | |



Şekil 3.2.1.2.4 : AFRP Cep açma operasyonuna ait güç için yanıt yüzey grafikleri.

Güç değerinin; kesme genişliği, ilerleme, kesme hızı parametrelerine göre değişimini gösteren yanıt yüzey grafikleri Şekil 3.2.1.2.4'te verilmiştir. Varyans analizi tablosuna göre, güç değeri üzerinde en etkili parametre olan kesme genişliğinin artmasıyla güç değeri de artmaktadır. Aynı bağıntı, güç değeri ile kesme hızı parametresi arasında da görölmektedir.

AFRP malzemenin cep açma operasyonuna ait boyutsal hata değeri için varyans analizi, Çizelge 3.2.1.2.5'te verilmiştir. Deney tasarım parametrelerinden kesme genişliği, ilerleme ve kesme hızı parametrelerinin boyutsal hata değeri üzerindeki

etkisi incelendiğinde; boyutsal hata değeri için etkili parametre olmadığı görülmektedir.

Çizelge 3.2.1.2.5 : AFRP Cep açma operasyonuna ait boyutsal hata değeri için varyans analizi tablosu.

| Kaynak | Serbestlik Derecesi | Kareler Toplamı | Kareler Ortalaması | F-değeri | P-değeri |
|---------------|---------------------|-----------------|--------------------|----------|----------|
| ae (mm) | 1 | 0,000012 | 0,000012 | 3,17 | 0,105 |
| fz (mm/dev) | 1 | 0,000002 | 0,000002 | 0,44 | 0,521 |
| Vc (mm/dak) | 1 | 0,000007 | 0,000007 | 1,94 | 0,194 |
| Hata | 16 | 0,000038 | 0,000004 | | |
| Toplam | 19 | 0,000097 | | | |

AFRP malzemenin cep açma operasyonuna ait giriş çapak değeri için varyans analizi, Çizelge 3.2.1.2.6'de verilmiştir. Deney tasarım parametrelerinden kesme genişliği, ilerleme ve kesme hızı parametrelerinin giriş çapak değeri üzerindeki etkisi incelendiğinde; etkili parametre görülmemektedir.

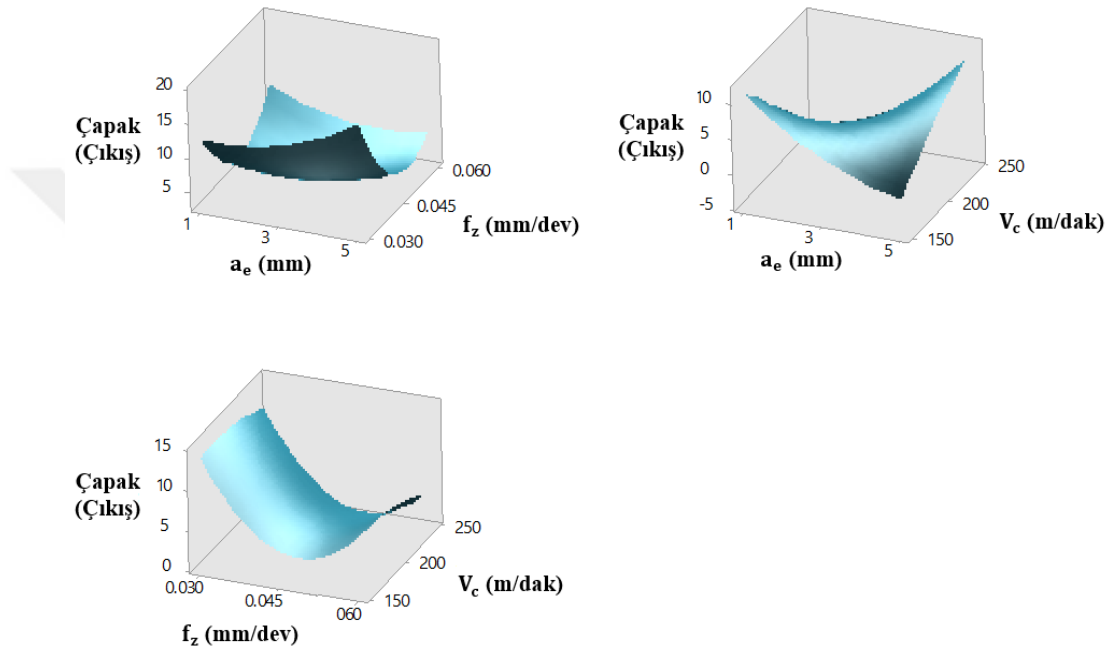
Çizelge 3.2.1.2.6 : AFRP Cep açma operasyonuna ait giriş çapakları için varyans analizi tablosu.

| Kaynak | Serbestlik Derecesi | Kareler Toplamı | Kareler Ortalaması | F-değeri | P-değeri |
|---------------|---------------------|-----------------|--------------------|----------|----------|
| ae (mm) | 1 | 0,3084 | 0,3084 | 0,65 | 0,439 |
| fz (mm/dev) | 1 | 1,6313 | 1,63127 | 3,43 | 0,094 |
| Vc (mm/dak) | 1 | 0,356 | 0,35601 | 0,75 | 0,407 |
| Hata | 16 | 17,8706 | 0,47559 | | |
| Toplam | 19 | 20,1663 | | | |

AFRP malzemenin cep açma operasyonuna ait çıkış çapak değeri için varyans analizi, Çizelge 3.2.1.2.7'de verilmiştir. Deney tasarım parametrelerinden kesme genişliği, ilerleme ve kesme hızı parametrelerinin çıkış çapak değeri üzerindeki etkisi incelendiğinde; tek etkili parametrenin ilerleme olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.2.1.2.7 : AFRP Cep açma operasyonuna ait çıkış çapakları için varyans analizi tablosu.

| Kaynak | Serbestlik Derecesi | Kareler Toplamı | Kareler Ortalaması | F-değeri | P-değeri |
|---------------|---------------------|-----------------|--------------------|----------|----------|
| ae (mm) | 1 | 2,792 | 2,7923 | 0,44 | 0,524 |
| fz (mm/dev) | 1 | 57,979 | 57,9794 | 9,05 | 0,013 |
| Vc (mm/dak) | 1 | 8,375 | 8,3754 | 1,31 | 0,28 |
| Hata | 16 | 198,907 | 6,4073 | | |
| Toplam | 19 | 268,053 | | | |

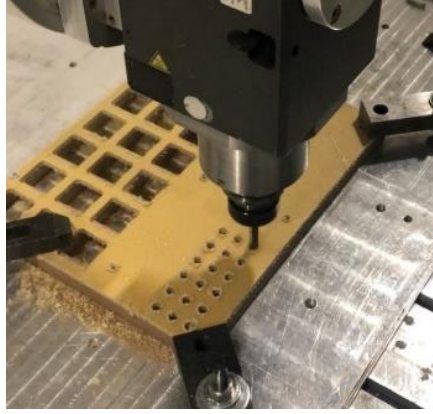


Şekil 3.2.1.2.5: AFRP Cep açma operasyonuna ait çıkış çapakları için yanıt yüzey grafikleri.

Çıkış çapak değerinin; kesme genişliği, ilerleme, kesme hızı parametrelerine göre değişimini gösteren yanıt yüzey grafikleri Şekil 3.2.1.2.5'te verilmiştir. Varyans analizi tablosuna göre, çıkış çapak değeri üzerinde tek etkili parametre olan ilerleme parametresi incelendiğinde; ilerlemenin düşük olduğu değerlerde yüksek çıkış çapakları görülürken, ilerlemenin yüksek olduğu değerlerde daha düşük çıkış çapak değerleri görülmektedir.

3.2.1.3 AFRP Delik Delme Operasyonu

AFRP delik delme operasyonu sırasında çekilmiş görüntü Şekil 3.2.1.3.1'te verilmiştir.



Şekil 3.2.1.3.1 : AFRP delik delme operasyonu.

Aramid elyafla güçlendirilmiş polimer reçineli bu kompozit malzemenin, delik delme operasyonuna ait, ilerleme (f_z), dönme hızı (N) parametrelerinden oluşan deney tasarımı; yüzey pürüzlülüğü (Ra), sıcaklık (T), güç (P), iç çap hata (%), giriş ve çıkış delaminasyon (Fd) değerlerinden oluşan deney sonuçları, Çizelge 3.2.1.3.1’de verilmiştir.

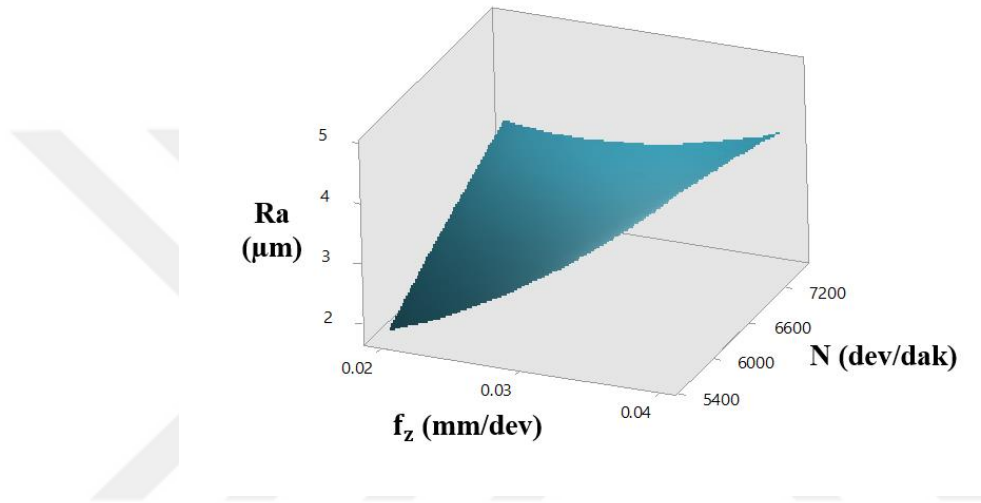
Çizelge 3.2.1.3.1 : AFRP Delik delme operasyonuna ait deney tasarımı ve deney sonuçları.

| Deney No. | f_z (mm/dev) | N (dev/dak) | Ra (μm) | T ($^{\circ}\text{C}$) | P (W) | İç Çap Hata (%) | Fd (Giriş) | Fd (Çıkış) |
|-----------|----------------|-------------|----------------------|--------------------------|-------|-----------------|------------|------------|
| 1 | 0.030 | 7500 | 3,572 | 23,89 | 4410 | 0,0% | 1,229 | 1,660 |
| 2 | 0.020 | 6500 | 2,834 | 21,66 | 4198 | 0,4% | 1,229 | 1,660 |
| 3 | 0.030 | 6500 | 3,316 | 22,39 | 4355 | 0,3% | 1,250 | 1,576 |
| 4 | 0.030 | 6500 | 3,039 | 21,72 | 4380 | 0,1% | 1,313 | 1,471 |
| 5 | 0.040 | 6500 | 4,351 | 23,91 | 4320 | 0,8% | 1,429 | 1,502 |
| 6 | 0.030 | 5500 | 2,943 | 21,53 | 4247 | 1,5% | 1,324 | 1,649 |
| 7 | 0.030 | 6500 | 3,046 | 22,60 | 4353 | 0,6% | 1,324 | 1,817 |
| 8 | 0.030 | 6500 | 3,262 | 21,80 | 4370 | 1,3% | 1,303 | 1,607 |
| 9 | 0.037 | 5793 | 4,024 | 22,74 | 4631 | 0,4% | 1,397 | 1,765 |
| 10 | 0.037 | 7207 | 3,584 | 24,81 | 4824 | 1,2% | 1,292 | 1,639 |
| 11 | 0.030 | 6500 | 3,145 | 22,53 | 4474 | 1,3% | 1,292 | 1,555 |
| 12 | 0.023 | 5793 | 2,151 | 20,46 | 4431 | 0,7% | 1,208 | 1,471 |
| 13 | 0.030 | 6500 | 3,205 | 23,10 | 4474 | 1,4% | 1,208 | 1,492 |
| 14 | 0.023 | 7207 | 2,843 | 24,31 | 4417 | 1,2% | 1,134 | 1,439 |

AFRP malzemenin delik delme operasyonuna ait yüzey pürüzlülüğü için varyans analizi, Çizelge 3.2.1.3.2’de verilmiştir. Deney tasarım parametrelerinden dış başı ilerleme, dönme hızının, yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi incelendiğinde; tek etkili parametrenin dış başı ilerleme olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.2.1.3.2 : AFRP Delik delme operasyonuna ait yüzey pürüzlülüğü için varyans analizi tablosu.

| Kaynak | Serbestlik Derecesi | Kareler Toplamı | Kareler Ortalaması | F-değeri | P-değeri |
|---------------|---------------------|-----------------|--------------------|----------|----------|
| fz (mm/dev) | 1 | 2,82992 | 2,82992 | 83,65 | 0 |
| N (dev/dak) | 1 | 0,16247 | 0,16247 | 4,8 | 0,065 |
| Hata | 11 | 0,77421 | 0,03383 | | |
| Toplam | 13 | 3,7666 | | | |



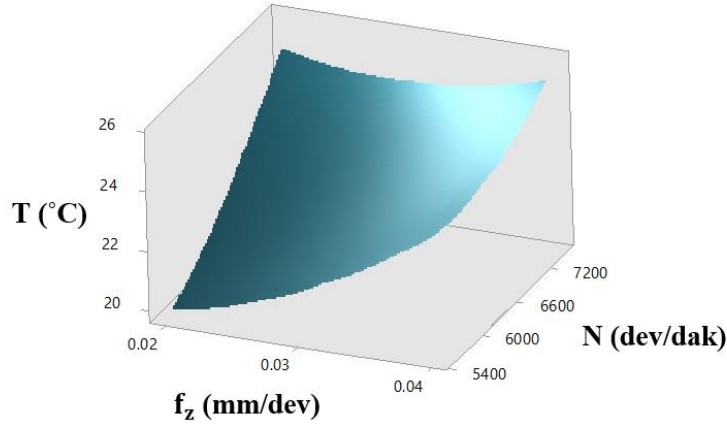
Şekil 3.2.1.3.2 : AFRP Delik delme operasyonuna ait yüzey pürüzlülüğü için yanıt yüzey grafiği.

Yüzey pürüzlülüğü değerinin ilerleme, dönme hızı parametrelerine göre değişimini gösteren yanıt yüzey grafikleri Şekil 3.2.1.3.2’de verilmiştir. Varyans analizi tablosuna göre, yüzey pürüzlülüğü üzerinde tek etkili parametre olan ilerlemenin artmasıyla, yüzey pürüzlülüğü artış göstermektedir.

AFRP malzemenin delik delme operasyonuna ait sıcaklık için varyans analizi, Çizelge 3.2.1.3.3’te verilmiştir. Deney tasarım parametrelerinden dış başı ilerleme, dönme hızının, sıcaklık değeri üzerindeki etkisi incelendiğinde; en etkili parametrenin dönme hızı olduğu görülmektedir. Ayrıca dış başı ilerleme değeri de sıcaklık değeri üzerinde etkilidir.

Çizelge 3.2.1.3.3 : AFRP Delik delme operasyonuna ait sıcaklık için varyans analizi tablosu.

| Kaynak | Serbestlik Derecesi | Kareler Toplamı | Kareler Ortalaması | F-değeri | P-değeri |
|---------------|---------------------|-----------------|--------------------|----------|----------|
| fz (mm/dev) | 1 | 4,456 | 4,456 | 14,68 | 0,006 |
| N (dev/dak) | 1 | 10,6776 | 10,6776 | 35,17 | 0,001 |
| Hata | 11 | 4,2788 | 0,3036 | | |
| Toplam | 13 | 19,4124 | | | |



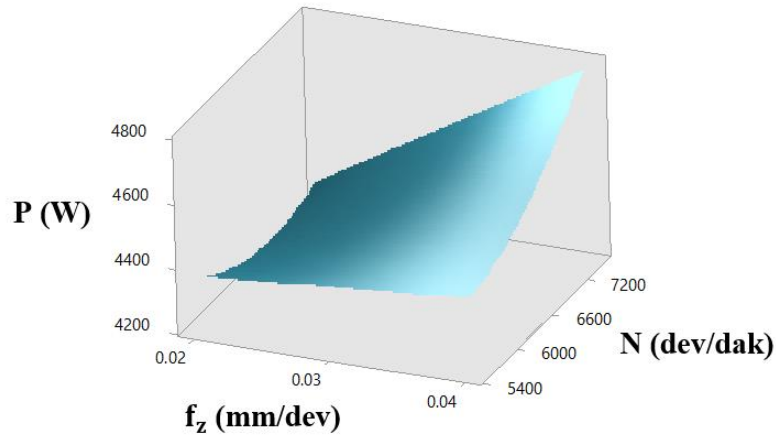
Şekil 3.2.1.3.3 : AFRP Delik delme operasyonuna ait sıcaklık için yanıt yüzey grafiği.

Sıcaklık değerinin diş başı ilerleme, dönme hızı parametrelerine göre değişimini gösteren yanıt yüzey grafikleri Şekil 3.2.1.3.3’de verilmiştir. Varyans analizi tablosuna göre, sıcaklık değeri üzerinde en etkili parametre olan dönme hızının artmasıyla, sıcaklık değerinin arttığı görülmektedir.

AFRP malzemenin delik delme operasyonuna ait güç değeri için varyans analizi, Çizelge 3.2.1.3.4’de verilmiştir. Deney tasarım parametrelerinden diş başı ilerleme, dönme hızının, güç değeri üzerindeki etkisi incelendiğinde; tek etkili parametrenin ilerleme olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.2.1.3.4 : AFRP Delik delme operasyonuna ait güç için varyans analizi tablosu.

| Kaynak | Serbestlik Derecesi | Kareler Toplamı | Kareler Ortalaması | F-değeri | P-değeri |
|---------------|---------------------|-----------------|--------------------|----------|----------|
| fz (mm/dev) | 1 | 76089 | 76089 | 7,85 | 0,026 |
| N (dev/dak) | 1 | 21011 | 21011 | 2,17 | 0,184 |
| Hata | 11 | 219139 | 9691 | | |
| Toplam | 13 | 316239 | | | |



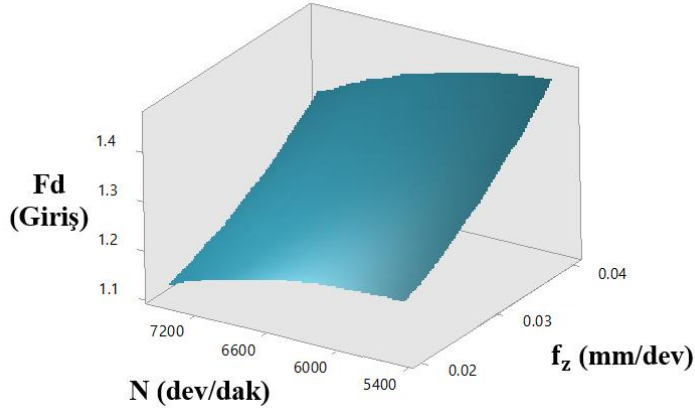
Şekil 3.2.1.3.4 : AFRP Delik delme operasyonuna ait güç için yanıt yüzey grafiği.

Güç değerinin diş başı ilerleme, dönme hızı parametrelerine göre değişimini gösteren yanıt yüzey grafikleri Şekil 3.2.1.3.4’de verilmiştir. Varyans analizi tablosuna göre, güç değeri üzerinde tek etkili parametre olan ilerlemenin artmasıyla, güç değerinde büyük bir değişim görülmemektedir.

AFRP malzemenin delik delme operasyonunda ait giriş delaminasyon görülmüştür. Yapılan ölçümlerde giriş delaminasyon değeri için varyans analizi, Çizelge 3.2.1.3.5’te verilmiştir. Deney tasarım parametrelerinden diş başı ilerleme, dönme hızının, giriş delaminasyonu değeri üzerindeki etkisi incelendiğinde; en etkili parametrenin ilerleme olduğu görülmektedir. Ayrıca, dönme hızı parametresi de giriş delaminasyon değeri üzerinde etkilidir.

Çizelge 3.2.1.3.5 : AFRP Delik delme operasyonuna ait giriş delaminasyonu için varyans analizi tablosu.

| Kaynak | Serbestlik Derecesi | Kareler Toplamı | Kareler Ortalaması | F-değeri | P-değeri |
|---------------|---------------------|-----------------|--------------------|----------|----------|
| fz (mm/dev) | 1 | 0,049437 | 0,049437 | 36,28 | 0,001 |
| N (dev/dak) | 1 | 0 | 0 | 8,94 | 0,02 |
| Hata | 11 | 0,00954 | 0,001363 | | |
| Toplam | 13 | 0,07911 | | | |



Şekil 3.2.1.2.5 : AFRP Delik delme operasyonuna ait giriş delaminasyonu için yanıt yüzey grafiği.

Giriş delaminasyonu değerinin ilerleme, dönme hızı parametrelerine göre değişimini gösteren yanıt yüzey grafikleri Şekil 3.2.1.3.5'te verilmiştir. Varyans analizi tablosuna göre, yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametre olan ilerlemenin artmasıyla giriş delaminasyonu değeri de artmaktadır.

AFRP malzemenin delik delme operasyonuna ait çıkış delaminasyon değeri için varyans analizi, Çizelge 3.2.1.3.6'da verilmiştir. Deney tasarım parametrelerinden dış başı ilerleme, dönme hızının, çıkış delaminasyonu değeri üzerindeki etkisi incelendiğinde; etkili bir parametre görülmemektedir.

Çizelge 3.2.1.3.6 : AFRP Delik delme operasyonuna ait çıkış delaminasyonuna ait varyans analizi tablosu.

| Kaynak | Serbestlik Derecesi | Kareler Toplamı | Kareler Ortalaması | F-değeri | P-değeri |
|---------------|---------------------|-----------------|--------------------|----------|----------|
| fz (mm/dev) | 1 | 0,009171 | 0,009171 | 0,46 | 0,518 |
| N (dev/dak) | 1 | 0,002546 | 0,002546 | 0,13 | 0,730 |
| Hata | 11 | 0,156352 | 0,019797 | | |
| Toplam | 13 | 0,16807 | | | |

AFRP malzemenin delik delme operasyonuna ait iç çap hata değeri için varyans analizi, Çizelge 3.2.1.3.7’de verilmiştir. Deney tasarım parametrelerinden dış başı ilerleme, dönme hızının, iç çap hata değeri üzerindeki etkisi incelendiğinde; etkili bir parametre görülmemektedir.

Çizelge 3.2.1.3.7 : AFRP Delik delme operasyonuna ait iç çap hata (%) değerine ait varyans analizi tablosu.

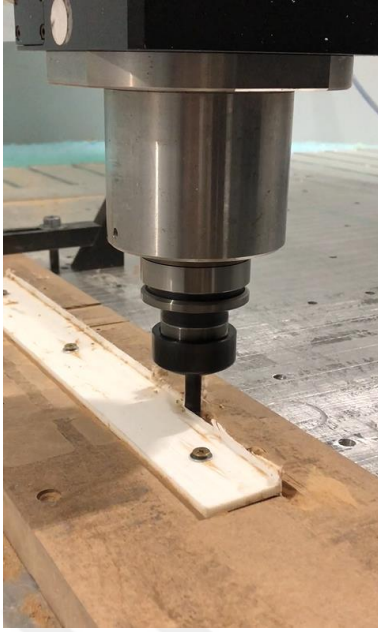
| Kaynak | Serbestlik Derecesi | Kareler Toplamı | Kareler Ortalaması | F-değeri | P-değeri |
|---------------|---------------------|-----------------|--------------------|----------|----------|
| fz (mm/dev) | 1 | 0,000001 | 0,000001 | 0,03 | 0,861 |
| N (dev/dak) | 1 | 0,000011 | 0,000011 | 0,36 | 0,566 |
| Hata | 11 | 0,168057 | 0,000029 | | |
| Toplam | 13 | 0,16807 | | | |

3.2.2 UHMWPE Talaşlı İmalat Deneyleri ve Analizleri

Literatürde UHMWPE malzemesinin talaşlı imalatı üzerine bir çalışmaya rastlanılamamıştır. Yapılan deneylerde ise genelde başarılı olunamamış ve malzemenin hızla eridiği ve ölçüm alınamayacak hale geldiği görülmüştür. Sadece delik delme işlemi için kısmi başarı sağlanmış ve bazı etkiler saptanabilmiştir.

3.2.2.1 UHMWPE Trim Operasyonu

UHMWPE’nin trim operasyonu sırasında çekilen görüntüler, Şekil 3.2.2.1.1’de verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.2.2.1.1 : (a) UHMWPE Trim operasyonu (b) sıcaklık ölçümü.

UHMWPE malzemenin trim operasyonu için deney tasarımı ve deney sonuçlarını içeren veriler Çizelge 3.2.2.1.1’de gösterilmiştir. Deney tasarımı parametreleri olarak; kesme genişliği (a_e), dış başına ilerleme (f_z) ve kesme hızı (v_c), farklı değerlere göre malzeme üzerinde denenmiş, deney sonuçları olarak yüzey pürüzlülüğü (R_a) ve sıcaklık (T), güç (P) ve işlem süresi (t) ölçülmüştür. Deneyler sırasında enerji metresinde oluşan bazı hatalardan dolayı, yeterli ve sağlıklı güç ölçümü alınamamıştır.

Çizelge 3.2.2.1.1 : UHMWPE Trim operasyonu için deney tasarımı ve deney sonuçları.

| Deney No. | ae (mm) | fz (mm/dev) | Vc (mm/dak) | Ra (µm) | T (°C) | İşlem Süresi (sn) |
|-----------|---------|-------------|-------------|---------|--------|-------------------|
| 1 | 5,0 | 0,045 | 195 | 2,509 | 17,63 | 1,7 |
| 2 | 4,2 | 0,036 | 222 | 1,801 | 21,53 | 1,9 |
| 3 | 4,2 | 0,054 | 168 | 1,945 | 24,67 | 1,6 |
| 4 | 4,2 | 0,036 | 168 | 2,704 | 19,13 | 2,5 |
| 5 | 4,2 | 0,054 | 222 | 1,898 | 19,00 | 1,3 |
| 6 | 3,0 | 0,045 | 195 | 2,432 | 20,10 | 1,7 |
| 7 | 3,0 | 0,045 | 195 | 2,705 | 19,83 | 1,7 |
| 8 | 3,0 | 0,045 | 195 | 3,209 | 20,77 | 1,7 |
| 9 | 3,0 | 0,045 | 240 | 2,459 | 19,47 | 1,4 |
| 10 | 3,0 | 0,060 | 195 | 2,744 | 20,90 | 1,3 |
| 11 | 3,0 | 0,045 | 195 | 3,418 | 20,10 | 1,7 |
| 12 | 3,0 | 0,045 | 195 | 2,260 | 20,17 | 1,7 |
| 13 | 3,0 | 0,045 | 150 | 2,494 | 21,30 | 2,2 |
| 14 | 3,0 | 0,030 | 195 | 2,495 | 24,03 | 2,6 |
| 15 | 3,0 | 0,045 | 195 | 2,328 | 18,53 | 1,7 |
| 16 | 1,8 | 0,054 | 222 | 2,248 | 18,73 | 1,3 |
| 17 | 1,8 | 0,036 | 168 | 3,214 | 23,47 | 2,5 |
| 18 | 1,8 | 0,036 | 222 | 2,135 | 18,73 | 1,9 |
| 19 | 1,8 | 0,054 | 168 | 2,390 | 20,47 | 1,6 |
| 20 | 1,0 | 0,045 | 195 | 2,932 | 21,13 | 1,7 |

Deney tasarım parametrelerinden kesme genişliği, ilerleme ve kesme hızı parametrelerinin ölçülen tüm değerler üzerindeki etkisi incelendiğinde; etkili bir parametre bulunamamıştır.

3.2.2.2 UHMWPE Cep Açma Operasyonu

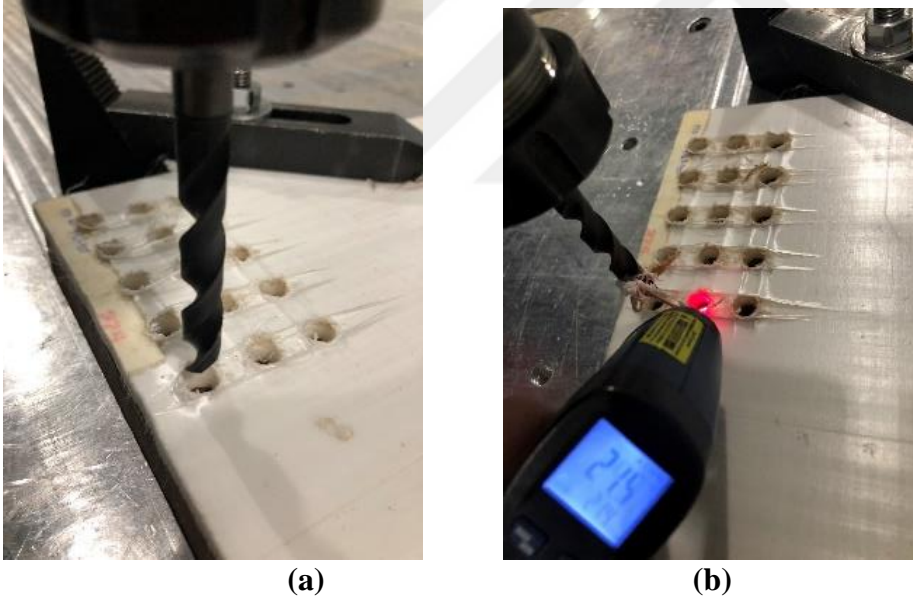
UHMWPE Cep açma operasyonu sonucunda tamamen eriyen ve yığılan malzeme sebebi ile herhangi bir ölçüm alınamamıştır. İşlem sırasında elde edilen bozuk ceplerin görüntüsü Şekil 3.2.2.2.1’te verilmiştir.



Şekil 3.2.2.2.1 : UHMWPE cep açma operasyonu.

3.2.2.3 UHMWPE Delik Delme Operasyonu

UHMWPE malzemesinin delik delme işlemleri ve sıcaklık ölçümleri Şekil 3.2.2.3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.2.2.3.1 : (a) UHMWPE Delik delme operasyonu (b) sıcaklık ölçümü.

UHMWPE malzemenin delik delme operasyonu için deney tasarımı ve deney sonuçlarını içeren veriler Çizelge 3.2.2.3.1’de gösterilmiştir. Deney tasarımı parametreleri olarak; diş başı ilerleme (fz), dönme hızı (N) parametreleri farklı değerler için malzeme üzerinde denenmiş, deney sonuçları olarak yüzey pürüzlülüğü (Ra), sıcaklık (T), delik iç çap hata (%), giriş ve çıkış delaminasyonları ölçülmüştür.

Çizelge 3.2.2.3.1 : UHMWPE Delik delme operasyonuna ait deney tasarımı ve deney sonuçları.

| Deney No. | fz (mm/dev) | N (dev/dak) | Ra (µm) | T (°C) | İç Çap Hata (%) | Fd (Giriş) | Fd (Çıkış) |
|-----------|-------------|-------------|---------|--------|-----------------|------------|------------|
| 1 | 0,030 | 7500 | 12,485 | 25,17 | 3,4% | 1,394 | 1,438 |
| 2 | 0,020 | 6500 | 8,545 | 29,23 | 5,3% | 1,472 | 1,587 |
| 3 | 0,030 | 6500 | 10,371 | 30,17 | 7,9% | 1,250 | 1,631 |
| 4 | 0,030 | 6500 | 14,595 | 29,53 | 6,2% | 1,393 | 1,778 |
| 5 | 0,040 | 6500 | 14,486 | 25,17 | 8,0% | 1,293 | 1,727 |
| 6 | 0,030 | 5500 | 7,122 | 26,87 | 4,9% | 1,285 | 1,710 |
| 7 | 0,030 | 6500 | 9,731 | 26,93 | 5,0% | 1,339 | 1,660 |
| 8 | 0,030 | 6500 | 14,426 | 28,03 | 7,5% | 1,417 | 1,733 |
| 9 | 0,037 | 5793 | 8,984 | 27,10 | 7,6% | 1,269 | 1,803 |
| 10 | 0,037 | 7207 | 9,342 | 31,80 | 8,8% | 1,262 | 1,880 |
| 11 | 0,030 | 6500 | 11,627 | 32,47 | 6,4% | 1,471 | 1,855 |
| 12 | 0,023 | 5793 | 13,942 | 31,03 | 5,7% | 1,489 | 1,795 |
| 13 | 0,030 | 6500 | 13,948 | 31,50 | 6,5% | 1,508 | 1,894 |
| 14 | 0,023 | 7207 | 8,927 | 27,77 | 5,7% | 1,495 | 1,723 |

UHMWPE malzemenin delik delme operasyonuna ait yüzey pürüzlülüğü değeri için varyans analizi, Çizelge 3.2.2.3.2’de verilmiştir. Deney tasarım parametrelerinden ilerleme ve dönme hızı parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü değeri üzerindeki etkisi incelendiğinde; etkili bir parametre görülmemektedir.

Çizelge 3.2.2.3.2 : UHMWPE Delik delme operasyonuna ait yüzey pürüzlülüğü için varyans analizi tablosu.

| Kaynak | Serbestlik Derecesi | Kareler Toplamı | Kareler Ortalaması | F-değeri | P-değeri |
|---------------|---------------------|-----------------|--------------------|----------|----------|
| fz (mm/dev) | 1 | 1,861 | 1,861 | 0,21 | 0,661 |
| N (dev/dak) | 1 | 1,071 | 1,071 | 0,12 | 0,738 |
| Hata | 11 | 86,542 | 8,859 | | |
| Toplam | 13 | 89,474 | | | |

UHMWPE malzemenin delik delme operasyonuna ait sıcaklık değeri için varyans analizi, Çizelge 3.2.2.3.3’te verilmiştir. Deney tasarım parametrelerinden dış başı ilerleme ve dönme hızı parametrelerinin sıcaklık değeri üzerindeki etkisi incelendiğinde; etkili bir parametre görülmemektedir.

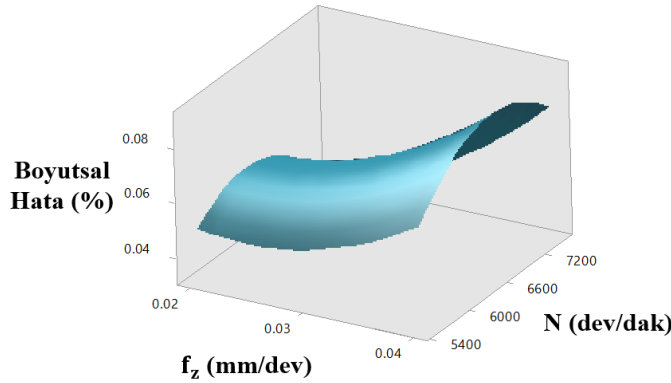
Çizelge 3.2.2.3.3 : UHMWPE Delik delme operasyonuna ait sıcaklık için varyans analizi tablosu.

| Kaynak | Serbestlik Derecesi | Kareler Toplamı | Kareler Ortalaması | F-değeri | P-değeri |
|---------------|---------------------|-----------------|--------------------|----------|----------|
| fz (mm/dev) | 1 | 3,9919 | 3,9919 | 1,18 | 0,314 |
| N (dev/dak) | 1 | 0,1178 | 0,1178 | 0,03 | 0,858 |
| Hata | 11 | 71,3624 | 3,3952 | | |
| Toplam | 13 | 75,4721 | | | |

UHMWPE malzemenin delik delme operasyonuna ait iç çap hata değeri için varyans analizi, Çizelge 3.2.2.3.4'te verilmiştir. Deney tasarım parametrelerinden dış başı ilerleme ve dönme hızı parametrelerinin boyutsal hata değeri üzerindeki etkisi incelendiğinde; tek etkili parametrenin ilerleme olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.2.2.3.4 : UHMWPE Delik delme operasyonuna ait boyutsal hata için varyans analizi tablosu.

| Kaynak | Serbestlik Derecesi | Kareler Toplamı | Kareler Ortalaması | F-değeri | P-değeri |
|---------------|---------------------|-----------------|--------------------|----------|----------|
| fz (mm/dev) | 1 | 0,000991 | 0,000991 | 9,22 | 0,019 |
| N (dev/dak) | 1 | 0,000012 | 0,000012 | 0,11 | 0,751 |
| Hata | 11 | 0,001861 | 0,000108 | | |
| Toplam | 13 | 0,002864 | | | |



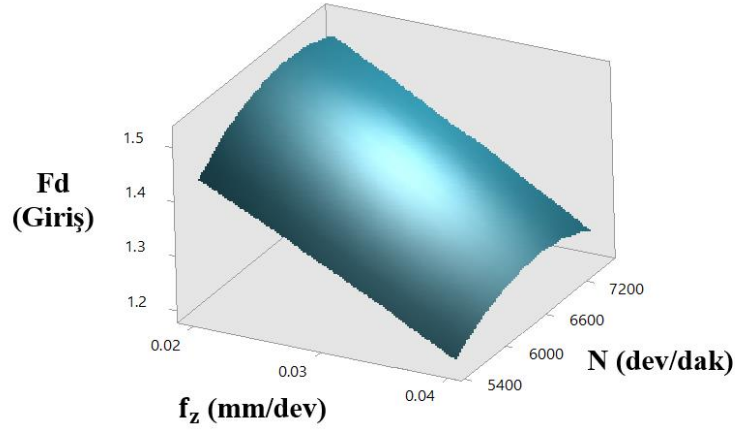
Şekil 3.2.2.3.2 : UHMWPE Delik delme operasyonuna ait boyutsal sapma için yanıt yüzey grafiği.

Boyutsal sapma değerinin; dış başı ilerleme, dönme hızı parametrelerine göre değişimini gösteren yanıt yüzey grafikleri Şekil 3.2.1.3.2'de verilmiştir. Varyans analizi tablosuna göre, yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametre olan ilerlemenin artmasıyla iç çap hata değeri de artmaktadır.

UHMWPE malzemenin delik delme operasyonuna ait giriş delaminasyonu değeri için varyans analizi, Çizelge 3.2.2.3.5'ta verilmiştir. Deney tasarım parametrelerinden ilerleme ve dönme hızı parametrelerinin giriş delaminasyonu değeri üzerindeki etkisi incelendiğinde; tek etkili parametrenin ilerleme olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.2.2.3.5 : UHMWPE Delik delme operasyonuna ait giriş delaminasyonu için varyans analizi tablosu.

| Kaynak | Serbestlik Derecesi | Kareler Toplamı | Kareler Ortalaması | F-değeri | P-değeri |
|---------------|---------------------|-----------------|--------------------|----------|----------|
| fz (mm/dev) | 1 | 0,062361 | 0,062361 | 12,43 | 0,01 |
| N (dev/dak) | 1 | 0,002903 | 0,002903 | 0,58 | 0,472 |
| Hata | 11 | 0,056269 | 0,005018 | | |
| Toplam | 13 | 0,12153 | | | |



Şekil 3.2.2.3.3 : UHMWPE Delik delme operasyonuna ait giriş delaminasyonu için yanıt yüzey grafiği.

Giriş delaminasyonu değerinin ilerleme, dönme hızı parametrelerine göre değişimini gösteren yanıt yüzey grafikleri Şekil 3.2.2.3.3'te verilmiştir. Varyans analizi tablosuna göre, giriş delaminasyonu üzerinde en etkili parametre olan ilerlemenin artmasıyla giriş delaminasyonu değeri azalmaktadır.

UHMWPE malzemenin delik delme operasyonuna ait çıkış delaminasyonu değeri için varyans analizi, Çizelge 3.2.2.3.6'da verilmiştir. Deney tasarım parametrelerinden ilerleme ve dönme hızı parametrelerinin çıkış delaminasyonu değeri üzerindeki etkisi incelendiğinde; etkili bir parametre görülmemektedir.

Çizelge 3.2.2.3.6 : UHMWPE Delik delme operasyonuna ait çıkış delaminasyonuna ait varyans analizi tablosu.

| Kaynak | Serbestlik Derecesi | Kareler Toplamı | Kareler Ortalaması | F-değeri | P-değeri |
|---------------|---------------------|-----------------|--------------------|----------|----------|
| fz (mm/dev) | 1 | 0,016425 | 0,016425 | 2,43 | 0,163 |
| N (dev/dak) | 1 | 0,018002 | 0,018002 | 2,67 | 0,147 |
| Hata | 11 | 0,163296 | 0,006754 | | |
| Toplam | 13 | 0,19772 | | | |

3.3 Aşındırıcı Su Jeti Deneyleri ve Analizleri

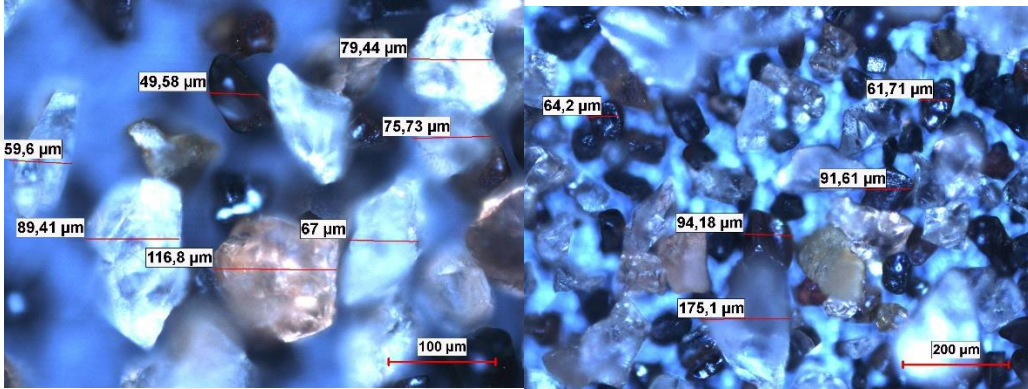
Aşındırıcı su jeti kesim operasyonları 2 malzeme tipi üzerinde yapılmıştır. 2 malzeme tipi için 3 farklı operasyonun tümü için 30 deneyli bir deney tasarımı oluşturulmuştur. Böylece her malzemenin tüm operasyonlar aynı kontrol parametreleri kullanılarak, aynı levha üzerinde bir kerede yapılarak, zaman kazanımı sağlanmıştır.

Deneylerin gerçekleştirildiği Storma marka su jeti tezgâhı Şekil 3.3.1’de gösterilmiştir.



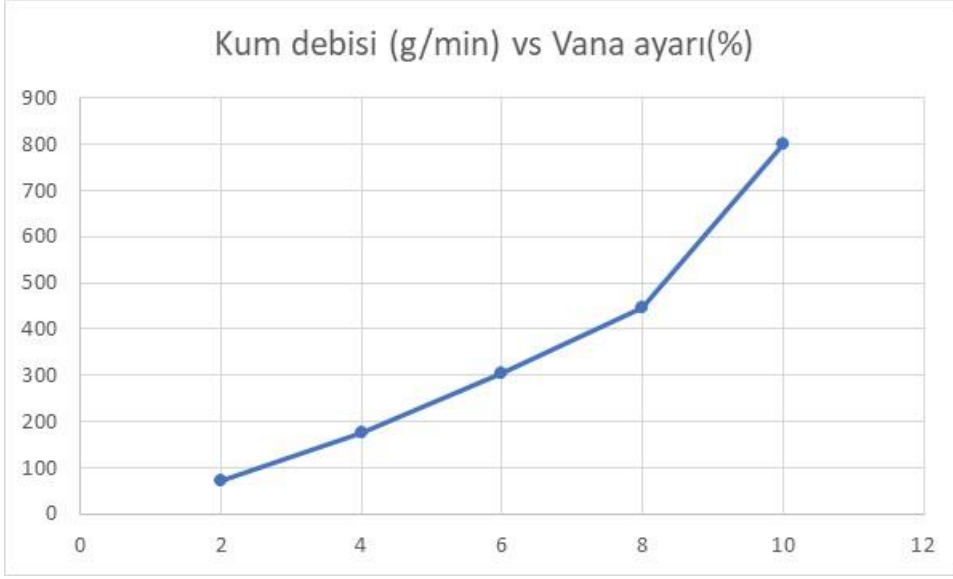
Şekil 3.3.1 : Su jeti kesim operasyonlarında kullanılan Storma marka tezgâh.

Deneylerde tezgâhın üzerinde kullanılan jet çıkışıdaki orifisin çapı 0,31 mm'dir. Nozulun çapı ise 1,02 mm'dir. Kullanılan kumun mesh boyutu ise #80 olduğu firma yetkilileri tarafından belirtilmiştir. #80 mesh boyutlarda en büyük tanecik boyutunun 0,185 mm olacağı göz önünde bulundurularak, numune olarak alınan kumların, kesme mekanizmalarına olan etkilerinin de görülebilmesi için, optik mikroskop altında incelemeleri yapılmıştır. Elde edilen görselde kumlardan alınan uzunluk değerleri uygun görülmektedir. Ayrıca kum geometrilerindeki keskin köşelerin, kumun aşındırıcı kabiliyetini arttıracığı düşünülmüştür. Yapılan incelemeler sonucunda elde edilen görüntü Şekil 3.3.2'de verilmiştir.



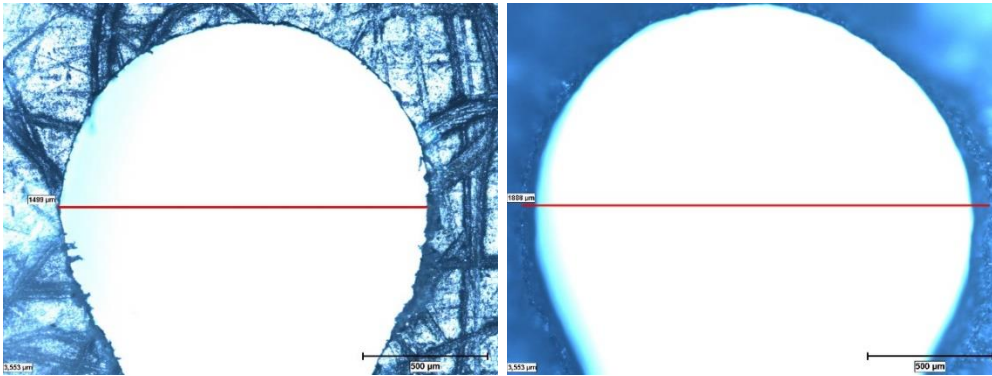
Şekil 3.3.2 : Aşındırıcı kum taneciklerinin optik mikroskoptan alınan görüntüleri.

Su jetine karıştırılan kum oranı, tezgâhta otomatik olarak ayarlanamamakta, nozula yakın bulunan bir vana aracılığıyla manuel olarak %0 ile %10 arasında değişen oranlarda ayar yapılabilmektedir. Bu aralıkta her seviyede akan kum debisinin ölçümleri sonucunda, şekil 3.3.3'de elde edilen yaklaşık doğrusal eğri elde edilmiştir. Sistemde sık sık tıkanmalar yaşandığı göz önüne alınmış ve her deney öncesi akım yolları basınçlı hava ile temizlenmiştir. Bundan sonraki varyans analizi hesaplarında, kum debisi yerine vanada bulunan % oran değeri kullanılmıştır.

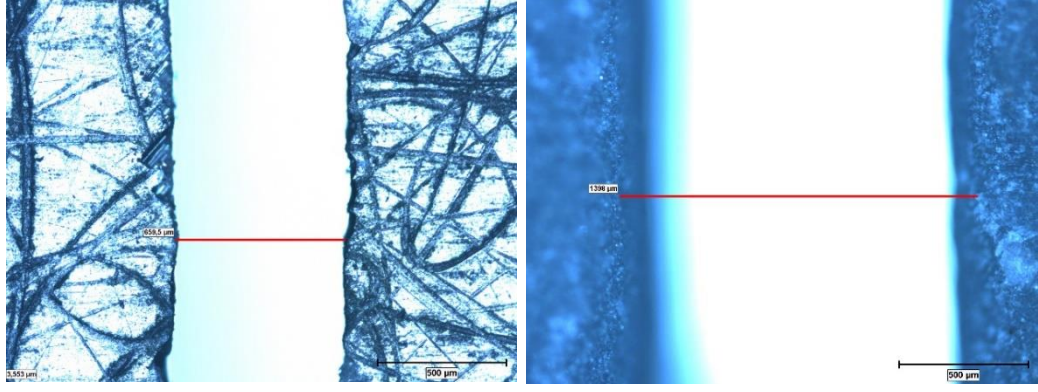


Şekil 3.3.3 : Kütlesel kum debisinin, vana ayarına göre grafiği.

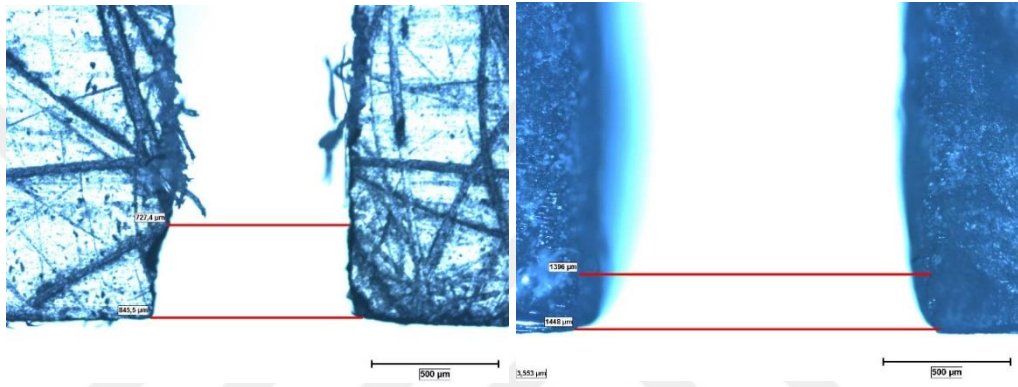
Deneylerin bir çıktı parametresi olan kerflerin ölçülmesinde Nikon marka LV150N model optik mikroskop kullanılmıştır. Kerf oran ve açılarının hesaplanması için kesimi yapılan kompozit plakanın hem üst hem de alt kesim bölgelerinden görüntüler alınmıştır. Üst ve alt görüntüler kesim geometrisine göre, giriş, orta ve çıkış-boğaz olmak üzere 3 noktanın ortalamasından oluşmaktadır. Şekil 3.3.4'te su jeti kesim geometrisi çıkışındaki alt ve üst örnek optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Şekil 3.3.5'te ise kesim geometrisinin orta kısmının örnek optik mikroskop görüntüleri, Şekil 3.3.6'te ise kesim geometrisi giriş kısmının örnek optik mikroskop görüntüleri verilmiştir.



Şekil 3.3.4 : (a) Su jeti çıkış parça alt optik mikroskop görüntüsü (b) Su jeti çıkış parça üst optik mikroskop görüntüsü.

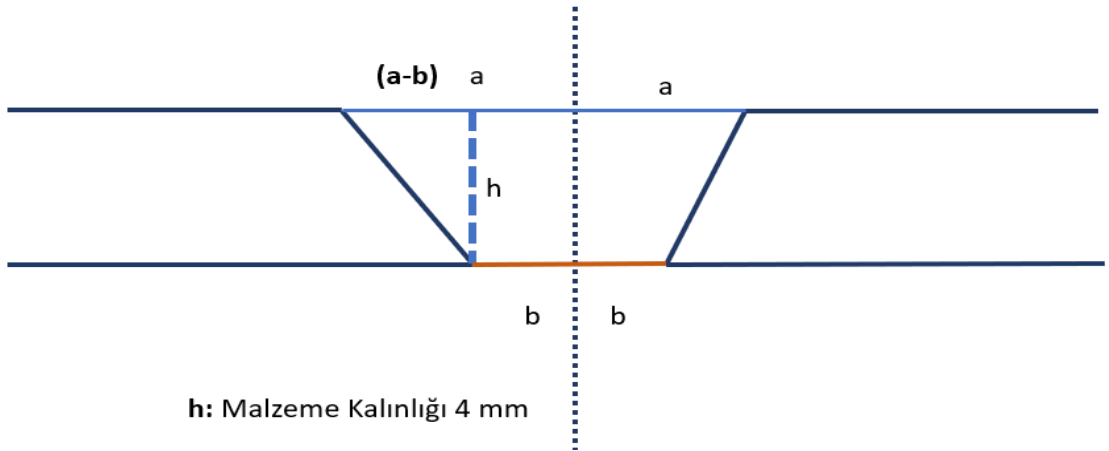


Şekil 3.3.5 : (a) Su jeti orta parça alt optik mikroskop görüntüsü (b) Su jeti orta parça üst optik mikroskop görüntüsü.



Şekil 3.3.6 : (a) Su jeti giriş parça alt optik mikroskop görüntüsü (b) Su jeti giriş parça üst optik mikroskop görüntüsü.

Kerf açısı ve kerf oranının hesaplanması için Denklem (3.3.1) ve Denklem (3.3.2) kullanılmıştır. Denklemlerde yer alan 'a', plaka üst bölgesi kesim kenar uzunluğu; 'b', plaka alt bölgesi kesim kenar uzunluğu, 'ka', kerf açısı, 'kr' ise kerf oranıdır (Şekil 3.3.7).



Şekil 3.3.7 : Kerf yapısı ve ölçütleri çizimi.

$$Ka = \arctan \left(\frac{a - b}{2 * h} \right) \quad (3.3.1)$$

$$Kr = \frac{a}{b} \quad (3.3.2)$$

Hizmet alımı yapılan firmaya, satın alınan enerji metrenin taktırılması da mümkün olmadığı için su jeti işlemleri sırasında detaylı enerji ölçümü alınamamıştır. Buna rağmen, firmada hali hazırda binaya takılı olan bir enerji metresi üzerinde yapılan gözlemlerden ve incelemelerden sonra, su jeti işlemi sırasında çekilen gücün büyük oranda pompaya bağlı olduğu, eksen hareketi için kullanılan servo motorların ve tezgâh bilgisayarının çektiği gücün, işlemlerde etken olmadığı anlaşılmıştır. Bu sebeple, çeşitli basınçlarda pompanın çektiği güç değerleri harici olarak ölçülmüş ve her basınç için yaklaşık çekilen güç hesaplanmıştır. Bu ölçümlerin sonuçları Çizelge 3.3.1'de verilmiştir. Çekilen güç sadece pompa basıncına bağlı olduğu sonucuna varıldığından, herhangi bir deneyde güç için varyans analizleri yapılmamıştır.

Çizelge 3.3.1 : Su jeti tezgahının pompa basıncına oranlı çektiği güç değerleri.

| Basınç (Bar) | Güç (W) |
|---------------------|----------------|
| 2000 | 740 |
| 2400 | 871 |
| 2800 | 912 |
| 3100 | 1167 |
| 3200 | 1404 |
| 3600 | 1599 |
| 3400 | 1155 |
| 3700 | 1451 |
| 4000 | 1469 |

Su jeti deneyleri, işlem parametreleri aynı alınabileceğinden, tüm operasyon deneyleri plakalar üzerinde bir kerede yapılmıştır. Bu yaklaşım, hizmet alımı sırasında önemli zaman tasarrufu sağlamıştır. İşlemlerde yapılan trim, delik ve ceplere ilave olarak, trimlerin kerf ölçümleri için ayrılması gerektiğinden, yüzey pürüzlülüğü ölçümüne sayılmak üzere bir de yarı cep işlemi yapılmıştır.

3.3.1 AFRP Aşındırıcı Su Jeti Deneyleri ve Analizleri

3.3.1.1 AFRP Trim Operasyonu

AFRP üzerinde yapılan su jeti trim operasyonu Şekil 3.3.1.1.1’de gösterilmiştir. Yapılan deney tasarımı sonrasında 30 adet deney için 450 mm x 450 mm boyutlarında numune plaka kullanılmıştır.



Şekil 3.3.1.1.1: AFRP trim operasyonu.

Aramid fiberle güçlendirilmiş polimer malzemeye ait trim operasyonu için deney tasarımı ve deney sonuçlarını içeren veriler Çizelge 3.3.1.1.1’de gösterilmiştir. Deney tasarımı parametreleri olarak; Kum Oranı (Qa), Basınç (P) ve Mesafe (SoD) ve ilerleme hızı (f) farklı değerlere göre malzeme üzerinde denenmiş, deney sonuçları olarak Kerf Oranı (Kr), Kerf Açısı (Ka), Yüzey Pürüzlülüğü (Ra) ve Süre (t) ölçülmüştür.

Çizelge 3.3.1.1.1 : AFRP trim operasyonuna ait deney tasarım tablosu ve deney sonuçları.

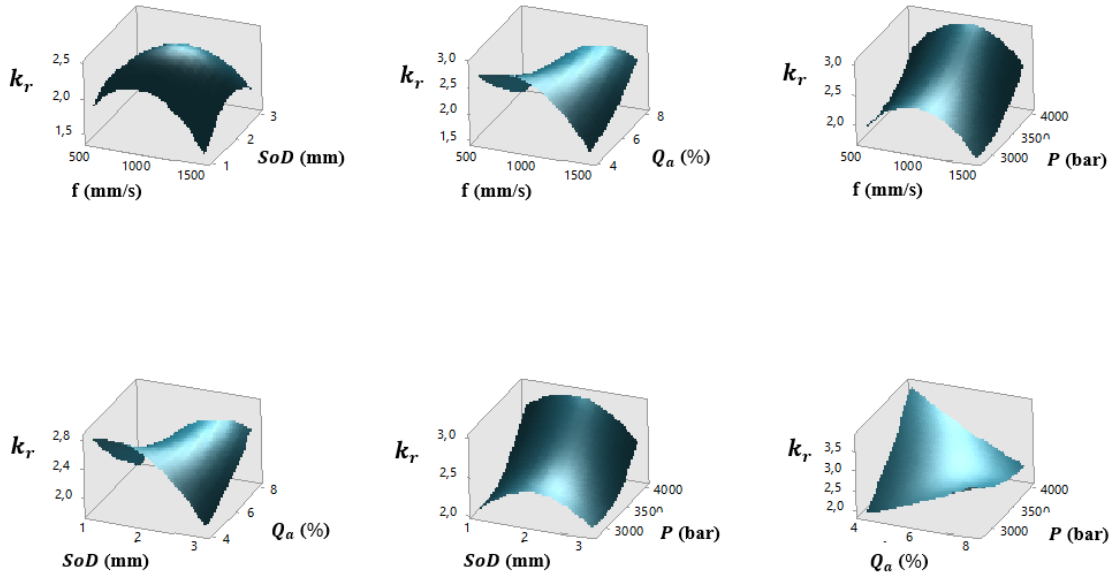
| Deney No. | Qa (%) | P (Bar) | SoD (mm) | f (mm/dk) | Kr | Ka(deg) | Ra (µm) | t (Sn.) |
|-----------|--------|---------|----------|-----------|-------|---------|---------|---------|
| 1 | 4 | 3400 | 2 | 1000 | 2,790 | 5,5 | 10,835 | 3,0 |
| 2 | 5 | 3100 | 3 | 1250 | 1,744 | 3,7 | 9,422 | 2,4 |
| 3 | 5 | 3100 | 3 | 750 | 1,999 | 4,4 | 7,416 | 4,0 |
| 4 | 5 | 3100 | 2 | 1250 | 1,965 | 4,1 | 7,328 | 2,4 |
| 5 | 5 | 3100 | 2 | 750 | 2,167 | 4,8 | 6,941 | 4,0 |
| 6 | 5 | 3700 | 3 | 1250 | 2,630 | 5,9 | 8,081 | 2,4 |
| 7 | 5 | 3700 | 3 | 750 | 2,678 | 5,8 | 6,865 | 4,0 |
| 8 | 5 | 3700 | 2 | 1250 | 2,727 | 5,9 | 6,466 | 2,4 |
| 9 | 5 | 3700 | 2 | 750 | 3,284 | 6,9 | 6,392 | 4,0 |
| 10 | 6 | 2800 | 2 | 1000 | 2,783 | 5,6 | 9,572 | 3,0 |
| 11 | 6 | 3400 | 3 | 1000 | 2,018 | 4,6 | 9,904 | 3,0 |
| 12 | 6 | 3400 | 2 | 1500 | 1,769 | 3,6 | 8,935 | 2,0 |
| 13 | 6 | 3400 | 2 | 1000 | 2,545 | 5,5 | 7,066 | 3,0 |
| 14 | 6 | 3400 | 2 | 1000 | 2,457 | 5,4 | 6,780 | 3,0 |
| 15 | 6 | 3400 | 2 | 1000 | 2,505 | 5,5 | 6,714 | 3,0 |
| 16 | 6 | 3400 | 2 | 1000 | 2,498 | 5,4 | 7,065 | 3,0 |
| 17 | 6 | 3400 | 2 | 1000 | 2,536 | 5,5 | 6,720 | 3,0 |
| 18 | 6 | 3400 | 2 | 1000 | 2,479 | 5,4 | 6,947 | 3,0 |
| 19 | 6 | 3400 | 2 | 500 | 1,981 | 4,6 | 5,268 | 6,0 |
| 20 | 6 | 3400 | 1 | 1000 | 2,136 | 4,9 | 5,412 | 3,0 |
| 21 | 6 | 4000 | 2 | 1000 | 2,470 | 6,3 | 5,097 | 3,0 |
| 22 | 7 | 3100 | 3 | 1250 | 2,468 | 5,4 | 7,930 | 2,4 |
| 23 | 7 | 3100 | 3 | 750 | 2,289 | 5,4 | 6,695 | 4,0 |
| 24 | 7 | 3100 | 2 | 1250 | 2,307 | 5,2 | 6,881 | 2,4 |
| 25 | 7 | 3100 | 2 | 750 | 2,178 | 5,2 | 4,986 | 4,0 |
| 26 | 7 | 3700 | 3 | 1250 | 2,803 | 6,5 | 6,901 | 2,4 |
| 27 | 7 | 3700 | 3 | 750 | 2,371 | 6,2 | 4,782 | 4,0 |
| 28 | 7 | 3700 | 2 | 1250 | 2,545 | 6,3 | 6,362 | 2,4 |
| 29 | 7 | 3700 | 2 | 750 | 2,293 | 6,4 | 4,135 | 4,0 |
| 30 | 8 | 3400 | 2 | 1000 | 2,223 | 5,4 | 4,840 | 3,0 |

Çizelge 3.3.1.1.2'deki varyans analizi incelendiğinde, kerf oranı için en etkili parametrenin kum oranı olduğu görülebilir. İkincil olarak ilerleme, mesafe ve basınç parametrelerinin de kerf oranı üzerinde etkileri olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.3.1.1.2 : AFRP trim operasyonuna ait kerf oranı için varyans analizi tablosu.

| Kaynak | Serbestlik Derecesi | Kareler Toplamı | Kareler Ortalaması | F-değeri | P-değeri |
|------------------|---------------------|-----------------|--------------------|----------|----------|
| Kum Oranı (%) | 1 | 20,5844 | 20,5844 | 27,87 | 0 |
| Basınç (Bar) | 1 | 11,4338 | 11,4338 | 15,48 | 0,001 |
| Mesafe (mm) | 1 | 12,8832 | 12,8832 | 17,44 | 0,001 |
| İlerleme (mm/dk) | 1 | 14,2471 | 14,2471 | 19,29 | 0,001 |
| Hata | 25 | 14,8794 | 0,7387 | | |
| Toplam | 29 | 74,0279 | | | |

Şekil 3.3.1.1.2’de Kerf Oranının, ilerleme, kum oranı, basınç, mesafeye göre değişimini gösteren yanıt yüzey grafiği verilmiştir. Kum oranının artmasıyla kerf oranının arttığı ilerlemenin artmasıyla kerf oranının azaldığı görülmektedir.



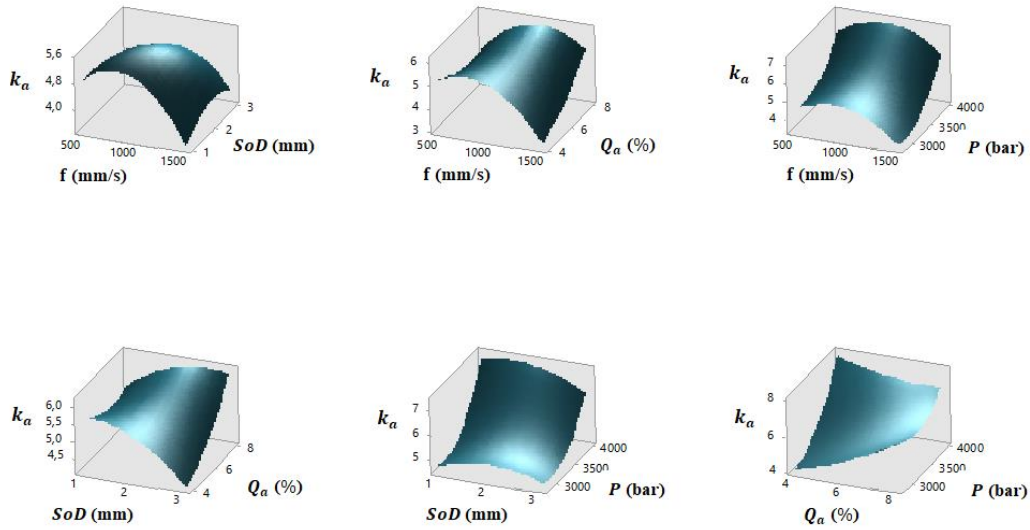
Şekil 3.3.1.2 : AFRP trim operasyonuna ait kerf oranı için yanıt yüzey grafikleri.

Çizelge 3.3.1.1.3’teki varyans analizi incelendiğinde, Kerf açısı için tek etkili parametrenin basınç olduğu görülebilir.

Çizelge 3.3.1.1.3 : AFRP trim operasyonuna ait kerf açısı için varyans analizi tablosu.

| Kaynak | Serbestlik Derecesi | Kareler Toplamı | Kareler Ortalaması | F-değeri | P-değeri |
|------------------|---------------------|-----------------|--------------------|----------|----------|
| Kum Oranı (%) | 1 | 0.86920 | 0.86924 | 4.38 | 0.055 |
| Basınç (Bar) | 1 | 7.30190 | 7.30192 | 36.83 | 0 |
| Mesafe (mm) | 1 | 0.21450 | 0.21451 | 1.08 | 0.316 |
| İlerleme (mm/dk) | 1 | 0.74340 | 0.74342 | 3.75 | 0.073 |
| Hata | 25 | 9.33910 | 0.19829 | | |
| Toplam | 29 | 18.46810 | | | |

Şekil 3.3.1.1.3'te Kerf açısının, ilerleme, kum oranı, basınç, mesafeye göre değişimi incelenmiştir. Basıncın artmasıyla kerf açısının arttığı görülmektedir.



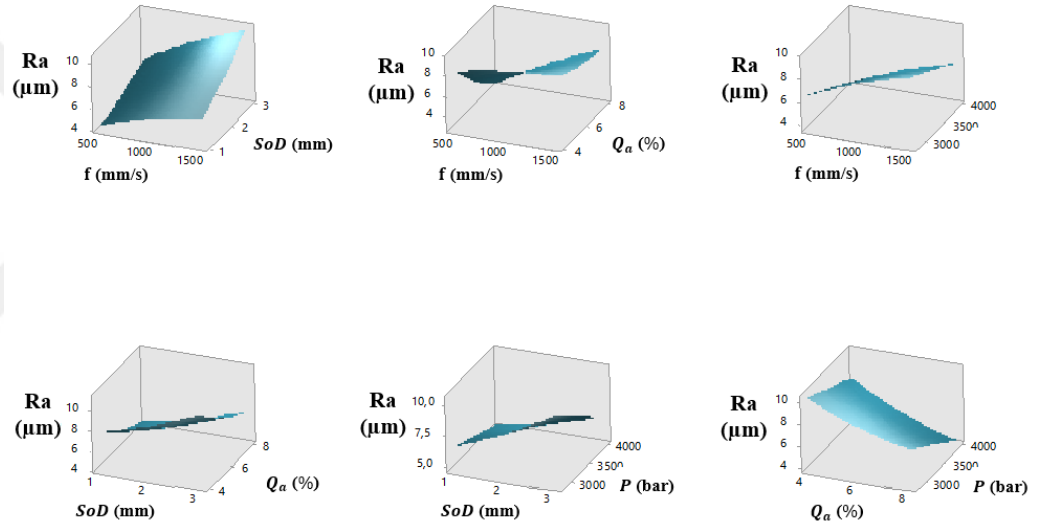
Şekil 3.3.1.1.3 : AFRP trim operasyonuna ait kerf açısı için yanıt yüzey grafikleri.

Çizelge 3.3.1.1.4'teki varyans analizi incelendiğinde yüzey pürüzlülüğü için en etkili parametrenin basınç olduğu görülebilir. İkincil olarak ilerleme ve kum oranı parametrelerinin de yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkisi olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.3.1.1.4 : AFRP trim operasyonuna ait yüzey pürüzlülüğü için varyans analizi tablosu

| Kaynak | Serbestlik Derecesi | Kareler Toplamı | Kareler Ortalaması | F-değeri | P-değeri |
|------------------|---------------------|-----------------|--------------------|----------|----------|
| Kum Oranı (%) | 1 | 0,0186 | 0,0186 | 5,10 | 0,04 |
| Basınç (Bar) | 1 | 0,0964 | 0,0964 | 26,43 | 0 |
| Mesafe (mm) | 1 | 0,0037 | 0,0037 | 1,02 | 0,33 |
| İlerleme (mm/dk) | 1 | 0,0227 | 0,0227 | 6,21 | 0,026 |
| Hata | 25 | 0,1834 | 0,0036 | | |
| Toplam | 29 | 0,3248 | | | |

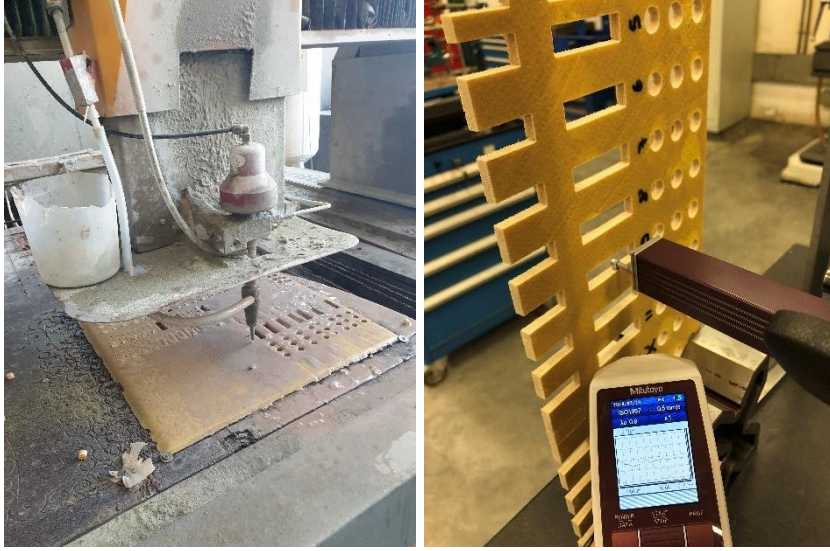
Şekil 3.3.1.1.4'te Yüzey pürüzlülüğü, ilerleme, kum oranı, basınç, mesafeye göre değişimi incelenmiştir. Kum oranının artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün azaldığı görülmektedir. Basıncın artmasıyla ise, yüzey pürüzlülüğü artmaktadır.



Şekil 3.3.1.1.4 : Aramid trim operasyonuna ait yüzey pürüzlülüğü için yanıt yüzey grafikleri.

3.3.1.2 AFRP Cep Açma Operasyonu

AFRP cep açma operasyonu ve yüzey pürüzlülüğü ölçümü Şekil 3.3.1.2.1'de görülmektedir.



(a)

(b)

Şekil 3.3.1.2.1 : (a) AFRP cep açma operasyonu (b) yüzey pürüzlülüğü ölçümü

Yapılan deney tasarımı sonrasında 30 adet deney için 450 mm x 450 mm boyutlarında numune plaka kullanılmıştır. Aramid fiberle güçlendirilmiş polimer malzemeye ait Cep açma Operasyonu için deney tasarımı ve deney sonuçlarını içeren veriler Çizelge 3.3.1.2.1 de gösterilmiştir. Deney tasarımı parametreleri olarak; Kum Oranı (Qa), Basınç (P) ve Mesafe (SoD) ve ilerleme hızı (f) farklı değerlere göre malzeme üzerinde denenmiş, deney sonuçları olarak Yüzey Pürüzlülüğü (Ra), Boyutsal Hata (En), Boyutsal Hata (Boy) ölçülmüştür.

Çizelge 3.3.1.2.1 : AFRP cep açma operasyonuna ait deney tasarım tablosu ve deney sonuçları.

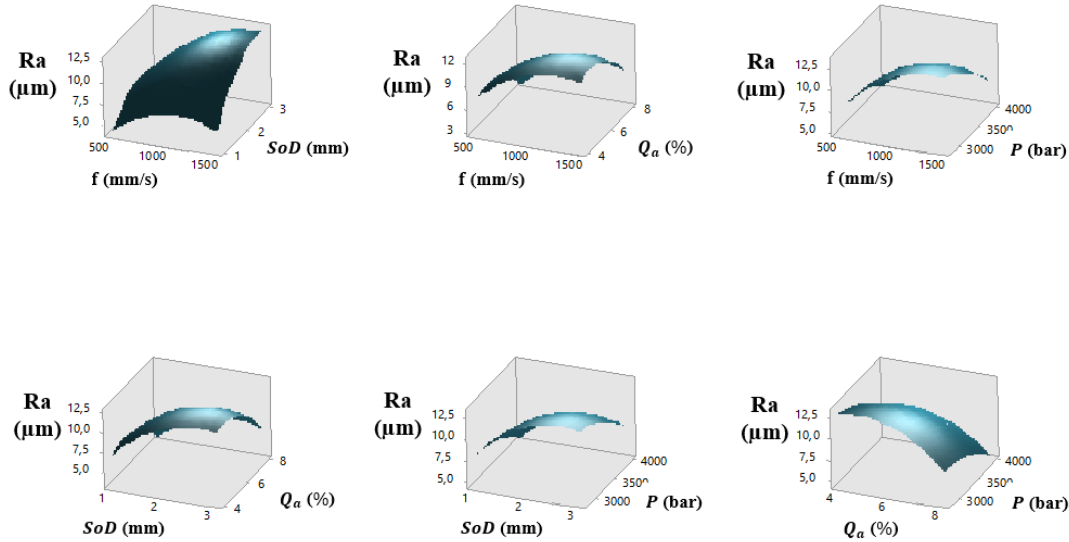
| Deney No. | Qa (%) | P (Bar) | Sod (mm) | f (mm/dk) | Ra (µm) | Boyutsal Hata (En) (%) | Boyutsal Hata (Boy) (%) |
|-----------|--------|---------|----------|-----------|---------|------------------------|-------------------------|
| 1 | 4 | 3400 | 2 | 1000 | 12,778 | 10.1% | 3.2% |
| 2 | 5 | 3100 | 3 | 1250 | 13,083 | 10.0% | 3.2% |
| 3 | 5 | 3100 | 3 | 750 | 10,643 | 11.6% | 3.4% |
| 4 | 5 | 3100 | 2 | 1250 | 10,122 | 11.3% | 3.3% |
| 5 | 5 | 3100 | 2 | 750 | 7,793 | 12.8% | 3.8% |
| 6 | 5 | 3700 | 3 | 1250 | 10,769 | 11.2% | 3.4% |
| 7 | 5 | 3700 | 3 | 750 | 8,760 | 13.2% | 3.8% |
| 8 | 5 | 3700 | 2 | 1250 | 8,883 | 12.6% | 3.7% |
| 9 | 5 | 3700 | 2 | 750 | 8,112 | 15.0% | 4.0% |
| 10 | 6 | 2800 | 2 | 1000 | 15,006 | 11.3% | 3.4% |
| 11 | 6 | 3400 | 3 | 1000 | 12,378 | 11.6% | 3.5% |
| 12 | 6 | 3400 | 2 | 1500 | 12,665 | 11.5% | 3.5% |
| 13 | 6 | 3400 | 2 | 1000 | 11,105 | 13.0% | 3.7% |
| 14 | 6 | 3400 | 2 | 1000 | 11,233 | 12.7% | 3.7% |
| 15 | 6 | 3400 | 2 | 1000 | 11,272 | 12.8% | 3.7% |
| 16 | 6 | 3400 | 2 | 1000 | 11,241 | 12.8% | 3.7% |
| 17 | 6 | 3400 | 2 | 1000 | 10,573 | 12.7% | 3.7% |
| 18 | 6 | 3400 | 2 | 1000 | 10,798 | 12.9% | 3.6% |
| 19 | 6 | 3400 | 2 | 500 | 7,277 | 14.2% | 3.9% |
| 20 | 6 | 3400 | 1 | 1000 | 7,662 | 14.2% | 3.8% |
| 21 | 6 | 4000 | 2 | 1000 | 7,383 | 14.1% | 3.8% |
| 22 | 7 | 3100 | 3 | 1250 | 10,658 | 12.4% | 3.3% |
| 23 | 7 | 3100 | 3 | 750 | 7,391 | 13.0% | 3.4% |
| 24 | 7 | 3100 | 2 | 1250 | 8,363 | 12.9% | 3.4% |
| 25 | 7 | 3100 | 2 | 750 | 7,253 | 13.8% | 3.7% |
| 26 | 7 | 3700 | 3 | 1250 | 9,457 | 13.1% | 3.6% |
| 27 | 7 | 3700 | 3 | 750 | 7,467 | 14.6% | 3.9% |
| 28 | 7 | 3700 | 2 | 1250 | 6,795 | 14.2% | 3.8% |
| 29 | 7 | 3700 | 2 | 750 | 5,962 | 15.3% | 4.1% |
| 30 | 8 | 3400 | 2 | 1000 | 7,406 | 14.5% | 4.0% |

Çizelge 3.3.1.2.2’deki varyans analizi incelendiğinde, yüzey pürüzlülüğü için en etkili parametrenin kum oranı olduğu görülebilir. İkincil olarak ilerleme, mesafe ve basınç parametrelerinin de yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkisi olduğu da görülmektedir.

Çizelge 3.3.1.2.2 : AFRP cep açma operasyonuna ait yüzey pürüzlülüğü için varyans analizi tablosu.

| Kaynak | Serbestlik Derecesi | Kareler Toplamı | Kareler Ortalaması | F-değeri | P-değeri |
|------------------|---------------------|-----------------|--------------------|----------|----------|
| Kum Oranı (%) | 1 | 27,2280 | 27,2278 | 20,98 | 0 |
| Basınç (Bar) | 1 | 24,6980 | 24,6977 | 19,03 | 0,001 |
| Mesafe (mm) | 1 | 24,7600 | 24,7599 | 19,08 | 0,001 |
| İlerleme (mm/dk) | 1 | 27,1500 | 27,1497 | 20,92 | 0 |
| Hata | 25 | 44,3710 | 1,2976 | | |
| Toplam | 29 | 148,2070 | | | |

Şekil 3.3.1.2.2'de Yüzey pürüzlülüğünün, ilerleme, kum oranı, basınç, mesafeye göre değişimi incelenmiştir. Kum oranının artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün azaldığı, basıncın artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün azaldığı görülmektedir.



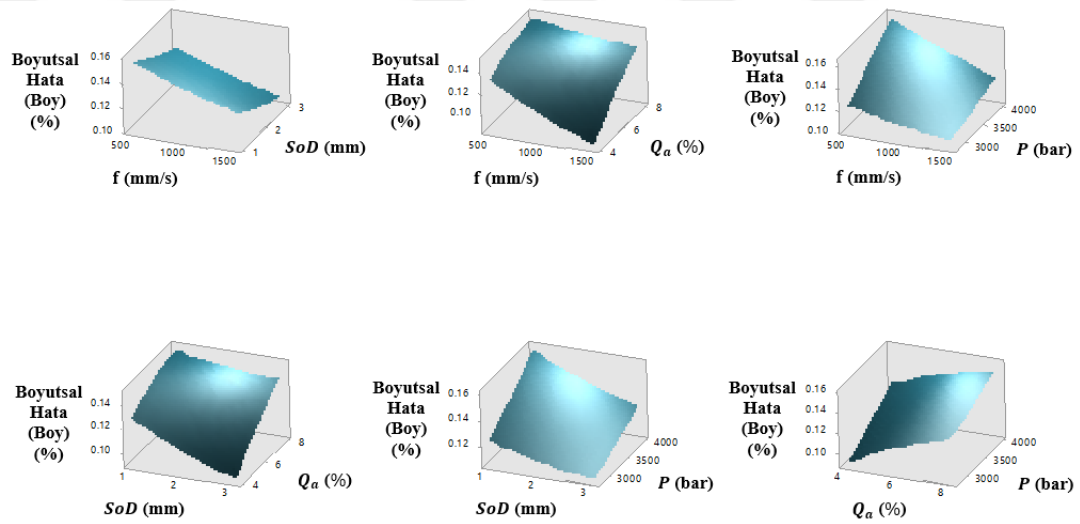
Şekil 3.3.3.2.2 : AFRP cep açma operasyonuna ait yüzey pürüzlülüğü için yanıt yüzey grafikleri.

Çizelge 3.3.1.2.3'deki varyans analizi incelendiğinde, boyutsal hata (Boy) (%) için en etkili parametrenin kum oranı olduğu görülebilir. İkincil olarak basınç, ilerleme ve mesafe parametrelerinin de boyutsal hata (Boy) (%) üzerinde etkisi olduğu da görülmektedir.

Çizelge 3.3.1.2.3 : AFRP cep açma operasyonuna ait boyutsal hata (boy) için varyans analizi tablosu.

| Kaynak | Serbestlik Derecesi | Kareler Toplamı | Kareler Ortalaması | F-değeri | P-değeri |
|------------------|---------------------|-----------------|--------------------|----------|----------|
| Kum Oranı (%) | 1 | 0,0017 | 0,0017 | 240,94 | 0 |
| Basınç (Bar) | 1 | 0,0012 | 0,0012 | 170,15 | 0 |
| Mesafe (mm) | 1 | 0,0008 | 0,0008 | 114,51 | 0 |
| İlerleme (mm/dk) | 1 | 0,0012 | 0,0012 | 164,32 | 0 |
| Hata | 25 | 0,0003 | 0,0000 | | |
| Toplam | 29 | 0,0053 | | | |

Şekil 3.3.1.2.3’de boyutsal hata (Boy), ilerleme, kum oranı, basınç, mesafeye göre değişimi incelenmiştir. Kum oranının ve basıncın artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmektedir.



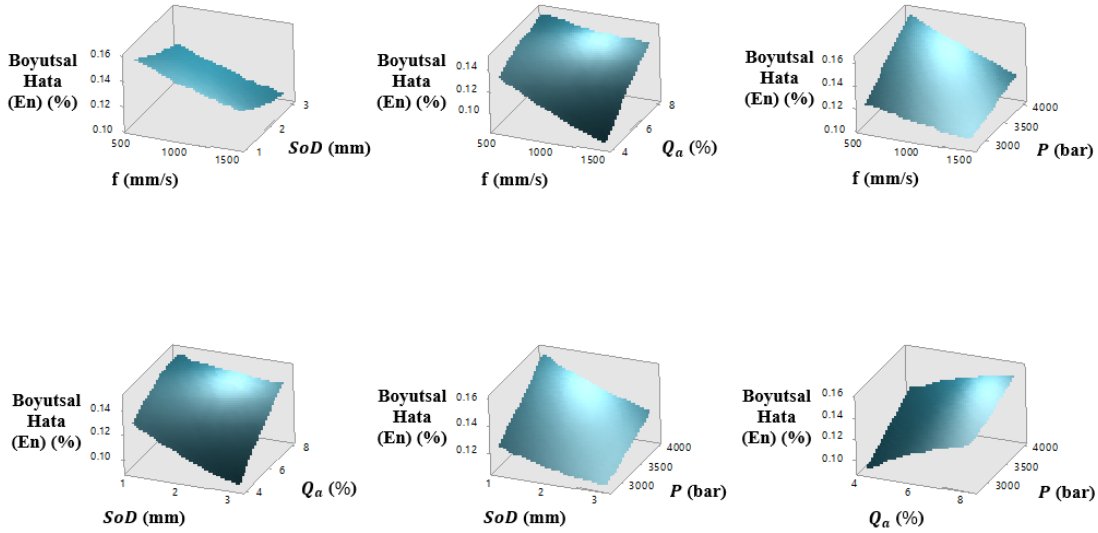
Şekil 3.3.1.2.3 : AFRP cep açma operasyonuna ait boyutsal hata (boy) için yanıt yüzey grafikleri.

Çizelge 3.3.1.2.4’deki varyans analizi incelendiğinde, boyutsal hata (En) için en etkili parametrenin Basınç olduğu görülebilir. İkincil olarak ilerleme, mesafe ve kum oranı parametrelerinin de boyutsal hata (En) üzerinde etkisi olduğu da görülmektedir.

Çizelge 3.3.3.2.4 : AFRP cep açma operasyonuna ait boyutsal hata (en) için varyans analizi tablosu.

| Kaynak | Serbestlik Derecesi | Kareler Toplamı | Kareler Ortalaması | F-değeri | P-değeri |
|------------------|---------------------|-----------------|--------------------|----------|----------|
| Kum Oranı (%) | 1 | 0,000021 | 0,000021 | 16,68 | 0,001 |
| Basınç (Bar) | 1 | 0,000050 | 0,000050 | 40,87 | 0 |
| Mesafe (mm) | 1 | 0,000028 | 0,000028 | 22,99 | 0 |
| İlerleme (mm/dk) | 1 | 0,000042 | 0,000042 | 34,35 | 0 |
| Hata | 25 | 0,000024 | 0,000001 | | |
| Toplam | 29 | 0,000165 | | | |

Şekil 3.3.1.2.4’de boyutsal hata (En), ilerleme, kum oranı, basınç, mesafeye göre değişimi incelenmiştir. Basıncın artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün arttığı, ilerlemenin artmasıyla boyutsal hata (En) azaldığı görülmektedir.



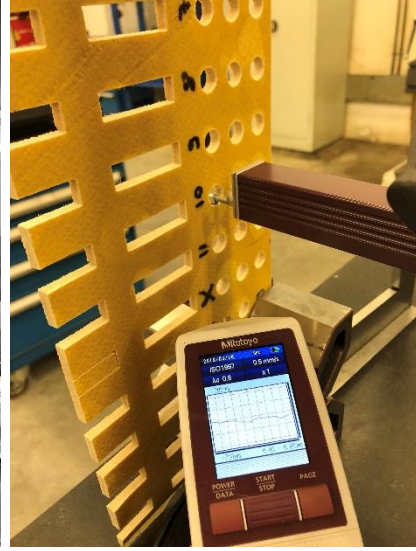
Şekil 3.3.1.2.4 : AFRP cep açma operasyonuna ait boyutsal hata (en) için yanıt yüzey grafikleri

3.3.1.3 AFRP Delik Delme Operasyonu

Aramid fiberle güçlendirilmiş malzeme için delik delme operasyonu ve yüzey pürüzlülüğü ölçümü Şekil 3.3.1.3.1’de görülebilir.



(a)



(b)

Şekil 3.3.1.3.1 : (a) AFRP delik delme operasyonu (b) yüzey pürüzlülüğü ölçümü.

Yapılan deney tasarımı sonrasında 30 adet deney için şekil 450 mm x 450 mm boyutlarında numune plaka kullanılmıştır. Aramid fiberle güçlendirilmiş polimer malzemeye ait delik delme operasyonu için deney tasarımı ve deney sonuçlarını içeren veriler Çizelge 3.3.1.3.1’de gösterilmiştir. Deney tasarımı parametreleri olarak; Kum Oranı (Qa), Basınç (P) ve Mesafe (SoD) ve ilerleme hızı (f) farklı değerlere göre malzeme üzerinde denenmiş, deney sonuçları olarak Yüzey Pürüzlülüğü (Ra), İç Çap Hata (%) ölçülmüştür.

Çizelge 3.3.1.3.1 : AFRP delik delme operasyonuna ait deney tasarım tablosu ve deney sonuçları

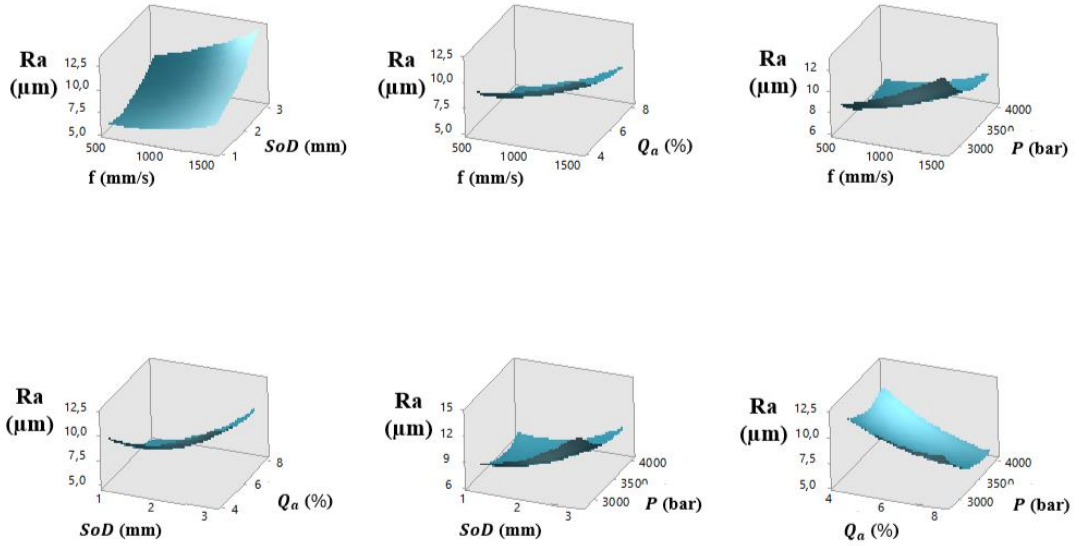
| Deney No. | Qa (%) | P (Bar) | SoD (mm) | f (mm/dk) | Ra (µm) | İç Çap Hata (%) | Fd (Giriş) |
|-----------|--------|---------|----------|-----------|---------|-----------------|------------|
| 1 | 4 | 3400 | 2 | 1000 | 11,817 | 10% | 1,317 |
| 2 | 5 | 3100 | 3 | 1250 | 10,564 | 11% | 1,934 |
| 3 | 5 | 3100 | 3 | 750 | 8,802 | 11% | 2,273 |
| 4 | 5 | 3100 | 2 | 1250 | 8,728 | 12% | 2,358 |
| 5 | 5 | 3100 | 2 | 750 | 7,913 | 11% | 2,170 |
| 6 | 5 | 3700 | 3 | 1250 | 8,783 | 10% | 1,850 |
| 7 | 5 | 3700 | 3 | 750 | 8,313 | 11% | 2,022 |
| 8 | 5 | 3700 | 2 | 1250 | 8,383 | 12% | 3,164 |
| 9 | 5 | 3700 | 2 | 750 | 7,425 | 13% | 1,748 |
| 10 | 6 | 2800 | 2 | 1000 | 11,521 | 10% | 3,239 |
| 11 | 6 | 3400 | 3 | 1000 | 11,653 | 10% | 2,861 |
| 12 | 6 | 3400 | 2 | 1500 | 10,521 | 10% | 1,547 |
| 13 | 6 | 3400 | 2 | 1000 | 7,474 | 12% | 1,882 |
| 14 | 6 | 3400 | 2 | 1000 | 7,201 | 12% | 1,299 |
| 15 | 6 | 3400 | 2 | 1000 | 7,424 | 11% | 2,705 |
| 16 | 6 | 3400 | 2 | 1000 | 7,202 | 11% | 3,369 |
| 17 | 6 | 3400 | 2 | 1000 | 7,201 | 12% | 1,702 |
| 18 | 6 | 3400 | 2 | 1000 | 7,233 | 11% | 1,614 |
| 19 | 6 | 3400 | 2 | 500 | 5,466 | 14% | 2,148 |
| 20 | 6 | 3400 | 1 | 1000 | 5,526 | 14% | 2,485 |
| 21 | 6 | 4000 | 2 | 1000 | 6,362 | 15% | 1,864 |
| 22 | 7 | 3100 | 3 | 1250 | 10,636 | 11% | 2,954 |
| 23 | 7 | 3100 | 3 | 750 | 7,996 | 12% | 2,242 |
| 24 | 7 | 3100 | 2 | 1250 | 7,528 | 12% | 1,857 |
| 25 | 7 | 3100 | 2 | 750 | 7,295 | 11% | 2,291 |
| 26 | 7 | 3700 | 3 | 1250 | 8,303 | 11% | 1,441 |
| 27 | 7 | 3700 | 3 | 750 | 7,262 | 14% | 1,813 |
| 28 | 7 | 3700 | 2 | 1250 | 6,909 | 13% | 2,353 |
| 29 | 7 | 3700 | 2 | 750 | 5,882 | 14% | 2,800 |
| 30 | 8 | 3400 | 2 | 1000 | 4,696 | 13% | 3,370 |

Çizelge 3.3.1.3.2'deki varyans analizi incelendiğinde, yüzey pürüzlülüğü için en etkili parametrenin mesafe olduğu görülebilir. İkincil olarak kum oranı parametresinin de yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkisi olduğu da görülmektedir.

Çizelge 3.3.1.3.2 : AFRP delik delme operasyonuna ait yüzey pürüzlülüğü için varyans analizi tablosu.

| Kaynak | Serbestlik Derecesi | Kareler Toplamı | Kareler Ortalaması | F-değeri | P-değeri |
|------------------|---------------------|------------------|--------------------|----------|----------|
| Kum Oranı (%) | 1 | 18,980200 | 18,980200 | 12,73 | 0,003 |
| Basınç (Bar) | 1 | 14,293800 | 14,293800 | 9,59 | 0,008 |
| Mesafe (mm) | 1 | 21,757000 | 21,757000 | 14,59 | 0,002 |
| İlerleme (mm/dk) | 1 | 15,127800 | 15,127800 | 10,15 | 0,007 |
| Hata | 25 | 28,547100 | 1,491000 | | |
| Toplam | 29 | 98,705900 | | | |

Şekil 3.3.1.3.2’de Yüzey pürüzlülüğünün, ilerleme, kum oranı, basınç, mesafeye göre değişimi incelenmiştir. Kum oranının ve mesafenin artmasıyla, yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmektedir.



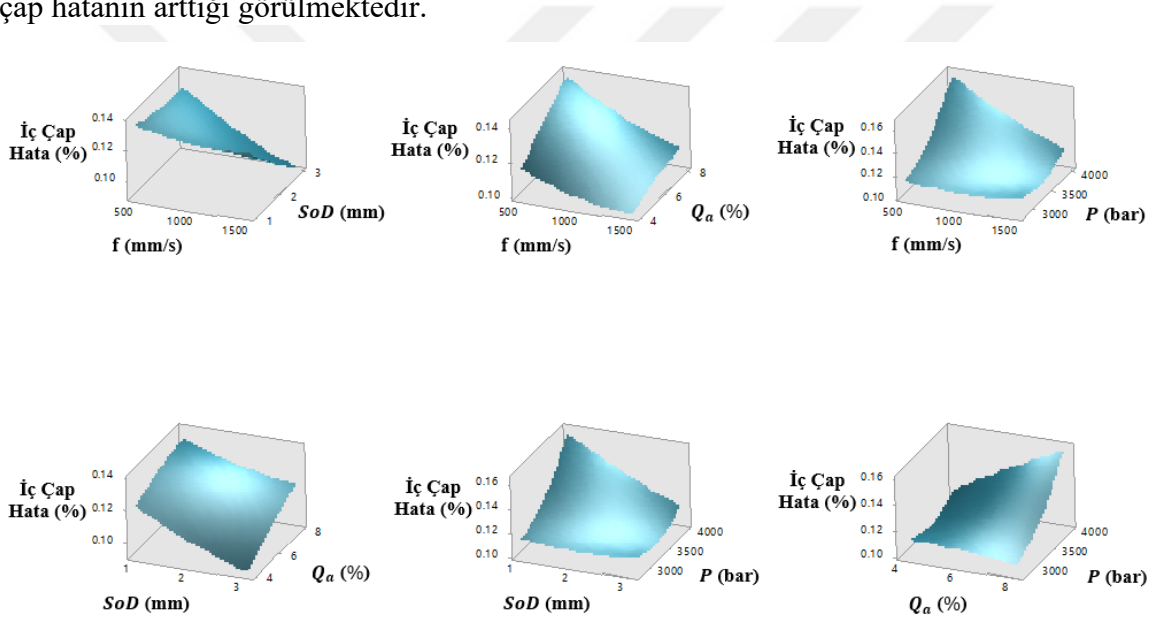
Şekil 3.3.1.3.2 : AFRP delik delme operasyonuna ait yüzey pürüzlülüğü için yanıt yüzey grafikleri.

Çizelge 3.3.1.3.3’deki varyans analizi incelendiğinde, İç çap hata için en etkili parametrenin basınç olduğu görülebilir. İkincil olarak ilerleme, mesafe ve kum oranı parametrelerinin de yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkisi olduğu da görülmektedir.

Çizelge 3.3.1.3.3 : AFRP delik delme operasyonuna ait iç çap hata için varyans analizi tablosu.

| Kaynak | Serbestlik Derecesi | Kareler Toplamı | Kareler Ortalaması | F-değeri | P-değeri |
|------------------|---------------------|-----------------|--------------------|----------|----------|
| Kum Oranı (%) | 1 | 0,00054 | 0,00054 | 7,42 | 0,016 |
| Basınç (Bar) | 1 | 0,00103 | 0,00103 | 14,22 | 0,002 |
| Mesafe (mm) | 1 | 0,00081 | 0,00081 | 11,16 | 0,005 |
| İlerleme (mm/dk) | 1 | 0,00085 | 0,00085 | 11,74 | 0,004 |
| Hata | 25 | 0,00176 | 0,00007 | | |
| Toplam | 29 | 0,00499 | | | |

Şekil 3.3.1.3.3'de İç çap hatanın, ilerleme, kum oranı, basınç, mesafeye göre değişimi incelenmiştir. İlerlemenin artmasıyla, iç çap Hatanın azaldığı, basıncın artmasıyla iç çap hatanın arttığı görülmektedir.



Şekil 3.3.1.3.3 : AFRP delik delme operasyonuna ait iç çap hata için yanıt yüzey grafikleri.

Çizelge 3.3.1.3.4'deki varyans analizi sonuçlarında görüldüğü gibi, giriş delaminasyonu (Fd) için etkili parametre bulunamamıştır.

Çizelge 3.3.1.3.4 : AFRP delik delme operasyonuna ait giriş delaminasyonu için varyans analizi tablosu.

| Kaynak | Serbestlik Derecesi | Kareler Toplamı | Kareler Ortalaması | F-değeri | P-değeri |
|------------------|---------------------|-----------------|--------------------|----------|----------|
| Kum Oranı (%) | 1 | 0,78380 | 0,78380 | 1,55 | 0,234 |
| Basınç (Bar) | 1 | 0,55130 | 0,55134 | 1,09 | 0,315 |
| Mesafe (mm) | 1 | 0,08900 | 0,08896 | 0,18 | 0,682 |
| İlerleme (mm/dk) | 1 | 0,01760 | 0,01762 | 0,03 | 0,855 |
| Hata | 25 | 9,15030 | 0,50674 | | |
| Toplam | 29 | 10,59200 | | | |

3.3.2 UHMWPE Aşındırıcılı Su Jeti Deneyleri ve Analizleri

3.3.2.1 UHMWPE Trim Operasyonu

UHMWPE üzerinde yapılan su jeti trim operasyonu Şekil 3.3.2.1.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.3.2.1.1 : UHMWPE trim operasyonu.

Yapılan deney tasarımı sonrasında 30 adet deney için 450 mm x 450 mm boyutlarında numune plaka kullanılmıştır. UHMWPE polimer malzemeye ait trim operasyonu için deney tasarımı ve deney sonuçlarını içeren veriler Çizelge 3.3.2.1.1’de gösterilmiştir. Deney tasarımı parametreleri olarak; kum oranı (Qa), Basınç (P) ve mesafe (SoD) ve ilerleme hızı (f) farklı değerlere göre malzeme üzerinde denenmiş, deney sonuçları olarak Kerf Oranı (Kr), Kerf Açısı (Ka) ve Yüzey Pürüzlülüğü (Ra) ölçülmüştür.

Çizelge 3.3.2.1.1 : UHMWPE trim operasyonuna ait deney tasarım tablosu ve deney sonuçları.

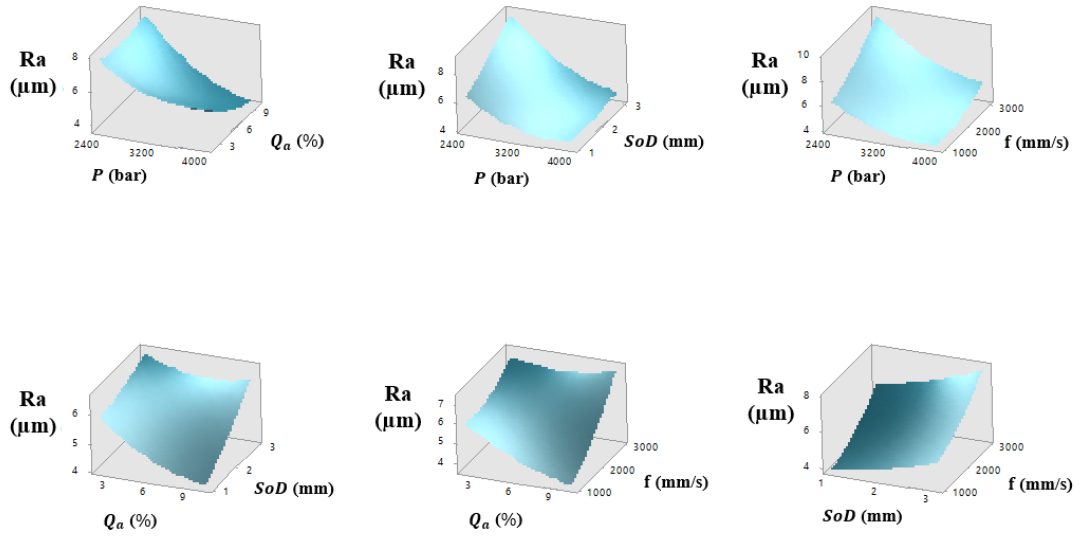
| Deney No, | Qa (%) | P (Bar) | SoD (mm) | f (mm/dk) | Kr | Ka(deg) | Ra (µm) |
|-----------|--------|---------|----------|-----------|-------|---------|---------|
| 1 | 2 | 3200 | 2 | 2000 | 3,64 | 7,48 | 5,890 |
| 2 | 4 | 2800 | 2 | 1500 | 3,37 | 8,07 | 5,924 |
| 3 | 4 | 2800 | 2 | 2500 | 9,27 | 9,72 | 6,328 |
| 4 | 4 | 2800 | 3 | 1500 | 3,51 | 8,15 | 6,070 |
| 5 | 4 | 2800 | 3 | 2500 | 3,79 | 8,17 | 7,717 |
| 6 | 4 | 3600 | 2 | 1500 | 2,89 | 6,79 | 4,705 |
| 7 | 4 | 3600 | 2 | 2500 | 2,45 | 6,29 | 5,647 |
| 8 | 4 | 3600 | 3 | 1500 | 3,51 | 8,93 | 5,632 |
| 9 | 4 | 3600 | 3 | 2500 | 3,29 | 8,42 | 5,809 |
| 10 | 6 | 2400 | 2 | 2000 | 4,8 | 8,78 | 7,895 |
| 11 | 6 | 3200 | 1 | 2000 | 5,07 | 8,10 | 4,879 |
| 12 | 6 | 3200 | 2 | 1000 | 2,89 | 7,93 | 4,278 |
| 13 | 6 | 3200 | 2 | 2000 | 3,64 | 7,96 | 4,703 |
| 14 | 6 | 3200 | 2 | 2000 | 3,74 | 8,15 | 5,054 |
| 15 | 6 | 3200 | 2 | 2000 | 3,82 | 8,41 | 5,555 |
| 16 | 6 | 3200 | 2 | 2000 | 3,77 | 8,26 | 5,150 |
| 17 | 6 | 3200 | 2 | 2000 | 3,75 | 8,13 | 5,939 |
| 18 | 6 | 3200 | 2 | 2000 | 3,65 | 8,04 | 4,942 |
| 19 | 6 | 3200 | 2 | 3000 | 2,44 | 5,63 | 7,009 |
| 20 | 6 | 3200 | 3 | 2000 | 5,26 | 10,82 | 5,843 |
| 21 | 6 | 4000 | 2 | 2000 | 2,85 | 6,57 | 4,104 |
| 22 | 8 | 2800 | 2 | 1500 | 3,69 | 8,30 | 4,375 |
| 23 | 8 | 2800 | 2 | 2500 | 4,96 | 9,26 | 6,434 |
| 24 | 8 | 2800 | 3 | 1500 | 5,74 | 10,77 | 6,250 |
| 25 | 8 | 2800 | 3 | 2500 | 5,21 | 10,59 | 7,524 |
| 26 | 8 | 3600 | 2 | 1500 | 4,48 | 9,66 | 3,827 |
| 27 | 8 | 3600 | 2 | 2500 | 4,1 | 9,12 | 4,659 |
| 28 | 8 | 3600 | 3 | 1500 | 5,39 | 10,66 | 4,083 |
| 29 | 8 | 3600 | 3 | 2500 | 5,05 | 9,74 | 5,581 |
| 30 | 10 | 3200 | 2 | 2000 | 13,22 | 15,57 | 5,234 |

Çizelge 3.3.2.1.2'deki varyans analizi incelendiğinde, yüzey pürüzlülüğü için en etkili parametrenin basınç olduğu görülebilir. İkincil olarak ilerleme, mesafe ve kum oranı parametrelerinin de yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkisi olduğu da görülmektedir.

Çizelge 3.3.2.1.2 : UHMWPE trim operasyonuna ait yüzey pürüzlülüğü için varyans analizi tablosu.

| Kaynak | Serbestlik Derecesi | Kareler Toplamı | Kareler Ortalaması | F-değeri | P-değeri |
|------------------|---------------------|-----------------|--------------------|----------|----------|
| Kum Oranı (%) | 1 | 1,7115 | 1,7115 | 8,85 | 0,01 |
| Basınç (Bar) | 1 | 13,8964 | 13,8964 | 71,86 | 0 |
| Mesafe (mm) | 1 | 3,1496 | 3,1496 | 16,29 | 0,001 |
| İlerleme (mm/dk) | 1 | 8,5153 | 8,5153 | 44,03 | 0 |
| Hata | 25 | 5,4237 | 0,1934 | | |
| Toplam | 29 | 32,6965 | | | |

Şekil 3.3.2.1.2’de Yüzey pürüzlülüğünün, ilerleme, kum oranı, basınç, mesafeye göre değişimi incelenmiştir. Basıncın artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün azaldığı, ilerlemenin artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmektedir.



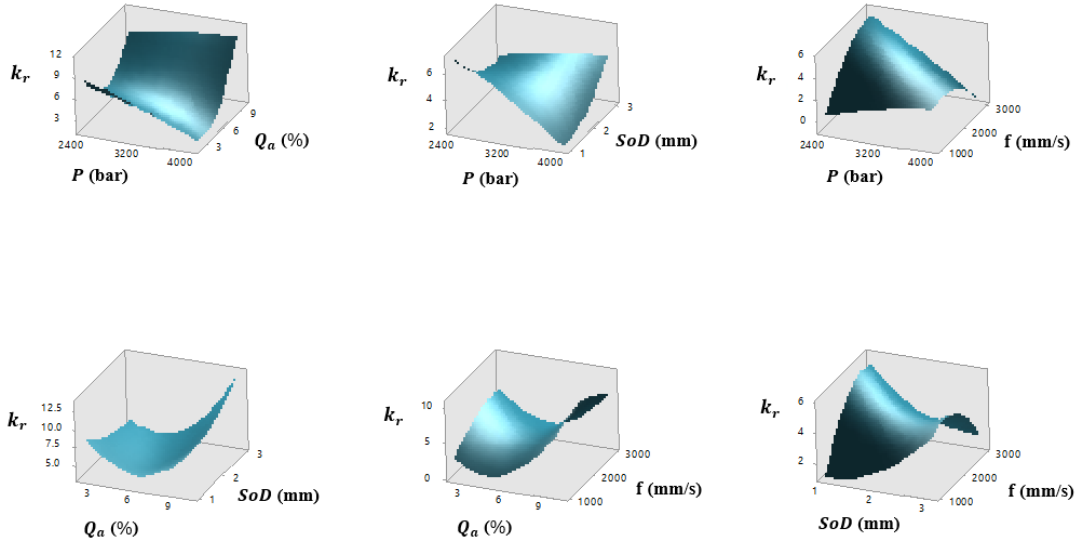
Şekil 3.3.2.1.2 : UHMWPE trim operasyonuna ait yüzey pürüzlülüğü için yanıt yüzey grafikleri.

Çizelge 3.3.2.1.3’teki varyans analizi incelendiğinde, kerf oranı için tek etkili parametrenin kum oranı olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.3.2.1.3 : UHMWPE trim operasyonuna ait kerf oranı için varyans analizi tablosu.

| Kaynak | Serbestlik Derecesi | Kareler Toplamı | Kareler Ortalaması | F-değeri | P-değeri |
|------------------|---------------------|-----------------|--------------------|----------|----------|
| Kum Oranı (%) | 1 | 27,5400 | 27,5397 | 11,60 | 0,004 |
| Basınç (Bar) | 1 | 6,2650 | 6,2654 | 2,64 | 0,127 |
| Mesafe (mm) | 1 | 0,0180 | 0,0180 | 0,01 | 0,932 |
| İlerleme (mm/dk) | 1 | 0,8970 | 0,8971 | 0,38 | 0,549 |
| Hata | 25 | 95,1580 | 2,3738 | | |
| Toplam | 29 | 129,8780 | | | |

Şekil 3.3.2.1.3'te Kerf oranı, ilerleme, kum oranı, basınç, mesafeye göre değişimi incelenmiştir. Kum oranı arttığında kerf oranının da arttığı görülmektedir.



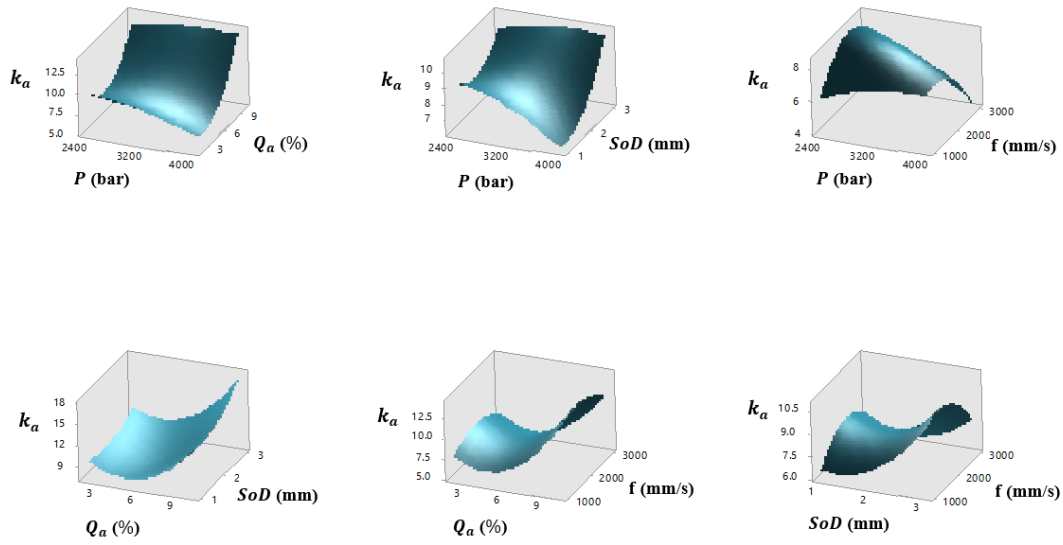
Şekil 3.3.2.1.3 : UHMWPE trim operasyonuna ait kerf oranı için yanıt yüzey grafikleri.

Çizelge 3.3.2.1.4'teki varyans analizi incelendiğinde, kerf açısı için en etkili parametrenin kum oranı olduğu görülebilir. İkincil olarak mesafe parametresinin de kerf açısı üzerinde etkisi olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.3.2.1.4 : UHMWPE trim operasyonuna ait kerf açısı için varyans analizi tablosu.

| Kaynak | Serbestlik Derecesi | Kareler Toplamı | Kareler Ortalaması | F-değeri | P-değeri |
|------------------|---------------------|-----------------|--------------------|----------|----------|
| Kum Oranı (%) | 1 | 36,8491 | 36,8491 | 35,99 | 0 |
| Basınç (Bar) | 1 | 2,5570 | 2,5570 | 2,50 | 0,136 |
| Mesafe (mm) | 1 | 7,7500 | 7,7500 | 7,57 | 0,016 |
| İlerleme (mm/dk) | 1 | 0,8902 | 0,8902 | 0,87 | 0,367 |
| Hata | 25 | 47,7505 | 1,0239 | | |
| Toplam | 29 | 95,7968 | | | |

Şekil 3.3.2.1.4'te Kerf açısı, ilerleme, kum oranı, basınç, mesafeye göre değişimi incelenmiştir. Kum oranı ve mesafenin artmasıyla kerf açısı arttığı görülmektedir.



Şekil 3.3.2.1.4 : UHMWPE trim operasyonuna ait kerf açısı için yanıt yüzey grafikleri.

3.3.2.2 UHMWPE Cep Açma Operasyonu

UHMWPE üzerinde yapılan su jeti cep açma operasyonu Şekil 3.3.2.2.1'de gösterilmiştir. Yapılan deney tasarımı sonrasında 30 adet deney için 450 mm x 450 mm boyutlarında numune plaka kullanılmıştır. UHMWPE polimer malzemeye ait cep açma operasyonu için deney tasarımı ve deney sonuçlarını içeren veriler Çizelge 3.3.2.2.1'de gösterilmiştir. Deney tasarımı parametreleri olarak; Kum Oranı (Q_a), Basınç (P) ve Mesafe (SoD) ve ilerleme hızı (f) farklı değerlere göre malzeme üzerinde denenmiş, deney sonuçları olarak Boyutsal Hata (En), Boyutsal Hata (Boy) ve Yüzey Pürüzlülüğü (Ra) ölçülmüştür.



(a)

(b)

Şekil 3.3.2.2.1 : (a) UHMWPE cep açma operasyonu (b) yüzey pürüzlülüğü ölçümü.

Çizelge 3.3.2.2.1 : UHMWPE cep açma operasyonuna ait deney tasarım tablosu ve deney sonuçları.

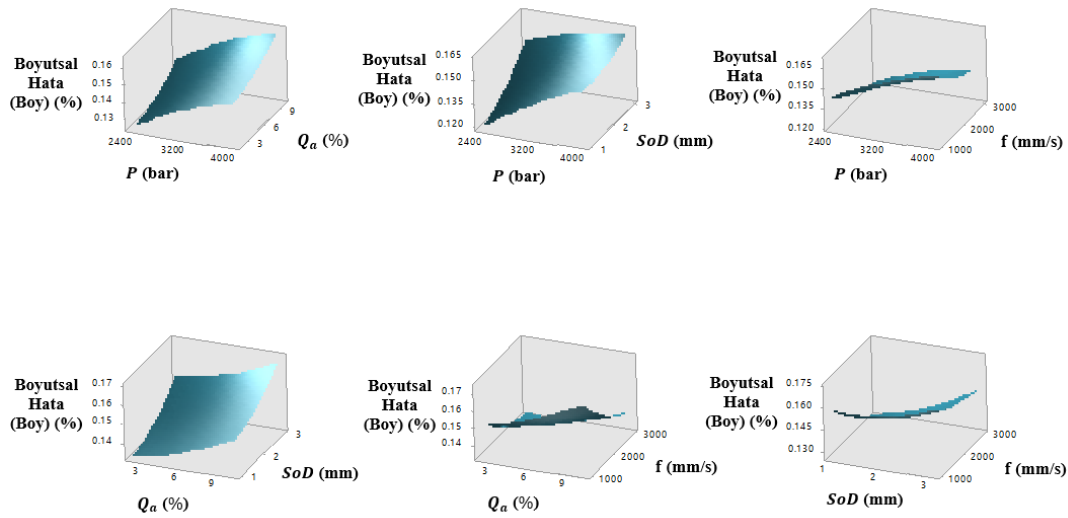
| Deney No, | Qa (%) | P (Bar) | Sod (mm) | f (mm/dk) | Boyutsal Hata (En) (%) | Boyutsal Hata (Boy) (%) | Ra (µm) |
|------------------|---------------|----------------|-----------------|------------------|-------------------------------|--------------------------------|----------------|
| 1 | 2 | 3200 | 2 | 2000 | 14% | 3,4% | 6,727 |
| 2 | 4 | 2800 | 2 | 1500 | 14% | 3,9% | 4,647 |
| 3 | 4 | 2800 | 2 | 2500 | 13% | 3,2% | 6,575 |
| 4 | 4 | 2800 | 3 | 1500 | 14% | 3,9% | 6,216 |
| 5 | 4 | 2800 | 3 | 2500 | 14% | 3,8% | 7,951 |
| 6 | 4 | 3600 | 2 | 1500 | 15% | 4,0% | 3,713 |
| 7 | 4 | 3600 | 2 | 2500 | 14% | 4,0% | 4,065 |
| 8 | 4 | 3600 | 3 | 1500 | 15% | 4,3% | 4,163 |
| 9 | 4 | 3600 | 3 | 2500 | 14% | 3,9% | 6,665 |
| 10 | 6 | 2400 | 2 | 2000 | 13% | 3,2% | 7,583 |
| 11 | 6 | 3200 | 1 | 2000 | 14% | 3,6% | 4,069 |
| 12 | 6 | 3200 | 2 | 1000 | 16% | 4,3% | 3,921 |
| 13 | 6 | 3200 | 2 | 2000 | 14% | 4,0% | 5,277 |
| 14 | 6 | 3200 | 2 | 2000 | 14% | 4,1% | 5,021 |
| 15 | 6 | 3200 | 2 | 2000 | 15% | 4,0% | 4,947 |
| 16 | 6 | 3200 | 2 | 2000 | 14% | 4,1% | 4,942 |
| 17 | 6 | 3200 | 2 | 2000 | 15% | 4,1% | 5,231 |
| 18 | 6 | 3200 | 2 | 2000 | 14% | 4,1% | 4,936 |
| 19 | 6 | 3200 | 2 | 3000 | 14% | 3,5% | 6,853 |
| 20 | 6 | 3200 | 3 | 2000 | 16% | 4,2% | 6,433 |
| 21 | 6 | 4000 | 2 | 2000 | 16% | 4,4% | 3,584 |
| 22 | 8 | 2800 | 2 | 1500 | 15% | 4,0% | 3,984 |
| 23 | 8 | 2800 | 2 | 2500 | 13% | 3,7% | 4,458 |
| 24 | 8 | 2800 | 3 | 1500 | 15% | 4,3% | 4,015 |
| 25 | 8 | 2800 | 3 | 2500 | 15% | 4,2% | 5,580 |
| 26 | 8 | 3600 | 2 | 1500 | 16% | 4,3% | 3,525 |
| 27 | 8 | 3600 | 2 | 2500 | 15% | 4,0% | 4,413 |
| 28 | 8 | 3600 | 3 | 1500 | 16% | 4,5% | 3,889 |
| 29 | 8 | 3600 | 3 | 2500 | 15% | 4,3% | 4,174 |
| 30 | 10 | 3200 | 2 | 2000 | 15% | 4,4% | 3,946 |

Çizelge 3.3.2.2.2'deki varyans analizi incelendiğinde, boyutsal hata (Boy) için en etkili parametrenin kum oranı olduğu görülebilir. İkincil olarak ilerleme, mesafe ve basınç parametrelerinin de boyutsal hata (Boy) üzerinde etkisi olduğu da görülmektedir.

Çizelge 3.3.2.2.2 : UHMWPE cep açma operasyonuna ait boyutsal hata (boy) için varyans analizi tablosu.

| Kaynak | Serbestlik Derecesi | Kareler Toplamı | Kareler Ortalaması | F-değeri | P-değeri |
|------------------|---------------------|-----------------|--------------------|----------|----------|
| Kum Oranı (%) | 1 | 0,0009 | 0,0009 | 73,38 | 0 |
| Basınç (Bar) | 1 | 0,0003 | 0,0003 | 28,06 | 0 |
| Mesafe (mm) | 1 | 0,0005 | 0,0005 | 42,49 | 0 |
| İlerleme (mm/dk) | 1 | 0,0008 | 0,0008 | 68,09 | 0 |
| Hata | 25 | 0,0003 | 0,0000 | | |
| Toplam | 29 | 0,0028 | | | |

Şekil 3.3.2.2.2’te Boyutsal Hata (Boy), ilerleme, kum oranı, basınç, mesafeye göre değişimi incelenmiştir. Kum oranının artmasıyla boyutsal hata (Boy)’nın arttığı, ilerlemenin artmasıyla azaldığı görülmektedir.



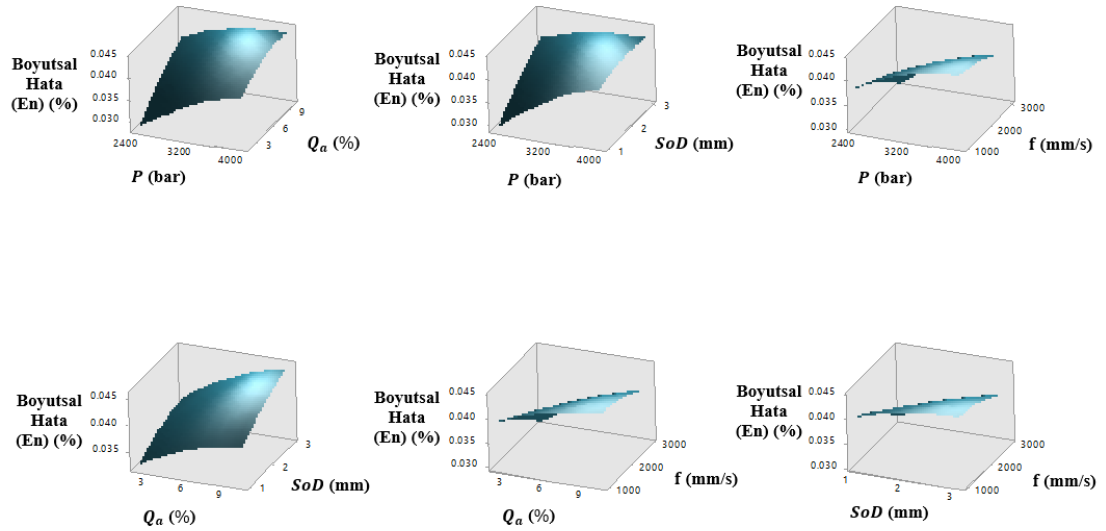
Şekil 3.3.2.2.2 : UHMWPE cep açma operasyonuna ait boyutsal hata (boy) için yanıt yüzey grafikler.

Çizelge 3.3.2.2.3’teki varyans analizi incelendiğinde, boyutsal hata (En) için en etkili parametrenin basınç olduğu görülebilir. İkincil olarak kum oranı, ilerleme ve mesafe parametrelerinin de boyutsal hata (En) üzerinde etkisi olduğu da görülmektedir.

Çizelge 3.3.2.2.3 : UHMWPE cep açma operasyonuna ait boyutsal hata (en) için varyans analizi tablosu

| Kaynak | Serbestlik Derecesi | Kareler Toplamı | Kareler Ortalaması | F-değeri | P-değeri |
|------------------|---------------------|-----------------|--------------------|----------|----------|
| Kum Oranı (%) | 1 | 0,000086 | 0,000086 | 30,39 | 0 |
| Basınç (Bar) | 1 | 0,000092 | 0,000092 | 32,43 | 0 |
| Mesafe (mm) | 1 | 0,000047 | 0,000047 | 16,47 | 0,001 |
| İlerleme (mm/dk) | 1 | 0,000063 | 0,000063 | 22,33 | 0 |
| Hata | 25 | 0,000066 | 0,000003 | | |
| Toplam | 29 | 0,000354 | | | |

Şekil 3.3.2..2.3'te Boyutsal hata (En), ilerleme, kum oranı, basınç, mesafeye göre değişimi incelenmiştir. Basınç ve kum oranı artmasıyla boyutsal hata (En)'nin arttığı görülmektedir.



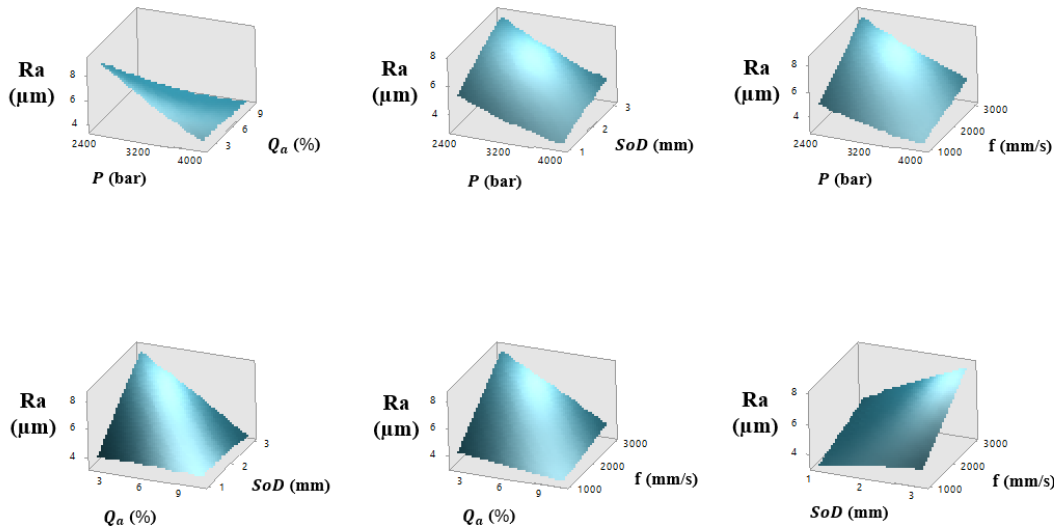
Şekil 3.3.2.2.3 : UHMWPE cep açma operasyonuna ait boyutsal hata (en) için yanıt yüzey grafikleri.

Çizelge 3.3.2.2.4'deki varyans analizi incelendiğinde, yüzey pürüzlülüğü için en etkili parametrenin basınç olduğu görülebilir. İkincil olarak ilerleme, kum Oranı ve mesafe parametrelerinin de yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkisi olduğu da görülmektedir.

Çizelge 3.3.2.2.4 : UHMWPE cep açma operasyonuna ait yüzey pürüzlülüğü için varyans analizi tablosu.

| Kaynak | Serbestlik Derecesi | Kareler Toplamı | Kareler Ortalaması | F-değeri | P-değeri |
|------------------|---------------------|-----------------|--------------------|----------|----------|
| Kum Oranı (%) | 1 | 10,0345 | 10,0345 | 48,40 | 0 |
| Basınç (Bar) | 1 | 11,7843 | 11,7843 | 56,84 | 0 |
| Mesafe (mm) | 1 | 6,0013 | 6,0013 | 28,95 | 0 |
| İlerleme (mm/dk) | 1 | 10,1287 | 10,1287 | 48,86 | 0 |
| Hata | 25 | 8,2683 | 0,2073 | | |
| Toplam | 29 | 46,2171 | | | |

Şekil 3.3.2.2.4’de Yüzey pürüzlülüğü, ilerleme, kum oranı, basınç, mesafeye göre değişimi incelenmiştir. Basıncın artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün azaldığı, ilerlemenin artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmektedir.



Şekil 3.3.2.2.4 : UHMWPE Cep açma operasyonuna ait yüzey pürüzlülüğü için yanıt yüzey grafikleri.

3.3.2.3 UHMWPE Delik Delme Operasyonu

Şekil 3.3.2.3.1’de UHMWPE malzemesi üzerinde su jeti delik delme işlemi ve sonrasında yüzey pürüzlülüğü ölçümleri verilmiştir. Yapılan deney tasarımı sonrasında 30 adet deney için şekil 450 mm x 450 mm boyutlarında numune plaka kullanılmıştır. UHMWPE polimer malzemeye ait delik delme operasyonu için deney tasarımı ve deney sonuçlarını içeren veriler Çizelge 3.3.2.3.1’de gösterilmiştir. Deney tasarımı parametreleri olarak; Kum Oranı (Qa), Basınç (P) ve Mesafe (SoD) ve ilerleme hızı (f) farklı değerlere göre malzeme üzerinde denenmiş, deney sonuçları

olarak Yüzey Pürüzlülüğü (Ra), İç Çap Hata(%), Çıkış Delaminasyon (Fd) faktörü ölçülmüştür.



(a)



(b)

Şekil 3.3.2.3.1 : (a) UHMWPE Delik delme operasyonu (b) yüzey pürüzlülüğü ölçümü.

Çizelge 3.3.2.3.1. UHMWPE Delik delme operasyonuna ait deney tasarım tablosu ve deney sonuçları.

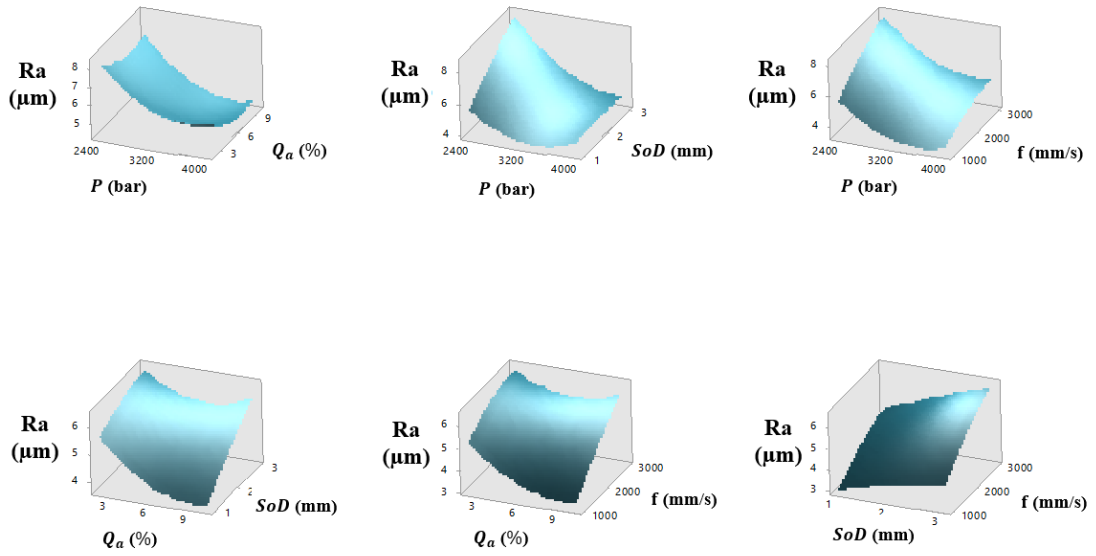
| Deney No. | Qa (%) | P (Bar) | SoD (mm) | f (mm/dk) | Ra (µm) | İç Çap Hata (%) | Fd (Çıkış) |
|-----------|--------|---------|----------|-----------|---------|-----------------|------------|
| 1 | 2 | 3200 | 2 | 2000 | 6,563 | 13% | 1,4 |
| 2 | 4 | 2800 | 2 | 1500 | 4,943 | 13% | 1,3 |
| 3 | 4 | 2800 | 2 | 2500 | 5,657 | 13% | 1,5 |
| 4 | 4 | 2800 | 3 | 1500 | 6,037 | 14% | 1,4 |
| 5 | 4 | 2800 | 3 | 2500 | 7,219 | 13% | 1,7 |
| 6 | 4 | 3600 | 2 | 1500 | 4,335 | 14% | 1,4 |
| 7 | 4 | 3600 | 2 | 2500 | 5,231 | 13% | 1,4 |
| 8 | 4 | 3600 | 3 | 1500 | 4,716 | 14% | 1,3 |
| 9 | 4 | 3600 | 3 | 2500 | 5,067 | 14% | 1,5 |
| 10 | 6 | 2400 | 2 | 2000 | 7,360 | 12% | 1,5 |
| 11 | 6 | 3200 | 1 | 2000 | 4,357 | 12% | 1,7 |
| 12 | 6 | 3200 | 2 | 1000 | 3,608 | 15% | 1,3 |
| 13 | 6 | 3200 | 2 | 2000 | 4,755 | 14% | 1,3 |
| 14 | 6 | 3200 | 2 | 2000 | 4,995 | 13% | 1,3 |
| 15 | 6 | 3200 | 2 | 2000 | 4,895 | 13% | 1,3 |
| 16 | 6 | 3200 | 2 | 2000 | 4,816 | 14% | 1,3 |
| 17 | 6 | 3200 | 2 | 2000 | 4,945 | 14% | 1,3 |
| 18 | 6 | 3200 | 2 | 2000 | 4,919 | 14% | 1,4 |
| 19 | 6 | 3200 | 2 | 3000 | 5,680 | 12% | 1,2 |
| 20 | 6 | 3200 | 3 | 2000 | 5,237 | 14% | 1,3 |
| 21 | 6 | 4000 | 2 | 2000 | 4,549 | 14% | 1,3 |
| 22 | 8 | 2800 | 2 | 1500 | 4,567 | 14% | 1,6 |
| 23 | 8 | 2800 | 2 | 2500 | 5,573 | 13% | 1,8 |
| 24 | 8 | 2800 | 3 | 1500 | 5,487 | 14% | 1,6 |
| 25 | 8 | 2800 | 3 | 2500 | 7,097 | 14% | 1,7 |
| 26 | 8 | 3600 | 2 | 1500 | 3,526 | 14% | 1,3 |
| 27 | 8 | 3600 | 2 | 2500 | 4,469 | 14% | 1,9 |
| 28 | 8 | 3600 | 3 | 1500 | 4,319 | 14% | 1,5 |
| 29 | 8 | 3600 | 3 | 2500 | 5,559 | 14% | 1,3 |
| 30 | 10 | 3200 | 2 | 2000 | 4,408 | 15% | 1,9 |

Çizelge 3.3.2.3.2'deki varyans analizi incelendiğinde, yüzey pürüzlülüğü için en etkili parametrenin basınç olduğu görülebilir. İkincil olarak ilerleme, mesafe ve kum oranı parametrelerinin de yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkisi olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.3.2.3.3 : UHMWPE Delik delme operasyonuna ait yüzey pürüzlülüğü için varyans analizi tablosu.

| Kaynak | Serbestlik Derecesi | Kareler Toplamı | Kareler Ortalaması | F-değeri | P-değeri |
|------------------|---------------------|-----------------|--------------------|----------|----------|
| Kum Oranı (%) | 1 | 1,9949 | 1,9948 | 17,72 | 0,001 |
| Basınç (Bar) | 1 | 9,3500 | 9,3500 | 83,07 | 0 |
| Mesafe (mm) | 1 | 3,3446 | 3,3445 | 29,71 | 0 |
| İlerleme (mm/dk) | 1 | 6,0863 | 6,0863 | 54,07 | 0 |
| Hata | 25 | 5,3755 | 0,1125 | | |
| Toplam | 29 | 26,1513 | | | |

Şekil 3.3.2.3.2’de yüzey pürüzlülüğü, ilerleme, kum oranı, basınç, mesafeye göre değişimi incelenmiştir. Basınç artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün azaldığı, ilerlemenin artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmektedir.



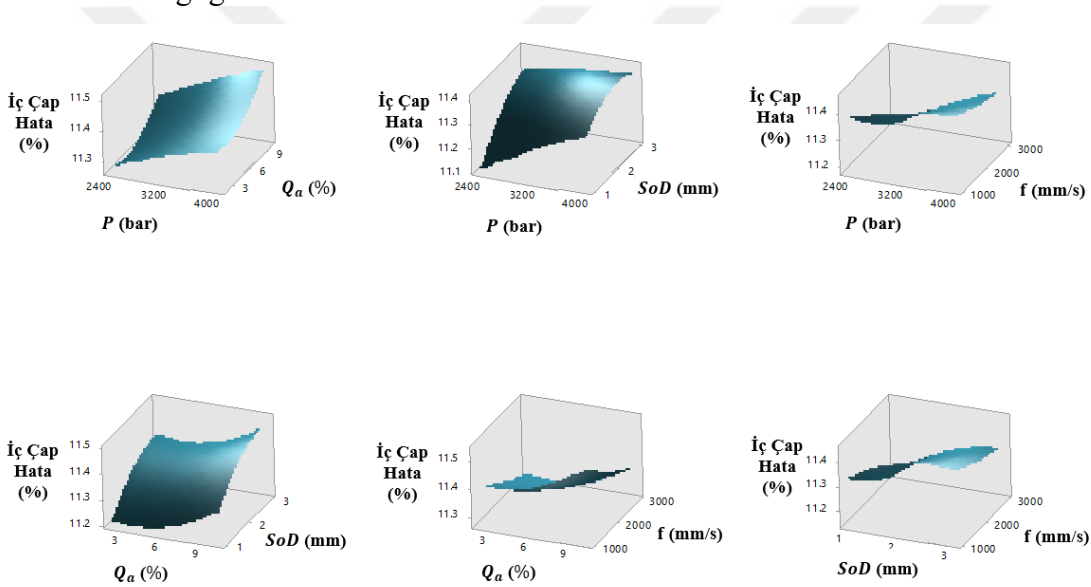
Şekil 3.3.2.3.2 : UHMWPE Delik delme operasyonuna ait yüzey pürüzlülüğü için yanıt yüzey grafikleri.

Çizelge 3.3.2.3.4’deki varyans analizi incelendiğinde, iç çap hata için en etkili parametrenin mesafe olduğu görülebilir. İkincil olarak ilerleme, basınç ve kum oranı parametrelerinin de iç çap hata üzerinde etkisi olduğu da görülmektedir.

Çizelge 3.3.2.3.4 : UHMWPE Delik delme operasyonuna ait iç çap hata için varyans analizi tablosu.

| Kaynak | Serbestlik Derecesi | Kareler Toplamı | Kareler Ortalaması | F-değeri | P-değeri |
|------------------|---------------------|-----------------|--------------------|----------|----------|
| Kum Oranı (%) | 1 | 0,0147 | 0,0147 | 4,91 | 0,044 |
| Basınç (Bar) | 1 | 0,0245 | 0,0245 | 8,19 | 0,013 |
| Mesafe (mm) | 1 | 0,0328 | 0,0328 | 10,96 | 0,005 |
| İlerleme (mm/dk) | 1 | 0,0303 | 0,0303 | 10,15 | 0,007 |
| Hata | 25 | 0,0556 | 0,0030 | | |
| Toplam | 29 | 0,1579 | | | |

Şekil 3.3.2.3.3’de İç çap hata, ilerleme, kum oranı, basınç, mesafeye göre değişimi incelenmiştir. Mesafenin artmasıyla iç çap hata arttığı, ilerlemenin artmasıyla iç çap hatanın azaldığı görülmektedir.



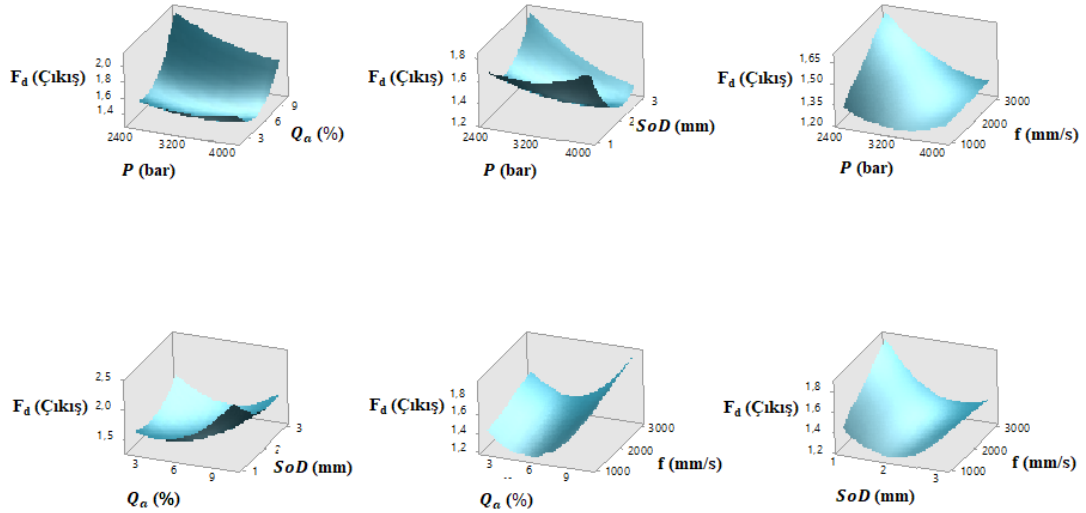
Şekil 3.3.2.3.3 : UHMWPE delik delme operasyonuna ait iç çap hata için yanıt yüzey grafikleri.

Çizelge 3.3.2.3.5’deki varyans analizi incelendiğinde delaminasyon faktörü için etkili parametrenin kum oranı olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.3.2.3.5 : UHMWPE Delik delme operasyonuna ait delaminasyon faktörü için varyans analizi tablosu.

| Kaynak | Serbestlik Derecesi | Kareler Toplamı | Kareler Ortalaması | F-değeri | P-değeri |
|------------------|---------------------|-----------------|--------------------|----------|----------|
| Kum Oranı (%) | 1 | 18,1660 | 18,1656 | 8,89 | 0,01 |
| Basınç (Bar) | 1 | 5,7620 | 5,7624 | 2,82 | 0,115 |
| Mesafe (mm) | 1 | 4,2840 | 4,2841 | 2,10 | 0,17 |
| İlerleme (mm/dk) | 1 | 5,3390 | 5,3393 | 2,61 | 0,128 |
| Hata | 25 | 68,6970 | 2,0428 | | |
| Toplam | 29 | 102,2480 | | | |

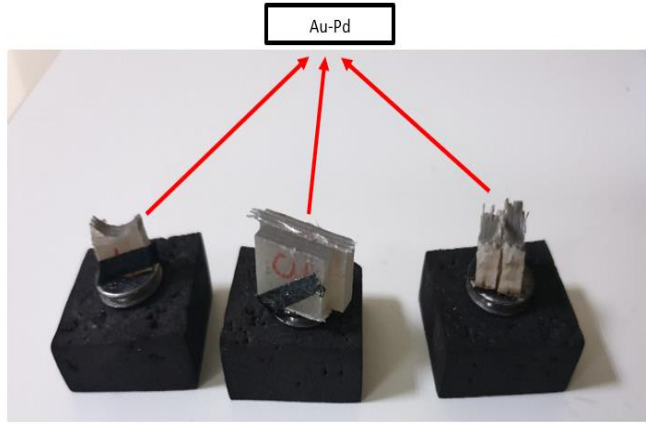
Şekil 3.3.2.3.4’de Delaminasyon faktörü, ilerleme, kum oranı, basınç, mesafeye göre değişimi incelenmiştir. Kum oranının artmasıyla delaminasyon faktörünün arttığı görülmektedir.



Şekil 3.3.2.3.4 : UHMWPE Delik delme operasyonuna ait çıkış delaminasyon faktörü için yanıt yüzey grafikleri.

3.4 SEM Analizleri

Çalışmanın bu bölümünde seçilen numunelerin yüzey morfolojilerinin anlaşılabilmesi SEM görüntüleri incelenmiş ve değerlendirmeler yapılmıştır. Seçilen numunelerin SEM cihazında karakterizasyonunun gerçekleştirilebilmesi için incelenecek yüzeyin iletken hale getirilmesi amacıyla numuneler beş nanometre kalınlığında “sputtering” yöntemiyle altın-paladyum ile kaplanmış ve SEM’e hazır hale getirilmiştir. (Şekil 3.4.1)



Şekil 3.4.1 : SEM cihazına girmeden önce yapılan kaplama ve cihaza yerleştirme.

3.4.1 Talaşlı İmalat Numuneleri

Bu bölümde AFRP malzemeden alınan örnek numunelerin SEM incelemelerine yer verilmiştir. UHMWPE malzemesinde ise, malzemenin yapısından dolayı, SEM'e uygun boyutlarda numune ayırımı mümkün olmamış, malzeme yüzeyi kıl testeresi ile kesme işlemi neticesinde deforme olmuş ve tamamen bozulmuştur.

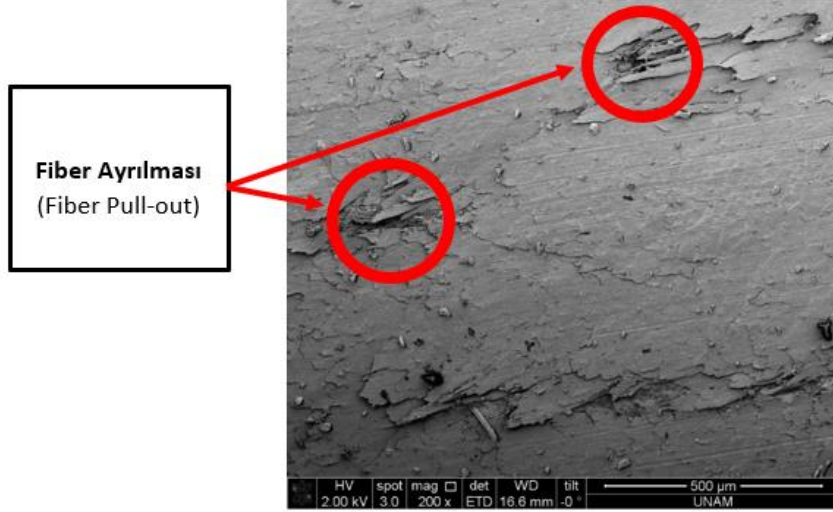
3.4.1.1 AFRP Talaşlı İmalat SEM Analizleri

AFRP Delik Delme Operasyonu

Yapılan 14 deney arasından toplam 2 farklı numune, SEM karakterizasyonu için seçilmiştir. Seçilen numuneler sırasıyla; 2 ve 5 numaralı deneylere aittir. Numuneler seçilirken, en düşük ve en yüksek yüzey pürüzlülükleri seçilmiştir.

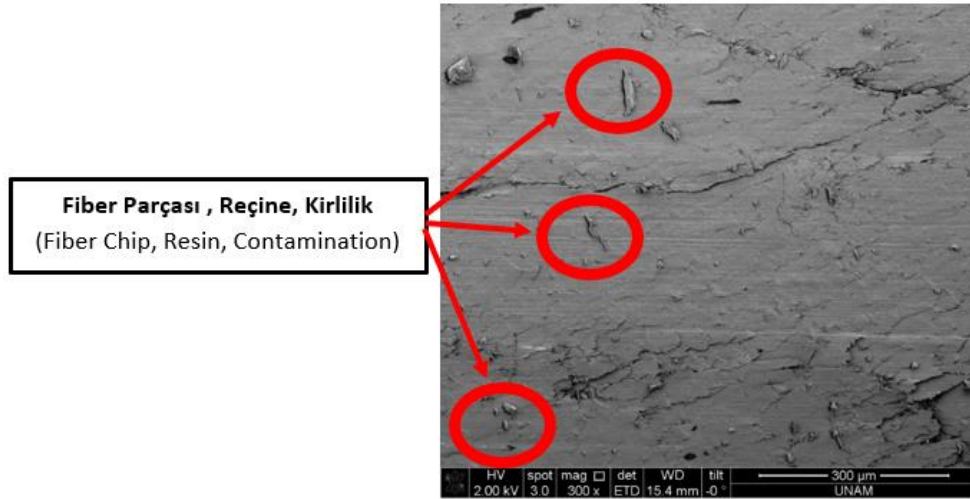
Çizelge 3.4.1.1.1 : AFRP Delik delme operasyonu numuneleri

| Deney No. | fz (mm/dev) | N (dev/dak) | Ra (μm) | T ($^{\circ}\text{C}$) |
|-----------|-------------|-------------|----------------------|--------------------------|
| 2 | 0,02 | 6500 | 2,834 | 21,66 |
| 5 | 0,04 | 6500 | 4,351 | 23,91 |



Şekil 3.4.1.1.1 : AFRP malzemenin (2) nolu delik açma operasyonuna ait SEM görüntüleri.

Şekil 3.4.1.1.1'deki SEM görüntüleri incelendiğinde reçinenin fiberleri ve yüzeyi tamamen kapladığı fakat bazı kısımlarda bölgesel fiber ayrılmaları olduğu görülmektedir.



Şekil 3.4.1.1.2 : AFRP malzemenin (5) nolu delik açma operasyonuna ait SEM görüntüleri.

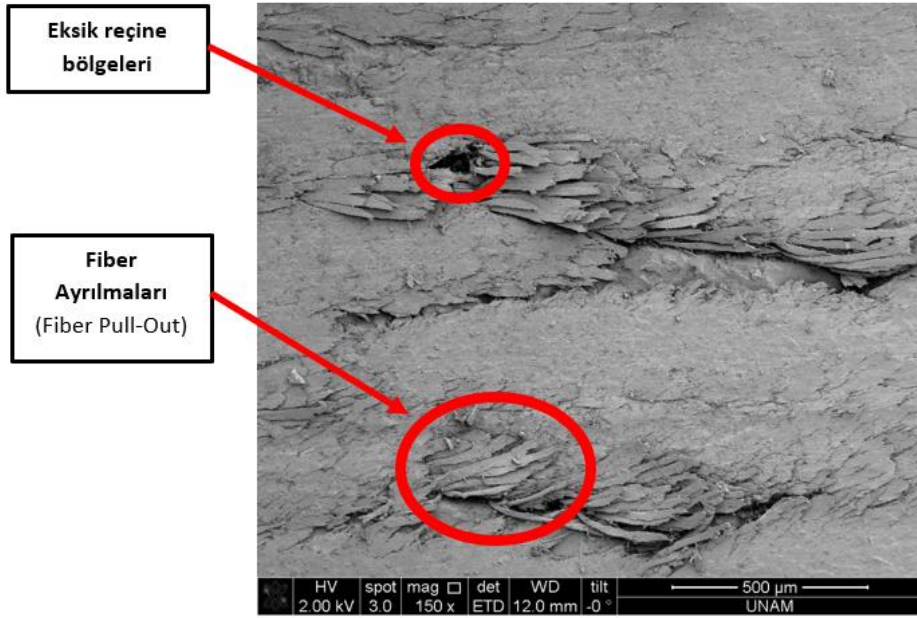
Şekil 3.4.1.1.2 SEM görüntüleri incelendiğinde, reçinenin yüzeyi tamamen kapladığı ve bazı bölgelerde artık reçine, fiberlerin ve bazı kirliliklerin yüzeye yapıştığı görülmektedir.

AFRP Cep Açma operasyonu

AFRP cep açma operasyonu için 2 farklı numune hazırlanmış ve SEM incelemeleri yapılmıştır. Numuneler seçilirken, cep açma operasyonu sonucu düşük ve yüksek yüzey pürüzlülüğüne sahip deneylerden örnekler seçilmiştir.

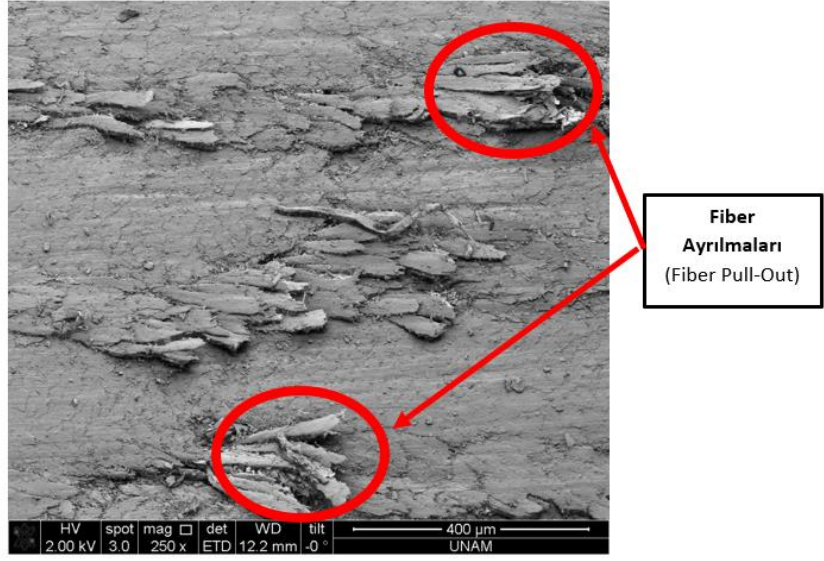
Çizelge 3.4.1.1.2 : AFRP Cep açma operasyonu numuneleri

| Deney No. | ae (mm) | fz (mm/dev) | Vc (mm/dak) | Ra (μm) | T ($^{\circ}\text{C}$) |
|-----------|---------|-------------|-------------|----------------------|--------------------------|
| 3 | 1,8 | 0,036 | 222 | 2,707 | 41,57 |
| 18 | 4,2 | 0,054 | 168 | 4,350 | 30,60 |



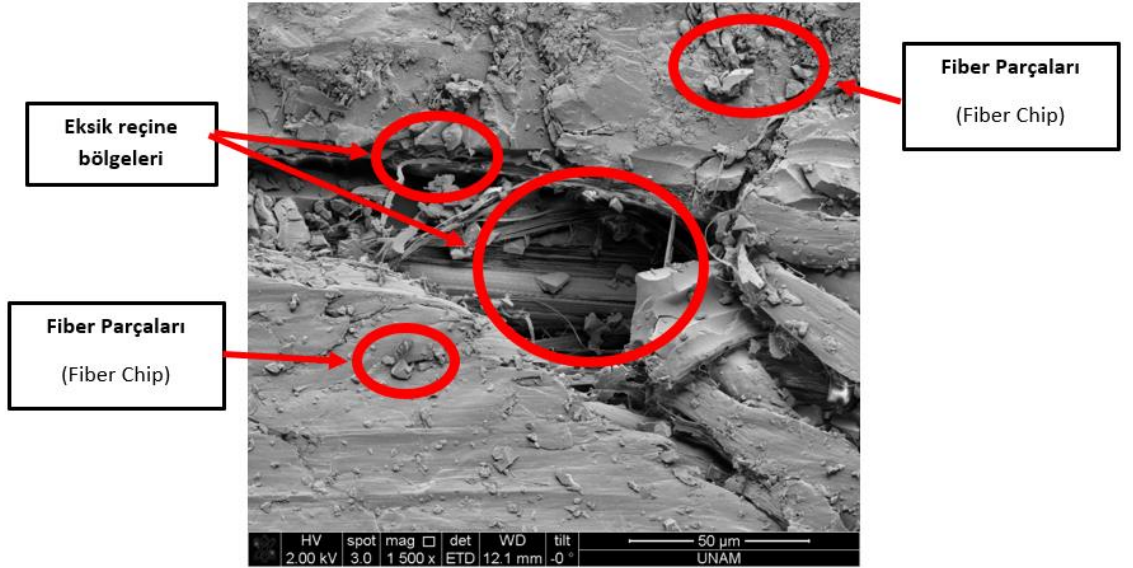
Şekil 3.4.1.1.3 : AFRP malzemenin (3) nolu deneye için cep açma operasyonuna ait SEM görüntüsü.

Şekil 3.4.1.1.3 'deki cep açma operasyonları incelendiğinde, bazı kısımlarda bölgesel fiber ayrılmaları gerçekleştiği ve ayrıca fiber ayrılma bölgelerinin yanlarında eksik reçine alanlarının olduğu görülebilir.



Şekil 3.4.1.1.4 : AFRP malzemenin (18) nolu deneye için cep açma operasyonuna ait SEM görüntüsü.

Şekil 3.4.1.1.4’de 3 nolu SEM incelemesindeki gibi, aynı hatalar 18 numaralı deneye ait SEM görüntülerinde de görülmektedir. Bölgesel fiber ayrılmaları, kesim yüzeyinde yaygın olarak bulunmaktadır.



Şekil 3.4.1.1.5 : AFRP (18) nolu deneye için cep açma operasyonuna ait SEM görüntüsü.

Şekil 3.4.1.1.5’deki daha detaylı SEM görüntüsünde de görülebileceği gibi bazı bölgelerde reçine boşlukları olduğu saptanmıştır. Ayrıca fiber parçalarının kesim yüzeyinde kaldığı görülmektedir.

3.4.2 Aşındırıcı Su Jeti Numuneleri

Bu bölümde AFRP malzemedan alınan örnek numunelerin SEM incelemelerine yer verilmiştir. UHMWPE malzemesinde ise, malzemenin yapısından dolayı, SEM'e uygun boyutlarda numune ayırımı mümkün olmamış, malzeme yüzeyi kıl testeresi ile kesme işlemi neticesinde deforme olmuş ve tamamen bozulmuştur.

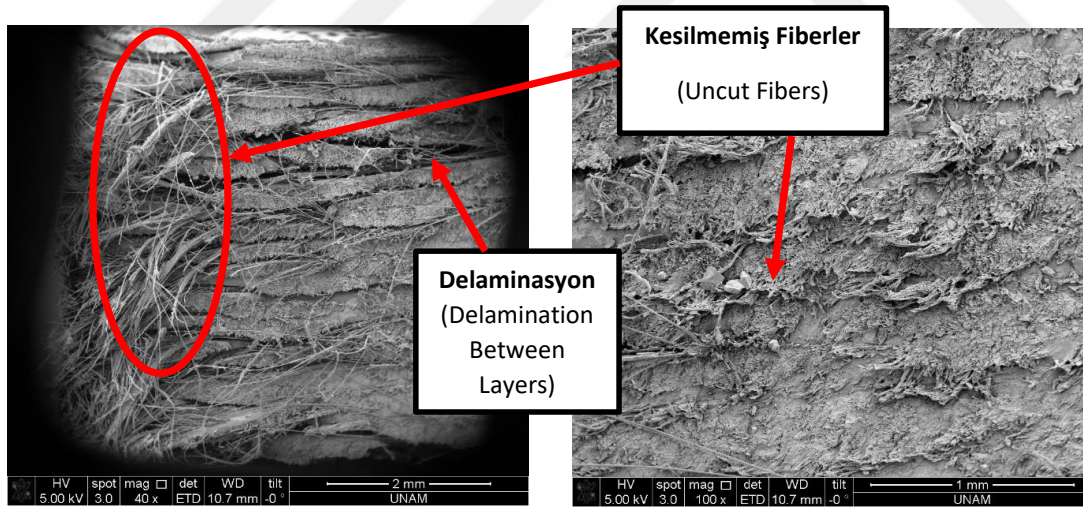
3.4.2.1 AFRP Aşındırıcı Su Jeti SEM Analizleri

AFRP Trim Operasyonu

AFRP trim operasyonu için yüzey pürüzlülüğü değerlerine göre 2 farklı numune seçilmiştir ve bu numuneler düşük ve yüksek yüzey pürüzlülüğüne sahiptir.

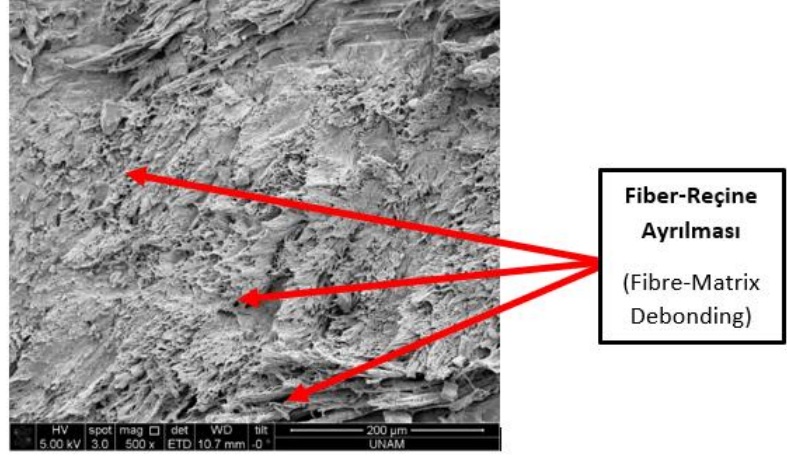
Çizelge 3.4.2.1.1 : AFRP Trim operasyonu numuneleri

| Deney No. | Qa (%) | P (Bar) | SoD (mm) | f (mm/dk) | Ra (µm) |
|-----------|--------|---------|----------|-----------|---------|
| 1 | 4 | 3400 | 2 | 1000 | 10,835 |
| 29 | 7 | 3700 | 2 | 750 | 4,135 |



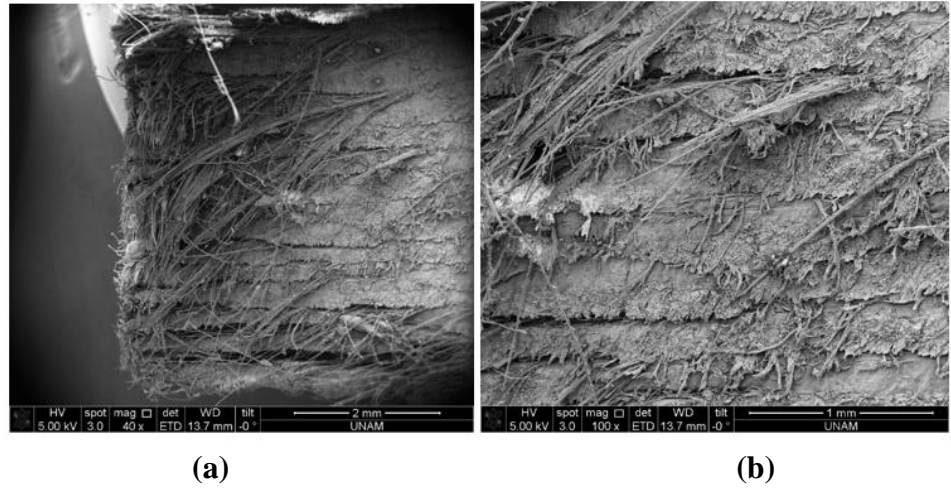
Şekil 3.4.2.1.1 : AFRP malzemenin (1) nolu trim operasyonuna ait SEM görüntüsü.

AFRP malzemenin trim operasyonu sonucu kesme yüzeyinin SEM görüntüleri incelenmiş ve sonuç olarak, yüzeyde pek çok kesilmemiş ve liflenmiş olarak sarkan fiberlere rastlanmıştır. Ayrıca delaminasyon da görülmektedir.



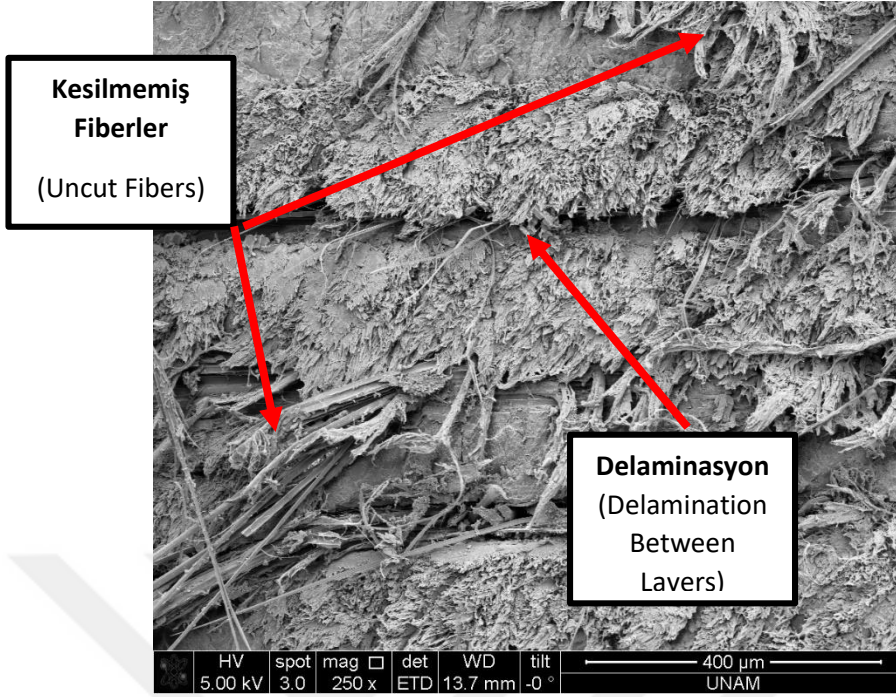
Şekil 3.4.2.1.2 : AFRP malzemenin (1) nolu trim operasyonuna ait SEM görüntüsü.

Şekil 3.4.2.1.2'deki SEM görüntüsünde, kesilmemiş fiberlere rastlanmış aynı zamanda bazı bölgelerde fiber-matris ayrılmaları gözlemlenmiştir.



Şekil 3.4.2.1.3 : AFRP malzemenin (29) nolu trim operasyonuna ait SEM görüntüsü.

Şekil 3.4.2.1.3'teki AFRP malzemenin trim operasyonuna ait SEM görüntüleri incelendiğinde, tüm yüzeyde gene kesilmemiş fiberlere rastlanmıştır.



Şekil 3.4.2.1.4 : AFRP malzemenin (29) nolu trim operasyonuna ait SEM görüntüsü.

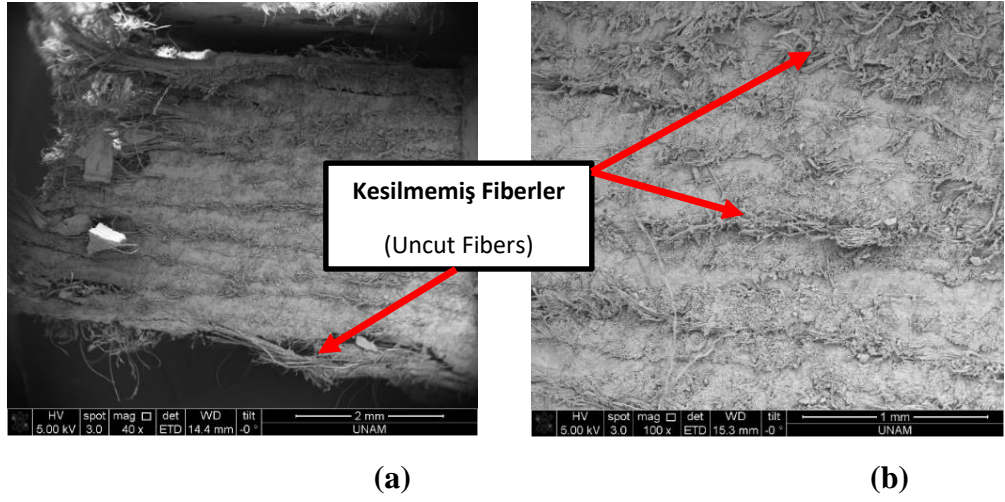
Şekil 3.4.2.1.4'deki aynı numunenin görüntülerinde ise, kesilmemiş fiberlerin yanında, katmanlar arası ayrılmalar sonucu oluşan delaminasyonlar işaretli olarak gösterilmiştir.

AFRP Cep Açma Operasyonu

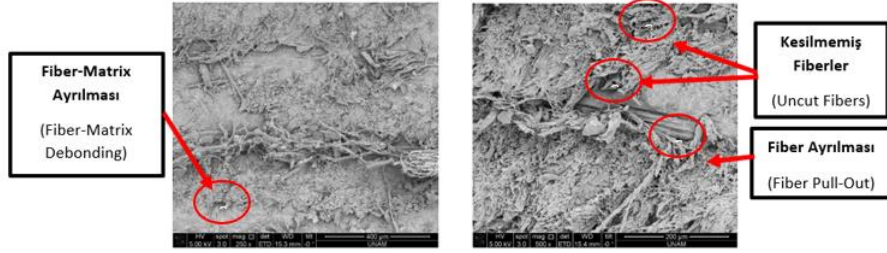
AFRP cep operasyonu için yüzey pürüzlülüğü değerlerine göre 2 örnek numune seçilmiştir. Bunlar en düşük ve en yüksek yüzey pürüzlüğüne sahip örneklerdir.

Çizelge 3.4.2.1.2 : AFRP Cep açma operasyonu numuneleri.

| Deney No. | Qa (%) | P (Bar) | SoD(mm) | f (mm/dk) | Ra (µm) |
|-----------|--------|---------|---------|-----------|---------|
| 10 | 6 | 2800 | 2 | 1000 | 15,006 |
| 29 | 7 | 3700 | 2 | 750 | 5,962 |

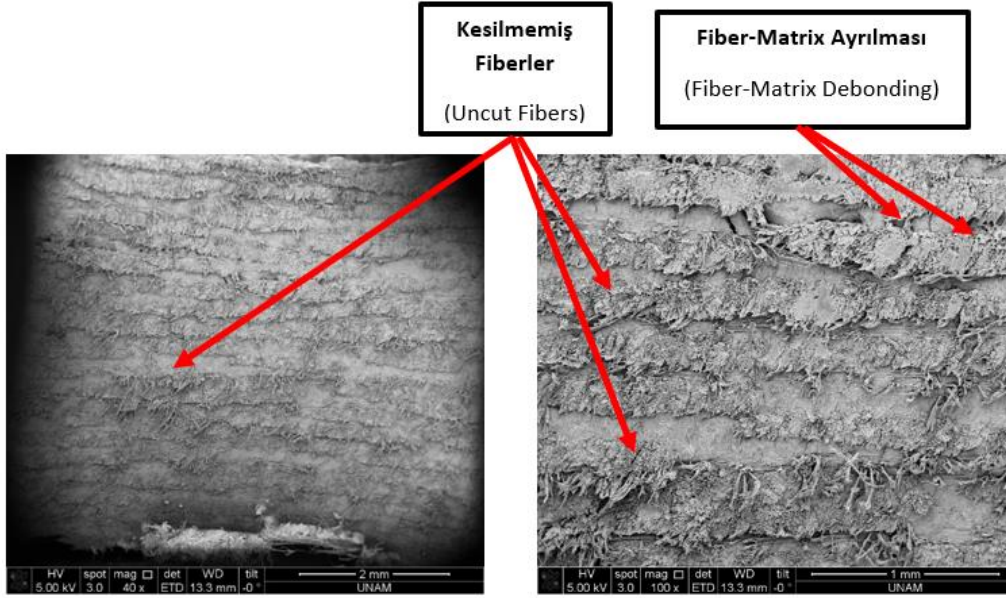


Şekil 3.4.2.1.5 : AFRP malzemenin (10) nolu cep açma operasyonuna ait SEM görüntüsü.



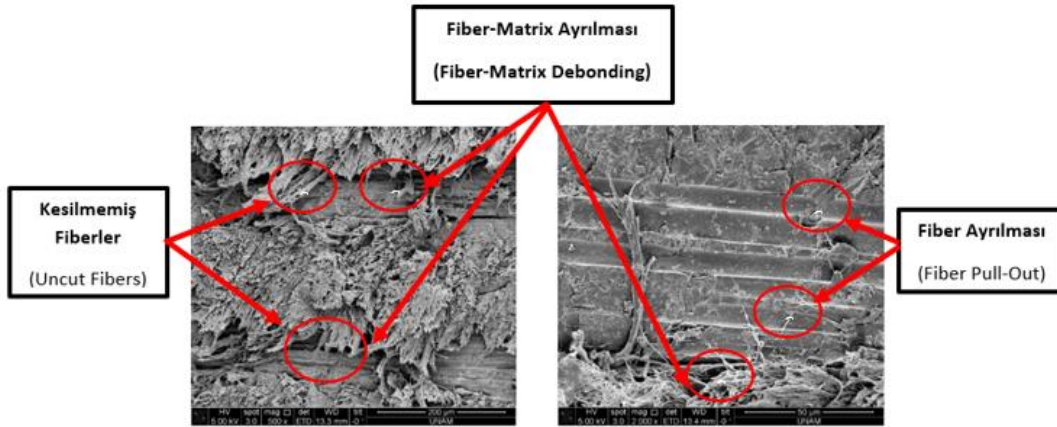
Şekil 3.4.2.1.6 : AFRP malzemenin (10) nolu cep açma operasyonuna ait SEM görüntüsü.

Şekil 3.4.2.1.5 ve Şekil 3.4.2.1.6'daki AFRP malzemenin cep açma operasyonuna ait SEM görüntüleri incelendiğinde, birçok bölgede kesilmemiş fiberlere rastlanmıştır. Ayrıca epoksiden ayrılan fiberlerde görülmektedir.



Şekil 3.4.2.1.7 : AFRP malzemenin (29) nolu cep açma operasyonuna ait SEM görüntüsü.

Şekil 3.4.2.1.7'deki 29 nolu numunenin SEM görüntüleri incelendiğinde, birçok bölgede daha kısa kesilmemiş fiberlere rastlanmış ayrıca bazı bölgelerde fiber-matris ayrılmaları gözlemlenmiştir.



Şekil 3.4.2.1.8 : AFRP malzemenin (29) nolu cep açma operasyonuna ait SEM görüntüsü.

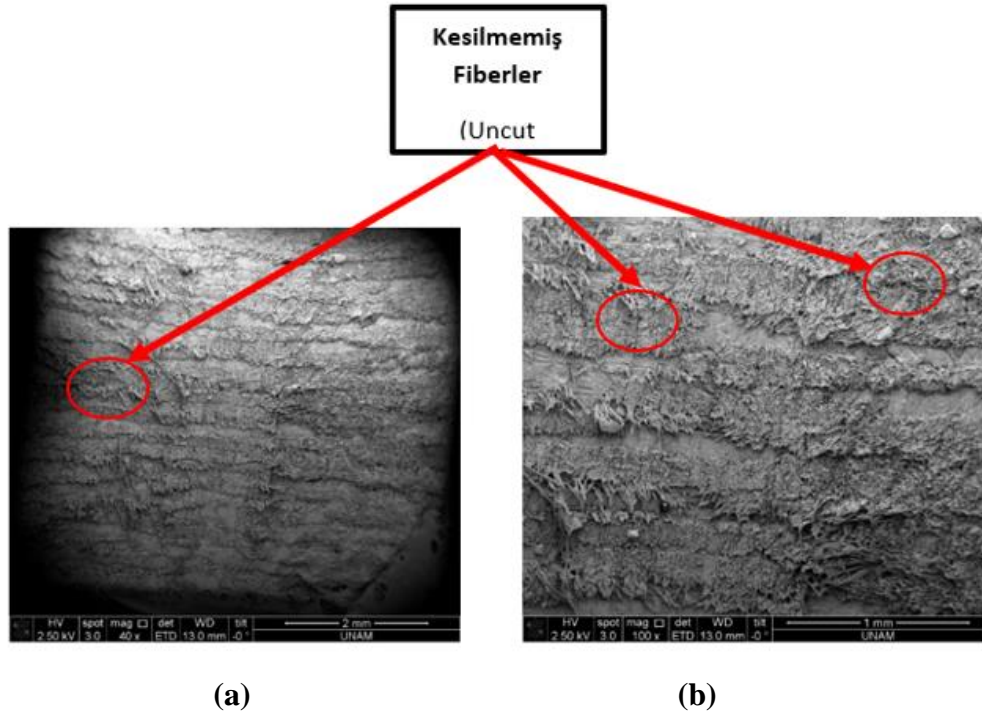
Şekil 3.4.2.1.8 aynı numunenin SEM görüntüleri incelendiğinde, kesilmemiş fiberler işaretlenmiş, ayrıca bazı bölgelerde fiberlerin reçineden ayrıldığı görülmüştür. Kesilmemiş fiberlerin yanında, aynı zamanda fiber-matris ayrılmaları görülmektedir.

AFRP Delik Delme Operasyonu

AFRP delik delme operasyonu için en düşük ve en yüksek yüzey pürüzlük değerlerine göre, 2 örnek numune seçilmiştir.

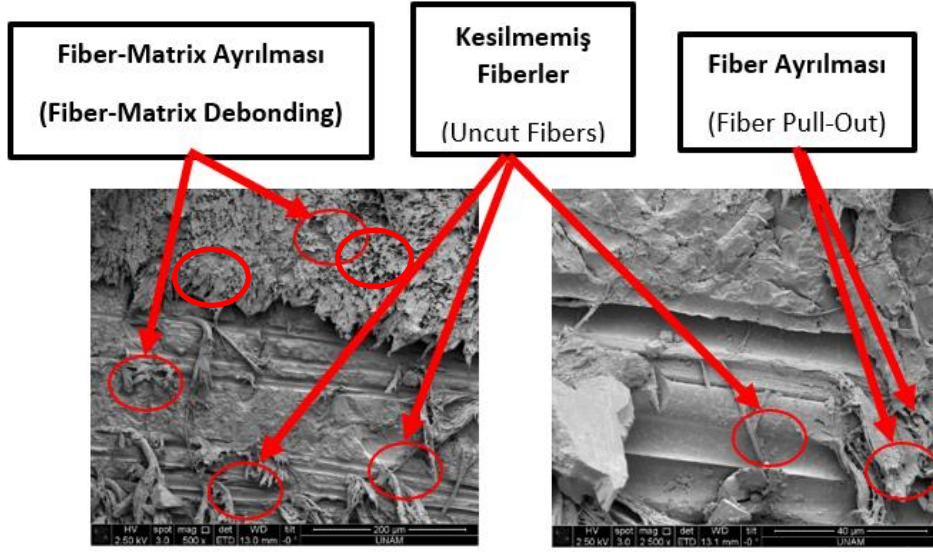
Çizelge 3.4.2.1.3 : AFRP Delik delme operasyonu numuneleri.

| Deney No. | Qa (%) | P (Bar) | SoD (mm) | f (mm/dk) | Ra (μm) |
|-----------|--------|---------|----------|-----------|----------------------|
| 1 | 4 | 3400 | 2 | 1000 | 11,817 |
| 30 | 8 | 3400 | 2 | 1000 | 4,696 |



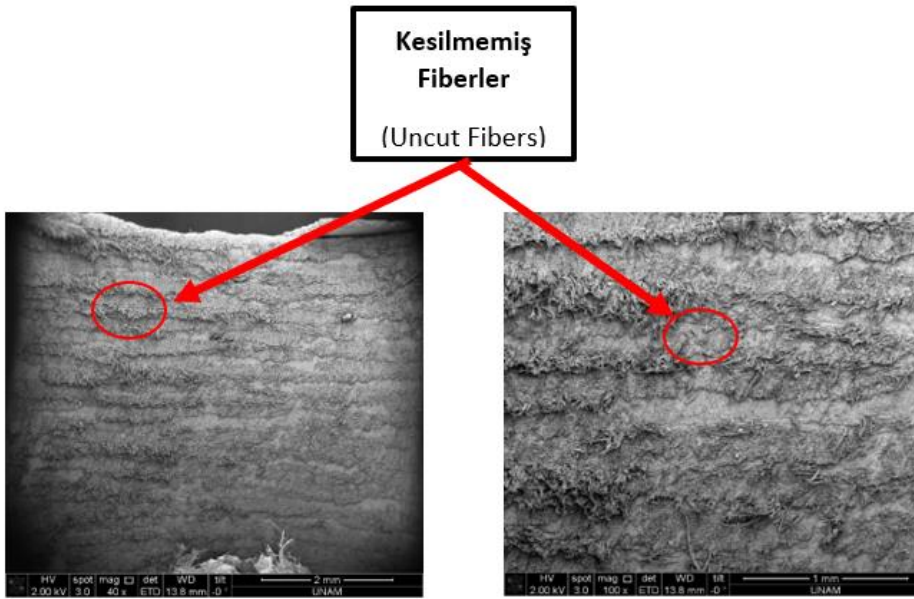
Şekil 3.4.2.1.9 : AFRP malzemenin (1) nolu delik operasyonuna ait SEM görüntüsü.

Şekil 3.4.2.1.9'daki SEM görüntüleri incelendiğinde, AFRP malzemenin delik açma operasyonu sonucu, kesim yüzeyinde kesilmemiş fiberlere rastlanmıştır.

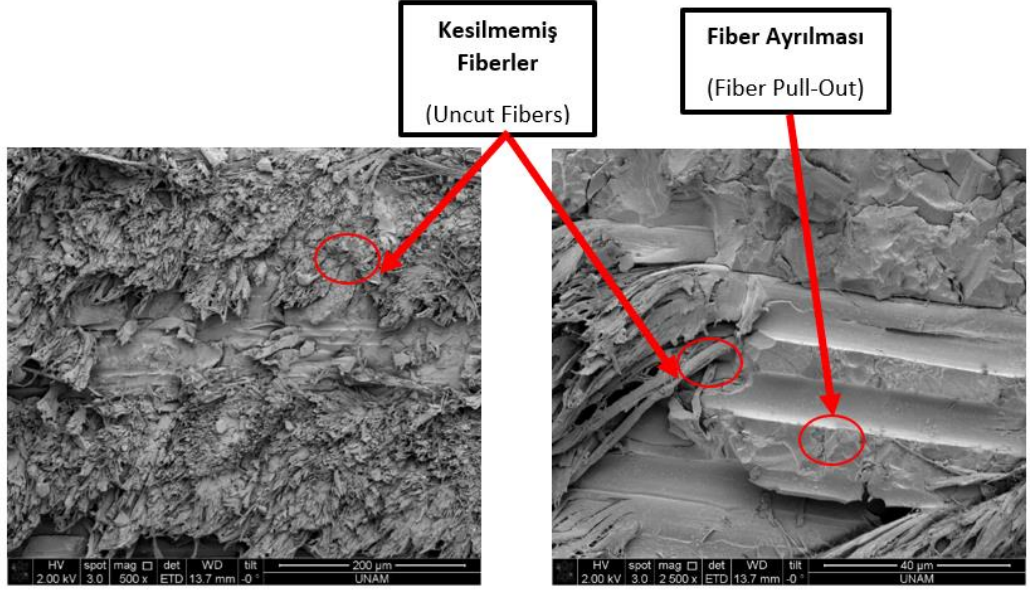


Şekil 3.4.2.1.10 : AFRP malzemenin (1) nolu delik operasyonuna ait SEM görüntüsü.

Şekil 3.4.2.1.10'deki aynı numunenin görüntüleri incelendiğinde, kesilmemiş fiberlere rastlanmış, ayrıca bazı bölgelerde kesim yüzeyinde fiber-matris ayrılmaları ve fiberlerin reçineden ayrılmaları görülmüştür.



Şekil 3.4.2.1.11 : AFRP malzemenin (30) nolu delik açma operasyonuna ait SEM görüntüsü.



Şekil 3.4.2.1.12 : AFRP malzemenin (30) nolu delik açma operasyonuna ait SEM görüntüsü.

Şekil 3.4.2.1.11. ve Şekil 3.4.2.1.12'deki 30 nolu deneyin SEM görüntüleri incelendiğinde, yine kesilmemiş fiberler ve fiber ayrılmaları görülmektedir.



4. ENİYİLEME VE DOĞRULAMA ÇALIŞMALARI

Bu bölümde ilk önce, örnek olarak seçilen 2 işlem üzerinde popüler çok-amaçlı uygulama yöntemleri olarak bilinen Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization-PSO) ve Bastırılmamış Sınıflandırılmış Genetik Algoritma (NSGA-III) tekniği uygulanmıştır.

4.1 Talaşlı İmalat Eniyilemesi ve Doğrulanması

Gerçekleştirilen deneyler neticesinde 2 adet deney seti için optimizasyon çalışması örneklendirilmiştir. Bu çalışmalar için, ÇAPSO algoritması MATLAB™ üzerinde çalıştırılmıştır. c_1 ve c_2 öğrenme faktörleri sırasıyla 1,5 ve 2 olarak belirlenmiştir. Mutasyon oranı (μ) ise 0,025 olarak seçilmiştir. Başlangıç ağırlığı (w) 0,5 olarak belirlenmiş ve her iterasyon 0,9'luk indirme faktörü (wf) ile azaltılmıştır. Popülasyon ve depo için maksimum birey sayıları sırasıyla 500 ve 10 olarak belirlenmiştir. Algoritma 500 iterasyon koşturulmuştur.

4.1.1 AFRP Talaşlı İmalat İşlemi PSO ile Eniyileme

AFRP plakaların talaşlı imalat ile cep açma işlemi için hesaplanan regresyon modelleri Denklem (4.1.1.1), Denklem (4.1.1.2) ve Denklem (4.1.1.3) ile gösterilmiştir. Burada $x(1)$, $x(2)$, $x(3)$ sırasıyla; kesme genişliği (a_e), ilerleme (f) ve kesme hızı (V_c) temsil etmektedir.

$$\begin{aligned} R_a &= -1.16 - 0.91 * x(1) + 92 * x(2) & (4.1.1.1) \\ &+ 0.0308 * x(3) + 0.0137 * x(1) * x(1) + 754 * x(2) * x(2) - \\ &0.000080 * x(3) * x(3) - 7.2 * x(1) * x(2) + 0.00707 * x(1) * x(3) - \\ &0.496 * x(2) * x(3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P(W) &= +7951 -278*x(1) -14089*x(2) - & (4.1.1.2) \\
&27.4*x(3)+13.8*x(1)*x(1) +45939*x(2)*x(2) \\
&+0.0412*x(3)*x(3)+966*x(1)*x(2) \\
&+1.281*x(1)*x(3) +79*x(2)*x(3)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
T(^{\circ}C) &= +238 -9.2*x(1) -3986*x(2) -1.065*x(3)+1.200*x(1)*x(1) & (4.1.1.3) \\
&+15770*x(2)*x(2) +0.00183*x(3)*x(3) +116*x(1)*x(2) \\
&-0.0331*x(1)*x(3) +11.22*x(2)*x(3);
\end{aligned}$$

Denklem (4.1.1.4), (4.1.1.5), (4.1.1.6), (4.1.1.7) ve (4.1.1.8)'da AFRP su jeti trim işleminin matematiksel modeli gösterilmiştir. Denklem (4.1.1.4), (4.1.1.5) ve (4.1.1.6)'da amaç fonksiyonları, Denklem (4.1.1.4) ve Denklem (4.1.1.5)'te ise problem kısıtları yer almaktadır. ÜstLimit_i ve AltLimit_i, i parametresinin alt limit ve üst limitlerini temsil etmektedir. “g_i” ise i parametresini temsil etmektedir. Çizelge 4.1.1.1’de AFRP talaşlı imalat cep açma işlem parametrelerinin alt ve üst limitleri yer almaktadır.

$$\text{Min. } f_{Ra} = R_a(x_1, x_2, x_3) \quad (4.1.1.4)$$

$$\text{Min. } f_P = P(x_1, x_2, x_3) \quad (4.1.1.5)$$

$$\text{Min. } f_T = T(x_1, x_2, x_3) \quad (4.1.1.6)$$

Öyle ki:

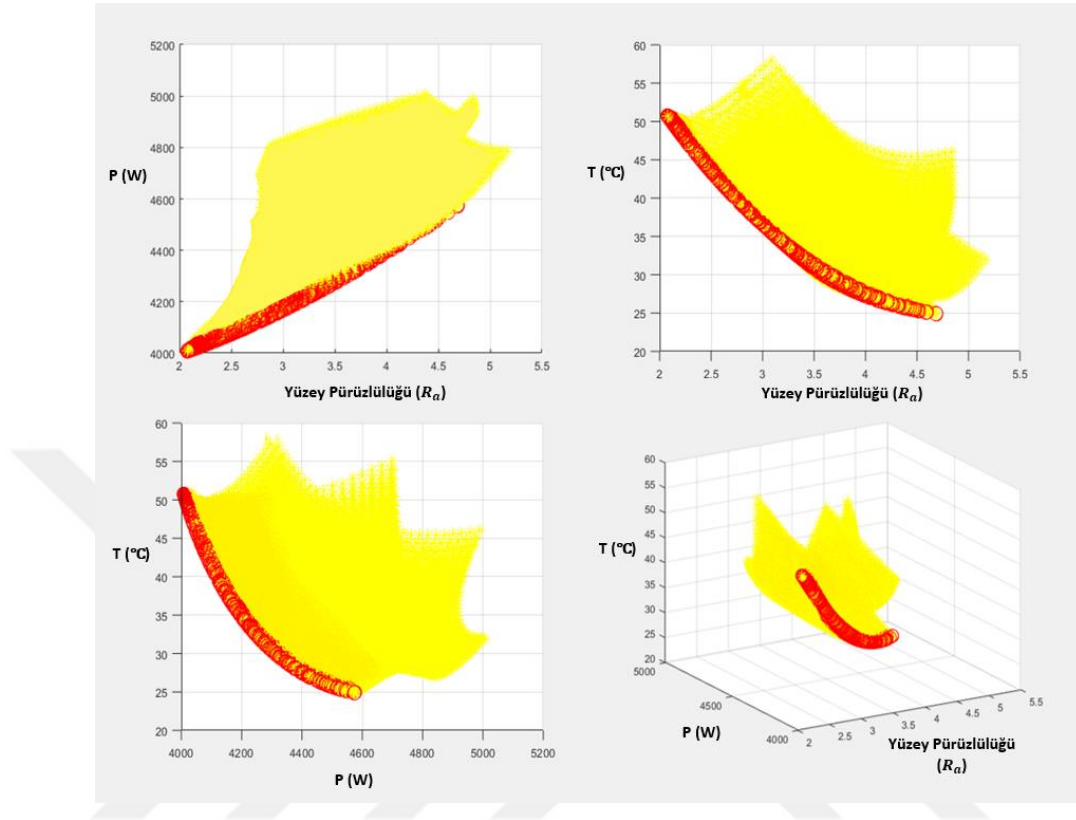
$$g_i - \text{ÜstLimit}_i \leq 0, \quad i=1:4 \quad (4.1.1.7)$$

$$\text{AltLimit}_i - g_i \leq 0, \quad i=1:4 \quad (4.1.1.8)$$

Çizelge 4.1.1.1 : AFRP Talaşlı cep açma işlemi parametrelerinin alt ve üst limitleri.

| İşlem Parametresi | Alt Limit | Üst Limit |
|------------------------------------|-----------|-----------|
| Yanal Kayma (a _e) (mm) | 1 | 5 |
| İlerleme (f) (mm/rev) | 0,03 | 0,06 |
| Sıcaklık (T) (°C) | 150 | 240 |

Şekil 4.1.1.1’de AFRP talaşlı imalat cep açma işlemi için elde edilen optimal çözüm seti yer almaktadır. Bu çözüm seti sayesinde, değişkenlik gösteren yüzey pürüzlülüğü, harcanan güç ve sıcaklık değerlerinin birbirlerine olan etkileri görülebilmektedir.



Şekil 4.1.1.1 : AFRP Talaşlı imalat cep açma işlemi için pareto optimal çözüm seti.

4.1.2 AFRP Eniyilemesinin Doğrulanması

AFRP malzeme için yapılan optimizasyon işlemleri sonrasında 3 farklı senaryo belirlenmiştir. Çıkan pareto eğrilerinin yaklaşık iki ucu ve ortasından birer veri noktası seçilerek, 3’er adet senaryo denenmiştir.

Çizelge 4.1.2.1 : AFRP talaşlı imalat doğrulama deneyleri.

| Sn. | ae mm | fz mm/dev | Vc mm/dak | Ra (µm) (ölçülen) | Ra (µm) (PSO) | Ra Sapma (%) | P (W) (Ölçülen) | P (W) (PSO) | P Sapma (%) | T (°C) Ölçülen | T (°C) (PSO) | T Sapma (%) |
|----------------------------|----------|--------------|--------------|----------------------|------------------|--------------------|--------------------|----------------|-------------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| <i>Cep Açma Operasyonu</i> | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 1000 | 0,03 | 239 | 2 | 2.080 | 2,60% | 4072,3 | 4009,9 | 1,50% | 41,25 | 50,7 | 22,9% |
| 2 | 5000 | 0,03 | 240 | 4 | 4.688 | 4,30% | 4716,0 | 4572,7 | 3% | 26,58 | 24,9 | 6,4% |
| 3 | 2841 | 0,03 | 239 | 3 | 3.196 | 5,80% | 4395,2 | 4216,9 | 4,10% | 35,82 | 34,1 | 4,9% |

4.2 Aşındırıcılı Su jeti Eniyilemesi

4.2.1 AFRP Bastırılmamış Sınıflandırılmış Genetik Algoritma ile Eniyilenmesi

Aramid malzemenin istenilen şekilde işlenmesi geleneksel üretim yöntemleriyle oldukça zordur. Bu nedenle ASJ ile bu işlemin yapılması oldukça doğru bir yöntemdir. Fakat işlem parametrelerinin seçimi oldukça önemlidir. NSGA-III algoritması, işlem parametrelerinin optimizasyonu için MATLAB™ üzerinden çalıştırılmıştır. Optimizasyon probleminin genel matematiksel modelleri denklem 4.2.1.1 – 4.2.1.8 arasında verilmiştir.

Denklemler 4.2.1.9 ve 4.2.1.10, trimleme işlemi için amaç fonksiyonlardır. Denklemler 4.2.1.11-4.2.1.12 ve 4.2.1.13-4.2.1.14 sırasıyla cep açma ve delik delme operasyonları için amaç fonksiyonlarıdır. $x(1)$, $x(2)$, $x(3)$ ve $x(4)$ sırasıyla f_r , sod , Q_a ve P 'ye karşılık gelir. Problemlerin kısıtlamaları girdi parametrelerinin alt ve üst sınırları olarak ifade edilir. Bu değerler Çizelge 4.2.1.1'de verilmektedir.

$$\text{Min. } f_{Ra} = R_a(x_1, x_2, x_3, x_4) \quad (4.2.1.1)$$

$$\text{Min. } F_{KerfAçısı} = KerfAçısı(x_1, x_2, x_3, x_4) \quad (4.2.1.2)$$

Öyle ki:

$$g_i - ÜstLimit_i \leq 0, \quad i = 1:4 \quad (4.2.1.3)$$

$$AltLimit_i - g_i \leq 0, \quad i = 1:4 \quad (4.2.1.4)$$

$$\text{Min. } f_{Ra} = R_a(x_1, x_2, x_3, x_4) \quad (4.2.1.5)$$

$$\text{Min. } F_{BoyutsalHata} = BoyutsalHata(x_1, x_2, x_3, x_4) \quad (4.2.1.6)$$

Öyle ki:

$$g_i - ÜstLimit_i \leq 0, \quad i = 1:4 \quad (4.2.1.7)$$

$$AltLimit_i - g_i \leq 0, \quad i = 1:4 \quad (4.2.1.8)$$

$$\begin{aligned} R_a &= 13.5 - 0.0026*x(1) + 2.83*x(2) - 2.33*x(3) + 0.0016*x(4) & (4.2.1.9) \\ &- 0.000001*x(1)*x(1) + 0.270*x(2)*x(2) + 0.112*x(3)*x(3) \\ &+ 0.00100*x(1)*x(2) + 0.000948*x(1)*x(3) - 0.089*x(2)*x(3) \\ &- 0.00085*x(2)*x(4) - 0.000210*x(3)*x(4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Kerf &= 17.2 + 0.00047*x(1) - 0.13*x(2) + 0.28*x(3) - 0.00933*x(4) & (4.2.1.10) \\ Açısı (^\circ) &- 0.000004*x(1)*x(1) - 0.387*x(2)*x(2) + 0.0774*x(3)*x(3) \\ &+ 0.000002*x(4)*x(4) + 0.000755*x(1)*x(2) \\ &+ 0.000667*x(1)*x(3) \\ &+ 0.000001*x(1)*x(4) + 0.295*x(2)*x(3) - 0.000306*x(2)*x(4) \\ &- 0.000668*x(3)*x(4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Ra &= -55.4 + 0.0265*x(1) + 11.20*x(2) + 4.44*x(3) + 0.0150*x(4) & (4.2.1.11) \\ &- 0.000008*x(1)*x(1) - 2.0*x(2)*x(2) - 0.0482*x(3)*x(3) \\ &- 0.000002*x(4)*x(4) + 0.00233*x(1)*x(2) - \\ &0.00009*x(1)*x(3) \\ &- 0.000003*x(1)*x(4) - 0.218*x(2)*x(3) - 0.00064*x(2)*x(4) \\ &+ 0.000236*x(3)*x(4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Boyutsal Hata} &= -0.014 - 0.00003*x(1) - 0.0245*x(2) + 0.0108*x(3) & (4.2.1.12) \\ (\%) &+ 0.000055*x(4) \\ &- 0.0*x(1)*x(1) + 0.00254*x(2)*x(2) - 0.000808*x(3)*x(3) \\ &+ 0.0*x(4)*x(4) - 0.0*x(1)*x(2) + 0.000008*x(1)*x(3) - \\ &0.0*x(1)*x(4) \\ &+ 0.00336*x(2)*x(3) - 0.000005*x(2)*x(4) - \\ &0.000002*x(3)*x(4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Ra &= 64.3 + 0.0003*x(1) - 2.43*x(2) - 2.70*x(3) - 0.0241*x(4) & (4.2.1.13) \\ &+ 0.000002*x(1)*x(1) + 1.117*x(2)*x(2) + 0.196*x(3)*x(3) \\ &+ 0.000004*x(4)*x(4) + 0.00144*x(1)*x(2) + 0.00023*x(1)*x(3) \\ &- 0.000002*x(1)*x(4) + 0.321*x(2)*x(3) - 0.00103*x(2)*x(4) \\ &- 0.00042*x(3)*x(4) \end{aligned}$$

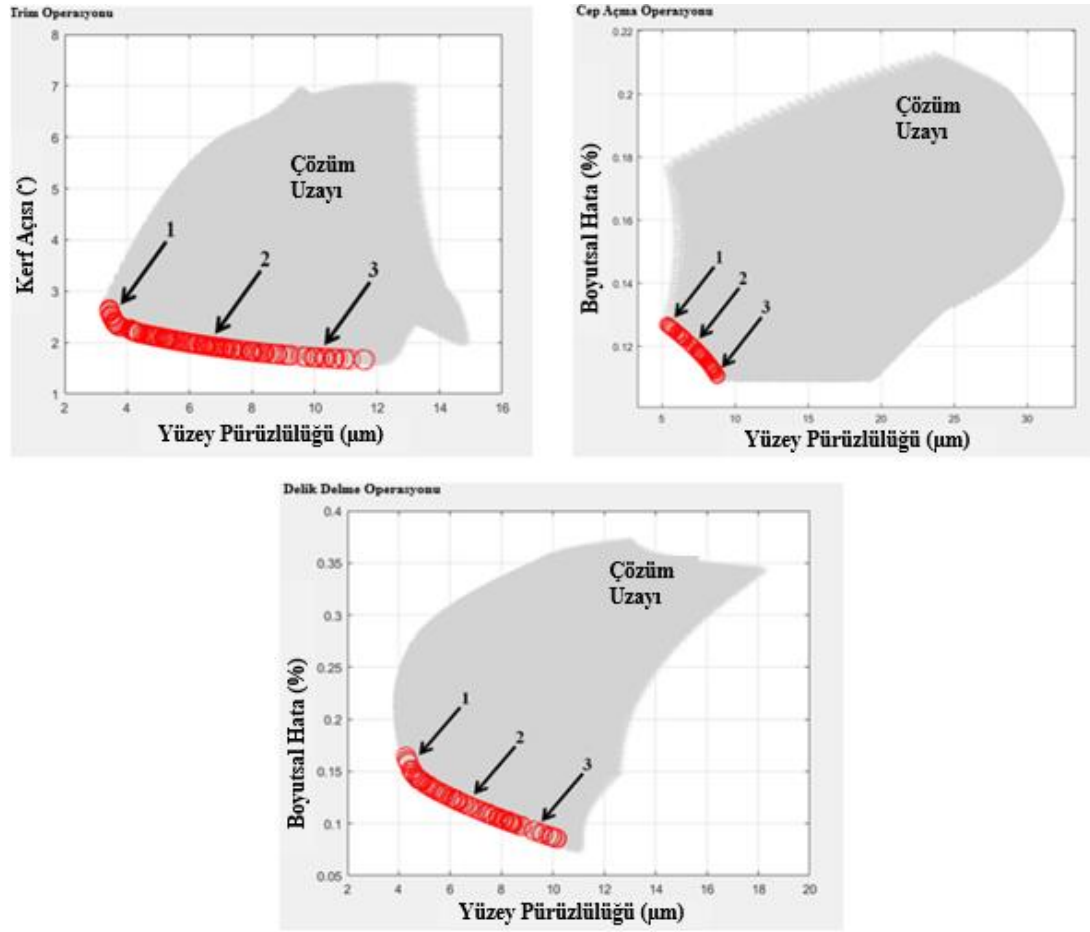
$$\begin{aligned} \text{Boyutsal Hata} &= 0.598 + 0.000144*x(1) + 0.0504*x(2) - 0.0256*x(3) - & (4.2.1.14) \\ (\%) &0.000144*x(4) \\ &+ 0.000000*x(1)*x(1) + 0.00244*x(2)*x(2) - \\ &0.00032*x(3)*x(3) \\ &- 0.000018*x(1)*x(2) - 0.000004*x(1)*x(3) - \\ &0.000000*x(1)*x(4) \\ &+ 0.00157*x(2)*x(3) - \\ &0.000019*x(2)*x(4) + 0.000010*x(3)*x(4) \end{aligned}$$

Çizelge 4.2.1.1 : Girdi parametreleri için alt ve üst limitler

| | Alt Limitler | Üst Limitler |
|--------------------|--------------|--------------|
| fr (mm/min) | 500 | 1500 |
| SoD (mm) | 1 | 3 |
| Qa (%) | 4 | 8 |
| P (bar) | 2800 | 4000 |

Çok amaçlı optimizasyon NSGA-III algoritması ile gerçekleştirildiğinde, Pareto optimal çözüm seti elde edilmektedir. Bu şekilde, farklı yüzey kalitesine sahip ürünler üretmek için en uygun işlem parametreleri elde edilebilmektedir. Şekil 4.2.1.2, trimleme, cep açma ve delik delme işlemleri için Pareto optimal çözüm setlerini içerir. Gri ile gösterilen bölge, optimizasyon problemleri için uygun bölgedir. Objektif fonksiyonların objektif yönlerinin birleştirilmesiyle, uygulanabilir bölgenin dış duvarında Pareto optimal çözüm setleri elde edilmiştir. Bu Pareto optimal çözüm setleri arasından üç örnek çözümü seçilmiştir. Bu çözümler, eğrilerin üç farklı bölgesinden seçilmiştir. Dolayısıyla, hangi proses çıktısı daha önemli veya eşit

dercede önemli olursa olsun, bu çözüm için uygun parametre değerleri tabloda sunulmuştur.



Şekil 4.2.1.2 : AFRP ASJ işlemi için pareto optimal çözüm eğrileri.

4.2.2 AFRP Eniyilemesinin Doğrulanması ve Endüstriyel Uygulamalar

AFRP malzemenin ASJ deneyleri sonrasında yapılan optimizasyon sonucunda, elde edilen deney optimizasyonların validasyonu için endüstride de kullanıma uygun olarak 3 farklı senaryo belirlenmiştir.

Endüstride kullanımları düşünülerek oluşturulan senaryolarda cep açma ve delik delme operasyonları için yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal hata işlem çıktısı olarak kullanılırken, trim operasyonu için yüzey pürüzlülüğü ve kerf açısı kullanılmıştır. Bu sebeple her 3 operasyonda da seçilen çıktı parametreleri birbirleri ile ters orantılıdır. Cep açma ve delik delme operasyonlarında kullanılan boyutsal doğruluk yerine de, kerf açısı kullanılmıştır.

İlk senaryoda (Düşük Geometrik Doğruluk ve Yüksek Yüzey Kalitesi), mümkün olan en yüksek yüzey kalitesini sağlayan düşük Ra ile düşük geometrik doğruluk

hedeflenmiştir. Askeri uygulamalarda aşınmaya ve çevre koşullarına maruz kalan parçalar için, mümkün olan en yüksek yüzey kalitesi ve dayanıklılığını elde etmek için daha fazla yüzey işleme ve boyama uygulanacaktır. Bu tür bileşenler için, yüksek yüzey kalitesi, boyutsal doğruluktan daha önemlidir.

İkinci senaryoda (Dengeli Geometrik Doğruluk ve Yüzey Kalitesi), boyutsal doğruluk ve Ra'nın eşit derecede önemli olduğu varsayılmıştır. AFRP montajları dikkate alındığında, yapıştırma ve bağlantı elemanı kullanımı yaygındır. Ra yapıştırma işlemlerinde zorunludur.

Üçüncü senaryoda (Yüksek Geometrik Doğruluk ve Düşük Yüzey Kalitesi), yüksek boyutsal doğruluk ve düşük Ra bölgesi seçilmiştir. Yüksek geometrik doğruluk, savunma ve uzay standartlarının gerektirdiği sıkı geometrik toleransları elde etmek için özellikle önemlidir. Üstün mekanik özellikleri sebebiyle bir çok zorlu koşulda kullanımı olan AFRP malzemelerin boyutsal doğruluğunun hassasiyeti yapılacak olan montaj operasyonları için de ayrıca önemlidir.

Seçilen senaryolar, analiz ve optimizasyon adımlarının doğruluğunu doğrulamak için aynı malzeme üzerinde ASJ işlemeye tabi tutuldu. Sonuçlar, en büyük hatanın % 8 olduğu Çizelge 4.2.2.1'de sunulmaktadır.

Çizelge 4.2.2.1 : AFRP malzeme ASJ işlemi için doğrulama deneyleri sonuçları

| Senaryolar | Girdiler | | | | NSGA-III | | Validasyon | | | |
|-------------------------------|----------------|-------------|-----------|------------|------------------|-------------------|------------------|-----------|-------------------|-----------|
| | fr (mm/min) | SoD (mm) | Qa (%) | P (bar) | Ra (μ m) | Kerf Açısı (°) | Ra (μ m) | Sapma (%) | Kerf Açısı (°) | Sapma (%) |
| Trim Operasyonu | | | | | | | | | | |
| 1 | 505,5 | 1,1 | 8,00 | 3639,3 | 3,777 | 2,314 | 3,863 | %2 | 2,40 | %4 |
| 2 | 500,2 | 2,8 | 6,70 | 3614,0 | 6,651 | 1,931 | 6,269 | %6 | 1,97 | %2 |
| 3 | 500,3 | 2,9 | 4,86 | 3255,2 | 10,286 | 1,701 | 9,781 | %5 | 1,75 | %3 |
| Senaryolar | Girdiler | | | | Çıktılar | | Validasyon | | | |
| | fr (mm/min) | SoD (mm) | Qa (%) | P (bar) | Ra (μ m) | Boyutsal Hata (%) | Ra (μ m) | Error (%) | Boyutsal Hata (%) | Sapma (%) |
| Cep Açma Operasyonu | | | | | | | | | | |
| 1 | 500 | 1,0 | 4,01 | 2828,1 | 5,405 | 13% | 5,375 | 1% | %13 | %1 |
| 2 | 500 | 1,5 | 1,00 | 2828,1 | 7,524 | 12% | 7,261 | 4% | %12 | %2 |
| 3 | 500 | 1,9 | 4,00 | 2828,1 | 8,763 | 11% | 8,277 | 6% | %11 | %2 |
| Delik Delme Operasyonu | | | | | | | | | | |
| 1 | 633,4 | 1,4 | 8,00 | 3927,9 | 4,280 | 16% | 4,641 | 8% | 17% | 2% |
| 2 | 565,9 | 2,3 | 6,27 | 3977,6 | 6,548 | 12% | 6,606 | 1% | 13% | 7% |
| 3 | 504,1 | 2,7 | 4,57 | 3977,8 | 9,469 | 9% | 9,221 | 3% | 10% | 6% |

4.2.3 UHMWPE Aşındırıcılı Su Jeti İşlemi Parçacık Sürü Optimizasyonu ile Eniyilenmesi

UHMWPE parçalarının doğru montajı, kişisel koruyucu zırh ve zırhlı araçlar için kullanımı düşünüldüğünde büyük önem taşır. Montaj operasyonunu etkileyen en önemli iki işlem çıktısı Ra ve boyutsal hatadır. Ra, parça montajında sıklıkla kullanılan yapıştırma işleminin çalışma kalitesini belirler ve boyutsal hata ise parçanın doğru geometrik toleranslar içerisinde montajının yapılabilmesi için önemlidir. Bu çalışmada, boyutsal hata ve Ra yukarıda belirtilen nedenlerden dolayı çok amaçlı optimizasyon çalışmasının amacı olarak seçilmiştir.

Deneylerin sonuçları analiz edildikten sonra, cep açma ve delik delme işlemleri için optimizasyon çalışması yapıldı. Bu çalışma için MATLAB™'da bir ÇAPSO algoritması geliştirilmiştir. Algoritma parametreleri için öğrenme faktörleri c1 ve c2 sırasıyla 1.5 ve 2 olarak belirlenmiştir. Mutasyon oranı (μ) 0.025 olarak seçildi. Başlangıç ağırlığının (w) 0.5 olduğu belirlendi ve her yineleme 0.9 (wf) faktörüyle

azaltıldı. Nüfus ve depolama için maksimum kişi sayısı sırasıyla 500 ve 100'dür. Algoritma 500 yinelemeye sahipti.

RSM'den elde edilen regresyon modelleri ÇAPSO'nun objektif fonksiyonları olarak kullanılmaktadır. Cep açma işlemi için regresyon modelleri Denklem (4.2.3.1) ve Denklem (4.2.3.2) 'de gösterilmiştir. Delme işlemi için regresyon modelleri Denklem (4.2.3.3) ve Denklem (4.2.3.4) 'te sunulmaktadır. Regresyon modellerinde, $x(1)$, $x(2)$, $x(3)$ ve $x(4)$ sırasıyla P, Qa, SoD ve fyi temsil etmektedir.

$$R_a = 18.56 - 0.00419*x(1) - 0.459*x(2) + 3.07*x(3) + 0.00304*x(4) + 0.000000*x(1)*x(1) - 0.0040*x(2)*x(2) - 0.150*x(3)*x(3) + 0.000371*x(1)*x(2) - 0.000289*x(1)*x(3) - 0.000001*x(1)*x(4) - 0.295*x(2)*x(3) - 0.000207*x(2)*x(4) + 0.000611*x(3)*x(4) \quad (4.2.3.1)$$

$$\text{Boyutsal Hata (\%)} = 0.0434 + 0.000056*x(1) + 0.00113*x(2) + 0.0051*x(3) - 0.000024*x(4) + 0.000159*x(2)*x(2) + 0.00388*x(3)*x(3) - 0.000006*x(1)*x(3) - 0.000146*x(2)*x(3) - 0.000001*x(2)*x(4) + 0.000004*x(3)*x(4) \quad (4.2.3.2)$$

$$R_a = 19.10 - 0.00963*x(1) - 0.904*x(2) + 3.11*x(3) + 0.00199*x(4) + 0.000002*x(1)*x(1) + 0.0381*x(2)*x(2) - 0.079*x(3)*x(3) - 0.000027*x(1)*x(2) - 0.000937*x(1)*x(3) + 0.0908*x(2)*x(3) + 0.000103*x(2)*x(4) + 0.000206*x(3)*x(4) \quad (4.2.3.3)$$

$$\text{Boyutsal Hata (\%)} = 10.87 + 0.000172*x(1) - 0.0249*x(2) + 0.381*x(3) - 0.000267*x(4) + 0.00269*x(2)*x(2) - 0.0469*x(3)*x(3) + 0.000003*x(1)*x(2) - 0.000050*x(1)*x(3) - 0.0004*x(2)*x(3) - 0.000002*x(2)*x(4) + 0.000022*x(3)*x(4) \quad (4.2.3.4)$$

Denklem (4.2.3.5), (4.2.3.6), (4.2.3.7) ve (4.2.3.8), UHMWPE cep açma ve delik açma işlemlerinin genel optimizasyon modelini göstermektedir. Denklemler (4.2.3.5), (4.2.3.6) ve (4.2.3.7) 'de objektif fonksiyonlar verilmiştir ve Denklem (4.2.3.8)'de problem kısıtlamaları gösterilmiştir. ÜstLimit ve AltLimit, “i” parametresinin sırasıyla üst ve alt sınırlarını temsil eder, burada “gi” i parametresini temsil etmektedir. Çizelge 4.2.3.1, cep alma ve delik açma işlem parametreleri için kullanılan üst ve alt sınırları gösterilmiştir. Şekil 4.2.3.1. 'de elde edilen pareto eğrileri gösterilmiştir.

$$\text{Min. } f_{Ra} = R_a(x_1, x_2, x_3, x_4) \quad (4.2.3.5)$$

$$\text{Min. } F_{\text{BoyutssalHata}} = \text{BoyutssalHata} (x_1, x_2, x_3, x_4) \quad (4.2.3.6)$$

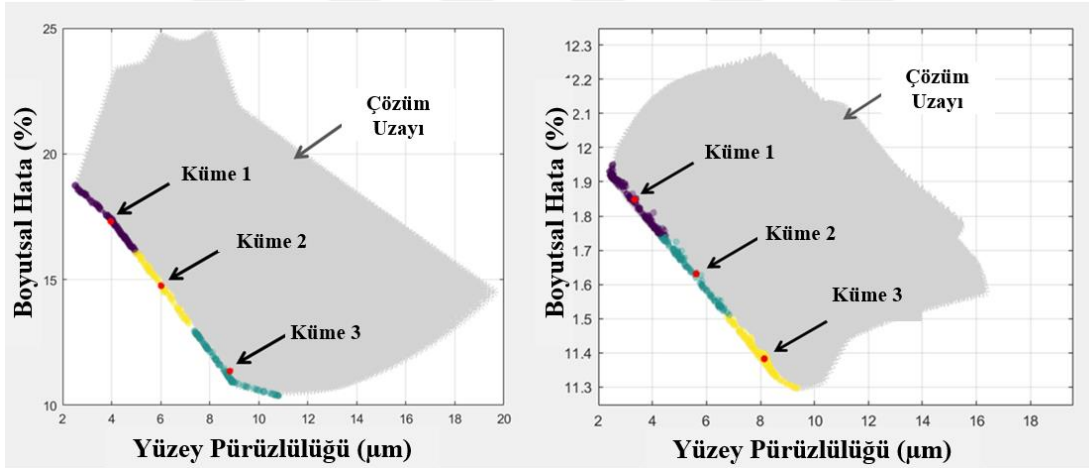
Öyle ki:

$$g_i - \text{ÜstLimit}_i \leq 0, \quad i = 1:4 \quad (4.2.3.7)$$

$$\text{AltLimit}_i - g_i \leq 0, \quad i = 1:4 \quad (4.2.3.8)$$

Çizelge 4.2.3.1 : ÇAPSO için cep ve delik açma parametrelerinin alt ve üst sınırları

| Parametreler | Alt Limit | Üst Limit |
|-----------------------|-----------|-----------|
| Basınç(P) (bar) | 2400 | 4000 |
| Kum Oranı (Qa) (%) | 2 | 10 |
| Mesafe (SoD) (mm) | 1 | 3 |
| İlerleme (f) (mm/min) | 1000 | 3000 |



Şekil 4.2.3.1 : Pareto eğrileri ve tanımlanmış kümeler (a) cep açma (b) delik delme.

4.2.4 UHMWPE Cep Açma ve Delik Delme Doğrulama ve Endüstriyel Uygulamalar

ÇAPSO algoritması sonucu ile Ra ve boyutsal hatalar arasındaki dengeyi temsil eden, Şekil 12'deki gibi iki benzer Pareto eğrisi elde edildi. Potansiyel kümeler pareto optimal kümelerinde tanımlanabilirse, endüstride operasyonel senaryolar olarak kullanılabilirler. Bunu başarmak için k-ortalama kümeleme algoritması kullanılmıştır. K-ortalama algoritması **Hartigan ve diğ. (1979)** tarafından geliştirilmiştir. ve veri setlerini sistematik olarak bölgelere bölmek için kullanılabilir (Miriya ve diğ., 2016). Uygulamamızın sonuçları ile her Pareto setinde 3 ayrı endüstriyel senaryo

tespit edilen 3 ayrı bölge sağlanmıştır. Bu senaryolara dayanarak, endüstriyel kullanım için kontrol parametrelerinin operasyonel aralıkları Çizelge 4.2.4.1'de verilmiştir.

İlk senaryoda (küme 1) (Düşük Geometrik Doğruluk ve Yüksek Yüzey Kalitesi), mümkün olan en yüksek yüzey kalitesini sağlayan düşük Ra ile düşük geometrik doğruluk hedeflenmiştir. Askeri uygulamalarda aşınmaya ve çevre koşullarına maruz kalan parçalar için, mümkün olan en yüksek yüzey kalitesi ve dayanıklılığını elde etmek için daha fazla yüzey işleme ve boyama uygulanacaktır. Bu tür bileşenler için, yüksek yüzey kalitesi, boyutsal doğruluktan daha önemlidir.

İkinci senaryoda (küme 2) (Dengeli Geometrik Doğruluk ve Yüzey Kalitesi), boyutsal doğruluk ve Ra'nın eşit derecede önemli olduğu varsayılmıştır. UHMWPE montajları dikkate alındığında, yapıştırma ve bağlantı elemanı kullanımı yaygındır. Ra yapıştırma işlemlerinde zorunludur.

Üçüncü senaryoda (küme 3) (Yüksek Geometrik Doğruluk ve Düşük Yüzey Kalitesi), yüksek boyutsal doğruluk ve düşük Ra bölgesi seçilmiştir. Yüksek geometrik doğruluk, savunma ve uzay standartlarının gerektirdiği sıkı geometrik toleransları elde etmek için özellikle önemlidir. UHMWPE'yi monte etmek için en çok kullanılan yöntemlerden biri bağlantı elemanlarıdır. Bağlantı elemanlarından vida için açılan deliklerin konum doğruluğu, doğru montaj için çok önemlidir.

Seçilen senaryolar, analiz ve optimizasyon adımlarının doğruluğunu doğrulamak için aynı malzeme üzerinde ASJ işlemeye tabi tutuldu. Sonuçlar, en büyük hatanın % 5.6 olduğu Çizelge 4.2.4.1'de sunulmaktadır.

Çizelge 4.2.4.1 : Cep açma ve delik delme operasyonları doğrulaması.

| Sn. | P (bar) | Qa (%) | SoD (mm) | fr (mm/min) | Ra (µm) (ölçülen) | Ra (µm) (ÇAPSO) | Ra Sapma (%) | Boyutsal Hata (%) (Ölçülen) | Boyutsal Hata (%) (ÇAPSO) | Boyutsal Hata Sapma (%) |
|-------------------------------|---------|--------|----------|-------------|-------------------|-----------------|--------------|-----------------------------|---------------------------|-------------------------|
| <i>Cep Açma Operasyonu</i> | | | | | | | | | | |
| 1 | 2697.8 | 10 | 1.013 | 647 | 8.028 | 8.158 | 1.6 | 13 | 12.4 | 4.3 |
| 2 | 3484.2 | 9.09 | 1 | 911 | 5.391 | 5.323 | 1.3 | 17.2 | 16.2 | 5.6 |
| 3 | 3939.3 | 2.52 | 1.012 | 1500 | 3.349 | 3.196 | 4.6 | 18 | 18.5 | 3.2 |
| <i>Delik Delme Operasyonu</i> | | | | | | | | | | |
| 1 | 2474 | 6.65 | 1.12 | 2834 | 8.695 | 8.701 | 0.1 | 11.5 | 11.41 | 1.1 |
| 2 | 2409 | 6.29 | 1.02 | 2073 | 6.671 | 6.571 | 1.5 | 12.2 | 11.59 | 4.7 |
| 3 | 2018 | 7.34 | 1.05 | 1000 | 3.351 | 3.247 | 3.1 | 12.3 | 11.89 | 2.9 |

5. DEĞERLENDİRMELER

Kompozit malzemelerin heterojen yapılarından kaynaklı olarak, yapılan talaşlı imalat ve aşındırıcılı su jeti işlemlerinde yaşanan problemlerden yukarıdaki literatür araştırması bölümünde bahsedilmiştir. Yapılan deneyler sonrasında elde edilen sonuçların literatür araştırması kısmında belirtilen teorik ve deneysel çalışmalar ile uyumlu ve bu modeller ile açıklanabiliyor olması elde edilen sonuçların doğru değerlendirilmesi için büyük öneme sahiptir. Elde edilen sonuçlar hem talaşlı imalat hem de aşındırıcılı su jeti işlemi için trimleme, cep açma ve delik delme işlerinde farklı çıktı parametrelerine göre değerlendirilmiştir.

5.1 Talaşlı İmalat İşlemi Değerlendirmeler

AFRP ve UHWMPE plakalar için yapılan talaşlı imalat deneyleri sonrasında elde edilen sonuçlar, literatürde yer alan teorik ve deneysel çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar sonrasında elde edilen sonuçlar aşağıda değerlendirilmiştir.

5.1.1 Trim Operasyonu

Trim işlemi sonrasında elde edilen güç, yüzey pürüzlülüğü ve sıcaklık değerleri aşağıda değerlendirilmiştir.

5.1.1.1 Güç

Trim işlemi sırasında kesme genişliğinin artması ile AFRP malzemelerde harcanan gücün de arttığı gözlemlenmektedir. Harcanan güç değerinin artmasına neden olan bir başka etken ise ilerleme ve kesme hızındaki artış olduğu da görülmektedir. Bu gözlemler daha önceki bölümlerde değinilen 2.1.1.2.'den 2.1.1.8.'e kadar olan denklemler ile de uyumludur. Bu gözlemlerden, kesme genişliği, ilerleme ve kesme hızı ile gücün doğru orantılı olduğu ortaya çıkmaktadır.

Fiber oryantasyonundan kaynaklı kuvvet ve güç sarfıyatı değişimi, çalışmada kullanılan malzemelerin tamamının $0^{\circ}/90^{\circ}$ açıyla serilmiş olması nedeniyle gözlemlenmemektedir.

5.1.1.2 Yüzey Pürüzlülüğü

AFRP malzemenin kesme genişliği, diş başı ilerleme ve kesme hızı parametrelerinin üzerinde etkisi olan bir diğer faktör de bahsedildiği gibi yüzey pürüzlülüğüdür. Bu açıdan incelenecek olursa bu parametrelerden her ikisinin de artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün arttığı yani yüzey kalitesinin düştüğü gözlemlenmektedir. Denklem 2.1.1.11'de, ilerlemenin artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün artacağı açıklanabilmektedir. Bu noktada kesme genişliğinin de yüzey pürüzlülüğünü artırdığının gözlemlenmesi önemli bir bulgudur. Artan ortalama talaş kalınlığı dolayısıyla, kesme kuvvetlerinin de arttığı, sonuç olarak da yüzey kalitesinin düştüğü düşünülmektedir. Artan kesme hızının yüzey kalitesini negatif yönde etkileyeceği **Sheikh-Ahmad ve Sirdhar (2002)** çalışmalarında da bahsedilmektedir; ancak literatürde yapılan çalışmaların aksine kesme hızının artışıyla yüzey pürüzlülüğünün azaldığı gözlemlenmektedir. Bu farklı durumun, malzemelerdeki farklı fiber türlerinin gösterdiği farklı davranıştan kaynaklı olabileceği düşünülmektedir.

UHMWPE malzemesinin talaşlı imalat ile trim işleminde yüzey pürüzlülüğü çıktıları için işlem parametrelerinin etkisi gözlenememiştir. Bu durumun malzemenin talaşlı imalat ile yığılması ve etkili bir şekilde işlenememesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

5.1.1.3 Sıcaklık

Trimleme esnasında işlem süresi çok kısadır (yaklaşık 1-10 sn.). Bu nedenle ilk bölümde bahsedilen çalışmalara göre göreceli olarak daha düşük sıcaklık değerleri elde edilmiştir. İşlem parametrelerinin etkisi göz önünde bulundurulduğunda Şekil 5.2.1.1'de görüldüğü gibi AFRP malzeme için sıcaklığın kesme genişliği ve kesme hızı üzerinde doğru orantılı şekilde etkili olduğu görülmektedir. CFRP malzeme üzerinde ise kesme hızının artmasıyla kesme sıcaklığının arttığı, **Wang ve diğ. (2016)** tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada saptanmaktadır.

5.1.2 Çep Açma Operasyonu

Cep açma işlemi sonrasında elde edilen güç, yüzey pürüzlülüğü, sıcaklık ve boyutsal hata ve çapak değerleri yapılan literatür araştırması ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

5.1.2.1 Güç

Deney sonuçlarına göre cep açma işlemi esnasında harcanan gücün, AFRP malzemenin kesme genişliğinin ve dış başı ilerlemenin artmasıyla arttığı görülmektedir. Trim işlemindeki sonuçlara göre beklenildiği gibi cep açma işleminde de klasik kesme teorisi ile örtüşen sonuçlar elde edilirken, kesme hızı için ise anlamlı bir etki gözlemlenmemiştir. UHMWPE malzemesi ile cep açma işlemi başarılı olmadığı için ölçüm alınamamıştır.

5.1.2.2 Yüzey Pürüzlülüğü

Trim işlemi ve buradaki açıklamalar ile paralel olarak işlenen ceplerin yüzey pürüzlülüğü incelendiğinde, deney sonuçlarına göre yüzey pürüzlülüğündeki artışın AFRP için kesme genişliğinin ve dış başı ilerlemenin artması ile açıklanabildiği görülmektedir.

5.1.2.3 Sıcaklık

Cep açma işlemindeki operasyon, cep geometrisinin ortasından başlanarak devam etmiştir. Bu durumda kesici takım, sıcaklık ölçümlerinin alındığı en dış yüzeye geldiğinde trim işlemine göre çok daha fazla ısınmıştır. Yani, takım yolunun uzamasıyla kesici takım üzerindeki sıcaklık artmıştır. Sıcaklığın etkisinin anlaşılabilmesi için en yüksek sıcaklığın elde edilebileceği en dış yüzeyden sıcaklık ölçümleri yapılmıştır.

Cep açma işleminde Trim işleminden farklı olarak, kesme genişliği değeri yükseldikçe AFRP malzemede sıcaklık ortalamalarının düştüğü gözlenmiştir. Bu durumun, kısalan işlem süresi ile sıcaklığın düşmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Trimleme işleminde kesme genişliği ile sıcaklık doğru orantılıdır; ancak cep açma işlemi merkezden başlayarak her turda kesme genişliği kadar boşaltma yapmaktadır. Bu nedenle iki işlemin karşılaştırılmasında işlem süresinin etkileri öne çıkmakta olup tam tersi bir durum gözlenmektedir.

5.1.2.4 Boyutsal Hata ve Çapak

Çapak oluşumunda ise AFRP malzemesinde, dış başına ilerlemedeki artışın, çapak oluşumunu azalttığı gözlenmiştir.

5.1.3 Delik Delme Operasyonu

Delik delme işlemi sonrasında elde edilen güç, yüzey pürüzlülüğü, sıcaklık ve boyutsal hata ve çapak değerleri yapılan literatür araştırması ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

5.1.3.1 Güç

Denklem 2.1.1.12 ve 2.1.1.13'te görüldüğü gibi kesme mekanizması incelendiğinde, kompozit malzemelerde delik delme işlemindeki kesme kuvvetleri ilerleme ile doğru orantılıdır. Denklem 2.1.1.7'ye göre ise kesme kuvveti arttıkça harcanan güç artmaktadır. Dolayısı ile delik delme işleminde AFRP malzeme ile gerçekleştirilen işlemlerde ilerlemenin artmasıyla harcanan gücün artması literatür ile desteklenmektedir.

5.1.3.2 Yüzey Pürüzlülüğü

AFRP'de her iki işlem parametresi de doğru orantılıdır. GFRP için ise ilerlemenin yüzey pürüzlülüğü değeri ile doğru orantılı olduğu **Ogawa ve diğ. (1997)** tarafından yapılan deneysel bir çalışmada saptanmıştır. Dolayısı ile AFRP malzemesinde dış başı ilerlemenin artması ile yüzey pürüzlülüğü değerinin artması sonucunun, literatürle örtüştüğü söylenebilmektedir.

5.1.3.3 Sıcaklık

Daha önceden de bahsedildiği üzere, harcanan gücün artması ile sıcaklık değeri artmaktadır. Bu diğer işlemler ile de benzer bir durum teşkil etmektedir. Delik delme işleminin sonuçlarında da harcanan güç ile sıcaklık değerlerinin benzer gidişatta olduğu, işlem parametrelerinden benzer şekilde etkilendiği görülmektedir.

5.1.3.4. Delaminasyon

Denklem 2.1.1.16'da ise delaminasyon için incelenen F_{kritik} denkleminde yer alan parametrelerin tamamının malzeme özellikleriyle alakalı olduğu görülmektedir. Malzemenin mekanik özelliklerini oluşturan fiber tipi, matris özellikleri, serim açısı

vb. gibi bir çok parametre F_{kritik} değerini dolayısı ile delaminasyon oluşumunu ilgilendirmektedir. Bu tez çalışmasında kuvvet ölçümü yapılamadığından dolayı yapılan deneylerde buna bağlı değerlendirme yapmak mümkün değildir. Deney sonuçlarında ise AFRP ve UHMWPE’de dış başına ilerlemenin artması ile giriş delaminasyonun azaldığı görülmüştür. Bu durum, zırh malzemesi olarak kullanılan bu iki malzemede de yoğun iplikli yapıdaki fiberlerin, yavaş ilerlemede giriş esnasında sararak yukarıya doğru çekerek daha fazla tiftiklenme ve saçaklanma yapması olarak yorumlanabilmektedir.

5.1.3.5 Çap Hata

Delik çap hatasında ise malzemeler arası tutarlı bir sonuca ulaşılamamıştır.

5.2 Aşındırıcılı Su Jeti İşlemi Değerlendirmeler

AFRP ve UHMWPE plakalar için yapılan aşındırıcılı su jeti deneyleri sonrasında elde edilen sonuçlar, literatürde yer alan teorik ve deneysel çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar sonrası elde edilen sonuçlar aşağıda değerlendirilmiştir.

5.2.1 Trim Operasyonu

Trim işlemi sonrasında elde edilen yüzey pürüzlülüğü ve kerf açısı/kerf oranı değerleri aşağıda değerlendirilmiştir

5.2.1.1 Yüzey Pürüzlülüğü

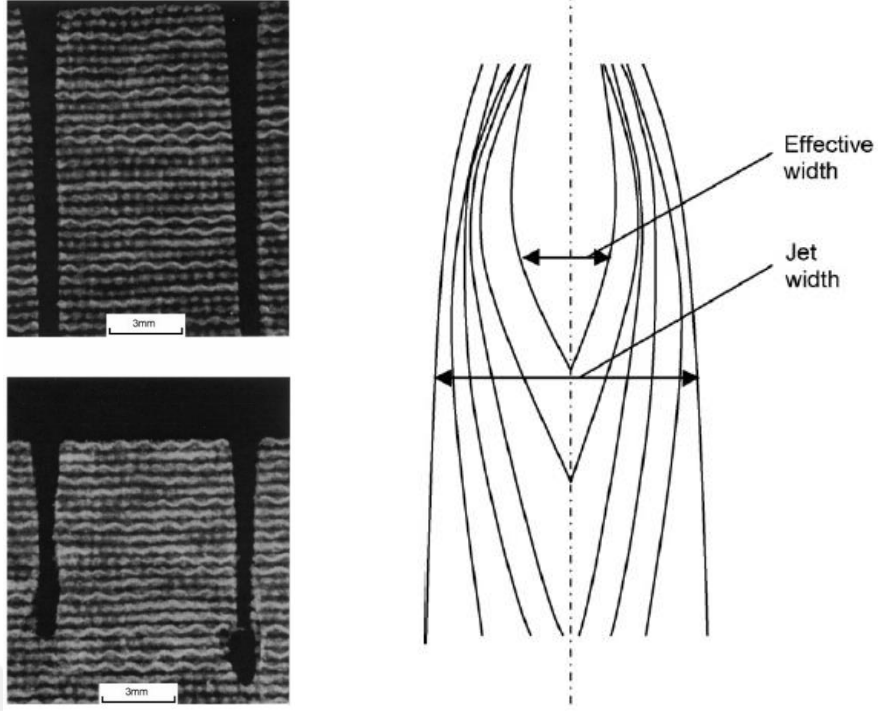
Trim işlemi sonucunda ölçülen yüzey pürüzlülüğüne, AFRP ve UHMWPE için ilerlemenin doğru orantılı olarak 1. veya 2. dereceden belirgin etkisi gözlenmiştir. Bu durum, denklem 2.2.1.4’te görüldüğü gibi, artan ilerleme hızının, teorik derinliği azaltacağı için, sabit kalınlıktaki levhalarda daha az düzgün bölge ile daha fazla kaba bölge oluşumundan kaynaklı olduğu şeklinde yorumlanabilir. Ayrıca AFRP, UHMWPE için ise basınç ve kum oranının artması ile yüzey pürüzlülüğünün düştüğü yani yüzey kalitesinin iyileştiği gözlenmiştir. Bu durum yine denklem 2.2.1.4’te aşındırıcı kum debisi ve basıncın arttığı takdirde, teorik kesme derinliğinin artması ve sabit kalınlıkta, düzgün bölge (smooth zone) içinde kalındığı olarak yorumlanmaktadır.

Yapılan diğerk bazı deneysel çalışmalarda da benzeri sonuçlar elde edildiği görülmüştür. **Azmir ve Ahsan (2009)** yaptıkları deneysel çalışma sonrasında, basıncı artırarak yüzey pürüzlülüğü azalır sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca kum oranının yüzey pürüzlülüğüne etkisi olarak aşındırıcı akış hızı arttıka, kesme derinliğinde de artış gözlemişlerdir. Aşındırıcı akış oranı arttırıldığında, basınçlı su hedef malzemeyi kolayca kesilebilir ve sonuç olarak kesim yüzeyi daha pürüzsüz hale gelir sonucuna ulaşmışlardır. Yazarlar, yüksek hidrolik basıncın, aşındırıcı parçacıkların kinetik enerjisini arttırdığı ve malzemenin işlenme kabiliyetinin arttığını da vurgulamışlardır. Bunun sonucu olarak da kesme işleminde işlenen yüzeydeki dalgalanmalar en aza indirgenir sonucuna ulaşmışlardır. **Azmi ve diğ. (2009)** yaptığı çalışmada da benzer sonuçlar olarak basıncı 200'den 320 MPa'ya yükselmesiyle, yüzey pürüzlülüğü %22 oranında azaldığı ortaya çıkmıştır. Bunun sebebi olarak teorik derinlik formüllüne bağlı değerlendirmelerine benzer olarak yüksek basınçlı suyla aşındırıcı parçacıkların momentumundaki artışlar ile malzemelerin ayrılma yeteneklerinin arttığını değerlendirmişlerdir.

5.2.1.2 Kerf Açısı ve Kerf Oranı

Bu bölümde, kerf açısı ve kerf oranı kerfte oluşan eğriliğin ortak ölçütleri oldukları için aynı başlık altında değerlendirilmişlerdir.

Yine **Wang'ın (1999)** yaptığı çalışmada, fiber kompozit polimer üzerine yaptığı denemelerde oluşan kerf oluşumu şekil 5.2.1.2.1'te gösterilmiştir. Bu çalışmada yüksek basınç, düşük ilerleme ve yüksek kum oranı kullanımında düşük kerf açısına ulaşıldığı görülmüştür.



Şekil 5.2.1.2.1 : Kerf oluşumu ve sujetindeki kuvvet bölgeleri (**Wang, 1999**).

Bu şekilde aynı zamanda orifisten çıkan jet akışının oluşumu verilmiştir. Bu akış içinde ortada bulunan etkili genişlik hızın en fazla olduğu bölümdür. Bunun dışında kalan akışta ise hız düşmekte ve kesim etkisi azalmaktadır. Bu sebeple parça içerisine nüfuz eden aşındırıcı suyun parçayı ayırmasından sonra tam doğrusal bir kesim elde edilememektedir. Buna göre bu doğrusal kesimin artırılabilmesi, yani kerfte oluşan eğriliğin en aza indirilebilmesi için jetin orta bölümünde bulunan etkili alanın genişletilmesi ve enerjisinin yükseltilmesi gerekmektedir. Bu da denklem 2.2.1.3'te verilen su jeti hızının artması için basınç parametresinin artırılması ile sağlanabilir.

Diğer yandan denklem 2.2.1.4'teki teorik derinliği artırmak, levha kesimde oluşan vadi yapısının mümkün olduğunca yukarı kısmında kalınmasını sağlayarak, oluşan kerf eğriliğini azaltacaktır. Bu formüle göre, teorik derinliği artırmak dolayısıyla, kerf açısı ve kerf oranını düşürmek için yüksek basınç, kum oranına ve düşük ilerleme değerine ihtiyaç bulunmaktadır. Sonuç olarak bu iki denkleme göre, basıncın ve kum oranının artırılması ile veya ilerlemenin azaltılması ile kerf oranı ve açısının düşeceği, dolayısıyla daha kaliteli bir yüzey elde edileceği yönünde bir genelleme yapılabilir. Ayrıca mesafenin azalması, jetteki iç bölgenin daha fazla kesim alanına etkisini sağlayarak, kerf oranı ve açısını da düşüreceği düşünülebilir.

AFRP malzeme için ilerleme, kum oranı ve mesafe parametreleri, kerf oranı ve kerf açısı üzerinde etkili olmamış fakat basınç artırıldığında kerf oranı ve açısının arttığı gözlenmiştir. Diğer parametrelerde bir sonuç gözlenememiştir. Litertürde yer alan CFRP ve GFRP malzemelerinin aksine, balistik koruyucu zırh olarak kullanılan AFRP, yüksek tokluk değeri sonucunda oluşan farklı kesme mekanizmaları sonucunda ortaya çıkmış olması ihtimali vardır. UHMWPE malzemesinde de benzer durum söz konusudur. Sadece kum oranı olması gerekenden zıt bir etki yapmıştır ve diğer parametrelerin bir etkisi bulunamamıştır.

5.2.2 Delik Delme Operasyonu

Delik delme işlemi sonrasında elde edilen yüzey pürüzlülüğü, çap hata ve delaminasyon değerleri aşağıda değerlendirilmiştir

5.2.2.1 Yüzey Pürüzlülüğü

Delik delme işleminde elde edilen yüzey pürüzlülüğü çıktısı sonuçları aynı trim işleminin yüzey pürüzlülüğü çıktıları gibi yorumlanmaktadır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, basınç ve kum oranının artmasıyla AFRP ve UHMWPE malzemeleri için yüzey pürüzlülüğünün düştüğü görülmektedir. Ayrıca ilerleme ve mesafe değerlerinin artması sonucunda yüzey pürüzlülüğü değeri de artmaktadır. Trim işleminde olduğu gibi burada da yüzey pürüzlülüğünün mekanizması teorik kesme derinliği ile açıklanabilmektedir.

5.2.2.2 Çap Hata

Çapta veya herhangi bir geometride meydana gelebilecek boyutsal hatalar denklem 2.2.1.1'den 2.2.1.3'e verilen enerji bağlantısı ile açıklanabilir. Yüksek basınç ve kum oranı değerlerinde parçacıkların enerjisi artmakta olduğu bu denklemler ile açıktır. Bunun sonucunda artan enerji sonrasında parçanın hedef parçadan ayrılması kolaylaşmakta ve oluşan ortalama kerf genişliği artmaktadır. Sonuç olarak, enerji denkleminde göre, basınç ve kum oranının artması ile boyutsal hatanın artması beklenmektedir.

Aynı zamanda jetten çıkan kum oranının birim alandaki miktarı da aşındırıcı taneciklerin ilk hasar da meydana gelene darbe enerjisinde etkilidir. Aşındırıcı taneciklerin birim alandaki yoğunluğunun tahmini için, **Schwartzentruber ve diğ.'nin (2017)** yaptıkları çalışma sonrasında geliştirdikleri model, denklem 5.2.2.2.1'te verilmiştir.

$$D_{S,ave} = \frac{m_a}{U D_f} \quad (5.2.2.2.1)$$

Denklem 5.2.2.2.1’de $D_{S,ave}$, birim alandaki kum miktarı (g/mm^2), m_a , aşındırıcılı kum oranı (g/s), D_f , orifis çapı (mm) ve U , ilerleme hızı (mm/s) olarak gösterilmiştir. Denklem 5.2.2.2.1’de gösterilen teorik formül doğrultusunda kum oranının artırılması ve ilerleme değerinin düşürülmesi belirli alandaki kum miktarını artmasına sebep olmakta ve artan darbe enerjisi sebebiyle ortalama kerf genişliği artmakta ve dolayısıyla boyutsal hatalar artmaktadır. Denklem 5.2.2.2.1’teki kum miktarının artması ve ilerleme değerinin düşmesi sonucunda artan birim alandaki kum miktarı bağlantısı Denklem 2.2.1.1’de kullanılan enerji teorik modelini de destekler niteliktedir. **Thongkaew ve diğ.’nin (2018)** yaptıkları deneysel bir çalışmada delik delme süresinin düşmesiyle delik çaplarının arttığını gözlemlemişlerdir. Bu durum ilerleme değerinin azalmasıyla, çap değerlerinde ortaya çıkan hatanın artması anlamına gelmektedir.

AFRP ve UHMWPE malzemeleri için delik delme işlemi sonrasında ortaya çıkan ortak sonuç; ilerleme değerinin artması sonucunda deliğin çapında ortaya çıkan hatanın düşmesi olmuştur. Bu durumda **Schwartzentruber ve diğ.’nin (2017)** modeli ile uyumludur. Buna ilaveten AFRP ve UHMWPE malzemelerinde basıncın artmasıyla, çap hatasının da arttığı gözlenmiştir. Yine bu malzemelerde, kum oranındaki artışın, hatanın artmasına sebep olduğu tespit edilmiştir. Ortaya çıkan bu sonuçlar da yukarıda bahsedilen kinetik enerji bazlı teorik modelleri destekler niteliktedirler.

5.2.2.3 Delaminasyon

Delaminasyon oranlarında genelde güvenilir sonuçlar elde edilememiş, sadece UHMWPE çıkışta kum oranı ile bağlantı elde edilebilmiştir. UHMWPE’de artan kum oranı olduğunda, kumun çıkış bölgesine malzemenin içine dolarak burada büyük ölçüde parçalanma ve saçaklanma yaptığı görülmüştür. Bunun sonucunda da kum oranı artırıldığında, çıkış delaminasyonunun arttığı tespit edilmiştir.

5.2.3 Cep Açma Operasyonu

Cep açma işlemi sonrasında elde edilen yüzey pürüzlülüğü, boyutsal hata değerleri aşağıda değerlendirilmiştir.

5.2.3.1 Yüzey Pürüzlülüğü

Çep açma işleminde elde edilen yüzey pürüzlülüğü çıktısı sonuçları, trim işleminin yüzey pürüzlülüğü çıktıları gibi yorumlanmaktadır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, basınç ve kum oranının artmasıyla AFRP ve UHMWPE malzemeleri için yüzey pürüzlülüğünün düştüğü görülmektedir. Ayrıca ilerleme ve mesafe değerlerinin artması sonucunda yüzey pürüzlülüğü değeri de artmaktadır. Trim işleminde olduğu gibi burada da yüzey pürüzlülüğünün mekanizması kesme derinliği teorisi ile açıklanabilmektedir.

5.2.3.2 Boyutsal Hata (En-Boy)

Cep açma işleminde ortaya çıkan sonuçlarda delik delme işlemlerine benzerdir. Delik delme işleminde çapta meydana gelen hatalarda olduğu gibi cep açma operasyonunda da AFRP ve UHMWPE malzemeleri için ortaya çıkan boyutsal hatalar, ilerleme değeri ile ters, kum oranı ile doğru orantılıdır. Tıpkı delik delme operasyonundaki gibi ilerleme değerinin düşmesiyle, her iki yönde de boyutsal hata artmaktadır. Gene tüm malzemelerde kum oranının artması ile boyutsal hataların arttığı görülmüş. Basınç artışı ile hatadaki artış aynı şekilde, AFRP, UHMWPE malzemelerinde görülmüştür.

5.3 Talaşlı İmalat ve Aşındırıcılı Su Jeti Karşılaştırmalı Değerlendirmesi

5.3.1 İşlem Çıktılarının Karşılaştırmalı Değerlendirilmesi

Yapılan pek çok deney sonucunda işlem çıktıları olarak, işlemin ve ölçümlerin uygunluğuna göre, yüzey pürüzlülüğü, sıcaklık, harcanan güç, işlem süresi, enerji tüketimi, delaminasyon faktörü, boyutsal hatalar ve kerf açısı değerleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçların karşılaştırmalı analizinin yapılabilmesi için çıktılar ayrı ayrı incelenmiştir. Öncelikli olarak çıktılar imalat teknoloji açısından değerlendirilmiştir.

Yüzey Pürüzlülüğü; İşlenen yüzeyin kalitesinin belirlemesi için kullanılan bir çıktıdır. Yüzey pürüzlülüğünün parça kalitesi üzerindeki önemini anlamak için öncelikli olarak kompozit malzemelerin üretiminden sonra gerçekleşen ikincil işlemlere bakmak gerekir. Bu ikincil işlemler arasında boya ve montaj önemli adımlardır. Yüzey pürüzlülüğü işlenen yüzeylerin boyanması sonrasında boya kalitesine doğrudan etki etmektedir. Üretici firmanın ürünlerinin final halini alması için müşteri tarafından beklenen boya isterlerini karşılaması gerekir. Ayrıca montaj işlemleri sırasında yer

alan yapıştırma işlemlerine de yüzey pürüzlülüğü doğrudan etki etmektedir. İşlenen yüzeyden yapılacak olan birleştirme işlemi (yapıştırma) yüzey kalitesiyle doğrudan ilişkilidir. Yüksek değerde ve kontrolsüz olarak ortaya çıkan yüzey pürüzlülüğü parçanın yapışma kalitesini azaltacaktır. Bu durumlar göz önünde bulundurulduğu zaman, kompozit malzemelerin imalatında, parçanın yüzey pürüzlülüğü üretilen parçanın kalitesine etkisinin yüksek olduğu sonucuna varılmaktadır.

Sıcaklık; Deneylerde kullanılan malzemelerin hepsi polimer matrisli kompozittir ve polimerin düşük erime sıcaklığına sahip olmaları operasyonlarda her zaman bir kısıt olmuştur. Ayrıca sadece erime noktası değil, aynı zamanda düşük camsı geçiş sıcaklıkları da özellikle montaj için gerekli olan geometrilerde kompozit yapının bozulmasına sebep olacağı için; operasyon sıcaklıklarının, malzemelerin camsı geçiş sıcaklığına (Tg) ulaşmaması önem arz etmektedir.

Harcanan Güç ve Enerji Tüketimi; birbirleri ile işlem süresi üzerinden ilişkili olan bu iki çıktı, hem doğaya verilen zararın azaltılması, hem de işletmeci kuruluşa maddi fayda sağlaması açısından önemlidir. Ayrıca sürdürülebilir üretim ile ilgili yapılabilecek akademik çalışmalar önemli rol oynayabilecektir.

İşlem süresi; Her şeyin hız ile ilerlediği günümüz sektöründe, operasyon hızı, siparişin teslimat süresinin doğrudan etkilediğinden dolayı, teslimatların zamanında tamamlanması açısından önemlidir. İşlem sürelerinin azaltılması hem maliyet, hem de teslimat süreleri açısından, imalat firmaları için her zaman bir rekabet avantajı niteliğindedir.

Delaminasyon faktörü; kompozit malzemeler üzerinde, lamine yapılarından kaynaklı olarak en sık gözlenen hata çeşitlerinden biridir. Delaminasyon oluşumu, özellikle montaj için açılan delik unsurlarında, kaliteyi bozmakta ve işlenen parçanın hurda olmasına sebep olmaktadır. Delaminasyon gerçekleşen bölgede herhangi bir geri dönüş olması mümkün olmamaktadır ve işlenen parçada görülen delaminasyon işleme operasyonu yapan firma/kuruluşa maddi zarar olarak dönmektedir

Boyutsal hatalar; Üretilen parçanın belirlenen toleranslar içerisinde üretilmesini tanımlar. Bu tanım parçanın üretiminin başarılı olup olmadığına karar veren bir çıktıdır. Havacılık ve savunma sanayinde kullanılan düşük toleranslar dikkate

alındığında, yüksek boyutsal hatanın sonucu hurdaya ayrılan parçalar maddi kayıplara yol açmaktadır.

Kerf açısı; Sadece su jeti işleminde ortaya çıkan kerf oranı ve açısı, bu işlemde en aza indirgenmeye çalışılmaktadır. Özellikle kesim yüzeyinde eğri yapıya sebep veren bu hata, yüksek olduğu takdirde, bu yüzeydeki birleştirmelerde sorunlar ortaya çıkarabilmektedir.

Yapılan deneyler sonrasında elde edilen çıktılar bu kriterler göz önünde bulundurularak aşağıda değerlendirilmiştir.

5.3.1.1 Yüzey Pürüzlülüğü

Yüzey pürüzlülüğü her iki operasyon için de işlenmiş yüzeyinde kalitesi açısından önemli bir çıktıdır. Çizelge 5.3.1.1.1’de deneyler sonucunda ortaya çıkan yüzey pürüzlülüğü değerleri karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

Çizelge 5.3.1.1.1 : Karşılaştırmalı yüzey pürüzlülüğü.

| <i>Ra (µm)</i> | | | | | | | |
|------------------------|--------|------------------|--------|--------|----------------------|--------|-------|
| | | Talaşlı İmalat | | | Aşındırıcılı Su Jeti | | |
| | | Min. | Maks. | Ort. | Min. | Maks. | Ort. |
| TRIM | AFRP | 2,602 | 3,966 | 3,44 | 4,135 | 10,835 | 6,958 |
| | UHMWPE | 1,801 | 3,418 | 2,516 | 3,827 | 7,895 | 5,568 |
| CEP AÇMA | AFRP | 2,702 | 4,446 | 3,74 | 5,962 | 15,006 | 9,676 |
| | UHMWPE | İşlem başarısız. | | | 3,525 | 7,951 | 5,05 |
| DELİK DELME | AFRP | 2,151 | 4,351 | 3,237 | 4,696 | 11,817 | 8,067 |
| | UHMWPE | 7,122 | 14,595 | 11,324 | 3,526 | 7,36 | 5,163 |

İki operasyon için de yüzey pürüzlülüğü değerleri incelendiğinde talaşlı imalat işlemlerinde aşındırıcılı su jeti işlemine göre daha iyi yüzey pürüzlülüğü değerlerinin elde edildiği görülmektedir. Burada kompozitler için geliştirilen yeni geometri takımların önemli rol oynadığı düşünülmektedir. Su jeti işleminde ise, aşındırıcı kullanılması ve su jetinin ilerlemeden dolayı yarattığı iz, yüzey kalitesini bozmaktadır.

5.3.1.2 Harcanan Güç ve Enerji Tüketimi

Deneysel sırasında elde edilen güç değerleri sonuçları Çizelge 5.1.2.1’de ve trim operasyonu için elde edilen enerji tüketimi sonuçları Çizelge 5.1.2.2’de yer almaktadır.

Çizelge 5.1.2.1 : Karşılaştırmalı güç değerleri.

| <i>P (W)</i> | | Talaşlı İmalat | | | Aşındırıcılı Su Jeti | | |
|----------------|--------|-----------------------|-------|------|----------------------|-------|------|
| | | Min. | Maks. | Ort. | Min. | Maks. | Ort. |
| TRIM | AFRP | 4015 | 4887 | 4374 | 912 | 1469 | 1239 |
| | UHMWPE | Doğru veri alınamadı. | | | 871 | 1599 | 1309 |
| CEP ACMA | AFRP | 4224 | 4805 | 4531 | 912 | 1469 | 1239 |
| | UHMWPE | İşlem başarısız. | | | 871 | 1599 | 1309 |
| DELİK DELME | AFRP | 4198 | 4824 | 4420 | 912 | 1469 | 1239 |
| | UHMWPE | Ölçüm alınamadı. | | | 871 | 1599 | 1309 |

Elde edilen güç değerlerine bakıldığı zaman aşındırıcılı su jeti operasyonunda ortalama güç değerlerinin talaşlı imalat operasyonuna göre daha düşük olduğu görülmektedir. Özellikle işlemin fiziğinin bu farkı yarattığı düşünülmektedir.

Harcanan gücün, maliyet ve doğaya etkisi düşünüldüğünde asıl etkisi ise enerji tüketimindedir. Burada işlem süreleri faktör olmaktadır. Trim operasyonu için elde edilen karşılaştırmalı enerji tüketimi değerleri Çizelge 5.1.2.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1.2.2 : Karşılaştırmalı enerji tüketimi.

| <i>Enerji Tüketimi (J)</i> | | Talaşlı İmalat | | | Aşındırıcılı Su Jeti | | |
|----------------------------|--------|-------------------------|-------|------|----------------------|-------|------|
| | | Min. | Maks. | Ort. | Min. | Maks. | Ort. |
| TRIM | AFRP | 5147 | 10986 | 7726 | 2310 | 6930 | 3935 |
| | UHMWPE | Sağlıklı veri alınamadı | | | 1094 | 4212 | 2078 |

AFRP'nin talaşlı imalat işleminde enerji tüketiminin ASJ işlemine göre daha yüksek olduğu görülmektedir. AFRP malzemenin yüksek mekanik özelliklerinden dolayı kesici takım ile arasındaki etkileşim sonucunda ortaya yüksek enerji tüketimi çıkmıştır.

5.3.1.3 Sıcaklık

Aşındırıcılı su jeti kesim işlemi bir soğuk kesme operasyonu olduğundan talaşlı imalat ile kıyaslandığında önemli bir avantaja sahiptir. Operasyon sırasında kullanılan su, sıcaklığın yükselmesine engel olmaktadır. Su jeti operasyonu bu konuda avantaj sağlamasına rağmen talaşlı imalat deneyleri sırasında ortaya çıkan sıcaklığın, Tg sıcaklığı ve erime noktasını geçmiyor olması, aşındırıcılı su jeti operasyonunu avantajlı kılmaktadır.

Dolayısıyla, su jeti işlemi sırasında sıcaklık ölçümleri yapılmamış, bundan sonraki karşılaştırma sadece talaşlı imalat işlemlerini kapsamaktadır. Bu işlemlerin karşılaştırmalı sıcaklık değerleri Çizelge 5.1.3.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1.3.1 : Karşılaştırmalı sıcaklık değerleri.

| $T (^{\circ}C)$ | | Talaşlı İmalat | | |
|--------------------|--------|------------------|-------|-------|
| | | Min. | Maks. | Ort. |
| TRIM | AFRP | 15,83 | 21,4 | 17,99 |
| | UHMWPE | 17,63 | 24,67 | 29,49 |
| CEP AÇMA | AFRP | 26,7 | 48,93 | 33,17 |
| | UHMWPE | İşlem başarısız. | | |
| DELİK DELME | AFRP | 20,46 | 24,8 | 22,67 |
| | UHMWPE | 25,14 | 32,47 | 32,47 |

Talaşlı imalat deneylerinde kullanılan farklı malzemelerin deney çıktılarında elde edilen sıcaklıklar incelenecek olursa;

- Trim operasyonunun AFRP'nin deneyleri sonucunda UHMWPE'e göre daha düşük sıcaklık değerleri elde edildiği görülmektedir. Buradaki farklılığın sebebi UHMWPE fiberleri ve AFRP fiberleri mekanik özellikleri birbirlerine yakın olsa dahi UHMWPE malzemenin büyük çoğunluğunun fiberden oluşması yani yüksek fiber/matris oranından kaynaklığı düşünülmektedir.

- Delik delme operasyonunda ortaya çıkan sıcaklık değerleri kıyaslandığında ise en yüksek sıcaklık değeri UHMWPE malzemesine aittir. Kısmen başarı sağlana delik delme ve başarısız olunan trim ve cep açma işlemleri, bu malzeme için daha düşük hızlarda kesim yapılabilecek, özel takım geometrilerinin geliştirilmesi gerektiğini düşündürmektedir.

5.3.1.4 İşlem Süresi

İşlem süresinin önemi ilk bölümde belirtilmiştir. Bu durum göz önünde bulundurularak çıkan sonuçlar incelenmiştir. Deneyle sonrasında elde edilen sonuçlar Çizelge 5.1.4.1’de gösterilmiştir. Öncelikli olarak talaşlı imalat ve aşındırıcılı su jeti operasyonlarında ortaya çıkan işlem süreleri karşılaştırıldığında, aramid elyaf takviyeli polimer malzeme talaşlı imalat işlemi avantajlı görünürken, UHMWPE malzemede ASJ operasyonunun üstünlüğü görülmektedir. Bunun en büyük sebebi talaşlı imalat işleminde ortaya çıkan sıcaklıktır. Sıcaklığın kritik seviyenin üstüne çıkmaması için kesim hızlarının yüksek değerlere ulaşmaması gerekmektedir. Bu durum sonucunda ortaya çıkan sürelerde aşındırıcılı su jeti işlemi, talaşlı imalat işleminin önüne geçmektedir.

AFRP malzeme için kullanılan düşük ilerleme değeri şartıcı olmamasına rağmen, bu değerlerin UHMWPE malzemesinde de görülmesi beklenmekteydi. Fakat UHMWPE malzemesinin, bir matris malzemesi olmaması su jetine kesiminde malzemenin daha kolay kopmasına olanak sağlamıştır. AFRP malzemedeki hem yüksek elyaf direnci hem de epoksi matris malzemesi olmasından gelen sertlik, aşındırıcılı su jeti kesiminde daha düşük ilerleme ile daha yüksek basınç değerlerinde operasyonu mümkün kılmıştır.

Çizelge 5.1.4.1 : Karşılaştırmalı işlem süreleri.

| <i>İşlem Süresi (sn)</i> | | | | | | | |
|--------------------------|--------|----------------|-------|------|----------------------|-------|------|
| | | Talaşlı İmalat | | | Aşındırıcılı Su Jeti | | |
| | | Min. | Maks. | Ort. | Min. | Maks. | Ort. |
| TRIM | AFRP | 1,3 | 2,3 | 1,8 | 2 | 6 | 3,2 |
| | UHMWPE | 1,3 | 2,6 | 1,8 | 1 | 3 | 1,6 |

5.3.1.5 Delaminasyon Faktörü

Delaminasyon faktörünün montaj üzerinde olası etkilerinden yukarıda bahsedilmiştir. Günümüzde hala en yaygın birleştirme tekniklerinde kullanılan delik geometrisi

delaminasyon faktörünün en yüksek etki ettiği geometri olarak düşünülmüş ve incelenmiştir. Delamanisyon faktörü hem delik geometrisinin girişi hem de çıkışı olarak ayrı ayrı incelenmiştir. Çizelge 5.1.5.1’de deneyler sonucunda elde edilen delaminasyon çıktıları gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde aşındırıcılı su jeti operasyonlarında delaminasyon görülme sıklığının daha az olduğu ortadadır. AFRP ve UHMWPE malzemelerde su jeti kesiminde giriş delaminasyonu görülmemesi talaşlı imalata göre bu operasyonu avantajlı duruma getirmiştir.

Çizelge 5.1.5.1 : Karşılaştırmalı delik için giriş ve çıkış delaminasyon faktörleri.

| | <i>Fd (Giriş)</i> | | | | | | <i>Fd (Çıkış)</i> | | | | | |
|--------|-------------------|-------|-------|----------------------|-------|------|-------------------|-------|-------|----------------------|-------|------|
| | Talaşlı İmalat | | | Aşındırıcılı Su Jeti | | | Talaşlı İmalat | | | Aşındırıcılı Su Jeti | | |
| | Min. | Maks. | Ort. | Min. | Maks. | Ort. | Min. | Maks. | Ort. | Min. | Maks. | Ort. |
| AFRP | 1,134 | 1,429 | 1,281 | Görülmedi | | | 1,439 | 1,817 | 1,593 | Görülmedi | | |
| UHMWPE | 1,250 | 1,508 | 1,381 | Görülmedi | | | 1,438 | 1,894 | 1,73 | 1,2 | 1,9 | 1,5 |

5.3.1.6 Boyutsal Hatalar

Boyutsal hataların parçanın üretiminin başarılı olup olmadığının önemli bir çıktısı olduğundan yukarıda bahsedilmiştir. Boyutsal hataların kabul edilebilir olduğuna karar verebilmek için her firma kullanım alanına göre farklı tolerans değerleri belirlemektedir. Bu tez çalışması kapsamında uluslararası geçerliliği olan ISO 2768 Genel Boyutlandırma ve Toleranslandırma Standardı kullanılmıştır. Şekil 5.1.6.1’de ISO 2768 standartlarının düzlemsel geometriler için olan tolerans değerleri verilmiştir. Çizelge 5.1.6.1’de ise yapılan deneyler sonrasında elde edilen boyutsal sapmalar gösterilmiştir.

LINEAR DIMENSIONS:

| Permissible deviations in mm for ranges in nominal lengths | f (fine) | Tolerance class designation (description) | | v (very coarse) |
|--|----------|---|------------|-----------------|
| | | m (medium) | c (coarse) | |
| 0.5 up to 3 | ±0.05 | ±0.1 | ±0.2 | - |
| over 3 up to 6 | ±0.05 | ±0.1 | ±0.3 | ±0.5 |
| over 6 up to 30 | ±0.1 | ±0.2 | ±0.5 | ±1.0 |
| over 30 up to 120 | ±0.15 | ±0.3 | ±0.8 | ±1.5 |
| over 120 up to 400 | ±0.2 | ±0.5 | ±1.2 | ±2.5 |
| over 400 up to 1000 | ±0.3 | ±0.8 | ±2.0 | ±4.0 |
| over 1000 up to 2000 | ±0.5 | ±1.2 | ±3.0 | ±6.0 |
| over 2000 up to 4000 | - | ±2.0 | ±4.0 | ±8.0 |

Şekil 5.3.1.6.1 : ISO 2768 toleransları düzlemsel geometriler için toleransları

Çizelge 5.1.6.1 : Karşılaştırmalı cep açma operasyonu için boyutsal hatalar.

| | <i>Boyutsal Hata (Boy) (%)</i> | | | | | | | | | |
|--------|--------------------------------|-------|------|-----------|-----|----------------------|-------|------|-----------|------|
| | Talaşlı İmalat | | | | | Aşındırıcılı Su Jeti | | | | |
| | Min. | Maks. | Ort. | Reel (mm) | Ort | Min. | Maks. | Ort. | Reel (mm) | Ort. |
| AFRP | 0,6 | 1,7 | 1,22 | 0,488 | | 3,2 | 4,1 | 3,6 | 1,44 | |
| UHMWPE | İşlem başarısız | | | | | 3,2 | 4,5 | 4 | 1,6 | |

Deneysel süreçte talaşlı imalat operasyonlarında 40x40 mm boyutlarında, aşındırıcılı su jeti operasyonunda ise 40x10 mm boyutlarında cep unsurları kullanılmıştır. İki operasyon için de uzun kenar (Boy) uzunlukları incelenmiştir. Sonuçlara bakıldığında su jetindeki boyutsal hataların talaşlı imalat göre yüksek çıktığı görülmektedir. Burada su jetinin boyutu ve izin verilen bir etken olduğu, düşük boyutsal hatalı işlemler için, bunu gözünde bulundurularak ilerleme yollarının kompanse edilmesi gerektiği değerlendirilmiştir.

ISO 2768 Standardı incelendiğinde 30-120 mm arasındaki değerler için 1,5 mm ve daha düşük değerlerin boyutsal hata için kabul edilebilir olduğunu göstermektedir. Deneysel sonuçları incelendiğinde su jeti işlemleri “very coarse” kategorisinde bulunmakta, talaşlı imalat işlemleri ise “medium” ve “coarse” kategorilerinde görülmektedir.

5.3.1.7 Kerf Açısı

Kerf, aşındırılı su jeti işlemine ait bir işlem hatasıdır. Talaşlı imalatta böyle bir hata olmaması, aşındırıcılı su jeti işlemine göre talaşlı imalat işlemine bir avantaj sağlamaktadır. Aşındırıcılı su jeti operasyonunda elde edilen kerf açısı değerleri Çizelge 5.1.7.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1.7.1 : Karşılaştırmalı trim işlemi için kerf açısı değerleri.

| Kerf Açısı (k_a) | | Aşındırıcılı Su Jeti | | |
|--------------------------------------|--------|-----------------------------|--------------|-------------|
| | | Min. | Maks. | Ort. |
| TRİM | AFRP | 3,6 | 6,9 | 5,4 |
| | UHMWPE | 5,63 | 15,57 | 8,75 |

Kerf açısı değerleri incelendiği zaman en düşük değer AFRP malzemeye ait olduğu görülmektedir. Bu durumun boyutsal hataya olan doğrudan etkisini incelemek gerekirse düşük kerf açısı düşük boyutsal hata anlamına gelmektedir. Boyutsal hataların incelendiği Çizelge 5.1.6.1’e bakıldığında zaman su jeti için AFRP’nin düşük boyutsal hataya sahip olduğu görülmektedir.

6. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, balistik koruyucu olarak savunma sanayisinde kullanımı gün geçtikçe artan AFRP ve UHMWPE malzemelerinin, endüstrideki ihtiyaçlar göze önünde bulundurularak, talaşlı imalat ve aşındırıcılı su jeti işlemlerindeki performansları karşılıklı olarak incelenmiştir. Her iki operasyonda da 4 mm kalınlığında plakalar kullanılmıştır. Kullanılan plakalar hem talaşlı imalat hem de aşındırıcılı su jeti işlemleri için trimleme, cep açma ve delik delme operasyonlarında değerlendirilmiştir. İşlem çıktıları değerlendirilirken, endüstriyel ihtiyaçlar göz önünde bulundurulmuş ve malzemelerin üretimi sonrasında montaj operasyonları düşünülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal hatanın montaj operasyonlarında kullanılan yapıştırma ve mekanik montaj işlemlerinin kalitesini doğrudan etkilemesi sebebiyle yapılan eniyileme çalışmalarında, bu iki çıktı parametresi üzerinde durulmuştur. Yapılan deneysel çalışmalar, analizler ve sonrasındaki eniyileme çalışmaları için elde edilen sonuçlar aşağıda paylaşılmıştır.

- Talaşlı ve su jeti teknolojileri kompozitlerin işlenmesi alanında doludizgin rekabete devam etmektedir. İkisinin de avantajlı ve dezavantajlı olduğu malzemeler ve ölçütler vardır.
- Takım imalatçılarının, kompozit kesimine uygun özgün geometrili takımları üretmedeki çabası dikkat çekicidir. Örneğin bu çalışmada Sandvik firması tarafından sağlanan takımlar oldukça yenilikçidir.
- Eğer uygun takım teknolojisi mevcutsa, kalite ölçütü olarak yüzey pürüzlülüğünde talaşlı imalat ile daha iyi sonuçlar alındığı ve işlem sürelerinin daha hızlı olabileceği değerlendirilmiştir. Fakat işlem süresinin uzamasıyla ortaya çıkan sıcaklık talaşlı imalat işleminin önüne çıkan en büyük kısıttır. Bu noktada su jetinin en büyük avantajı sıcaklık sorununun olmayışdır.
- Bir diğer kalite ölçütü olan kerf açısı, sadece su jetin için geçerlidir. Bunun kontrol altında tutulamaması, deliklerde ve birleştirme işlemi yapılacak arayüz

özelliği taşıyan dış yüzeylerde sorun yaratmaktadır. Talaşlı imalatta ise bu sorun bulunmamaktadır.

- Bazı kompozit malzemelerin talaşlı imalat ile işlenmesi hiç mümkün olmamaktadır. Buna örnek olarak UHMWPE verilebilir. Bu yapıda bir malzeme için su jeti tek opsiyon olarak görünmektedir. Yapılan deneyler sonrasında başarılı bir kesim işlemi elde edilmemiş ve ölçümle alınamamıştır.
- Özellikle deliklerdeki delaminasyon konusunda su jetinin genelde daha az delaminasyona sebep verdiği görülmüştür.
- AFRP için talaşlı imalat sonuçları incelendiğin de kesme kuvvetlerinin artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün ve Güç değerinin arttığı görülmüştür. Kesme genişliği ve dış başı ilerlemenin kesme kuvvetlerini arttırması sebebiyle, bu girdi parametrelerinin artmasıyla yüzey pürüzlülüğü ve güç değerleri artmıştır.
- AFRP plakanın talaş kaldırma operasyonu sonrasında trim operasyonu için 2,602-3,966 µm, delik delme operasyonu için 2,151-4,351 µm ve cep açma operasyonu için 2,704-4,446 µm değerleri arasında yüzey pürüzlülükleri elde edilmiştir. Ayrıca trim operasyonunda 4015-4887 (W), delik delme operasyonunda 4198-4824 (W) ve cep açma operasyonunda 4224-4805 (W) aralıklarında güç değerleri elde edilmiştir.
- İşlem parametrelerinin etkisi incelendiğinde ise AFRP için kesme genişliği ve kesme hızının sıcaklık ile etkili ve doğru orantılı olduğu Şekil 3.2.1.12'de görülmektedir. Bunlar artan kesme kuvvetleri ve güç ile, yayılan ısıl enerjinin artması olarak yorumlanmaktadır. Fakat burada cep açma operasyonunda artan sıcak değerlerinin en büyük sebebi işlem süresinin uzamasıdır. İşlem süresinin uzamasıyla sıcak artışı doğru orantılıdır. Cep açma operasyonunda kesme kuvvetleri artsa bile sıcaklık değerlerinin düşmesi, işlem süresinin kısalmasıyla açıklanabilmektedir. AFRP trim operasyonunda 15,83-21,40 (s), delik delme operasyonunda 20,46-24,81 (s) ve cep açma operasyonunda 26,70-48,93 (s) arasında değerler elde edilmiştir.
- Aşındırıcılı su jeti işlemi sonrası sonuçlar incelendiğinde, çoğu polimer matris kompozit malzeme üzerine yapılan araştırmalar, KE artması genellikle kerf açısı azalması ile sonuçlanır. KE değerinin artması nedeniyle basınçlı su, basınçlı suyun orta kısmı kullanılarak daha derinlere ulaşılabilir, şekil 5.2.1.2.1'de gösterilmiştir. Yüksek KE değeri daha doğrusal ve istekli kesim

sağlar. Bununla birlikte, AFRP ve UHMWPE'nin yüksek enerji emici karakteristikleri nedeniyle, Qa ve P değerlerindeki bir artış ters etki yaptı ve çıkış bölgesinde bozulmalara neden olmuştur.

- KE'deki artış genel olarak UHMWPE plakasının daha kolay kesilmesine sağlamıştır. P ve Qa'daki artış, KE'nin artmasıyla sonuçlanmış ve Ra'nın azalmasına sebep olmuştur. İlerlemedeki (f) bir artış ise KE'nin azalmasına sebep olmuştur. Elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri incelendiği zaman AFRP aşındırıcılı su jeti işlemi sonrasında en düşük cep açma operasyonu için 3,525 μm delik delme işlemi 3,526 μm değerleri elde edilmiştir. AFRP için ise trimlemede 4,135 μm , cep açma operasyonunda 5,962 μm ve delik delmede 4,696 μm değerleri elde edilmiştir.
- Aşındırıcılı su jeti işleminde hem AFRP hem de UHMWPE için boyutsal hata ve çap hatası ortalama kerf genişliğiyle ilişkilidir. SoD'nin artmasıyla kerf genişliği artmış ve bunun sonucunda boyutsal hatalarda artmalar gözlenmiştir. AFRP için en düşük değerleri cep açma operasyonu için % 3,2 ve delik delme operasyonu için 10%'dur. UHMWPE için cep açma operasyonunda % 13 ile % 15 arasında boyutsal hata değerleri değişmektedir ve delik açma operasyonları için % 13 ile % 15 arasında değerler elde edilmiştir. İlerleme (f) değerinin artmasıyla daha dar kerf genişliği elde edilmiştir ve hatalar azalmıştır.
- Deliklerde Qa'nın artmasıyla çıkış bölgelerinde delaminasyonun da arttığı gözlenmiştir. Bu temel sebebinin yüksek tokluk değerlerine sahip malzemelerin önemli ölçüde KE değerini sönmülemesiyle çıkış bölgelerinde fiberlerin kopmasına yetmeyen enerji miktarına sahip basınçlı su delaminasyona sebep olduğu değerlendirilmiştir.
- Talaşlı imalat işleminde AFRP malzeme üzerinde cep operasyonu gerçekleştirilmiş ve ÇAPSO algoritması ile yüzey pürüzlülüğü, güç ve sıcaklık işlem çıktıları optimize edilmiştir. Çizelge 4.2.1.2'de elde edilen doğrulama deneyleri sonuçlarına göre yüzey pürüzlülüğü için en yüksek %5.8, Güç için en yüksek % 4,1 ve sıcaklık için en yüksek % 22,9 sapma gözlenmiştir. Burada sıcaklık için gözlenen % 22,9'luk sapmanın temel sebebi sıcaklık ölçümü sırasında ortaya çıkan talaşların sıcaklık değerlerini arttırması ve doğru ölçümleri engellemesi olarak yorumlanmıştır.

- ASJ işlemleri için yapılan diğer iyileştirme çalışmaları, AFRP malzeme üzerinde trimleme, cep açma ve delik delme operasyonları için yapılmıştır. NSGA-III kullanılarak yapılan en iyileştirme çalışmaları sonrasında elde edilen pareto çözümleri üzerinden 3 farklı senaryo için trim operasyonunda yüzey pürüzlülüğü ve kerf açısı, cep açma ve delik delme operasyonları için ise yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal hata değerleri seçilmiştir. Yapılan doğrulama deneyleri sonrasında en yüksek %8'lik bir sapma değeri gözlemlenmiştir.
- ASJ'de boyutsal hata ve Ra arasındaki çelişkili denge ÇAPSO kullanılarak simüle edilmiştir. Her iki çıktı ölçüsü farklı endüstriyel uygulamalar için önemli olabileceğinden, k-ortalamları kümeleme algoritması kullanılarak üç olası senaryo tanımlanmıştır. Pareto optimal çözüm seti içindeki kümelerden elde edilen doğrulama veri seti, aynı malzeme üzerinde ASJ işlemi ile bir kez daha doğrulanmıştır. Deneysel olarak doğrulanmış değerlere karşı Pareto eğrisinde elde edilen işlem parametreleri ve optimum değerler Çizelge 4.3.4.2'de sunulmaktadır. Regresyon modellerinin doğruluğu ve ÇAPSO'nun doğru yakınsaması % 0,1 ile % 5,6 arasında değişen hata oranları ile doğrulanmıştır.

6.1. Önerilen Gelecek Çalışmalar

AFRP ve UHWMPE malzemelerin savunma sanayi için kullanımından ve öneminden yukarıda bahsedilmiştir. Yapılan deneylerde endüstride en çok kullanılan uygulamalar örnek alınmış ve yapılan optimizasyon çalışmalarında da endüstriyel uygulamalar önceliklendirilmiştir. Bu çalışmalar sonrasında elde edilen sonuçlar ve literatür incelendiği zaman, literatürde bu iki malzeme için oldukça az çalışma olması ve çalışmalarını bulunan diğer kompozit malzemeler için yapılan çalışmalarla bazı işlem çıktılarının uyumlu olmaması, ileride yapılacak çalışmalarda bu malzemelerin kesme mekanizmalarının daha iyi anlaşılabilmesi için önemlidir.

Yapılan işlemlerde UHWMPE malzeme için talaşlı imalat işleminde operasyonlarda başarı elde edilememesi üstüne gidilmesi gereken bir konu olarak değerlendirilmiştir.

Kesici takım teknolojisinin geliştirilmesiyle, talaşlı imalat işleminde ortaya çıkan sıcaklık probleminin üstünden gelinebileceği öngörülmektedir. Talaşlı imalat işleminde operasyon sırasında ortaya çıkan sıcaklığın ölçümünün doğru metotları

üzerine yapılacak çalışmalar sonrasında kesici takım teknoloji üzerine yapılacak olan çalışmalar bu kapsamda oldukça kritiktir.





KAYNAKLAR

- Abbas, A.; Aly, M.; Hamza, K.,** (2016). Multiobjective Optimization Under Uncertainty in Advanced Abrasive Machining Processes Via a Fuzzy-Evolutionary Approach. *J Manuf Sci*, E-T. ASME, Vol. 138. DOI: 10.1115/1.4032567.
- Abrao, A.M., Fara, P.E., Rubio, J.C.C., Reis, P., Davim, P.,** (2007). “Drilling of fiber reinforced plastics: A review”. *J Mater Process Technol*, 186, 1–7.
- Altıntaş, Y.,** (2012). “Manufacturing Automation”. *Cambridge University Press*.
- Arola, D., Ramulu, M., Wang ,D.H.,** (1996). “Chip formation in orthogonal trimming of graphite/epoxy composite”. *Compos Part A Appl Sci Manuf*, 27(2),121–133.
- Ay, M., Caydas, U., Hascalik, A.,** (2010). “Effect of traverse speed on abrasive waterjet machining of age hardened Inconel 718 Nickel-based superalloy”. *Mater Manuf Process*, 25, 1160-1165.
- Azmir, M.A., Ahsan, A.K., Rahmah, A.,** (2009). “Effect of abrasive water jet machining parameters on aramid fibre reinforced plastics composite”. *Int J of Mater Form*, 2,37–44.
- Azmir, M.A.; Ahsan, A.K.,** (2009). “Investigation on glass/epoxy composite surfaces machined by abrasive water jet machining”. *J Mater Process Technol*, 198(1-3), 3887-3893.
- Bao, Y. J., Hao, W., Gao, H., Liu, X. S., & Wang, Y. Q.,** (2018). “Numerical and experimental investigations on temperature distribution of plain-woven aramid fiber-reinforced plastics composites with low-mild spindle velocities”. *Int J Adv Manuf Tech*, 99(1-4), 613-622.
- Beasley D, Bull DR, Martin RR,** (1993). An Overview of Genetic Algorithms: Part 1, Fundamentals. *University Computing* 15(2) 58–69.
- Bersani A, Canonica L, Cariello M, Creseto R, Di Domizio S, Pallavicini M,** (2013) Long term elongation of Kevlar-49 single fiber at low temperature. *Cryogenics* 54 50–53.
- Bhatnagar, N., Nayak, D., Singh, I., Chouhan, H., Mahajan, P.,** (2004). “Determination of machining induced damage characteristics of fiber reinforced plastics composite laminates”. *Mater Manuf Process*, 19(6),1009–1023.
- Bhattacharyya, D., & Horrigan, D. P. W.,** (1998). “A study of hole Drilling in Kevlar composites”. *Compos Sci Technol*, 58(2), 267-283.

- Bitlisli, B.; Yazici, M.,** (2019). Araç zırhlamada kullanılan kompozit malzemelerin balistik performanslarının incelenmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*. 24(1), 25–34.
- Brinksmeir, E., Fangmann, S., Rentsch, R.,** (2011). “Drilling of composites and resulting surface integrity”, *CIRP Ann Manuf Techn*, 60, 57-60.
- Callister WD,** (1997). *Materials science and engineering: An introduction*. New York
- Chakraborty, S.; Mitra, A.,** (2018). Parametric optimization of abrasive water-jet machining processes using grey wolf optimizer. *Mater Manuf Process*, 33(13), 1471–1482. DOI: 10.1080/10426914.2018.1453158.
- Cheng, H., Zhang, K., Wang, N., Luo, B., Meng, Q.,** (2017). “A novel six – state cutting force model for drilling – countersinking machining process of CFRP-Al stacks’’. *Int J Adv Manuf Tech*, 89(5-8), 2063-2076.
- Coello Coello, C.A., Pulido, G.T., Lechuga, M.S.,** (2004). “Handling Multiple Objectives with Particle Swarm Optimization”. *IEEE T Evolut Comput*, 8(3).
- Çolak, A.; Göktaş, F.; Mindivan, F.,** (2019). İndirgenmiş Grafen Oksit Katkılı UHMWPE Kompozitin Kuru ve Sulu Ortamlarda Aşınma Davranışlarının Karşılıştırılması. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*. 8, 12–20. DOI: 10.17100/nevbittek.633270.
- Deb K., Jain H.,** (2014). An Evolutionary Many-Objective Optimization Algorithm Using Reference- Point-Based Nondominated Sorting Approach, Part I: Solving Problems with Box Constraints. *IEEE T Evolut Comput*. 18:577-601. <http://dx.doi.org/10.1109/TEVC.2013.2281535>
- Dhanawade, A.; Kumar, S.,** (2018). “Study on carbon epoxy composite surfaces machined by abrasive water jet machining”. *J Compos Mater*. DOI: doi.org/10.1177/0021998318807278
- Díaz-Álvarez, A., Rodríguez-Millán, M., Díaz-Álvarez, J., & Miguélez, M. H.,** (2018). “Experimental analysis of drilling induced damage in aramid composites”. *Compos Struct*, 202, 1136-1144.
- El-Domiaty, A.A.; Shabara, M.A.; Abdel-rahman, A.A.; Al-Sabeeh, A.K.,** (1996). “On the Modelling of Abrasive Waterjet Cutting”. *Int J Adv Manuf Tech*, 12(4), 255-265.
- EN 1522** (1998). “Windows, doors, shutters and blinds- Bullet resistance, requirements and classification,” *European Standard*, London.
- Folkes, J.,** (2009). “Waterjet – An innovative tool for manufacturing”. *J Mater Process Technol*, 209(20), 6181-6189.
- Fukuda, I.M., Pinto, C.F.F., Moreira, C.S., Savaiano, A.M., Lourenco, F.R.,** (2018). “Design of Experiments (DoE) applied to Pharmaceutical and Analytical Quality by Design (QbD)” *Braz J of Pharm Sci*, 54,
- Gaitonde, V. N., Karnik, S. R., Rubio, J. C., Correia, A. E., Abrao, A. M., & Davim, J. P.,** (2008). “Analysis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites”. *J Mater Process Technol*, 203(1-3), 431-438.

- Gara, S., Fredj, R., Naîmi, S., & Tsoumarev, O.,** (2017). “Prediction of cutting forces in slotting of multidirectional CFRP laminate”. *Int J Adv Manuf Tech*, 89(9-12), 3379-3391.
- Gara, S., Tsoumarev, O.,** (2016). “Effect of tool geometry on surface roughness in slotting of CFRP”. *Int J Manuf Technol*, 86, 451-461.
- Ghafarizadeh S., Lebrun G., Chatelain J.** (2016). “Experimental investigation of the cutting temperature and surface quality during milling of unidirectional carbon fiber reinforced plastic”. *J Compos Mater*, 50(8), 1059-1071.
- Giray M.; Bailey, S.,** (2019) Developments in Lightweight Composite Ballistic Helmet Manufacture. *Güvenlik Bilimleri Dergisi*. IDEF Özel Sayısı, 79-94. DOI: 10.28956/gbd.551759.
- Girof, F., Dau, F., Gutierrez-Orrantia, M.E.,** (2017). “New analytical model for delamination of CFRP during drilling”. *J Mater Process Technol*, 240, 332–343.
- Gordon, S., Hillery, M.T.,** (2003). “A review of the cutting of composite materials”. *P I Mech Eng E-J Pro*, 217, Part L: J., 35-45.
- Hamid O, Azari K, Mohammad T, Ali S,** (2012). Impact and Ballistic Behavior Optimization of Kevlar–Epoxy Composites by Taguchi Method. *Arab J Sci Eng*, 38 1161–1167. <http://dx.doi.org/10.1007/s13369-012-0381-4>.
- Hartigan, J., Wong, M.,** (1979). “Algorithm AS 136: A K-Means Clustering Algorithm”. *J R Stat Soc C-Appl*, 1979, 28(1), 100-108.
- Hintze, W., & Brüggmann, F.,** (2018). “Influence of spatial tool inclination on delamination when milling CFRP”. *J Mater Process Technol*, 252, 830-837.
- Ho-Cheng, H., Dharan, G.K.H.,** (1990). “Delamination during drilling in composite laminates”. *J Manuf Sci Technol*, 112, 236–239.
- Hoogstarte, A.M.; Susuzlu, T.; Karpuschewski, B.,** (2006). “High performance cutting with abrasive waterjets beyond 400 MPA”. *CIRP Ann*, 55(1), 339-342.
- Ibraheem, H.M.A; Iqbal, A.; Hashemipour, M.,** (2015). “Numerical optimization of hole making in GFRP composite using abrasive water jet machining process”. *J Chin Inst Eng*, 38(1), 66-76
- Kahya, M.,** “Türbin Bıçaklarının Torna-Freze Takım Tezgahlarında Optimal Talaşlı İmalatı İçin İşlem Metodolojisi Geliştirilmesi Ve Ti6Al4V İle Uygulamaları”. *Yüksek Lisans Tezi*, TOBB ETU, Ankara. (2018)
- Karahan, M.; Jabbar, A.; Karahan, N.,** (2014). Ballistic impact behavior of the aramid and ultra-high molecular weight polyethylene composites. *J Reint Plast Comp*, 34(1), 37–48. DOI: 10.1177/0731684414562223.
- Karakurt, I.; Aydın G.; Aydiner, K.,** (2012). “An experimental study on the depth of cut of granite in abrasive waterjet cutting”. *Mater Manuf Process*, 27(5), 538-544.

- Kennedy J.**, (2011). "Particle Swarm Optimization". Sammut C., Webb G.I. Encyclopedia of Machine Learning. *Springer*, Boston, MA
- Khashaba, U. A., & El-Keran, A. A.**, (2017). "Drilling analysis of thin woven glass-fiber reinforced epoxycomposites". *J Mater Process Technol*, 249, 415-425.
- Khuri, A.I., Cornell, J.A.**, (1996). Response Surfaces: Designs and Analyses: Second Edition, *Marcel Dekker*, New York, USA.
- Klocke, F., Soo, S. L., Karpuschewski, B., Webster, J. A., Novovic, D., Elfizy, A., & Tönissen, S.**, (2015). "Abrasive machining of advanced aerospace alloys and composites". *CIRP Ann*, 64(2), 581-604.
- Komanduri, R.**, (2007). "Machining of Fiber-Reinforced Composites". *Mach Sci Technol*, 113-152.
- Konig, W., Grass, P., Heintze, A., Okcu, F., Schmitz-Juster, Cl.**, (1984). "New developments in drilling and contouring composites containing Kevlar aramid fiber", *Technical Symposium V, Design and Use of Kevlar Aramid fiber in Composite Structures*, 95–103.
- Konig, W., Wulf, C., Grab, P., Willerscheid, H.**, (1985). "Machining of fiber reinforced plastics". *CIRP Ann*, 34(2), 537–547.
- Kulekci, M.K.**, (2002). "Processes and apparatus developments in industrial waterjet applications". *Int J Mach Tool Manuf*, 42(12), 1297-1306.
- Kumar, V., Minz, S.**, (2014). "Multi-objective particle swarm optimization: An introduction". *Smart Computing Review*, 4(5), 335-353.
- Kurtz, S.**, (2015) UHMWPE Biomaterials Handbook: Ultra High Molecular Weight Polyethylene in Total Joint Replacement and Medical Devices; *Elsevier*, Boston, MA, USA.
- Lee, S.; Kim, G.; Kim, S.; Chang, C.**, (2018) High-Energy Impact Behaviors of Hybrid Composite Plates Strengthened with 3D-UHMWPE Composites. *Shock Vib*, 1–12. DOI: 10.1155/2018/7626075.
- Li, C.; Jia, J.; Wang, G.; Zhang, R.; Li, X.**, (2016). A study on the tensile properties of UHMWPE fiber weft-knitted structural composites. *J Reinf Plast Comp* 36(2), 435–442. DOI: 10.1177/0731684416682854.
- Liu L, Zhao Z, Chen W, Luo G**, (2018) Influence of pre-tension on ballistic impact performance of multi-layer Kevlar 49 woven fabrics for gas turbine engine containment systems. *Chinese J Aeronaut*. 31(6): 1273–1286. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2018.03.021>
- Liu, S., Yang, T., Liu, C., Du, Y., & Gong, W.**, (2018). "Investigation of hole quality during drilling of AFRP based on the interaction between collars and cutter". *Int J Adv Manuf Tech*, 95(9-12), 4101-4116.
- Liu, X.; Li, M.; Li, X.; Deng, X.; Zhang, X.; Yan, Y.; Liu, Y.**, (2018) Ballistic performance of UHMWPE fabrics/EAMS hybrid panel. *J Mater Sci*. DOI: 10.1007/s10853-018-2055-4 .7371–7357 ,53
- Madhu, S.; Balasubramian M.**, (2017). "Influence of nozzle design and process parameters on surface roughness of CFRP machined by abrasive jet". *Mater Manuf Proces*, 32(9), 1011-1018.

- Mahfuz, H.; Khan, M.; Leventouri, T.; Liarokapis, E.,** (2011). Investigation of MWCNT Reinforcement on the Strain Hardening Behavior of Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene. *Journal of Nanotechnology*. 1–9. DOI: 10.1155/2011/637395.
- Mardi, K.; Dixit, A.; Mallick, A.; Pramanik, A.; Balloková, B.; Hvizdos, P.,** (2017). Surface integrity of Mg-based nanocomposite produced by Abrasive Water Jet Machining (ASJM). *Mater. Manuf. Process.* 32, 1707–1714. DOI: 10.1080/10426914.2017.1279306.
- Martellotti, M.E.,** (1941). “An analysis of the milling process”. *Transactions of the ASME*, (63),677-700.
- Mazumdar S.,** (2002) Composite Manufacturing – Materials, Product, and Process Engineering. *CRC Press LLC*, London, UK.
- Miriyala, S. S.; Subraminian, V. R.; Mitra, K.,** (2018). “TRANSFORM-ANN for online optimization of complex industrial processes: Casting process as case study”. *Eur J Oper Res*, 2018, 261, 294-309.
- Mohan, N. S., Kulkarni, S. M., & Ramachandra, A.,** (2007). “Delamination analysis in drilling process of glass fiber reinforced plastic (GFRP) composite materials”. *J Mater Process Technol*, 186(1-3), 265-271.
- Momber, A., Kovacevic, R.,** (1998). “Principles of Abrasive Water Jet Machining”. *Springer-Verlag London Limited*. London, UK.
- Myers, R.H., Montgomery, D.C., Anderson-Cook, C.M.,** (2016). Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments, *John Wiley & Sons*. Hoboken, New Jersey, USA
- Ogawa, K., Aoyama, E., Inoue, H., Hirogaki, T., Nobe, H., Kitahara, Y., Katayama, T., Gunjima, M.,** (1997). “Investigation on cutting mechanism in small diameter drilling for GFRP (thrust force and surface roughness at drilled hole wall)”. *Compos Struct*, 38, 343-350.
- Palanikumar, K.,** (2008). “Application of Taguchi and response surface methodologies for surface roughness in machining glass fiber reinforced plastics by PCD tooling”. *Int J Adv Manuf Tech*, 36(1-2), 19-27.
- Panchagnula, K. K., & Palaniyandi, K.,** (2018). “Drilling on fiber reinforced polymer/nanopolymer composite laminates: a review”. *J Mater Resh Technol*, 7(2), 180-189.
- Paul, S.; Hoogstrate, A.M.; van Praag, R.,** (2002). “Abrasive water jet machining of glass fiber metal laminates”. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B. *J Eng Manuf.* 216(11), 1459-1469.
- Poli, R., Kennedy, J. & Blackwell, T.,** (2002). “Particle Swarm Optimization”. *Swarm Intelligence*, 1(1): 33-37.
- Puw, H.Y., Hocheng, H.,** (1999). “Milling of polymer composites”. Jahanmir S, Ramulu M (ed) Machining of ceramics and composites. *Marcel Dekker Book*, 267–294.

- Rahmé, P., Landon, Y., Lachaud, F., Piquet, R., Lagarrigue, P.,** (2011). “Analytical models of composite material drilling”. *Int J Adv Manuf Tech*, 52, 609–617.
- Razfar, M. R., & Zadeh, M. Z.,** (2009). “Optimum damage and surface roughness prediction in end milling glass fibre-reinforced plastics, using neural network and genetic algorithm”. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: *J Eng Manuf*, 223(6), 653-664.
- Razfar, M. R., & Zadeh, M. Z.,** (2009). “Optimum damage and surface roughness prediction in end milling glass fibre-reinforced plastics, using neural network and genetic algorithm”. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: *J Eng Manuf*, 223(6), 653-664.
- Reis, P., Davim, J.,** (2005). “Damage and dimensional precision on milling carbon fiber reinforced plastics using design experiments”. *J Mater Process Technol*, 160(2), 160-167.
- Schwartzentruber, J., Spelt, J.K., Papini, M.,** (2017). “Prediction of surface roughness in abrasive waterjet trimming of fiber reinforced polymer composites”. *Intl Mach Tool Manu*, 122, 1-17.
- Sheikh-Ahmad, J., Sirdhar, G.,** (2002). “Edge trimming of CFRP composites with diamond coated tools: edge wear and surface characteristics”. *SAE General Aviation Technology Conference and Exhibition*, Wichita, Kansas, USA.
- Shetty, N., Shahabaz, S. M., Sharma, S. S., & Shetty, S. D.,** (2017). “A review on finite element method for machining of composite materials”. *Compos Struct*, 176, 790-802.
- Shuaib, A. N., Al-Sulaiman, F. A., & Hamid, F.,** (2004). “Machinability of Kevlar® 49 composite laminates while using standard TiN coated HSS drills”. *Mach Sci Technol*, 8(3), 449-467.
- Teti, R.,** (2002). “Machining of composite materials”. *CIRP Ann Manuf Technol*, 51(2), 611-634.
- Thongkaew, K., Wang, J., Li, W.,** (2018). “An investigation of the hole machining processes on woven carbon-fiber reinforced polymers (CFRPs) using abrasive waterjets”. *Mach Sci Technol*, 23, 19-38.
- Turing AM,** (1950) Computing Machinery and Intelligence. *Mind* (49): 433-460.
- Ventura G, Martelli V.,** (2009) Very low temperature thermal conductivity of Kevlar 49. *Cryogenics*. 49 376–377. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2009.04.001>
- Voss, R., Henerichs, M., & Kuster, F.,** (2016). “Comparison of conventional drilling and orbital drilling in machining carbon fiber reinforced plastics (CFRP)”. *CIRP Ann Manuf Technol*, 65(1), 137-140.
- Walter General Catalogue, erişim adresi: https://www.walter-tools.com/SiteCollectionDocuments/global/catalogues/en-gb/GC_2012_EN_light.pdf, erişim tarihi: 20 Eylül 2019

- Wang J.**, (1999). “Abrasive Waterjet Machining of Polymer Matrix Composites – Cutting Performance, Erosive Process and Predictive Models”. *Int J of Adv Manuf Technol*, 15, 757-768.
- Wang, D.H., Ramulu, M., Arola, D.**, (1995). “Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part I: Unidirectional Laminate”. *Int J Mach Tool Manu*, 35(12), 1623-1638.
- Wang, H., Sun, J., Zhang, D., Guo, K., Li, J.**, (2016). “The effect of cutting temperature in milling of carbon fiber reinforced polymer composites”. *Compos Part A*, 380-387.
- Won, M. S., & Dharan, C. K. H.**, (2002). “Drilling of aramid and carbon fiber polymer composites”. *J Manuf Sci Eng*, 124(4), 778-783.
- Yashiro, T., Ogawa, T., Sasahara, H.**, (2013). “Temperature measurement of cutting tool and machined surface layer in milling of CFRP”. *Int J Mach Tool Manuf*, 70, 63-69.
- Zhang, L., Liu, Z., Tian, W., Liao, W.**, (2015). “Experimental studies on the performance of different structure tools in drilling CFRP/Al alloy stacks”. *Int J Adv Manuf Technol*, 81(1-4), 241-251.
- Zhu D, Vaidya A, Mobasher B, Subramaniam D**, (2014) Finite element modeling of ballistic impact on multi-layer Kevlar 49 fabrics. *Compos Part B*, 56 254–262. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.08.051>
- Zu, W., Zhang, L.**, (2017). “A new approach to characterising the surface integrity of fibre-reinforced polymer composites during cutting”. *Compos Part A*, 103, 272-282.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Emre DOĞANKAYA
Uyruğu : T.C.
Doğum Tarihi ve Yeri : 09.09.1993
E-posta : emre.dogankaya@outlook.com;
e.dogankaya@etu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2016, Çankaya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : 2020, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

| Yıl | Yer | Görev |
|--------------------|--|-------------------|
| 2018- Devam ediyor | MAN Türkiye A.Ş. | Tasarım Mühendisi |
| 2018-2019 | TUBİTAK – 1002 Projesi | Bursiyer |
| 2017 | CES İleri Kompozit ve Savunma Teknolojileri A.Ş. | Tasarım Mühendisi |
| 2015 | TUSAŞ-Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş | Stajyer |
| 2014 | TUSAŞ-Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş. | Stajyer |

YABANCI DİL: İngilizce (İleri düzeyde)

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Dogankaya, E., Kahya, M., Ünver, H.Ö.,** 2020. Abrasive Water Jet Machining of UHMWPE and Trade-off Optimization, Mater. Manuf. Process. DOI: 10.1080/10426914.2020.1772486





