

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TÜRBİN BIÇAKLARININ TORNA-FREZE TAKIM TEZGAHLARINDA
OPTİMAL TALAŞLI İMALATI İÇİN İŞLEM METODOLOJİSİ
GELİŞTİRİLMESİ VE Ti6Al4V İLE UYGULAMALARI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Müge KAHYA

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Hakkı Özgür ÜNVER

ARALIK 2017

Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

.....
Prof. Dr. Osman EROĞUL
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans/Doktora derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

.....
Doç. Dr. Murat Kadri AKTAŞ
Anabilimdalı Başkanı

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 141511025 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Müge KAHYA'nın ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **“TÜRBİN BIÇAKLARININ TORNA-FREZE TAKIM TEZGAHLARINDA OPTİMAL TALAŞLI İMALATI İÇİN İŞLEM METODOLOJİSİ GELİŞTİRİLMESİ VE Ti6Al4V İLE UYGULAMALARI”** başlıklı tezi **08.12.2017** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Hakkı Özgür ÜNVER**
TOBB Ekonomive Teknoloji Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Yrd. Doç. Dr. Ahmet Murat ÖZBAYOĞLU**
(Başkan)
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Besim BARANOĞLU
Atılım Üniversitesi

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.

Müge KAHYA

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TÜRBİN BIÇAKLARININ TORNA-FREZE TAKIM TEZGAHLARINDA OPTİMAL TALAŞLI İMALATI İÇİN İŞLEM METODOLOJİSİ GELİŞTİRİLMESİ VE Ti6Al4V İLE UYGULAMALARI

Müge KAHYA

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Hakkı Özgür ÜNVER

Tarih: Aralık 2017

Teknolojinin gelişmesi ve üretim gereklerinin artmasıyla beraber özellikle havacılık, enerji ve otomotiv sanayilerindeki iş parçalarının hassas üretim işlemleri günden güne önem kazanmaktadır. Karmaşık geometri ve hassas çalışma koşullarına sahip iş parçalarının imalat süreçlerinde enerji verimliliği ve yüksek kalite ödünleşmesi her zaman işlem çıktılarını etkileyen bir unsur olmuştur. Hem yüksek kalitede hem de yüksek enerji verimliliği ile üretim süreçlerini gerçekleştirilebilir hale getirmek sürdürülebilir üretim uygulamalarına katkı sağlamaktadır. Türbin bıçakları özellikle havacılık ve enerji endüstrilerinde kritik bir göreve sahip iş parçalarıdır. Bu sebeple yüksek üretkenlik, düşük enerji tüketimi ve çok iyi bir yüzey kalitesi ile üretilmeleri gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında, türbin bıçaklarının torna-freze takım tezgahlarında talaşlı imalatının optimizasyonu için bir metodoloji geliştirilmiştir. Geliştirilen metodoloji, CAD/CAM ile imalat süreç geliştirme aşaması, Merkezi Kompozit Tasarım ile deney tasarımı, deneysel imalat ile veri toplanması, Yanıt Yüzey Metodolojisi ile veri analizi ve Çok-Amaçlı Parçacık Sürü Optimizasyonu ile pareto optimal çözümlerin

incelenmesi basamaklarını içermektedir. Çok-amaçlı optimizasyon sonunda elde edilen Pareto optimal çözüm seti üzerinden imalat stratejileri belirlenerek, bu stratejiler için gerekli optimal işlem parametre değerleri ile modellerin doğrulamaları yapılmıştır. Bu metodoloji iki farklı uygulama ile hayata geçirilmiştir. Uygulamalar, özel bir titanyum alaşımı olan Ti6Al4V ile gerçekleştirilmiştir. Birinci uygulamada türbin kanadının kaba ve ince talaş işlemleri için kesme derinliği, kesme genişliği, diş başı ilerleme ve kesme hızı işlem parametreleri ile talaşlı imalat süreçleri mercek altına alınmıştır. İşlem çıktıları olarak özgül kesme enerjisi, talaş kaldırma debisi ve ortalama yüzey pürüzlülüğü incelenmiştir. Uygulamanın sonucunda kaba ve ince talaş işlemleri için Pareto optimal çözüm setleri oluşturulmuştur. Bu çözüm setleri üzerinden belirlenen üç farklı imalat stratejisi için optimal işlem parametreleri belirlenmiş ve bu değerler ile modellerin doğrulaması yapılmıştır.

İnce talaş akışsal frezeleme işleminde küresel parmak frezeler kullanılmaktadır. Küresel parmak frezelerle verimli bir talaş kaldırma işlemi yapabilmek için belirli açılar ile çalışılması gerekmektedir. Bu kesici takım eğim açıları yaklaşma ve eğim açılarıdır. İkinci uygulamada öncelikle, ince talaş akışsal frezeleme işleminde yaklaşma ve eğim açılarının yüzey kalitesi üzerine etkileri geniş bir inceleme aralığı ile incelenmiştir. Ardından geliştirilen metodoloji için, işlem parametreleri olarak yaklaşma açısı, eğim açısı, kesme genişliği ve diş başı ilerleme alınarak, türbin kanadının ince talaş akışsal frezeleme işlemi üzerinde metodoloji uygulanır. Kesici takım eğim açılarının temel talaşlı imalat parametreleri ile birlikte; özgül kesme enerjisi, talaş kaldırma debisi ve ortalama yüzey pürüzlülüğü işlem çıktıları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çok-amaçlı optimizasyon sonucunda elde edilen Pareto optimal çözüm setinden belirli üç imalat stratejisi için optimal işlem parametre değerleri seçilmiş ve doğrulama süreci tamamlanmıştır.

Kesici takım eğim açılarının çeşitlendirilmesiyle ince talaş akışsal frezeleme işleminde bir iyileşme sağlanıp sağlanmadığını görmek için iki uygulamaların ince talaş akışsal frezeleme işlemlerine ait Pareto optimal çözüm setleri olurlu bölgeleri ile birlikte incelenmiş ve kesici takım eğim açılarının etkileri gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Türbin bıçakları, Torna-freze takım tezgahları, Çok-Amaçlı Parçacık Sürü Optimizasyonu, Yanıt Yüzey Metodolojisi, Ti6Al4V.

ABSTRACT

Master of Science

DEVELOPMENT OF PROCESS METODOLOGY FOR OPTIMIZATION OF MACHINING OF TURBINE BLADES ON TURN-MILL MACHINE TOOLS WITH Ti6Al4V APPLICATIONS

Müge KAHYA

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

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Hakkı Özgür ÜNVER

Date: December 2017

With the development of technology and increasing production requirements, high precision production processes especially for the parts in aviation, energy and automotive industries gain importance everyday. In the manufacturing processes of workpieces with complex geometry and high precision operations, energy efficiency and high quality compromise have always been influential on process output. Making production processes feasible both with high quality and high energy efficiency contributes to sustainable production practices. Turbine blades are components having a critical importance, especially in the aviation and energy industries. For this reason, they need to be produced with high productivity, low energy consumption and excellent surface quality.

In this thesis study, a methodology has been developed for the optimization of machining of turbine blades on turn-mill machine tools. The developed methodology includes the steps as CAD/CAM, experimental design, collection of data by machining, analysis of results with Response Surface Methodology and obtaining

Pareto optimal solution set by Multi-Objective Particle Swarm Optimization. The manufacturing strategies were determined through the Pareto optimal solution set obtained at the end of the multi-objective optimization and the models were confirmed with the optimal process parameter values required for these specified strategies. This methodology has been put into practice by two different applications. The applications were carried out with Ti6Al4V material which is a special titanium alloy, with high mechanical and thermal properties. In the first application, using the process parameters as depth of cut, stepover, feed per tooth and cutting speed, machining processes are examined for rough and fine machining of turbine blades. Specific cutting energy, material removal rate and average surface roughness were investigated as process responses. As a result of the application, Pareto optimal solution sets were established for roughing and finishing. The optimal process parameters for the three different manufacturing strategies identified through these solution sets were determined and the models were verified with these values.

Ball nose solid carbide end mills are used for finish flow milling. The ball nose end mills have to be machined with an angle to perform an efficient chip removal operation. These cutting tool angles are lead and tilt angles. In the second application, firstly, the effects on the surface quality of the lead and tilt angles in the finish flow milling process are investigated with a wide range of examination. Then, for the second application of methodology; lead angle, tilt angle, stepover and feed per tooth have been specified as process parameters for finish flow milling and developed methodology for the machining of turbine blade has been applied.

The effects of the cutting tool inclination angles and basic machining parameters on specific cutting energy, metal removal rate and average surface roughness were investigated. From the Pareto optimal solution set obtained as a result of multi-objective optimization, optimal process parameter values are selected for the three manufacturing strategies and the verification process has been carried out.

Keywords: Turbine blades, Turn-mill machine tools, Multi-Objective Particle Swarm Optimization, Response Surface Methodology, Ti6Al4V.

TEŞEKKÜR

Tez danışmanım, değerli hocam Doç.Dr. Hakkı Özgür ÜNVER'e ve çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocam Yrd.Doç.Dr. Ahmet Murat ÖZBAYOĞLU'na teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım sırasında desteklerini esirgemeyen hocam Prof. Dr. Osman EROĞUL'a teşekkür ederim. Tez jürisi üyesi sayın hocam Yrd.Doç.Dr. Besim BARANOĞLU'na zaman ayırıp tezimi değerlendirdikleri ve jürimde buldukları için teşekkür ederim.

Her daim bana inanıp, hiçbir desteği benden esirgemeyen aileme teşekkürü bir borç bilirim. Bu tezi sevgili aileme adıyorum. Kıymetli dostlarım Elif DEMİRTAŞ, Ceren YILMAZ ve Korhan Babacan YILMAZ'a bu süreçteki yardım, destek ve sabırlarından dolayı teşekkür ediyorum. Ayrıca, değerli arkadaşlarım Gökberk SERİN ve Fırat MEMU'ya bu süreçteki yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Tez kapsamındaki talaşlı imalat işlemleri için TOBB ETÜ Su Türbini Tasarım ve Test merkezi (ETÜ Hidro) altyapısı kullanılmıştır. Merkez altyapısının oluşturulmasındaki maddi desteği sebebiyle, Kalkınma Bakanlığı'na teşekkür ederim. Çalışmalarım sırasında sağladığı burs için TOBB ETÜ'ye ayrıca teşekkür ederim.

Ayrıca, Atılım Üniversitesi Metal Şekillendirme Mükemmelliyet Merkezi'nden Yahya TUNÇ'a, SECO firmasından Fatih SARI ve Umut BEKTAŞ'a, Manus Yazılım firmasından Ender CENGİZ ve Semih ÇİNÇİ'ye, Form Makina CNC Takım Tezgahları San.ve Tic. Ltd. Şti.'den Sinan ÇALIK'a, TOBB ETÜ İleri İmalat Laboratuvarı teknisyeni Kamil ARSLAN'a teknik desteklerinden dolayı teşekkür ederim. Yüksek lisans eğitimim boyunca sağladığı burs için TOBB ETÜ'ye teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
TEŞEKKÜR	xi
İÇİNDEKİLER	xiii
ŞEKİL LİSTESİ	xi
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
KISALTMALAR	xvii
SEMBOL LİSTESİ	xix
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
2.1 Titanyum Alaşımlarının İşlenebilirliği ile İlgili Çalışmalar	5
2.2 Torna-Freze Tezgahları ile İlgili Yapılan Çalışmalar	7
2.2.1 Torna-freze takım tezgahları	7
2.2.2 Torna-freze takım tezgahlarında işlem parametrelerinin incelenmesi ile ilgili çalışmalar	9
2.3 Türbin Bıçağı ile İlgili Çalışmalar	11
2.4 Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ile Talaşlı İmalat İşlemlerinin Optimizasyonları.....	13
2.4.1 Parçacık Sürü Optimizasyonu'nun evrimi	13
2.4.2 Parçacık Sürü Optimizasyonu varyasyonları	14
2.4.3 Talaşlı imalat işlemlerinde Parçacık Sürü Optimizasyonu'nun uygulanışı	15
2.5 Küresel Parmak Freze ile Frezeleme İşlemlerinde Kesici Takımların Eğim Açılırları ile İlgili Çalışmalar	22
3. TÜRBİN BIÇAKLARININ TORNA-FREZE TAKIM TEZGAHLARINDA İŞLENMESİ İÇİN İŞLEM METODOLOJİSİ GELİŞTİRİLMESİ	29
3.1 CAD/CAM Aşaması	31
3.2 Yanıt Yüzey Metodolojisi ve Deney Tasarımı.....	36
3.2.1 Yanıt Yüzey Metodolojisi	36
3.2.2 Deney tasarımı	39
3.3 Veri Toplama Aşaması.....	42
3.3.1 Özgül kesme enerjisi ve veri toplanması	42
3.3.2 Ortalama yüzey pürüzlülüğü ve ölçümü	44
3.3.3 Talaş kaldırma debisi ve hesaplanması.....	46
3.4 Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO)	47
3.4.1 Parçacık Sürü Optimizasyonu'nun temelleri	47
3.4.2 Çok amaçlı optimizasyon	48
3.4.3 Çok-Amaçlı Parçacık Sürü Optimizasyonu (ÇAPSO).....	50
4. UYGULAMA 1: GELİŞTİRİLEN METODOLOJİNİN Ti6Al4V ALAŞIMI İLE ÇALIŞILMASI	55
4.1 CAD/CAM Aşaması	56

4.1.1 Tornalama operasyonları.....	56
4.1.2 Frezeleme operasyonları	60
4.2 Üretim Aşaması	65
4.2.1 Kaba talaş işlemleri	67
4.2.2 Ara-kaba talaş işlemleri.....	68
4.2.3 İnce talaş işlemleri.....	69
4.3 Deney Tasarımı	70
4.3.1 Kaba talaş işlemi	70
4.3.2 İnce talaş işlemi	71
4.4 Yanıt Yüzey Metodolojisi	73
4.4.1 Kaba talaş yan frezeleme işlem çıktılarının analizi.....	73
4.4.2 İnce talaş akışsal frezeleme işlem çıktılarının analizi	76
4.5 Çok Amaçlı Parçacık Sürü Optimizasyonu	79
4.5.1 Kaba talaş yan frezeleme işlem optimizasyonu	80
4.5.2 İnce talaş akışsal frezeleme işlem optimizasyonu.....	81
4.6 Doğrulama	83
5. UYGULAMA 2: GELİŞTİRİLEN METODOLOJİNİN KESİCİ TAKIM	
EĞİLME AÇILARI İNCELENEREK İYİLEŞTİRİLMESİ	87
5.1 İnce Talaş Akışsal Frezeleme İşleminde Eğim ve Yaklaşma Açılarının	
Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü Üzerine Etkilerinin İncelenmesi	88
5.2 İnce Talaş Akışsal Frezeleme İşleminde Kesme Açılarının Enerji, Verimlilik	
ve Kalite Üzerine Etkilerinin İncelenmesi	94
5.2.1 CAD/CAM aşaması	94
5.2.2 Üretim aşaması	95
5.2.3 Deney tasarımı.....	96
5.2.4 Yanıt Yüzey Metodolojisi	97
5.2.5 Çok Amaçlı Parçacık Sürü Optimizasyonu.....	102
5.2.6 Doğrulama.....	104
6. KESİCİ TAKIM EĞİM AÇILARININ VARYASYONLARININ İŞLEM	
ÇIKTILARI ÜZERİNDE YARATTIĞI FARKLILIKLARIN	
İNCELENMESİ	107
7. SONUÇLAR VE YORUMLAR.....	109
7.1 Önerilen Gelecek Çalışmaları.....	113
KAYNAKLAR.....	115
EKLER.....	125
ÖZGEÇMİŞ.....	131

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1: (a) Kesme hızı, (b) ilerleme, (c) kesme genişliğinin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkileri.....	6
Şekil 2.2: Mazak i-200ST torna-freze takım tezgahı	8
Şekil 2.3: (a) Dik torna-freze işlemi (b) eş-eksenli torna-freze işlemi	9
Şekil 2.4: (a) ilerleme ve kesme hızının Ra üzerindeki etkisi (b) kesme derinliği ve kesme hızının Ra üzerindeki etkisi (c) kesme derinliği ve ilerlemenin Ra üzerindeki etkisi(d) Ra için artıkların normal olasılıkları	11
Şekil 2.5: Jet motorunun görünümü	12
Şekil 2.6: Parçacık Sürü Optimizasyonu'nun varyasyonları	14
Şekil 2.7: Yukarı ve aşağı frezeleme durumlarında oluşan kesme yüzeyleri ve eğim açıları	22
Şekil 2.8: Chen vd. tarafından belirlenen 8 farklı kesme stratejisi	24
Şekil 3.1: Türbin bıçağının temel unsurları	29
Şekil 3.2: Türbin bıçağının torna-freze tezgahlarında işlenmesi üzerine geliştirilen metodoloji.....	30
Şekil 3.3: Siemens NX 9.0 kullanıcı arayüzü	32
Şekil 3.4: Türbin bıçağının kaba ve ara-kaba işlemleri için CAM operasyon seçenekleri	35
Şekil 3.5: Türbin bıçağının ince talaş işlemleri için CAM operasyon seçenekleri	36
Şekil 3.6: Örnek yanıt yüzey grafiği	38
Şekil 3.7: $k=2$ tasarım değişkeni için MKT örneklemleri	40
Şekil 3.8: $k=3$ tasarım değişkeni için MKT örneklemleri	41
Şekil 3.9: $k=3$ tasarım değişkeni için BBT örneklemleri	41
Şekil 3.10: Talaşlı imalat operasyonu için harcanan gücün işlenme süreci	44
Şekil 3.11: Ortalama yüzey pürüzlülüğü gösterimi	45
Şekil 3.12: Türbin bıçağının yüzey pürüzlülüğü ölçümü	46
Şekil 3.13: PSO'nun çalışma mekanizması	48
Şekil 3.14: Pareto optimal çözüm seti	49
Şekil 3.15: ÇAPSO algoritması akış şeması	53
Şekil 4.1: Türbin bıçağı kanat formu	55
Şekil 4.2: Kesici uç biçimi seçimi	56

Şekil 4.3:	Yan boşluk açısının seçimi	56
Şekil 4.4:	Kesici uç tolerans seçimi	57
Şekil 4.5:	Kesici uç sabitleme/talaş kırıcı seçimi	57
Şekil 4.6:	Ti6Al4V için uygun kaplama ve malzeme seçimi	58
Şekil 4.7:	Alın tornalama ve dış çap tornalama işlemleri için uygun kesici uç seçimi	58
Şekil 4.8:	Alın tornalama işlemi için (a) takım yolu, (b) işlem simülasyonu, (c) beklenen işlem sonucu	59
Şekil 4.9:	Dış çap tornalama işlemi için (a) takım yolu, (b) işlem simülasyonu, (c) beklenen işlem sonucu	59
Şekil 4.10:	Ti6Al4V için uygun kesici grubunun seçimi	60
Şekil 4.11:	Ti6Al4V için uygun kesici grubundan uygun çapta ve uzunlukta kesici seçimi	61
Şekil 4.12:	Türbin kanadının çevre frezeleme metodu kaba talaş işlemi	62
Şekil 4.13:	Türbin kanadının profil çevreleme metodu ile ara-kaba talaş işlemi	62
Şekil 4.14:	Ti6Al4V için uygun küresel takım için sınıf seçimi	63
Şekil 4.15:	Ara-kaba ve ince talaş işlemleri için küresel takım seçimi	64
Şekil 4.16:	Küresel parmak freze ile gerçekleştirilen ara-kaba işlemi	64
Şekil 4.17:	İnce talaş işlemi	64
Şekil 4.18:	Kaba talaş operasyonları	67
Şekil 4.19:	Tornalama işlemleri ve işlem parametreleri	67
Şekil 4.20:	Kaba yan frezeleme işlemi ve işlem parametreleri	68
Şekil 4.21:	Ara-kaba işlemleri ve çıktıları	69
Şekil 4.22:	Ara-kaba işlemi işlem parametreleri	69
Şekil 4.23:	İnce talaş işlem parametreleri, ince talaş işlemi ve işlenmiş türbin kanadı	70
Şekil 4.24:	Kaba talaş yan frezeleme işlemi ÖKE için yüzey grafikleri	75
Şekil 4.25:	Kaba talaş yan frezeleme işlemi TKD için yüzey grafikleri	76
Şekil 4.26:	İnce talaş akışsal frezeleme işlemi ÖKE için yüzey grafikleri	78
Şekil 4.27:	İnce talaş akışsal frezeleme işlemi TKD için yüzey grafikleri	79
Şekil 4.28:	İnce talaş akışsal frezeleme işlemi Ra için yüzey grafikleri	79
Şekil 4.29:	Kaba talaş yan frezeleme işlemi optimal çözüm seti	81
Şekil 4.30:	İnce talaş akışsal frezeleme işlemi için Pareto optimal çözüm seti.	82
Şekil 4.31:	İnce talaş işlemlerinin yüzey topoğrafyası (a) iyi, (b) orta, (c) kötü	85
Şekil 5.1:	Dar eğilme açılarında freze kafası ve aynanın çarpışma riski	88
Şekil 5.2:	Negatif yatma açılarında kesici takım ve türbin kanadı çarpışma riski	89
Şekil 5.3:	50° yatma açısı ve 20° eğilme açısı ile yapılan işlem	90

Şekil 5.4:	Farklı yatma açıları ile gerçekleştirilen ince talaş işleminde Ra değişimi.....	91
Şekil 5.5:	Farklı eğilme açıları ile gerçekleştirilen ince talaş işleminde Ra değişimi.....	92
Şekil 5.6:	Farklı kesim açıları ile gerçekleştirilen ince talaş işlemleri	93
Şekil 5.7:	Farklı kesme açısı kombinasyonları sonucu ortaya çıkan CAM durumları	95
Şekil 5.8:	Farklı işlem parametreleri ile işlenmekte olan türbin kanadı (a) eğilme açısının gösterimi (b) yatma açısının gösterimi	96
Şekil 5.9:	Özgül kesme enerjisi için oluşturulan yüzey grafikleri	100
Şekil 5.10:	Talaş kaldırma debisi için oluşturma yüzey grafikleri	101
Şekil 5.11:	Ortalama yüzey pürüzlülüğü için oluşturulan yüzey grafikleri	101
Şekil 5.12:	İnce talaş akışsal frezeleme işlemi için Pareto optimal çözüm seti..	104
Şekil 5.13:	Kesici takım eğim açıları doğrulama işlemlerinin yüzey topoğrafyaları (a) 1. strateji, (b) 2. strateji, (c) 3. strateji	106
Şekil 6.1:	Geliştirilen metodolojinin uygulamaları sonucu işlem çıktılarında elde edilen iyileşme	108

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1: Talaşlı imalatta PSO kullanımının literatür taraması özeti.....	19
Çizelge 2.2: Küresel parmak frezelemede eğim açılarıyla ilgilenilen çalışmalar.....	26
Çizelge 4.1: Alın tornalama ve dış çap tornalama işlemleri için belirlenen kesme parametreleri	59
Çizelge 4.2: Talaşlı imalat operasyonlarının işlem parametreleri.....	65
Çizelge 4.3: Ti6Al4V (Sınıf 5) alaşımının kimyasal kompozisyonu.....	65
Çizelge 4.4: Ti6Al4V alaşımının mekanik ve termal özellikleri.....	65
Çizelge 4.5: Talaşlı imalat operasyonlarında kullanılan kesici takımlar ve özellikleri.....	66
Çizelge 4.6: Kaba talaş işlemi için Merkezi Kompozit Tasarım ve deney sonuçları.....	71
Çizelge 4.7: İnce talaş işlemi için Merkezi Kompozit Tasarım ve deney sonuçları.....	72
Çizelge 4.8: Kaba talaş yan frezeleme işleminde ÖKE için varyans analizi.....	74
Çizelge 4.9: Kaba talaş yan frezeleme işleminde TKD için varyans analizi.....	75
Çizelge 4.10: İnce talaş akışsal frezeleme işleminde ÖKE için varyans analizi.....	77
Çizelge 4.11: İnce talaş akışsal frezeleme işleminde TKD için varyans analizi.....	78
Çizelge 4.12: İnce talaş akışsal frezeleme işleminde Ra için varyans analizi..	78
Çizelge 4.13: Kaba talaş yan frezeleme işlem parametrelerinin alt ve üst limitleri.....	80
Çizelge 4.14: İnce talaş akışsal frezeleme işlem parametrelerinin alt ve üst limitleri.....	82
Çizelge 4.15: Kaba talaş yan frezeleme işlemi doğrulama verileri.....	83
Çizelge 4.16: İnce talaş akışsal frezeleme işlemi için işlem stratejileri ve parametre değerleri.....	84
Çizelge 4.17: İnce talaş akışsal frezeleme işlemi için işlem stratejileri için doğrulama verileri	84
Çizelge 5.1: Farklı yatma açılarında gerçekleştirilen ince talaş işlemlerinden elde edilen Ra değerleri.....	90
Çizelge 5.2: Farklı yatma açılarında gerçekleştirilen ince talaş işlemlerinden elde edilen Ra değerleri	92

Çizelge 5.3:	İnce talaş akışsal frezeleme işlemi için oluşturulan MKT ve deney çıktıları.....	96
Çizelge 5.4:	Özgül kesme enerjisi için varyans analizi.....	98
Çizelge 5.5:	Talaş kaldırma debisi için varyans analizi.....	99
Çizelge 5.6:	Ortalama yüzey pürüzlülüğü için varyans analizi.....	100
Çizelge 5.7:	İşlem parametrelerinin alt ve üst limitleri.....	103
Çizelge 5.8:	Belirlenen işlem stratejileri için işlem parametresi değerleri...	103
Çizelge 5.9:	İnce talaş akışsal frezeleme işlemi için işlem stratejileri için doğrulama verileri.....	105



KISALTMALAR

ANOVA	: Varyans Analizi
CAD	: Bilgisayar Destekli Tasarım (Computer Aided Design)
CAM	: Bilgisayar Destekli Üretim (Computer Aided Manufacturing)
CNC	: Bilgisayar Sayımlı Yönetim (Computer Numerical Control)
GA	: Genetik Algoritma
ÖKE	: Özgül Kesme Enerjisi(Specific Cutting Energy)
Ti6Al4V	: Titanyum Alaşımı
TKD	: Talaş Kaldırma Debisi (Material Removal Rate)
YSA	: Yapay Sinir Ağları (Artificial Neural Network)
YYM	: Yanıt Yüzey Metodu (Response Surface Methodology)
PSO	: Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization)
ÇAPSO	: Çok-Amaçlı Parçacık Sürü Optimizasyonu (Multi-Objective Particle Swarm Optimization)

SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
a_e	Yanal kayma (radial depth of cut) (mm)
a_p	Kesme derinliği (axial depth of cut) (mm)
V_c	Kesme hızı
f_z	Diş başı ilerleme (mm/dev)
f	İlerleme (mm/dak)
E_{temel}	Makinanın boşta tükettiği enerji (j)
E_{toplam}	Tüketilen toplam enerji (j)
E_{kesme}	Tüketilen kesme enerjisi (j)
$E_{konveyör}$	Konveyörün tükettiği enerji (j)
$E_{soğutma}$	Soğutma ünitesinin tükettiği enerji (j)
$E_{soğutma\ sıvısı}$	Soğutma sıvısı için tüketilen enerji (j)
$E_{yardımcı}$	Yardımcı birimlerin tükettiği enerji (j)
R_a	Ortalama yüzey pürüzlülüğü
R_q	Karekök ortalama pürüzlülüğü
R_z	On nokta yüksekliği
P	Toplam harcanan güç
P_0	Makinenin harcadığı temel güç
k	Talaş kaldırma sabiti
\tilde{v}	Talaş kaldırma debisi
S	Arama uzayı
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
w_f	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 değişkeninin alt limiti
$ÜstLimit_i$	i 'ninci karar değişkeninin üst limiti
$f_{ÖKE}$	Özgül kesme enerjisi için amaç fonksiyonu
f_{TKD}	Talaş kaldırma debisi için amaç fonksiyonu
f_{Ra}	Ortalama yüzey pürüzlülüğü için amaç fonksiyonu

1. GİRİŞ

Günümüzde, endüstriyel gelişimin beraberinde karmaşıklaşan iş parçaları teknolojik zorluklar meydana getirmektedir. Yüksek hassasiyete sahip ve verimli bir talaşlı imalat işlemi başta havacılık, enerji, otomotiv ve medikal sanayiler olmak üzere bir çok alanda vazgeçilmez konumdadır.

Talaşlı imalat, parça geometrisi ve geometrik özellikler çeşitliliği üretme kabiliyeti ile tüm üretim süreçleri arasında en çok yönlü ve en hassas işlemdir. Talaşlı imalatın temelleri, tarih öncesi zamanlara kadar uzanmaktadır. Eski çağlarda yaşanan insanların, avlanma ve barınma gibi ihtiyaçları için gerekli teçhizatları üretmek için bir çeşit malzeme kaldırma işlemi uyguladıkları bilinmektedir. Modern takım tezgahlarının geliştirilmesi ise Sanayi Devrimi'yle yakından ilişkilidir. James Watt'ın 1775 yılı civarında İngiltere'de bir buhar motorunda meydana gelen problemi giderecek bir boru açma makinesi tasarlamıştır. Bu makine tarihteki ilk takım tezgahı olarak anılmaktadır [1]. Arından 1800'lü yılların başında ilk torna takım tezgahı ve 1800'lü yılların ortalarında da ilk freze takım tezgahı geliştirilmiştir. Torna ve freze takım tezgahları ile bir çok iş parçasının talaşlı imalatı gerçekleştirilebilmektedir. Ancak, karmaşık geometri ve serbest form yüzeye sahip iş parçalarının üretimi için tornalama ve frezeleme işlemlerinin bir arada ve gelişmiş takım tezgahlarının kullanımı talaşlı imalat işlemini çok daha verimli hale getirmektedir.

Torna-frezeleme işlemi gelişmiş bir imalat yöntemidir. Torna-freze işleminin karmaşık kavisli yüzeyler ve özel şekilli parçaların üretimi konusunda güçlü bir kabiliyeti vardır. Torna-freze işleminde, hem kesici takım hem de iş parçasına aynı anda bir dönme hareketi yapmaktadır. Özellikle havacılık endüstrisindeki imalatlarda, geleneksel frezeleme teknolojileri kullanmak yerine, kesilmesi zor ince duvarlı iş parçalarının üretilmesi için kapsamlı çalışmalar yapılmıştır [2].

Torna-frezeleme, karmaşık yüzeyleri işleyebilme kabiliyeti sayesinde yaygın olarak kullanılan bir işlem haline gelmiştir. Karmaşık geometri iş parçalarının torna-freze

takım tezgahlarında gerçekleştirilen uygulamalarının çoğunda takım tezgahlarının ve iş parçalarının maliyetinden dolayı yüksek verimlilik önem kazanmaktadır [3,4]. Bu sebeple Torna-freze işlemlerinde enerji verimliliği, üretkenlik ve kalitenin artırılması da araştırılmakta olan önemli konuların başında gelmektedir. Torna-frezeleme işleminin özel olarak uygulandığı iş parçalarından bazıları: türbin kanatları, karmaşık ince duvarlı parçalar, döner çarklar, özel-biçimli şaftlar ve bazı motor parçaları olarak sıralanabilir.

Türbin bıçakları özellikle havacılık ve enerji endüstrileri için oldukça önemlidir. Türbin bıçaklarının imalat süreçleri karmaşık olmakla birlikte ve bir çok farklı detay barındırmaktadır. Araştırmacılar, türbin bıçaklarının talaşlı imalatı üzerine çalışmışlar ve kesme kuvveti, titreşim, sapma, yüzey kalitesi ve form hataları gibi konularda yoğunlaşmışlardır. Ancak, bu çalışmalar genellikle teorik model ya da simulasyon bazlı olarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar da bir istatistiksel alt yapıya dayandırılmadan gerçekleştirilmiştir. Oysaki, oldukça hassas çalışma şartlarına sahip türbin bıçaklarının üretim aşamaları bir bütün olarak incelenmeli ve uygun tahmin ve optimizasyon teknikleri ile iyileştirilmelidir. Böyle bir metodoloji ile, türbin bıçağının talaşlı imalatı daha verimli, üretken ve yüksek kaliteli bir kademeye getirilebilmektedir.

Bu çalışmada türbin bıçağının torna-freze takım tezgahlarında üretim sürecini daha verimli kılabilmek adına bir metodoloji geliştirilmiştir. Bu metodolojide türbin bıçağının üretim süreci; CAD/CAM, Deneysel Tasarım, deneysel çıktıların elde edilebilmesi için talaşlı imalat ile türbin kanadı üretimi, Yanıt Yüzey Metodolojisi ile işlem çıktılarının analizi, ve Çok-Amaçlı Parçacık Sürü Optimizasyonu ile çok-amaçlı optimizasyon gibi aşamalara ayrılarak incelenmiştir. CAD/CAM süreci, Siemens NX 9.0 CAD/CAM paketi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel Tasarım olarak Merkezi Kompozit Tasarım tercih edilmiştir. Üretim aşamasında, havacılık, enerji ve medikal sanayinde kullanılan özel bir titanyum alaşımı olan Ti6Al4V malzemesi kullanılmıştır. Türbin bıçağı üretimi TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi İleri İmalat Laboratuvarında bulunan Mazak i200-ST torna-freze takım tezgahı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmaların ardından özgül kesme enerjisi, talaş kaldırma debisi ve ortalama yüzey pürüzlülüğü olarak belirlenen işlem çıktıları ölçülmüştür. Ölçülen işlem çıktıları Yanıt Yüzey Metodolojisi ile

analiz edilmek üzere MINITAB™ adlı istatistiksel analiz programına aktarılmıştır. Bu aşamada varyans analizi, yüzey grafikleri ve regresyon modelleri elde edilerek işlem girdilerinin belirli işlem çıktıları üzerindeki etkileri analiz edilmesi için tasarlanmıştır. Son olarak da belirlenen işlem çıktılarının optimizasyonu için Çok-Amaçlı Parçacık Sürü Optimizasyonu algoritması MATLAB™ üzerinde çalıştırılmış ve Pareto optimal çözüm setleri elde edilmiştir. Bu metodoloji iki uygulama için tekrarlanmıştır. Birinci uygulama Ti6Al4V türbin kanadının kaba talaş ve ince talaş işlemlerinin incelenmesi üzerineyken, ikinci uygulama ise Ti6Al4V türbin kanadının ince talaş işleminde kesici takım eğim açılarının etkisinin araştırılması üzerine kurulmuştur. Ardından kesici takım eğim açılarının ne ölçüde bir iyileşme sağladığının görülmesi adına iki uygulamadan elde edilen Pareto optimal çözüm setleri karşılaştırılmıştır.



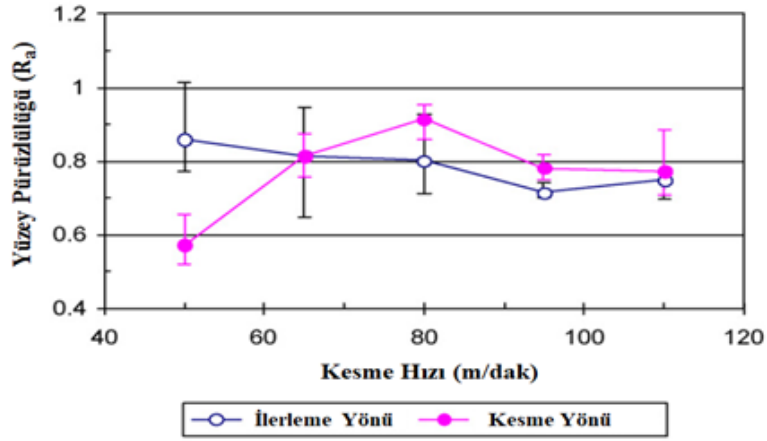
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1 Titanyum Alaşımlarının İşlenebilirliği ile İlgili Çalışmalar

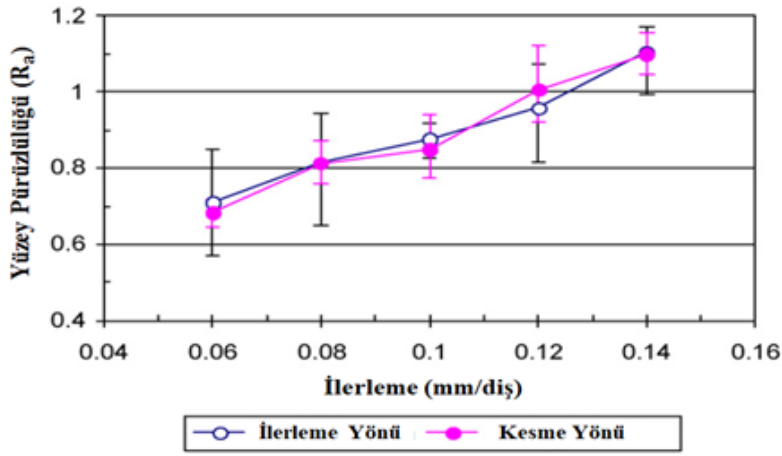
Titanyum alaşımları, üstün mekanik ve termal özellikleri sayesinde havacılık, enerji, medical ve kimya endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Düşük karbon çelikleri ve alüminyumlara göre daha yüksek korozyon direncine sahip olduklarından havacılık uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Ti6Al4V alaşımı endüstride en yaygın olarak kullanılan titanyum alaşımıdır [5].

Ti6Al4V alaşımı, mikroyapılarında α ve β fazlarını içerdiğinden α - β alaşım sınıfında yer almaktadır. α - β sınıfında yer alan titanyum alaşımları yakın- α sınıfındaki alaşımlara göre daha iyi mukavemet değerlerine sahiptirler [6]. Ti6Al4V, mükemmel mekanik özellik birleşiminden dolayı işlenmesi zor bir malzeme bilinmektedir. Bu özellikler, yüksek sıcaklıkta yüksek özgül mukavemet (mukavemet-ağırlık oranı), kırılma direnci karakteristiği, düşük elastik modül, düşük ısıl iletkenlik ve yüksek korozyon direnci olarak belirtilmektedir [7,8].

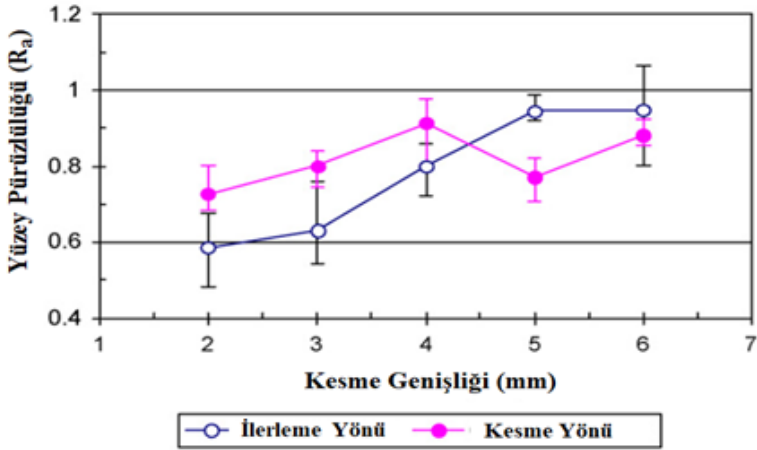
Arrazola vd. Titanium alaşımlarının işlenebilirliklerini, özgül kesme kuvveti, özgül ilerleme kuvveti ve takım aşınması işlem çıktıları üzerinden karşılaştırmışlardır [5]. Sue vd. çeşitli yağlama koşullarında, Ti6Al4V alaşımının yüksek hızlı parmak frezeleme işleminde takım aşınmasını incelemiştirler [8]. Sun ve Guo Ti6Al4V alaşımının parmak frezeleme işleminde yüzey bütünlüğü üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmada yüzey bütünlüğünü incelerken, yüzey pürüzlülüğü, kalıntı gerilmesi, yüzey altı mikroyapısı ve mikro sertlik araştırılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü üzerinde işlem parametrelerinin etkileri incelendiğinde Şekil 2.1'de yer alan grafikler elde edilmiştir. Grafikler neticesinde, yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili işlem parametrelerinin sırasıyla ilerleme, kesme genişliği ve kesme hızı olduğu belirtilmiştir [9].



(a) Kesme hızı etkisi ($f:0,08$ mm/diş, $a_e: 4$ mm, $a_p: 1,5$ mm)



(b) İlerleme etkisi ($V:65$ m/dak, $a_e: 4$ mm, $a_p: 1,5$ mm)



(c) Kesme genişliği etkisi ($V:80$ m/dak, $f: 0,08$ mm/diş, $a_p: 1,5$ mm)

Şekil 2.1 : (a) Kesme hızı (b) ilerleme (c) kesme genişliğinin yüzey pürüzlürlüğü üzerine etkileri [9].

Rao vd. Ti6Al4V alaşımının yüzey frezeleme işleminde yüzey bütünlüğü ve takım performanslarını incelemişlerdir. Limitli bir takım aşınması için, uygun kalıntı

gerilmesi ve iyi yüzey pürüzlülüğünü kapsayan yüzey bütünlüğü elde edilmiştir [10]. Rahman vd. kesici takım malzemesi, yüksek hızlı imalat ve yüksek basınçlı soğutucu sıvı kullanımı açısından titanyum alaşımlarının işlenebilirliğini araştırmışlardır [11]. Abele ve Fröhlich ise yaptıkları çalışmada, uygun işlem girdi parametresi kombinasyonu, uygun kesici takım ve etkili bir kesme stratejisi ile titanyum alaşımlarının verimli frezeleme işleminin gerçekleştirilebileceğini belirtmişlerdir [12].

2.2 Torna-Freze Tezgahları ile İlgili Yapılan Çalışmalar

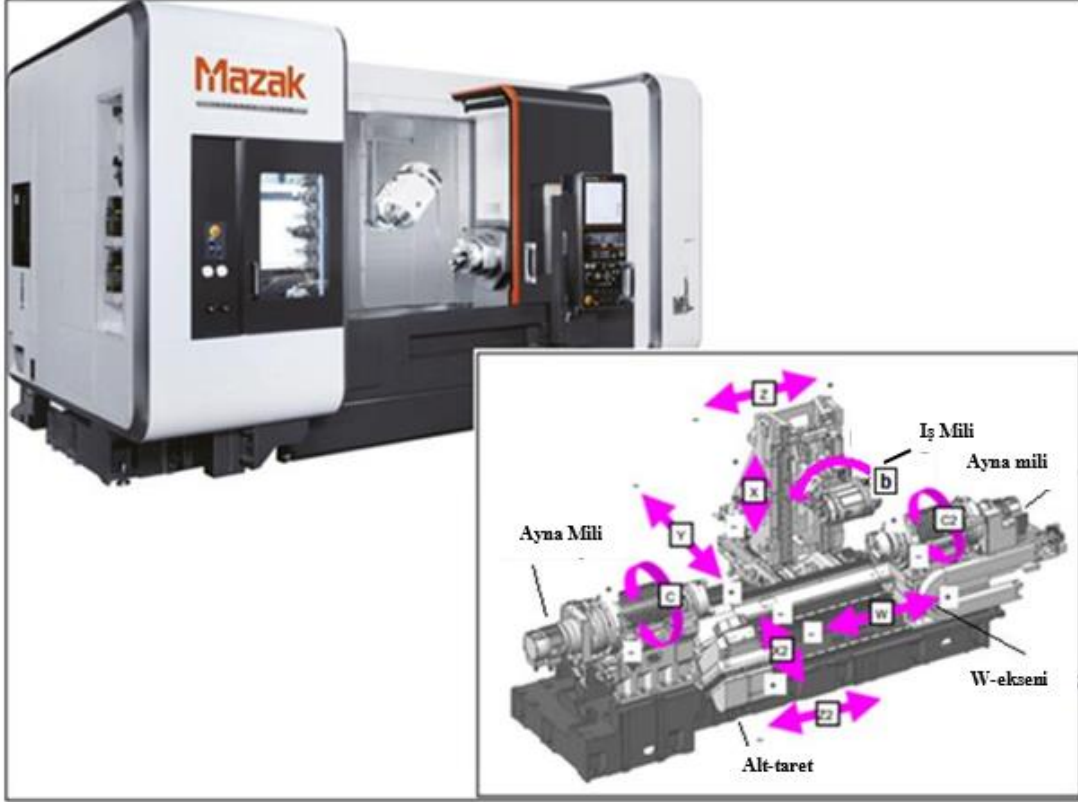
2.2.1 Torna-freze takım tezgahları

19. yüzyılın ortalarından itibaren metal malzemelerin talaşlı imalatı universal frezeleme ve taşlama tezgahları ile gerçekleştirilmeye başlanmış olup, bu tezgahların ve yüzyılın sonlarına doğru tornalama tezgahlarının da kullanımı günden güne artmıştır. İlerleyen teknolojinin sayesinde 20. yüzyılın ortalarında ilk kez nümerik kontrollü tezgahlar geliştirilmiş ve ardından CNC tezgahları imal edilmeye başlanmıştır. Günümüzde CNC takım tezgahları, yüksek hız, yüksek boyutsal hassasiyet ve üretim verimliliği isterleri olan endüstrilerin de gelişmesiyle beraber vazgeçilmez hale gelmiştir. Torna ve freze takım tezgahları en yaygın olarak kullanılan takım tezgahlarıdır.

Şekil 2.2’de TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi İleri İmalat Laboratuvarında bulunan Mazak i-200ST torna-freze takım tezgahı görülmektedir. Bu tezgah, bu çalışmanın imalat işlemleri için kullanılan torna-freze takım tezgahıdır. Şekil 2.2’de görüldüğü üzere toplamda 13 eksenli bir takım tezgahı olup 5 eksenli simultane olarak kullanılabilir.

Tornalama ve frezeleme işlemlerinin eş zamanlı olarak gerçekleştirildiği işlem torna-freze işlemi işlemidir. Bir ileri imalat teknolojisi olan torna-freze işlemi verimliliği artırmak adına kullanışlı bir işlemidir [13]. Torna-freze işleminin en büyük avantajı ise türbin bıçağı ve döner çarklar gibi karmaşık iş parçalarının üretiminde tornalama ve frezeleme işlemlerinin eş zamanlı olarak gerçekleştirilmesidir. Dahası, torna-freze takım tezgahlarında talaşlı imalat sırasında iş parçası ayna üzerine bir kez

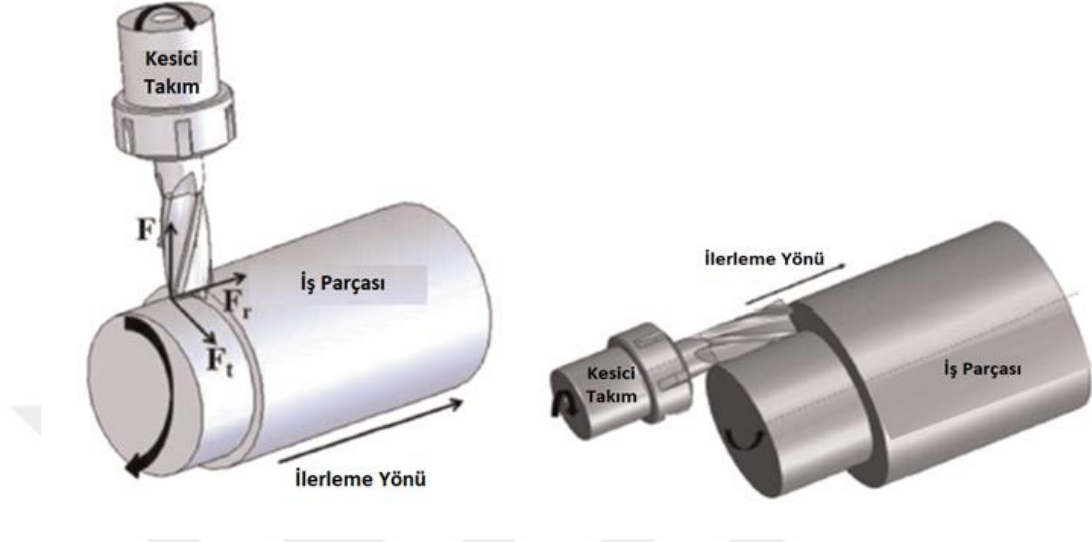
bağlandıktan sonra bir daha değiştirilmesine gerek duyulmadan işlem gerçekleştirilebilmektedir [14]. Bu teknoloji ile havacılık, enerji, otomotiv, medikal ve benzeri sanayiilerin isterleri olan karmaşık iş parçaları üretilebilir kılınmış, yüzey kaliteleri geliştirilmiş ve iş parçalarının üretim maliyetlerini oldukça azaltılmıştır [15].



Şekil 2.2 : Mazak i-200ST torna-freze takım tezgahı.

Torna-freze işlemini diğer talaş kaldırma işlemlerinden ayıran önemli farklardan biri ise kesme hızının hem kesici takımın hem de iş parçasının rotasyonel hızları ile hesaplanmasıdır [16]. Torna-freze işlemi ile ilgili ilk çalışma 1990 yılında Schulz ve Spur tarafından gerçekleştirilmiştir [17]. Bu çalışmada Schulz ve Spur torna-freze işlemlerini dik torna-freze işlemi ve eş-eksenli torna-freze işlemi olarak iki gruba ayırmışlardır [17]. Eş eksenli torna-freze işleminin, rotasyonel simetrik iş parçalarının iç kısım ve dış kısım işlenmesi için kullanılabileceği, dik torna-freze torna-frezelerin ise sadece dış kısım parça işleme için kullanılabileceği belirtilmiştir [16]. Dik torna-freze işlemi ile eş-eksenli torna-freze işlemlerinin temel farkı kesici takım ile iş parçasının konumlamalarıdır. Dik torna-freze işleminde iş parçası ile

kesici takım dik konumdayken, eş-eksenli torna-freze işleminde paralel konumdadırlar [18]. Şekil 2.3'te dik torna-freze işlemi ve eş-eksenli torna-freze işlemi gösterilmiştir.



Şekil 2.3 : (a) Dik torna-freze işlemi (b) eş-eksenli torna-freze işlemi [19].

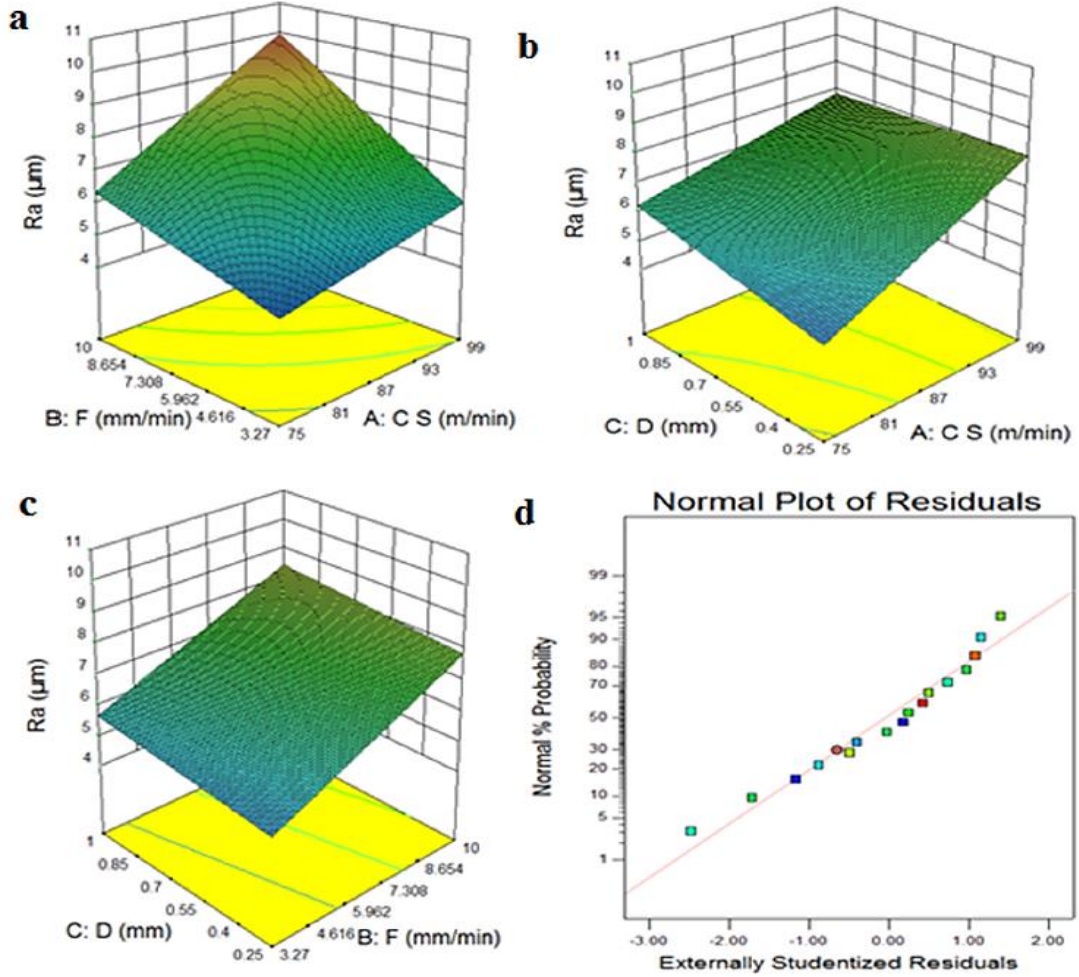
2.2.2 Torna-freze takım tezgahlarında işlem parametrelerinin incelenmesi ile ilgili çalışmalar

Torna-freze işlemi yıllardan bu yana özel bir araştırma konusu olmuş ve bir çok araştırmacı tarafından çalışılmıştır. Araştırmaların temeli Schulz ve Spur (1990) tarafından ortaya konulan çalışmaya dayanmaktadır [17]. Genellikle yüzey pürüzlülüğü, talaş yapısı ve takım aşınması üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır. Kopac ve Poganik (1997) torna-freze işlemi üzerinde hem teorik hem deneysel çalışmışlardır. Bu çalışmada yüzey pürüzlülüğü işlem parametreleri etkisinde incelenmiştir. Yüksek kesme derinliğindeki işlemlerde titreşim kaynaklı yüzey pürüzlülüğü artışı belirtilmiştir [20]. Choudhury ve Mangrulkar (2000) tarafından yapılan çalışmada, normal hız ve ilerleme aralığında rotasyonel olarak simetrik iş parçalarının torna-freze takım tezgahlarında işlenmesi incelenmiş ve torna işlemine göre avantajları belirtilmiştir. İşlem çıktılarından yüzey pürüzlülüğü ve talaş uzunluğu dikkate alınmıştır. Sonuçlar doğrultusunda, yaklaşık 10 kat daha iyi püzye kalitesi ve çok daha küçük talaş yapısı ile torna-freze işleminin torna işlemine alternatif olabileceği belirtilmiştir [21]. Benzer şekilde Choudhury ve Bajpaj 2005

yılında yaptıkları çalışmada dik torna-freze işleminde kesici takım dönüşünün, çapının ve kesme derinliğinin yüzey pürüzlülüğüne etkisini incelemişlerdir. En düşük yüzey pürüzlülüğü değeri için optimal kesme hızını araştırmışlardır. Deneyler sonucunda torna-freze işlemi ile elde edilebilen yüzey pürüzlülüğünün frezeleme işlemine göre daha iyi olduğu belirtilmiştir [22]. Savaş ve Özay 2007 yılında yaptıkları çalışmada tanjant torna-freze işleminde yüzey pürüzlülüğü ile işlem parametreleri arasındaki etkileşimi belirlemişlerdir. Tanjant torna-freze işlemi ile tornalama işlemine göre daha düşük yüzey pürüzlülüğü ve daha küçük talaş uzunluğu elde edilebileceğini belirtmişlerdir [23]. 2008 yılında yaptıkları çalışmada ise, Savaş ve Özay, Genetik Algoritma ile minimum yüzey pürüzlülüğü için tanjant torna-freze işleminin işlem parametrelerini optimize etmişlerdir [24]. Jiang vd. (2012) tanjant torna-freze işleminde iş parçasının yüzey kalitesini, pürüz yüksekliği ve kurulan model ile MATLAB ortamında simüle ederek incelemişlerdir. Çalışma sonucunda diş başı ilerlemenin artışı ile pürüz yüksekliğinin ve mesafesinin arttığı görülmüştür [25]. Zhu vd. 2013 yılında yaptıkları çalışmada hem simülasyon hem de deneysel çalışma ile dik torna-freze işleminde kesme parametrelerinin yüzey topoğrafyası üzerine etkilerini incelemişlerdir. Torna işleminde daha iyi sonuçlar elde edildiği belirtilmiştir [26].

Yüzey pürüzlülüğünün yanı sıra kesme kuvvetleri hakkında da literatürde oldukça çalışma mevcuttur. Karagüzel vd. 2012 yılında yaptıkları çalışmada dik ve tanjant torna-freze işlemi için kesme kuvvetinin tahmini ve optimizasyonu için bir işlem modeli kurulmuştur [16]. Uysal vd. 2014 yılında dik torna-freze işleminin eksantiriklik etkileri üzerine bir tahmin modeli geliştirmişlerdir. Bu model talaş geometrisi ve kesme kuvvetleri hesaplamalarını içermektedir. Ayrıca bu çalışmada eksantirikliğin takım aşınması üzerine etkileri de incelenmiştir [27]. Qiu vd. (2015) tarafından yapılan çalışmada dik torna-freze işleminde kesme kuvvetleri yuvarlak uçlu kesicili kesici takımlar ile simüle edilmiştir [28]. Karagüzel vd. 2015 yılında yaptıkları çalışmada ise torna- freze ve taretli torna işlemlerinde işlenmesi zor malzeler ile çalışmışlardır. İşlem çıktısı olarak ise takım ömrü araştırılmıştır [29]. Babu vd. 2016 yılında yaptıkları çalışmada Yanıt yüzey Metodolojisi ile torna-freze işleminde kesici takım titreşimi ve yüzey pürüzlülüğünün çok amaçlı optimizasyonunu yapmışlardır. Ayrıca, kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliği işlem

parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve kesici takım titreşimi üzerine etkileri de belirlenmiştir. Parametre etkileşimleri için elde edilen yüzey grafikleri Şekil 2.4'te gösterilmiştir [30].

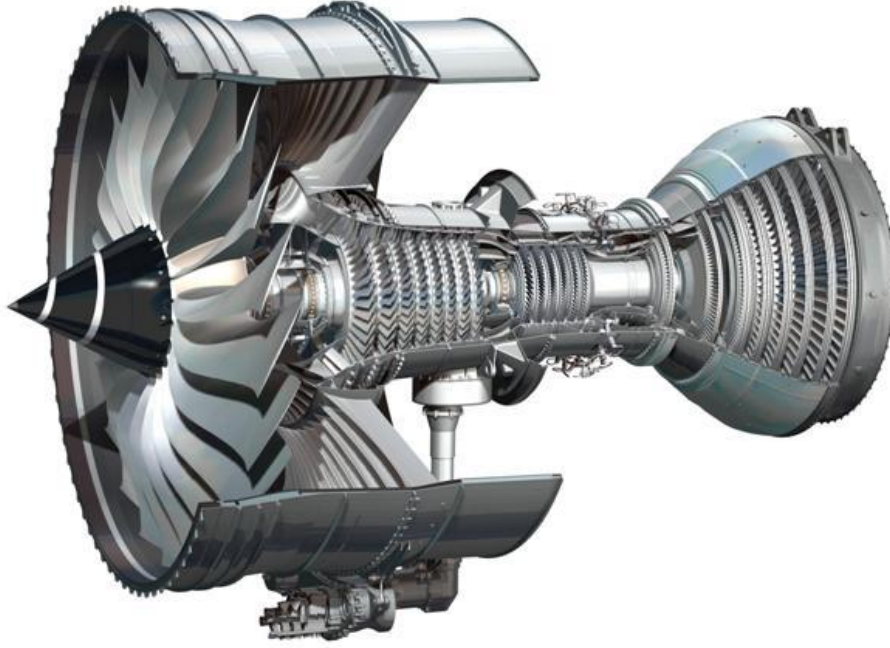


Şekil 2.4 : (a) İlerleme ve kesme hızının R_a üzerindeki etkisi, (b) kesme derinliği ve kesme hızının R_a üzerindeki etkisi, (c) kesme derinliği ve ilerlemenin R_a üzerindeki etkisi, (d) R_a için artıkların normal olasılıkları [30].

2.3 Türbin Bıçağı ile İlgili Çalışmalar

Türbin bıçağı endüstride önemli bir konuma sahiptir. Endüstrideki önemi, yüksek fiyatı ve geometrik karmaşıklığı piyasada rekabet oluştururken, araştırmacılar için de işlem optimizasyonu, geometrik modelleme ve tersine mühendislik gibi alanlarda popüler bir konu olmasını sağlamıştır [31].

Türbin bıçakları havacılık ve enerji endüstrisinde kullanılan bir geometridir. Enerji sektöründe gaz türbinlerinde; havacılık sektöründe ise jet motorlarının kompresör bıçakları olarak yer almaktadır. Şekil 2.5'te bir jet motorunun açık görünümü yer almaktadır. Bu tezde üzerine çalışılmış olan Ti6Al4V türbin bıçakları genellikle orta kısımda bulunan alçak basınçlı kompresörde kullanılmaktadır.



Şekil 2.5 : Jet motorunun görünümü [32].

Box-behken Ghaffari vd. 2014 yılında yaptıkları çalışmada türbin bıçaklarının işlenmesine özel bir 4 özgürlük dereceli bir mekanizma geliştirmiş ve kinematik hesaplamalarını da dahil etmişlerdir [33]. Boz vd. 2015 yılında yaptıkları çalışma da 3-eksenli ve 5-eksenli yassı frezeleme ve bilyalı frezeleme işlemleri için kesici-işparçası çarpışma haritası içeren iki farklı model geliştirmişlerdir. Bu modeller yassı frezeleme ve bilyalı frezeleme işlemlerinin katı model işlem hazırlığı aşamasında kullanılmak üzere tasarlanmış olup, türbin çarkı ve türbin bıçağı gibi iş parçaları ile test edilmiş ve kesme kuvvetleri incelenmiştir [34]. Bolsunovsky vd. 2013 yılında yaptıkları çalışmada 5-eksen bilyalı frezeleme işleminde kesme kuvvetinin hesaplanması için bir model geliştirmişlerdir. Modelin doğrulanması için ise bir türbin bıçağı geometrisi kullanılmıştır [35]. Shan vd. 2016 yılında gerçekleştirdikleri çalışmada ince duvarlı serbest yüzeyli iş parçalarında kesici takım eğim açısının elastik deformasyon üzerine etkilerini incelemişlerdir. Bu amaç doğrultusunda kesici

takım eğim açılarının kesme kuvveti üzerine etkileri teorik modeller ve deneyler ile incelenmiştir. Ardından kesici takım eğim açılarının elastik deformasyon üzerine etkileri Sonlu Elemanlar Metodu ile araştırılmıştır. Çalışmanın doğrulaması için bir türbin kanadı geometrisi kullanılmıştır. Çalışma sonucunda 15° ve 45°'lik kesici takım eğim açısı ile minimum kesme kuvveti ve deformasyon altında işlem gerçekleştirilebildiği belirtilmiştir [36].

2.4 Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ile Talaşlı İmalat İşlemlerinin Optimizasyonları

2.4.1 Parçacık Sürü Optimizasyonu'nun evrimi

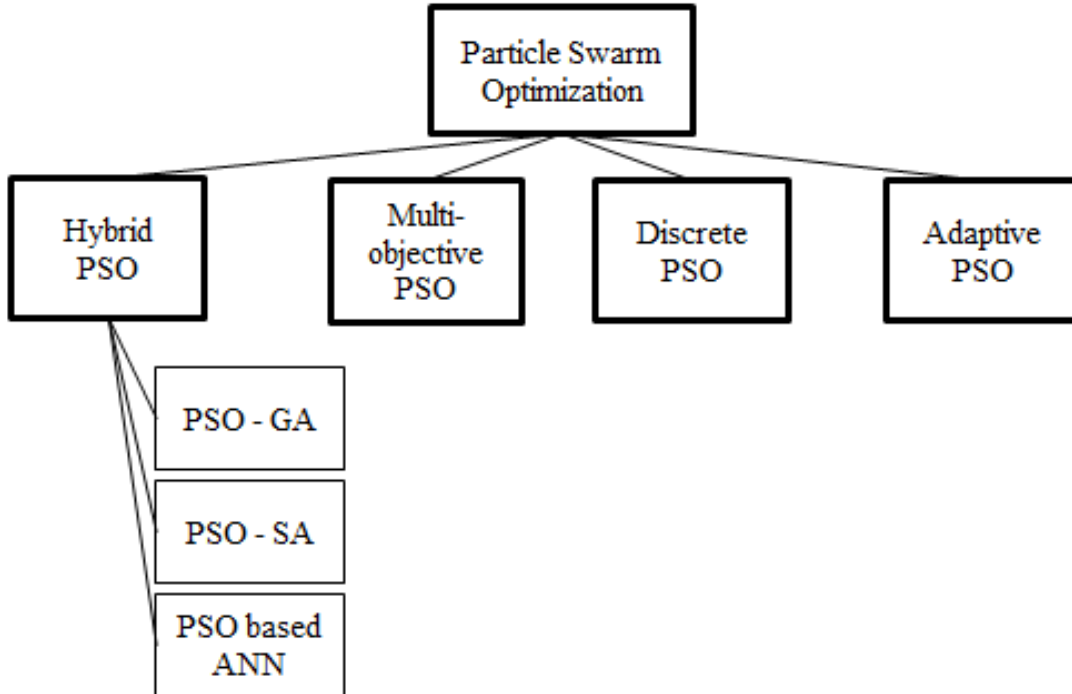
Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), doğrusal olmayan sürekli fonksiyonları içeren problemler için en iyi çözümü elde etmekte kullanılan sezgisel optimizasyon tekniğidir. Bu yöntem, Dr Eberhart ve Dr. Kennedy [37] tarafından, 1995 yılında kuşlar, balıklar ve hayvanların, birlikte yaşama, bilgi paylaşımı, yiyecek bulma ve avlanmayı önleme içgüdülerinden esinlenerek, geliştirilmiştir. Tıpkı hayvan sürülerinin davranışları gibi, PSO algoritması özellikle parçacık ve sürünün öğrenilmiş deneyimlerine dayanarak çalışır.

Bir sürü, sürü nüfusu nedeniyle komşuluklar içerir ve her komşuluk içinde parçacıklar bulunur. Her parçacık, hiper boyutlu bir arama uzayında daha iyi bir amaç fonksiyonu değeri bulmak için her yinelemede hareket eder [38]. Bu hareket, üç bileşene göre gerçekleşir: kendi tecrübesi, komşulukların tecrübeleri ve sürünün tecrübesi. Her parçacık, bir konum, hız ve optimize edilen amaç fonksiyonuna göre hesaplanan uygunluk değerine sahiptir. Parçacıkların yönelimleri, belirtilen tecrübelerin kombinasyonlarına bağlı olarak belirlenmektedir. Yinelemeden yinelemeye parçacıklar arama uzayı içerisinde belirli bir noktaya doğru yoğunlaşırlar. Bu noktada yeteri kadar parçacık toplandığında en iyi çözüm elde edilir.

2.4.2 Parçacık Sürü Optimizasyonu varyasyonları

PSO, literatürde çeşitli problem türlerinin çözümü için kullanılmıştır. Zaman içerisinde PSO'nun çeşitli varyasyonları geliştirilmiştir. Şekil 2.6'da, PSO kullanım türleri şematik olarak gösterilmektedir.

Özellikle karmaşık problemlerin çözüm kalitesinin artırılması için PSO ile birlikte bazı yapay optimizasyon ve tahmin yöntemleri kullanılmıştır. Bunlar Hibrid-PSO olarak adlandırılmaktadır. PSO ile birleştirilen başlıca yöntemler, optimizasyon problemlerinde performansı artıran genetik algoritma ve benzetimli tavlama yöntemleridir. Ayrıca PSO için daha fazla girdi verisi üretmek için Yapay Sinir Ağları (YSA) da kullanılır. Bazı optimizasyon problemleri, aynı anda birden fazla amacın optimize edilmesini gerektirir. Araştırmacılar amaç fonksiyonlarını, sabit ya da dinamik ağırlıklarla tek bir amaç fonksiyonunda birleştirmektedirler. Ayrık PSO, farklı aralıklı problemlerde farklı şekillerde kullanılır. PSO'nun adaptif hiyerarşik kullanımı (AH-PSO), herhangi bir test fonksiyonu için belirli bir hedefe ulaşmak için de kullanılmıştır [39].



Şekil 2.6 : Parçacık Sürü Optimizasyonu'nun varyasyonları.

2.4.3 Talaşlı imalat işlemlerinde Parçacık Sürü Optimizasyonu'nun uygulanışı

Birçok talaşlı imalat problemi, ürün kalitesini artırmak, çevresel etkileri minimuma indirmek ve enerji tüketimini azaltmak için en iyi sonuçlara ihtiyaç duymaktadır. Herhangi bir talaşlı imalat sürecinin matematiksel modelini geliştirmek için problem kısıtlarını tanımlama karmaşıklığı nedeniyle, sezgisel optimizasyon yöntemleri daha hızlı ve kullanışlı bir çözüm bulmayı sağlar. Literatürde çoğunlukla kullanılan sezgisel algoritmalar olarak Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), Genetik Algoritma (GA) ve Tavlama Benzetimi (TB) örnek gösterilebilir. Talaşlı imalatın analiz edilmek üzere görselleştirilmesini tahmin modellerinin oluşturulabilmesi için ise Yapay Sinir Ağları (YSA) ve Yanıt Yüzey Metodolojisi (YYM) gibi yöntemler de sıklıkla kullanılmaktadır. Ayrıca, Yanıt Yüzey Metodolojisi (YYM) kullanımında talaşlı imalat işleminin girdi parametrelerinin belirlenen işlem çıktıları üzerine etkileri Varyans Analizi yardımı ile belirlenebilmektedir.

PSO, talaşlı imalat proseslerini optimize etmek için yapay metodolojiler arasında uygun bir seçimdir. PSO, nüfusa dayalı bir algoritmaya sahip olduğundan, iyi bilinen bir optimizasyon metodu olan Genetik Algoritma'ya benzemektedir. Bununla birlikte, PSO, çaprazlama ve mutasyon gibi evrimsel operatörleri içermediğinden algoritmayı kullanması görece kolaydır. PSO, talaşlı imalat işlemleri için kullanışlı olduğu için, 1995 yılından bu yana tornalama, frezeleme, delme, telli elektrik aşındırma ve lazer işleme gibi çeşitli talaşlı imalat operasyonlarını optimize etmek için kullanılmıştır.

Literatürde, geleneksel olmayan birkaç teknik PSO ile karşılaştırılmış yahut birlikte kullanılmıştır. Çizelge 2.1'de son yıllarda literatürde yer alan çalışmalar sıralanmıştır. Gupta vd. 2016 yılında titanyum alaşımının Nano-Sıvı Temelli Minimum Miktar Yağlama (NSTMMY) fikrini kullanarak tornalama işleminin optimizasyonu üzerinde çalışmışlardır. İşlemi optimize etmek için Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) ve Bakteriyel Besin Arama Optimizasyonu (BBAO) kullanılmıştır. Parametrelerin etkinliğini belirlemek için varyans analizinin kullanıldığı deneylerden sonra, PSO ve BBAO, NSTAM tabanlı bir tornalama işlem optimizasyonu yararlı bulunmuştur [40]. Li vd. 2016 yılında yaptıkları çalışmalarında, S45C karbon çeliğinin çok geçişli yüzey frezeleme işleminde çok

amaçlı PSO (ÇAPSO) yöntemini kullanmışlardır. ÇAPSO ile işlemin enerji tüketimi en üst düzeye getirilip üretim maliyeti en aza indirilmiş ve ardından, enerji verimliliği ve üretim maliyeti ödünleşmesine göre alternatif çözümler seçilmiştir [41].

Gayatri ve Baskar'ın 2015 yılında yaptıkları çalışmalarında çok geçişli tornalama işlemi için iyi bilinen sezgisel yöntemleri karşılaştırmışlardır. Genetik Algoritma (GA), Tavlama Benzetimi (TB) ve PSO modellerinin sonuçlarına göre, minimum birim maliyetten dolayı PSO en uygun görülmüştür. GA ve TB sırasıyla orta ve yüksek değerlere sahip olarak elde edilmiştir [42]. Optimal yüzey pürüzlülüğü amacı için, takım ömrü ve kesme kuvveti değerlerini göz önünde bulundurularak gerekli optimum işlem parametrelerini elde etmek için, Marko vd. 2014 yılında yaptıkları torna işlemi üzerinde PSO'yu kullanmışlardır [43]. Raja ve Baskar 2011 yılında pirinç, alüminyum, bakır ve yumuşak çelik gibi çeşitli malzemeleri kullanarak çok geçişli torna işlemleri için PSO'yu kullanarak bir optimizasyon çalışması yürütmüşlerdir. Sonuçlara göre PSO, torna işlemi için uygun bir yöntem olarak önerilmiştir [44].

Costa vd. 2011 yılında, PSO'nun arama algoritmasını geliştirmek için TB tabanlı bir yerel arama geliştirerek çok geçişli torna işlemi için kullanmışlardır. Birim üretim maliyeti, parça işleme maliyeti, makina temel gideri maliyeti, takım değiştirme maliyeti ve takım maliyeti toplamı ile hesaplanmıştır. Son olarak, üretilen Hibrid-PSO mevcut tanımlanmış test verileri ile karşılaştırılmış ve işleme ekonomileri için etkili bir sezgisel olarak gösterilmiştir [45].

Yang vd. 2011 yılında , parçacıklara belirsiz hız değerleri atayarak bir bulanık PSO (B-PSO) geliştirmişlerdir. Bu yöntem çok geçişli yüzey frezelemede minimum üretim maliyetini elde etmek için kullanılmıştır [46]. Aynı araştırmacılar, bulanık tabanlı ÇAPSO (B-ÇAPSO) kullanarak üretim zamanını ve maliyetini en aza indirmek ve kâr oranını en üst düzeye çıkarmak için bir araştırma yapmışlardır. Bu çalışmada, çok geçişli yüzey frezelemesi için uygun Pareto optimal çözüme erişilmiştir [47]. Rao ve Pawar 2010 yılında, çok geçişli frezeleme işleminde üretim süresini en aza indirmek için çalışmışlardır. Bu işlemin problemini çözmek için üç farklı geleneksel olmayan optimizasyon tekniği uygulanmış ve sonuçlar literatürdeki

mevcut çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Bu yöntemler Yapay Arı Kolonisi (YAK), TB ve PSO olarak tanımlanmaktadır [48].

Srinivas vd. 2009 yılında PSO kullanarak birim üretim maliyetini en aza indirmek için çok geçişli tornalama işlemi için bir araştırma yapmışlardır. ÇAPSO'nun, karmaşık geometriler için tornalama veya başka talaşlı imalat süreçlerinde çok amaçlı problemler için kullanılabileceği belirtilmiştir [49]. Li vd. 2008 yılında yaptıkları çalışmalarında, LY12 frezeleme işlemi için işlem parametrelerini optimize etmişlerdir. Optimizasyon işlemi PSO ile Kesme Parametreleri Optimizasyonu (KPO) kullanılarak yapılmıştır [50]. 2015 yılında Baskar vd. tarafından yürütülen çalışmada kâr oranını en yükseğe çıkarmak için frezeleme işlemi için Tabu Arama (TA), Karınca Kolonisi Algoritması (KKA), GA ve PSO kullanılmıştır. Birim maliyeti ve birim işlem süresini en aza indirmek için PSO en iyi performansa sahiptir. Öte yandan, karı maksimize etmek için KKA en iyi çözüme ulaşmıştır [51].

Bazı araştırmacılar, Yanıt Yüzey Metodu (YYM) veya Taguchi yöntemini, işlem parametrelerini optimizasyonun yanında işlem parametrelerinin etkililiklerinin belirlenmesi için kullanmışlardır. Deneysel Tasarım, optimizasyon tekniğinin yakınsama performansını artırmak için deney setleri hazırlanmasında kullanılmaktadır. Hanafi vd. 2016 yılında, Deneysel Tasarım (DT) için tam faktöriyel tasarımı kullanarak PEEK CF30 kompozitinin tornalama işlemi ile ilgili bir çalışma yürütmüşlerdir. Yanıt Yüzey Metodolojisi (YYM), işlem çıktıları üzerinden deneysel sonuçları analiz etmek için kullanılmıştır. Son olarak, optimum işlem parametreleri değerlerini elde etmek için PSO kullanılmıştır [52].

Gupta vd. tarafından 2016 yılında yürütülen çalışmada, Minimum Miktar Yağlama (MMY) ile YYM ve PSO kullanarak titanyum (derece 2) alaşımının optimize tornalama işlemine dair çalışmalar mevcuttur [53]. Li vd. tarafından 2016 yılında Özgül Kesme Enerjisi (ÖKE) optimizasyonu için ÇAPSO yöntemi kullanılmıştır. DT olarak Taguchi metodolojisini kullanılarak, parametreler ile yanıtlar arasındaki etkileşimleri sinyal/gürültü (S/G) oranları sayesinde ölçülmüştür. ÇAPSO için dört farklı amaç fonksiyonu kullanılmış ve minimum işlem süresi ve tüketilen enerji için ödünleşme ile sonuca varılmıştır [41].

Sreenivasa ve Venkaiah 2015 yılında, PSO kullanarak Telli Elektriksel Aşındırma İmalatı (TEAİ) üzerinde bir optimizasyon çalışması yürütmüşlerdir. YYM için yüzey merkezli kompozit tasarımı (YMKT) ile yapılan deneyler ile talaş kaldırma oranı (TKO) ve yüzey pürüzlülüğü araştırılmıştır. İşlem parametrelerinin yanıtlar üzerindeki etkinliği Varyans Analizi kullanılarak analiz edilmiştir. Sonuçların gözlemlendiğinde, PSO'nun optimizasyon için YYM'den daha etkili bir yöntem olduğunu anlaşılmıştır [54]. Thepsonthi ve Özel 2012 yılında, ÇAPSO kullanan mikro parmak frezeleme işlemi için çok amaçlı bir optimizasyon çalışması gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada çapak oluşumu azaltılırken, ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) en aza indirilmiştir [55].

Yapay Sinir Ağları (YSA), nöronların biyolojik etkileşimine dayalı karmaşık bir tahmin aracıdır [56]. YSA çeşitli problem türlerinde kullanılır. Talaşlı imalat süreçleri için gerekli çıktı parametrelerinin tahmini için YSA kullanılabilir. Ayrıca, bir talaşlı imalat probleminin optimizasyonunun girdi değerleri sayısını arttırmak için de YSA kullanılır. Garcia-Nieto vd. 2016 yılında yürüttükleri çalışmalarında frezeleme işleminde takım aşınması için bir regresyon modeli elde etmek için PSO tabanlı Destek Vektör Makineleri (DVM) kullanmışlardır [57].

Escamilla-Salazar vd. 2016 yılında yürüttükleri çalışmalarında, Ti6Al4V'nin frezeleme sürecini görselleştirmek için dört farklı yapay sinir ağı modeli geliştirdiler. Sırasıyla bu dört modelin her biri ile PSO'nun amaç fonksiyonları belirlenmiştir. Pareto çözümü için; zaman, sıcaklık, titreşim ve yüzey pürüzlülüğü olarak belirlenen işlem çıktıları minimize edilmiştir [58]. Xue vd. 2015 yılında yürüttükleri çalışmalarında, takım ömrü ve talaşlı imalat girdi parametreleri arasındaki ilişkinin analitik olarak modellenmesinin karmaşıklığı nedeniyle, takım ömrü tahmini için bir hibrid PSO tabanlı Geri Beslemeli Sinir Ağı (GBSA) geliştirmişlerdir. PSO tabanlı GBSA, basit GBSA'dan daha iyi olarak belirtilmiştir [59].

Çizelge 2.1: Talaşlı imalatta PSO kullanımının literatür taraması özeti.

Yazarlar	Yöntem	Malzeme	İşlem Türü	Girdi Parametreleri	Çıktı Parametreleri	Amaç
Li vd. (2016)	ÇAPSO	S45C karbon çeliği	Çok geçişli yüzey frezelemesi	Kesme hızı, ilerleme hızı, kesme derinliği, kesme genişliği	Enerji tüketimi, üretim maliyeti	Maksimum enerji verimliliğine ulaşma ve minimum üretim maliyeti ödünleşmesi
Yang vd. (2011)	B-ÇAPSO		Çok geçişli yüzey frezelemesi	Geçiş sayısı, işlem hızı, ilerleme hızı, kesme derinliği	Üretim maliyeti, üretim süresi, kâr oranı, kesme kuvveti, kesme gücü, pürüzlülük, takım ömrü, üretim hızı	Üretim süresini ve maliyetini en aza indirmek ve kar oranını en üst düzeye çıkarmak
Yang vd. (2011)	B-PSO	Çelik	Çok geçişli yüzey frezelemesi	İşlem hızı, ilerleme hızı, kesme derinliği	Kesme kuvveti, kesme gücü, yüzey pürüzlülüğü, takım ömrü	Minimum üretim maliyetine ulaşmak
Rao, Pawar (2010)	YAK, PSO, TB	Çelik (0.6%C)	Çok geçişli yüzey frezelemesi	Geçiş sayısı, kesme derinliği, kesme hızı, ilerleme	Üretim süresi	Üretim süresini en aza indirmek
Baskar vd. (2005)	GA, TA, PSO		Frezeleme	Kesme hız, ilerleme	Birim maliyet, birim zaman, kar oranı	Sezgisel ile maksimum kazanç oranına ulaşma

Çizelge 2.1 : (Devamı) Talaşlı imalatta PSO kullanımının literatür taraması özeti.

Yazarlar	Yöntem	Malzeme	İşlem Türü	Girdi Parametreleri	Çıktı Parametreleri	Amaç
Li vd. (2016)	Taguchi, YYM, ÇAPSO	AISI 1045 Çeliği	Frezeleme	İş mili hızı, diş başına ilerleme, kesme derinliği, kesme genişliği	Enerji verimliliği, işlem süresi	Maksimum enerji verimliliği ve minimum işlem süresi için optimum işlem parametrelerini belirleme
Thepsonthi, Özel (2012)	ÇAPSO, YYM	Ti6Al4V	Mikro-parmak frezeleme	İş mili hızı, diş başına ilerleme, kesim genişliği	Yüzey pürüzlülüğü, çapak oluşumu	Seçilen işlem çıktılarının optimize edilmesi
Garcia-Nieto, vd. (2016)	PSO tabanlı DVM	Dökme demir, çelik	Frezeleme	Kesme derinliği, ilerleme, malzeme türü	Freze ucu aşınması	Takım aşınmasını öngörmek için bir regresyon modeli oluşturma
Escamilla-Salazar, vd. (2012)	PSO ve GBSA	Ti6Al4V	Frezeleme	Kesici kenar sayısı, iş mili hızı, ilerleme, kesme derinliği	Pürüzlülük, sıcaklık, zaman, titreşim	Seçilen işlem çıktılarının optimize edilmesi

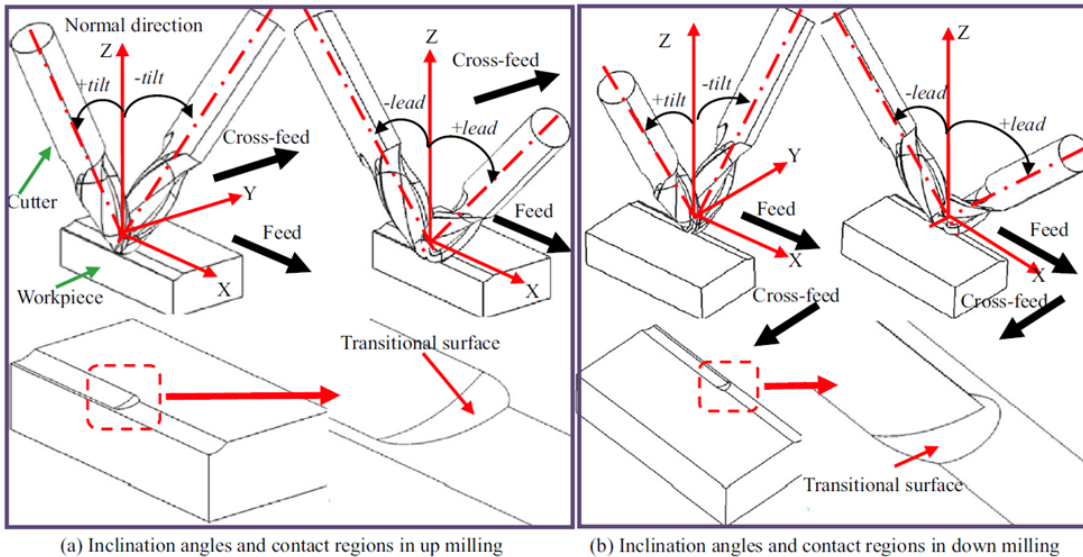
Çizelge 2.1 : (Devamı) Talaşlı imalatta PSO kullanımının literatür taraması özeti.

Yazarlar	Yöntem	Malzeme	İşlem Türü	Girdi Parametreleri	Çıktı Parametreleri	Amaç
Xue vd. (2015)	PSO- GBSA	45 Çeliği	Frezeleme	Kesme hızı, takım çapı, diş sayısı, kesme genişliği, kesme derinliği, ilerleme hızı	Takım ömrü	Takım ömrünü en üst düzeye çıkaran işlem parametrelerine ulaşılması
Escamilla- Salazar vd.(2013)	PSO tabanlı YSA	Ti6Al4V	Frezeleme	Kesme hızı, ilerleme hızı, kesme derinliği, soğutma sıvısı türü	Yüzey pürüzlülüğü, sıcaklık	Pürüzlülük ve sıcaklık arasında Pareto çözümleri ile en uygun çözümü elde etmek
Jesuthanam, Kumanan, Asokan (2007)	YSA-GA- PSO	Hafif çelik	Parmak frezelemesi	Hız, ilerleme, kesme derinliği	Yüzey pürüzlülüğü, titreşim	Optimum işlem parametrelerinin elde edilmesi

2.5 Küresel Parmak Freze ile Frezeleme İşlemlerinde Kesici Takımların Eğim Açılı ile İlgili Çalışmalar

Küresel parmak frezeler serbest yüzeyli iş parçalarının ince talaş işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Talaşlı imalat sonrasında elde edilecek yüzey topografyasını ise belirleyebilmek oldukça zordur. Bu konu hakkında çeşitli yöntemler kullanılmaktadır [60-63].

Küresel parmak frezelemede, kesme hızı, iş parçası üzerinde kesici takımın temas konumuna göre değişir. Kesici takım merkezinin kesme hızı sıfırdır. Bu nedenle, takım eksenini kesme düzlemine normal olduğunda, üretilen işlenmiş yüzey pürüzlü olabilir ve takım aşınması sifıra yakın kesim alanına kadar ciddi olabilir. Bu durumda, işlemede kesici takım eğim açılarının ayarlanması takım performansını ve yüzey pürüzlülüğünü artırabilir [64]. Kesici takımın yerleşimi, takım, işlenmiş yüzey ve besleme yönü arasındaki kesici takım eğim açılına göre farklılaştırılmıştır. Kesici takımın eğimi besleme yönüne doğru olduğunda, yukarı ve aşağı frezeleme, her iki durumda da itme ve çekme frezelemesi sağlanır. Yukarı ve aşağı frezeleme durumlarına oluşan kesme yüzeyleri Şekil 2.7'de gösterilmiştir. Takımın eğiminin ilerleme yönüne değil dikey doğrultuda olması durumunda eğik frezeleme meydana gelir (Şekil 2.7).



Şekil 2.7 : Yukarı ve aşağı frezeleme durumlarına oluşan kesme yüzeyleri ve kesici takım eğim açıları [65].

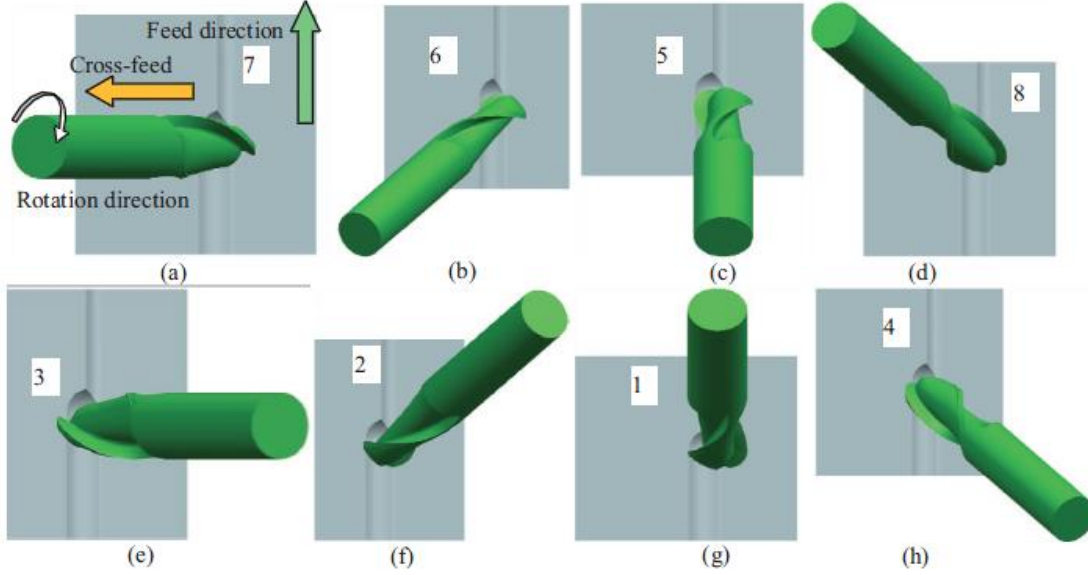
Çizelge 2.2’de küresel parmak frezeler ve eğim açıları ile ilgili çalışmalar sıralanmıştır. Ozturk vd. 2009 yılında yaptıkları çalışmada, 5-eksen talaşlı imalatta küresel parmak frezelelerin eğim ve yaklaşma açılarının etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada öncelikle kesici takımın yüzeye etkileşiminin final yüzeye etkisi incelenirken eğim/yaklaşma açıları ve kesme derinliği göz önünde bulundurulmuştur [3]. Zhang vd. (2012) serbest yüzeylerin ince talaş işlenmesinde takım yolunun pürüz yüksekliği ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etkilerini incelemişlerdir. Öncelikle takım yolu uzunlukları ve pürüz yükseklikleri teorik olarak hesaplanmış ve dört temel strateji belirlenilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Talaşlı imalat verimliliği, pürüz yüksekliği, yüzey pürüzlülüğü ve form hataları incelenmiş ve takım yolunun etkili olduğu belirtilmiştir [66].

Mhamdi vd. 2012 yılında yaptıkları çalışmada Ti6Al4V malzemesi ile serbest yüzey ince talaş işleminde kesici takımın yüzey ile yaptığı açığa göre yüzey pürüzlülüğü, mikro sertlik ve mikroyapı değişimini incelemişlerdir [67]. Vakondios vd. 2012 yılında yaptıkları çalışmada küresel kesici takımlar ile Al7075-T6 malzemesinde her bir strateji (dikey, itme, çekme, eğik, eğik itme ve eğik çekme) için yüzey pürüzlülüğü üzerine çalışmışlardır. Kesme derinliği, kesme genişliği, ilerleme, eğim ve yaklaşma açıları incelenen işlem parametreleridir. Varyans analizi kullanılarak girdi parametrelerinin etkileri belirlenmiştir [68].

Chen vd. 2013 yılında yaptıkları çalışmada 5-eksen küresel parmak frezeleme işleminde farklı eğim ve yaklaşma açısı kombinasyonlarının yüzey bütünlüğü üzerine etkisi incelemişlerdir. Şekil 2.8’de oluşturdukları 8 farklı kesme stratejisi temsili olarak gösterilmiştir. Deneyler sonucunda yüzey topoğrafyası ve pürüzlülüğü, Leeb sertliği ve mikro sertlik ve kalıntı gerilmeleri incelenmiştir [69].

Chen vd. 2013 yılında yaptıkları çalışmada 5-eksen küresel parmak frezeleme işleminde eğim ve yaklaşma açılarının pürüz yüksekliği, yüzey topoğrafyası ve yüzey hasarlarına olan etkilerini araştırmışlardır. 5-eksen frezeleme üzerine hem geometrik analiz hem de deneysel çalışmalar yapılmış ve deneylerden elde edilen eğim açılarına göre yüzey pürüzlülüğü ve yüzey topoğrafya değişimleri analiz edilmiştir. Farklı eğim açılarındaki yüzey hataları da incelenmiş ve optik profilometre ile analiz edilmiştir. Eğer ki küresel takımın yalnızca küresel kısmı iş

parçası ile temas ediyorsa, eğim açılarının pürüz yüksekliği ile ilgili olmadığı belirtilmiştir. Ayrıca eğim açısının 0° etrafında yüzey pürüzlülüğü üzerinde simetrik bir etki gösterdiği ifade edilmiştir [70].



Şekil 2.8 : Chen vd. tarafından belirlenen 8 farklı kesme stratejisi [69].

Chen vd. 2015 yılında yaptıkları çalışmada 5-eksen küresel parmak frezeleme işleminde işlem performansı artırmak adına işlenmiş yüzey özelliklerini incelemişlerdir. Kesici takım üzerinden oluşan çeşitli kesme hızlar ve talaşlı imalat karakteristiği farklı eğim açıları üzerinden incelenmiştir. Eğim açılarının yüzey sertliği, kalıntı gerilmeleri, yüzey bütünlüğü, topoğrafyası ve pürüzlülüğü üzerindeki etkileri itme ve çekme frezeleme teknikleri için araştırılmıştır [65].

Bhopale vd. 2017 yılında yaptıkları çalışmada ince duvarlı Inconel 718 malzemeden iş parçasının farklı eğim açıları ve işlem parametreleri ile işlenmesi sonucu elde edilen yüzey kalitesini, sapma, yüzey pürüzlülüğü ve yüzey hataları üzerinden incelemişlerdir [71]. Batista vd. 2017 yılında yaptıkları çalışmada küresel parmak freze ile 5-eksen kalıp işlenmesi için yüzeyde oluşan tepeler ve pürüz yükseklikleri matematiksel olarak modellenmiş, mikroskop ile karakterize edilmiş ve deneysel olarak doğrulanmıştır [72]. Sonaware ve Joshi 2015 yılında yaptıkları çalışmada Merkezi Kompozit Tasarım (MKT) kullanarak ayna devri, ilerleme, iş parçası kalınlığı ve eğim açısı parametrelerini kullanarak yüzey kalitesini ve iş parçası saptmasını araştırmışlardır [73].

Shan vd. 2016 yılında yaptıkları çalışmada Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ince duvarlı iş parçalarında 4-eksen küresel frezeleme işleminde eğim açısına bağlı oluşan elastik deformasyonu ürettikleri kuvvet modelleri üzerinden incelemişlerdir [74]. Dikshit vd. 2016 yılında yaptıkları çalışmada Öğrenme-Öğretme Bazlı Optimizasyon yöntemi ve Yanıt Yüzey Yöntemi ile küresel parmak frezeleme işleminde elde edilen yüzey pürüzlülüğünü minimize etmişlerdir. Girdi parametresi olarak kesme derinliği, kesme genişliği, ilerleme ve kesme hızı seçilmiştir. Ayrıca varyans analizi ile parametrelerin yüzey pürüzlülüğüne etkisi de incelenmiştir [75]. Yao vd. 2017 yılında yaptıkları çalışmada TC17 titanyum alaşımında küresel parmak freze eğim açılarının yüzey bütünlüğü üzerine etkilerini incelemişlerdir. Yüzey pürüzlülüğü, yüzey morfolojisi ve kalıntı gerilmesi incelenen yüzey parametreleridir. En iyi yüzey özelliklerinin eğim açısının 30° - 60° olduğu durumlarda elde edildiği belirtilmiştir [76].

Çizelge 2.2. Küresel parmak frezelemede eğim açılarıyla ilgilenilen çalışmalar.

Yazarlar	Metod	Malzeme	Kesici Takım	Simultane Eksen Adedi	Girdi Parametreleri	Çıktı Parametreleri
Ozturk vd. (2009)		1050 çeliği	D16 küresel parmak freze	5-eksen	Eğim açısı, yaklaşma açısı, kesme derinliği	Kesici takım etki alanı, pürüz yüksekliği, kesme kuvveti, tork, form hataları
Zhang vd. (2012)		Al alaşımı	D5 küresel parmak freze	3-eksen	Kesme yörüngesi	Yüzey pürüzlülüğü, pürüz yüksekliği
Mhamdia vd. (2012)		Ti6Al4V	D16 küresel parmak freze	3-eksen	İlerleme	3-boyutlu pürüzlülük, mikro sertlik ve mikroyapı
Vakondios vd. (2012)	Varyans analizi, regresyon modeli	Al7075-T6	ACZ350 kesici uçları		Kesme derinliği, kesme genişliği, ilerleme, frezeleme stratejisi	Yüzey pürüzlülüğü (Rz)
Chen vd. (2013).		H13 çeliği	D10 küresel parmak freze	5-eksen	Eğim açısı, yaklaşma açısı	Sertlik, kalıntı gerilmeleri, yüzey bütünlüğü ve yüzey pürüzlülüğü

Çizelge 2.2: (Devamı) Küresel parmak frezelemede eğim açılarıyla ilgilenilen çalışmalar.

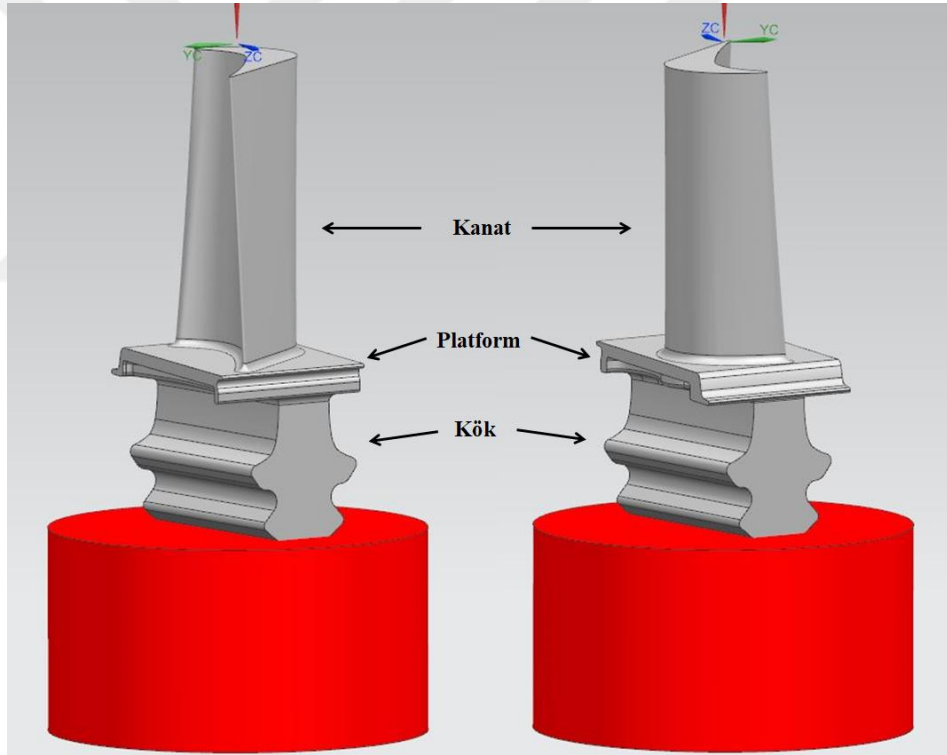
Yazarlar	Metod	Malzeme	Kesici Takım	Simultane Eksen Adedi	Girdi Parametreleri	Çıktı Parametreleri
Chen vd. (2013).		H13 çeliği	D10 küresel parmak freze	5-eksen	Eğim açısı, yaklaşma açısı	Yüzey pürüzlülüğü, yüzey topoğrafyası, yüzey hataları, pürüz yüksekliği
Chen vd. (2015)		H13 çeliği	D10 küresel parmak freze	5-eksen	Eğim açısı, yaklaşma açısı, frezeleme yönü	Sertlik, kalıntı gerilmeleri, yüzey dokusu, yüzey topoğrafyası ve yüzey pürüzlülüğü
Nandkumar vd. (2017)	MKT, YYM	Inconel 718	D10 küresel parmak freze		Kesme hızı, ilerleme, iş parçası kalınlığı, iş parçası eğim açısı, takım yörüngesi	Yüzey pürüzlülüğü ve yüzey
Ferreira vd. (2015)	Varyans Analizi	H10 çeliği	D6 küresel parmak freze	3-eksen	Kesme genişliği, ilerleme, kesme yönü	Yüzey pürüzlülüğü (Ra ve Rz)
Harshad vd. (2015)	MKT, YYM	Inconel-718		3-eksen	Ayna devri, ilerleme, iş parçası kalınlığı, eğim açısı	Sapma
Shana vd. (2016)	SEY	Paslanmaz çelik	D8 küresel parmak freze	4-eksen	Eğim açısı	İnce duvarlı iş parçalarının elastik deformasyonu, kesme kuvveti

Çizelge 2.2: (Devamı) Küresel parmak frezelemede eğim açılarıyla ilgilenilen çalışmalar.

Yazarlar	Metod	Malzeme	Kesici Takım	Simultane Eksen Adedi	Girdi Parametreleri	Çıktı Parametreleri
Dikshit vd. (2016)	TLBO, YYM ve MKT	Al2014-T6	D10 küresel parmak freze	3-eksen	Diş başı ilerleme, kesme derinliği, kesme genişliği, kesme hızı	Yüzey pürüzlülüğü (Ra)
Yao vd. (2017)		TC17 titanyum alaşımı	D7 küresel parmak freze		Eğim açısı	Yüzey pürüzlülüğü, yüzey morfolojisi, kalıntı gerilmesi

3. TÜRBİN BIÇAKLARININ TORNA-FREZE TAKIM TEZGAHLARINDA İŞLENMESİ İÇİN İŞLEM METODOLOJİSİ GELİŞTİRİLMESİ

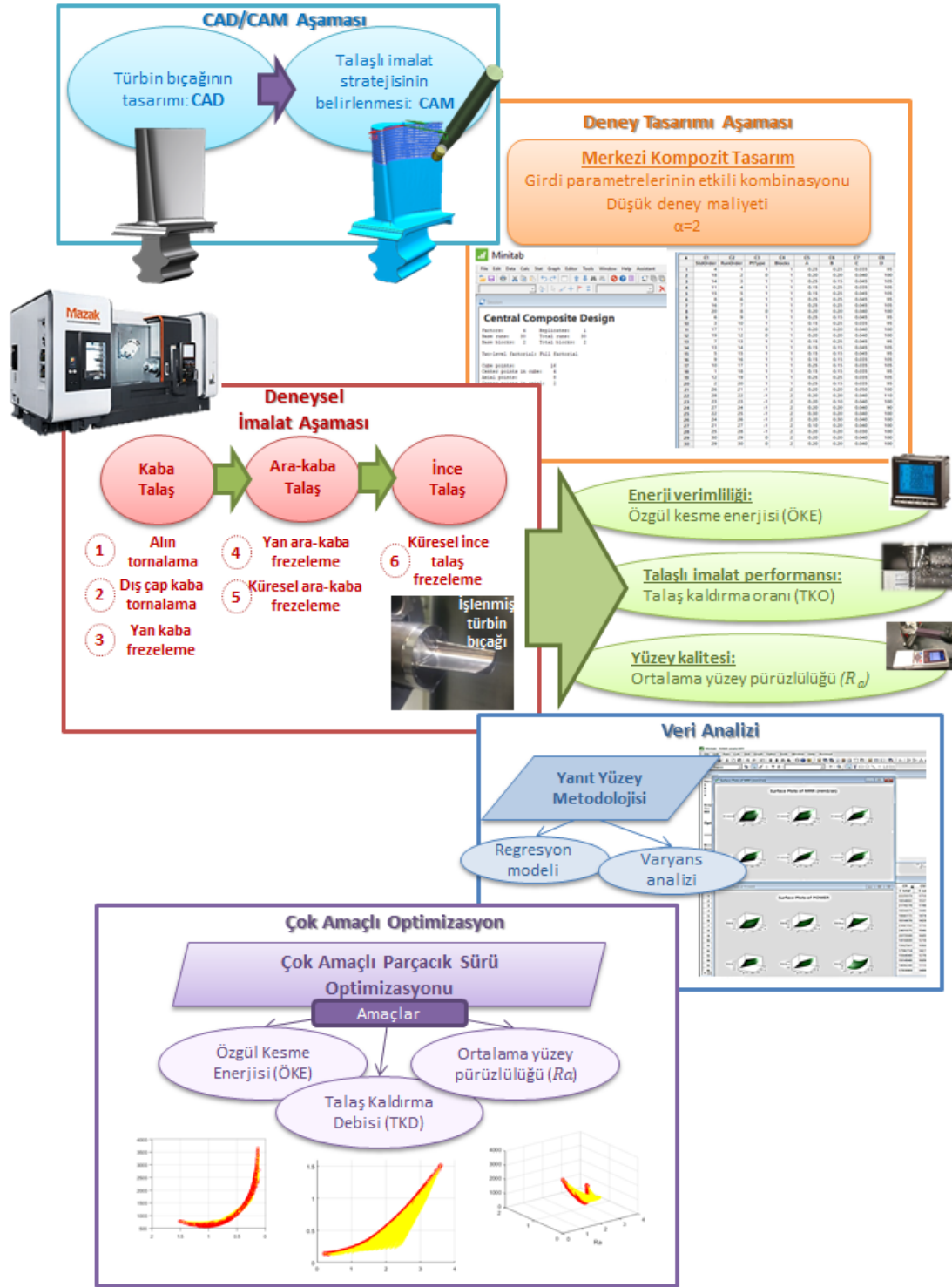
Geometrinin karmaşıklığı ve kullanım alanının kritik oluşu sebebiyle, türbin bıçaklarının işlenmesi yüksek oranda hassasiyet gerektiren bir işlemdir. Türbin bıçaklarının işlenmesi için optimum işlem parametrelerinin elde edilebilmesi araştırmacılar için önemli bir konu olduğundan, türbin bıçaklarının işlenmesi üzerine çeşitli yöntemler uygulanmıştır. Şekil 3.1’de yer alan türbin bıçağının üretim süreci bu bölümde değerlendirilecektir.



Şekil 3.1 : Türbin bıçağının temel unsurları.

Türbin bıçağının verimli ve hassas bir işlem ile üretilmesi için talaşlı imalat işleminin parametre optimizasyonu yapıldığı gibi yardımcı işlem basamaklarının her birinin de özenle incelenmesi ve düzenlenmesi gerekmektedir. Bu tezde talaşlı imalat aşamasına yardımcı basamaklar olarak, CAD/CAM aşaması, yanıt yüzey metodolojisi ve deney tasarımı aşaması, deneysel imalat aşaması, veri toplama

aşaması ve çok amaçlı optimizasyon aşaması geliştirilmiştir. Şekil 3.2’de türbin bıçağı talaşlı imalatı süreci için geliştirilen metodolojinin şeması yer almaktadır.



Şekil 3.2 : Türbin bıçağının torna-freze tezgahlarında işlenmesi üzerine geliştirilen metodoloji.

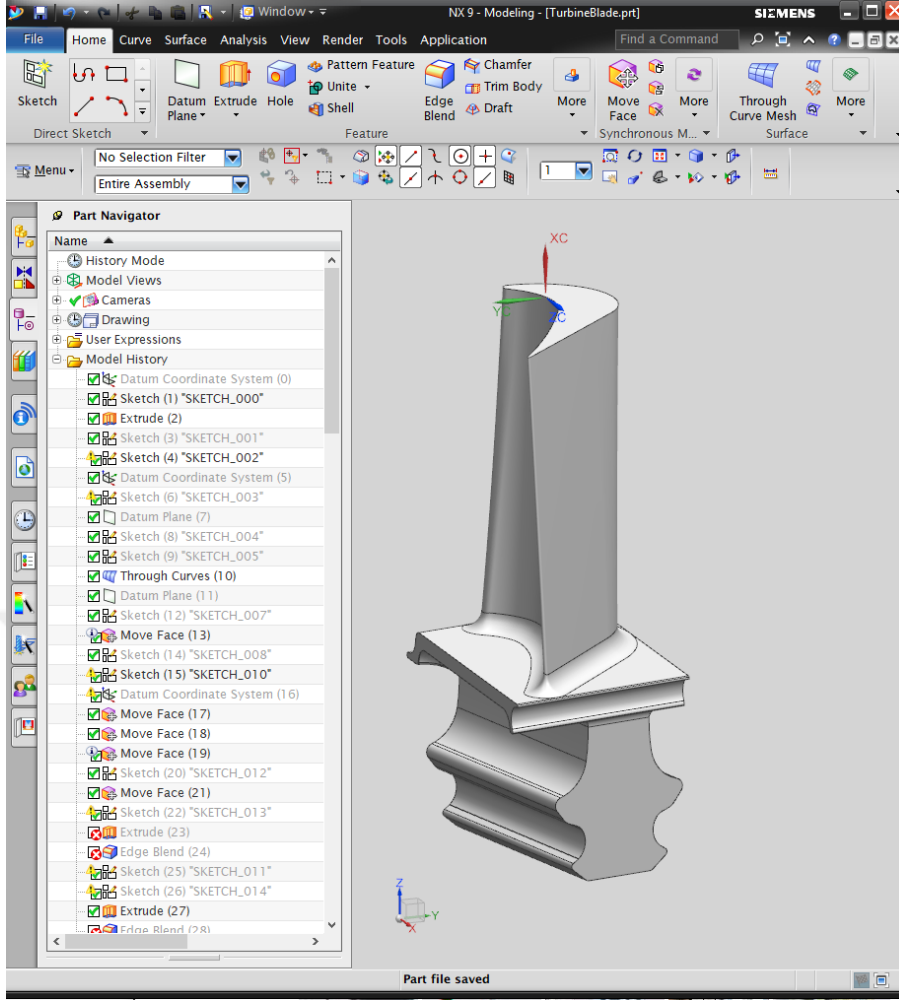
3.1 CAD/CAM Aşaması

CAD/CAM terminolojisi bilgisayar destekli tasarım ve bilgisayar destekli üretim anlamına gelmektedir. Ayrıca, tasarım ve üretim aşamasında belirlenmiş olan fonksiyonların bilgisayarların kullanımı ile teknolojik ortama geçmesi olarak da tanımlanabilir [77]. Geleneksel bir üretim tesisinde bu iki faaliyet ayrı ayrı değerlendiriliyorken, bu teknoloji tasarım ve imalatın daha fazla bütünleşmesi yönünde ilerlemektedir. Sonuç olarak, CAD/CAM teknolojisi, bilgisayar destekli fabrikalarının temelini oluşturmaktadır.

Bilgisayar destekli tasarım (CAD), tasarımın oluşturulması, modifikasyonu, analizi veya optimizasyonu için bilgisayar sistemlerinin kullanımı olarak tanımlanabilir. Bilgisayar destekli üretim (CAM) ise bir imalat tesisinin operasyonlarını doğrudan ya da dolaylı bilgisayar arabirimi yoluyla tesisin üretim kaynakları ile planlamak, yönetmek ve kontrol etmek için bilgisayar sistemlerinin kullanımı olarak tanımlanabilir. Bu çalışmada CAD/CAM aşaması, yaygın olarak kullanılan bir program olan Siemens NX 9.0 üzerinden yapılmıştır (Şekil 3.3.). Türbin bıçağının tasarımı tamamlandıktan sonra torna-freze takım tezgahında uygulanmak üzere CAM aşaması yapılmıştır. CAM aşamasında türbin bıçağının karmaşık geometrisi gereği farklı işlem stratejileri arasından bir dizi tercihler yapılmıştır. Seçilen işlem stratejilerinin yanı sıra türbin bıçağının farklı bölümleri için uygulanacak işlemlerin sıralaması da CAM aşamasının önemli bir adımı olarak görülmüştür.

Torna-freze takım tezgahında işlenecek olan türbin bıçağının CAM işlemleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Kaba tornalama işlemleri (Alın tornalama, dış çap tornalama)
- Kaba yan frezeleme işlemi
- Ara-kaba frezeleme işlemleri (ara-kaba yan frezeleme ve küresel parmak frezeleme)
- Platform ve kök bölümlerinin kaba ve ince talaş işlemleri
- Türbin kanadının ince talaş işlemi



Şekil 3.3 : Siemens NX 9.0 kullanıcı arayüzü.

Türbin bıçağı imalatının ilk aşaması olarak blok halindeki silindirik malzemeye alın tornalama işlemi yapılarak alın yüzeyi düzeltilir. Ardından dış çap tornalama işlemi ile türbin bıçağı geometrisine en yakın dış çapa kadar talaş kaldırma işlemi yapılır.

Kanat bölümünün kaba talaş frezeleme işleminde silindirik bir blok malzemeden ada şeklinde türbin bıçağı geometrisi elde edilecektir. Bu tür bir işlem için düzlemsel frezeleme ya da çevre frezeleme seçeneklerinin ikisi de kullanılabilir. Her iki işlemde de ortaya çıkarılması gereken taban yüzey seçimine göre talaş kaldırma işlemi yapılabilmektedir. Bu çalışmada iş parçasında bulunan kanadın platforma bağlantısında yer alan radyustan dolayı çevre frezeleme daha uygun görülmüş ve kesici takım olarak parmak freze tercih edilmiştir.

Kanat geometrisinin Z ekseninde eğimli olmasından dolayı kaba işlemten sonra üzerinde düzensiz bir talaş kalmıştır. Bu talaşın ince talaş işlemi için azaltılması ve

eşitlenmesi gerekmektedir. Bunun için profil çevreleme frezeleme seçeneği ile parmak frezenin yan kısmı kullanılarak yan ara-kaba frezeleme işlemi planlanmıştır. Bu işlemde parmak frezenin kanat yüzeyine anlık paralel hareketi sayesinde yüzeyin genelinde benzer miktarda talaş bırakılmıştır.

Ardından kanat ve platform arasındaki radyusun ve platform yüzeyinin üzerinde kaba işlemde kalan talaşlar, kesim yüzeyinin açısız bir karakteristiğe sahip olmasından dolayı alan çevre frezeleme ya da z-seviye profil frezeleme seçenekleriyle yapılabilmektedir. İşlem stratejisinden dolayı daha kısa sürede daha iyi yüzey elde edilebildiğinden dolayı z-seviye profil frezeleme bu işlem için uygun görülmüş ve küresel takım ile uygulanmıştır.

Kök bölümünün kaba talaş işlemi çevresel olarak değil, ön-arka-sağ-sol olacak şekilde 4 farklı düzlem üzerinden gerçekleştirilmiştir. Kanat bölümünün kaba talaş işlemi gibi bu bölümün kaba talaş işlemi için de çevresel frezeleme yöntemi kullanılmıştır. Kanat kaba frezelemede kullanılan parmak freze bu işlemde için de kullanılabilir. Böylece takım masrafı da göz önünde bulundurulmuştur.

Kök bölümünün kaba talaşı alındıktan sonra kalan talaş miktarı küresel parmak frezeler ile almak için fazla bulunmuştur. Bu sebeple radyuslu kısımların arasında kalan talaş daha küçük çaplı bir parmak freze ile ara-kaba frezeleme işlemi ile temizlenmiş ve ince talaş işlemine hazır hale getirilmiştir. Bu işlem için yine çevresel frezeleme seçeneği kullanılmış ve aynı işlem arka kök bölümü için de tekrarlanmıştır.

Türbin kanadının kaba talaş işlemleri tamamlandıktan sonra ince talaş işlemleri için küresel parmak frezeler ile devam edilmiştir. Öncelikle, kanat kısmını ince talaş işleminin işlem parametrelerine uygun hale getirmek için küresel parmak frezeyle yapılacak olan ara-kaba işlemi planlanmıştır.

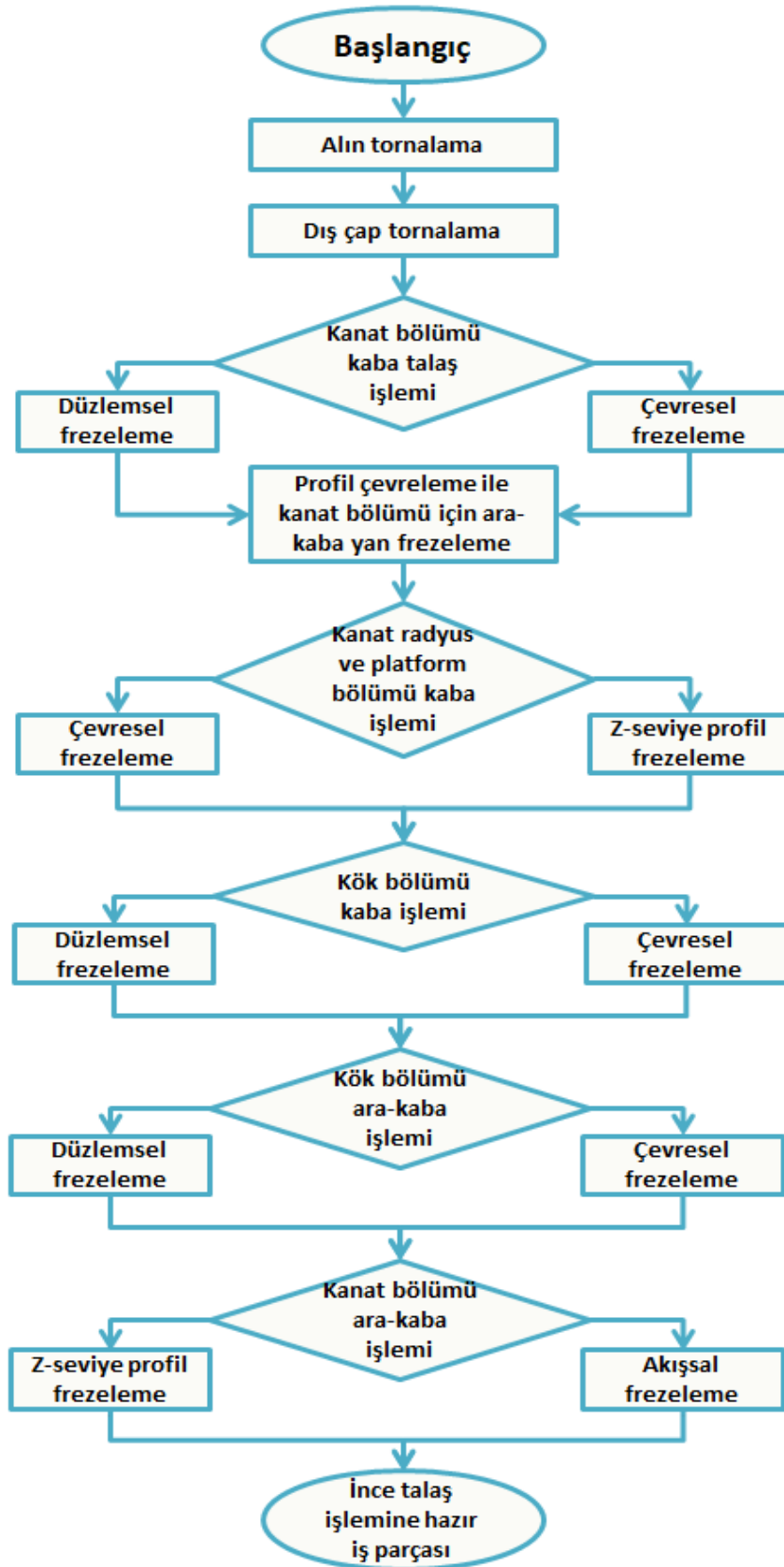
Bu işlemde bir ada konumunda olan kanat geometrisinin serbest form yüzeyi işlenecektir. Bu işlem yüzey kontürleme, z-seviye profil frezeleme ve akışsal frezeleme seçenekleri ile gerçekleştirilebilmektedir. Ancak tek işlemde bütün kanat yüzeyinin küresel parmak frezeyle işlenebilmesi için en uygun seçenek akışsal frezeleme olarak görülmüştür. Çünkü diğer seçeneklerde farklı açılardan ayrık

işlemler ile kanat geometrisinin işlenebilmektedir. Akışsal frezeleme işleminde ise kesici takım belirlenen adanın etrafında dönerek yaptığı devinimler ile kanat geometrisini tek operasyon ile tamamlayabilmektedir. Türbin bıçağının torna-freze takım tezgahı ile üretiminde kaba ve ara-kaba işlemleri için uygun görülen CAM operasyonları ve olası işlem seçenekleri Şekil 3.4’de gösterilmiştir. Türbin bıçağının, kanat bölümünün ince talaş işlemi de ara-kaba işleminin ardından aynı metot ancak daha hassas işlem parametreleri ile uygulanmıştır.

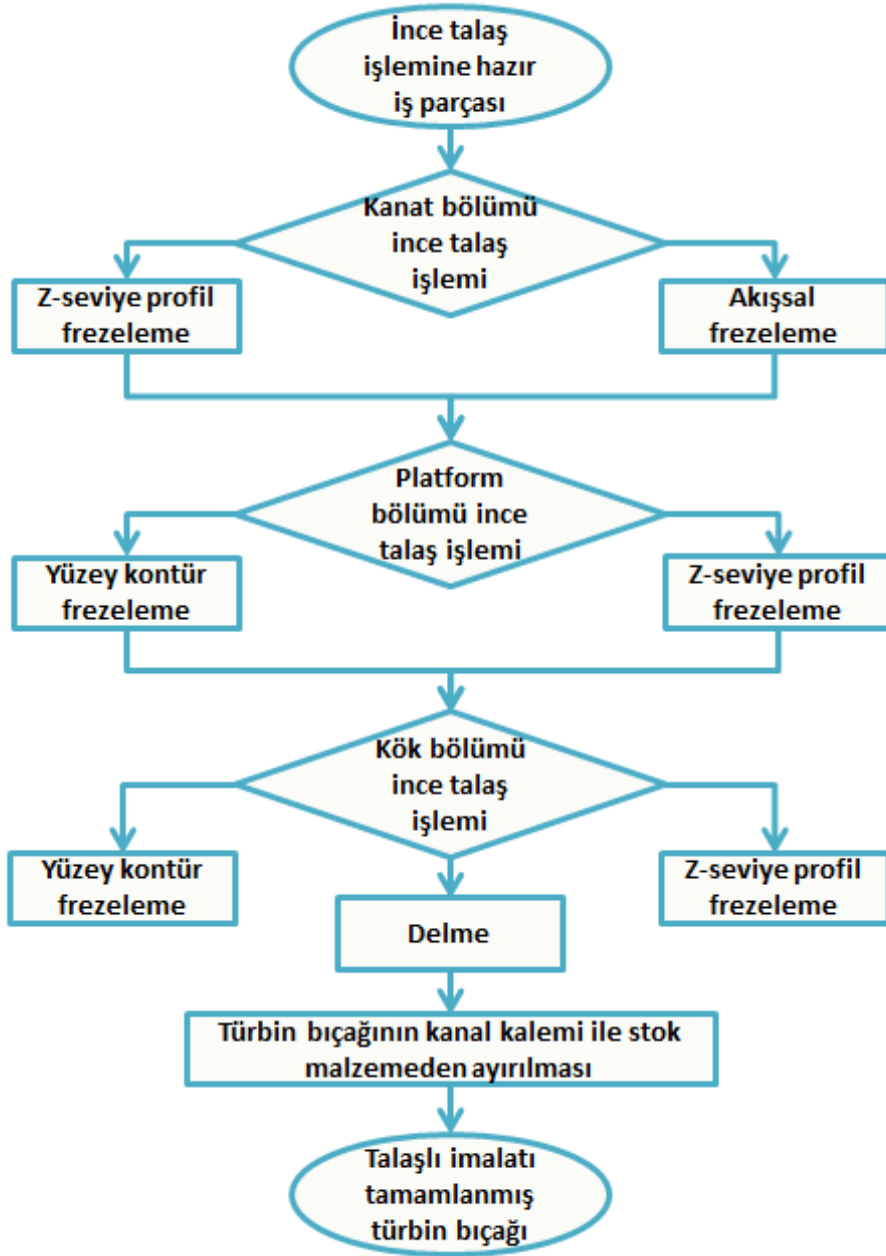
Platform bölümünün ince talaş işlemi için yüzey kontürleme ve z-seviye profil frezeleme işlemleri ile yapılabilmektedir. Yüzey kontürleme işlemi ile elde edilen takım yolu geometride yer alan çukurlu bölgeler için daha uygun görülmüş ve küresel parmak freze kullanılarak bu yöntem uygulanmıştır. Kök bölümünün ince talaş işlemi için ise yüzey kontürleme, z-seviye profil frezeleme ya da delme işlemi ile yapılabilmektedir. Yüzey kontürleme ve z-seviye profil frezeleme işlemlerinde küresel parmak freze ile yüzeyler üzerinde belirli bir eğim açısı ile ince talaş işlemi yapılabilmektedir.

Delme işlemi seçilirse de matkap kesici ucu ile kök kısmında yer alan küresel oyuk temizlenebilecek ve ardından diğer iki seçenekten biri ile konkav yüzeylerdeki ince talaş alınabilmektedir. Ancak işlem süresinin ve takım maliyetinin azaltılması amacı için delme yöntemi seçilmemiştir.

Kök kısmının ince talaş işlemi için z-seviye profil seviyeleme işlemi yüzey radiusuna uygun bir küresel parmak freze ile uygulanmıştır. Bu işlemin ardından ince talaş işlemleri tamamlanmış ve türbin bıçağı aynaya bağlı olan stok malzemeden alt tarete bağlı kanal kalemi ile koparılmıştır. Türbin bıçağının torna-freze takım tezgahı ile üretiminde ince-talaş işlemleri için uygun görülen CAM operasyonları ve olası işlem seçenekleri Şekil 3.5’te gösterilmiştir.



Şekil 3.4 : Türbin bıçağının kaba ve ara-kaba işlemleri için CAM operasyon seçenekleri.



Şekil 3.5 : Türbin bıçağının ince talaş işlemleri için CAM operasyon seçenekleri.

3.2 Yanıt Yüzey Metodolojisi ve Deney Tasarımı

3.2.1 Yanıt Yüzey Metodolojisi

Yanıt Yüzey Metodolojisi (YYM) istatistik ve matematiksel yöntemlerin bir araya gelmesiyle oluşmuş, süreçlerin geliştirilmesi, iyileştirilmesi ve optimizasyonunda

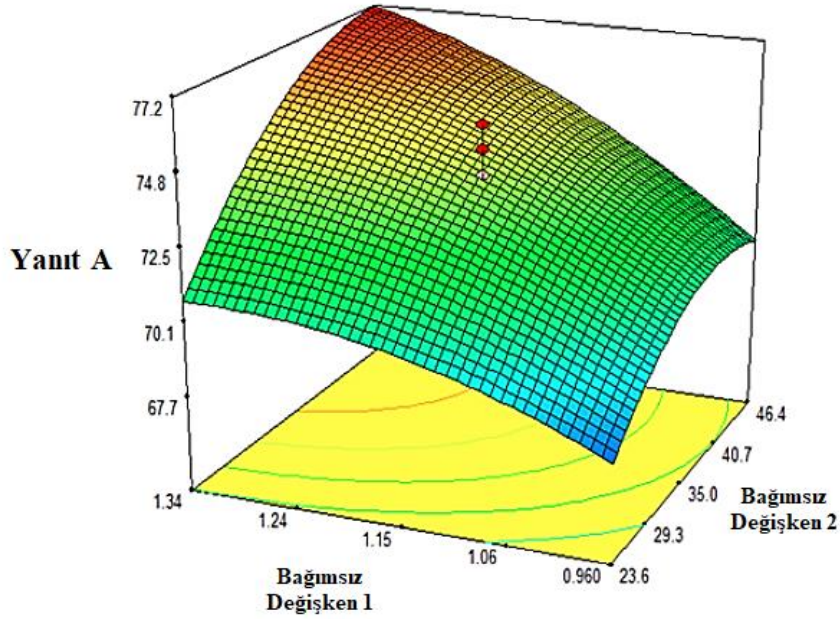
kullanılan bir yöntemdir. YYM ilk kez Box ve Wilson (1951) tarafından yayımlanan “Optimum koşullar için deneysel başarı” isimli yayınında tanıtılmıştır [78]. Ardından 2000 senesinde Box tarafından yayımlanan çalışma ile YYM uygulaması genişletilmiş ve düzenlenmiştir [79]. YYM ayrıca, var olan ürünlerin geliştirilmesi ya da yeni geliştirilecek olan ürünlerin tasarım, geliştirme ve formülasyon aşamalarında da önemli uygulamalarda kullanılabilmektedir [80].

YYM'nin en yaygın olarak endüstriyel alanlarda kullanılmaktadır. Özellikle birden fazla işlem parametresinin ürün veya sürecin performans ölçütlerini veya kalite özelliklerini potansiyel olarak etkilediği durumlarda YYM etkili bir yöntem olmaktadır. Bu performans ölçütleri ya da kalite karakteristikleri yanıt olarak nitelendirilmektedir. Yanıtlar genellikle sürekli bir ölçekte ölçülmektedir. Ancak öznitelik yanıtları, sıralamaları ve sensörsel yanıtlar da olabilmektedir. Çoğu gerçek hayat problemleri birden fazla yanıt içermektedir.

İşlemin girdi parametreleri bağımsız değişkenler olarak adlandırılmaktadır. Bağımsız değişkenler araştırmacı tarafından en az bir test ya da deney ortamında gözlemlenmektedir. Bağımsız değişkenlerle tekrarlanan deneyler sonrasında geliştirilmek, incelenmek ya da optimize edilmek istenilen yanıt için matematiksel yöntemler aracılığıyla bir yüzey elde edilmektedir. Şekil 3.6'da temsili bir yanıt yüzey örneği bulunmaktadır. Bu örnekte iki adet bağımsız değişkene (A, B) göre A yanıtının değişimi gözlenmektedir. Kısacası, elde edilen yüzey ile herhangi bir işlem yanıtının, işlem parametrelerine göre değişimi ve olası alabileceği değerler belirlenebilmektedir.

Yanıt yüzeyin (ϕ) yapısal biçimi genellikle bilinmediğinden bir polinom ya da başka bir ampirik model denklemi kullanılarak bir yaklaşım şekli aranmaktadır. Model oluşturulurken izlenen adımlar sırasıyla şöyledir: ilk olarak k girdi değişkeni üzerinden model önerilmiştir. Ardından, ilk önerilen model ile birlikte, k girdi değişkenin çeşitli kombinasyonları X_1, X_2, \dots, X_k de modele katılmıştır. Seçilen her bir faktör seviyesi kombinasyonunda bir veya daha çok sayıda gözlemler yapılır. Gözlemler, önerilen modelde parametre değerlerinin tahminlerini elde etmek için ve deneysel hata varyansının bir tahminini elde etmek için kullanılır. Daha sonra bu testler, katsayı tahminlerinin büyüklükleri ve model formunun kendisi üzerinde

yapılır. Elde edilen model yeteri düzeyde kabul edilirse, bir tahmin modeli olarak kullanılabilir.



Şekil 3.6 : Örnek yanıt yüzey grafiği [81].

Birinci dereceden elde edilen ilk tahmin modelinin, iki adet faktör ile gösterimi Denklem (3.1) ile gösterilmiştir.

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \varepsilon \quad (3.1)$$

$N \geq 3$ sayıda yanıt değerlerinin elde edilmesiyle, X_1 ve X_2 değişkenlerinin en az üç ayrı seviye kombinasyonundan elde edilen Y değeri ve β_0 , β_1 ve β_2 katsayıları en küçük kareler metodu ile bulunmaktadır. Eğer bu yaklaşımlar sırasıyla b_0 , b_1 ve b_2 ile temsil edilmiş olsaydı, Denklem (3.2) ile gösterilen tahmin fonksiyonu kullanılabilir:

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \varepsilon \quad (3.2)$$

Genel olarak yanıt yüzey değişkenleri k adet regresör değişkene bağlı olabilir. Bu durumda model Denklem (3.3) ile gösterildiği şekilde yeniden yazılabilir:

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (3.3)$$

Denklem (3.3) ile gösterilen model k adet regresör değişkenine sahip bir doğrusal regresyon modeli olarak belirtilmektedir. β_j parametreleri ($j = 0, 1, \dots, k$) regresyon katsayıları olarak tanımlanmaktadır. Bu model regresör değişkenlerinin k -boyutlu uzayında hiper düzlem olarak tanımlanmaktadır. β_j parametresi, diğer bütün bağımsız değişkenler, x_i ($i \neq j$) sabit kaldığı durumda x_j değişkeninin her birim değişiminin y yanıtı üzerindeki etkisini temsil etmektedir.

3.2.2 Deney tasarımı

Deney Tasarımı (DT), operasyonları mümkün olan en verimli biçimde geliştirmek için kullanılacak şekilde sistematik bir bilgi edinme ve organize etme yöntemidir [82]. Bu tanıma göre, deney tasarımı bilgiyi hızlı bir şekilde elde etmek ve uygulamak için önemli olduğu herhangi bir alana uygulanabilir. Deney tasarımı kullanıcıya neredeyse sınırsız yararlar için bir fırsat olarak görülmelidir.

Araştırmacı tarafından deney süreci bir deney tasarımı kullanarak gerçekleştirilirse, istatistiksel süreçte yaşanılması muhtemel zorlukla asgari düzeye indirilmektedir. Ayrıca, edinilen bilgiye ve bu bilginin organizasyonundan ve uygulanmasından öğrenilenler ile çok daha fayda sağlanmaktadır. Deney tasarımı, araştırmacının elde edilen karmaşık istatistiksel verinin iyileştirilmesi için gerekli bilgiyi elde etmek ve düzenlemek için kullanılan bir yöntemdir.

Deney tasarımı, araştırma çeşitli araştırma konularında deneysel süreci en düşük maliyet ile gerçekleştirmek için etkili bir araçtır. Üretim süreçlerinde malzeme ve takım maliyetleri bir hayli yüksek olduğu için yapılan deneylerin sayısı ve dolayısı ile kullanılan malzeme ve kesici takım miktarı da önem kazanmaktadır. Deney tasarımı kullanımı ile daha az ancak daha yararlı örneklem noktaları kullanılarak verimli bir deney süreci gerçekleştirilebilmektedir.

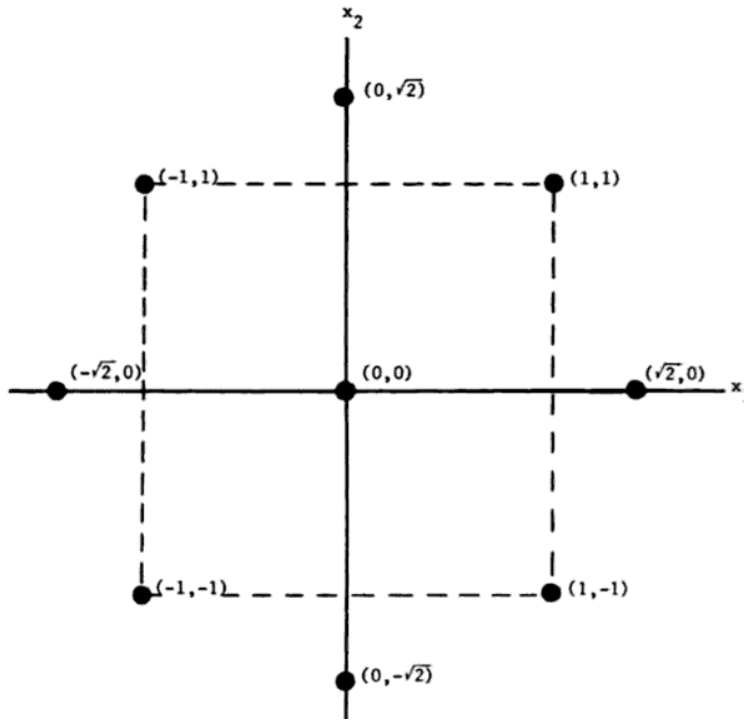
Yanıt Yüzey Metodolojisi'nde yanıt yüzeyin daha az hata ile tanımlanabilmesinde, modelde kullanılan girdi parametrelerinin ve ilgili yanıtlarının modelin yapısını oluşturmada daha etkili noktalardan seçilmesinin büyük faydası bulunmaktadır. Bu sebeple deney tasarımı ile elde edilen yanıtlar YYM için oldukça elverişlidir. Standart ikinci dereceden YYM ile koordine olarak en çok kullanılan iki adet deney

tasarımı türü bulunmaktadır. Bunlar Merkezi Kompozit Tasarım ve Box-Behnken Tasarımı'dır.

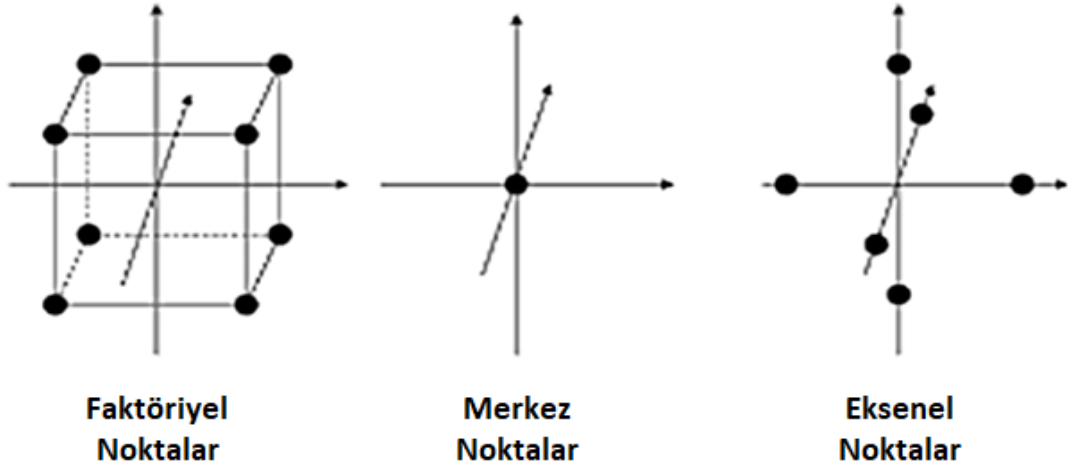
Merkezi Kompozit Tasarım (MKT), Box ve Wilson tarafından 1951 yılında 3k faktöriyel tasarımlara alternatif olarak öne sürülmüştür [78]. Bir MKT aşağıdaki örneklemi içermektedir [80]:

- Faktör seviyelerinin “-1” ve “+1” olarak nitelendirildiği 2^k faktöriyel tasarım. Bu kısım MKT tasarımının faktöriyel kısmı olarak adlandırılmaktadır.
- n_0 merkez noktalar ($n_0 \geq 1$).
- Her bir tasarım değişkenin ekseninde, tasarım merkezinden α kadar uzakta iki adet aksenal nokta.

Şekil 3.7’de iki faktörlü bir MKT tasarımının örneklem yerleşimi gösterilmiştir. Şekil 3.8’de ise üç faktörlü bir MKT tasarımının örneklem noktaları yer almaktadır. α parametresi bir MKT’nin döndürülebilirliğini belirleyen parametredir. Eğer bir deney tasarımı döndürülebilir bir karakteristiğe sahip olursa, herhangi bir noktadaki tahmin değişimi yalnızca örneklem nokta ile merkez nokta arasındaki mesafeye bağlıdır. Standart tasarımlarda α değeri ikiye eşittir.

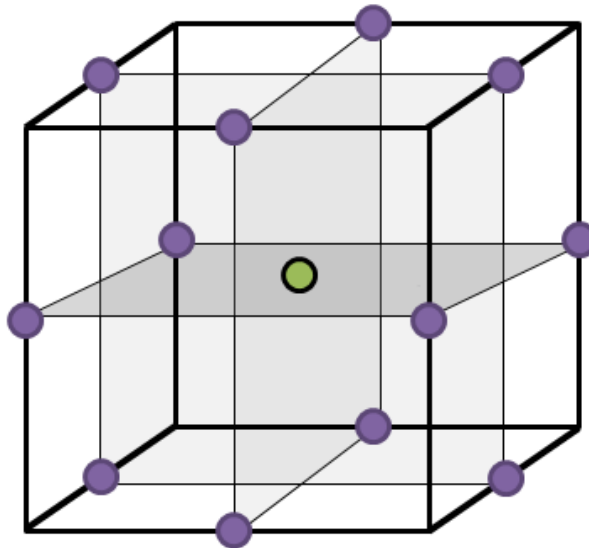


Şekil 3.7 : $k = 2$ tasarım değişkeni için MKT örneklemi [82].



Şekil 3.8 : $k = 3$ tasarım değişkeni için MKT örneklemeleri [83].

Box-Behnken Tasarımı (BBT) ise 1960 yılında Box ve Behnken tarafından, üç seviyeli tamamlanmamış faktöriyel bir tasarım şeklinde, ikinci dereceden model parametrelerinin belirlenmesi için tasarlanmıştır. Üç seviyeli tamamlanmamış bir faktöriyel tasarım, $3k$ faktöriyel tasarım içerisindeki faktöriyel kombinasyonların bir alt kümesidir [82]. Box-Behnken tasarımları, iki seviye faktöriyel tasarımların dengeli tamamlanmamış blok tasarımlarla özel bir biçimde birleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Şekil 3.9’da üç adet tasarım değişkeni için BBT örneklemeleri şematize edilmiştir.



Şekil 3.9 : $k = 3$ tasarım değişkeni için MKT örneklemeleri.

Hem MKT hem de BBT yanıt yüzey oluşturmak için kullanılan etkili deney tasarım yöntemleridir. Ancak BBT ile üç seviyeli deney tasarımı elde edilebilmektedir. MKT’de ise α parametresinin ikiye eşit olduğu standart durumda beş seviyeli bir tasarım elde edilmektedir. Bu sebeple örneklem uzayında daha farklı noktalardan örneklem alabilmek için bu çalışmada MKT kullanılmıştır.

3.3 Veri Toplama Aşaması

Türbin kanadının torna-freze tezgahta talaşlı imalatı üzerinden elde edilebilecek ve incelenecek olan veriler şu şekilde belirlenmiştir:

- Özgül Kesme Enerjisi (ÖKE)
- Ortalama Yüzey pürüzlülüğü (R_a)
- Talaş Kaldırma Oranı (TKD)

3.3.1 Özgül kesme enerjisi ve veri toplanması

Talaşlı imalat, imalat sanayiinde yaygın olarak kullanılan ve üretim sektöründeki ana enerji tüketim uygulamalarının başında gelen en temel ve önemli imalat süreçlerinden biridir ve son yıllarda enerji azaltımının ana hedefi olarak belirlenmiştir [84]. İmalat sektöründe enerji azaltımı ile ilgili mevcut çalışmaların çoğu enerji tasarruflu talaşlı imalat proseslerini geliştirmeye odaklanmıştır. Ana talaşlı imalat süreçleri; tornalama, frezeleme, planyalama, taşlama, broşlama ve delme işlemleridir. Talaşlı imalat işlemleri genellikle takım tezgahlarında yapılmaktadır.

Teknolojinin gelişimi, zaman içinde geliştirilen takım tezgahlarının ve bilgisayar kontrollü makinelerin sayısını arttırmıştır. Takım tezgahı üretim teknolojilerinin geliştirilmesiyle, CNC’ler çok hassas bir kesme kabiliyetine ulaşmışlardır. Takım tezgahlarının yaygın kullanımı, takım tezgahı endüstrisinin de en önemli enerji tüketicilerinden biri haline gelmesi sebep olmuştur. Takım tezgahlarını çalıştırmak için elektrik enerjisi tüketmek gerekir ve ülkede üretilen elektriğin çoğu, yüksek karbon emisyonlarına ve düşük enerji dönüşüm verimliliğine sahip fosil yakıtlardan elde edilir. Elde edilen enerjinin verimli bir şekilde kullanılması için, talaşlı imalat

işlemleri sırasında takım tezgahlarının enerji tüketiminin belirlenmesi ve azaltılması önemlidir.

Üretim işlemlerinde enerji tüketimi ile ilgili çalışmaların temelini Gutowski vd. tarafından 2006 yılında yapılan çalışmaya dayanmaktadır [85]. Gutowski vd. bu çalışmada üretim işlemlerinde güç tüketimini Denklem (3.4)'teki gibi modellemişlerdir. Burada “P” toplam gereken gücü (kW), “P₀” makinenin harcadığı temel gücü (kW) ve “v̄” ise talaş kaldırma debisini (cm³/sn) temsil etmektedir. k ise kJ/cm³ biriminde bir sabit olarak tanımlanmıştır.

$$P = P_0 + k\bar{v} \quad (3.5)$$

Yıllar içerisinde literatürde talaşlı imalat işleminin enerji tüketimine dair Gutowski ve diğerlerinin (2006) çalışmasındaki mantık temel alınarak çeşitli model oluşturulmuştur. Bu çalışmada takım tezgahlarının enerji tüketimini oluşturan kalemler Denklem (3.6) ile gösterilmiştir. Bu genel enerji tüketim modeli Moradnazhad ve Unver (2016) tarafından da uygulanmıştır [86].

$$E_{\text{Toplam}} = E_{\text{Temel}} + E_{\text{Kesme}} + E_{\text{Yardımcı}} \quad (3.6)$$

Bu genel enerji tüketim modelinde “E_{Toplam}” makinenin toplam enerji tüketimini, “E_{Kesme}” talaş kaldırmak için harcanan enerji miktarını, “E_{Yardımcı}” ise makinenin talaş kaldırma işlemi için yardımcı konumda ve kesme işleminden harici çalışan diğer bütün ek bölümlerini tarafından tüketilen enerji miktarını göstermektedir. E_{Yardımcı} kalemini oluşturan alt elemanlar Denklem (3.7) ile gösterilmiştir.

$$E_{\text{Yardımcı}} = E_{\text{Konveyör}} + E_{\text{Soğutucu}} + E_{\text{SoğutmaSıvısı}} \quad (3.7)$$

Talaşlı imalat operasyonları sırasında enerji tüketimini belirlemek adına Socomec DIRIS A40 markalı çok fonksiyonlu bir enerji metre kullanılmıştır. Bu enerji metre torna-freze tezgahının elektrik panosuna bağlı olup, anlık güç, akım, voltaj ve benzeri bilgileri kullanıcıya sağlar. Enerji ölçerin örnekleme süresi 1 saniyedir, yani saniyede bir veri alınmaktadır. Bu enerji metre ile talaşlı imalat operasyonları sırasında harcanan güç, yerel ağ bağlantısı üzerinden kişisel bilgisayarda anlık olarak görüntülenir ve ExcelTM dosyası üzerinde depolanır. Daha sonra güç tüketimi, operasyon sınırları boyunca ayıklanır, temizlenir ve böylelikle operasyon başına düşen enerji tüketimi miktarı hesaplanır. Bu enerji ölçüm sürecinin şematik görünümü Şekil 3.10 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.10 : Talaşlı imalat operasyonu için harcanan gücün işleme süreci.

3.3.2 Ortalama yüzey pürüzlülüğü ve ölçümü

Yüzey pürüzlülüğü değerlendirmesi, sürtünme, temas deformasyonu, ısı ve elektrik akımı iletimi, kontak eklemlerinin sızdırmazlığı ve konum doğruluğu gibi birçok temel problem için çok önemlidir. Bu nedenle yüzey pürüzlülüğü, onlarca yıldır deneysel ve teorik araştırmaların konusu olmuştur.

Yüzey pürüzlülüğü, nominal yüzeyden üçüncü ila altıncı sıra sapması anlamına gelmektedir. Birinci ve ikinci sıra sapmaları (örneğin sırasıyla düzlilik, dairesellik ve dalgalanma) şeklinde gösterilir ve takım tezgah hataları, iş parçasının deformasyonu, yetersiz sıkıştırma vb. nedeniyle oluşur. Üçüncü ve dördüncü sıra sapmaları, kesici takımların şekil ve durumuna, talaş oluşumuna ve işlem kinematiklerine bağlanan periyodik oluklarla belirtilmektedir. Beşinci ve altıncı sıra sapmaları, iş parçası malzemesinin yapısına (kayma, difüzyon, artık stres vb. fiziksel ve kimyasal mekanizmalara) işaret eder [87].

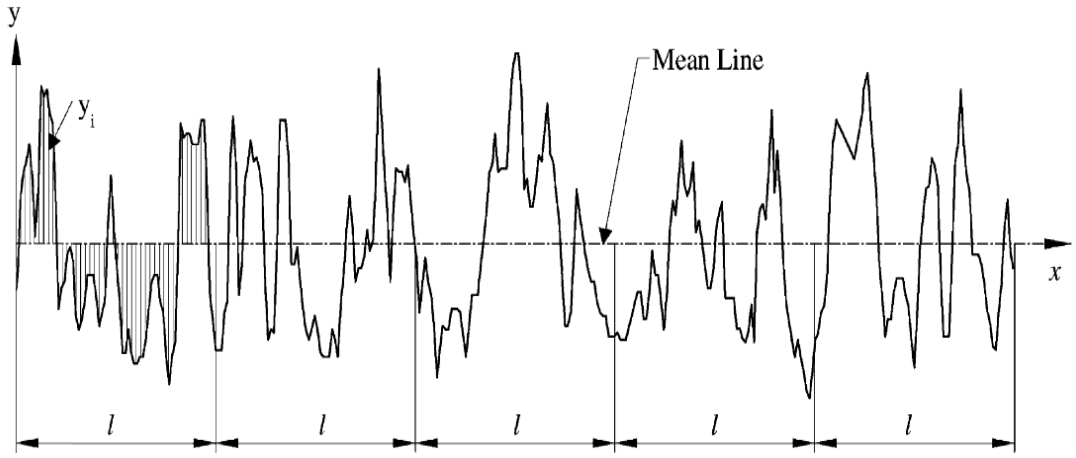
Gerçek yüzey geometrisi çok karmaşıktır ve sonlu sayıda parametre tam bir tanımlama sağlayamaz. Bu sebeple farklı yüzey pürüzlülüğü parametreleri türetilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü parametreleri normal olarak işlevselliğine göre üç gruba ayrılır. Bu gruplar, genlik parametreleri, boşluk parametreleri ve hibrid parametreler olarak tanımlanır. Genlik parametrelerinden başlıcaları ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a), karekök ortalama pürüzlülüğü (R_q) ve on-nokta yüksekliğidir (R_z) [88]. Bu çalışmada işlenen türbin kanadının yüzey kalitesi, ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) ölçülerek belirlenecektir. 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 3.11). R_a , genel kalite kontrolü için en çok kullanılan yüzey pürüzlülüğü parametresidir. Çünkü bu parametrenin tanımlaması ve ölçmesi kolaydır. Ayrıca yükseklik varyasyonlarının genel bir tanımını verir. Dalga boyu hakkında herhangi bir bilgi vermez ve profildeki küçük değişikliklere duyarlı değildir. Matematiksel tanımı ve uygulamasal formülasyonu sırasıyla Denklem (3.8) ve Denklem (3.9) ile gösterilmiştir.

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad (3.8)$$

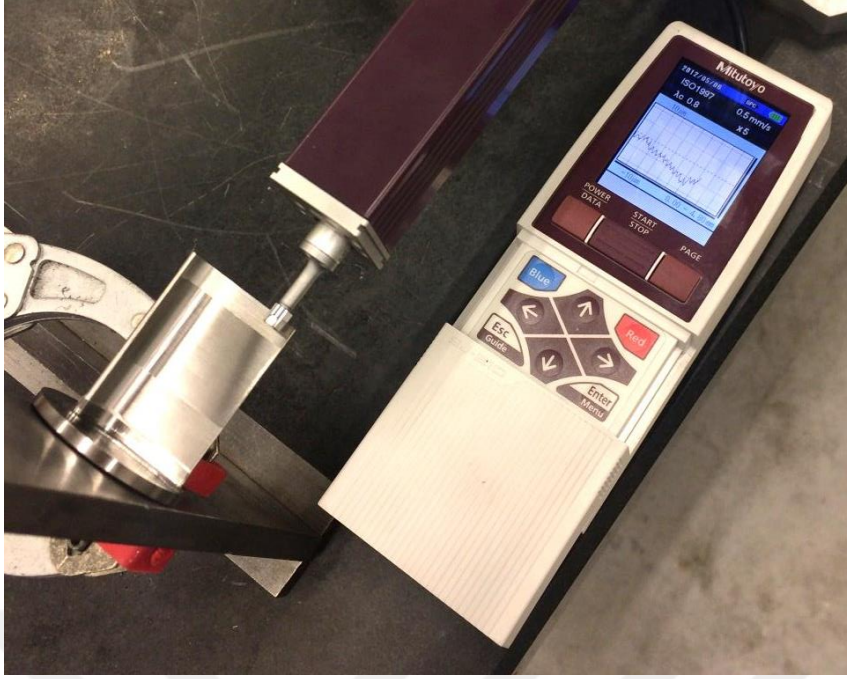
$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (3.9)$$

Denklem (3.7)'de, l örneklem uzunluğunu, $y(x)$ ise yüzey çizgisini göstermektedir. Denklem (3.8)'de, n örneklem uzunluğu içerisindeki veri sayısını göstermektedir.



Şekil 3.11 : Ortalama yüzey pürüzlülüğü gösterimi [88].

Bu çalışmada ortalama yüzey pürüzlülüğünün ölçümü Mitutoyo SurfTest SJ-210 markalı bir yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Ölçüm koşulları Şekil 3.12'de gösterilmiştir.



Şekil 3.12 : Türbin bıçağının yüzey pürüzlülüğü ölçümü.

3.3.3 Talaş kaldırma debisi ve hesaplanması

Talaşlı imalatta, işlemin verimliliğini belirleyen en önemli parametrelerden biri talaş kaldırma debisidir (TKD). Kesme derinliği (mm), kesme genişliği (mm) ve ilerleme (mm/dak) parametreleri talaş kaldırma debisini belirleyen temel talaşlı imalat parametreleridir. Frezeleme işleminde talaş kaldırma debisi Denklem (3.10)'da gösterilen denklem ile hesaplanmaktadır.

$$TKD = a_e * a_p * f \quad (3.10)$$

Küresel frezeleme işleminde ise kesme derinliği (a_p), kesme genişliği (a_e), küresel takım yarıçapı (R) ve ilerleme (f) ile hesaplanmaktadır. Quintana vd. tarafından 2010 yılında yapılan çalışmada küresel frezeleme işleminde talaş kaldırma debisinin hesaplanması için geliştirilen denklem Denklem (3.11) ile gösterilmiştir [89].

$$TKD = f * \left[\left[a_e * R - \frac{a_e}{2} \sqrt{R^2 - \left(\frac{a_e}{2}\right)^2} - R^2 * \sin^{-1} \left[\frac{a_e}{2 * R} \right] \right] - \left[a_e * a_p \right] \right] \quad (3.11)$$

Bu çalışmada türbin bıçağı işlenmesindeki operasyonların metal kaldırma oranları hesaplanırken, temel talaş kaldırma debisi formülü olan Denklem (3.9)'daki formülasyon kullanılmıştır.

3.4 Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO)

3.4.1 Parçacık Sürü Optimizasyonu'nun temelleri

Yıllar yılı, bilim insanları, günümüz problemlerine çözüm getirmek doğa olaylarından için esinlenmişlerdir. Bu çalışmalardan bir çoğu da çözüm algoritmaları için olmuştur. Gen yapısı, karıncaların, arıların ya da kuşların davranışları gibi bir çok doğal yapı üzerine sezgisel algoritmalar geliştirilmiştir.

Parçacık Sürü Optimizasyonu da (PSO) bir populasyon bazlı sezgisel algoritmadır. PSO, optimal sonuca ulaşırken, hayvan sürülerinin (kuşlar ya da balıklar) davranışlarını ve alışkanlıklarını taklit etmektedir. PSO algoritması, özellikle sürüdeki bireylerin ve sürünün öğrenilmiş deneyimlerine dayanarak çalışır. Sürülerde hareket eden hayvanların rasgele olarak yiyecek bulma ve hayatta kalma gereksinimlerini sergilerken, sürüdeki diğer bireyleri etkilerler ve böylelikle sürünün amacına daha kolay ulaşmalarını sağlarlar.

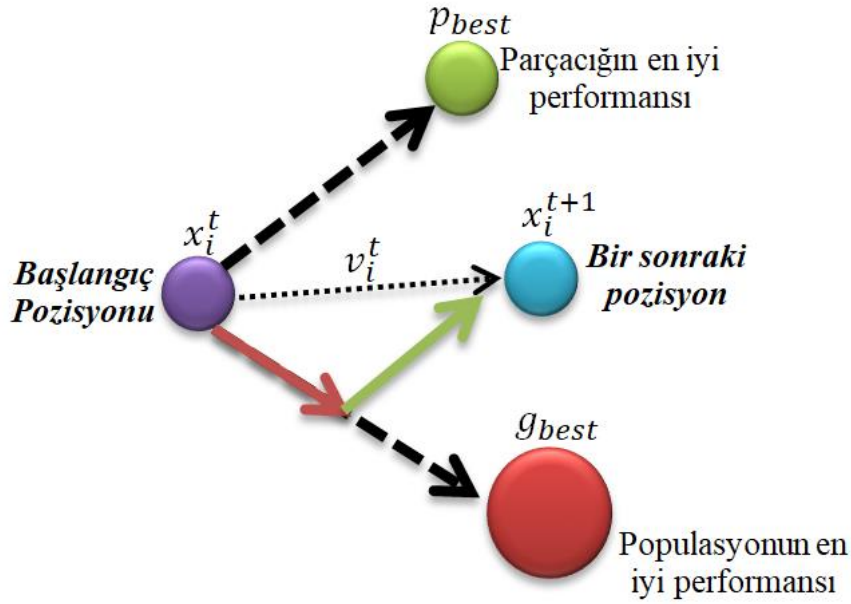
PSO algoritmasında populasyondaki her bir birey “parçacık”, populasyon ise “sürü” olarak adlandırılmaktadır. Her bir parçacığın bir hız ve pozisyon değeri vardır. Parçacığın pozisyonu arama uzayındaki konumunu belirlerken hızı da bir sonraki iterasyonda varolduğu konumdan ne yönde ve ne kadar bir ilerleme göstereceğini belirler. PSO algoritması için, $f: S \rightarrow \mathbb{R}$ optimizasyon probleminin amaç fonksiyonu olsun. S d-boyutlu arama uzayı ve n sürüdeki parçacık sayısı olsun. Bu durumda arama uzayı $S = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ ile gösterilir. Her bir parçacığın pozisyon vektörü $X_i = \{x_{i,1}, x_{i,2}, x_{i,3}, \dots, x_{i,d}\} \in S$ ile gösterilirken her bir parçacığın hız vektörü de $V_i = \{x_{i,1}, x_{i,2}, x_{i,3}, \dots, x_{i,d}\} \in S$ ile gösterilmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi, her bir parçacık her bir iterasyonda kendisinin ve sürüdeki diğer bireylerin öğrenilmiş tecrübeleri doğrultusunda ilerler. Parçacıkların öğrenilmiş tecrübeleri içinden en iyi amaç fonksiyonu değerine sahip olan konumları kişisel eniyi “ p_{best} ” olarak tanımlanıp, $p_{best}_i = \{p_{best_{i,1}}, p_{best_{i,2}}, p_{best_{i,3}}, \dots, p_{best_{i,d}}\} \in S$ şeklinde gösterilir. Sürünün en iyi amaç fonksiyonuna sahip konumu ise “ g_{best} ” ile

tanımlanmaktadır. Her bir iterasyonda parçacıkların sahip oldukları hız ve pozisyon değerleri sırasıyla Denklem (3.12) ve Denklem (3.13)'te gösterilmiştir.

$$v_i^{t+1} = w * v_i^t + c_1 * r_1 * (pbest_i^t - x_i^t) + c_2 * r_2 * (gbest_i^t - x_i^t) \quad (3.12)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (3.13)$$

Burada $i = 1,2,3, \dots, n$ şeklindedir. Her i parçacığının t iterasyonunda sahip olduğu hız ve konum değerleri sırasıyla 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 3.13'te şematize edildiği gibi, kendi tecrübeleri ve popülasyonun tecrübesi üzerinden hareket etmektedirler.



Şekil 3.13 : PSO'nun çalışma mekanizması.

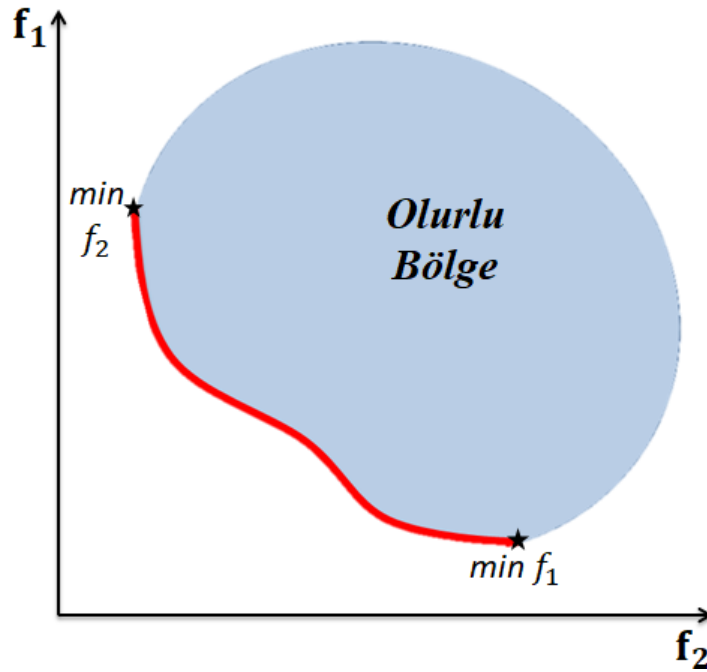
3.4.2 Çok amaçlı optimizasyon

Tek amaçlı optimizasyon, diğer önemli amaçların yanı sıra yalnızca tek bir hedef elde ederek karmaşık problemleri çözmekte bazen yetersiz ve başarısız

olabilmektedir. Bu amaca ulaşmak yani karmaşık optimizasyon problemlerini birkaç yönden ele alabilmek için, çok amaçlı optimizasyon, birden fazla amacı tek amaç fonksiyonu çatısı altında derleyebilen kurtarıcı bir yöntemdir. Özellikle, talaşlı imalat problemleri gibi karmaşık problem türleri için, çok amaçlı algoritmalar, operasyonun çeşitli amaçlarına yönelik çalışabildiğinden önem kazanmaktadır.

Çok amaçlı optimizasyon problemlerinde bir optimal sonuca ulaşabilmek için amaç fonksiyonlarının sıralandırılması, ağırlıklandırılması vb. yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada problem ayrık ancak eş zamanlı bir çözüme ulaştırılmak istenilmiştir. Yani amaç fonksiyonları için her hangi bir ağırlıklandırma ya da sıralama yapılmak istenmemiştir. Bu sebeple, amaçlar için olası en iyi çözümleri bir arada sunan Pareto optimal çözüm setinden faydalanılmıştır.

Pareto optimal çözüm setindeki her bir çözüm için, bir amaçtan ödün vermeden diğer amaç fonksiyonu iyileştirilememektedir. Elde edilen Pareto optimal çözümler arasından işlem stratejisine uygun çözümler seçilebilmektedir. Şekil 3.14'te çok amaçlı optimizasyon için grafiksel gösterim yer almaktadır. Kırmızı çizgi ise Pareto optimal çözüm setini temsil etmektedir.



Şekil 3.14 : Pareto optimal çözüm seti.

3.4.3 Çok-Amaçlı Parçacık Sürü Optimizasyonu (ÇAPSO)

Bu çalışmada Çok Amaçlı Parçacık Sürü Optimizasyonu (ÇAPSO) algoritması talaşlı imalat işleminde optimize edilmek için belirlenen amaçların optimizasyonu için kullanılmıştır. ÇAPSO ilk olarak Coello vd. tarafından 2004 yılında geliştirilmiştir [90]. Bu yöntem ile Pareto optimal çözümler de elde edilebilmektedir. ÇAPSO’da, tıpkı PSO algoritmasındaki gibi, parçacıklar kendilerinin ve sürünün en iyi tecrübeleri ile hareket ederler. Ancak bu kez en iyi tecrübeler yalnızca bir kritere bağlı değildir. Bu sebeple sürüdeki en iyi parçacıklar “depo” adı verilen bir alt sürüye taşınırlar ve diğer parçacıklar bu alt gruptaki parçacıkların önderliğinde hareket etmektedirler.

Yanıt Yüzey Metodolojisi ile elde edilen regresyon modelleri çok amaçlı optimizasyonda amaç fonksiyonları olarak kullanılacaktır. Problemin karar değişkenleri, torna-freze işleminin girdi parametreleri olarak belirlenip, $y = [y_1, y_2, y_3, \dots, y_m]^T$ şeklinde gösterilmektedir (m karar değişkeni sayısını göstermektedir.).

Talaş kaldırma problemlerinde genellikle problem kısıtları, işlem koşulları tarafından belirlenmektedir. Bu çalışmada ise girdi parametrelerinin alt ve üst limitleri problem kısıtları olarak kullanılmıştır. Bu alt ve üst limitler, işlem türü, malzeme ve kesici takım özelliklerine göre belirlenmiştir.

Bu çalışmada ÇAPSO için kullanılan algoritma, www.yarpiz.com üzerinden açık kaynak olarak alınmış ve MATLAB üzerinde çalıştırılmıştır. Problemin gereklerinden dolayı kaynak kodun bazı bölümleri değiştirilmiş ve geliştirilmiştir. Hali hazırda bulunan açık kaynak kod yalnızca iki amaç için çalışabilmekteydi. Ancak mevcut problemde üç adet amaç fonksiyonu kullanıldığı için algoritmanın bir çok bölümü bu perspektif ile değiştirilmiştir.

Klasik PSO algoritmasından farklı olarak bu çalışmada kullanılan algoritma bir de mutasyon srecine sahiptir. Bu süreç, Denklem (3.14) ile gösterilen formül ile hesaplanan mutasyon oranı ile sürü içerisinde belirli sayıda parçacık seçilerek, pozisyon değeri rasgele olarak değiştirilmesine dayanır.

$$\text{Mutasyon Oranı} = \left(1 - \frac{it - 1}{\text{MaxIt} - 1}\right)^{\frac{1}{\mu}} \quad (3.14)$$

Burada, “it” iterasyon numarası, “MaxIt” en fazla iterasyon sayısı, μ ise mutasyon faktörüdür. Başlangıç ağırlığı olarak tanıtilan w parametresi her iterasyonda bir indirme faktörü (wf) ile Denklem (3.15)’e göre güncellenmektedir.

$$w^{t+1} = w^t * wf \quad (3.15)$$

Algoritmanın akış şeması Şekil 3.15 ile gösterilmiştir. Aşağıda ise adım adım algoritma detayları irdelenmiştir.

Adım 1: Parçacıkların başlangıç pozisyonları kısıtlar dahilinde rasgele olarak belirlenir. Başlangıç hızları her parçacık için sıfır olarak atanır. Başlangıç pozisyonları üzerinden amaç fonksiyonu değerleri hesaplanır. Parçacıkların en iyi pozisyon değerleri ($pbest$) her parçacık için başlangıç pozisyonu olarak atanır.

Adım 2: Sürü içerisindeki dominant parçacıklar belirlenir. Bu parçacıklar depoya klonlanır.

Adım 3: Depodaki dominant parçacıklar içinden amaç fonksiyonlarının değerleri en iyi olan parçacığın pozisyonu sürünün en iyi pozisyonu ($gbest$) olarak belirlenir.

Adım 4: Her bir parçacığın hız ve pozisyon bilgileri Denklem (3.11) ve (3.12)’ye göre güncellenir. Ardından her parçacığın amaç fonksiyonu değerleri hesaplanır.

Adım 5: Mutasyon süreci başlar. Bu süreçte belirli bir mutasyon oranına göre seçilen parçacıkların pozisyon değerleri rasgele değiştirilir. Eğer yeni pozisyonun amaç fonksiyonu öncesinden daha iyi ise yeni pozisyon kabul edilir ve $pbest$ güncellenir. Eğer değilse parçacık eski pozisyon ile kalır.

Adım 6: Sürü içerisindeki dominant parçacıklar belirlenir ve depoya klonlanır. Depodaki parçacıklar arasında dominasyon kontrolü yapılır ve dominant olmayan parçacıklar depodan çıkartılırlar.

Adım 7: Eğer deponun parçacık limiti aşıldıysa, depodan gerekli sayıda parçacık rasgele olarak çıkartılır.

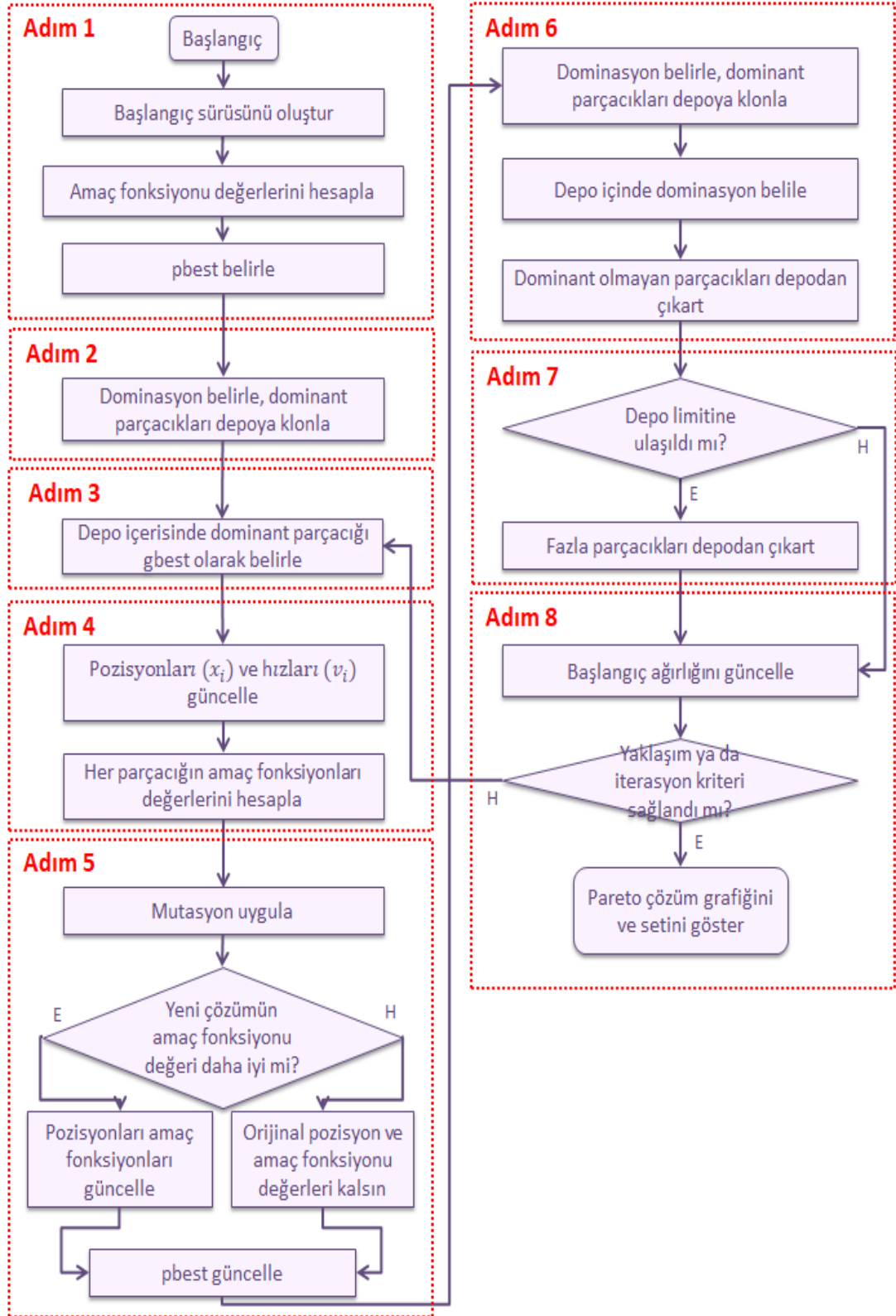
Adım 8: Başlangıç ağırlığı (w) Denklem (3.14)’e göre güncellenir.

Adım 9: Iterasyon limitine gelinmediyse ya da yakınsama kısıtı sağlanmadıysa Adım 3’e dönülür. Bu iki şarttan biri sağlandıysa algoritma sona erer. Pareto çözüm seti ve Pareto grafiği olurlu bölge ile birlikte gösterilir.

ÇAPSO algoritmasına eklenen yakınsama kriteri, parçacıkların iki iterasyon arası amaç fonksiyonu değerlerinin farkına dayanmaktadır. Her bir parçacığın takip eden iki iterasyon arasında amaç fonksiyonu değerlerinin ne miktarda değiştiği tutulur. Bu değişim miktarları her parçacık için belirlenen limitten daha düşük ise ilerleyen iterasyonlarda bariz bir farklılık yaratılmayacağından algoritma durdurulur.

c_1 ve c_2 öğrenme faktörleri sırasıyla 1,5 ve 2 olarak belirlenmiştir. Mutasyon oranı (μ) ise 0,075 olarak seçilmiştir. Başlangıç ağırlığı (w) 0,5 olarak belirlenmiş ve her iterasyon 0,8'lik indirme faktörü (wf) ile azaltılmıştır. Popülasyon ve depo için maksimum birey sayıları sırasıyla 600 ve 500 olarak belirlenmiştir.





Şekil 3.15 : ÇAPSO algoritması akış şeması.

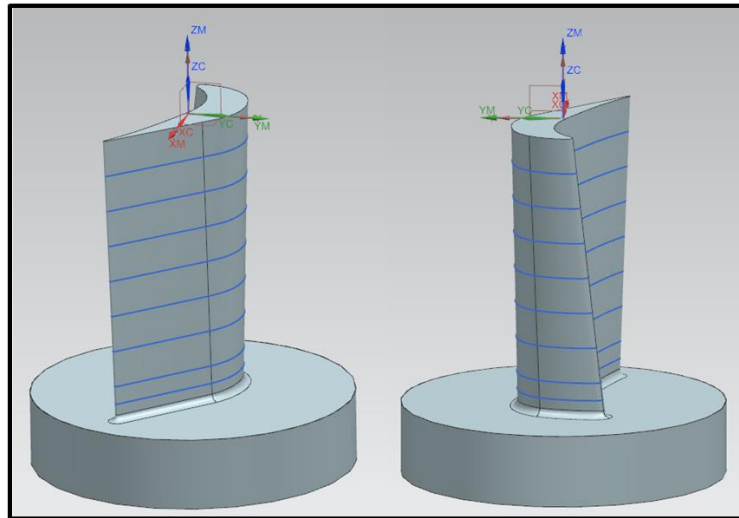


4. UYGULAMA 1: GELİŞTİRİLEN METODOLOJİNİN Ti6Al4V ALAŞIMI İLE ÇALIŞILMASI

Ti6Al4V titanyum alaşımı endüstride özellikle yüksek mukavemet ve düşük ağırlık istenilen işlemlerde sıklıkla tercih edilmektedir. Ti6Al4V türbin bıçakları özellikle jet motorlarının kompresör bıçakları olarak kullanılmaktadır.

Titanyum alaşımları hali hazırda işlenmesi zor bir malzemedir. Bunun yanında bir de türbin bıçağı gibi karmaşık bir geometriye sahip iş parçasının bu alaşımdan imal edilmesi özen isteyen bir işlem haline gelmektedir. Bu sebeple türbin bıçaklarının torna-freze tezgahlarında işlenmesi için geliştirilen metodoloji Ti6Al4V alaşımı ile uygulanmıştır.

Türbin bıçağı talaşlı imalatında, en hassas işlenmesi gereken yüzey kanat bölgesidir. Gerek serbest form yüzeyin işleme zorluğu gerekse kullanıldığı ortamda en aktif çalışan bölge olması sebebiyle kanat bölümünün işlenmesi büyük önem arz etmektedir (Şekil 4.1). Kanat bölümünün imalatındaki işlem parametrelerinin incelenmesi de büyük önem taşımaktadır. Bu sebeple, bu uygulamada türbin bıçağının yalnızca kanat bölümünün torna-freze takım tezgahında işlenmesi ve işlem çıktılarının optimize edilmesi üzerinde durulmuştur.



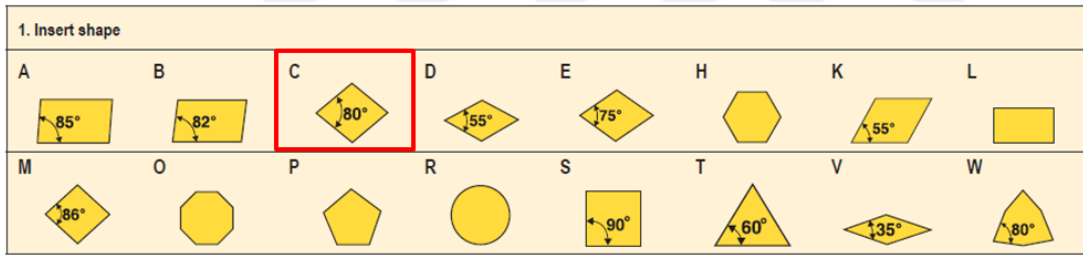
Şekil 4.1: Türbin bıçağı kanat serbest form yüzeyleri.

4.1 CAD/CAM Aşaması

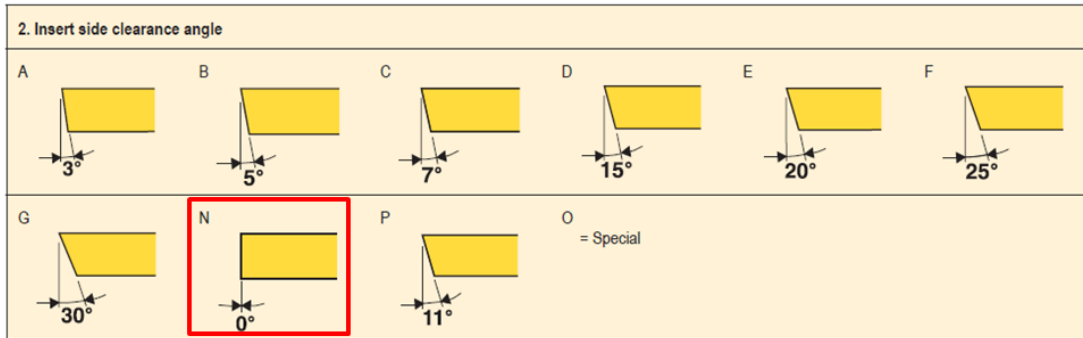
Türbin kanadı işleme metodolojisinin Ti6Al4V uygulamasında öncelikle CAD/CAM operasyonları gerçekleştirilmiştir. Kullanılan Ti6Al4V stoğu 45 mm çapında ve yeterli uzunlukta silindirik bir malzemedir. CAM operasyonlarının detayları ve kesici takım seçim kriterleri bu bölümde detaylı olarak belirtilmiştir. Kullanılan malzeme özel bir alaşım olduğu için kesici takım seçimleri de bu malzemenin karakteristik özelliklerine ve işlem türlerine bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. Torna-freze işlemlerinde kullanılan kesici takımlar SECO kesici takım katalogundan seçilmiştir.

4.1.1 Tornalama operasyonları

Kullanılan stok malzeme silindirik bir malzeme olup 45 mm çapa sahiptir. Bir dizi torna işlemleriyle stok malzemeyi türbin bıçağı geometrisine en yakın çapa indirmek mümkündür. Bu sebeple ilk olarak alın tornalama ve dış çap tornalama işlemleri planlanmıştır. Bu işlemlerde kullanılan kesici uç seçim basamakları Şekil 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 ve 4.6 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.2 : Kesici uç biçim seçimi [90].



Şekil 4.3 : Yan boşluk açısının seçimi [90].

3. Tolerances														
Tolerance-class	Tolerance +/- mm		For d, dimension mm											
	s	d	3,175*	3,969	4,064	4,760	6,350	9,525	12,700	15,875	19,050	25,400	31,750	38,100
A	0,025	0,025	•			•	•	•	•	•	•	•	•	•
C	0,025	0,025	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
E	0,025	0,025	•			•	•	•	•	•	•	•	•	•
F	0,025	0,013	•			•	•	•	•	•	•	•	•	•
G	0,130	0,025	•			•	•	•	•	•	•	•	•	•
H	0,025	0,013	•			•	•	•	•	•	•	•	•	•
J	0,025	0,050	•			•	•	•						
	0,025	0,080							•					
	0,025	0,100								•	•			
	0,025	0,130										•		
K	0,025	0,150											•	•
	0,025	0,050	•			•	•	•						
	0,025	0,080							•					
	0,025	0,100								•	•			
M	0,025	0,130											•	
	0,025	0,130												•
	0,025	0,130												•
	0,025	0,150												•
U	0,025	0,150												•
	0,130	0,050	•			•	•	•						
	0,130	0,080							•					
	0,130	0,100								•	•			

Şekil 4.4 : Kesici uç tolerans seçimi [90].

4. Fixing and/or chipbreaker						
A	B	G	M	N	R	
T	U	W	X	= Special		

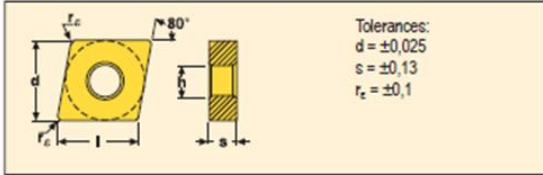
Şekil 4.5 : Kesici uç sabitleme/talaş kırıcı seçimi [90].

Stok malzemenin alın kısmındaki aşınmaları ve geometrik bozuklukları ortadan kaldırmak için öncelikle alın tornalama işlemi uygulanmıştır. Ardından da stok malzemenin kanat bölümünü kapsayan kısmının kaba dış çap tornalama işlemi yapılmıştır. Bu iki işlem için SECO CNGG120402-MF1 kodlu kesici uç kullanılmıştır (Şekil 4.7.). Bu işlemler için kullanılan kesme parametreleri Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

Grades	Steel	Stainless steel	Cast iron	Non-ferrous metals	Superalloys and titanium	Hard materials
	P	M	K	N	S	H
	P01 P10 P20 P30 P40 P50	M01 M10 M20 M30 M40	K01 K10 K20 K30 K40	N01 N10 N20 N30	S01 S10 S20 S30	H01 H10 H20 H30
CVD	TP0501					
	TP1501					
	TP2501					
	TP3500					
	TP200					
	TP40					
	TM2000					
	TM4000					
	TK1001					
	TK2001					
PVD	TH1500					
	TS2000					
	TS2500					
	TH1000					
	CP200					
	CP500					
Cermet	CP600					
	TP1030					
Uncoated	TP1020					
	890					
	HX					
	KX					
	883					

Şekil 4.6 : Ti6Al4V için uygun kaplama ve malzeme türü seçimi
(Ti6Al4V, katalogda S12 malzeme sınıfında yer almaktadır.) [90].

CNGG



Size	Dimensions in mm				
	d	l	s	h	r _c = rep
1204	12,700	12,9	4,76	5,15	0,1-0,8



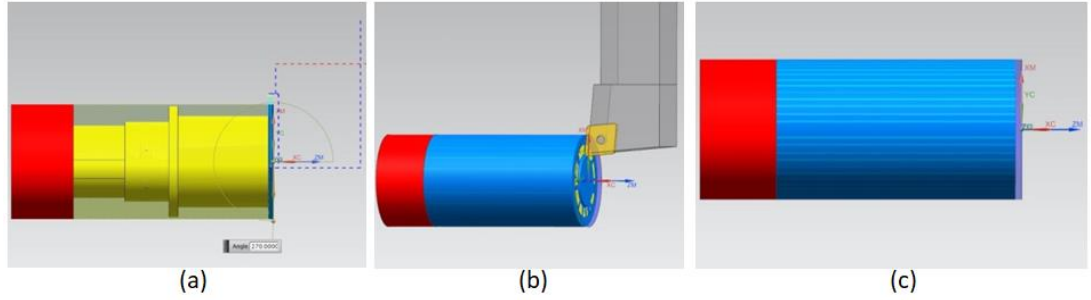
Inserts	Part No.	Grades																							
		Coated														Uncoated			Cermet						
		TP0501	TP1501	TP2501	TP3500	TP200	TP40	TH1000	TH1500	TM2000	TM4000	TK1001	TK2001	TS2000	TS2500	CP200	CP500	CP600	HX	KX	883	890	TP1020	TP1030	
CNGG-MF1	CNGG 120401-MF1																								
	120402-MF1																								
	120404-MF1																								
	120408-MF1																								
CNGG-M1	CNGG 120402-M1																								
	120404-M1																								
	120408-M1																								

Şekil 4.7 : Alın tornalama ve dış çap tornalama işlemleri için uygun kesici uç seçimi [90].

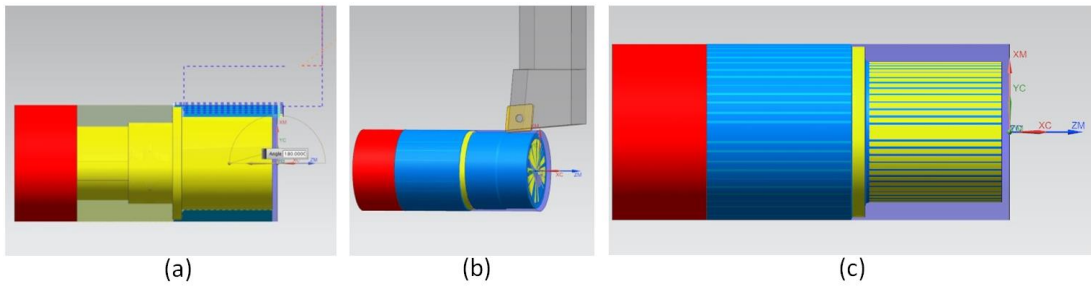
Çizelge 4.1 : Alın tornalama ve dış çap tornalama işlemleri için belirlenen kesme parametreleri.

Operasyon	Kesme Derinliği (mm)	İlerleme (mm/dev)	Ayna Devri (rpm)	Kesme Hızı (m/dak)
Alın Tornalama	1	0,3	5000	706,86
Dış Çap Tornalama	1	0,3	5000	706,86

Alın tornalama işleminin CAM aşamaları Şekil 4.8. ile gösterilmiştir. Sarı ile gösterilen bölüm torna işlemi nihayetinde varılmak istenilen silindirik yarı-mamul durumundaki stoktur. Dış çap tornalama işleminin CAM aşamaları ise Şekil 4.9. ile gösterilmiştir.













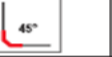
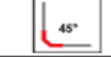



















Şekil 4.8 : Alın tornalama işlemi için (a) Takım yolu, (b) İşlem simülasyonu, (c) Beklenen işlem sonucu.



Şekil 4.9 : Dış çap tornalama işlemi için (a) Takım yolu, (b) İşlem simülasyonu, (c) Beklenen işlem sonucu.

4.1.2 Frezeleme operasyonları

Kanat bölümünün kaba, ara-kaba ve ince talaş işlemleri türbin kanadı geometrisinin hem hızlı hem de olurlu bir süreç elde edilmesi için planlanmıştır. Öncelikle kaba talaş işlemi yapılmıştır. Kaba talaş işleminde temel amaç yüksek talaş kaldırma debisi ile en kısa sürede en fazla malzeme kaldırmaktır. Bu sebeple, kaba talaş işleminde kullanılan kesici takım SECO553L100Z33.0-SIRON-A kodlu, 10 mm çapında bir parmak freze olarak planlanmıştır. Parmak freze seçimine dair adımlar Şekil 4.10. ve 4.11 ile gösterilmiştir.

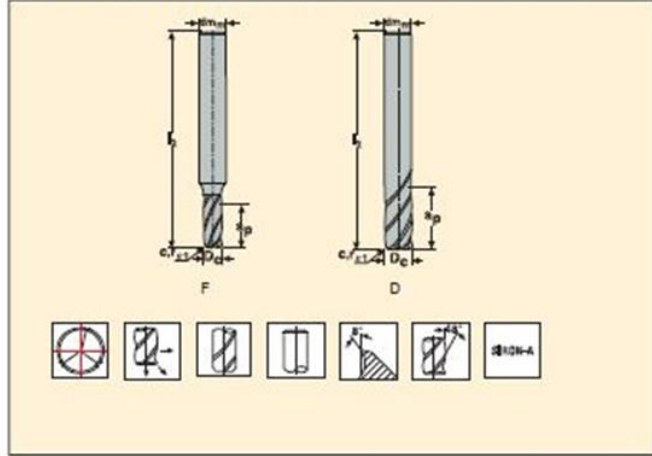
						
						
Name		JS512	JS513	JS514	JS553	JS554*
Page		27-31	32-37	38-42	43-52	53-73
Family		JS ²	JS ²	JS ²	JS ²	JS ²
Type of mill						
Shank	Cylindrical	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Weldon	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Number of flutes		2	3	4	3	4
ICC						
Diameter range	Metric	1-25	1-25	1-25	2-25	3-25
	Inch				1/8-1	1/4-1
Lengths available, based on length index						
		2,3,4	2,3,4	2,3,4	2,3	2,3
Operation						
						
						
SMG						
P1-8		•	•	•	•	•
P11		•	•	•	•	•
M1-3		•	•	•	•	•
M4-5		•	•	•	•	•
K1-7		•	•	•	•	•
S1-3		•	•	•	•	•
S11-13		•	•	•	•	•
HS H8 H11 H12 H21		•	•	•	•	•
N1		•	•	•	•	•
N2-3		•	•	•	•	•
N11		•	•	•	•	•
TS1		•	•	•	•	•
TP1		•	•	•	•	•
GR		•	•	•	•	•

Şekil 4.10 : Ti6Al4V için uygun kesici grubunun seçimi [90].

JS553 – Solid carbide end mill – cylindrical – three flute – 45° chamfer – unequal flute spacing



Tolerances:
 $dm_m = h5$
 $D_c = e7$

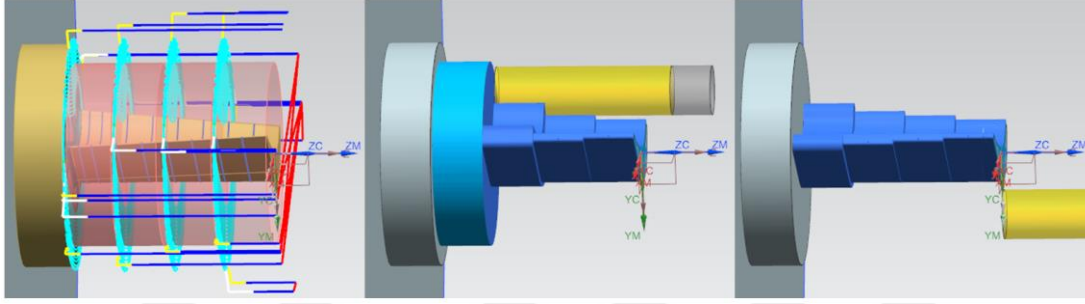


Part No.	Length index	Tool shape	Dimensions in mm				c x 45°	Zn	Cylindrical
			D _o	dm _m	a _p	l ₂			
553020Z3.0-SIRON-A	2	F	2	6	5	50	0,025	3	■
553025Z3.0-SIRON-A	2	F	2,5	6	7	50	0,025	3	■
553030Z3.0-SIRON-A	2	F	3	6	7	50	0,035	3	■
553035Z3.0-SIRON-A	2	F	3,5	6	9	55	0,035	3	■
553040Z3.0-SIRON-A	2	F	4	6	10	55	0,045	3	■
553045Z3.0-SIRON-A	2	F	4,5	6	12	55	0,045	3	■
553050Z3.0-SIRON-A	2	F	5	6	12	55	0,055	3	■
553055Z3.0-SIRON-A	2	F	5,5	6	14	55	0,055	3	■
553060Z3.0-SIRON-A	2	D	6	6	14	55	0,075	3	■
553075Z3.0-SIRON-A	2	F	7,5	8	18	60	0,1	3	■
553080Z3.0-SIRON-A	2	D	8	8	18	60	0,1	3	■
553095Z3.0-SIRON-A	2	F	9,5	10	22	70	0,125	3	■
553100Z3.0-SIRON-A	2	D	10	10	22	70	0,125	3	■
553115Z3.0-SIRON-A	2	F	11,5	12	26	80	0,15	3	■
553120Z3.0-SIRON-A	2	D	12	12	26	80	0,15	3	■
553140Z3.0-SIRON-A	2	D	14	14	30	85	0,175	3	■
553160Z3.0-SIRON-A	2	D	16	16	34	90	0,2	3	■
553200Z3.0-SIRON-A	2	D	20	20	42	110	0,25	3	■
553250Z3.0-SIRON-A	2	D	25	25	52	125	0,3	3	■
553L020Z3.0-SIRON-A	3	F	2	6	7	50	0,025	3	■
553L030Z3.0-SIRON-A	3	F	3	6	10	55	0,035	3	■
553L040Z3.0-SIRON-A	3	F	4	6	14	60	0,045	3	■
553L050Z3.0-SIRON-A	3	F	5	6	18	60	0,055	3	■
553L060Z3.0-SIRON-A	3	D	6	6	20	65	0,075	3	■
553L080Z3.0-SIRON-A	3	D	8	8	28	70	0,1	3	■
553L100Z3.0-SIRON-A	3	D	10	10	35	85	0,125	3	■
553L120Z3.0-SIRON-A	3	D	12	12	40	95	0,15	3	■
553L160Z3.0-SIRON-A	3	D	16	16	50	110	0,2	3	■
553L200Z3.0-SIRON-A	3	D	20	20	60	125	0,25	3	■
553L250Z3.0-SIRON-A	3	D	25	25	75	150	0,3	3	■

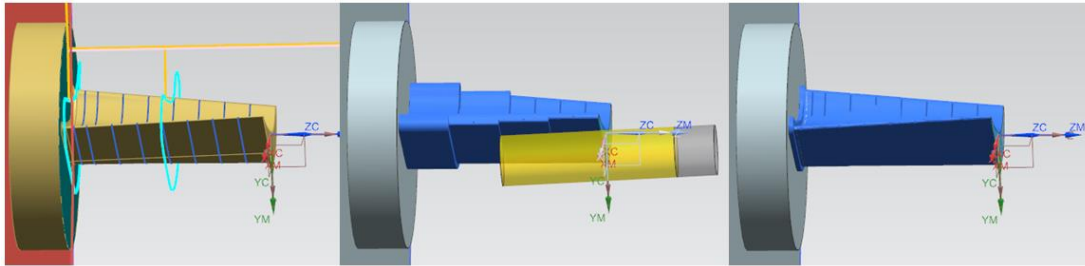
Şekil 4.11 : Ti6Al4V için uygun kesici grubundan uygun çapta ve uzunlukta kesici takım seçimi [90].

Türbin kanadının kaba talaş işleminin CAM görüntüleri Şekil 4.12. ile gösterilmiştir. Türbin kanadının kaba talaş işlemi metodoloji bölümünde de belirtildiği üzere çevre frezeleme yöntemi kullanılmıştır. Bu işlem, iş parçasının Z eksenine doğrultusunda yapılmaktadır. Bu sebeple türbin kanadının Z eksenine boyunca sahip olduğu geometrik eğikliklerden dolayı kanadın iç ve dış kısımlarında küresel takımla kaldırmak için fazla talaş kalmaktadır. Bu sorunun önüne geçmek için parmak

frezele ile planlanan bir ara-kaba işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu işlemler SECO553L100Z33.0-SIRON-A kodlu, 10 mm çapındaki parmak freze ile profil çevreleme metodu ile gerçekleştirilmiştir. Kaba talaş işleminde ve ara-kaba yan frezeleme işleminde stok miktarı 0,3 mm olarak belirlenmiştir. Ara-kaba işleminin CAM görüntüleri Şekil 4.13 ile gösterilmiştir.

































Şekil 4.12 Türbin kanadının çevre frezeleme metodu kaba talaş işlemleri.



Şekil 4.13 : Türbin kanadının profil çevreleme metodu ile ara-kaba talaş işlemleri.

Parmak freze ile yapılan işlemlerin ardından yüzey formuna uygun daha hassas talaşlı imalat yapabilmek adına küresel parmak frezeyle bir ara-kaba işlemleri daha yapılmıştır. Bu ara-kaba işlemlerin ardından türbin kanadı ince talaş işlemine hazır hale gelmiştir. İnce talaş işlemlerinde ise aynı küresel takım ile ancak farklı işlemler parametreleri ile türbin kanadının talaşlı imalatı tamamlanmıştır. Ara-kaba ve ince talaş işlemlerinde kullanılan kesici takımın seçim süreci Şekil 4.14. ve 4.15. ile gösterilmiştir.

							
Name	JHP750	JHP760	JHP770	JHP780	JCO710	JH720	
Page	167-169	170-172	173-177	178-180	181-183	184-185	
Family	HPM	HPM	HPM	HPM	Hss-Co	HSM/TORNADO	
Type of mill							
Shank	Cylindrical	■	■	■	■	■	
	Weidon	■	■	■	■	■	
Number of flutes	2-4	2-4	4-5	4	4-6	3	
ICC		■	■				
Diameter range	Metric	2-25	4-25	6-25	6-25	16-50	2-16
	Inch						
Lengths available, based on length index							
	1,2	2,3	2	2	2,4	2,3,4	
Operation							
							
							
SMG							
M1		•			•	•	
M2		•			•	•	
M3		•			•	•	
M4		•			•	•	
M5		•			•	•	
S1	•			•		•	
S2	•			•		•	
S3	•			•		•	
S11	•		•		•	•	
S12	•		•		•	•	
S13	•		•		•	•	

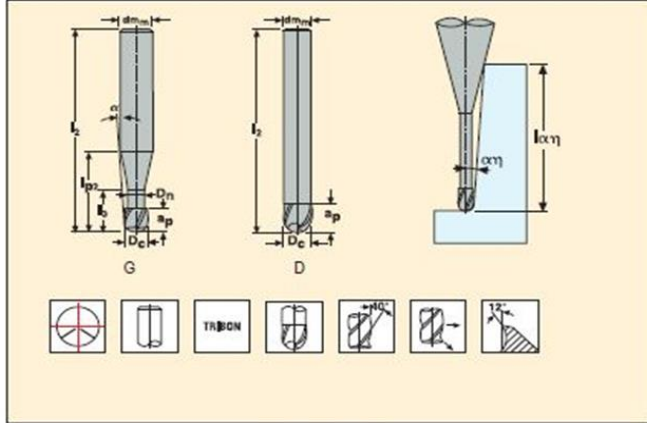
Şekil 4.14 : Ti6Al4V için uygun küresel takım için sınıf seçimi [90].

5 mm çapındaki SECO720050-TRIBON kodlu küresel parmak freze ara-kaba ve ince talaş işlemleri için kullanılmıştır. Ara-kaba işleminin CAM süreci Şekil 4.16. ile gösterilmiştir. Ara-kaba işleminde stok miktarı ince talaş işlemi için ihtiyaç duyulduğu kadar kademe kademe ayarlanmıştır. Kanat üzerindeki mavi çizgiler inceleme yapılacak bölgelerin belirlenmesi için bulunmaktadır. Her iki çizgi arasında kalan bölge farklı girdi parametreleriyle ince talaş işlemine tabi tutulmuştur. Küresel parmak freze ile yapılan ara-kaba ve ince talaş işlemlerinde yaklaşma açısı 0°, eğim açısı ise 20° olarak belirlenmiştir. Şekil 4.17. ile ince talaş işleminin CAM süreci gösterilmiştir.

JH720 – Solid carbide end mill – ball nose

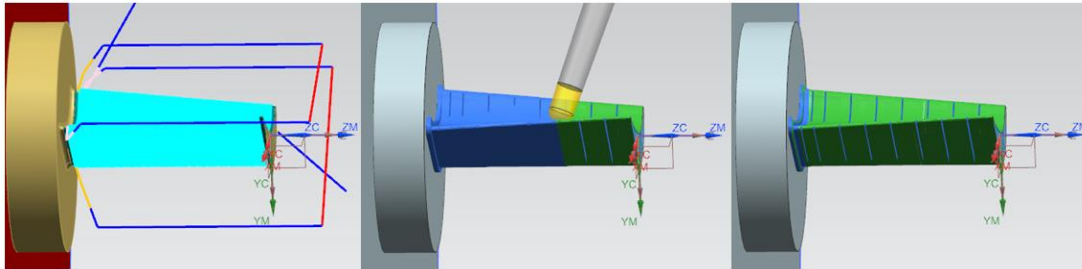


Tolerances:
 $dm_m = \pm 5$
 $D_c = -0,02/-0,04$ mm
 Radius = $\pm 0,01$ mm

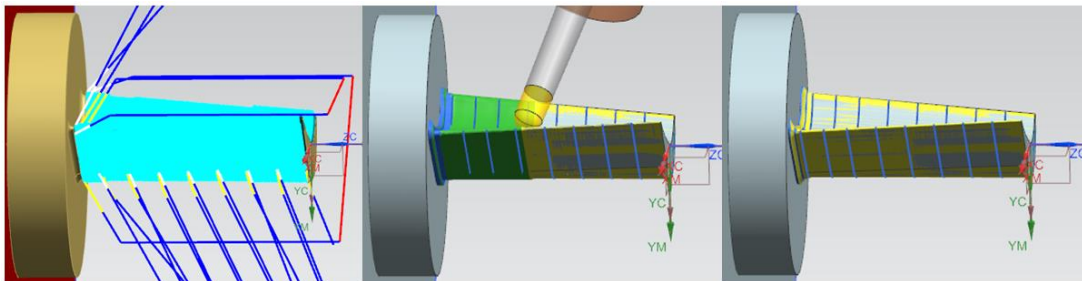


Part No.	Length index	Tool shape	Dimensions in mm										Max. cut depth rel. to α_{η} ($l_{c\eta}$, ref)*					
			D_c	dm_m	a_p	l_2	l_3	l_{p2}	D_n	α^*	z_n	0°	0.5°	1°	1.5°	2°	3°	
720020-TRIBON	2	G	2	6	3	60	6	18,1	1,9	7	3	6,5	7	7,4	7,7	8,2	9,2	
720025-TRIBON	2	G	2,5	6	4	60	6	16,7	2,4	6,5	3	6,5	7	7,3	7,7	8,1	9,1	
720030-TRIBON	2	G	3	6	4,5	60	6,5	19,1	2,8	5	3	7	8,2	8,7	9,3	10	11,9	
720035-TRIBON	2	G	3,5	6	5	65	7	23,5	3,2	3,5	3	7,5	10	11	12,4	14,1	20,4	
720040-TRIBON	2	G	4	6	6	65	8	21,6	3,7	3	3	8,5	11,1	12,2	13,7	15,6	∞	
720050-TRIBON	2	G	5	6	7,5	65	10	18,5	4,6	2	3	10,5	13,9	15,3	17,1	∞	∞	
720060-TRIBON	2	D	6	6	9	75	-	-	-	-	3	9	∞	∞	∞	∞	∞	
720080-TRIBON	2	D	8	8	12	75	-	-	-	-	3	12	∞	∞	∞	∞	∞	
720100-TRIBON	2	D	10	10	15	80	-	-	-	-	3	15	∞	∞	∞	∞	∞	
720120-TRIBON	2	D	12	12	18	90	-	-	-	-	3	18	∞	∞	∞	∞	∞	
720160-TRIBON	2	D	16	16	24	100	-	-	-	-	3	24	∞	∞	∞	∞	∞	

Şekil 4.15 : Ara-kaba ve ince talaş işlemleri için küresel takım seçimi [90].



Şekil 4.16 Küresel parmak freze ile gerçekleştirilen ara-kaba işlemleri.



Şekil 4.17 : İnce talaş işlemi.

Kaba çevresel frezeleme, ara-kaba profil çevreleme, ara-kaba akışsal frezeleme ve ince talaş akışsal frezeleme operasyonlarında kullanılan işlem parametreleri ve işlem parametreleri aralıkları Çizelge 4.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2 : Talaşlı imalat operasyonlarının işlem parametreleri.

Operasyon	Kesme Derinliği (mm)	Kesme Genişliği (mm)	Diş Başı İlerleme (mm/dev)	Kesme Hızı (m/dak)
Kaba çevresel frezeleme	8 – 12	0,5 - 0,7	0,05 - 0,07	60 - 70
Ara-kaba profil çevreleme	20	1	0,05	65
Ara-kaba akışsal frezeleme	~ 0 - 0,2	0,2	0,04	90
İnce talaş akışsal frezeleme	0,1 - 0,3	0,1 - 0,3	0,03 - 0,05	90 - 110

4.2 Üretim Aşaması

Türbin kanadının Ti6Al4V malzemesi ile üretimi sırasında gerçekleştirilen işlemler bu bölümde açıklanmıştır. İşlenen malzeme özel bir titanyum alaşımıdır ve kimyasal kompozisyonu Çizelge 4.3’te yer almaktadır. Çizelge 4.4’te ise Ti6Al4V alaşımının mekanik ve termal özellikleri belirtilmiştir. Seçilen kesici takımlar ve özellikleri Çizelge 4.5’te yer almaktadır.




Çizelge 4.3 : Ti6Al4V (Sınıf 5) alaşımının kimyasal kompozisyonu.

C	Fe	N ₂	O ₂	Al	V	H ₂	Ti
<0.08%	<0.25%	<0.05%	<0.2%	5.5-6.76%	3.5-4.5%	<0.01%	Balance

Çizelge 4.4 : Ti6Al4V alaşımının mekanik ve termal özellikleri.

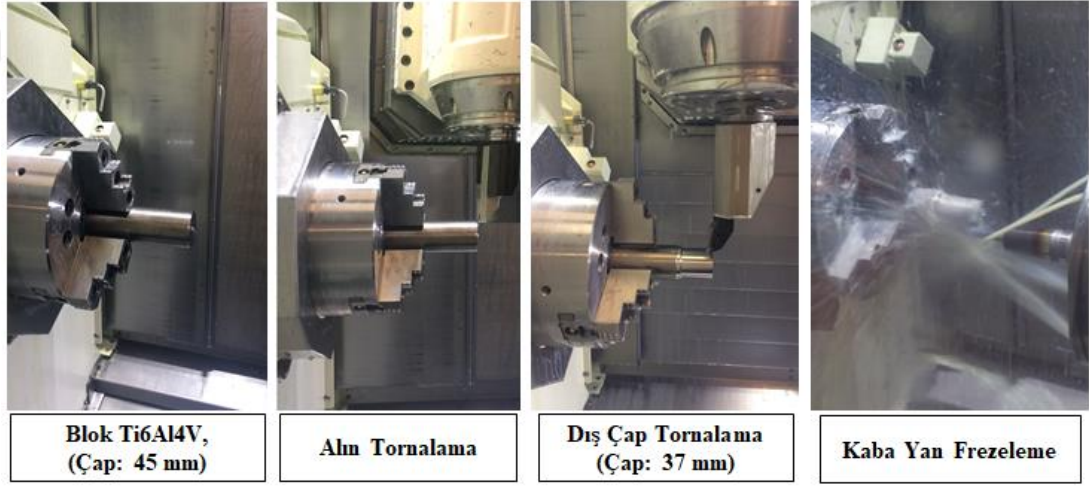
Yoğunluk (g/cm ³)	Rockwell C Sertliği (HRC)	Elastik Modül (GPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Isıl İletkenlik (W/m ^o K)	Erime Sıcaklığı (°C)
4.42	36	114	950	7.2	1650

Çizelge 4.5 : Talaşlı imalat operasyonlarında kullanılan kesici takımlar ve özellikleri [90].

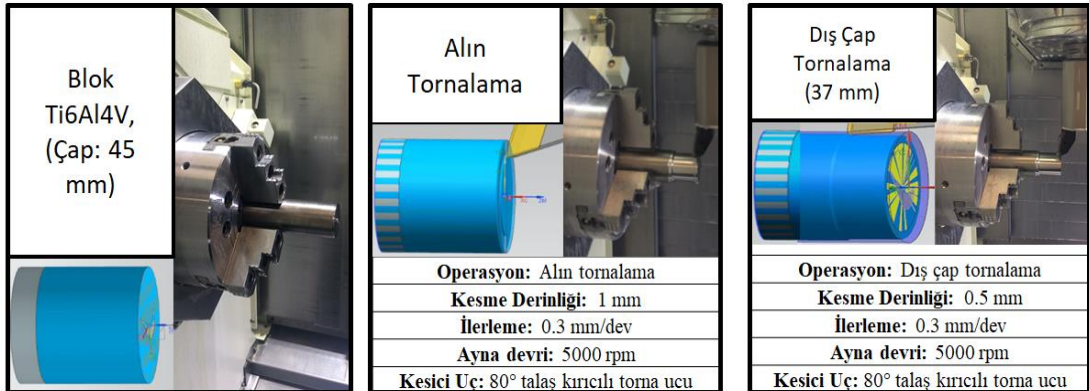
Operasyon	Kesici Takım	Takım Kodu	Tip	Kaplama	a_p (mm)	f_z (mm/dev)	V_c (m/dak)
Alın tornalama	Torna ucu 	CNGG120402-MF1	80 ° torna ucu	PVD	0.2-3.5	0.08-0.3	180-200
Dış çap tornalama							
Kaba yan frezeleme	Parmak freze 	553L120Z3.0-SIRON-A	D12 karbür parmak freze	PVD	35	0.045	65-115
Ara-kaba yan frezeleme							
Ara-kaba akışsal frezeleme	Küresel parmak freze 	720050-TRIBON	D5 yüksek hız küresel burun	PVD	6	0.195	115-165
İnce talaş akışsal frezeleme							

4.2.1 Kaba talaş işlemleri



Üretim işlemlerinin ilk sırasında torna işlemleri yer almaktadır. Bunlar alın tornalama ve dış çap tornalama işlemleridir. Kaba talaş tornalama işlemlerinin ardından kaba talaş yan frezeleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.5'te torna işlemlerinde ve kaba talaş yan frezeleme işleminde kullanılan kesici takımlar ve özellikleri belirtilmiştir. Şekil 4.18 ile kaba talaş işlemlerinin üretim aşamaları gösterilmiştir. Şekil 4.19'de ise tornalama işlemleri ve işlem parametreleri yer almaktadır. Şekil 4.20'te ise kaba talaş yan frezeleme işleminin işlem detayları yer almaktadır.



Şekil 4.18 Kaba talaş operasyonları.



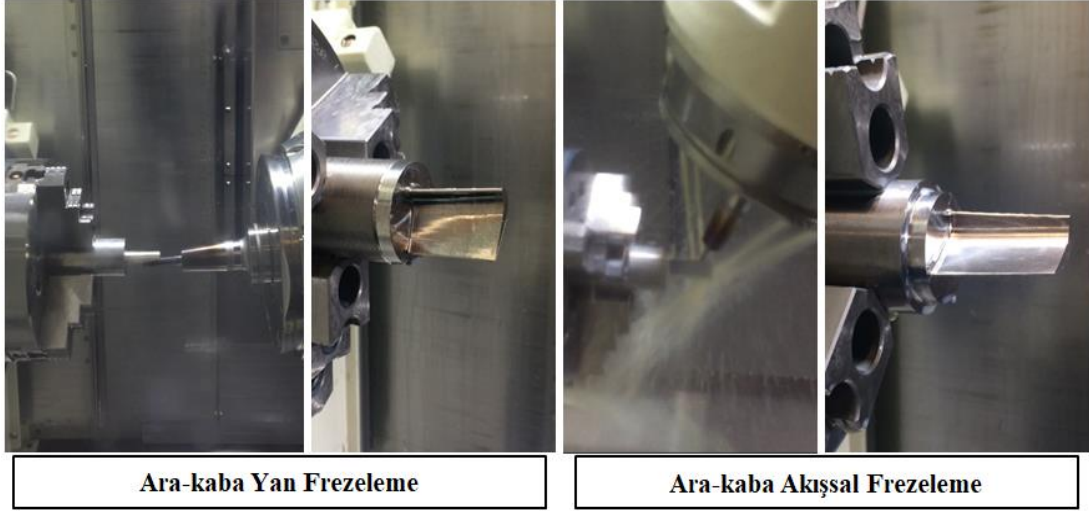
Şekil 4.19 Tornalama işlemleri ve işlem parametreleri.

Kaba Yan Frezeleme	
	
Operasyon: Çevre frezeleme	
Operasyon Alt-tipi: Boşluk frezeleme	
Kesme Stratejisi: Parça takip	
Takım Ekseni: ZM ekseni	
Kesme Genişliği: 0,5-0,7 mm	
Kesme Derinliği: 8-12 mm	
Diş Başı İlerleme: 0.05-0.07 mm	
Kesme Hızı: 60-70 m/dak	
Stok: 0.3 mm	
Kesici Takım: D12 Karbür Parmak Freze	



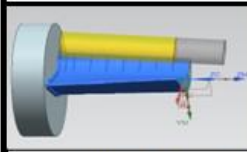
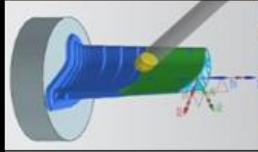
Şekil 4.20 Kaba yan frezeleme işlemi ve işlem parametreleri.

4.2.2 Ara-kaba talaş işlemleri

Türbin kanadının talaşlı imalatında ince talaş işleminin kalacak talaş miktarının istenilen miktara indirilebilmesi için kaba talaş işlemlerinin ardından, ara-kaba talaş işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bunlar ara-kaba yan frezeleme ve ara-kaba akışsal frezeleme işlemleridir. Ara-kaba işlemlerinde kullanılan kesici takımlar ve özellikleri Çizelge 4.5'te yer almaktadır. Ara-kaba yan frezeleme, ara-kaba akışsal frezeleme işlemleri ve işlemlerinin ardından elde edilen iş parçaları Şekil 4.21'de gösterilmiştir. Şekil 4.22'de ise ara-kaba işlemleri ve işlem parametreleri belirtilmiştir.



Şekil 4.21 Ara-kaba işlemleri ve çıktıları.

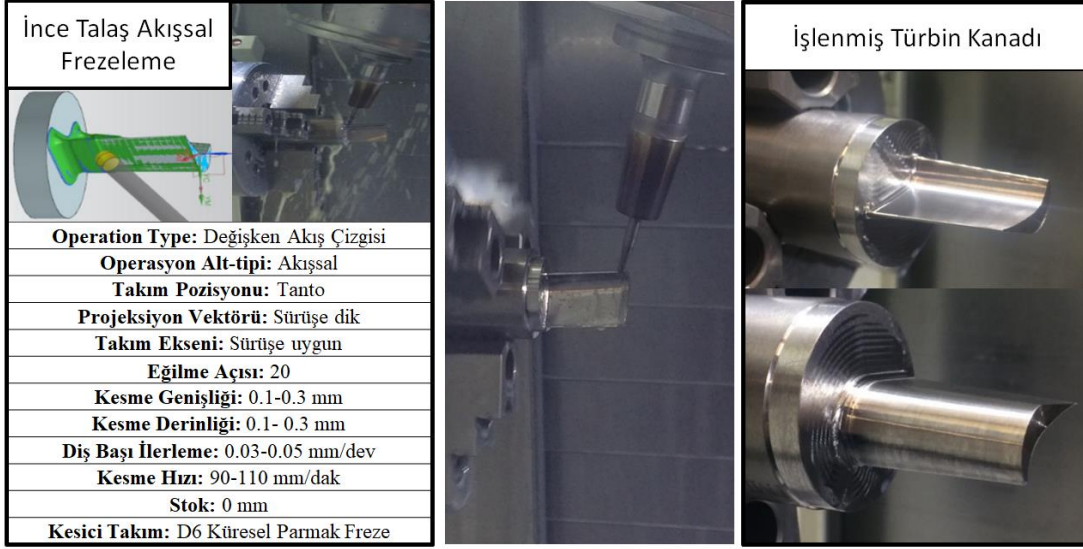
<p>Ara-kaba Yan Frezeleme</p>		<p>Ara-kaba Akışsal Frezeleme</p>	
			
<p>Operasyon: Çok eksen frezeleme</p>		<p>Operasyon: Değişken Akış Çizgisi</p>	
<p>Operasyon Alt-tipi: Profil çevreleme</p>		<p>Operasyon Alt-tipi: Akışsal</p>	
<p>Takım Ekseni: Yüzey ekseni</p>		<p>Takım Pozisyonu: Tanto</p>	
<p>Hareket Tipi: Kesme</p>		<p>Projeksiyon Vektörü: Sürtüşe dik</p>	
<p>Kesme Yönü: Tırmanma kesim</p>		<p>Takım Ekseni: Sürüşe uygun</p>	
<p>Kesme Genişliği: 1 mm</p>		<p>Eğilme Açısı: 20</p>	
<p>Kesme Derinliği: 20 mm</p>		<p>Kesme Genişliği: 0.2 mm</p>	
<p>Diş Başı İlerleme: 0.03 mm</p>		<p>Kesme Derinliği: 0 - 0.2 mm</p>	
<p>Kesme Hızı: 65 mm/dak</p>		<p>Diş Başı İlerleme: 0.04 mm/dev ($z=3$)</p>	
<p>Stok: 0.3 mm</p>		<p>Kesme Hızı: 90 mm/dak</p>	
<p>Kesici Takım:D12 Karbür Parmak Freze</p>		<p>Stok: 0.1 - 0.3 mm</p>	
		<p>Kesici Takım: D6 Küresel Parmak Freze</p>	

Şekil 4.22 Ara-kaba işlemleri ve işlem parametreleri.

4.2.3 İnce talaş işlemleri

Türbin kanadının gerçek geometrisinin elde edildiği işlem ince talaş işlemidir. Bu işlemde stoksuz çalışılmıştır. Küresel parmak freze kullanılarak akışsal frezeleme işlemi ile ince talaş işlemi gerçekleştirilmiştir. Küresel parmak freze ve özellikleri

Çizelge 4.5'te yer almaktadır. Şekil 4.23'te ince talaş işlemi, işlem parametreleri ve nihai türbin kanadı gösterilmiştir.



Şekil 4.23 : İnce talaş işlem parametreleri, ince talaş işlemi ve işlenmiş türbin kanadı.

4.3 Deney Tasarımı

Kaba talaş ve ince talaş işlemlerinin gerek işlem özellikleri kesici takımların farklılıkları sebebiyle deney tasarımları ayrı olarak planlanmıştır. Deney tasarımı Yanıt Yüzey Metodoloji için verimli bir deney alt yapısı oluşturmak için kullanılmıştır. Kaba talaş ve ince talaş işlemlerinin deneylerinde uygulanmak üzere Merkezi Kompozit Tasarım (MKT) kullanılmıştır.

4.3.1 Kaba talaş işlemi

Kaba talaş işleminin (kaba yan frezeleme) deney tasarımı için girdi parametreleri olarak kesme derinliği (mm), kesme genişliği (mm), diş başı ilerleme (mm/dev) ve kesme hızı (m/dak) belirlenmiştir. MKT'da her bir girdi parametresi 5 seviyeye bölünerek incelenmiştir. İşlem çıktıları olarak ise özgül kesme enerjisi (J/mm^3) ve talaş kaldırma debisi (mm^3/sn) belirlenmiştir. Çizelge 4.6'da kaba talaş işlemi için deney tasarımı ve deneylerin ardından ölçülen işlem çıktıları yer almaktadır.

Çizelge 4.6 : Kaba talaş işlemi için Merkezi Kompozit Tasarımı ve deney sonuçları.

Girdi Parametreleri					Yanıtlar	
İşlem Sırası	Kesme Derinliği (mm)	Kesme Genişliği (mm)	Diş başı ilerleme (mm/dev)	Kesme Hızı (m/dak)	ÖKE (J/mm ³)	TKD (mm ³ /sn)
1	9	0.6	0.055	62.5	215.85	29.54
8	11	0.6	0.055	62.5	177.38	36.11
18	9	0.8	0.055	62.5	161.99	39.39
14	11	0.8	0.055	62.5	133.47	48.14
4	9	0.6	0.065	62.5	182.76	34.91
7	11	0.6	0.065	62.5	150.19	42.67
15	9	0.8	0.065	62.5	137.31	46.55
17	11	0.8	0.065	62.5	113.06	56.9
9	9	0.6	0.055	67.5	199.96	31.91
3	11	0.6	0.055	67.5	164.17	39
13	9	0.8	0.055	67.5	150.67	42.54
2	11	0.8	0.055	67.5	123.43	52
12	9	0.6	0.065	67.5	169.57	37.71
20	11	0.6	0.065	67.5	139.19	46.09
11	9	0.8	0.065	67.5	127.23	50.28
10	11	0.8	0.065	67.5	104.8	61.45
5	10	0.7	0.06	65	147.09	43.45
6	10	0.7	0.06	65	147.04	43.45
19	10	0.7	0.06	65	147.11	43.45
16	10	0.7	0.06	65	147.09	43.45
26	8	0.7	0.06	65	183.35	34.76
21	12	0.7	0.06	65	122.9	52.14
28	10	0.5	0.06	65	204.83	31.04
27	10	0.9	0.06	65	114.69	55.86
24	10	0.7	0.05	65	176.21	36.21
30	10	0.7	0.07	65	126.29	50.69
29	10	0.7	0.06	60	159.1	40.11
23	10	0.7	0.06	70	136.67	46.79
22	10	0.7	0.06	65	147.09	43.45
25	10	0.7	0.06	65	147.09	43.45

4.3.2 İnce talaş işlemi

İnce talaş işleminin (ince talaş akışsal frezeleme) deney tasarımı için girdi parametreleri olarak kesme derinliği (mm), kesme genişliği (mm), diş başı ilerleme

(mm/dev) ve kesme hızı (m/dak) belirlenmiştir. MKT’da her bir girdi parametresi 5 seviyeye bölünerek incelenmiştir. İşlem çıktıları olarak ise özgül kesme enerjisi (J/mm^3), ortalama yüzey pürüzlülüğü (μm) ve talaş kaldırma debisi (mm^3/sn) belirlenmiştir. Çizelge 4.7’de ince talaş işlemi için deney tasarımı ve deneylerin ardından ölçülen işlem çıktıları yer almaktadır.

Çizelge 4.7 : İnce talaş işlemi için Merkezi Kompozit Tasarımı ve deney sonuçları.

Girdi Parametreleri					Yanıtlar		
İşlem Sırası	Kesme Derinliği (mm)	Kesme Genişliği (mm)	Diş başı ilerleme (mm/dev)	Kesme Hızı (m/dak)	ÖKE (J/mm^3)	TKD (mm^3/sn)	R _a (μm)
18	0.15	0.15	0.035	95	2032.5	0.238	0.533
20	0.25	0.15	0.035	95	1360.6	0.397	1.049
10	0.15	0.25	0.035	95	1259.8	0.397	1.52
1	0.25	0.25	0.035	95	854.1	0.661	1.905
15	0.15	0.15	0.045	95	1610.2	0.306	0.774
9	0.25	0.15	0.045	95	1091.5	0.51	1.321
13	0.15	0.25	0.045	95	1013.1	0.51	1.644
6	0.25	0.25	0.045	95	683.1	0.85	2.144
16	0.15	0.15	0.035	105	1869.3	0.263	0.643
17	0.25	0.15	0.035	105	1249.2	0.439	1.183
4	0.15	0.25	0.035	105	1148.9	0.439	1.641
19	0.25	0.25	0.035	105	785.1	0.731	2.003
14	0.15	0.15	0.045	105	1480.5	0.338	0.883
3	0.25	0.15	0.045	105	1005.3	0.564	1.401
5	0.15	0.25	0.045	105	932.6	0.564	1.71
7	0.25	0.25	0.045	105	627.7	0.94	2.258
11	0.2	0.2	0.04	100	1056.4	0.509	1.424
2	0.2	0.2	0.04	100	1054.4	0.509	1.423
12	0.2	0.2	0.04	100	1056.4	0.509	1.427
8	0.2	0.2	0.04	100	1052.4	0.509	1.427
27	0.1	0.2	0.04	100	1888.9	0.255	0.901
25	0.3	0.2	0.04	100	777.5	0.764	1.948
23	0.2	0.1	0.04	100	2014.5	0.255	0.601
26	0.2	0.3	0.04	100	735.7	0.764	2.248
28	0.2	0.2	0.03	100	1361.4	0.382	1.174
21	0.2	0.2	0.05	100	871.8	0.637	1.677
24	0.2	0.2	0.04	90	1154.1	0.458	1.308
22	0.2	0.2	0.04	110	974.6	0.56	1.543
30	0.2	0.2	0.04	100	1058.3	0.509	1.426
29	0.2	0.2	0.04	100	1054.4	0.509	1.426

4.4 Yanıt Yüzey Metodolojisi

Merkezi Kompozit Tasarım kullanılarak gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen işlem yanıtları Yanıt Yüzey Metodolojisi ile analiz edilmiştir. Vining ve Kowalski (2010) tarafından YYM'nin işlem parametrelerinin işlem çıktıları üzerindeki etkilerinin analiz edilmesi ve işlem çıktılarının optimizasyonu açısından etkili bir yöntem olduğu belirtilmiştir [91]. YYM uygulamak adına, deney tasarımı ve deney sonuçları istatistiksel çözümlerde yardımcı güçlü bir program olan MINITAB™ üzerine işlenmiştir. YYM kullanılarak işlem çıktılarının regresyon modelleri oluşturulmuştur. Varyans analizi ile işlem parametrelerinin işlem çıktıları üzerinde etkileri incelenmiştir. Varyans analizinde sınanan yanıt yüzey modeli %95'lik bir güven aralığında oluşturulmaktadır. Bu sebeple varyans analizinde bulunan P değeri 0,05'ten küçük olan işlem parametrelerinin seçili işlem çıktısı üzerinde etkili olduğu söylenebilmektedir. P değerlerinin eşit olduğu durumda ise F değerleri incelenmektedir. F değeri en büyük olan işlem parametresi, en etkili işlem parametresi olarak görülmektedir. Varyans analizinin ardından, işlem çıktılarının yüzey grafikleri elde edilmiş ve bu grafikler üzerinden işlem parametrelerinin değer farklılıklarının işlem yanıtlarına nasıl yansıdığı analiz edilmiştir. Kaba talaş ve ince talaş işlemleri için deney sonuçlarının analizi iki ayrı alt başlık altında açıklanmıştır.

4.4.1 Kaba talaş yan frezeleme işlem çıktılarının analizi

İlk olarak kaba talaş işleminin deney sonuçları analiz edilmiştir. Kaba talaş yan frezeleme işleminde işlem çıktıları olarak belirlenen özgül kesme enerjisi (ÖKE) ve talaş kaldırma debisi (TKD) için elde edilen regresyon modelleri sırasıyla Denklem (4.1) ve Denklem (4.2)'de yer almaktadır.

$$\begin{aligned} \text{ÖKE} = & 187.8 - 5.32*a_p - 94.5*a_e - 1414*a_e - 1.652*f_z + 0.1600* a_p* a_p & (4.1) \\ & + 22.01*a_e*a_e + 5404*f_z*f_z + 0.00956*V_c*V_c + 1.608*a_p*a_e \\ & + 20.17*a_p*f_z - 0.0176*a_p*V_c + 206.9*a_e*f_z + 0.306*a_e*V_c \\ & + 3.63*f_z*V_c \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{TKD} = & 130.3 - 8.690*a_p - 124.14*a_e - 1448*f_z - 1.337*V_c + 6.207*a_p*a_e & (4.2) \\ & + 72.42*a_p*f_z + 0.06685*a_p*V_c + 1034.5*a_e*f_z + 0.9549*a_e*V_c \\ & + 11.14*f_z*V_c \end{aligned}$$

Çizelge 4.8 ve Çizelge 4.9’da sırasıyla kaba talaş yan frezeleme işleminde ÖKE ve TKD için varyans analizi tabloları yer almaktadır. Çizelge 4.8’de işlem parametrelerinin P değerleri incelendiğinde, bütün P değerlerinin sıfıra eşit olduğu görülmektedir. Bu durumda bütün işlem parametrelerinin etkili olduğu söylenebilir. Ancak etkililik sıralaması için F değerleri göz önüne alınacaktır. F değerlerine bakıldığı zaman ise, kesme genişliğinin ÖKE üzerinde en etkili girdi parametresi olduğu görülmektedir. Kesme genişliğinin ardından, kesme derinliği en etkili ikinci girdi parametresi olarak elde edilmiştir. Üçüncü ve dördüncü sırada ise sırasıyla diş başı ilerleme ve kesme hızı yer almaktadır.

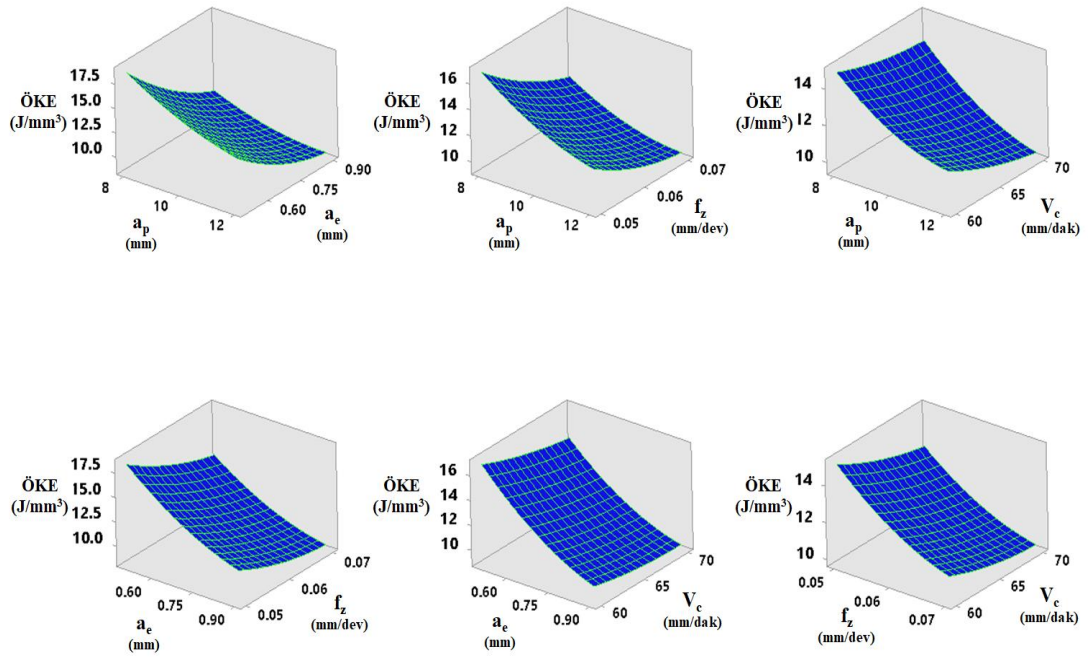
Çizelge 4.9 incelendiğinde ise yine P değerlerinin sıfıra eşit olduğu, yani bütün işlem parametrelerinin TKD üzerinde etkili olduğu görülmektedir. İşlem parametrelerinin F değerleri incelendiğinde ise TKD üzerinde en etkili işlem parametresinin kesme genişliği, ikinci en etkili işlem parametresinin ise kesme derinliği olduğu görülmektedir. Ardından ise sırasıyla diş başı ilerleme ve kesme hızı etkili parametreler arasında görülmektedir. Şekil 4.24 ve Şekil 4.25’te sırasıyla ÖKE ve TKD için oluşturulan yüzey grafikleri bulunmaktadır. Varyans analizi ile edinilen, işlem parametrelerinin etkililik düzeyleri ve işlem parametreleri üzerindeki etkileri yüzey grafikleri ile de desteklenmiştir.

Çizelge 4.8 : Kaba talaş yan frezeleme işleminde ÖKE için varyans analizi.

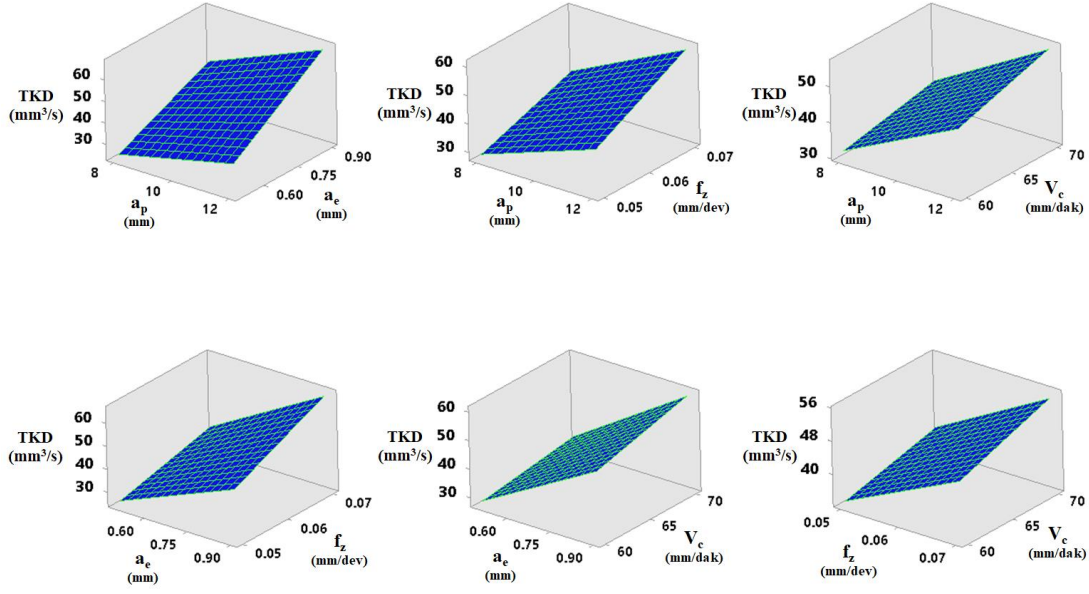
Kaynak	Serbestlik Derecesi	Katılım Oranı	Kareler Toplamı	Kareler Ort.	F-değeri	P-değeri
a_p	1	19.72%	20.628	20.6276	605.57	0
a_e	1	53.94%	56.419	56.4191	1656.31	0
f_z	1	19.14%	20.023	20.0231	587.82	0
V_c	1	3.39%	3.548	3.5477	104.15	0
Hata	25	3.81%	0.477	0.0341		
Toplam	29	100.00%				

Çizelge 4.9 : Kaba talaş yan frezeleme işleminde TKD için varyans analizi.

Kaynak	Serbestlik Derecesi	Katılım Oranı	Kareler Toplamı	Kareler Ort.	F-değeri	P-değeri
a_p	1	25.54%	453.08	453.082	103265	0
a_e	1	52.13%	924.66	924.657	210745	0
f_z	1	17.74%	314.64	314.64	71711.8	0
V_c	1	3.78%	67.02	67.024	15275.9	0
Hata	25	0.81%	0.06	0.004		
Toplam	29	100.00%				



Şekil 4.24 : Kaba talaş yan frezeleme işlemi ÖKE için yüzey grafikleri.



Şekil 4.25 : Kaba talaş yan frezeleme işlemi TKD için yüzey grafikleri.

4.4.2 İnce talaş akışsal frezeleme işlem çıktılarının analizi

Kaba talaş işleminin analizinin ardından, ince talaş akışsal frezeleme işleminin deney sonuçları analiz edilmiştir. İnce talaş akışsal frezeleme işleminde işlem çıktıları olarak belirlenen özgül kesme enerjisi (ÖKE), talaş kaldırma debisi (TKD) ve ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) için elde edilen regresyon modelleri sırasıyla Denklem (4.3), Denklem (4.4) ve Denklem (4.5)'te yer almaktadır.

$$\begin{aligned} \text{ÖKE} = & 12134 - 27906 \cdot a_p - 31756 \cdot a_e - 130173 \cdot f_z - 8.6 \cdot V_c + 25478 \cdot a_p \cdot a_p \quad (4.3) \\ & + 29666 \cdot a_e \cdot a_e + 381369 \cdot f_z \cdot f_z - 0.141 \cdot V_c \cdot V_c + 22033 \cdot a_p \cdot a_e \\ & + 108154 \cdot a_p \cdot f_z + 40.5 \cdot a_p \cdot V_c + 133157 \cdot a_e \cdot f_z + 43.6 \cdot a_e \cdot V_c \\ & + 256 \cdot f_z \cdot V_c \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{TKD} = & 1.428 - 5.093 \cdot a_p - 5.093 \cdot a_e - 25.46 \cdot f_z - 0.01019 \cdot V_c \quad (4.4) \\ & + 12.732 \cdot a_p \cdot a_e + 63.66 \cdot a_p \cdot f_z + 0.02546 \cdot a_p \cdot V_c + 63.66 \cdot a_e \cdot f_z \\ & + 0.02546 \cdot a_e \cdot V_c + 0.1273 \cdot f_z \cdot V_c \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_a = & -4.61 + 3.36 \cdot a_p + 14.27 \cdot a_e + 50.3 \cdot f_z + 0.0364 \cdot V_c - 0.87 \cdot a_p \cdot a_p - \quad (4.5) \\ & 0.88 \cdot a_e \cdot a_e - 78 \cdot f_z \cdot f_z - 0.000078 \cdot V_c \cdot V_c - 8.13 \cdot a_p \cdot a_e + 77.4 \cdot a_p \cdot f_z \\ & + 0.0052 \cdot a_p \cdot V_c - 70.9 \cdot a_e \cdot f_z - 0.0084 \cdot a_e \cdot V_c - 0.231 \cdot f_z \cdot V_c \end{aligned}$$

Çizelge 4.10, Çizelge 4.11 ve Çizelge 4.12'de sırasıyla ince talaş akışsal frezeleme işleminde ÖKE, TKD ve R_a için varyans analizi tabloları yer almaktadır. Çizelge

4.10'da işlem parametrelerinin P değerleri incelendiğinde, bütün P değerlerinin sıfıra eşit olduğu görülmektedir. F değerleri incelendiği zaman ise, kesme genişliğinin ince talaş akışsal frezeleme işleminde ÖKE üzerinde en etkili girdi parametresi olduğu görülmektedir. Kesme genişliğinin ardından, kesme derinliği, diş başı ilerleme ve kesme hızı sırasıyla etkili işlem parametreleri olarak yer almaktadır.

İnce talaş akışsal frezeleme işleminin işlem parametrelerinin TKD üzerinde etkilerini belirlemek için Çizelge 4.11. incelendiğinde ise yine P değerlerinin sıfıra eşit olduğu, yani bütün işlem parametrelerinin TKD üzerinde etkili olduğu görülmektedir. İşlem parametrelerinin F değerleri incelendiğinde ise TKD üzerinde en etkili iki işlem parametresinin kesme genişliği ve kesme derinliği olduğu görülmektedir. Ardından ise sırasıyla diş başı ilerleme ve kesme hızı etkili parametreler arasında görülmektedir.

Çizelge 4.12. incelendiğinde R_a üzerinde en etkili ince talaş akışsal frezeleme işlem parametresinin kesme genişliği olduğu görülmektedir. Ardından ise sırasıyla kesme derinliği, diş başı ilerleme ve kesme hızı en etkili işlem parametreleridir.

Şekil 4.26., Şekil 4.27. ve Şekil 4.28'de sırasıyla ÖKE, TKD ve R_a için oluşturulan yüzey grafikleri bulunmaktadır. Yüzey grafiklerinde işlem parametrelerinin, yanıtlar üzerindeki etkileri ve yanıt yüzeyin işlem parametrelerinin değişimi karşılığında gösterdiği eğilim rahatlıkla görülebilmektedir. Yüzey grafikleri varyans analizi sonuçlarıyla örtüşür niteliktedir.

Çizelge 4.10 : Kaba talaş yan frezeleme işleminde TKD için varyans analizi.

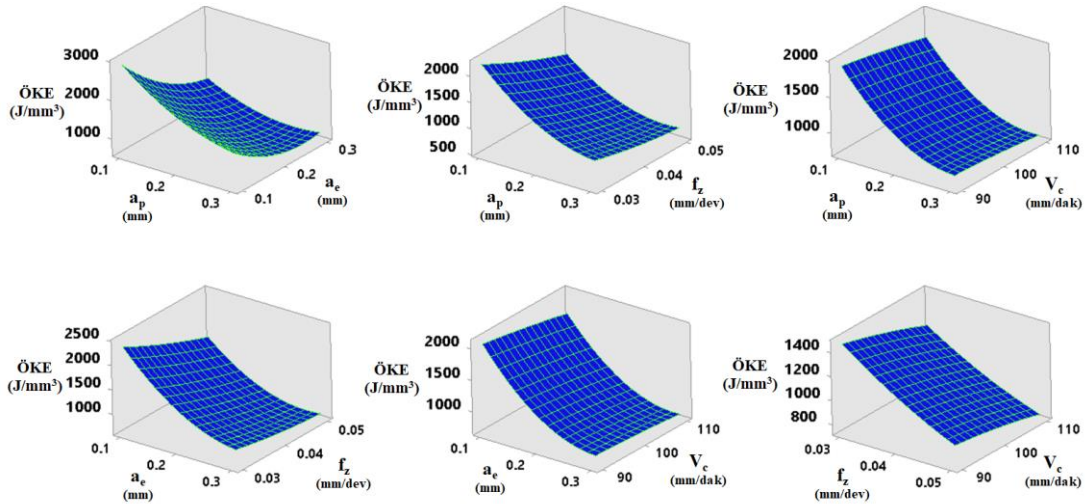
Kaynak	Serbestlik Derecesi	Katılım Oranı	Kareler Toplamı	Kareler Ort.	F-değeri	P-değeri
a_p	1	34.01%	1456765	1456765	773.81	0
a_e	1	47.02%	2013956	2013956	1069.79	0
f_z	1	9.32%	399006	399006	211.95	0
V_c	1	1.32%	56585	56585	30.06	0
Hata	25	8.33%	26356	1883		
Toplam	29	100.00%				

Çizelge 4.11 : Kaba talaş yan frezeleme işleminde TKD için varyans analizi.

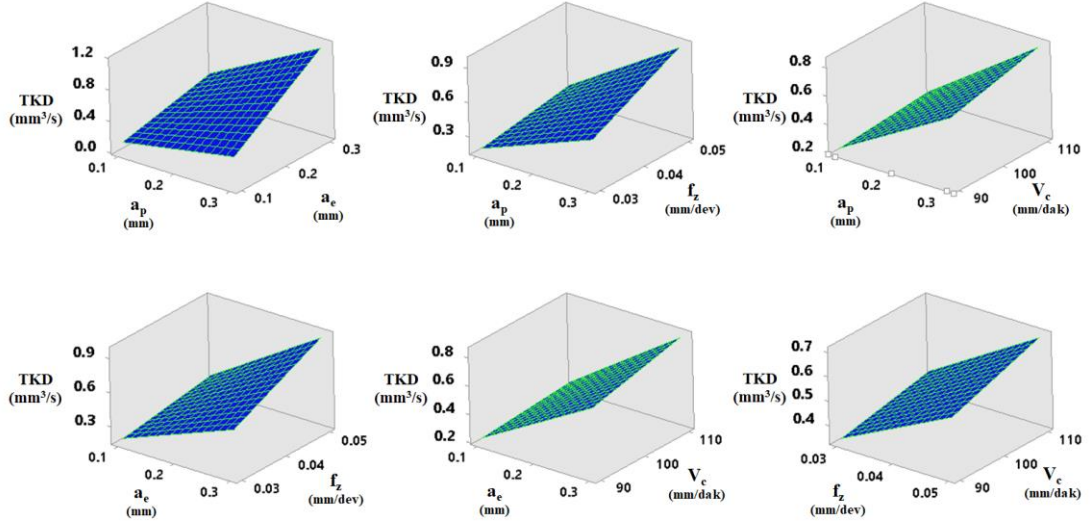
Kaynak	Serbestlik Derecesi	Katılım Oranı	Kareler Toplamı	Kareler Ort.	F-değeri	P-değeri
a_p	1	42.43%	0.38907	0.38907	17307	0
a_e	1	42.43%	0.38907	0.38907	17307	0
f_z	1	10.61%	0.09727	0.09727	4326.76	0
V_c	1	1.70%	0.01556	0.01556	692.28	0
Hata	25	2.83%	0.00032	2.2E-05		
Toplam	29	100.00%				

Çizelge 4.12 : Kaba talaş yan frezeleme işleminde TKD için varyans analizi.

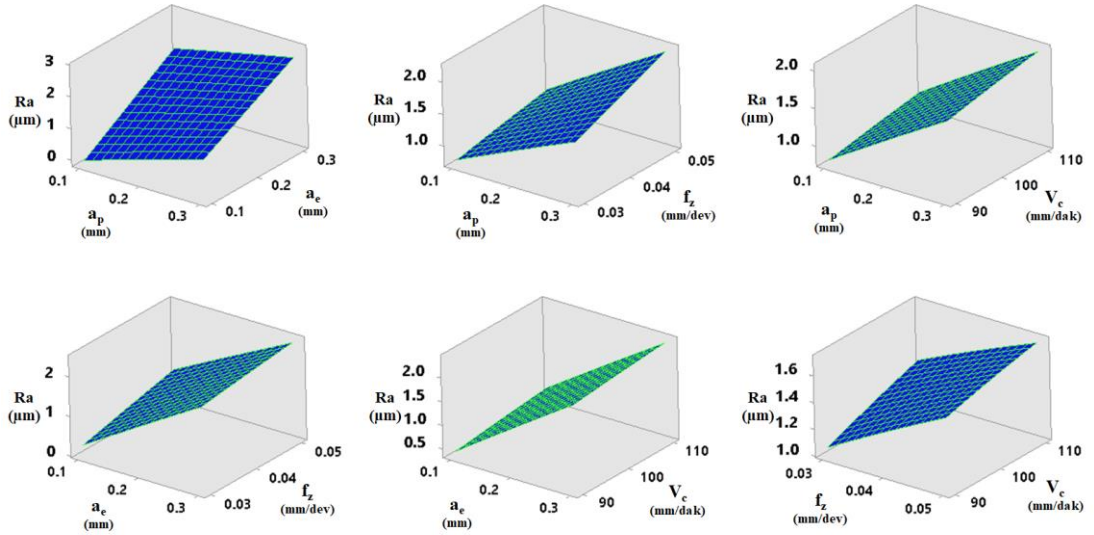
Kaynak	Serbestlik Derecesi	Katılım Oranı	Kareler Toplamı	Kareler Ort.	F-değeri	P-değeri
a_p	1	23.68%	1.50517	1.50517	1400.73	0
a_e	1	70.01%	4.44936	4.44936	4140.64	0
f_z	1	4.66%	0.29607	0.29607	275.53	0
V_c	1	1.11%	0.07067	0.07067	65.77	0
Hata	25	0.54%	0.01504	0.00107		
Toplam	29	100.00%				



Şekil 4.26 : İnce talaş akışsal frezeleme işlemi ÖKE için yüzey grafikleri.



Şekil 4.27 : İnce talaş akışsal frezeleme işlemi TKD için yüzey grafikleri.



Şekil 4.28 : İnce talaş akışsal frezeleme işlemi Ra için yüzey grafikleri.

4.5 Çok Amaçlı Parçacık Sürü Optimizasyonu

Kaba talaş yan frezeleme ve ince talaş akışsal frezeleme işlemlerinin, işlem çıktılarının optimizasyonunda, problemlerin amaç fonksiyonları olarak YYM'den elde edilen regresyon modelleri kullanılmıştır. İşlem parametreleri karar değişkeni olarak alıpın, problem kısıtlarını ise işlem parametrelerinin aralıkları belirlemiştir. Kaba talaş yan frezeleme işlemi iki-amaçlı; ince talaş akışsal frezeleme işlemi ise üç-amaçlı olarak çözdürülmüştür.

4.5.1 Kaba talaş yan frezeleme işlem optimizasyonu

Kaba talaş yan frezeleme işleminde minimum ÖKE ve maksimum MRR amaçları benimsenmiştir. Problemin amaç fonksiyonları Denklem (4.1) ve Denklem (4.2)'de yer alan regresyon modelleridir.

Denklem (4.6), (4.7), (4.8) ve (4.9)'da kaba talaş yan frezeleme işleminin matematiksel modeli gösterilmiştir. Denklem (4.6) ve Denklem (4.7)'de amaç fonksiyonları, Denklem (4.8) ve Denklem (4.9)'da 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 4.13'te kaba talaş yan frezeleme işlem parametrelerinin alt ve üst limitleri yer almaktadır.

$$\text{Min. } f_{ÖKE} = ÖKE(a_p, a_e, f_z, V_c) \quad (4.6)$$

$$\text{Max. } f_{TKD} = TKD(a_p, a_e, f_z, V_c) \quad (4.7)$$

Öyle ki:

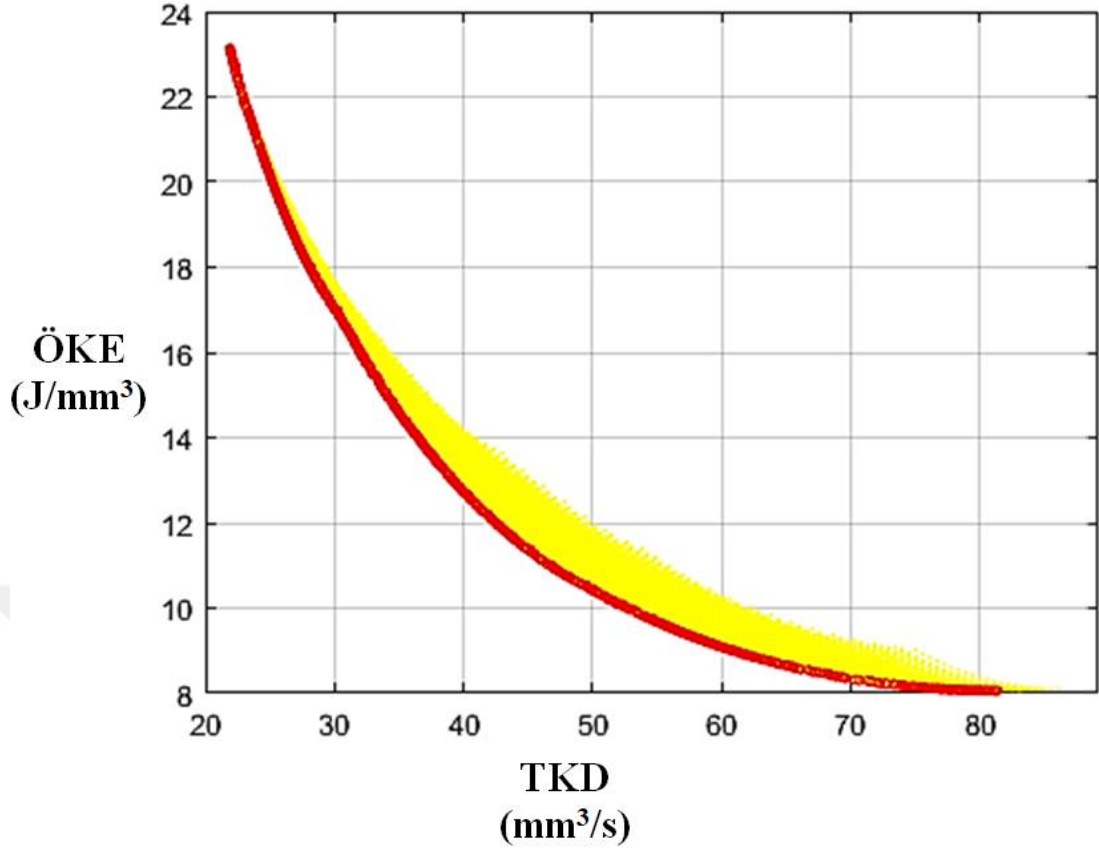
$$g_i - ÜstLimit_i \leq 0, \quad i=1:4 \quad (4.8)$$

$$AltLimit_i - g_i \leq 0, \quad i=1:4 \quad (4.9)$$

Çizelge 4.13 : Kaba talaş yan frezeleme işlem parametrelerinin alt ve üst limitleri.

İşlem Parametresi	Alt Limit	Üst Limit
Kesme Derinliği (a_p) (mm)	8	12
Kesme Genişliği (a_e) (mm)	0.5	0.9
Diş Başı İlerleme (f_z) (mm/rev)	0.05	0.07
Kesme Hızı (V_c) (mm/dak)	60	70

Şekil 4.29'da kaba talaş yan frezeleme işlemi için optimal çözüm seti yer almaktadır. Bu çözüm seti sayesinde, değişkenlik gösteren TKD değerlerine karşılık elde edilecek ÖKE değerleri yer almaktadır. Bu sayede istenilen TKD hedefi ve minimum ÖKE değeri için işlem parametreleri seçilebilmektedir.



Şekil 4.29 : Kaba talaş yan frezeleme işlemi optimal çözüm seti.

4.5.2 İnce talaş akışsal frezeleme işlem optimizasyonu

Ti6Al4V türbin kanadının ince talaş işleminin optimizasyonda minimum ÖKE, maksimum TKD ve minimum R_a amaçlanmıştır. Problemin amaç fonksiyonları olarak Denklem (4.3), Denklem (4.4) ve Denklem (4.5)'te yer alan regresyon modelleri kullanılmıştır.

Denklem (4.10), (4.11), (4.12), (4.13), ve (4.14)'te ince talaş akışsal frezeleme işleminin matematiksel modeli yer almaktadır. Denklem (4.10), Denklem (4.11) ve Denklem (4.12)'de amaç fonksiyonları, Denklem (4.13) ve Denklem (4.14)'te ise problem kısıtları yer almaktadır. Çizelge 4.14'te ince talaş akışsal frezeleme işleminin, işlem parametrelerinin alt ve üst limitleri bulunmaktadır.

$$\mathbf{Min} f_{\text{ÖKE}} = \text{ÖKE} (a_p, a_e, f_z, V_c) \quad (4.10)$$

$$\mathbf{Min} f_{R_a} = R_a (a_p, a_e, f_z, V_c) \quad (4.11)$$

$$Max f_{TKD} = TKD (a_p, a_e, f_z, V_c) \quad (4.12)$$

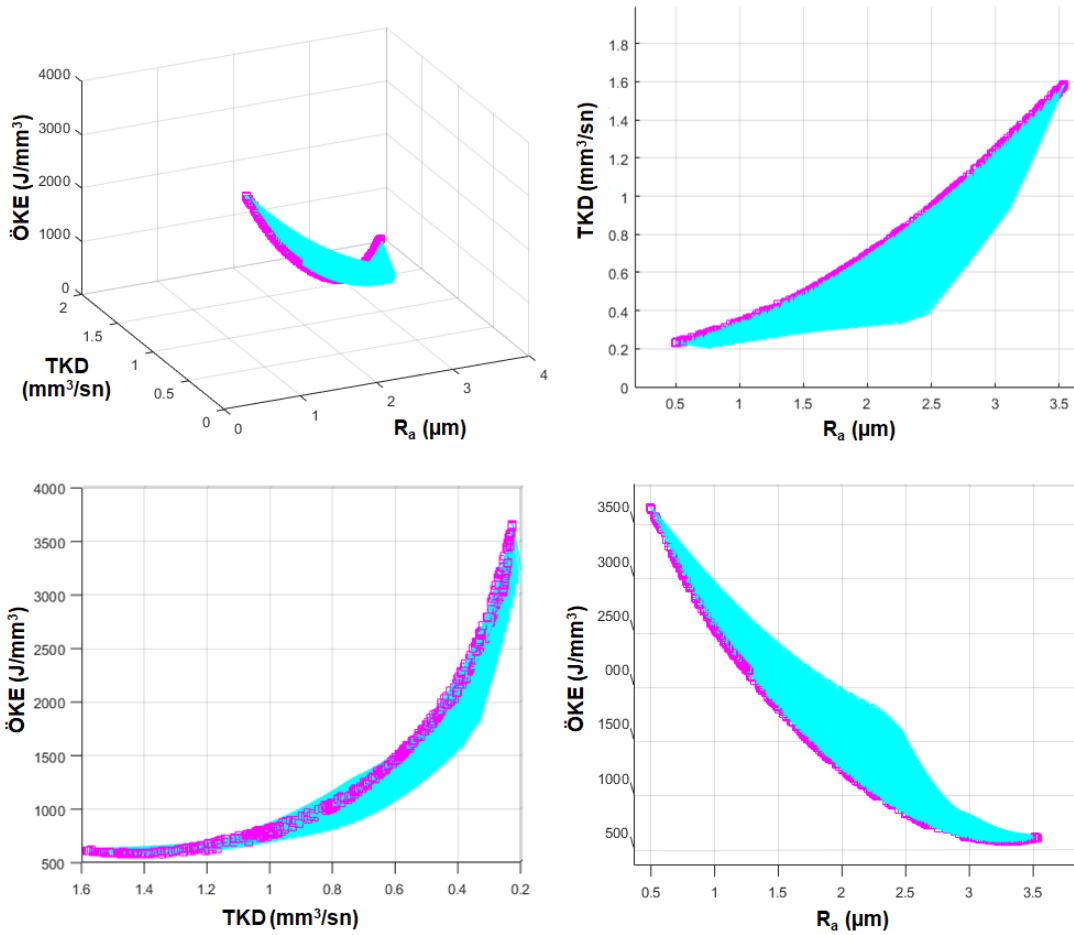
Öyle ki:

$$g_i - ÜstLimit_i \leq 0, \quad i=1:4 \quad (4.13)$$

$$AltLimit_i - g_i \leq 0, \quad i=1:4 \quad (4.14)$$

Çizelge 4.14 : Kaba talaş yan frezeleme işlem parametrelerinin alt ve üst limitleri.

İşlem Parametresi	Alt Limit	Üst Limit
Kesme Derinliği (a_p) (mm)	0,1	0,3
Kesme Genişliği (a_e) (mm)	0,1	0,3
Diş Başı İlerleme (f_z) (mm/dev)	0,03	0,05
Kesme Hızı (V_c) (mm/dak)	90	110



Şekil 4.30 : İnce talaş akışsal frezeleme işlemi için Pareto optimal çözüm seti.

İnce talaş akışsal frezeleme işlemi için elde edilen Pareto optimal çözüm seti Şekil 4.30'da yer almaktadır. Özgül kesme enerjisi, talaş kaldırma debisi ve ortalama yüzey pürüzlülüğü işlem çıktılarının birbirlerine göre ödünleşmeleri Pareto optimal çözüm setinden incelenebilmektedir. Pareto optimal çözüm setinde bulunan çözümler içerisinden işlem gereklerine uygun stratejiler belirlenip, bu belirlenen stratejilere ulaştırarak işlem parametreleri elde edilebilmektedir. İnce talaş işlemi için oluşturulan stratejiler ve belirlenen strateji seçenekleri için gerekli işlem parametreleri Çizelge 4.16'da yer almaktadır.

4.6 Doğrulama

Kaba talaş yan frezeleme işleminin doğrulaması "Verimli kaba talaş işlemi" stratejisi üzerinden gerçekleştirilmiştir. Kaba talaş yan frezeleme işleminin optimal çözüm setinden yüksek TKD ve düşük ÖKE çıktılarına sahip işlem parametresi seti seçilmiştir. Seçili işlem parametreleri ile deneyler gerçekleştirilmiştir. İşlem parametrelerinin değerleri, ÇAPSO değerleri, deney sonuçları ve yüzde hatalar Çizelge 4.17'de yer almaktadır.

Çizelge 4.15 : Kaba talaş yan frezeleme işlemi doğrulama verileri.

Strateji	Parametre Değerleri		Model Çıktıları		Deney Sonuçları		Yüzde Hata (%)	
			TKD (mm ³ /sn)	ÖKE (J/mm ³)	TKD (mm ³ /sn)	ÖKE (J/mm ³)	TKD (mm ³ /sn)	ÖKE (J/mm ³)
Verimli kaba talaş işlemi	a_p (mm)	12	85,6	88,1	83,3	80,4	2,68	8,84
	a_e (mm)	1						
	f_z (mm/dev)	0,07						
	V_c (mm/dak)	70						

İnce talaş akışsal frezeleme işleminin doğrulaması Çizelge 4.16'da bulunan stratejiler üzerinden yapılmıştır. Doğrulama sonuçları ve yüzde hataları Çizelge 4.17'de yer almaktadır.

Çizelge 4.16 : İnce talaş akışsal frezeleme işlemi için işlem stratejileri ve parametre değerleri.

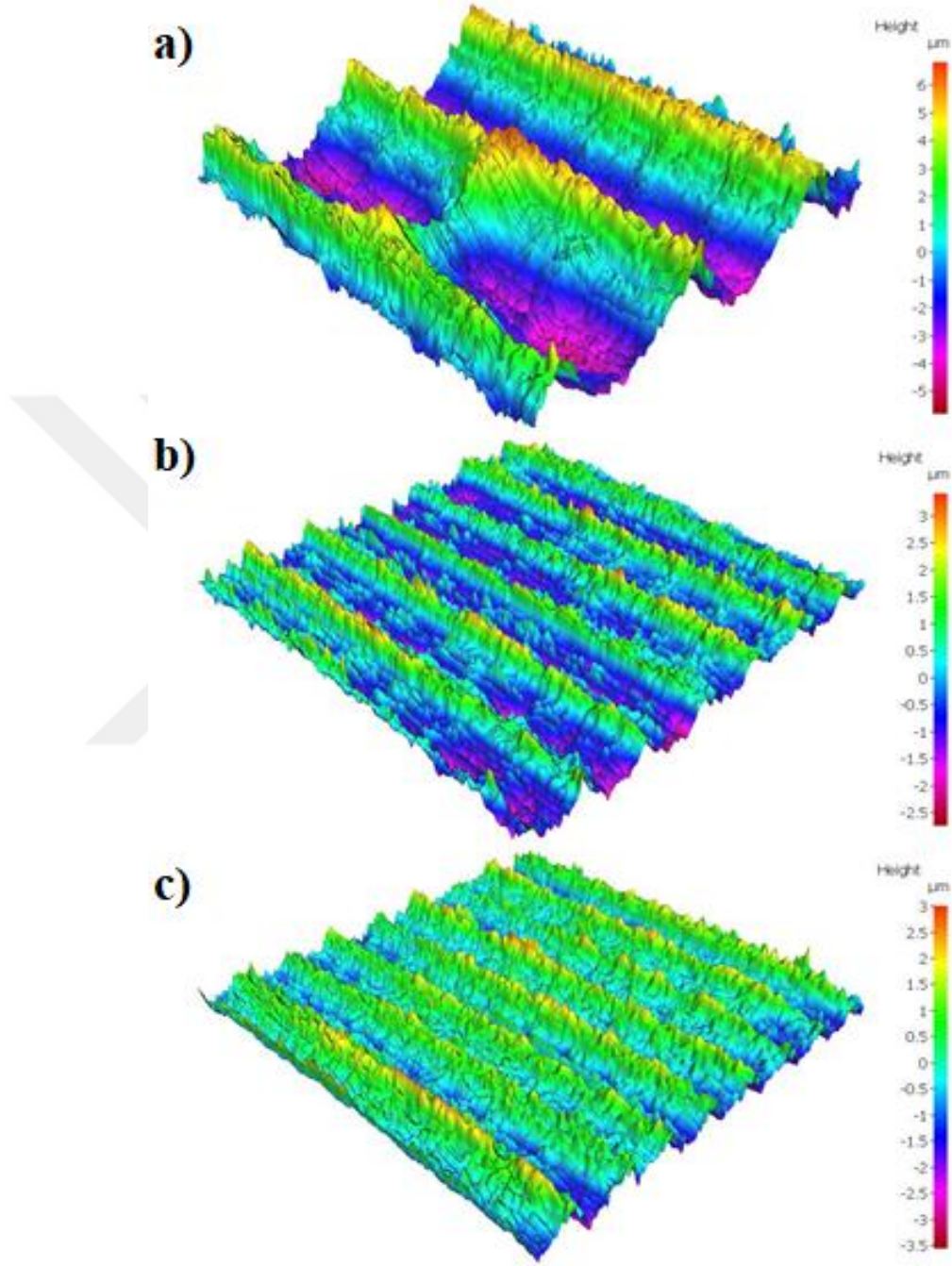
Strateji	İşlem Parametreleri			
	a_p (mm)	a_e (mm)	f_z (mm/dev)	V_c (mm/dak)
1. Maksimum performans ve enerji verimliliği	0.3	0.3	0.05	110
2. Enerji tasarrufu ile makul kalite	0.204	0.127	0.037	93.43
3. Mükemmel yüzey kalitesi	0.1	0.1	0.03	90

Çizelge 4.17 : İnce talaş akışsal frezeleme işlemi için işlem stratejileri için doğrulama verileri.

Strateji	İşlem Çıktısı	Model Çıktıları	Deney Sonuçları	Yüzde Hata (%)
1. Maksimum performans ve enerji verimliliği	R_a (μm)	2.421	2.316	4.5
	TKD (mm^3/sn)	1.514	1.576	3.9
	ÖKE (J/mm^3)	777	714	8.8
2. Enerji tasarrufu ile makul kalite	R_a (μm)	1.068	1.083	1.4
	TKD (mm^3/sn)	0.289	0.285	1.4
	ÖKE (J/mm^3)	1779	1722	3.3
3. Mükemmel yüzey kalitesi	R_a (μm)	0.442	0.47	6
	TKD (mm^3/sn)	0.081	0.086	5.6
	ÖKE (J/mm^3)	4633	4596	0.8

Çizelge 4.17’de yer alan kaba talaş işlemine ait doğrulama sonuçları ve hataları incelendiğinde, hata oranlarının kabul edilebilir değerlerde olduğu görülmektedir. Çizelge 4.17’de ise en düşük hatalar ortalamasının 2. strateji olan “Enerji tasarrufu ile makul kalite” ile elde edildiği görülmüştür. Bu durum modelin uç nokta çözümler için ürettiği çıktı değerlerinin gerçek hayatta uygulanırken bir miktar sapmaya

uğradığını göstermektedir. Makinenin toleransı, ortam koşulları, ölçüm hataları da bu sapmayı etkileyebilecek önemli unsurlardır. Yine de 1. ve 3. stratejilerin hataları da kabul edilebilir sınırlar içerisinde.



Şekil 4.31 : İnce talaş doğrulama işlemlerinin yüzey topoğrafyaları (a) 1. strateji, (b) 2. strateji, (c) 3. strateji.

Tek yönde yapılan yüzey pürüzlülüğü ölçümlerine ek olarak, düşük, orta ve yüksek R_a değerlerine sahip yüzeyler için optik form ve pürüzlülük ölçümü Atılım

Üniversitesi, Metal Şekillendirme Mükemmelliyet Merkezi'nde yer alan Alicona markalı cihaz ile gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde yüzey topografyası elde edilmiş ve Şekil 4.31'de gösterilmiştir. Türbin kanadının topografyası 20X lens, 100nm dikey ve 3µm yanal çözünürlük ile ölçülmüştür. Ayrıca $L_c = 800 \mu\text{m}$ 'lik bir dalga boyu ile ölçülmüştür. Sırasıyla yüzeylerde işlem parametrelerinin değişimi ile oluşan yüzey topografları ölçülen R_a değerleri ile uyum göstermektedir.



5. UYGULAMA 2: GELİŞTİRİLEN METODOLOJİNİN KESİCİ TAKIM EĞİLME AÇILARI İNCELENEREK İYİLEŞTİRİLMESİ

Ti6Al4V alaşımı ile türbin bıçağı talaşlı imalatı incelenmiş, kaba ve ince talaş frezeleme işlemleri için işlem parametreleri optimize edilmiştir. İşlem çıktıları üzerinde etkili işlem parametreleri belirlenmiştir. Ayrıca, işlem parametrelerinin değerleri için elde edilecek işlem çıktılarına yönelik regresyon modelleri oluşturulmuştur. Bu sayede Ti6Al4V türbin kanadının torna-freze takım tezgahlarında üretimi için yeterli alt yapı sağlanmıştır.

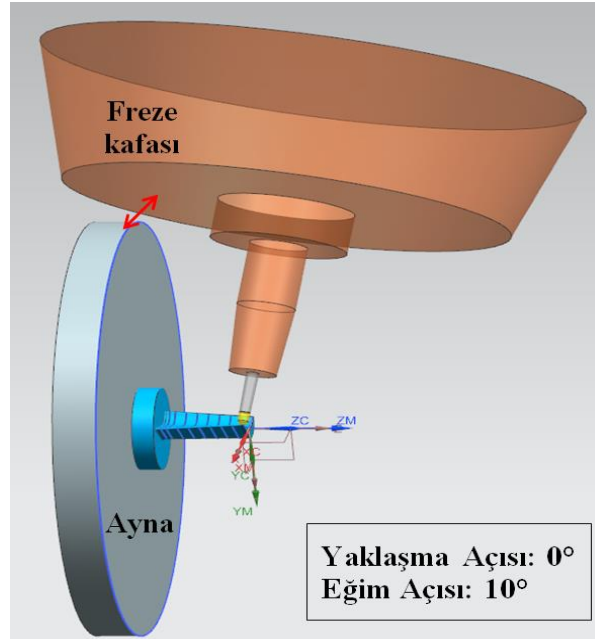
İnce talaş akışsal frezeleme işleminde küresel parmak freze kullanılmaktadır. Küresel parmak frezeler, talaş kaldırma esnasında ilerleme yönünde ve ilerlemeye dik açılar alabilmektedir. Hatta verimli bir talaşlı imalat olabilmesi için mutlaka belirli bir açı ile çalışılması gerekmektedir. İlerleme yönünde alınan açı yaklaşma açısı, ilerleme yönüne dik alınan açı ise eğim açısı olarak adlandırılmaktadır. Eğim ve yaklaşma açısı, kesici takımın ve etkileşim bölgesinin yönünü belirlemektedir. Ayrıca, sürecin mekaniğini ve dinamiğini etkilemektedir. Yerel talaş kalınlığı, kesme kuvveti katsayıları, dinamik kuvvetler ve talaşlı imalat istikrarı eğim ve yaklaşma açılarından etkilenmektedir. Takımın yanlış yönlendirilmesi, daha yüksek kesme kuvveti, yüzey form hataları ve işlem kararsızlığı nedeniyle üretkenliğin ve parça kalitesinin düşmesine neden olabilmektedir [3]. Bu sebeple, küresel parmak frezeler ile frezeleme işlemlerinde eğim ve yaklaşma açısı çok önemli parametrelerdir.

Bu bölümde öncelikle farklı eğim ve yaklaşma açılarına sahip ince talaş akışsal frezeleme işlemleri ile türbin kanatları işlenmiştir. Böylelikle eğim ve yaklaşma açılarının özgül kesme enerjisi ve ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerine etkileri incelenmiştir. Ardından türbin bıçaklarının torna-freze tezgahlarında işlenmesi için geliştirilen metodoloji eğim ve yaklaşma açıları ile birlikte uygulanmıştır. Bu uygulama ile eğim ve yaklaşma açılarının türbin kanadı işlenmesinde eğim ve yaklaşma açılarının kesme genişliği ve diş başı ilerleme parametreleri ile birlikte özgül kesme enerjisi, ortalama yüzey pürüzlülüğü ve talaş kaldırma debisi çıktıları

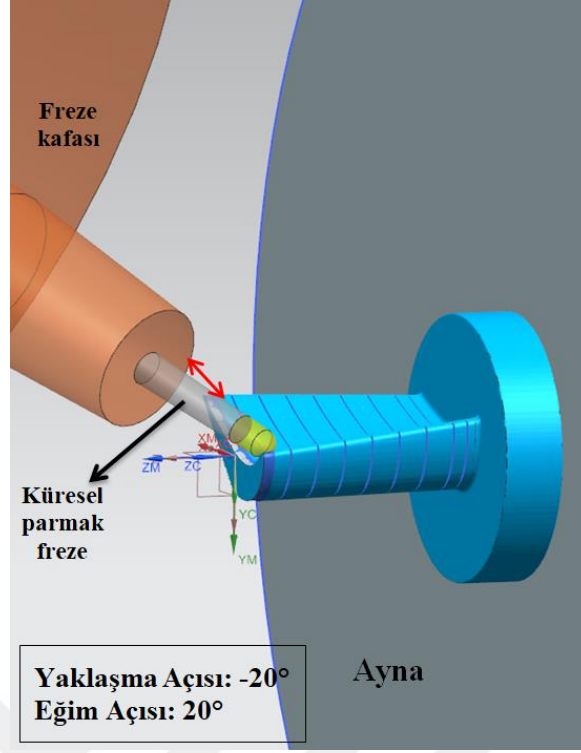
üzerine etkileri belirlenmiş, regresyon modelleri ve yüzey grafikleri oluşturulmuştur. Ayrıca, Çok-Amaçlı Parçacık Sürü Optimizasyon yöntemi kullanılarak, işlem optimize edilmiş ve Pareto optimal çözüm seti oluşturulmuştur.

5.1 İnce Talaş Akışsal Frezeleme İşleminde Eğim ve Yaklaşma Açılarının Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü Üzerine Etkilerinin İncelenmesi

Eğim ve yaklaşma açıları türbin kanadının karmaşık geometrisi sebebiyle belirli aralıklarda incelenmiştir. Deneylerde SECO720050-TRIBON kodlu, 5 mm çapa sahip küresel karbür parmak freze kullanılmıştır. Türbin kanadının eğimli geometrisinden dolayı, işlem sırasında freze kafası ile stoğun bağlı olduğu ayna arasındaki mesafe, dar eğim açılarında çarpma riskine yol açmaktadır. Bu sebeple 10° 'den daha küçük eğim açıları denenememiştir. Şekil 5.1'de bu durum gösterilmiştir. Literatürde çeşitli kaynaklarda eğim açısının yüzey normaline göre ortalama yüzey pürüzlülüğü açısından simetrik bir performans sergilediği belirtildiğinden bu durum sorun teşkil etmemektedir [70]. Bir başka riskli durum negatif yaklaşma açılarında meydana gelmektedir. Negatif yaklaşma açılarında kesici takım türbin kanadına oldukça yakın ilerlemektedir. Bu sebeple -20° 'nin altında yaklaşma açıları denenememiştir.



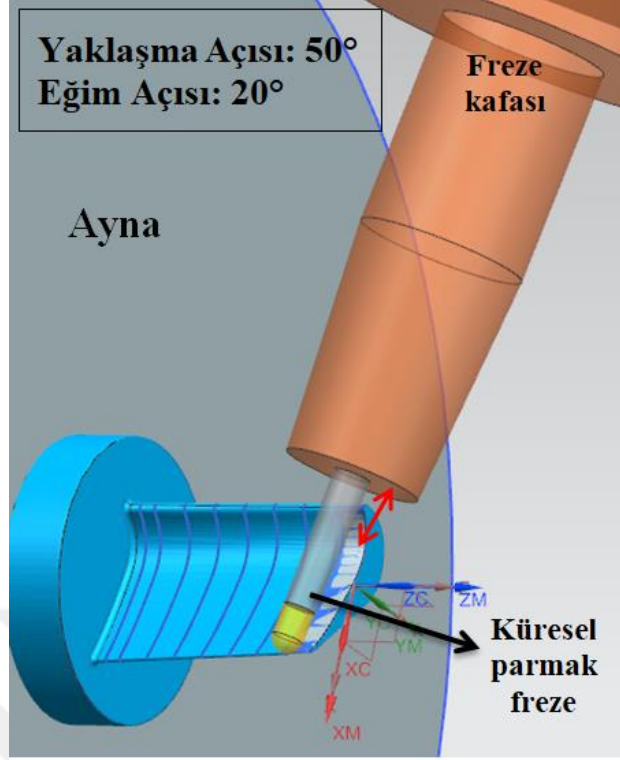
Şekil 5.1 : Dar eğim açılarında freze kafası ve aynanın çarpışma riski.



Şekil 5.2 : Negatif yaklaşma açılarında kesici takım ve türbin kanadı çarpışma riski.

Eğim ve yaklaşma açıları için en üst değerler olarak sırasıyla 60° ve 50° denenebilmiştir. Şekil 5.3'te 50° yaklaşma açısı ve 20° eğim açısı ile yapılan simülasyonda daha büyük bir açı ile çalışılmayacağı görülmektedir. Eğim açısı için, açının büyümesi her hangi bir risk doğurmamaktadır. Ancak 60° 'nin üzerine çıkıldığında iyi bir yüzey kalitesi elde edilemeyeceği literatür desteğiyle karar verilmiştir [64].

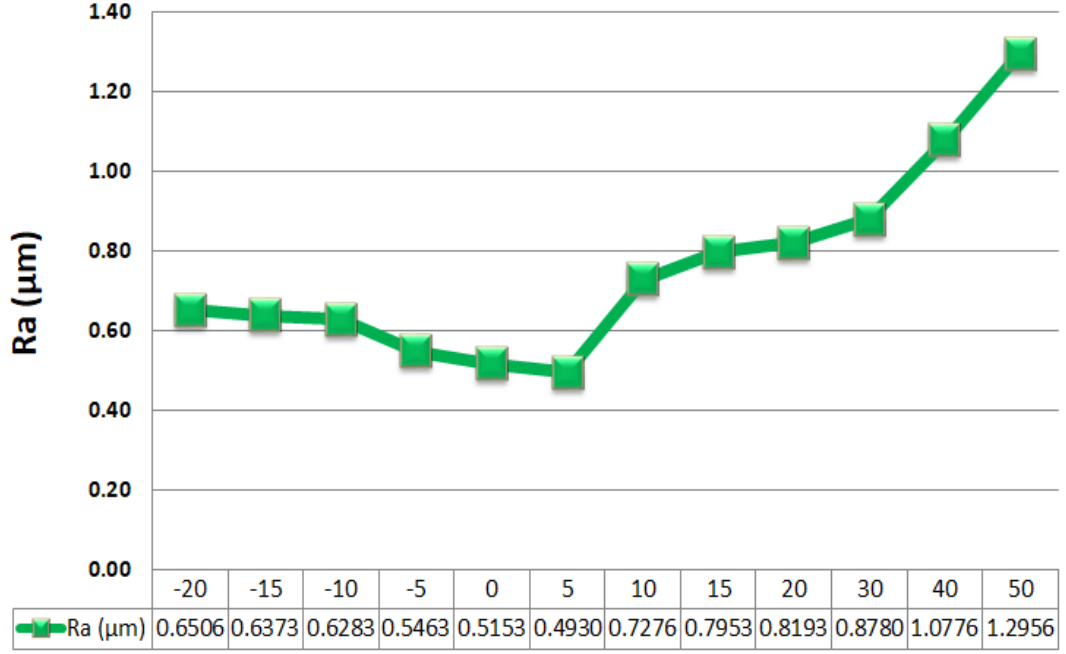
Yaklaşma açılarının deneylerinde, freze kafasının aynaya çarpmasının önüne geçmek için eğim açısı 20° olarak sabitlenmiştir. Çizelge 5.1'de farklı yaklaşma açılarıyla gerçekleştirilen ince talaş akışsal frezeleme işleminden elde edilen ortalama yüzey pürüzlülükleri yer almaktadır. Şekil 5.4'te ise yaklaşma açısı değişimine göre ortalama yüzey pürüzlülüğü değişimi izlenmektedir. Şekil 5.4 incelendiğinde, Ti6Al4V türbin kanadı ince talaş işleminde pozitif ya da negatif yaklaşma açılarının yüzey kalitesini olumsuz yönde etkilediği görülmektedir.



Şekil 5.2 : 50° yaklaşma açısı ve 20° eğim açısı ile yapılan simulasyonda çarpışma riski.

Çizelge 5.1 : Farklı yaklaşma açılarında gerçekleştirilen ince talaş işleminden elde edilen R_a değerleri.

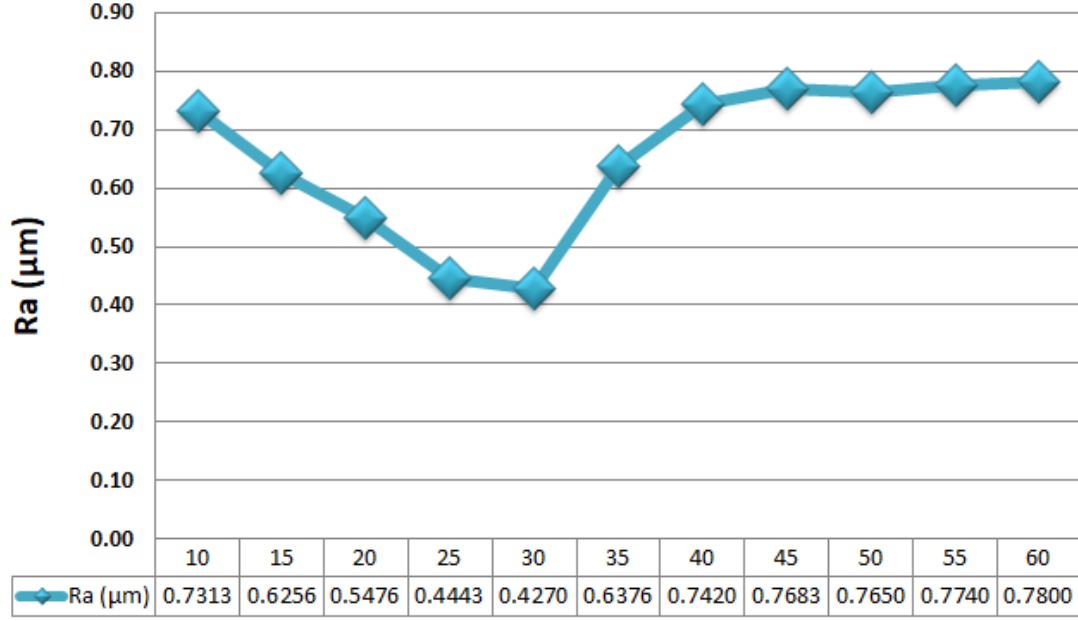
Yaklaşma Açısı (°)	Eğim Açısı (°)	Kesme Genişliği (mm)	Diş Başı İlerleme (mm/dev)	Kesme Derinliği (mm)	Kesme Hızı (mm/dak)	R_a (μm)
-20	20	0.2	0.04	0.2	100	0.651
-15	20	0.2	0.04	0.2	100	0.637
-10	20	0.2	0.04	0.2	100	0.628
-5	20	0.2	0.04	0.2	100	0.546
0	20	0.2	0.04	0.2	100	0.515
5	20	0.2	0.04	0.2	100	0.493
10	20	0.2	0.04	0.2	100	0.728
15	20	0.2	0.04	0.2	100	0.795
20	20	0.2	0.04	0.2	100	0.819
30	20	0.2	0.04	0.2	100	0.878
40	20	0.2	0.04	0.2	100	1.078
50	20	0.2	0.04	0.2	100	1.296



Şekil 5.4 : Farklı yaklaşma açıları ile gerçekleştirilen ince talaş işleminde R_a değişimi.

Eğim açılarının ince talaş akışsal frezeleme işlemine etkisi incelenirken kullanılan işlem parametreleri ve işlem sonucunda ölçülen R_a değerleri Çizelge 5.2’de gösterilmiştir. Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2’de yer alan işlem parametreleri 4. Bölümde geliştirilen Merkezi Kompozit Deney Tasarımı’nın merkez noktaları olarak belirlenmiştir.

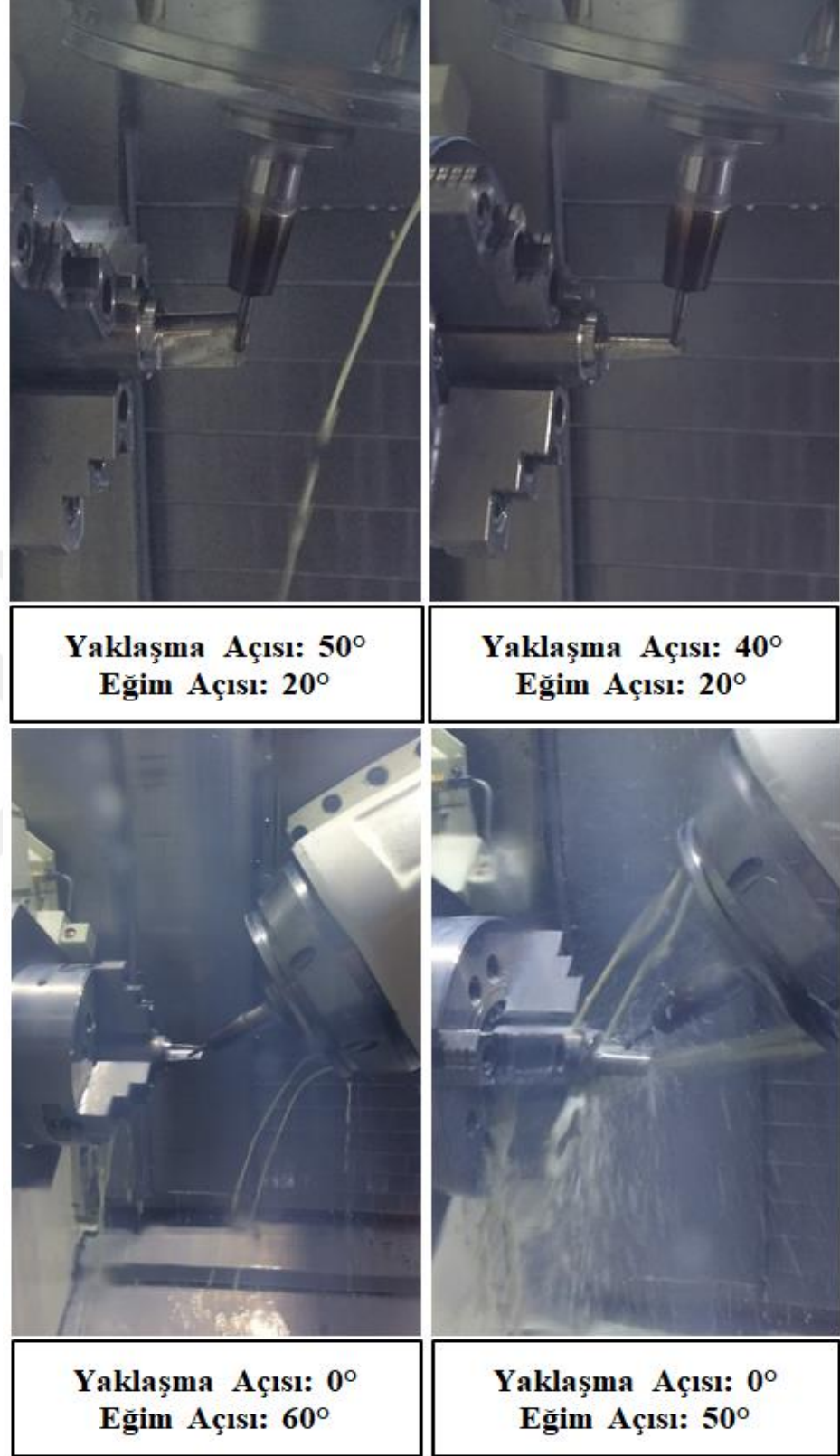
Şekil 5.5’te eğim açılarına göre ince talaş akışsal frezeleme işlemi sonrası ölçülen ortalama yüzey pürüzlülükleri görülmektedir. Deneyler sonucunda en iyi yüzey kalitesinin 20° - 30° arasındaki eğim açılarıyla elde edildiği saptanmıştır. Deneyler esnasında farklı kesme açıları için çekilen görüntüler Şekil 5.6’da gösterilmiştir.



Şekil 5.5 : Eğim yaklaşma açıları ile gerçekleştirilen ince talaş işleminde R_a değişimi.

Çizelge 5.2 : Farklı yaklaşma açılarında gerçekleştirilen ince talaş işleminden elde edilen R_a değerleri.

Yaklaşma Açısı (°)	Eğim Açısı (°)	Kesme Genişliği (mm)	Diş Başı İlerleme (mm/dev)	Kesme Derinliği (mm)	Kesme Hızı (mm/dak)	R_a (µm)
0	10	0.2	0.04	0.2	100	0.731
0	15	0.2	0.04	0.2	100	0.626
0	20	0.2	0.04	0.2	100	0.548
0	25	0.2	0.04	0.2	100	0.444
0	30	0.2	0.04	0.2	100	0.427
0	35	0.2	0.04	0.2	100	0.638
0	40	0.2	0.04	0.2	100	0.742
0	45	0.2	0.04	0.2	100	0.768
0	50	0.2	0.04	0.2	100	0.765
0	55	0.2	0.04	0.2	100	0.774
0	60	0.2	0.04	0.2	100	0.780



Şekil 5.6 : Farklı kesme açıları ile gerçekleştirilen ince talaş işleminde işlemleri.

5.2 İnce Talaş Akışsal Frezeleme İşleminde Kesme Açılarının Enerji, Verimlilik ve Kalite Üzerine Etkilerinin İncelenmesi

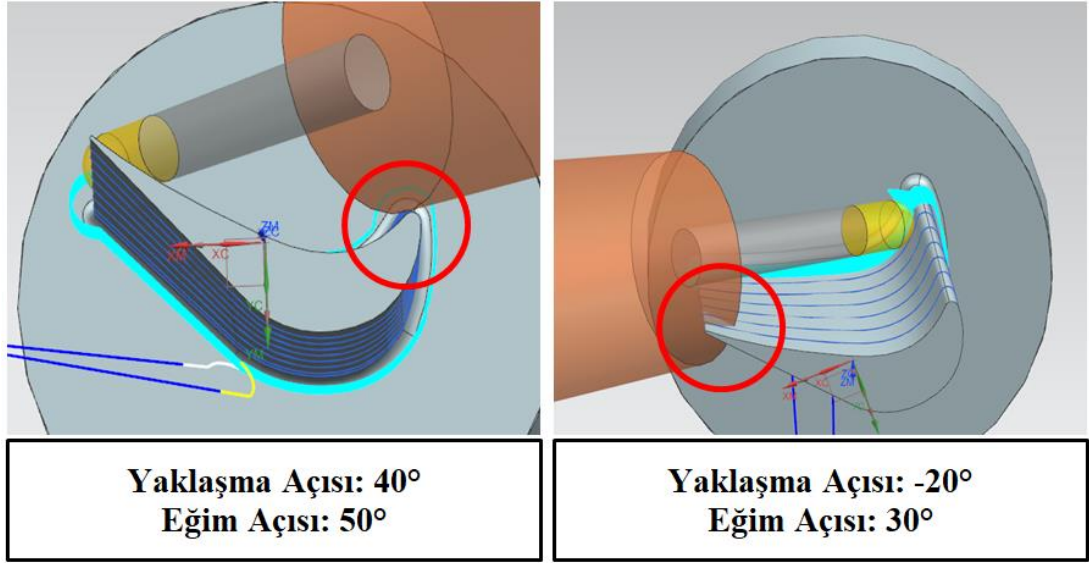
Farklı eğim ve yaklaşma açılarıyla yapılan çalışmada kesici takım eğim açılarının yüzey kalitesine etkisi açıkça görülmüştür. Ancak kesme genişliği ve diş başı ilerleme gibi gerek yüzey kalitesi gerek talaş kaldırma debisi gerekse enerji tüketimi üzerine etkili diğer talaşlı imalat girdi parametrelerinin etkisi göz ardı bırakılmıştır.

Bu bölümde ise kesici takım eğim açılarının önemli iki talaşlı imalat girdi parametresi ile etkileşimini incelenmiş bulunmaktadır. Böylece ince talaş akışsal frezeleme işleminin farklı girdi parametresi kombinasyonlarıyla nasıl işlem çıktılarını elde edileceği araştırılmıştır. Bu süreçte Bölüm 4'te geliştirilen türbin bıçağının torna-freze takım tezgahlarında işlenmesine dair metodoloji baz alınmış ve süreç geliştirilen metodoloji üzerinden ilerlemiştir.

5.2.1 CAD/CAM aşaması

Türbin kanadının ince talaş işlemi için akışsal frezeleme metodu uygun görülmüştür. Kesici takım olarak ise 5 mm çapında bir küresel parmak freze seçilmiştir. Türbin kanadı geometrisinin karmaşık olmasından dolayı üretim işlemlerinin bilgisayar üzerinde simülasyonu sırasında özenle ve dikkatle kesici takım/ayna/freze kafası öğelerinin çarpışma durumları incelenmiştir.

Şekil 5.7'de mevcut kesici takım ve iş parçası geometrisi ile uygulanması mümkün olmayan kesme açısı kombinasyonu gösterilmiştir. Simülasyonların ardından, deney tasarımında kullanılmak üzere yaklaşma açısı için 0° - 40° aralığı, eğim açısı için ise 10° - 30° aralığı uygun görülmüştür.

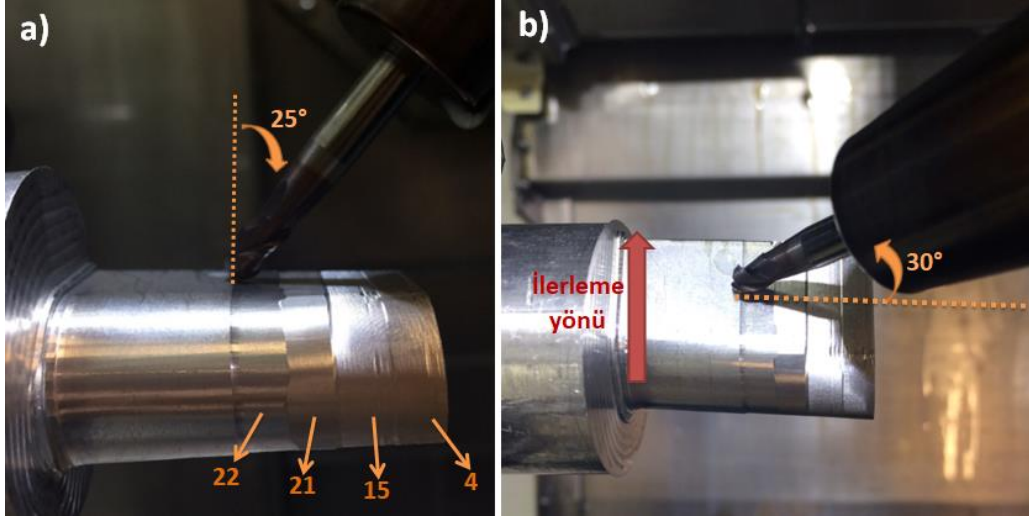


Şekil 5.7 : Farklı kesme açısı kombinasyonları sonucu ortaya çıkan uygunsuz CAM durumları.

5.2.2 Üretim aşaması

Türbin kanadının ince talaş işleminde kesme açılarının incelenmesi için seçilen kesici takım SECO720050-TRIBON kodlu 5 mm çapında karbür parmak frezedir. Ti6Al4V stoğu 45 mm çapında yeterli uzunlukta silindirik bir malzemedir. Stok malzeme üzerinden kaba ve ara-kaba işlemleri tamamlandıktan sonra iş parçasının üzerinde ince talaş işleminde alınmak üzere 0,2 mm stok bırakılmıştır. Yani ince talaş işleminde kesme derinliği 0,2 mm olarak ayarlanmıştır. Kesme hızı ise 100 mm/dak olarak her operasyonda sabit tutulmuştur.

40 mm kanat boyuna sahip türbin bıçağının kanadı, 5'er milimetrelik 7 bölüme ayrılmıştır. Yaklaşma açısı, eğim açısı, kesme genişliği ve diş başı ilerleme parametrelerinin değerleri her bir bölüm için değişmektedir. Böylelikle daha az malzeme sarfiyatı ile istenilen işlem çıktılarına ulaşılabilmektedir. Şekil 5.8'de farklı işlem parametreleriyle işlenmekte olan bir türbin kanadı yer almaktadır. Şekil 5.8'de yer alan numaralar Çizelge 5.3'te bulunan deneylerin işlem sırası numaralarıdır. Şekilde kesici takımın işlemekte olduğu bölüm, türbin kanadında ayrılan 4. bölüm olup, Çizelge 5.3'deki 22 numaralı işlem sırasına sahip deneydir. İşlem parametreleri ise eğim açısı, yaklaşma açısı, kesme genişliği ve diş başı ilerleme için sırasıyla; 30°, 25°, 0,15 mm ve 0,045mm/dev'dir.



Şekil 5.8 : Farklı işlem parametreleri ile işlenmekte olan türbin kanadı a) eğim açısının gösterimi, b) yaklaşma açısının gösterimi.

5.2.3 Deney tasarımı

Eğim açısı, yaklaşma açısı, kesme genişliği ve diş başı ilerlemenin girdi parametreleri olarak belirlendiği ince talaş akışsal frezeleme işleminin deney tasarımı Merkezi Kompozit Tasarım ile oluşturulmuştur. Çıktı parametreleri olarak ise özgül kesme enerjisi, talaş kaldırma debisi ve ortalama yüzey pürüzlülüğü ölçülmüştür. Çizelge 5.3'te deney tasarımı ve ölçülen deney sonuçları yer almaktadır.

Çizelge 5.3 : İnce talaş akışsal frezeleme işlemi için oluşturulan MKT ve deney çıktıları.

Girdi Parametreleri					Yanıtlar		
İşlem Sırası	Yaklaşma Açısı (°)	Eğim Açısı (°)	Kesme Genişliği (mm)	Diş Başı İlerleme (mm/dev)	ÖKE (J/mm ³)	TKD (mm ³ /sn)	R _a (µm)
1	20	20	0.2	0.05	867.1	0.637	1.204
2	20	10	0.2	0.04	932.7	0.509	1.219
3	20	20	0.3	0.04	755.3	0.764	1.375
4	40	20	0.2	0.04	848.2	0.509	1.461
5	20	30	0.2	0.04	1148.6	0.509	1.025
6	20	20	0.2	0.04	1115.3	0.509	1.118
7	20	20	0.2	0.04	1107.4	0.509	1.124
8	20	20	0.2	0.03	1248.8	0.382	0.572
9	0	20	0.2	0.04	1023	0.509	0.818
10	20	20	0.1	0.04	1963.5	0.255	0.316

Çizelge 5.3 : (Devamı) İnce talaş akışsal frezeleme işlemi için oluşturulan MKT ve deney çıktıları.

Girdi Parametreleri					Yanıtlar		
İşlem Sırası	Yaklaşma Açısı (°)	Eğim Açısı (°)	Kesme Genişliği (mm)	Diş Başı İlerleme (mm/dev)	ÖKE (J/mm ³)	TKD (mm ³ /sn)	R _a (µm)
11	20	20	0.2	0.04	1105.4	0.509	1.123
12	10	25	0.25	0.035	1016.1	0.557	1.064
13	30	15	0.25	0.045	770.7	0.716	1.278
14	30	15	0.15	0.045	1254.3	0.43	1.066
15	30	25	0.25	0.045	625.5	0.716	1.361
16	20	20	0.2	0.04	1101.5	0.509	1.121
17	10	15	0.15	0.045	1082.1	0.43	0.902
18	30	15	0.15	0.035	1624.7	0.334	0.962
19	10	25	0.15	0.035	1427.2	0.334	0.608
20	30	15	0.25	0.035	990.9	0.557	1.254
21	30	25	0.25	0.035	771.9	0.557	1.228
22	30	25	0.15	0.045	993.7	0.43	0.815
23	30	25	0.15	0.035	1361.4	0.334	0.77
24	20	20	0.2	0.04	1111.3	0.509	1.123
25	10	25	0.15	0.045	1105.4	0.43	0.697
26	10	25	0.25	0.045	727.5	0.716	1.064
27	10	15	0.25	0.045	646.5	0.716	1.264
28	10	15	0.25	0.035	836.6	0.557	1.214
29	20	20	0.2	0.04	1113.3	0.509	1.129
30	10	15	0.15	0.035	1400.3	0.334	0.747

5.2.4 Yanıt Yüzey Metodolojisi

Merkezi Kompozit Tasarım ile gerçekleştirilen deneyler sonucunda ölçülen deney çıktıları, Yanıt Yüzey Metodolojisi ile analiz edilmiştir. Varyans analizi, regresyon modelleri ve yüzey grafikleri ile işlem girdilerinin işlem çıktıları üzerinde etkileri incelenmiş ve etkili işlem parametreleri belirlenmiştir.

Varyans analizi ile belirlenen işlem parametrelerinin belirli işlem çıktısı üzerinde etkisi incelenmiştir. Çizelge 5.4'te özgül kesme enerjisi için oluşturulan varyans analizi tablosu yer almaktadır. P değerleri incelendiğinde, yaklaşma ve eğim

açıların özgül kesme enerjisi üzerinde etkili olmadığı görülmüştür. Kesme genişliği ve diş başı ilerleme parametrelerine bakıldığında ise P değerlerinin sıfıra eşit olduğu görülmektedir. Bu durumda iki parametre de etkilidir. F değerleri incelendiğinde ise en etkili girdi parametresinin kesme genişliği olduğu görülmektedir. Özgül kesme enerjisi üzerinde ikinci en etkili girdi parametresi ise diş başı ilerlemedir. Şekil 5.9'da yer alan özgül kesme enerjisi için oluşturulan yüzey grafiklerinden de kesme genişliği ve diş başı ilerleme işlem parametrelerinin etkililikleri gözlemlenebilmektedir.

Çizelge 5.4 : Özgül kesme enerjisi için varyans analizi.

Kaynak	Serbestlik Derecesi	Katılım Oranı	Kareler Toplamı	Kareler Ort.	F-değeri	P-değeri
Yaklaşma Açısı	1	0.07%	1631	1631	0.23	0.637
Eğim Açısı	1	0.04%	882	882	0.13	0.728
Kesme Genişliği	1	66.71%	1643059	1643059	234.47	0
Diş Başı İlerleme	1	15.09%	371688	371688	53.04	0
Hata	25	18.09%	98106	7008		
Total	29	100.00%				

Çizelge 5.5'te talaş kaldırma debisi için varyans analizi tablosu yer almaktadır. Talaş kaldırma debisi belirli bir formülden hesaplandığı ve bu formülde kesici takım eğim açıları kullanılmadığı için varyans analizi tablosunda da yaklaşma ve eğim açılarının hiçbir etkisi görülmemektedir. Modelde oluşan bu eksiklikten dolayı kesme genişliği ve diş başı ilerleme için de P değeri ve F değeri oluşturulamamıştır. Ancak katılım oranı üzerinden bu iki işlem parametresinin kıyası yapılabilmektedir.

Katılım oranları göz önünde bulundurulduğunda kesme genişliği % 79'luk bir katılım oranı ile talaş kaldırma debisi üzerinde diş başı ilerlemeye göre çok daha etkili olduğunu göstermektedir. Şekil 5.10'da yer alan talaş kaldırma debisi için

oluşturulan yüzey grafiklerinden de kesici takım eğim açılarının etkili olmadığı açıkça görülebilmektedir.

Çizelge 5.6'da ise ortalama yüzey pürüzlülüğü için varyans analizi tablosu yer almaktadır. P değerleri incelendiğinde bütün işlem parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkili olduğu görülmektedir.

En etkili parametre kesme genişliği olarak belirlenirken, onun ardından en etkili ikinci girdi parametresi ise yaklaşma açısı olmuştur. Sırasıyla dış başı ilerleme ve eğim açısı da üçüncü ve dördüncü etkili işlem parametreleri olarak yer almaktadırlar. Şekil 5.11'de yer alan ortalama yüzey pürüzlülüğü için oluşturulmuş yüzey grafiklerinden de benzer durum gözlenebilmektedir.

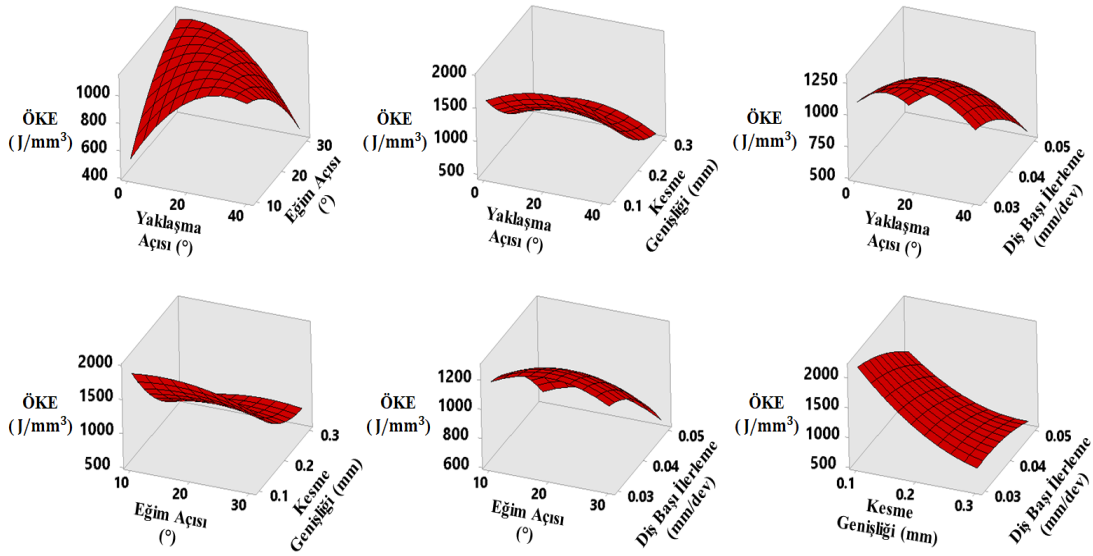
Yaklaşma açısı üst değeri olan 40°'e yaklaştıkça yüzey kalitesi kötüleşmektedir. Eğim açısı ise en üst değeri olan 30°'e yaklaştıkça yüzey kalitesi iyileşmektedir. Kesme genişliği arttığında ise yüzey pürüzlülüğü değeri artmakta, yani yüzey kalitesi kötüleşmektedir.

Çizelge 5.5 : Talaş kaldırma debisi için varyans analizi.

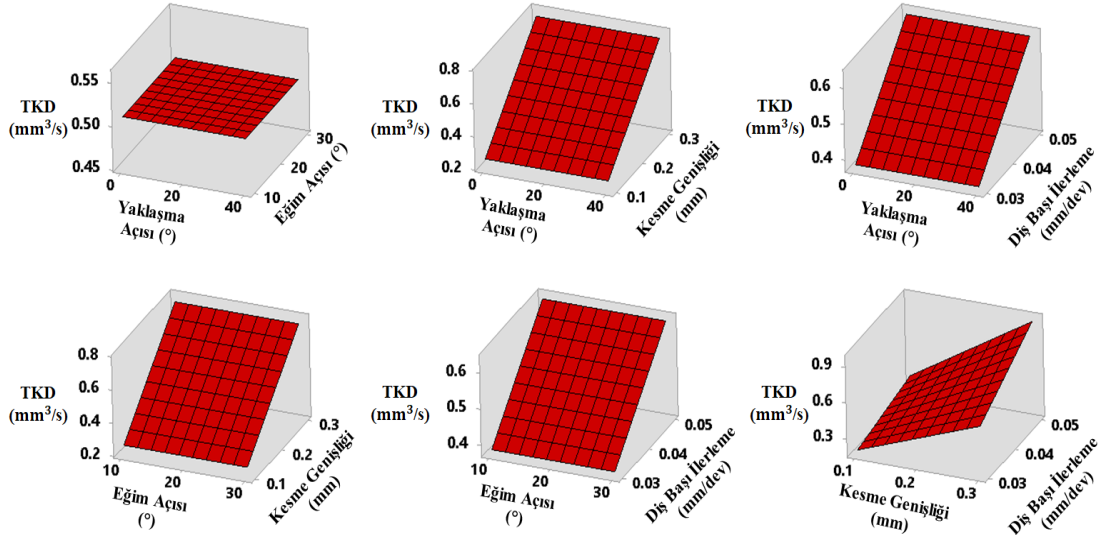
Kaynak	Serbestlik Derecesi	Katılım Oranı	Kareler Toplamı	Kareler Ort.	F-değeri	P-değeri
Yaklaşma Açısı	1	0.00%	0	0	*	*
Eğim Açısı	1	0.00%	0	0	*	*
Kesme Genişliği	1	79.34%	0.389073	0.389073	*	*
Dış Başı İlerleme	1	19.83%	0.097268	0.097268	*	*
Hata	25	0.83%	0	0		
Total	29	100.00%				

Çizelge 5.6 : Ortalama yüzey pürüzlülüğü için varyans analizi.

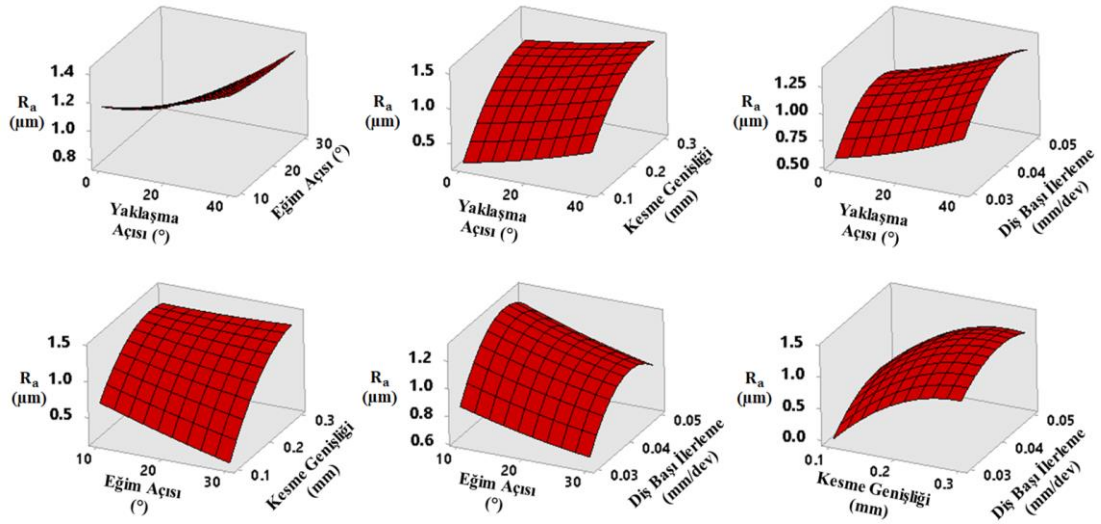
Kaynak	Serbestlik Derecesi	Katılım Oranı	Kareler Toplamı	Kareler Ort.	F-değeri	P-değeri
Yaklaşma Açısı	1	12.26%	0.25099	0.25099	20.43	0
Eğim Açısı	1	4.00%	0.08194	0.08194	6.67	0.022
Kesme Genişliği	1	57.25%	1.17227	1.17227	95.41	0
Diş Başı İlerleme	1	7.05%	0.14431	0.14431	11.74	0.004
Hata	25	19.44%	0.17202	0.01229		
Total	29	100.00%				



Şekil 5.9 : Özgül kesme enerjisi için oluşturulan yüzey grafikleri.



Şekil 5.10 : Talaş kaldırma debisi için oluşturulan yüzey grafikleri.



Şekil 5.11 : Ortalama yüzey pürüzlülüğü için oluşturulan yüzey grafikleri.

Denklem (5.1), (5.2) ve (5.3)'te sırasıyla özgül kesme enerjisi, talaş kaldırma debisi ve ortalama yüzey pürüzlülüğü için oluşturulan regresyon modelleri yer almaktadır. Regresyon modellerinde “Y” yaklaşma açısı, “E” eğim açısı, “K” kesme genişliği ve “D” ise diş başı ilerlemeyi temsil etmektedir.

$$\begin{aligned}
 \text{ÖKE} = & 2623+56.9*Y+55.9*E-20141*K+21631*D-0.531*Y*Y- & (5.1) \\
 & 1.075*E*E+21119*K*K-902711*D*D-1.499*Y*E- \\
 & 35.8*Y*K+18*Y*D+92.5*E*K-64*E*D+133160*K*D
 \end{aligned}$$

$$TKD = 63.66 * K * D \quad (5.2)$$

$$R_a = -3.8 + 0.0023 * Y - 0.0457 * E + 14.46 * K + 203.4 * D + 0.000082 * Y * Y - 0.000189 * E * E - 25.88 * K * K - 2180 * D * D - 0.000398 * Y * E - 0.0204 * Y * K + 0.020 * Y * D + 0.134 * E * K - 0.21 * E * D - 49 * K * D \quad (5.3)$$

5.2.5 Çok Amaçlı Parçacık Sürü Optimizasyonu

Yaklaşma açısı, eğim açısı, kesme genişliği ve diş başı ilerleme olarak belirlenen girdi parametreleri ile gerçekleştirilen ince talaş akışsal frezeleme işleminin çıktıkları olan özgül kesme enerjisi, talaş kaldırma debisi ve ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin çok amaçlı parçacık sürü optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu optimizasyon çalışmasının amacı, 4. Bölüm’de kesme derinliği, kesme genişliği, diş başı ilerleme ve kesme hızı işlem parametreleri ile gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasının, kesici takım eğim açılarından faydalanılarak geliştirilmesidir.

Optimizasyon problemi minimum özgül kesme enerjisi, maksimum talaş kaldırma debisi ve minimum ortalama yüzey pürüzlülüğü prensibine göre kurulmuş olup amaç fonksiyonları olarak Denklem (5.1), (5.2) ve (5.3)’te yer alan regresyon modelleri kullanılmıştır. Karar değişkenleri olarak işlem girdi parametreleri kullanılmıştır. Problem kısıtları olarak işlem parametrelerinin alt ve üst limitleri belirlenmiştir. Çizelge 5.7’de ise işlem parametrelerinin alt ve üst limitleri yer almaktadır. Optimizasyon problemi için kurulan matematiksel modelin amaç fonksiyonları Denklem (5.4), (5.5) ve (5.6)’da, kısıtları ise (5.7) ve (5.8)’de gösterilmiştir. Denklemlerde “Y” yaklaşma açısını, “E” ise eğim açısını temsil etmektedir. $\dot{U}stLimit_i$ ve $AltLimit_i$, i parametresinin alt limit ve üst limitlerini temsil etmektedir. “ g_i ” ise i parametresini temsil etmektedir.

$$\mathbf{Min} f_{\dot{O}KE} = \dot{O}KE(Y, E, a_e, f_z) \quad (4.10)$$

$$\mathbf{Min} f_{R_a} = R_a(Y, E, a_e, f_z) \quad (4.11)$$

$$\mathbf{Max} f_{TKD} = TKD(Y, E, a_e, f_z) \quad (4.12)$$

Öyle ki:

$$g_i - \dot{U}stLimit_i \leq 0, \quad i=1:4 \quad (4.13)$$

$$AltLimit_i - g_i \leq 0, \quad i=1:4 \quad (4.14)$$

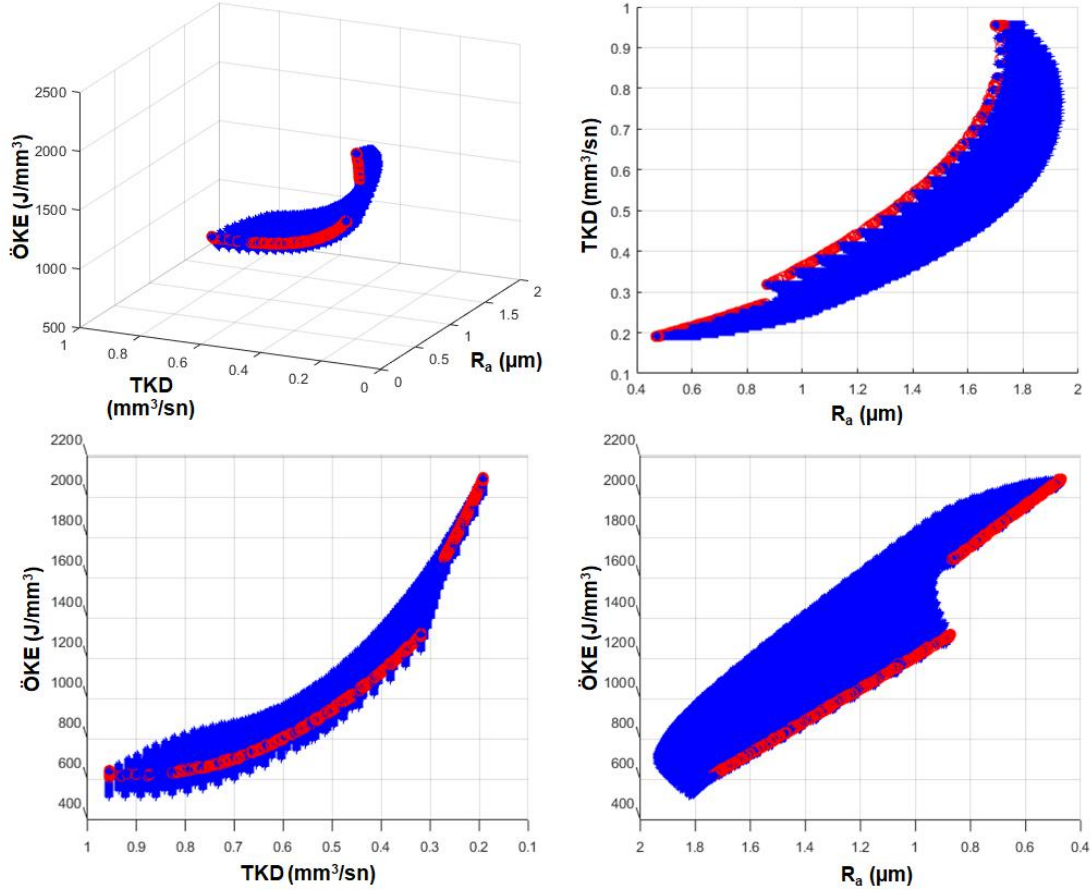
Çizelge 5.7 : İşlem parametrelerinin alt ve üst limitleri.

İşlem Parametresi	Alt Limit	Üst Limit
Yaklaşma Açısı (°)	0	40
Eğim Açısı (°)	10	30
Kesme Genişliği (a_e) (mm)	0,1	0,3
Diş Başı İlerleme (f_z) (mm/rev)	0,03	0,05

Çok amaçlı optimizasyon probleminin çözümü olarak Şekil 5.12’de yer alan Pareto optimal çözüm seti oluşturulmuştur. İşlem çıktısı olarak belirlenmiş olan özgül kesme enerjisi, talaş kaldırma debisi ve ortalama yüzey pürüzlülüğünün birbirlerine göre ödünleşmeleri Pareto eğrisinden görülebilmektedir. Pareto optimal çözüm setinden istenilen işlem stratejisi doğrultusunda bir çözüm belirlenip bu çözüm için gerekli işlem parametreleri elde edilebilmektedir. İşlem stratejileri olarak maksimum performans ve enerji verimliliği, enerji tasarrufu ile makul kalite ve mükemmel yüzey kalitesi olarak üç adet strateji belirlenmiştir. Pareto optimal çözüm setinden belirli stratejiler için elde edilen optimal işlem parametresi değerleri Çizelge 5.8’de yer almaktadır.

Çizelge 5.8 : Belirlenen işlem stratejileri için optimal işlem parametresi değerleri.

Strateji	İşlem Parametreleri			
	Y (°)	E (°)	a_e (mm/dev)	f_z (mm/dev)
1. Maksimum performans ve enerji verimliliği	0	30	0,3	0,05
2. Enerji tasarrufu ile makul kalite	0	24,67	0,201	0,0495
3. Mükemmel yüzey kalitesi	0	30	0,1	0,03



Şekil 5.12 : İnce talaş akışsal frezeleme işlemi için Pareto optimal çözüm seti.

5.2.6 Doğrulama

Çizelge 5.8’de yer alan stratejiler ve bu stratejiler için Pareto optimal çözüm setin elde edilen optimal işlem parametresi değerleri yer almaktadır. Uygulama 2 için gerçekleştirilen çalışmanın doğrulaması bu stratejiler üzerinden gerçekleştirilmiştir. Çizelge 5.9’da optimal işlem parametresi değerleri için model çıktıları, deney sonuçları ve yüzde hatalar sıralanmıştır. İnce talaş işlemine ait doğrulama sonuçları ve hataları incelendiğinde, hata oranlarının kabul edilebilir düzeyde olduğu görülmektedir. Talaş kaldırma oranları formül ile hesaplandığı için, tahmin modelinin katsayılarının oluşturulması nispeten daha kolaydır. Yüzde hatalara bakıldığında ise modelin 0 hata ile formülü tahmin edebildiği görülmektedir.

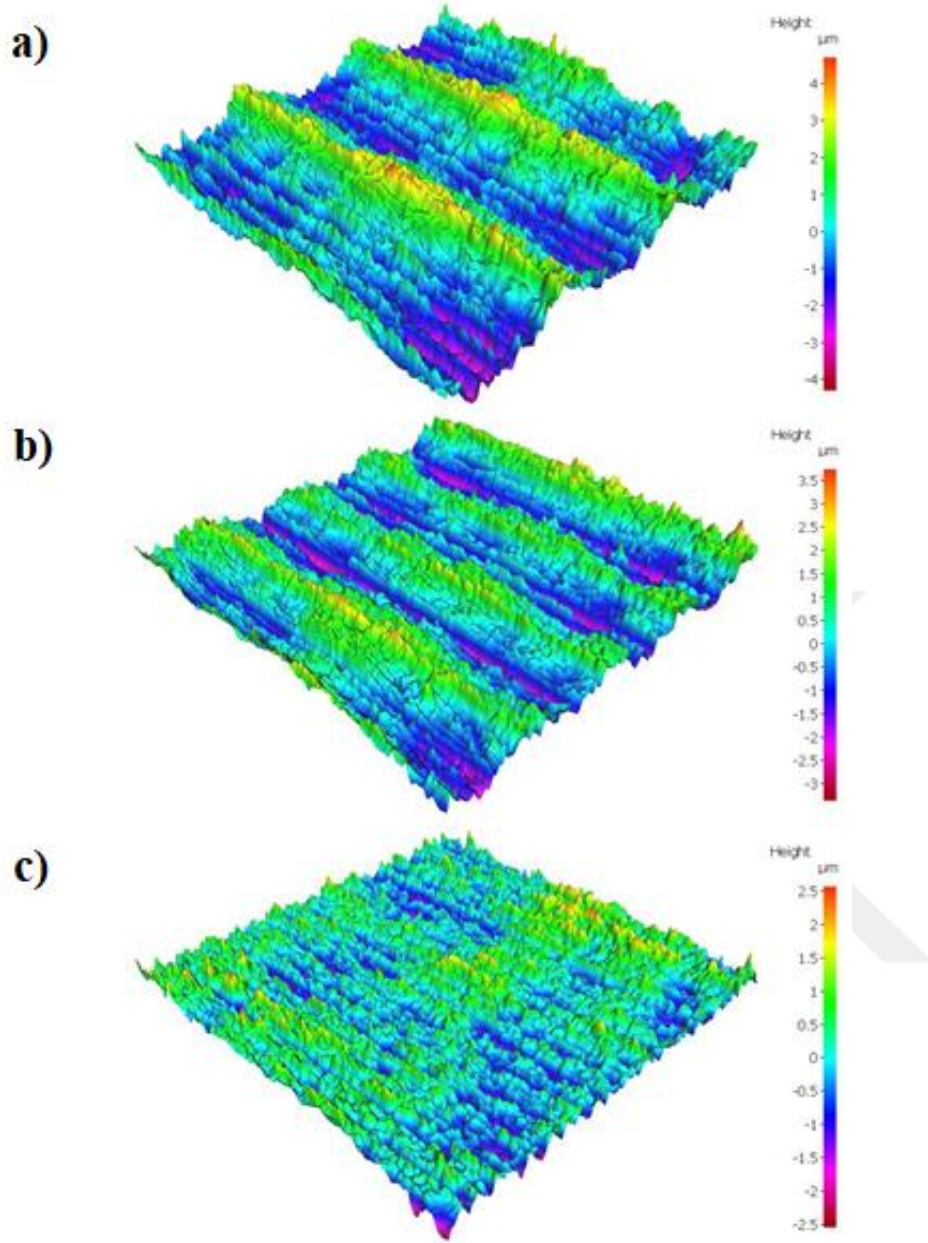
Çizelge 5.9 : İnce talaş akışsal frezeleme işlemi için işlem stratejileri için doğrulama verileri.

Strateji	İşlem Çıktısı	Model Çıktıları	Deney Sonuçları	Yüzde Hata (%)
1. Maksimum performans ve enerji verimliliği	R _a (µm)	1,281	1,283	0,2
	TKD (mm ³ /sn)	0,955	0,955	0
	ÖKE (J/mm ³)	641,1	611,9	4,9
2. Enerji tasarrufu ile makul kalite	R _a (µm)	1,047	0,994	5,3
	TKD (mm ³ /sn)	0,633	0,633	0
	ÖKE (J/mm ³)	750,5	802,4	6,5
3. Mükemmel yüzey kalitesi	R _a (µm)	0,421	0,496	15,2
	TKD (mm ³ /sn)	0,191	0,191	0
	ÖKE (J/mm ³)	2069,9	2110,2	1,9

Özgül kesme enerjilerinin modelleri ile deney sonuçları arasında oldukça az hataya rastlanmıştır. Ortalama yüzey pürüzlülüğü için ise, mükemmel yüzey kalitesi adlı strateji için gerçekleştirilen deney sonucu beklenilenden daha yüksek bir R_a değeri ölçülmüştür. Bu durumun dış başı ilerlemenin etkisi olarak yorumlanmıştır.

Türbin kanadının yüzeyinde ilerleme yönünde dalgalanma gözlenmiştir. Ancak model yalnızca kesme genişliği doğrultusunda alınan ölçümler ile oluşturulduğundan, bu denli hassas işlemlerde ilerleme yönündeki yüzey dokusunda farklılıklar olduğunda sapma meydana geldiği görülmüştür.

Şekil 5.13'te doğrulama için elde edilen yüzeylerin topografyaları gösterilmiştir. Türbin kanadındaki bölgelerin topografyası 20X lens, 100nm dikey ve 3µm yanıl çözünürlük ile ölçülmüştür. Ayrıca L_c = 800 µm'lik bir dalga boyu kullanılmıştır. Sırasıyla yüzeylerde işlem parametrelerinin değişimi ile oluşan yüzey topografaları ölçülen R_a değerleri ile uyum göstermektedir. 3. stratejiye ait yüzeyin oldukça düşük yükseklikte pürüzleri olduğu Şekil5.13'ten görülebilmektedir.



Şekil 5.13 : Kesici takım eğim açıları doğrulama işlemlerinin yüzey topografyaları (a) 1. strateji, (b) 2. strateji, (c) 3. strateji.

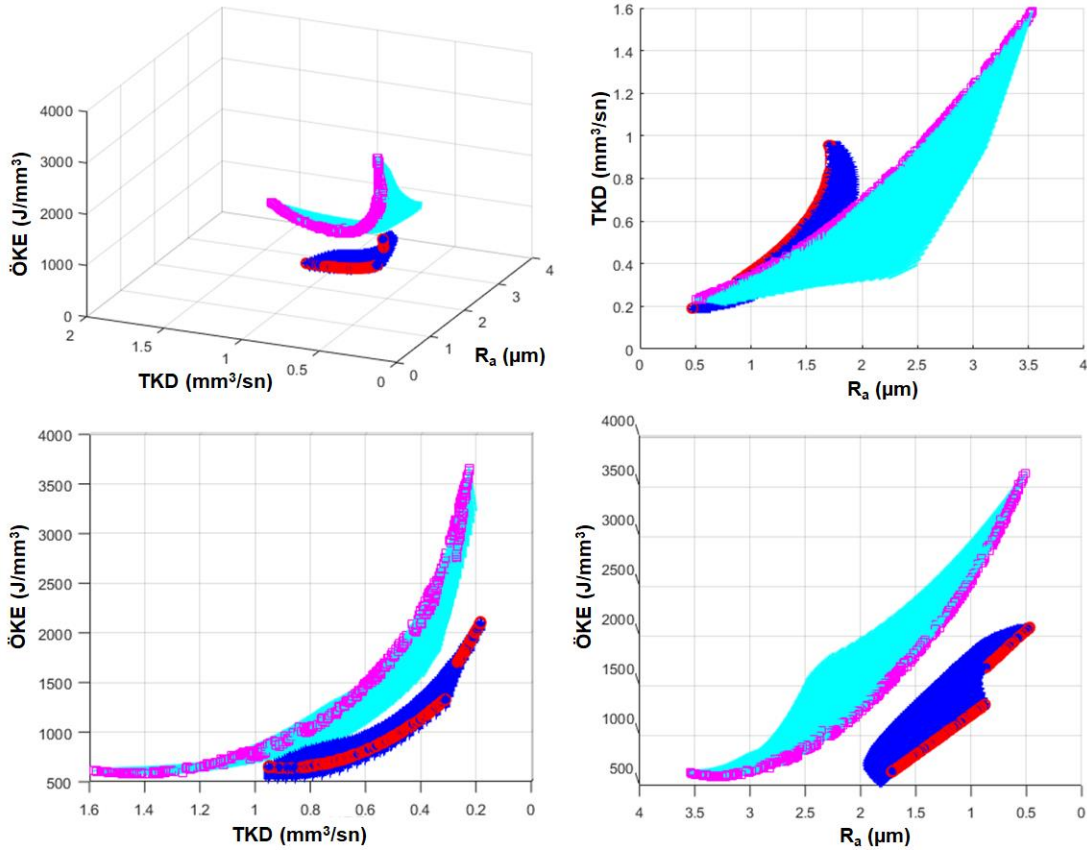
6. KESİCİ TAKIM EĞİM AÇILARININ VARYASYONLARININ İŞLEM ÇIKTILARI ÜZERİNDE YARATTIĞI FARKLILIKLARIN İNCELENMESİ

Türbin bıçağının torna-freze takım tezgahlarında işlenmesinde etkili olan işlem parametrelerinin belirlenmesi ve işlem çıktılarının optimizasyonu Bölüm 4'te gerçekleştirilmiştir. Ardından türbin kanadının ince talaş akışsal frezeleme işleminde kesici takım eğim açılarının özgül kesme enerjisi, malzeme kaldırma oranı ve ortalama yüzey pürüzlülüğü gibi işlem çıktıları üzerine nasıl bir etkisi olduğu incelenmiş ve çok-amaçlı optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir.

Bu iki uygulamanın ardından kesici takım eğim açılarının farklılaştırılmasının işlem çıktıları nasıl etkilediğini görmek için iki uygulamanın çok-amaçlı optimizasyonlarından elde edilen Pareto optimal çözüm setleri olurlu bölgeleriyle beraber Şekil 6.1'de bir arada oluşturulmuştur. Olurlu bölgelerin alan farklılıkları, işlem parametrelerinin farklılığı ile açıklanmaktadır. Mavi rengin temsil ettiği olurlu bölge kesme derinliği, kesme genişliği, diş başı ilerleme ve kesme hızı işlem parametrelerinin aldığı değerler ile oluşturulmuştur. Yaklaşma açısı 0° , eğim açısı ise 20° olarak sabitlenmiştir. Lacivert rengin temsil ettiği olurlu bölge ise yaklaşma açısı, eğim açısı, kesme genişliği ve diş başı ilerleme işlem parametrelerinin aldığı farklı değerler ile oluşturulmuştur. Bu aşamada kesme derinliği ve kesme hızı, diğer çalışmanın ortalama değerleri olan 0,2 mm ve 100 m/dak olarak belirlenmiştir.

Özgül kesme enerjisi ve ortalama yüzey pürüzlülüğünün ödünleşmesini gösteren grafiğe bakıldığında, benzer R_a değerlerinin kesme açılarının dahil edildiği model ile daha düşük özgül kesme enerjisi ile elde edilebildiği görülmektedir. Ayrıca özellikle eğim açısının artış göstermesiyle daha düşük R_a değerleri elde edilebildiği görülmüştür. Talaş kaldırma debisi ve ortalama yüzey pürüzlülüğünün ödünleşmesini gösteren grafikte ise $0,8 \mu\text{m}$ 'den yüksek R_a değerlerinin daha yüksek metal kaldırma oranları ile elde edilebildiği görülmektedir.

Özgül kesme enerjisi ve talaş kaldırma debisinin ödünleşmesinin yansıtıldığı grafikte ise benzer metal kaldırma oranları için kesme açılarının yer aldığı model ile daha düşük özgül kesme enerjileri elde edilmiştir. Kesme açılarının talaş kaldırma debisi üzerinde bir etkisi olmadığı varyans analizi ve yüzey grafikleri ile belirtilmiştir. Ayrıca, uygulamalarda incelenen işlem parametreleri ve aldıkları değer aralıkları farklıdır. Birinci uygulamada kesme derinliği ve kesme hızı farklı değerler almış, ancak ikinci uygulamada ortalama değerlerinde sabit tutulmuştur. Bu sebepler özgül kesme enerjisi ve talaş kaldırma debisi etkileşiminin gösterildiği grafikteki farklılıkta etkili olsa da sonuç olarak ikinci uygulamada aynı talaş kaldırma debisi değerleri için daha düşük özgül kesme enerjisi ölçülmüştür.



Şekil 6.1 : Geliştirilen metodolojinin uygulamaları sonucu işlem çıktılarında elde edilen iyileşme.

7. SONUÇLAR VE YORUMLAR

Yapay Türbin bıçakları sanayideki önemli işlevlerinden dolayı oldukça hassas olarak üretilmesi gereken, karmaşık geometriye sahip iş parçalarıdır. Bu çalışmada türbin bıçaklarının torna-freze takım tezgahlarında üretiminde kalite, enerji verimliliği ve üretkenliği arttırmaya yönelik bir metodoloji geliştirilip, bu metodoloji ile iki adet uygulama gerçekleştirilmiştir.

Titanyum alaşımlarının işlenmesi, mukavemetlerini yüksek sıcaklıklarda korumaları ve düşük termal iletkenliğe sahip olmaları gibi özelliklerinden dolayı oluşan işleme koşulları nedeniyle zorlu bir süreçtir. Bu sebeple, malzeme Ti6Al4V iken, uygun kesme parametrelerinin seçimi önemli bir husustur.

Türbin bıçağının hassas ve verimli bir şekilde işlenebilmesi için üretim öncesi ve sonrası basamakları kapsayan bir metodoloji geliştirilmiştir. Bu metodolojide yer alan CAD/CAM ve deney tasarımı basamakları ile üretim öncesi planlamalar yapılmaktadır. Ardından belirlenen işlem çıktılarının eldeedilebilmesi için türbin kanadının talaşlı imalatı gerçekleştirilmektedir. Ölçülen işlem çıktıları MINITAB™ ortamında Yanıt Yüzey Metodolojisi ile analiz edilip işlem parametrelerinin belirli işlem çıktıları üzerindeki etkileri incelenmektedir. Son olarak ise ÇAPSO ile optimal işlem parametreleri belirlenmektedir. Ayrıca oluşturulan Pareto optimal çözüm setleri ile farklı işlem stratejileri için uygun işlem parametrelerinin değerleri de elde edilmektedir.

Birinci uygulamada, Ti6Al4V türbin kanadının işlenmesi için kaba ve ince talaş işlemlerinde optimal kesme koşulları ortaya konmuştur. İşlemi en uygun şekilde gerçekleştirmek için, geliştirilen metodoloji titizlikle uygulanmıştır. Tasarlanan türbin kanadının CAM işlemi planlanmıştır. Hem kaba talaş hem ince talaş işlemleri için Deney Tasarımı, Merkezi Kompozit Tasarım kullanılarak üretilmiştir. İşlemlerde girdi parametreleri olarak, kesme derinliği, kesme genişliği, diş başı ilerleme ve kesme hızı kullanılmıştır. Türbin kanadı 45 mm çaplı Ti6Al4V stoğundan

işlenmiştir. Üretim sürecinin enerji tüketimi, çok fonksiyonlu bir enerji sayacı kullanılarak ölçülmüştür. Daha sonra işlem çıktıları araştırılmak için talaş kaldırma debisi ve ortalama yüzey pürüzlülüğü de ölçülmüştür. Deney sonuçları analizi Yanıt Yüzey Metodolojisi ile analiz edilmiş ve yanıtlar üzerinde girdi parametrelerinin etkinliğini elde etmek için varyans analizi kullanılmıştır. Hem varyans analizi tablolarından hem de yüzey grafiklerinden görülebileceği üzere, kesme genişliği hem kaba yan frezeleme hem de ince talaş akışsal frezeleme işlemleri için en etkili işlem parametresidir. Kesme derinliği, tüm yanıtlar ve işlemler için ikinci en etkili parametredir.

Ti6Al4V'nin işlenmesi sırasında anlık temas yüzeyi önemlidir, çünkü keme genişliği ve kesme derinliği en etkili parametrelerdir. Bu sebeple, işlem parametreleri bu durum göz önünde bulundurularak incelenmelidir. Çok-amaçlı Parçacık Sürü Optimizasyonu algoritması ile gerçekleştirilen optimizasyon çalışması iki aşamaya ayrılmıştır: kaba talaş yan frezeleme işlemi, ince talaş akışsal frezeleme işlemi. Kaba talaş yan frezeleme optimizasyonu için, çeşitli talaş kaldırma debisi değerleri için minimum özgül kesme enerjisinin değerleri elde edilmiştir. İnce talaş akışsal frezeleme işlemi için işlem çıktıları olarak özgül kesme enerjisi, talaş kaldırma debisi ve ortalama yüzey pürüzlülüğü incelenmiş ve Çok-Amaçlı Parçacık Sürü Optimizasyonu ile optimize edilmiştir. Optimizasyon çıktısı olarak, Pareto optimal çözüm seti olurlu bölge ile birlikte elde edilmiştir. Bu Pareto optimal çözümden işlem parametrelerinin belirlenebilmesi için farklı yanıt değerleri için farklı kesme senaryoları türetilmiştir. Bu senaryolardan birincisi maksimum performans ve enerji verimliliğidir. Bu senaryo için elde edilen optimal işlem parametresi değerleri kesme derinliği, kesme genişliği, diş başı ilerleme ve kesme hızı için sırasıyla; 0,3 mm, 0,3 mm, 0,05 mm/dev ve 110 m/dak'dır. İkinci senaryo enerji tasarrufu ile makul kalitede türbin bıçağı işlenmesidir. Bu senaryo için elde edilen optimal işlem parametreleri ise sırasıyla 0,204 mm, 0,127 mm, 0,037 mm/dev ve 93,43 m/dak'dır. Üçüncü senaryo ise maksimum yüzey kalitesi hedeflenmiştir. Bu senaryo için sırasıyla; 0,1 mm, 0,1 mm, 0,03 mm/dev ve 90 m/dak olarak işlem parametrelerinin değerleri belirlenmiştir. Belirlenen senaryoların optimal işlem parametreleri ile doğrulama yapılmış ve hatalar hesaplanmıştır. Doğrulama sonucu elde edilen hatalar

incelendiğinde geliştirilen yanıt yüzey modelinin ve optimizasyon çalışmasının uygun olduğu görülmüştür.

Birinci uygulama ile Ti6Al4V alaşımı ile torna-freze takım tezgahlarında türbin kanadı işlenirken meydana gelebilecek zorluklar tecrübe edilmiş ve farklı işlem türleri için optimal çözüm setleri edinilmiştir. Ancak bu işlemlerin incelenmeleri sırasında, ince talaş akışsal frezeleme işleminde kullanılan küresel parmak freze sabit kesme açısı ile çalıştırılmıştır. Ancak farklı yaklaşma ve eğim açılarının, ince talaş işlem çıktılarının üzerinde etkisinin belirlenmesi önem arz etmektedir. Bu sebeple birinci çalışmada kullanılan işlem parametrelerinden kesme genişliği ve diş başı ilerleme ile yaklaşma ve eğim açılarının işlem parametreleri olarak belirlendiği ikinci uygulama gerçekleştirilmiştir.

İkinci uygulamada eğim ve yaklaşma açılarının etkilerinin ve genel uygulamanın gözlemlenmesi için öncelikle farklı eğim ve yaklaşma açıları ile türbin kanadının ince-talaş akışsal frezeleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Farklı eğim ve yaklaşma açılarıyla gerçekleştirilen ince talaş işleminin ardından türbin kanatlarının ortalama yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür. Sonuçlar incelendiğinde yaklaşma açısının sıfıra yakın olmasının ve eğim açısının ise 20° - 30° arasında olmasının en iyi yüzey kalitesini verdiği gözlemlenmiştir.

Eğim ve yaklaşma açılarının ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerine genel etkileri incelendikten sonra, ince talaş işleminin etkili temel iki işlem parametresi ile birlikte geliştirilen metodolojiye katılmıştır. Yani, girdi parametreleri olarak eğim açısı, yaklaşma açısı, kesme genişliği ve diş başı ilerleme belirlenerek türbin kanadı işlemesine dair tasarlanan metodoloji uygulamaya koyulmuştur. İşlem çıktıları olarak özgül kesme enerjisi, talaş kaldırma debisi ve ortalama yüzey pürüzlülüğü incelenmiştir. Varyans analizi ve yüzey grafikleri ile işlem parametrelerinin seçili çıktılar üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Kesici takım eğim açılarının talaş kaldırma debisi üzerinde etkisi olmadığı ancak ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerinde oldukça etkili oldukları görülmüştür. Ayrıca yaklaşma açısı özgül kesme enerjisi üzerinde de etkilidir. Sonuçlar incelendiğinde, kesici takım eğim açıları için; yaklaşma açısı üst değeri olan 40° 'e yaklaştıkça yüzey kalitesi kötüleşmekte, alt limiti olan 0° 'ye yaklaştıkça yüzey kalitesi iyileşmektedir. Benzer durum özgül kesme enerjisi için de

geçerlidir. Eğim açısı için ise en üst değeri olan 30°'e yaklaştıkça yüzey kalitesi iyileşmektedir. Türbin kanadının karmaşık geometrisinden dolayı daha geniş bir aralıkta kesme açısı incelemesi yapılamamıştır. Ancak ön çalışmada tahmin edilen uygun aralıklar bu uygulamada karşılanmıştır. Örneğin eğim açısı kesme genişliği doğrultusunda simetrik bir karakteristik gösterdiği için, negatif değerlerinin ölçülememesi bir kayıp olmamıştır. Kullanılan deney seti ve parametre aralıkları mevcut koşullar içerisinde en etkili deney koşullarının elde edilmesini sağlamıştır.

İnce talaş akışsal frezeleme işleminde incelenen işlem çıktıları için Çok-Amaçlı Parçacık Sürü Optimizasyonu uygulanmış ve Pareto optimal çözüm seti elde edilmiştir. Bu çözüm seti üzerinden üç adet talaşlı imalat stratejisi seçilmiş ve bu senaryoları gerçekleştirmek için gerekli optimal işlem parametrelerinin değerleriyle sürecin doğrulaması yapılmıştır. Bu senaryolardan birincisi maksimum performans ve enerji verimliliği olarak belirlenmiştir. Bu senaryo için elde edilen optimal işlem parametresi değerleri yaklaşma açısı, eğim açısı, kesme genişliği ve kesme hızı için sırasıyla; 0°, 30°, 0,3 mm, ve 0,05 mm/dev'dir. İkinci senaryo enerji tasarrufu göz önünde bulundurularak makul kalitede tübin bıçağı işlenmesidir. Bu senaryo için elde edilen optimal işlem parametreleri ise sırasıyla 0°, 24, 67°, 0,201 mm, ve 0,0495 mm/dev'dir. Üçüncü senaryo ise maksimum yüzey kalitesi hedeflenmiştir. Bu senaryo için sırasıyla; 0°, 30°, 0,1 mm, ve 0,03 mm/dev'dir olarak işlem parametrelerinin değerleri belirlenmiştir.

Türbin bıçağının torna-freze takım tezgahlarında talaşlı imalatında kesici takım eğim açılarının, özgül kesme enerjisi, talaş kaldırma debisi ve ortalama yüzey pürüzlülüğü işlem çıktıları üzerine etkileri incelenirken iyileştirme sağlanıp sağlanmadığının görülmesi için iki uygulamanın sonuçları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma için iki uygulamada yer alan ince talaş akışsal frezeleme işlemleri için elde edilen Pareto optimal çözüm setleri olurlu bölgeleri ile birlikte aynı grafik üzerinde oluşturulmuştur. Elde edilen ortak Pareto grafiği incelendiğinde, kesici takım eğim açıları ile benzer talaş kaldırma debisi ve özgül kesme enerjisi değerlerinin elde edilebileceği bir ince talaş işleminde, daha düşük ortalama yüzey pürüzlülüğü elde edilebildiği görülmüştür. Yani kesici takım eğim açıları işlem karakteristiğine göre belirlendiğinde iş parçasının yüzey kalitesi iyileştirilebilmektedir.

7.1 Önerilen Gelecek Çalışmaları

Türbin bıçağının torna-freze takım tezgahlarında imalat sürecinin verimli hale getirilmesi için geliştirilen metodoloji Ti6Al4V alaşımı ile iki uygulama üzerinde gerçekleştirilmiştir. Birinci uygulamada hem kaba talaş işlemi hem ince talaş işlem çıktıları incelenirken, ikinci uygulamada ise yalnızca ince talaş işlem çıktıları incelenmiştir. Ancak bütün işlemlerde işlem çıktısı olarak talaş kaldırma debisi incelenmiştir. İnce talaş işlemlerinde küresel parmak frezeler kullanılmıştır. Bu çalışmada küresel parmak frezeler ile kaldırılan anlık talaş miktarı, Denklem (3.9)'da yer alan ve kesme derinliği, kesme genişliği ve ilerleme parametreleri üzerinden hesaplanan talaş kaldırma debisi formülü ile hesaplanmıştır. Birinci uygulamadaki ince talaş işleminde her bir deney seti için aynı kesici takım açısı ile çalışıldığından sonuçlar arasında sapmaya sebep olmamıştır. Ancak bu durum, ikinci uygulamada ince talaş frezeleme işleminde kesici takım eğim açılarının talaş kaldırma debisi üzerinde hiçbir etkisinin gözlenememesine yol açmıştır. Denklem (3.10)'da yer alan, kesici takım eğim açılarının da talaş kaldırma debisi hesabına dahil edildiği formül kullanılarak metodoloji güncellendiği durumda kesici takım eğim açılarının talaş kaldırma debisi üzerine etkileri de incelenebilecektir.

Bunların yanında kesici takım eğim açılarından kaynaklı, deney bölgeleri arasında form farklılıkları gözlemlenmiştir. Gelecekte yapılacak olan çalışmalarda, kesici takım eğim açılarının yol açtığı form hataları, bu hataların temel sebepleri, kesici takım ömrüne etkisi ve yüzey morfolojisi inceleyebilir konular olarak görülmektedir



KAYNAKLAR

- [1] **Groover, M.P.**, (2010) Fundamentals of modern manufacturing, *John Wiley & Sons Inc.*, USA.
- [2] **Zhu, L., Jiang, Z., Shi, J., Jin, C.**, (2015). An overview of turn-milling technology, *Int J Adv Manuf Technol*, 81, 493-505.
- [3] **Ozturk, E., Tunc, L.T., Budak, E.**, (2009). Investigation of lead and tilt angle effects in 5-axis ball-end milling processes, *Int J of Mach Tools & Manuf*, 49, 1053-1062.
- [4] **Zhu, L., Haonan, L., Wansan, W.**, (2013). Research on rotary surface topography by orthogonal turn-milling, *Int J Adv Manuf Technol*, 69, 2279-2292.
- [5] **Arrazola, P.J., Garay, A., Iriarte, L.M., Armendie, M.**, (2009). Machinability of titanium alloys (Ti6Al4V and Ti555.3), *J of Mater Process Tech*, 209, 2223-2230.
- [6] **Ezugwu, E.O., Bonney, J., Yamane, Y.**, (2003). An overview of the machinability of aeroengine alloys, *J of Mater Process Tech*, 134, 233-253.
- [7] **Thepsonti, T., Özel, T.**, (2012). Multi-objective process optimization for micro-end milling of Ti-6Al-4V titanium alloy, *Int J of Adv Manuf Technol*, 63, 903-914.
- [8] **Su, Y., He, N., Li, L., Li, X.L.**, (2006). An experimental investigation of effects of cooling/lubrication conditions on tool wear in high speed end milling of Ti6Al4V, *Wear*, 261, 760-766.
- [9] **Sun, J., Guo, Y.B.**, (2009). A comprehensive experimental study on surface integrity by end milling Ti-6Al-4V, *J of Mater Process Tech*, 209, 4036-4042.
- [10] **Rao, B., Dandekar, C.R., Shin, Y.C.**, (2011). An experimental and numerical study on the face milling of Ti-6Al-4V alloy: Tool

- performance and surface integrity, *J of Mater Process Tech*, 211, 294-304.
- [11] **Rahman, M., Wong, Y.S., Zareena, A.R.**, (2003). Machinability of titanium alloys, *JSME Int J Series C*, 46, 107-115.
- [12] **Abele, L., Fröhlich, B.**, (2008). High speed milling of titanium alloys, *Adv in Prod Eng & Manag*, 3, 131-140.
- [13] **Kara, M.E., Budak, E.**, (2015). Optimization of turn-milling processes, *Procedia CIRP*, 33, 476–483.
- [14] **Comak, A., Altintas, Y.**, (2017). Mechanics of turn-milling operations, *Int J of Mach Tools & Manuf*, 121, 2–9.
- [15] **Filho, C., Martins, J.**, (2012). Prediction of cutting forces in mill turning through process simulation using a five-axis machining center, *Int J of Adv Manuf Technol*, 58, 71-80.
- [16] **Karaguzel, U., Bakkal, M., Budak E.**, (2012). Process modeling of turn-milling using analytical approach, *3rd CIRP Conference on Process Machine Interactions, Procedia CIRP*, 4, 131-139.
- [17] **Schulz G., Spur G.**, (1990). High speed turn-milling—a new precision manufacturing technology for the machining of rotationally symmetrical workpieces, *CIRP Ann Manuf Technol*, 39(1), 107–109.
- [18] **Comak, A., Altintas, Y.**, (2017). Mechanics of turn-milling operations, *Int J of Mach Tools and Manuf*, 121, 2-9.
- [19] **Karagüzel, U., Uysal, E., Budak, E., Bakkal, M.**, (2015). Analytical modeling of turn-milling process geometry, kinematics and mechanics, *Int J of Mach Tools and Manuf*, 91, 24-33.
- [20] **Kopač, J., Pogačnik, M.**, (1997). Theory and practice of achieving quality surface in turn milling. *Int J Mach Tools Manuf*, 37(5), 709-715.
- [21] **Choudhury, S.K., Mangrulkar, K.S.**, (2000). Investigation of orthogonal turn-milling for the machining of rotationally symmetrical workpieces. *J Mater Process Technol*, 99(1–3), 120–128.

- [22] **Choudhury, S.K., Bajpai, J.B.**, (2005). Investigation in orthogonal turnmilling towards better surface finish. *J Mater Process Technol*, 170(3), 487–493.
- [23] **Savas, V., Ozay, C.**, (2007). Analysis of the surface roughness of tangential turn-milling for machining with end milling cutter. *J Mater Process Technol*, 186(1–3), 279–283.
- [24] **Savas, V., Ozay, C.**, (2008). The optimization of the surface roughness in the process of tangential turn-milling using genetic algorithm. *Int J Adv Manuf Technol*, 37, 35–340.
- [25] **Jiang, Z., Liu, X., Deng, X.**, (2012). Modeling and simulation on surface texture of workpiece machined by tangential turn-milling based on Matlab, *2nd Int Conf on Artif Intel, Manag Sci and Elect Comm (AIMSEC)*.
- [26] **Zhu, L., Li, H., Wang, W.**, (2013). Research on rotary surface topography by orthogonal turn-milling. *Int J Adv Manuf Technol* 69(9–12), 2279–2292.
- [27] **Uysal, E., Karaguzel, U., Budak, E., Bakkal, M.**, (2014). Investigating eccentricity effects in turn-milling operations, *Procedia CIRP*, 14, 176-181.
- [28] **Qiu, W., Liu, Q., Yuan, S.**, (2015). Modeling of cutting forces in orthogonal turn-milling with round insert cutters, *Int J Adv Manuf Technol*, 78, 1211-1222.
- [29] **Karaguzel U., Olgun U., Uysal E., Budak E., Bakkal M.**, (2015). Increasing tool life in machining of difficult-to-cut materials using nonconventional turning processes, *Int J Adv Manuf Technol*, 77, 1993-2004.
- [30] **Prasad Babu, G.H.V., Murthy, B.S.N., Venkatarao, K., Ratnam, C.H.**, (2016). Multi-response optimization in orthogonal turn milling by analyzing tool vibration and surface roughness using response surface methodology, *Proc IMechE Part B: J Engineering Manufacture*, 1–10.

- [31] **Wolovich, W., Albakri, H., Yalcin, H.,** (2002). The precise measurement of freeform surfaces. *Trans of ASME: J Manuf Sci Eng*, 124, 326–332.
- [32] Advance UK Aerospace, Defence, Security and Space Solutions Worldwide, erişim adresi: <http://www.adsadvance.co.uk/rolls-royce-begins-work-on-new-rotherham-facility.html>, erişim tarihi: Kasım 2017.
- [33] **Ghaffari, H., Payeganeh, G., Arbabtafti, M.,** (2014). Kinematic design of a novel 4-DOF parallel mechanism for turbine blade machining, *Int J Adv Manuf Technol*, 74, 729-739.
- [34] **Boz, Y., Erdim, H., Lazoglu.,** (2014). A comparison of solid model and three-orthogonal dexelfield methods for cutter-workpiece engagement calculations in three- and five-axis virtual milling, *Int J Adv Manuf Technol*, 81, 811-823.
- [35] **Bolsunovskya, S., Vermela, V., Gubanova, G.,** (2013). Cutting forces calculation and experimental measurement for 5-axis ball end milling, *Procedia CIRP*, 8, 235-239.
- [36] **Shana, C., Lva, X., Duana, W.,** (2016). Effect of tool inclination angle on the elastic deformation of thin-walled parts in multi-axis ball-end milling, *Procedia CIRP*, 56, 311-315.
- [37] **Kennedy, J., Eberhart, R.C.,** (1995), Particle Swarm Optimization, *Proceedings of IEEE Int Conf on Neur Netw*, 1942-1948.
- [38] **Bergh, F., Engelbrecht, A.P.,** (2006), A study of particle swarm optimization particle trajectories, *Infor Sci*, 176, 937-971.
- [39] **Janson, S., Middendorf, M.,** (2005). A hierarchical particle swarm optimizer and its adaptive variant, *IEEE Trans on Sys, Man, And Cybern Part B: Cybernetics*, 35, 1272-1282.
- [40] **Gupta, M.K., Sood, P.K., Sharma, V.S.,** (2016). Optimization of machining parameters and cutting fluids during nano-fluid based minimum quantity lubrication turning of titanium alloy by using evolutionary techniques, *J of Clean Prod* 135, 1276-1288.

- [41] **Li, C., Xiao, Q., Tang, Y., Li, L.,** (2016). A method integrating Taguchi, RSM and MOPSO to CNC machining parameters optimization for energy saving, *J of Clean Prod*, 135, 263-275.
- [42] **Gayatri, R., Baskar, N.,** (2015). Performance analysis of non-traditional algorithmic parameters in machining operation, *Int J of Adv Manuf Technol*, 77, 443-460.
- [43] **Marko, H., Simon, K., Tomaz, I., Matej, P., Joze, B., Miran, B.,** (2014). Turning Parameters Optimization using Particle Swarm Optimization, *Proc Eng*, 69, 670-677.
- [44] **Raja, S.B., Baskar, N.,** (2011). Particle swarm optimization technique for determining optimal machining parameters of different work piece materials in turning operation, *Int J of Adv Manuf Technol*, 54, 445-463.
- [45] **Costa, A., Celano, G., Fichera, S.,** (2011). Optimization of multi-pass turning economies through a hybrid particle swarm optimization technique, *Int J of Adv Manuf Technol*, 53, 421-433.
- [46] **Yang, W., Guo, Y., Liao, W.,** (2011). Optimization of multi-pass face milling using a fuzzy particle swarm optimization algorithm, *Int J of Adv Manuf Technol*, 54, 45-57.
- [47] **Yang, W., Guo, Y., Liao, W.,** (2011). Multi-objective optimization of multi-pass face milling using particle swarm intelligence, *Int J of Adv Manuf Technol*, 56, 429-443.
- [48] **Rao, R.V., Pawar, P.J.,** (2010). Parameter optimization of a multi-pass milling process using non-traditional optimization, *Appl Soft Comput*, 10, 445-456.
- [49] **Sirinivas, J., Giri, R., Yang, S.H.,** (2009). Optimization of multi-pass turning using particle swarm intelligence, *Int J of Adv Manuf Technol*, 40, 46-66.
- [50] **Li, J.G., Gao, D., Yao, Y.X.,** (2008). Cutting Parameters Optimization by Using Particle Swarm Optimization (PSO), *Appl Mech and Mater*, 10-12, 879-883.
- [51] **Baskar, N., Asokan, P., Saravanan, R., Prabhakaran, G.,** (2005). Optimization of machining parameters for milling operations

using non-conventional methods, *Int J of Adv Manuf Technol*, 25, 1078-1088.

- [52] **Hanafi,I., Cabrera, F.M., Dimane, F., Manzanares, JT.,** (2016). Application of particle swarm optimization for optimizing the process parameters in turning of PEEK CF30 composites, *Proc Technol*, 22, 195-202.
- [53] **Gupta, M.K., Sood, P.K., Sharma, V.S.,** (2016). Optimization of machining parameters and cutting fluids during nano-fluid based minimum quantity lubrication turning of titanium alloy by using evolutionary techniques, *J of Clean Prod*, 135, 1276-1288.
- [54] **Sreenivasa, RM., Venkaiah, N.,** (2015). Parametric Optimization in Machining of Nimonic-263 Alloy using RSM and Particle Swarm Optimization, *Proc Mater Sci*, 10, 70-79.
- [55] **Thepsonthi, T., Özel, T.,** (2012). Multi-objective process optimization for micro-end milling of Ti-6Al-4V titanium alloy, *Int J of Adv Manuf Technol*, 63, 903-914.
- [56] **Yegnanarayana, B.,** (2006). Artificial Neural Networks, *Prentice Hall of India, Private Limited*, New Delhi, India.
- [57] **Garcia-Nieto, P.J., Garcia-Gonzalo, E., Vilan, J.A., Robleda, A.S.,** (2016). A new predictive model based on the PSO-optimized support vector machine approach for predicting the milling tool wear from milling runs experimental data, *Int J of Adv Manuf Technol*, 86, 769-780.
- [58] **Escamilla-Salazar, I.G., Torres-Trevino, L., Gonzalez-Ortiz, G.,** (2016). Intelligent parameter identification of machining Ti643 alloy, *Int J of Adv Manuf Technol*, 86, 1997-2009.
- [59] **Xue, H., Wang, S., Yi, L., Zhu, R., Cai, B., Sun, S.,** (2015). Tool life prediction based on particle swarm optimization–back propagation neural network, *Proc IMechE Part B: J Eng Manuf*, 229, 1742-1752.

- [60] **Ehmann, K.F., Kapoor, S.G., Devor, R.E., Lazoglu, I.,** (1997). Machining process modeling: a review, *J of Manuf Sci and Eng*, 119, 655–663.
- [61] **Alaudin, M., Baradie, M.A.A., Hasmi, M.S.J.,** (1995). Computer-aided analysis of a surface roughness model for the end milling, *J of Mater Proc Technol*, 55, 123–127.
- [62] **Chen, A., Liu, W.C., Duffie, N.A.,** (1998). A surface topography model for automated surface finishing, *Int J of Mach Tools and Manuf*, 38, 543–550.
- [63] **Zhu, R., Kapor, S.G., DeVor, R.E.,** (2001). Mechanistic modeling of the ball end milling process for multi-axis machining of free-form surfaces, *J of Manuf Sci and Eng*, 123, 369–379.
- [64] **Ko, T.J., Kim, H.S., Lee, S.S.,** (2001). Selection of the machining inclination angle in high speed ball end milling, *Int J of Adv Manuf Technol*, 17, 163–170.
- [65] **Chen, X., Zhao, J., Zhang, W.,** (2015). Influence of milling modes and tool postures on the milled surface for multi-axis finish ball-end milling, *Int J of Adv Manuf Technol*, 77, 2035-2050.
- [66] **Zhang, X.F., Xie, J., Xie, H.F., Li, L.H.,** (2012). Experimental investigation on various tool path strategies influencing surface quality and form accuracy of CNC milled complex freeform surface, *Int J of Adv Manuf Technol*, 59, 647-654.
- [67] **Mhamdia, M.B., Boujelbenea, M., Bayraktara, E., Zghalb, A.,** (2012). Surface integrity of Titanium alloy Ti-6Al-4V in ball end milling, *Physics Proc*, 25, 355-362.
- [68] **Vakondios, D., Kyratsis, P., Yaldiz, S., Antoniadis, A.,** (2012). Influence of milling strategy on the surface roughness in ball end milling of the aluminum alloy Al7075-T6, *Measur*, 45, 1480-1488.
- [69] **Chen, X., Zhao, J., Dong, Y., Li, A., Wang, D.,** (2014). Research on the machined surface integrity under combination of various inclination angles in multi-axis ball end milling, *Proc IMechE Part B: J Eng Manuf*, 228, 31-50.

- [70] **Chen, X., Zhao, J., Dong Y., Han, S., Li, A., Wang, D.,** (2013). Effects of inclination angles on geometrical features of machined surface in five-axis milling, *Int J of Adv Manuf Technol*, 65, 1721-1733.
- [71] **Bhopale, N.N., Pawade, R.S., Joshi, S.S.,** (2017). Surface quality analysis in ball end milling of Inconel 718 cantilevers by response surface methodology, *Proc IMechE Part B: J Eng Manuf*, 231, 628-640.
- [72] **Batista, M.F, Rodrigues, A.R., Coelho, R.T.,** (2017). Modelling and characterisation of roughness of moulds produced by high speed machining with ball-nose end mill, *Proc IMechE Part B: J Eng Manuf*, 231, 933-944.
- [73] **Sonawane, H.A., Joshi, S.S.,** (2015). Modeling of machined surface quality in high-speed ball-end milling of Inconel-718 thin cantilevers, *Int J of Adv Manuf Technol*, 78, 1751-1768.
- [74] **Shana, C., Lva, X., Duana, W.,** (2016). Effect of tool inclination angle on the elastic deformation of thin-walled parts in multi-axis ball-end milling, *Proc CIRP*, 56, 311-315.
- [75] **Dikshit, M.K., Puri, A.B., Maity, A.,** (2016). Optimization of surface roughness in ball-end milling using teaching-learning-based optimization and response surface methodology, *Proc IMechE Part B: J Eng Manuf*, 230, 1-12.
- [76] **Yao1, C., Tan, L., Yang, P., Zhang, D.,** (2017). Effects of tool orientation and surface curvature on surface integrity in ball end milling of TC17, *Int J of Adv Manuf Technol*, Inpress.
- [77] **Groover, M., Zimmers, E.,** (1984). CAD/CAM Computer-Aided Design and Manufacturing, *Prentice Hall*, Upper Saddle River, New Jersey.
- [78] **Box, G.E.P., Wilson, K.B.,** (1951). On the experimental attainment of optimum conditions, *J of the Royal Statis Society*, 13(1), 1-45.
- [79] **Myers, R.H., Montgomery, D.C., Anderson-Cook, C.M.,** (2016). Response Surface Methodology: Process and Product Optimization

Using Designed Experiments, 4th Edition, *John Wiley & Sons*, Hoboken, New Jersey.

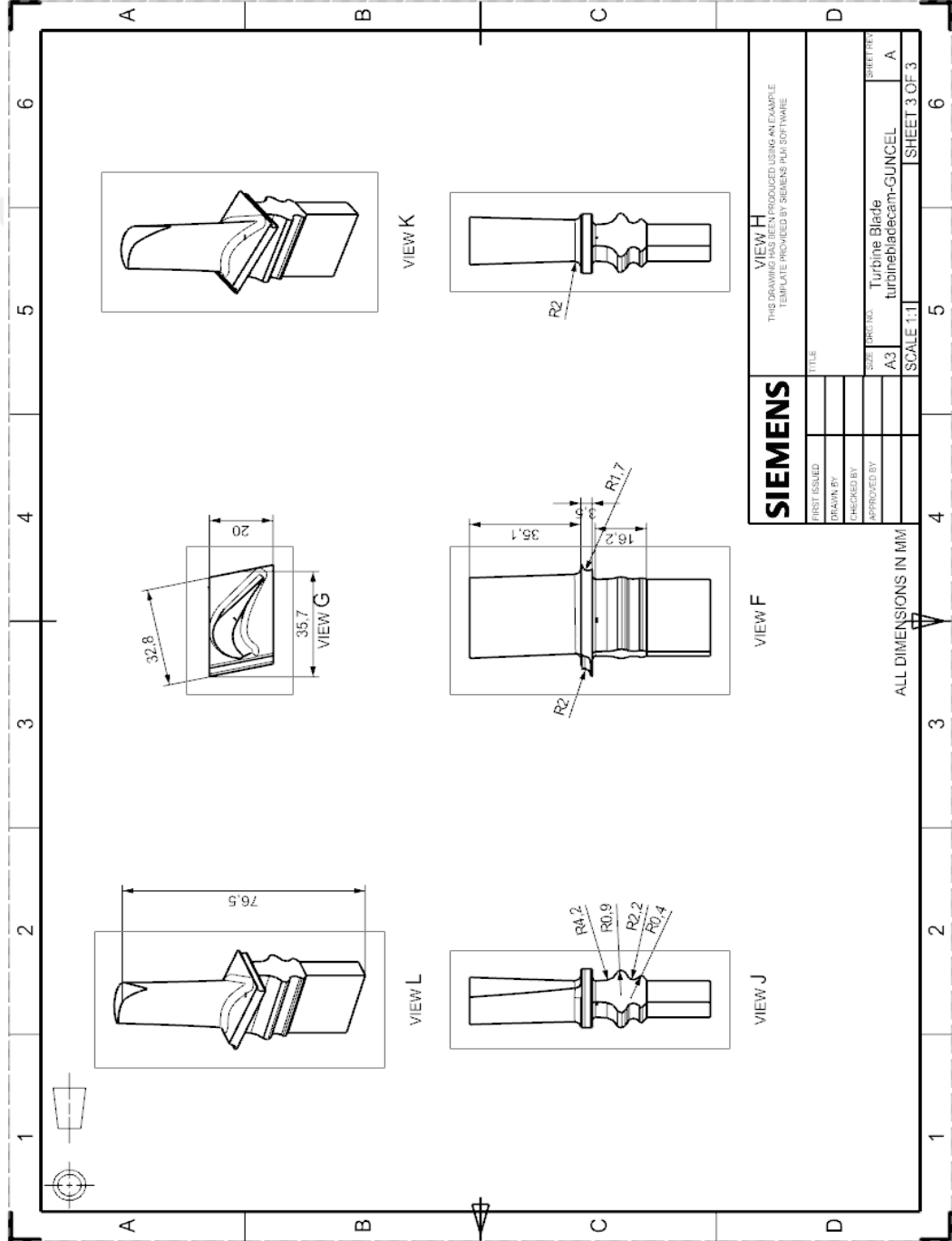
- [80] CHEM21 online learning platform, erişim adresi: <http://learning.chem21.eu/process-design/-/design-of-experiments/experimental-designs-response-surface-design/>, erişim tarihi: 20 Kasım 2017.
- [81] **Khuri, A.I., Cornell, J.A.**, (1996). *Response Surfaces: Designs and Analyses: Second Edition*, *Marcel Dekker*, New York, New York.
- [82] **Lawson, J.**, (2015). *Design and Analysis of Experiments with R*, *Taylor & Francis Group*, New York.
- [83] **Black, J.T., Kohser, R. A.**, (2008) *DeGarmo's materials and processes in manufacturing*, *John Wiley & Sons Inc.*, USA.
- [84] **Gutowski, T.G., Dahmus, J.B., Thiriez, A.**, (2006) Electrical energy requirements for manufacturing processes, *13th CIRP Int Conf on Life Cycle Eng*, Leuven, Belgium, 31 May- 2 June.
- [85] **Moradnazard, M., Unver, H.O.**, (2017). Energy consumption characteristics of turn-mill machining, *Int J Adv Manuf Technol*, 91(5-8), 1991-2016, DOI:10.1007/s00170-016-9868-6.
- [86] **Benardos, P.G., Vosniakos, G.**, (2003). Predicting surface roughness in machining: a review, *Int J of Mach Tools and Manuf*, 43(8), 833-844.
- [87] **Gadelmawla, E.S., Koura M.M., Maksoud T.M.A., Elewa I.M., Soliman, H.H.**, (2002). Roughness parameters, *J of Mater Proc Technol*, 123, 133-145.
- [88] **Quintana, G., Ciurana, J., Ribatallada, J.**, (2010). Surface Roughness Generation and Material Removal Rate in Ball End Milling Operations, *Mater and Manuf Proc*, 25:6, 386-398, DOI:10.1080/15394450902996601
- [89] **Coello Coello, C.A., Pulido, G.T., Lechuga, M.S.**, (2004). Handling Multiple Objectives with Particle Swarm Optimization, *IEEE Trans on Evolution Comput*, 8(3).
- [90] SECO TOOLS TÜRKİYE, "Solid Karbür Parmak Frezeler", erişim adresi: https://www.secotools.com/#article/m_7426, erişim tarihi: Haziran 2017.

[91] **Vining, G., Kowalski, S.M.**, (2011). *Statistical Methods for Engineers*,
Cengage Learning, USA.



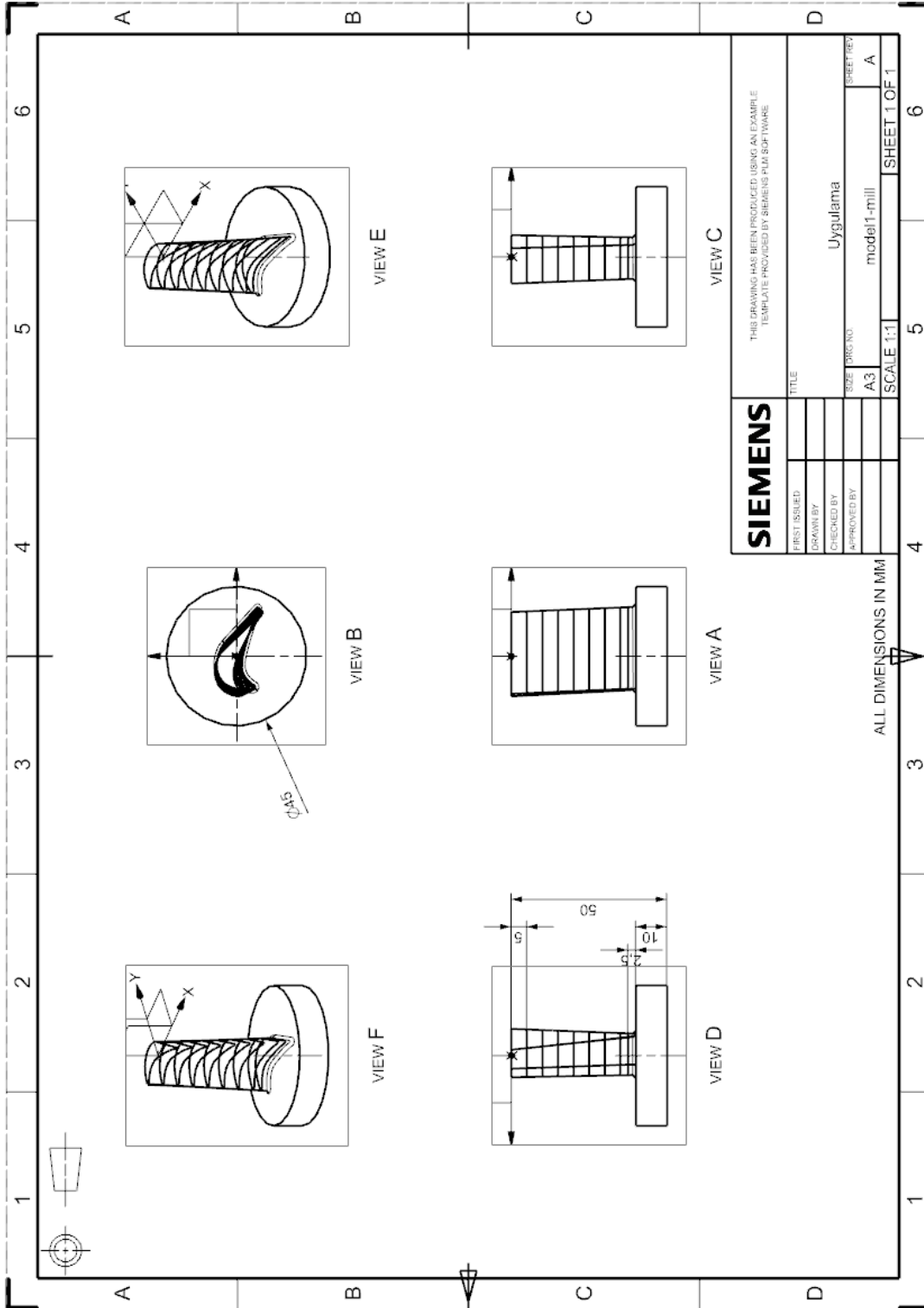
EKLER

EK 1: Metodoloji geliştirmede kullanılan türbin bıçağı geometrisi. (Ölçölendirme mm cinsinden yapılmıştır.)



EK 2: Uygulama 1 ve uygulama 2 için işlenen türbin kanadı geometrisi.

(Ölçülendirme mm cinsinden yapılmıştır.)



EK 6: ÇAPSO için kullanılan ana MATLAB kodu

```
clc;
clear;
close all;

%Problem Definition
CostFunction=@(x) ofun_mopso(x); % objective function
nVar=4; % Number of Decision Variables
VarSize=[1 nVar]; % Size of Decision Variables Matrix
VarMin=[0 10 0.1 0.03]; % Lower Bound of Variables
VarMax=[40 30 0.3 0.05]; % Upper Bound of Variables

% MOPSO Parameters
MaxIt=50; % Maximum Number of Iterations
tol=[0.005 0.005 5]; % Stopping Criteria
nPop=700; % Population Size
nRep=650; % Repository Size
w=0.5; % Inertia Weight
wdamp=0.8; % Intertia Weight Damping Rate
c1=1.5; % Personal Learning Coefficient
c2=2; % Global Learning Coefficient
nGrid=7; % Number of Grids per Dimension
alpha=0.1; % Inflation Rate
beta=2; % Leader Selection Pressure
gamma=2; % Deletion Selection Pressure
mu=0.75; % Mutation Rate

%% Initialization
PreviousCost =zeros(nPop,3);
CurrentCost =zeros(nPop,3);
fark = repmat(tol,nPop,1);
empty_particle.Position=[];

% initial particle features
empty_particle.Velocity=[];
empty_particle.Cost=[];
empty_particle.Best.Position=[];
empty_particle.Best.Cost=[];
empty_particle.IsDominated=[];
empty_particle.GridIndex=[];
empty_particle.GridSubIndex=[];
pop=repmat(empty_particle,nPop,1);
% building population matrix from particles&their features
for i=1:nPop
    pop(i).Position=unifrnd(VarMin,VarMax,VarSize);
% determination of initial random positions
    pop(i).Velocity=zeros(VarSize);
% determination of initial zero velocities
    pop(i).Cost=CostFunction(pop(i).Position);
% calculation of initial obj fnc values
    PreviousCost(i,:)=transpose(pop(i).Cost);
% Update Personal Best
    pop(i).Best.Position=pop(i).Position;
% best position equals to first position for initialization
    pop(i).Best.Cost=pop(i).Cost;
% best objfnc value equals to first objfnc value for initialization
end
% Determine Domination
```

```

pop=DetermineDomination(pop);
% selection of the particle which is going to move to repository
rep=pop(~[pop.IsDominated]);
% placing the the particle which is selected to move to repository
Grid=CreateGrid(rep,nGrid,alpha);
% for Figure 1
for i=1:numel(rep)
    rep(i)=FindGridIndex(rep(i),Grid);
end

%% MOPSO Main Loop
fark = abs(PreviousCost-CurrentCost) ;
for it=1:MaxIt
    found = 0;
    abc = mean(fark,1);
    for jjj = 1:size(tol,2)
        if abc(jjj) > tol(jjj)
            found = 1;
        end
    end
    if (found==1)
        PreviousCost = CurrentCost;
        for i=1:nPop
            leader=SelectLeader(rep,beta);
            pop(i).Velocity = w*pop(i).Velocity ...
% updating velocities
            +c1*rand(VarSize).*(pop(i).Best.Position-
pop(i).Position) ...
            +c2*rand(VarSize).*(leader.Position-pop(i).Position);
            pop(i).Position = pop(i).Position + pop(i).Velocity;
% updating positions
            pop(i).Position = max(pop(i).Position, VarMin);
% re-arrange the position if the particle go away the limits
            pop(i).Position = min(pop(i).Position, VarMax);
% re-arrange the position if the particle go away the limits
            pop(i).Cost = CostFunction(pop(i).Position);
% obj fnc values calculated due to position
            % Apply Mutation
            pm=(1-(it-1)/(MaxIt-1))^(1/mu);
% mutation factor
            if rand<pm
% mutation criteria
NewSol.Position=Mutate(pop(i).Position,pm,VarMin,VarMax);
%re-define positions
            NewSol.Cost=CostFunction(NewSol.Position);
%re-define obj fnc values
            if Dominates(NewSol,pop(i))
                pop(i).Position=NewSol.Position;
%re-specify positions after mutaiton
                pop(i).Cost=NewSol.Cost;
%re-specify objfnc values after mutaiton
            elseif Dominates(pop(i),NewSol)
                % Do Nothing
            else
                if rand<0.5
                    pop(i).Position=NewSol.Position;
                    pop(i).Cost=NewSol.Cost;
                end
            end
        end
    end
end
end

```



```

        if Dominates (pop(i), pop(i).Best)
            pop(i).Best.Position=pop(i).Position;
            pop(i).Best.Cost=pop(i).Cost;
        elseif Dominates (pop(i).Best, pop(i))
            % Do Nothing
        else
            if rand<0.5
                pop(i).Best.Position=pop(i).Position;
                pop(i).Best.Cost=pop(i).Cost;
            end
        end
        CurrentCost(i,:)=pop(i).Cost ;
        fark(i,:) = abs(PreviousCost(i,:)-CurrentCost(i,:)) ;
        if fark(i,:)==0
            fark(i,:)=tol;
        end
    end
end
% Add Non-Dominated Particles to REPOSITORY
rep=[rep
     pop(~[pop.IsDominated])]; %#ok
% Determine Domination of New Repository Members
rep=DetermineDomination(rep);
% Keep only Non-Dominated Members in the Repository
rep=rep(~[rep.IsDominated]);
% Update Grid
Grid=CreateGrid(rep,nGrid,alpha);
% Update Grid Indices
for i=1:numel(rep)
    rep(i)=FindGridIndex(rep(i),Grid);
end
% Check if Repository is Full
if numel(rep)>nRep
    Extra=numel(rep)-nRep;
    for e=1:Extra
        rep=DeleteOneRepMemebr(rep,gamma);
    end
end
end
% Show Iteration Information
disp(['Iteration ' num2str(it) ': Number of Rep Members = '
num2str(numel(rep))]);
figure(1);
% Plot Costs
PlotCosts(pop,rep);
pause(0.01);
%Damping Inertia Weight
w=w*wdamp;
%% END OF THE ALGO           % Solution Space %
if it==MaxIt
    mopsoN (rep) ;
    break
end
end
end
end
end

```



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Müge KAHYA
Uyruğu : T.C.
Doğum Tarihi ve Yeri : 01.08.1992-Ankara
E-posta : mmugekkahya@gmail.com;
m.kahya@etu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2014, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : 2017, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yıl	Yer	Görev
2014-2017	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü	Burslu Yüksek Lisans Öğrencisi
2014	FNSS Savunma Sistemleri A.Ş.	Stajyer
2013	TürkTraktör	Stajyer
2013	TUSAŞ-Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş.	Stajyer

YABANCI DİL: İngilizce (İleri düzeyde), Almanca (Temel düzeyde)

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Kahya, M., Serin, G., Özbayoğlu, A.M., Ünver, H.Ö., 2017.** Investigation of rough milling of Ti6Al4V using response surface methodology, The 8th International Symposium on Machining, 02-04 November, Antalya, Turkey.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Serin, G., **Kahya, M.**, Özbayoğlu, A.M., Ünver, H.Ö., 2017. An artificial neural network based power prediction model for rough cutting of AISI 304, The 8th International Symposium on Machining, 02-04 November, Antalya, Turkey.
- **Kahya, M.**, Serin, G., Ünver, H.Ö., Durlu, N., Eroğul, O., Demir, O., Oğuz, E., 2016. A comparative study of energy consumption of selective laser sintering and turn-mill machining, The 17th International Conference on Machine Design and Production, 12-15 July, Bursa, Turkey.
- Serin, G., **Kahya, M.**, Ünver, H.Ö., Güleç, Y., Durlu, N., Eroğul, O., 2016. A review of additive manufacturing technologies, The 17th International Conference on Machine Design and Production, 12-15 July, Bursa, Turkey.
- Altıntaş, R.S., **Kahya, M.**, Ünver, H.Ö., 2016, “Modelling and Investigation of Energy Consumption in Feature Based Milling”, International Journal of Advanced Manufacturing Technologies, pp:1-19,doi:10.1007/s00170-016-8441-7.
- **Kahya, M.**, Ünver, H.Ö., Jafari, R., Okutucu-Özyurt, T., 2015, “Process Optimization of Micro-WEDM for Micro Channel Manufacturing Using Taguchi Methodology”, The 25th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM), Wolverhampton, United Kingdom.