

**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İŞLENMESİ ZOR MALZEMELERİN YÜKSEK BASINÇLI SOĞUTMA
SİSTEMİ İLE İŞLENMESİNDE KALINTI GERİLME VE SICAKLIK
DEĞİŞİMİNİN ANALİZİ**

Lokman YÜNLÜ

**Danışman
Prof. Dr. Remzi VAROL**

**DOKTORA TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISPARTA - 2016**



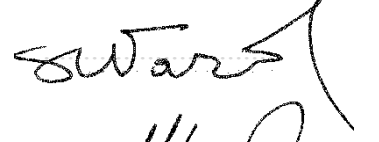
©2016 [Lokman YÜNLÜ]

TEZ ONAYI

Lokman YÜNLÜ tarafından hazırlanan "**İşlenmesi Zor Malzemelerin Yüksek Basıncılı Soğutma Sistemi İle İşlenmesinde Kalıntı Gerilme ve Sıcaklık Değişiminin Analizi**" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri üyeleri önünde Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **DOKTORA TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

Danışman

Prof. Dr. Remzi VAROL
Süleyman Demirel Üniversitesi



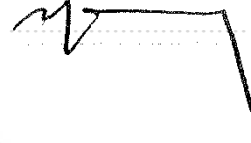
Jüri Üyesi

Prof. Dr. Ulvi ŞEKER
Gazi Üniversitesi



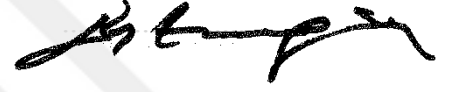
Jüri Üyesi

Prof. Dr. İbrahim SEVİM
Mersin Üniversitesi



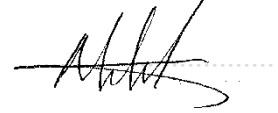
Jüri Üyesi

Prof. Dr. Ertuğrul DURAK
Süleyman Demirel Üniversitesi



Jüri Üyesi

Doç. Dr. Melek USAL
Süleyman Demirel Üniversitesi



Enstitü Müdürü

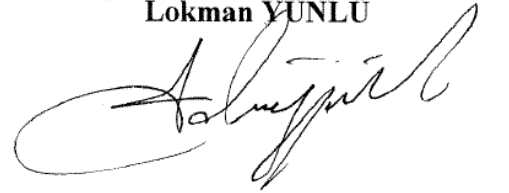
Doç. Dr. Yasin TUNCER

.....

TAAHHÜTNAME

Bu tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Lokman YÜNLÜ



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	i
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Kuramsal Temeller	4
1.1.1. Metal kesme mekaniği	5
1.1.2. Tornalama işleminde talaş kaldırma faktörleri	11
1.1.3. İşlenebilirlik	14
1.1.4. Takım aşınması	15
1.1.5. Takım ömrü	17
1.1.6. Yüzey pürüzlülüğü	18
1.1.7. Metal kesme işleminde sıcaklık oluşumu	19
1.1.8. Metal kesme işleminde soğutma sıvısı kullanımı	20
1.1.9. Metal kesme işleminde yüksek basınçlı soğutma metodunun	21
kullanımı	21
1.1.10. İşlenmesi zor malzemeler	23
1.1.10.1. Nikel esaslı süper alaşımlar ve işlenebilirliği	24
1.1.10.2. Titanyum esaslı süper alaşımlar ve işlenebilirliği	25
1.1.11. Kalıntı gerilme	26
1.1.12. Tornalama işleminde kalıntı gerilme oluşumu	28
1.1.13. X-ışını kırınımı yöntemiyle kalıntı gerilme analizi	30
1.1.14. Matematiksel model ve sonlu elemanlar metodu	32
1.1.15. Taguchi deney tasarımı ve analizi	34
2. KAYNAK ÖZETLERİ	37
3. MATERYAL ve YÖNTEM	55
3.1. Materyal	57
3.1.1. Deney malzemesi ve özellikleri	57
3.1.2. Kesici takım ve takım tutucu	58
3.1.3. Yüksek basınçlı soğutma (YBS) sistemi	60
3.1.4. Soğutma sıvısı	61
3.1.5. CNC torna ve özellikleri	61
3.1.6. Üç eksenli dinamometre	62
3.1.7. Amplifikatör	63
3.1.8. Veri toplama kartı	63
3.1.9. Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı	63
3.1.10. Sıcaklık ölçümü	64
3.1.11. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)	64
3.1.12. Numunelerin hazırlanması	64
3.1.13. Elektro-parlatma cihazı	65
3.1.14. X-ışını kırınım cihazı (XRD)	66
3.2. Yöntem	68
3.2.1. Deney çalışmalarına hazırlık	68
3.2.2. Kesme kuvvetlerinin ölçülmesi	68
3.2.3. Deney tasarımı ve kesme parametrelerinin belirlenmesi	70

3.2.4. Yüzey pürüzlülük değerlerinin ölçülmesi.....	71
3.2.5. Takım içi termokupl ile sıcaklık ölçümü	71
3.2.6. X-ışını kırınım yöntemi ile kalıntı gerilme analizlerinin yapılması	72
3.2.7. Sonlu elemanlar modelinin oluşturulması	73
3.2.7.1. Kesme kuvvetinin modellenmesi	73
3.2.7.2. Kesme sıcaklığı ve soğutma sıvısının modellenmesi.....	74
3.2.7.2.1. Kayma düzleminde oluşan ısı	75
3.2.7.2.2. Takım -işparçası arasındaki sıcaklığın modellenmesi.....	75
3.2.7.2.3. Soğutma sıvısının modellenmesi.....	77
3.2.7.3. Kesme işleminde kalıntı gerilmenin modellenmesi.....	77
3.2.8. Deform 3D programı ile simülasyonların yapılması	79
3.2.8.1. Tornalama işleminin 3 boyutlu simülasyonu	79
3.2.8.2. Sürtünme modelinin belirlenmesi	81
3.2.8.3. Takım geometrisi ve malzemesinin belirlenmesi.....	81
3.2.8.4. YBS sıvısının simülasyona dahil edilmesi	82
3.2.8.5. Deform 3D ile kesme kuvveti simülasyonların yapılması	84
3.2.8.6. Deform 3D ile sıcaklık simülasyonların yapılması	85
3.2.8.7. Deform 3D ile kalıntı gerilme simülasyonların yapılması	86
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	89
4.1. Inconel 718 Malzemeye Ait Deney ve Simülasyon Sonuçları.....	89
4.1.1. Kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülük değerleri	89
4.1.1.1. Kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülük sonuçları için varyans ..	92
analizi	92
4.1.1.2. Deney sonuçlarının taguchi optimizasyonu	94
4.1.1.3. Deney sonuçları için regresyon analizi.....	96
4.1.2. Inconel 718'in farklı işleme parametrelerindeki talaş geometrileri.	97
4.1.3. Inconel 718'in işlenmesinde takım aşınması ve SEM analizi	99
4.1.4. Inconel 718'in işlenmesinde oluşan sıcaklığın deney ve	104
simülasyon sonuçları	104
4.1.5. Inconel 718'in işlenmesinde oluşan kalıntı gerilmenin deney ve ...	108
simülasyon sonuçları	108
4.1.6. Inconel 718'in işleme sonrası ortaya çıkan yüzey özellikleri ve	113
mikroyapı analizi.....	113
4.2. Ti-6Al-4V Malzemeye Ait Deney ve Simülasyon Sonuçları.....	117
4.2.1. Kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülük değerleri	117
4.2.1.1. Kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülük sonuçları için varyans ..	120
analizi	120
4.2.1.2. Deney sonuçlarının taguchi optimizasyonu	123
4.2.1.3. Deney sonuçları için regresyon analizi	124
4.2.2. Ti-6Al-4V'nin farklı işleme parametrelerindeki talaş geometrileri.	124
4.2.3. Ti-6Al-4V'nin işlenmesinde takım aşınması ve SEM analizi	127
4.2.4. Ti-6Al-4V'nin işlenmesinde oluşan sıcaklığın deney ve	131
simülasyon sonuçları	131
4.2.5. Ti-6Al-4V'nin işlenmesinde oluşan kalıntı gerilmenin deney ve ...	133
simülasyon sonuçları	133
4.2.6. Ti-6Al-4V'nin işleme sonrası ortaya çıkan yüzey özellikleri ve	138
mikroyapı analizi.....	138
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	142
KAYNAKLAR	146
ÖZGEÇMİŞ	157

ÖZET

Doktora Tezi

İŞLENMESİ ZOR MALZEMELERİN YÜKSEK BASINÇLI SOĞUTMA SİSTEMİ İLE İŞLENMESİNDE KALINTI GERİLME VE SICAKLIK DEĞİŞİMİNİN ANALİZİ

Lokman YÜNLÜ

Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Remzi VAROL

Yüksek basınçlı soğutma sistemi (YBS), talaşlı imalatla talaş kaldırma oranını ve prodüktiviteyi önemli ölçüde artıran bir yöntemdir. Bunların yanı sıra takım-talaş ara yüzündeki sıcaklığın azaltılmasında, talaş kontrolünün geliştirilmesinde ve takım ömrünün artırılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Bu amaçla sunulan tez çalışmasında Havacılık ve Uzay endüstrisinde geniş kullanım alanına sahip Inconel 718 ve Ti-6Al-4V alaşımların yüksek basınçlı soğutma koşulları altında işlenebilirliği araştırılmıştır. Bu alaşımların işlenebilirliğini incelemek amacıyla çeşitli kesme parametrelerinde (kesme derinliği, kesme hızı, ilerleme oranı), soğutma şartlarında (geleneksel, 150, 300 bar) TiN, Al₂O₃, Ti (C,N) kaplamalı kesici takımlar kullanılarak bir dizi tornalama testleri yapılmıştır. Deneyler esnasında mineral esaslı kesme sıvısı kullanılmış, kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değerleri kaydedilmiştir. Ayrıca kesme parametrelerine ve soğutma koşullarına bağlı olarak kesici takımların ömürleri tespit edilmiştir. Elde edilen deney sonuçları analiz edilerek optimum kesme şartları belirlenmiştir. Bunlara ek olarak takım ucu sıcaklığı ve işlemeden sonra iş parçası üzerindeki kalıntı gerilmeler ölçülmüştür. Ölçümlerden elde edilen veriler bir sonlu elemanlar modelinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Yapılan tüm bu çalışmaların sonuçları incelendiğinde, YBS'nin Inconel 718 ve Ti-6Al-4V gibi alaşımların tornalanmasında işleme performansını kayda değer bir şekilde etkilediği ortaya çıkarılmıştır. Bu bağlamda YBS kullanımı ile takım-talaş ara yüzündeki sıcaklıklar, takım aşınmaları önemli ölçüde azaltılmış ve etkin bir talaş kontrolü sağlanmıştır. Bunlara bağlı olarak da parça üzerindeki kalıntı gerilmelerin tipi ve miktarı olumlu yönde değişiklik göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: İşlenebilirlik, İşlenmesi zor malzemeler, Yüksek basınçlı soğutma, Takım aşınması, Kesme sıcaklığı, Yüzey pürüzlülüğü, Kalıntı gerilme.

2016, 158 sayfa

ABSTRACT

PhD. Thesis

MACHINING OF HARD TO MACHINE MATERIALS WITH HIGH PRESSURE COOLING SYSTEM ANALYSIS OF RESIDUAL STRESS AND TEMPERATURE CHANGES

Lokman YÜNLÜ

**Süleyman Demirel University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Remzi VAROL

High Pressure Cooling System (HPC) is a method that significantly increases material removal rate and productivity in metal cutting. As well as, it plays an important role in decreasing of temperature at tool-chip interface, improving of chip control and prolonging of tool life. For this purpose, machinability of Inconel 718 and Ti-6Al-4V which have wide usage in aerospace industry were investigated under the high pressure cooling conditions within it presented thesis. In order to examine machinability of these material, numerous turning tests were made with various cutting parameters (depth of cut, cutting speed, feed rate), cooling conditions (conventional, 150, 300 bar) and cutting tools that have TiN, Al₂O₃, Ti (C,N) coating. During the experiments, mineral-based cutting fluids were used and cutting forces and surface roughness values were recorded. Also, cutting tool life depending on cutting parameters and cooling conditions were determined. Optimum cutting parameters were achieved by analyzing obtained experimental results. In addition, cutting tool tip temperatures and residual stresses on workpiece after machining were measured and the results were compared with result obtained from achieved a Finite Element Modelling.

As result of all these studies, it is shown that HPC considerably affects the machining performance especially in turning of Inconel 718 and Ti-6Al-4V alloys. So, tool-chip interface temperature and tool wear were remarkably decreased and effective chip control were provided by using HPC. Depending upon these facts, type and amount of residual stresses on workpiece also showed change positively.

Keywords: Machinability, Hard-to-machine materials, High pressure cooling, Tool wear, Cutting temperature, Surface roughness, Residual stress.

2016, 158 pages

TEŞEKKÜR

Üniversite öğrenimim boyunca bilgi, tecrübe ve desteklerini benden esirgemeyen danışman Hocam, sayın Prof. Dr. Remzi Varol’a sonsuz teşekkür ederim. Tez süresi boyunca bilgi ve yönlendirici fikirlerinden yararlandığım tez izleme komitesi üyesi hocalarım, sayın Prof. Dr. Cahit Kurbanoglu, sayın Prof. Dr. Ertugrul Durak ve sayın Doç. Dr. Melek Usal’a teşekkür ederim.

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde her türlü maddi ve manevi desteğini esirgemeyen, çalışmayla ilgili önemli anlarda beni cesaretlendiren ve deneyimlerini benimle paylaşan, değerli görüşleriyle beni yönlendiren hocam, sayın Doç. Dr. Oğuz Çolak’a sonsuz şükranlarımı sunarım.

Deneylein gerçekleştirildiği CAD/CAM Araştırma ve Uygulama Merkezi personeline, 108M380 No’lu Proje ile tezimi maddi olarak destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu TBTAK’a, konuyla ilgili tecrübelerini benimle paylaşan sayın Davorin Kramar ve Ljubjana Üniversitesi LABOD personeline, kalıntı gerilme analizleri konusunda yardımlarını esirgemeyen sayın Caner şimşir ve Atılım Üniversitesi Mükemmeliyet merkezi çalışanlarına teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde herşeyimi kendilerine borçlu olduğum, hayatımın her anında yanımda olan ve sonsuz güvenleriyle beni tamamlayan Aileme çok teşekkür ederim.

Lokman YNL
ISPARTA, 2016

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Ortogonal kesme işlemi; Düzlemsel (a), Silindirik (b)	6
Şekil 1.2. Ortogonal kesme mekanığı.	7
Şekil 1.3. Eğik kesme işlemi; Düzlemsel (a), Silindirik (b).....	9
Şekil 1.4. Eğik kesmede kuvvet, hız ve kayma diyagramları	10
Şekil 1.5. Tornalama işlemi	12
Şekil 1.6. Deformasyon bölgeleri ve tabaka oluşumu	13
Şekil 1.7. Talaş tipleri.	14
Şekil 1.8. Kesici takımında oluşan aşınma tipleri.	16
Şekil 1.9. Takım ömrü, Kesme hızı grafiksel ilişkisi.....	17
Şekil 1.10. R_a yüzey pürüzlülük değerinin gösterimi.	18
Şekil 1.11. Kesme işleminde oluşan deformasyon bölgeleri ve sıcaklık	19
dağılımı.....	
Şekil 1.12. Soğutma sıvısının uygulama yönleri	21
Şekil 1.13. Yüksek basınçlı soğutma sisteminin uygulanışı	22
Şekil 1.14. Süperalaşımların jet motorlarında kullanıldığı bölgeler.	24
Şekil 1.15. Tornalama işleminde kalıntı gerilme oluşum tabakaları.....	28
Şekil 1.16. Kalıntı gerilme mekanizması, mekanik etki	29
Şekil 1.17. İş parçası yüzeyine göre kalıntı gerilme bileşenlerinin yönleri.	30
Şekil 1.18. X-ışını kırınımı yöntemiyle kalıntı gerilme hesabı	31
Şekil 3.1. Çalışmada izlenen yolun sistematik akış şeması	56
Şekil 3.2. Deneylerde kullanılan iş parçalarına ait boyutlar.	57
Şekil 3.3. Deneylerde kullanılan kesici uç.	58
Şekil 3.4. Deneylerde kullanılan SECO Jet stream takım tutucu	59
Şekil 3.5. Yüksek Basınç Soğutma sisteminin yapısı	60
Şekil 3.6. Üç eksen dinamometrenin yapısı.	62
Şekil 3.7. Ti-6Al-4V malzemenin bakalite alınması.....	65
Şekil 3.8. Inconel 718 malzemenin bakalite alınması.....	65
Şekil 3.9. Numunedeki elektro-parlatma işlemi ve kalıntı gerilme ölçüm	66
yönleri.....	
Şekil 3.10. Kalıntı gerilme analizinde kullanılan GE–Seifert 3003 XRD cihazı	67
Şekil 3.11. Deney düzeneğinin şematik görünümü.....	67
Şekil 3.12. Elde edilen kesme kuvvetlerinin tam zamanlı grafiği.....	69
Şekil 3.13. Elde edilen kesme kuvvetlerinin (F_c ve F_f) 1 saniyelik grafiği.....	69
Şekil 3.14. CNMG takım içerisine K tipi termokuplun yerleştirilmesi.	72
Şekil 3.15. Oxley’in talaş kaldırma modeli.....	73
Şekil 3.16. Birincil deformasyon bölgesindeki ısı transfer modeli	75
Şekil 3.17. İşparçası üzerindeki sürtünme ısı kaynağı modeli	76
Şekil 3.18. Mekanik etki ile kalıntı gerilmenin oluşumu	78
Şekil 3.19. Temel torna bileşenleri ve analiz etki ilişkisi.	80
Şekil 3.20. Simülasyon modeli ve kesme parametreleri	80
Şekil 3.21. Oxley malzeme modeli	81
Şekil 3.22. Kesici takım ve nozul’a ait çizim.....	82
Şekil 3.23. Eğik akış sistemiği.	82
Şekil 3.24. YBS’nin etki ettiği talaş yüzeyi	83
Şekil 3.25. Kesme kuvveti simülasyonları	84
Şekil 3.26. Takım içi termokupl yöntemi ile sıcaklık simülasyonu.....	85
Şekil 3.27. Takım ucu sıcaklığının simülasyonla belirlenmesi.....	86
Şekil 3.28. Kesici takım ve işparçası modellerinin yapılması	86

Şekil 3.29. Oluşturulan 3D sonlu elamanlar modeli	87
Şekil 3.30. YBS mekanik etkisinin uygulanması	87
Şekil 3.31. İş parçasının oda sıcaklığına kadar soğutulması	88
Şekil 3.32. Kalıntı gerilme değerlerinin elde edilmesi	88
Şekil 4.1. Esas kesme kuvveti F_c 'nin ilerleme oranına göre değişimi	91
Şekil 4.2. Yüzey pürüzlülüğü; R_a 'nın ilerleme oranına göre değişimi	92
Şekil 4.3. Ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin S/N oranları	95
Şekil 4.4. Farklı soğutma sıvısı basınçlarında oluşan talaş geometrileri.	98
Şekil 4.5. Inconel 718 süper alaşımı için takım ömürleri	99
Şekil 4.6. Esas kesme kuvveti; F_c 'nin işleme zamanı ile değişimi	101
Şekil 4.7. Yüzey pürüzlülüğü; R_a 'nın işleme zamanı ile değişimi	101
Şekil 4.8. 6 bar soğutma basıncında takım yan yüzey ve krater aşınmaları	102
Şekil 4.9. 150 bar soğutma basıncında takım yan yüzey ve krater aşınmaları	103
Şekil 4.10. 300 bar soğutma basıncında takım yan yüzey ve krater aşınmaları ..	104
Şekil 4.11. Altı (6) numaralı kesme deneyi için takım içi maksimum sıcaklık .. değeri	105
Şekil 4.12. Takım içine yerleştirilen termokuplun gösterimi	106
Şekil 4.13. Sekiz (8) numaralı kesme deneyi için takım içi maksimum	106
sıcaklık simülasyonu.	106
Şekil 4.14. Inconel 718'e ait farklı basınçta işlenen numuneler	109
Şekil 4.15. 6 bar soğutma basıncında kalıntı gerilme XRD ve simülasyon	111
sonuçları.	111
Şekil 4.16. 150 bar soğutma basıncında kalıntı gerilme XRD ve simülasyon ...	112
sonuçları	112
Şekil 4.17. 300 bar soğutma basıncında kalıntı gerilme XRD ve simülasyon ...	113
sonuçları	113
Şekil 4.18. Inconel 718 alaşımının işleme sonrası ham yüzey görüntüleri	114
Şekil 4.19. Inconel 718 alaşımının 6 bar, 150 μ m derinlikteki mikroyapı	115
görüntüleri	115
Şekil 4.20. Inconel 718 alaşımının 150 bar basınçta mikroyapı görüntüleri	116
Şekil 4.21. Inconel 718 alaşımının 300 bar basınçta mikroyapı analiz görüntüleri	117
Şekil 4.22. Esas kesme kuvveti; F_c 'nin kesme hızına ve ilerleme oranına göre değişimi	119
Şekil 4.23. Yüzey pürüzlülüğü; R_a 'nın ilerleme oranına göre değişimi	120
Şekil 4.24. Ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin S/N oranları	123
Şekil 4.25. Farklı soğutma sıvısı basınçlarında oluşan talaş geometrileri	126
Şekil 4.26. Ti-6Al-4V süper-alaşımı için takım ömürleri	127
Şekil 4.27. Esas kesme kuvveti; F_c 'nin işleme zamanı ile değişimi	128
Şekil 4.28. Yüzey pürüzlülük; R_a 'nın işleme zamanı ile değişimi	128
Şekil 4.29. 6 bar soğutma basıncında takım yan yüzey ve krater aşınmaları	129
Şekil 4.30. 150 bar soğutma basıncında takım yan yüzey ve krater aşınmaları ..	130
Şekil 4.31. 300 bar soğutma basıncında takım yan yüzey ve krater aşınmaları ..	131
Şekil 4.32. Bir (1) numaralı kesme deneyi için takım içi maksimum sıcaklık .. değeri	132
Şekil 4.33. Simülasyon olarak hesaplanan takım içi maksimum sıcaklık değeri	132
Şekil 4.34. Ti-6Al-4V'e ait farklı basınçta işlenen numuneler	134
Şekil 4.35. 6 bar soğutma basıncında kalıntı gerilme XRD ve simülasyon	135
sonuçları	135
Şekil 4.36. 150 bar soğutma basıncında kalıntı gerilme XRD ve simülasyon ...	136
sonuçları	136

Şekil 4.37. 300 bar soğutma basıncında kalıntı gerilme XRD ve simülasyon.... sonuçları.....	137
Şekil 4.38. Ti-6Al-4V alaşımın işleme sonrası ham yüzey görüntüleri.....	138
Şekil 4.39. Ti-6Al-4V alaşımın yüzey alt tabakadaki mikroyapı analiz görüntüleri	139
Şekil 4.40. Ti-6Al-4V alaşımın yüzey alt tabakadaki görüntüleri	140
Şekil 4.41. Ti-6Al-4V alaşımın yüzey alt tabakadaki görüntüleri	140



ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1. Inconel 718'in kimyasal bileşimi (%)	57
Çizelge 3.2. Inconel 718'in mekanik özellikleri.....	58
Çizelge 3.3. Ti-6Al-4V'nin kimyasal bileşimi (%).....	58
Çizelge 3.4. Ti-6Al-4V'nin mekanik özellikleri.....	58
Çizelge 3.5. Deneylerde kullanılan kesici uca ait geometrik boyutlar.....	59
Çizelge 3.6. Yüksek basınç nozulu hakkında bilgiler.....	59
Çizelge 3.7. Yüksek basınçlı soğutma sisteminin elemanları ve teknik özellikleri.....	60
Çizelge 3.8. ANL-75T CNC Torna tezgahının özellikleri.....	61
Çizelge 3.9. Deney parametreleri ve seviyeleri	71
Çizelge 3.10. L9 deney tasarımı.....	71
Çizelge 3.11. Simülasyon parametreleri	84
Çizelge 4.1. Inconel 718'e ait deney ve simülasyon sonuçları	89
Çizelge 4.2. Esas kesme kuvveti (F_c) için ANOVA bulguları	93
Çizelge 4.3. Radyal kuvvet (F_p) için ANOVA bulguları.....	93
Çizelge 4.4. İlerleme kuvveti (F_f) için ANOVA bulguları	94
Çizelge 4.5. Yüzey pürüzlülüğü (R_a) için ANOVA bulguları.....	94
Çizelge 4.6. Doğrulama testi sonuçları	96
Çizelge 4.7. Kesme anında oluşan sıcaklığın deney ve simülasyon sonuçları....	107
Çizelge 4.8. Ti-6Al-4V'ye ait deney ve simülasyon sonuçları	118
Çizelge 4.9. Esas kesme kuvveti (F_c) için ANOVA bulguları	121
Çizelge 4.10. Radyal kuvvet (F_p) için ANOVA bulguları.....	121
Çizelge 4.11. İlerleme kuvveti (F_f) için ANOVA bulguları	122
Çizelge 4.12. Yüzey pürüzlülüğü (R_a) için ANOVA bulguları.....	122
Çizelge 4.13. Doğrulama testi sonuçları	124
Çizelge 4.14. Kesme anında oluşan sıcaklığın deney ve simülasyon sonuçları..	133

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

a	Eksenel kesme derinliği (Kesilmemiş talaş kalınlığı) (mm)
ac	Kesilmiş talaş kalınlığı (mm)
As	Kayma düzlemi alanı (mm ²)
b	Kesme genişliği (mm)
cs	İş parçası malzemesi ısı iletim katsayısı (w/m ² K)
f	İlerleme (mm/dev)
Fc	Esas kesme (Teğetsel) kuvveti (N)
Ff	İlerleme (Eksenel) kuvveti (N)
Fp	Pasif (Radyal) kuvvet (N)
Fs	Teğetsel sürtünme kuvveti (N)
F _R	Bileşke kuvvet (N)
n	Taylor takım ömrü sabiti
Nc	Normal kayma kuvveti (N)
Ns	Normal sürtünme kuvveti (N)
P	Soğutma sıvısı basıncı (bar)
Ra	Ortalama pürüzlülük değeri (μm)
r	Takım burun (uç) yarıçapı (mm)
T	Takım ömrü (dak)
V	Kesme Hızı (m/dak)
Vb	Yan Yüzey(Yanak) aşınması (μm)
VB	Yan yüzey aşınma ölçüsü (μm)
Vc	Talaş kaldırma oranı (cm ³ /dak)
Vs	Kayma hızı (m/dak)
ΔTc	Talaş oranındaki ortalama sıcaklık artışı (°C)
ΔTm	Talaş yüzeyi–talaş ara yüzeyi arasındaki en büyük sıcaklık artışı (°C)
γ	Talaş açısı
β	Sürtünme açısı
φ	Kayma açısı
φi	Eğim açısı
α	Serbest kenar boşluk açısı
γs	Kayma gerinmesi
γs	Kayma gerinme oranı
μ	Sürtünme katsayısı
η	Talaş akış açısı
λ	Yığılma faktörü
λs	İş parçası malzemesi ısı iletim oranı (w/m ² K)
ρ	İş parçası malzemesinin yoğunluğu (kg/m ³)
σs	Normal gerilme (N/mm ²)
τs	Kayma (kesilme) gerilmesi (N/mm ²)
BUE	Talaş yığılması (Built up edge)
Dev.	Devir (dev/dak)
Od	Ortogonal dizi
SEM	Tarama elektron mikroskobu
XRD	X ışını kırınımı
YBS	Yüksek Basıncılı Soğutma
YT	Yığıntı talaş

1. GİRİŞ

Üretim ve imalat sektöründeki gelişmeler, hem malzeme hem de bu malzemeleri kullanılabilir ürün haline getirme sürecindeki yöntemleri ve beklentileri arttırmaktadır. Küresel pazarlara ve ülkelerin ekonomisine yön veren otomotiv, havacılık, makine imalatı gibi sektörlerin en önemli parçalarından birini oluşturan talaşlı imalat üzerine yapılan araştırma çalışmaları güncelliğini her zaman canlı tutmaktadır. Bu endüstrideki yapılan çalışmaların amaçları öncelikle, kesme tekniklerini geliştirip verimliliği artırarak maksimum üretim hacmine ulaşabilmek, yüksek hassasiyette uzun ömürlü kullanışlı parçalar kazandırmak ya da mevcut imkanları en uygun şekilde kullanarak farklı ürünlerin imalat oranlarını yükseltebilmektir. Üretilen iş parçası için istenen işlevsel toleransların ve yüzey bütünlüğünün en uygun işleme şartlarıyla gerçekleştirilmesi kesici takım/takım tezgâhı/iş parçası ilişkilerinin doğru kurulması ile mümkündür (Çakır, 2006). Bu işlemlerin teknik ve ekonomik yönden en az yük/maliyet, operatör açısından ise en yüksek emniyetle yerine getirilmesi bir bütün olarak talaşlı imalatın temel amaçları arasındadır.

Parçaları malzemedan istenilen ebatlarda ve çeşitli metotlarla ayırma işlemine metal kesme denir. Talaş kaldırma yöntemi ve parametreleri işparçası malzeme özelliklerine göre belirlenebileceği gibi takımın malzemesi, talaş ve takım geometrisi, kesme kuvvetleri, takım tezgâhlarının özellikleri, kesme sırasında oluşan ısı, kullanılan kesme sıvıları, işçilik maliyeti, çalışma ortamı gibi unsurlar talaşlı imalatımızı etkiler (Ovalı, 2008; Atakök, 2008). Malzeme fiyatı hariç diğer maliyetleri azaltmak ya da uygun değere indirmek ise uygun bir soğutma sıvısı ile mümkündür. Kesici takımın talaşla temas ettiği yüzeyde, takım ile iş parçasının sürtündüğü takım yüzeyinde ve iş parçasında talaşın ayrıldığı yerde ısı açığa çıkar. İmalat şekline, iş parçası ve takım malzemesine, kesme verilerine göre seçilen soğutma sıvısı oluşan bu ısıyı ortamdan uzaklaştırır, yağlama ile sürtünmenin etkisini azaltır ve böylece takım ömrünü artırır, yüzey kalitesini iyileştirir, kesme kuvvetleri ve gücünü azaltarak imalatı kolaylaştırır (Çevik, 2006).

Aşınmanın, yüksek sıcaklığın ve korozyonun mevcut olduğu çalışma şartlarında metal ve metal alaşımlarının, arzu edilen özellikleri sağlayamadığı noktalarda yeni

malzeme grupları devreye girmektedir. Bu malzeme gruplarının başında süper alaşımlar gelmektedir. Artarak süregelen teknolojiye gelişmelerle birlikte; ekonomik yönden elverişli, teknik açıdan uygun özel malzemelerin elde edilmesi için yüksek mekanik özelliğe sahip, yüksek sıcaklıkta aşınma ve korozyona dayanıklı süper alaşımların üretimine neden olmuştur (Çelik, 2006; Karabulut, 2006). Süper alaşımlar, yüksek sıcaklık uygulamalarında diğer tüm metalürjik malzemelerden daha çok tercih edilmektedir. Bu tercihe neden yüksek mukavemet, yüksek spesifik elastik modülü, yüksek aşınma dayanımı ve bu özelliklerin yüksek sıcaklıkta bile muhafaza edilmesidir (Karabulut, 2006; Kahraman, 2008).

Titanyum ve nikel esaslı işlenmesi zor alaşımlar yukarıda bahsedilen kabiliyetlerinden dolayı havacılık ve uzay sanayinde sıklıkla tercih edilmektedir. Bu üstün özellikleriyle birlikte yüksek elastik modülü, düşük ısı iletkenliği gibi kazanımları onları işlenmesi zor malzemeler grubuna sokmaktadır. İşleme esnasında ihtiyaç duyulan yüksek kesme kuvveti ve sıcaklık daha düşük bir takım ömrü ve kesme verimliliğini de beraberinde getirmektedir. Dolayısıyla bu tür malzemelerin işlenmesinde ortaya çıkan hızlı takım aşınması ve işleme sonrası oluşan yüzey gerilimleri gibi olumsuz çıktılar çözülmesi ve iyileştirilmesi gereken bir problemdir. Hassas alanlarda kullanılma tercihi ile bu malzemelerin imalatı ve işlenmesinin önemi daha da artmaktadır. Süper alaşım malzemelerin 30-60 m/dak kesme hızları aralığında işleme uygulamaları mevcuttur. Daha yüksek verimlilik elde etmek için bu değerlerin 60-120 m/dak aralıklarına kadar çıkılması gerekmektedir (Ezugwu, 2005). Fakat bu kesme hızlarında işlemede hızlı bir takım aşınması ve kesme bölgesinde yüksek bir işleme sıcaklığının oluşmasına sebep olmaktadır (Günay vd., 2013; Dahlman, 2002).

Büyük kesme hızları ile işleme sırasında ortaya çıkan aşırı sıcaklık yüksek basınçlı soğutma sisteminin kullanımını gerekli kılan nedenlerin başında gelmektedir. Kesme bölgesinde ortaya çıkan bu sıcaklığa geleneksel soğutma şartları uygulanması ortamda bir buhar tabakası oluşmasına sebep olmaktadır. Bu durum; soğutma sıvısının sıcaklığın olduğu kaynağa veya kesme bölgesine ulaşmasına engel teşkil etmektedir. Bu bir bakıma o bölgede oluşan havayı soğutmak anlamına gelmektedir. Dolayısıyla soğutma ve yağlama işlemi verimli bir şekilde kullanılamamaktadır. Bu olumsuz etkinin ortadan kalkması için yüksek basınçlı soğutma desteği ile soğutma

sıvısı cebri bir halde kesme bölgesine nüfuz ettirilmekte ve burada oluşan yüksek sıcaklık, basıncın etkisiyle koparak daha kısa boyutlara gelen talaşla birlikte ortamdan atılmaktadır.

Isıl işlem, talaşlı ve talaşsız imalat, kimyasal işlemler gibi bütün imalat işlemleri, makine parçaları üzerinde kalıntı gerilmeler oluşturur. Özellikle talaş kaldırma yöntemlerine bağlı olarak malzeme üzerinde gerilmeler oluşmaktadır (Tekaslan, 2007). Kalıntı gerilmeler, dış yükler kaldırıldığında parçada kalan gerilmeler olarak tanımlanabilir. Kalıntı gerilmeler makine elamanlarının çalışma performansı üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir. Kalıntı gerilme üretilen parçaların sertliğine, mukavemetine ve ölçü hassasiyetine belli bir etki yaptığı için genellikle istenen bir durum değildir. Kalıntı gerilmeler makine elamanlarının yorulma dayanımını etkiler ve boyutsal değişikliklere neden olabilir. Bu nedenle makine elamanlarındaki kalıntı gerilme değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Kalıntı gerilmeleri zihinde canlandırmak, ölçmek veya mümkün olan yakınlıkta hesaplamak zordur. Kesme anında işparçası yüzeyinde sıcaklığın ve plastik deformasyonun bir sebebi olarak ortaya çıkan kalıntı gerilmeler, daha verimli bir yağlama ve soğutma işlemi olan yüksek basınçlı soğutmanın uygulanması ile yüzeyde oluşan çekme kalıntı gerilmelerin azalmasını sağlayarak ve yüzeydeki çatlakların ilerlemesini yavaşlatmak mümkündür. Malzeme yüzeyinde basma kalıntı gerilmelerin oluşması yorulma ömrünün artmasına sebep olur ki bu da arzu edilen bir durumdur. Kullanım amacı ve yerleri bakımından hayati öneme sahip olan bu malzemelerde işleme kabiliyetinin artırılması, maliyetin azaltılması ve malzemenin kullanım ömrünün uzatılması için yüksek basınçlı soğutma sisteminin önemli avantaja sahip olduğu ortaya çıkmaktadır.

Talaşlı imalat sürecine farklı teknik ve uygulamaların dahil edilmesi, özel ve karmaşık parçaların imal edilmesini kolaylaştırırken bu süreci nümerik metotlarla da desteklemek mümkündür. Metal kesme işleminin sonucundaki kalitenin hassas bir şekilde tahmini, takım performansının ve sonuçta elde edilecek yüzey kararlılığının önceden kestirilebilirliği, metal kesme sırasındaki termo-mekanik işlemin karmaşık fiziksel oluşumlarının bütünüyle kavranmasındaki zorluklar nedeniyle, oldukça güç ve hatalı olabilmektedir. Sonlu elemanlar ile modelleme ve simülasyon yöntemleri kullanarak, deformasyon alanı değişkenlerinin ve sıcaklık gibi diğer fiziksel temel değişkenlerin detaylı olarak hesaplanması, global işlem özelliklerinin tahmini, kesme

kuvvetleri, takım aşınma oranları, işlenmiş yüzeylerdeki kalıntı gerilmeler ve malzeme mikroyapısındaki değişikliklerin çıktıları şeklinde hesaplama olanağı elde edilmektedir. Sonlu elemanlar metodu kullanılması ile malzeme ve işçilik maliyeti olmadan daha kısa bir sürede operasyon çıktılarını görmek ve değerlendirmek tasarım ve uygulama parametrelerine yön vermeye yardımcı olmaktadır.

Bu çalışmada; havacılık, uzay ve otomotiv sektörlerinde sıklıkla tercih edilen ve işlenmesi zor olan Inconel 718 ve Ti-6Al-4V malzemelerin yüksek basınçlı soğutma desteğiyle tornalanmasında meydana gelen mekanik ve termal etkilerin belirlenerek, talaş kaldırma işleminden sonra malzemenin yüzeyinde ve yüzey alt tabakasında oluşan kalıntı gerilmelerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Oluşan bu kalıntı gerilmeler malzemenin çalışma performansını ve yorulma dayanımını etkilediğinden dolayı minimum değerde oluşması amacıyla optimum kesme parametrelerinin belirlenmesi için farklı ilerleme ve kesme hızlarında, geleneksel ve yüksek basınçlı soğutma şartlarında sıcaklık ve kalıntı gerilmedeki değişimler incelenmiştir. Aynı zamanda bu değişimler bir sonlu elemanlar paket programından (DEFORM 3D) elde edilen simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. İşleme sonrasında numunelerdeki kalıntı gerilmelerin belirlenmesi amacıyla tahribatsız bir kalıntı ölçme yöntemi olan X-ışını kırınım metodu yardımıyla Atılım Üniversitesi, Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezinde yapılmıştır.

Tezin sonuçlar kısmında farklı soğutma basıncı ve kesme parametrelerinden elde edilen kalıntı gerilme miktarları, kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüş ve bu sonuçlar ile sonlu elemanlar programından elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlara bağlı olarak optimum kesme parametreleri ortaya koyulmuştur.

1.1. Kuramsal Temeller

Bu bölümde tornalama ve metal kesme mekaniği, işlenmesi zor süper alaşım malzemeler, talaşlı imalatta soğutma sıvısı kullanımı, yüzey pürüzlülüğü, kalıntı gerilme ve sonlu elemanlar konuları üzerine kısaca açıklamalar yapılmıştır.

1.1.1. Metal kesme mekaniği

Bu bölümde genel olarak talaş kaldırma teorisi, dik (ortogonal) kesme mekaniği, eğik (oblique) kesme mekaniği ve tornalama işleminin mekaniği konuları özetlenmiştir.

Talaşlı imalat, iş parçası yüzeyinin kesici takımlar yardımıyla parça keserek şekillendirilmesi işlemidir ve imalat yöntemlerinin önemli bir grubunu oluşturmaktadır. En yaygın talaş kaldırma yöntemleri; delik delme ve bunları takiben honlama, broşlama, form kesme gibi özel işlemlerdir. Tüm metal kesme işlemleri mekanik prensipleri aynı olmakla birlikte bunların geometri ve kinematikleri birbirilerinden farklı olabilir. Uzay ve havacılık, otomotiv, kalıp gibi endüstriyel alanlarda çoğu ürüne son şekli talaşlı imalat işlemleri ile verilir. (Çolak, 2006; Atakök, 2008). Talaş kaldırma işlemi plastik şekil değiştirmeye dayanan sürtünme, ısı oluşumu, talaşın oluşumu, işlenen parçanın yüzey bütünlüğü, takım ucunun aşınmasını içine alan, karmaşık bir fiziksel olaydır. İşparçası üzerinden belirli bir malzeme tabakası kaldırılabilmesi için, takımın o malzemeye nüfuz etmesi gerekir. Bu da ancak takıma uygulanan kuvvetlerin yeterli ve takım malzemesinin parça malzemesinden daha sert olması halinde gerçekleşir (Özdemir, 2006).

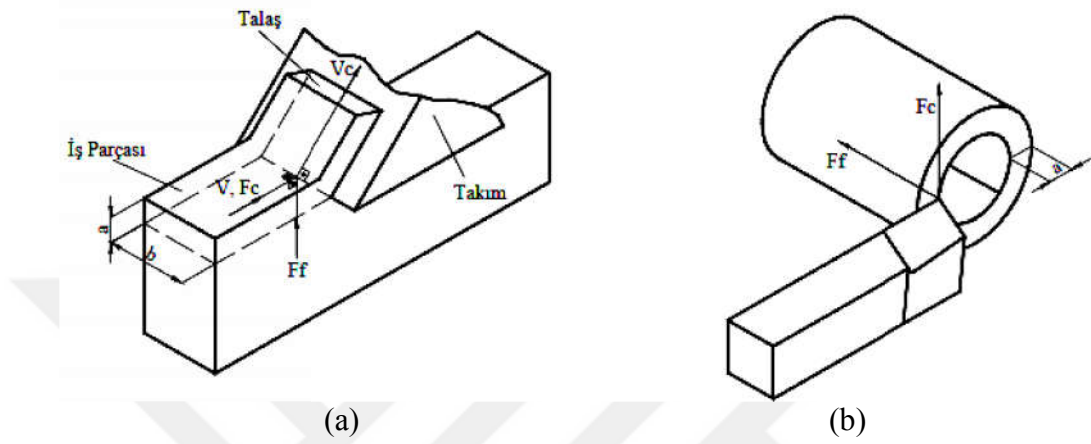
Talaş kaldırma işlemi sırasında kesici takım kenarının işparçasına göre dik (ortogonal) veya eğik (Oblique) konumda bulunmasına göre iki çeşit kesme işlemi vardır.

Dik (Ortogonal) kesme mekaniği

Birçok yaygın kesme işlemleri, üç boyutlu ve karmaşık geometrilere sahip olmasına rağmen, iki boyutlu ortogonal kesme metal talaş kaldırma işleminin genel mekaniğini açıklamak için kullanılır. Ortogonal kesmede malzeme ile takım kesme kenarı arasındaki açı diktir ve bu şekilde talaş kaldırma işlemi gerçekleşir.

Şekil 1.1’de şematik olarak ortogonal kesme işleminin temsili gösterimi yapılmıştır. Ortogonal kesme, kesme kenarı, kesme hızına (V) dik olan düz takımla şekillendirme işlemine benzer. Kesme genişliği (b) ve kesme derinliği (a) ile metal talaş, iş parçasından kesilerek ayrılır. Ortogonal kesmede kesme işlemi kesme kenarı

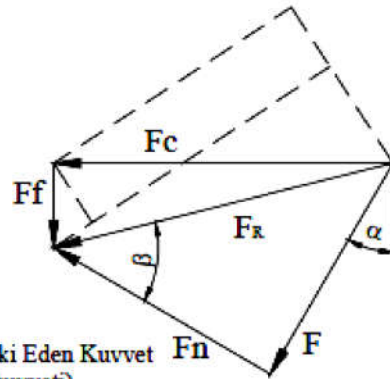
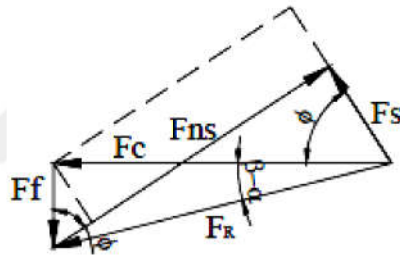
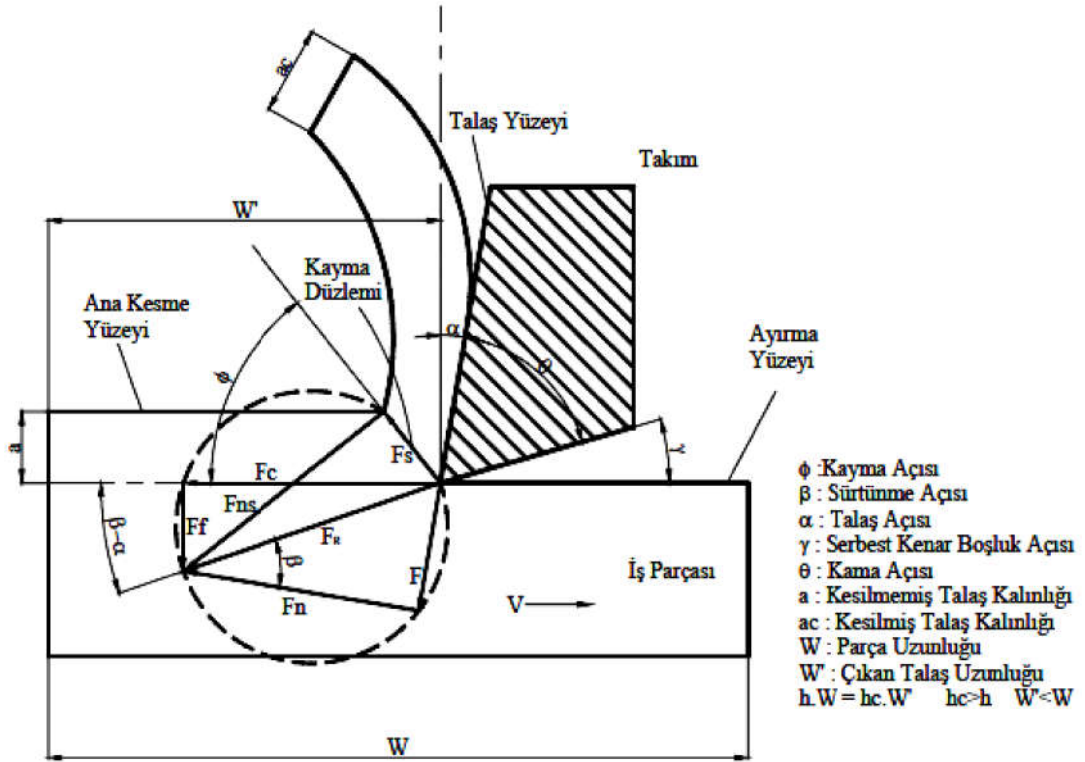
boyunca uniform olarak düşünülür. Böylelikle malzemenin kenarına yayılma olmaksızın iki boyutlu düz birim şekil değiştirme işlemi gerçekleşmiş olur. Dolayısıyla, kesme kuvvetleri sadece esas kesme (teğetsel) kuvveti (F_c) ve ilerleme kuvveti (F_f) olarak isimlendirilen hız ve kesilmemiş talaş kalınlığı doğrultusunda güç sarf eder.



Şekil 1.1. Ortogonal kesme işlemi; Düzlemsel (a), Silindirik (b) (Altıntaş, 2000).

Birincil kesme bölgesinin analizinde basit olarak iki tip varsayım vardır. Merchant ince tabakalar için kesme bölgesinin tahmin edilmesinde bir ortogonal kesme modeli geliştirmiştir. Lee, Shaffer, Palmer ve Oxley plastisite kanunlarıyla uyumlu kayma deformasyon bölgesinde “kayma açısı tahmini” yapabilen kendilerine ait analiz oluşturmuşlardır. Deformasyon geometrisi ve kesme kuvvetleri Şekil 1.2’de ortogonal kesmenin kesitiyle gösterilmektedir.

Kesme kenarının köşeli olduğu pah veya radyüs bulundurmadağı varsayılarak; ince kayma bölgesindeki deformasyonlara değinilmiştir. Kayma açısı (ϕ), kesme hızı (V) ve kayma düzlemi doğrultuları arasındaki açıdır. Kayma düzlemindeki kayma gerilmesi (τ_s) ve normal gerilme (σ_s) sürekli olarak mevcuttur. Talaş üzerinde oluşan bileşke kuvvet (F_R) kayma bölgesine uygulanmış olup talaş-talaş yüzeyi arasındaki bölgede ortalama daimi sürtünme olduğu varsayılarak hesaplanır. Burada bileşke kuvvet (F_R), kesme kuvveti (F_c) ile takım kuvveti (F_p) in bileşkesidir.



F_s : Kayma (kesilme) Düzlemi Boyunca Etki Eden Kuvvet
 F_c : Kesme (işleme) Kuvveti (Esas kesme kuvveti)
 F_f : İlerleme Kuvveti
 F : Sürtünme Kuvveti
 F_R : F_c ile F_p Bileşke Kuvveti
 F_n : Sürtünme Vektörüne Dik Kuvvet
 F_{ns} : Kayma Kuvvetine Dik Kuvvet

Şekil 1.2. Ortogonal kesme mekaniği (Taylan, 2009).

Takım kuvveti veya pasif kuvvet kesilmemiş talaş kalınlığı doğrultusunda, esas kesme kuvveti veya işleme kuvveti kesme hızı doğrultusundadır.

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_f^2} \quad (1.1)$$

Kayma düzleminde rol oynayan kayma kuvveti (F_s);

$$F_s = F_R \cdot \cos(\phi + \beta - \alpha) \quad (1.2)$$

Burada β açısı sürtünme kuvvetinin normali ile bileşke kuvvet arasında oluşan sürtünme açısıdır.

Kayma kuvveti aynı zamanda esas kesme kuvveti ve takım kuvveti değerleri kullanılarak da aşağıdaki eşitlikten hesaplanabilir.

$$F_s = F_c \cos \phi - F_f \sin \theta \quad (1.3)$$

Benzer şekilde kesme düzlemindeki normal kuvvet;

$$F_{ns} = F_r \sin(\phi + \beta - \alpha) \text{ veya } F_{ns} = F_c \sin \phi + F_f \cos \phi \quad (1.4)$$

formüllerinden bulunabilir.

Kesme (kayma) düzlemindeki uniform gerilim dağılımı

$$\tau_s = \frac{F_s}{A_s} \quad (1.5)$$

Burada A_s , kayma düzlemi alanıdır.

$$A_s = b \cdot \frac{a}{\sin \phi} \quad (1.6)$$

b kesme genişliği (tornalamada kesme derinliği), a talaş derinliği (kesilmemiş talaş kalınlığı), ϕ kayma açısıdır (Şekil 1.2).

Kayma düzlemindeki normal gerilme σ_s ;

$$\sigma_s = \frac{F_{ns}}{A_s} \quad (1.7)$$

Talaş basınç oranı (r_c) kesilmemiş talaş kalınlığının kesilmiş oranıdır.

$$r_c = \frac{a}{a_c} \quad (1.8)$$

Kayma açısı talaş baskı oranı ve talaş açısı fonksiyonlarından

$$\phi = \tan^{-1} \frac{r_c \cos \alpha}{1 - r_c \sin \alpha} \quad (1.9)$$

olarak bulunur.

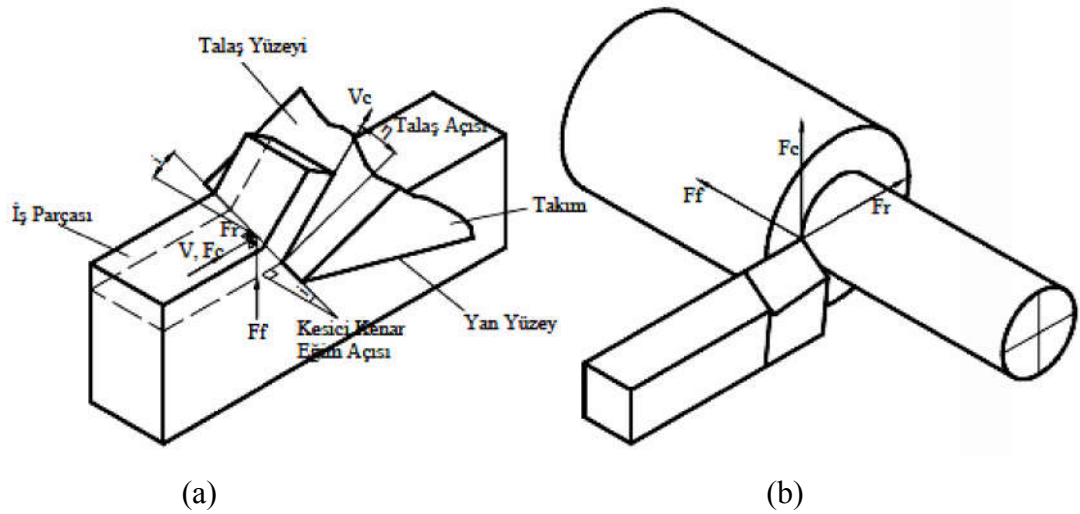
Talaş basınç oranının tersi ise talaş yığılma faktörünü (λ) ifade etmektedir. Talaş yığılma faktörü;

$$\lambda = \frac{a_c}{a} \quad (1.10)$$

olarak tanımlanır.

Eğik (Oblique) kesme mekaniği

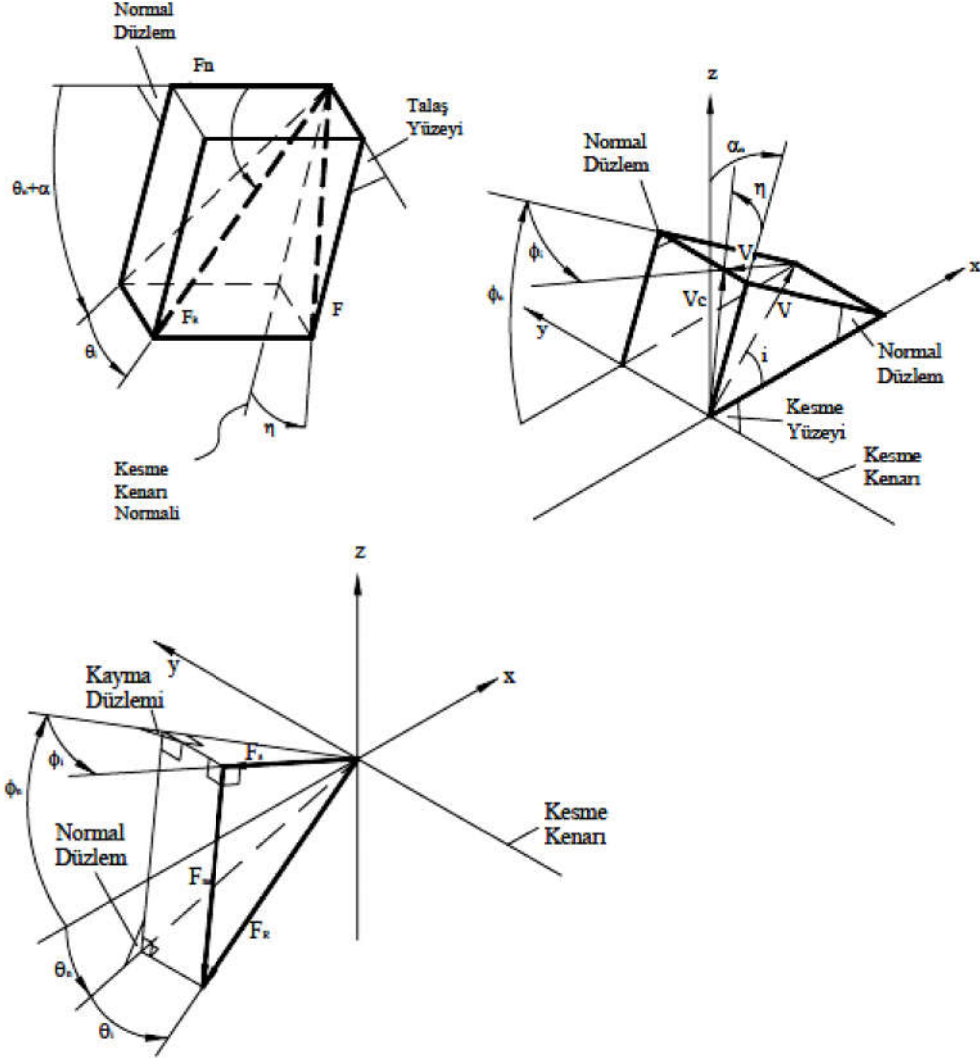
Şekil 1.3’de eğik kesme işlemlerinin şematik olarak temsili görünümü mevcuttur. Ortogonal ve eğik kesme mekaniği arasındaki fark Şekil 1.1 ve Şekil 1.2’deki kesme geometrisine tekrar bakılarak biraz daha iyi anlaşılabilir.



Şekil 1.3. Eğik kesme işlemi; Düzlemsel (a), Silindirik (b) (Altıntaş, 2000).

Eğik kesme mekaniği Şekil 1.3’de görülmektedir. Kesme hızı (V) ortogonal kesmede kesme kenarına diktir. Oysaki eğik kesmede, kesme kenarı ile normal düzlemi arasında bir (i) eğim açısı bulunmaktadır. Kesme kenarının normali ve kesme hızına paralel olan düzlem, normal düzlem veya P_n olarak belirlenebilir. Kesilme olayı ve talaş oluşumu, kesme hızıyla paralel tüm normal düzlemlerde benzerdir ve kesme kenarına diktir. Dolayısıyla kesme hızı, kayma hızı ve talaş hızı kesme kenarına diktir. Bileşke kuvvet ve kayma talaş yüzeyi bölgesindeki diğer kuvvetlerin tümü

ortogonal kesmede aynı normal düzlemdedir. Normal düzleme dik üçüncü doğrultuda bir kesme kuvveti yoktur. Eğik kesme işlemlerinde kesme hızı eğimlidir ve böylece kayma, sürtünme, talaş akışı ve bileşke kuvvet doğrultuları 3 kartezyen koordinatın bileşkeleridir.



Şekil 1.4. Eğik kesmede kuvvet, hız ve kayma diyagramları (Taylan, 2009).

Şekil 1.4’de kayma ve xy düzlemi arasındaki açı ϕ_n olarak isimlendirilmiştir. Kayma hızı kayma düzleminde oluşur, fakat normal düzlem üzerindeki kesme kenarının normal vektörüyle ϕ_i eğik kayma açısını oluşturur. Kesilen talaş, talaş akış açısı η ile talaş yüzeyi düzlemi üzerinden kalkar. Talaş, talaş yüzeyi arasındaki sürtünme kuvveti talaş akış doğrultusu ile aynı doğrultudadır. Z eksenini ile talaş yüzeyi üzerindeki normal vektör arasındaki açı normal talaş açısı α dır. Talaş yüzeyindeki sürtünme kuvveti F_s ve normal kuvvet F_n sürtünme açısı β ile bileşke kuvvet F_R yi oluşturur.

$$F = F_R \sin \beta = F_R \frac{\sin \theta_i}{\sin \eta} \Rightarrow \sin \theta_i = \sin \beta \cdot \sin \eta \quad (1.11)$$

$$F = F_n \tan \beta = F_n \frac{\tan(\theta_n + \alpha)}{\cos \eta} \Rightarrow \tan(\theta_n + \alpha) = \tan \beta \cdot \cos \eta \quad (1.12)$$

Merchant, ortogonal kesmede minimum enerji prensibinden kayma açısı tahmini yapılabileceğini önermiştir. Aynı prensip eğik kesmede de uygulanır.

$$F_s = F [\cos(\theta_n + \phi_n) \cos \theta_i \cos \phi_i + \sin \theta_i \sin \phi_i] \quad (1.13)$$

veya kayma gerilmesi ve kayma bölgesindeki alandan

$$F_s = \tau_s A_s = \tau \left(\frac{b}{\cos i} \right) \left(\frac{a}{\sin \phi_n} \right) \quad (1.14)$$

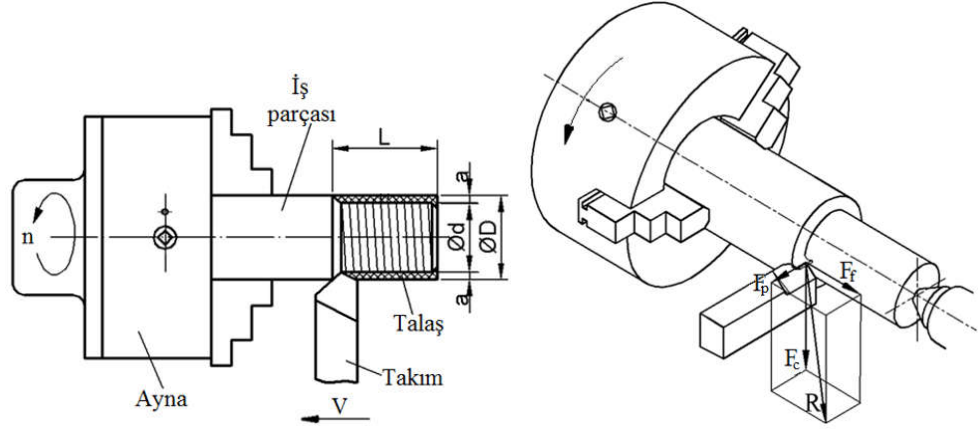
Burada A_s kayma bölgesindeki b ve h dan oluşmaktadır. İki kayma kuvveti eşitliğinden bileşke kuvvet türetilebilir.

$$F_R = \frac{\tau_s b a}{[\cos(\theta_n + \phi_n) \cos \theta_i \cos \phi_i + \sin \theta_i \sin \phi_i] \cos i \cdot \sin \phi_n} \quad (1.15)$$

1.1.2. Tornalama işleminde talaş kaldırma faktörleri

Tornalama işlemi genellikle tek nokta temaslı (tek ağızlı) kesici takım ile kendi eksenini etrafında dönme hareketi yapan iş parçası üzerinden talaş kaldırmak suretiyle silindirik unsurların imalinde kullanılan bir işlemdir. Tornalamada talaş kaldırma sırasında meydana gelen dirençleri yenmek için gerekli bileşke talaş kaldırma kuvveti R ; kesme kuvveti F_c , ilerleme kuvveti F_f ve radyal kuvvet F_p olmak üzere üç bileşene ayrılır (Şekil 1.5) Esas kesme kuvveti F_c , takıma dik doğrultudadır. F_f kuvveti işlenen parçanın eksenine paralel olup ilerleme yönüne zıttır. Radyal (veya pasif) kuvvet F_p , parça eksenine dik bir düzlemde bulunur.

$$R = \sqrt{(F_c)^2 + (F_f)^2 + (F_p)^2} \quad (1.16)$$



Şekil 1.5. Tornalama işlemi (Gunjan 2012).

Tornalama işleminde, kaldırılacak talaş hacimsel olduğundan 3 boyut için parametreler belirlenir.

V; Kesme hızı (m/dak), n; devir sayısı (dev/dak), a; Talaş derinliği (mm), f; İlerleme miktarı (mm/dev), D; Tornalanan (talaş kaldırılan) çap (mm).

$$V = \frac{\pi.D.n}{1000} \quad (1.17)$$

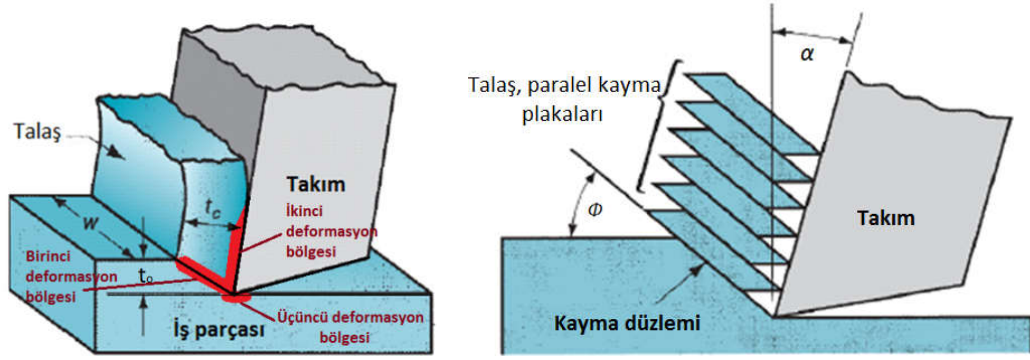
T_h ; İşleme zamanı (dak), L; Tornalama boyu (mm), i; Paso sayısı, u; İlerleme hızı, (mm/dak).

$$Th = \frac{L.i}{n.f} \quad (1.18)$$

$$u = n.f \quad (1.19)$$

Talaş oluşumu ve talaş tipleri

Takımın bir parça üzerine belirli bir kuvvetle bastırıldığını ve kuvvet yönüne doğru hareket ettirildiği düşünülürse takım ucunun temas ettiği metal tabakasında önce elastik sonra plastik şekil değiştirmeler meydana gelerek metal tabakasında akmlar başlar ve gerilmeler malzemenin kopma sınırını aştığı anda tabaka, talaş şeklinde belirli bir yüzey boyunca parçadan ayrılır (Şekil 1.6).



Şekil 1.6. Deformasyon bölgeleri ve tabaka oluşumu (Groover, 2010).

Kayma plakaları oluşumu birincil deformasyon bölgesi içinde oluşan belirli bir kesme düzlemi boyunca meydana gelir. Bu bölgeye kadar malzeme elastik olarak şekil değiştirir. İlk deformasyon, oluşan bu düzlem üzerinde başlar ve kesme yönüne yönelmiş ardışık kesme düzlemleri boyunca devam eder.

Talaş tipleri işlenmekte olan malzemeye ve operasyonun kesme koşullarına bağlı olarak değişmektedir. İdeal talaş tipi olan akma talaşın takım üzerinde birikmesi işlenmiş yüzeyleri bozabileceğinden talaşın kısa boylarda kırılması için çeşitli önlemler alınır (Ovalı, 2008; Tali, 2010).

Dört temel talaş tipi kabul edilmektedir;

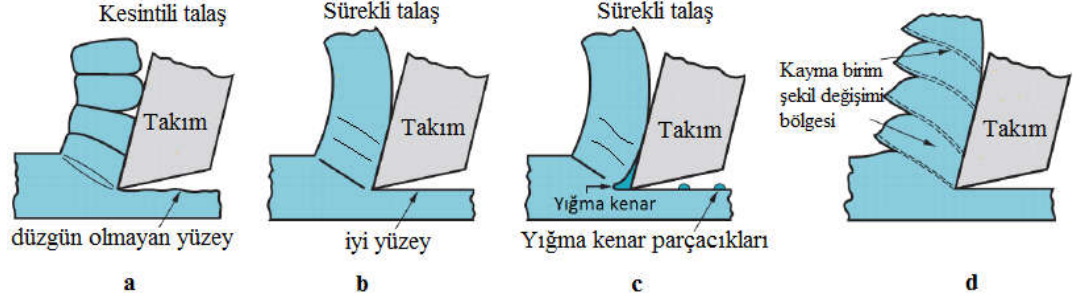
a- Kesintili Talaş: Dökme demir gibi gevrek malzemeler düşük kesme hızlarında işlendiğinde ortaya çıkan talaş tipidir.

b- Sürekli Talaş: Sünek malzemeler yüksek kesme hızlarında ve düşük ilerleme ve pasolarda işlendiğinde uzun sürekli talaş formu oluşur

c- Yığılma Kenarlı Sürekli Talaş: Sünek malzemeler orta veya düşük kesme hızlarında işlendiğinde takım ile talaş arasındaki sürtünme iş parçası malzemesinin bir kısmının kesme kenarı yakınındaki talaş yüzeyi üzerine kaynamasına neden olur. Bu oluşuma yığılma kenar denir. Bu durum takım ömrünün kısılmasına yol açar. Talaş ile uzaklaştırılamayan yığılma kenar parçacıkları yeni oluşturulan yüzey üzerine tutunarak yüzey kalitesini düşürür (Da Silva, 2006).

d- Testere Dişi Şekilli Talaş: Bu tip talaşlar testere dişi görünümlü olan yarı sürekli talaşlardır. Bu talaş tipi yüksek kayma birim şekil değişiminin ardından düşük kayma

birim şekil değişiminin periyodik olarak etkimesiyle oluşur. Bu talaş tipi, talaşlı imalatı zor olan titanyum alaşımları, nikel esaslı süper alaşımlar gibi metallerin yüksek kesme hızlarında işlenmesinde ortaya çıkar (Groover, 2010).



Şekil 1.7. Talaş tipleri (Groover, 2010).

1.1.3. İşlenebilirlik

Malzemelerin işlenebilirliği, kesme şartları sabit kalmak şartıyla genellikle bir takım ömrü için malzemelerin kesme hızlarını karşılaştırmak suretiyle ölçülür. Mukayese malzemesi olarak da işlenmesi en zor olan bir malzeme alınır ve diğer malzemelerin de kesme hızları bu hıza oranlanır. İşlenebilirlik mutlak bir terimdir. Örneğin kesme hızı artarsa daha iyi talaş akışı meydana gelecek, arttırılan kesme hızı da takım üzerinde daha yüksek aşınma miktarına yol açacaktır. Yani işlenebilirlik hem iyi hem de kötü manasına gelir.

Talaş kaldırma işleminde malzemenin sertliği, sünekliği, yüzey gerilmeleri, içyapıdaki alaşım malzemesinin türü, işleme öncesi malzemenin geçirdiği ısıl işlem gibi unsurlar işlenebilirliği etkiler. Talaşlı imalatın etkin uygulanabilmesi için seçilen malzemeye göre kesici takım ve kaplaması, kesme hızı, ilerleme oranı gibi kesim değişkenleri iyi belirlenmelidir (Çakır, 2006).

Takım malzemesi: İşlenebilirlik azaldıkça kesici uç malzemesinin daha sert ve tok olması gerekir.

Takım geometrisi: Talaş kırıcının yeri, kesim açısının doğru ayarlanması da işlenebilirliği artırıcı etki yapar.

Kesme hızı: Kesme hızı takım malzemesine ve iş parçasının işlenebilirliğine göre iyi dengelenmelidir. Hızın artırılması yüzey kalitesini artırırken kesme ucunun aşınmasına sebep olur.

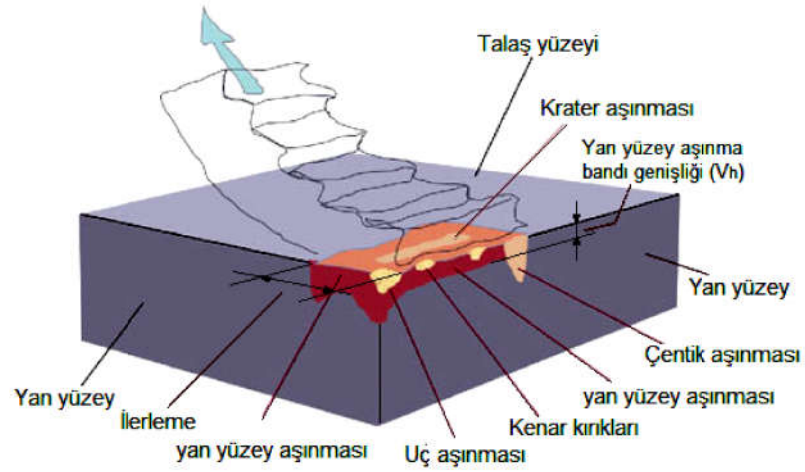
Tezgahın rijitliği: Tezgah dinamiği ve rezonans gibi değişkenler titreşimin artmasına sebep olurken makinada verimli işlemeyi zor hale getirirler.

1.1.4. Takım aşınması

Talař kaldırma iřlemi, mekanik etkinin bir sonucu olarak yůksek basınç ve sıcaklık altında, iř parçasının takım malzemesi üzerinde kaymaya zorlanması ve sůrekli temiz, yeni bir yůzeyin oluřması řeklinde gerçekteřir. Gerek sůrtůnmelerden, gerekse malzemenin plastik řekil deđiřtirmesinden ve talař řeklinde kopmasından dolayı kesme bۆlgesinde yůksek ısı açıđa çıkar. Kuvvet, basınç, gerilme ve sıcaklık řeklindeki tům bu etkenler, belirli bir çalıřma sůresi sonunda; takımda, bařta ařınma olmak ۆzere, ađız kısmında kırılmalara ve takım ile iř parçası arasında kimyasal reaksiyonlara sebep olarak, takımda ařınmalara yol açar (Gůndođdu, 2006).

Takım aşınma tipleri

Talaşlı imalat işlemlerinde kullanılan kesici takımların aşınması, talaşlı imalat işleminin verimliliğini, ۆretilen iř parçasının boyutlarını ve yůzey kalitesini doğrudan etkiler. Kesici takımda aşınma arttıkça, kesme kuvvetleri, kesme bۆlgesinde sıcaklık, titreşim ve ses artar. Artan kesme kuvvetleri sonucu daha fazla enerji gereksinimine ihtiyaç duyulur. Aynı zamanda, artan kesme kuvvetleri iř parçası ve kesici ۆzerinde daha fazla gerilme oluşturur (evik, 2006). Artan sıcaklık ve gerilme, kesici takımın aşınma direnci ve dayanımını azaltır. Aynı zamanda, takım ve iř parçası boyutlarında sapma olur ve istenilen ۆlů toleranslarının dışına çıkılarak hatalı parçalar ۆretilir. Yůksek sıcaklık sonucu iř parçasının yůzeyinde ve yůzey altında istenilmeyen metalurjik dۆnۆřۆmler kalıntı gerilmelerin oluşumunu sağlar ve iř parçalarının yorulma dayanımını azaltır. şekil 1.8’de kesici takımdaki aşınmalar şematik olarak gۆsterilmiřtir (Sandvik, 2014).



Şekil 1.8. Kesici takımında oluşan aşınma tipleri (Sandvik, 2014).

Sınıflandırılmış aşınma tiplerini ve bunları sebep olan mekanizmaları aşağıdaki gibi listeleyebiliriz.

Yan Yüzey (Yanak) Aşınması; Kesici kenarın yan yüzeylerinde (yanaklarında) genellikle abraziv aşınma mekanizmasından kaynaklanan bir aşınma tipidir.

Krater Aşınması; Talaş yüzeyinde abraziv ve difüzyon aşınma mekanizmaları sebebiyle oluşur.

Plastik Deformasyon; Plastik deformasyon, kesici kenar üzerindeki yüksek basınç ve yüksek sıcaklığın bir sonucu olarak ortaya çıkar.

Çentik Aşınması; Kesici kenar ile parça malzemesinin birleştiği yerde oluşur. Kesici kenarda çentik oluşması mekanik yüklerin bir sonucudur ve genellikle daha sert malzemelerin işlenmesi sırasında oluşur.

Termal (ısıl) çatlaklar; Termal çatlaklar kesici kenara dik olarak ortaya çıkar ve bu çatlaklar arasındaki takım malzemesi kesici kenardan koparak ayrılabilir.

Mekanik yorulma çatlakları; Mekanik yorulma çatlakları, kesme kuvveti darbeleri aşırı olduğunda oluşur. Bu tip çatlaklar, termal çatlaklardan farklı olarak, genellikle kesici kenara paraleldir.

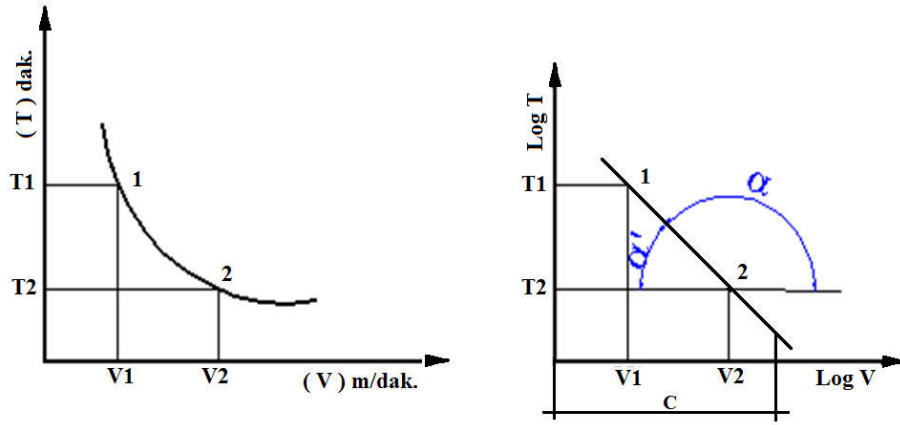
Çıtlama (çentiklenme); Kesici kenarda meydana gelen çentiklerin sebep olduğu, kesici kenar hattındaki küçük boyutlu kırılmalardır. Yükleme ve yükün kaldırılmasından kaynaklanan bu yorulma; kesici takım malzemesinden küçük parçacıkların takım yüzeyinden ayrılmasına sebep olmaktadır

Kırılma; Kırılma, kesici kenarın görevinin tamamen sona ermesidir.

Yığılma; Kesici kenarda yığılma oluşması, genellikle sıcaklık ve onunla ilişkili bir durum olan kesme hızının etkisindedir. (Özdemir, 2006).

1.1.5. Takım ömrü

Takım ömrü, takımın başlangıçtan belli bir aşınma kriteri ile tanımlanan noktaya kadar olan zaman olarak nitelenen faydalı ömür olarak ifade edilir. Takım ömrünü etkileyen unsurlar; iş parçası ve takımın malzemesi, takım geometrisi, talaş şekli, kesme hızı, soğutma sıvısı vb. faktörler takımın ömrünü etkilerler. Bunlardan en önemlisi ise kesme hızının etkisidir (Kartal, 2000). Taylor'un takım ömrü bağıntısı olarak bilinen formüldeki T takım ömrü, V kesme hızını, C sabiti göstermektedir (Şekil 1.9).



Şekil 1.9. Takım ömrü, Kesme hızı grafiksel ilişkisi (Kartal, 2000).

$$V.T^n = C \quad \text{veya} \quad T = \frac{C^{1/n}}{V^{1/n}} \quad (1.20)$$

Yukarıdaki formülde C sabit değer olup bu formüle logaritma işlemi uygulanırsa;

$$\log C = \log V + n.\log T \quad (1.21)$$

Diğer kesme koşulları sabit kalırsa, V_1 ve V_2 kesme hızları ve onlara karşılık gelen T_1 ve T_2 ömürleri arasındaki ilişki formül (1.20) bağıntısından,

$$V_1.T_1^n = V_2.T_2^n \quad (1.22)$$

olur.

1.1.6. Yüzey pürüzlülüğü

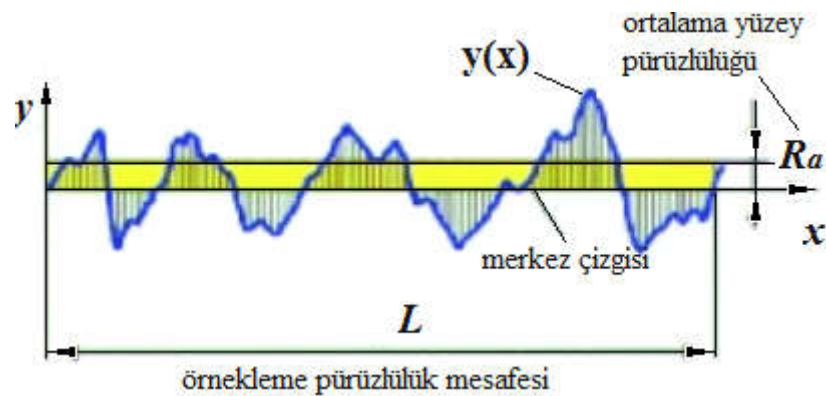
Makine parçalarının yüzeyleri hiçbir zaman düzgün ve kusursuz sayılmazlar. Bir çok nedene bağlı olarak yüzeylerinde pürüz ve dalgalanmalar barındırırlar. Bu dalgalanmaların geometrik sapmalarını tayin ederken nominal yüzey çizgisinin altında ve üstünde oluşan duruma da yüzey pürüzlülüğü denilmektedir (Tali, 2010).

Yüzey pürüzlülük miktarının tespiti malzeme kaldırma işleminden sonra yüzeyde oluşan metalurjik değişiklikleri ortaya koyar. Diğer bir ifadeyle yüzey kalitesini belirler. Yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinde en çok kullanılan yöntem R_a ; aritmetik ortalama yüzey pürüzlülüğü, f ; ilerleme ve r_ϵ ; uç yarıçapı değeri olarak bilinir.

$$R_a = \frac{0,0321 \cdot f^2}{r_\epsilon} \quad (1.23)$$

Diğer bir ifadeyle R_a , merkez doğrusu ve yüzey izleri arasındaki hattın alt ve üst eşdeğer alanı olarak alınır (Şekil 1.10). R_a , uluslararası benimsenmiş sembol olup pürüzlülük değerini gösterir. Ölçme aletleri pürüzlülük merkezinden ortalama ayrılmayı kullanır. R_a , ortalama profil doğrusundan y aritmetik ortalama olarak sapmasıdır. Birbiri ardı sıra birkaç tane örnekleme uzunluğu (L) sonuçlarının ortalaması alınarak belirlenir (Taylan, 2009; Altıntaş, 2006).

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx \quad (1.24)$$



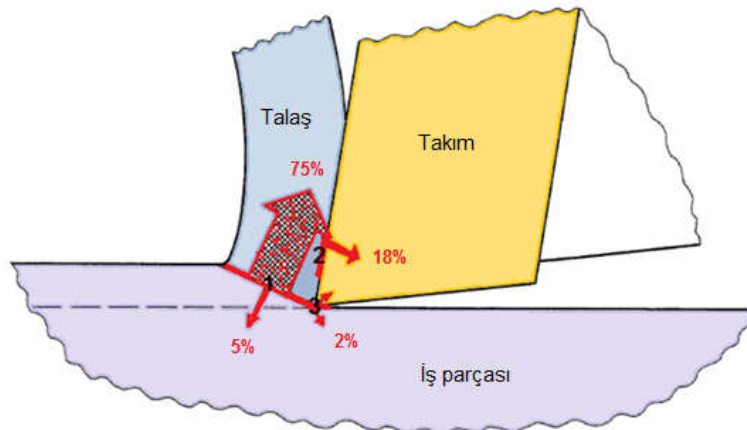
Şekil 1.10. R_a yüzey pürüzlülük değerinin gösterimi.

Bir diğ er y uzey p ur zl l k değ eri de On- nokta y ukseklik değ eridir. R_z ; On nokta y uksekliğ i olup  rneklem e uzunluğ u içinde beş en y uksek tepe ve beş en derin çukurun arasındaki ortalama mesafedir.

$$R_z = \frac{(R_1 + R_3 + R_5 + R_7 + R_9) - (R_2 + R_4 + R_6 + R_8 + R_{10})}{5} \quad (1.25)$$

1.1.7. Metal kesme işleminde sıcaklık oluşumu

Talaşlı imalat işleminde kullanılan g   (Fc · V) büyük oranda ısıya dönüşerek talaşın, iş parçasının ve kesici takımın sıcaklığ ını artırır ( evik, 2006). Oluşan bu sıcaklık takım aşınması, y uzey kalitesi ve talaş oluşum mekanizmasını kontrol eden önemli bir faktördür ( zek vd., 2004). Kesme işlemi devam ettikçe takım ucu ısınmakta ve belirli bir sıcaklık değ erinden sonra plastik deformasyona uğramaktadır. Bunun sonucunda takım ucunda bazı kopma ve kırılmalar meydana gelmektedir. Bu durum kesici takım performansını ve iş parçası y uzey kalitesini etkiler (şahin vd., 2003). şekil 1.11’de kesme işleminde oluşan deformasyon bölgeleri ve % sıcaklık dağılımı görülmektedir.



şekil 1.11. Kesme işleminde oluşan deformasyon bölgeleri ve sıcaklık dağılımı.

Birinci deformasyon bölgesi, plastik deformasyon ile oluşan temel ısı kaynağ ını oluşturur. Bu bölgedeki ısının büyük bir kısmı talaş içinde kalır ve talaşla birlikte kesme bölgesinde uzaklaştırılır.

 kinci deformasyon (takım-talaş ara y uzeyi) bölgesinde oluşur. Talaş içinde ekstra plastik deformasyonun olduğu ve yeni talaş malzemesinin sürekli akışı sonucu,

sürtünme nedeniyle meydana gelen ısının, bir kısmı talaşla atılırken bir kısmı da kesici takım gövdesine geçerek kesme bölgesinden uzaklaştırılır.

Üçüncü deformasyon bölgesi, takım ve iş parçasının işlenmiş yüzeyi arasındaki serbest kenarda oluşur. Oluşan ısının bir kısmı talaş, bir kısmı da iş parçası tarafından uzaklaştırılır. Bu bölgede oluşan ısı, ön boşluk açısı olan kesici takım kullanıldığında olmamaktadır (Gökkaya vd., 2006).

Kesme esnasında oluşan sıcaklığın ölçülmesi ve hesaplanması işlenebilirlik açısından büyük önem arz etmektedir. Oluşan bu sıcaklığın tayininde genel olarak ısı çift yöntemi, radyasyon pirometresi, ve termal kamera ile sıcaklık ölçümü gibi yöntemler kullanılmaktadır.

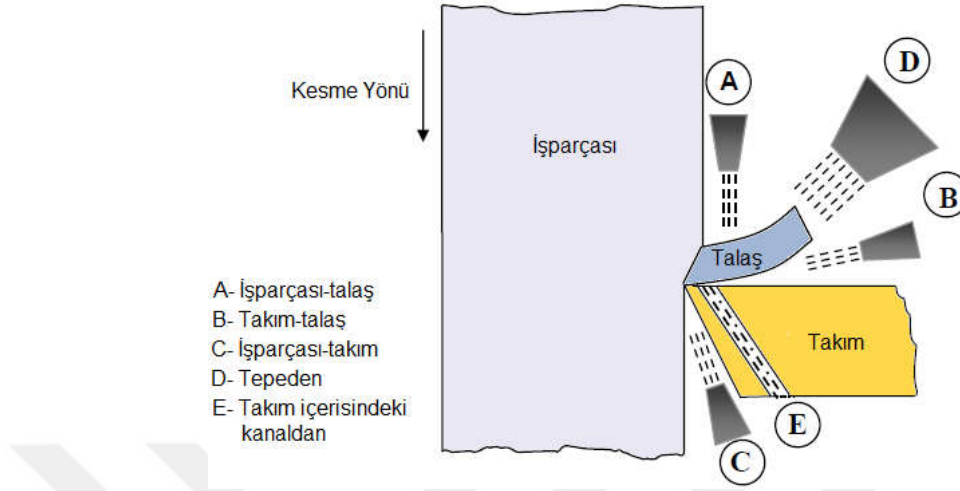
1.1.8. Metal kesme işleminde soğutma sıvısı kullanımı

Metal kesme esnasında kullanılan sıvıların başlıca amacı soğutma ve yağlamadır. Soğutma işlemi ile kesme sırasında oluşan ısıyı çevreye taşıyarak ısı miktarı azaltılırken yağlama ile de takım-talaş ve takımla işlenen yüzey arasına nüfuz edilerek sürtünmenin azaltılmasıyla takım aşınması önlenmektedir. Mekanik sürtünmenin etkisiyle plastik deformasyona maruz kalan metalde ortaya çıkan ısı kesme işlemini kolaylaştıracağı gibi takım ömrünü ve işlenen parçadaki yüzey bütünlüğünü doğrudan etkilemektedir. Yüksek sertlik ve aşınma direncine sahip Titanyum ve Inconel gibi malzemeler yüksek kesme hızlarında işlendiğinde daha fazla sıcaklık oluşmasına sebep olmaktadır. Bu da soğutma sıvısından beklenen özellikleri işleme verimliliği açısından önemli kılmaktadır (Akkurt, 2004).

Soğutma sıvısının uygulama yönleri

Soğutma sıvıları genellikle ısının olduğu kesme bölgesine harici olarak yönlendirilir. Hangi yöntemin kullanılacağı, kesme parametreleri ve malzemenin özelliklerine göre belirlenir. Örneğin A yönünde bir soğutma uygulanması işlemi kolay fakat talaş-takım temas uzunluğunu arttıran bir işlemdir. Bununda takım aşınması ve sıcaklığın ortamdaki uzaklaştırılmasına katkı sağlaması daha azdır. Diğer yöntemlerin de birbirine göre artı ve eksileri olmakla beraber işlenen malzeme ve oluşan sıcaklık dikkate alındığında B konumundan uygulanan soğutma sıvısı kesme

bölgesine direk nüfuz etmekte ve talaşın takım ile olan temas uzunluğunu kısaltarak takım aşınmasını azaltmada önemli katkı sağlamaktadır (Da Silva, 2006).

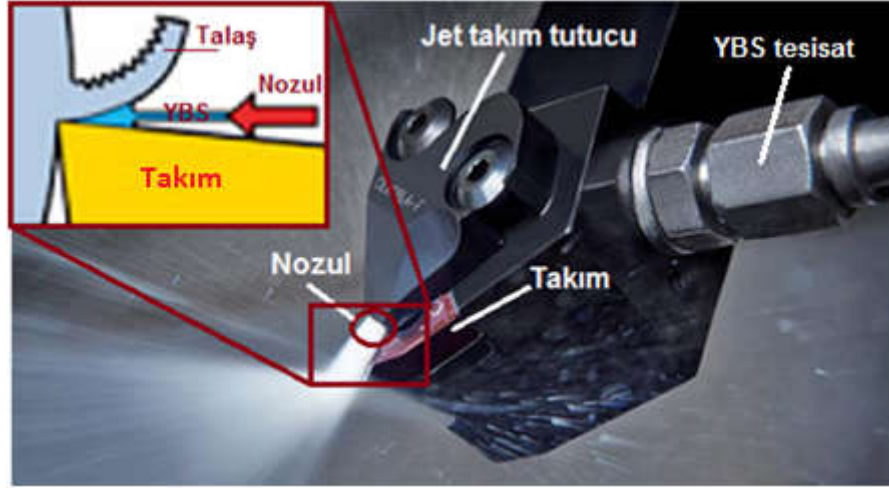


Şekil 1.12. Soğutma sıvısının uygulama yönleri (Da Silva, 2006).

1.1.9. Metal kesme işleminde yüksek basınçlı soğutma metodunun kullanımı

Temelde yüksek basınçlı soğutma (YBS) işlemi, istenilen konsantrasyonda ve türde hazırlanmış soğutma sıvısını basınca dayanıklı hortumlar ile kesme bölgesine yüksek basınç pompası yardımıyla püskürtme sürecidir. İşleme merkezine gönderilen sıvı Şekil 1.12’de gösterilen yöntemlerden birisinin uygunluğu belirlenerek takım tutucu veya harici tesisat yardımıyla kesme bölgesine nüfuz ettirilir. Bu yöntemde yüksek basınçlı soğutma sıvısı, ısıyı işlenen parça ve takımdan uzaklaştırmaya çalışır.

Yüksek basınçlı soğutma sisteminde takım ucunda doğru yere ve kesme kenarında doğru açıya odaklanmış, yüksek hızla paralel laminer soğutma sıvısı jetleri uygulayan optimize edilmiş nozullar kullanır. Takıma sabit, önceden yönlendirilmiş, yüksek hassasiyette nozullar takılır, dolayısıyla ayarların bir operatör tarafından yapılması gerekmez. Bunun yerine takım tipine bağlı olarak, takım tutucuya tek, iki ya da üç nozul takılabilir. Şekil 1.13’de YBS’nin takım-talaş arayüzüne enjekte edilmesi için kullanılan takım tutucu ve jet haldeki soğutma sıvısı görülmektedir.



Şekil 1.13. Yüksek basınçlı soğutma sisteminin uygulanaşı (Secotools, 2014).

YBJS titanyum, nikel alaşımlar ve paslanmaz çelik gibi zorlu malzemeler de dahil olmak üzere birçok malzeme ve tezgahta ve çok sayıda tornalama, frezeleme ve delme işlemlerinde kullanılabilir. Tornalama işlemlerinde, kesme bölgesinde talaş birikmesi, özellikle otomatik takım değıştirme yapılyorsa büyük bir sorun anlamına gelebilir. Özellikle orta-ince tornalama işlemlerinde, YBS üstün talaş kontrolü sağlayarak tezgah duraklamalarını azaltır ve tezgahdan alınan performansı yükseltir. Yüksek basınçlı soğutma sıvısı, tornalamada talaş kontrolünü önemli ölçüde geliştirerek işlemesi zor kabul edilen malzemelerde bile, kaba ve ince işlemler gibi insansız üretim avantajıyla birlikte yüksek hız ve takım ömrü (%50'nin üzerinde) sağlar.

Günümüzün içten soğutma sıvısı özellikli takımlarının (Jet takım tutuculu) sadece talaş kaldırma işlemi sırasında soğutma sağlamaktan daha fazlasını yapması istenmektedir (Sharma vd., 2009). Soğutma sıvısı kullandığınızda veya kullanmanız gerektiğinde işlevsel etkinlik mümkün olduğunca yüksek düzeyde olmalı ve gizli üretkenliği açığa çıkaracak önemli fırsatlar sunabilmelidir. Aynı şekilde, özellikle tornalama işlemlerinde içten soğutma sıvısı olan takımların etkili talaş kontrolü sağlaması da çok önemlidir. Soğutma sıvısının ısıyı ortadan kaldırma ve yağlama (sürtünmeyi azaltma) konularındaki faydaları çok iyi bilinmektedir ve soğutma sıvısı genellikle işleme yapılan alana uygulanmak suretiyle kullanılır (Courbon vd., 2011). Ancak bir soğutma sıvısının gerçekten etkili olabilmesi için ısıyı kesme alanından hızlı bir şekilde uzaklaştırması gerekir ve Yüksek basınçlı soğutma yöntemi ile

soğutma sıvısı tam olarak etkili olması gereken bölgeye yönlendirmektedir. Bu avantajıyla özel malzemelerin işlenmesinde etkili bir şekilde kullanılırlar.

Soğutma sıvısının basıncı, akışı ve küçük çaplı delikler bol miktardaki yüksek hızlı soğutma sıvısının kesme kenarının tam arkasındaki ana ısı bölgesine kolayca girmesini ve buraları soğutması sağlamaktadır. Soğutma sıvısı çıkışını kesme kenarına çok yakın yerleştirmenin en etkili yöntem olduğu keşfedilmiştir. Buna göre sistemin çıkışı, soğutma sıvısını uç boşluğunun kesme alanı ile talaş arasına püskürterek talaşın kaldırılmasına ve kırılmasına katkıda bulunmaktadır. Tornalama, kanal açma ve keserek ayırma uygulamalarında kullanılan jet nozullu takımlarla yönlendirilen soğutma sıvısı boşluk yüzeylerinin yanı sıra, ikincil ısı alanı olan uç boşluklarına da yönlendirilmektedir.

Yüksek basınçlı soğutma sıvısı birçok sektörde kullanılabilir, ancak geleneksel olarak yoğun talaş oluşumunun yönetilmesi gereken ve birçok farklı malzemenin kullanıldığı enerji üretimi, havacılık-uzay ve tıp alanlarında daha fazla kullanılmaktadır. Üniversitelerde yapılan deney ve araştırmalar, bir talaşın kesme kenarından geçerken sıcaklıktaki ani düşüşle birlikte sertleştirme etkisi yarattığını göstermiştir ve bu sıcak bir metal parçasına çok hızlı bir şekilde su vermeye benzerlik gösterir. Titanyum talaşının sertliği artar. Akış yönü, kama etkisi ve soğutma sıvısının sertleşen talaşa uyguladığı basıncın kombinasyonu talaşın kolayca küçük parçalara ayrılmasını sağlar. Genel olarak soğutma sıvısını, daha zor iş parçası malzemelerinin herhangi biri işlenirken uygulamak daha iyi sonuç verir.

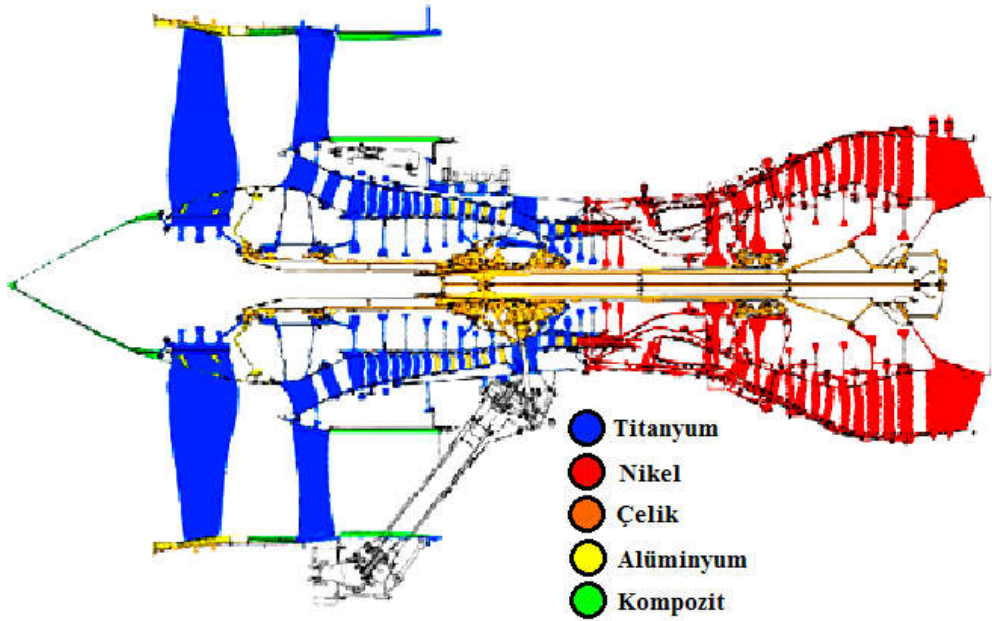
1.1.10. İşlenmesi zor malzemeler

Aşınmanın, yüksek sıcaklığın ve korozyonun mevcut olduğu çalışma şartlarında metal ve metal alaşımlarının, arzu edilen özellikleri sağlayamadığı noktalarda yeni malzeme grupları devreye girmektedir. Bu malzeme gruplarının başında süper alaşımlar gelmektedir (Karabulut, 2006). Süper alaşımlar, ergime sıcaklığının %70'ine kadar olan yüksek çalışma sıcaklık değerlerinde bile çok iyi mekanik mukavemet ve sürünme direncine, çok iyi yüzey stabilitesine ve korozyon ve oksidasyon direncine sahip metalik alaşımlardır (Kahraman, 2008). Bundan dolayı havacılık ve uzay sanayinde özellikle jet türbin palleri gibi aşırı sıcaklığın olduğu

ortamlarda diğer tüm metalürjik malzemelerden daha çok tercih edilmektedir. Süper alaşım malzemelerin sektörel kullanım oranının büyük bir kısmını havacılık ve uzay sanayi oluşturmaktadır (Altın, 2005).

1.1.10.1. Nikel esaslı süper alaşımlar ve işlenebilirliği

Nikel esaslı süper alaşımlar yüksek sıcaklıklarda yüksek mukavemet sağlayabilen ısı dirençli alaşımlar olmalarının yanında uzay sanayinin ekonomik işletme giderleri için gerekli olan yüksek sürtünme ve korozyon direncine sahip alaşımlardır. Nikel ve kobalt esaslı süper alaşımlar, yüksek sıcaklıklarda (1500–1650°C) yüksek dayanıma sahiptirler (Altın, 2005; Ezugwu vd., 2003). Bu alaşımların en önemli özellikleri, çok iyi korozyon ve oksidasyon direnci, yüksek sıcaklıklarda kırılma ve sürünme direncidir. Bu nedenle uçak sanayinde özellikle uçak motorlarının ağırlık olarak %50'sini Ni esaslı süper alaşımlar oluşturur (Şekil 1.28).



Şekil 1.14. Süperalaşımların jet motorlarında kullanıldığı bölgeler (Kahraman, 2008).

Çelik, nikel, titanyum ve alüminyum alaşımları uçak motoru üretiminde kullanılan genel malzeme ve alaşımlardır. Uçak motoru üretiminde kullanılan diğer malzemeler karbon, seramik ve metal-matris kompozitlerdir (Choudhury vd., 1998; Li, 2002). Titanyum ve nikel esaslı alaşımlar, küçük parçalarla sınırlı kullanım alanı bulan çeliklerle karşılaştırıldığında bu özellikleri sağlayan en iyi alaşımlardır (Çelik, 2006; Arunachalam vd., 2004).

Nikel esaslı süper alaşımların işlenebilirliğinde en önemli iki faktör kısa takım ömrü ve işparçasının sert olmasıdır. İşleme esnasındaki yüzey değişimi (kalıntı gerilme oluşumu gibi) parçaların artmasına sebep olabilir ve bu da işlenen malzemenin mekanik özelliklerini ve gerilme-korozyon özelliklerini değiştirebilir. Bu nedenle işleme esnasında parçanın yüzey bütünlüğünün sağlanmasına özen gösterilmelidir. Takım ömrü nikel esaslı süper alaşımların işlenmesinde oldukça yetersizdir. Takım malzemesi seçimi, takım geometrisi, işleme metodu, kesme hızı, ilerleme, talaş derinliği, vb. parametreler yeterli takım ömrünün sağlanmasında kontrol edilmesi gereken parametrelerdir. (Ezugwu, vd., 1998).

1.1.10.2. Titanyum esaslı süper alaşımlar ve işlenebilirliği

Titanyum sembolü Ti olan 22 atom numaralı bir elementtir. Hafif, güçlü, parlak, korozyona karşı dirençli grimsi bir geçiş metalidir. Bu güçlü, hafif alaşımlar havacılık (jet motorları, füzeler ve uzay araçları) askeri, endüstriyel işlemler (kimyasallar ve petrokimyasallar, arıtma santralleri, kağıt hamuru ve kağıt) otomotiv, yiyecek, tıp (protezler, implantlar, dental endodontik malzemeler, dental implantlar), spor eşyaları, mücevher, cep telefonu, ve diğer uygulamalarda kullanılır. Metalik bir ak element olan titanyum sahip olduğu yüksek dayanıklılık-ağırlık oranı ile bilinir. Düşük yoğunluklu hafif ve güçlü bir metaldir (Karabulut, 2006). Saf haliyle tamamen esnektir (özellikle oksijensiz ortamda) parlak, metalik beyaz renklidir. Göreceli olarak yüksek erime noktası (1649 °C) ile dayanıklı metallerden olması açısından kullanışlıdır. Titanyumun en önemli kimyasal özelliği korozyona karşı gösterdiği müthiş direncidir.

Titanyum ve alaşımları işlenmesi zor malzemelerdir. Bunun başlıca sebebi talaş kaldırma esnasında takım ile talaş kesişim bölgesindeki sıcaklığın çok fazla yükselmesidir. Sıcaklık, titanyum malzemenin çok yüksek sıcaklıklarda mekanik dayanımını koruması, yüksek kesme hızlarında kesme dayanımını kaybetmemesi ve titanyumun düşük ısı iletkenliği sebebiyle 1000°C'nin üzerine çıkar (Gündoğdu, 2006). Titanyum alaşımları, genel olarak 45 m/dk. kesme hızlarından yüksek değerlerde, kaplanmamış karbür (WC-Co) uçlarla işlenir. Daha yüksek hızlarda kesme ucunda yüksek sıcaklıklar oluşturması burun bölgesinde aşırı gerilmelere neden olarak plastik deformasyona ve takiben ucun kırılmasına yol açmaktadır.

500°C ve üzerindeki ara yüzey sıcaklıklarında titanyum ve alaşımları kesici uç ile reaksiyon vermektedir (Da Silva, 2006). Kesme esnasında ortaya çıkan yüksek ısı kolay bir şekilde yayılmaz. İşleme esnasında kesici takım üzerinde abrazif, adhezif ve difüzyon aşınmaları görülür. Yüksek sıcaklıklarda titanyum atomları karbür uç malzemesine difüze olarak kesici uçtaki karbon ile kimyasal reaksiyon verir ve ara bir titanyum karbür (TiC) tabakası oluşturur. Bu tabaka hem kesici uç, hem de talaş ile kuvvetli bağ oluşturur ve sonuç olarak difüzyon aşınmasını minimize eder. Bu tabakanın oluşumu için gerekli minimum kritik sıcaklık normal temas basıncı 0,23 GPa değerinde 740°C dir. Kaynaklanmış bağlantının ayrılması kesici uç malzemesinin hızla akan talaş ile taşınması sonucunu doğurur. Daha düşük hızlarda karbür uç malzemesi ve titanyum alaşımı arasında difüzyon etkili değildir ve aşınma kesici uçta bulunan hatalar veya mikro kırılmaların yanı sıra mekanik ve ısı yorulma ile gerçekleşir. Kesici uç taneleri çatlamış bölgeden kolaylıkla kopmaktadır. Küçük ya da büyük kesici uç parçaları kesici uç ile işlenen parça arasında ezilerek aşınmaya sebep olurlar. Süper alaşımların karbür uçlarla düşük hızlarda işlenmesi sırasında mekanik aşınma mekanizması yan kenar aşınmasının temel nedenidir. Titanyum alaşımlarının işlenmesi sonucunda elde edilen daha ince talaşlar yüksek hızdaki işleme koşullarıyla birleşerek maksimum sıcaklık bölgesinin, zaten maksimum gerilme altında bulunan kesme köşesine ötelenmesine neden olur. Bu durum ucun aşınma oranını artırır.

Titanyumun elastik modülü çok düşük olduğu için malzemenin kesilmesi düşük paso değerlerinde zordur. Kullanılan kesici ucun aşınmamış olması gerekir. Titanyum malzeme klor ve kükürt iyonlarını içermeyen kesme sıvıları kullanılarak işlenmelidir. Klor, malzeme üzerinde gerilmeli korozyona yol açmaktadır. Özellikle işlemeden sonra parça kaynak işlemi göreceksse, soğutma sıvısı içinde bulunan klor veya kükürt parçaya zarar verir. Parça işlemeden sonra yıkama işlemine tabi tutularak, üzerindeki soğutma sıvısı temizlenmelidir (Gündoğdu, 2006).

1.1.11. Kalıntı gerilme

Kalıntı gerilmeler bütün malzemelerde, imalatın her aşamasında artarak oluşurlar. Isıl işlemler, mekanik işlemler, plastik şekil verme, kaynak ve kaplama gibi mühendislik malzemesi üretiminin evrelerini oluşturan her bir süreç bu gerilmelerin

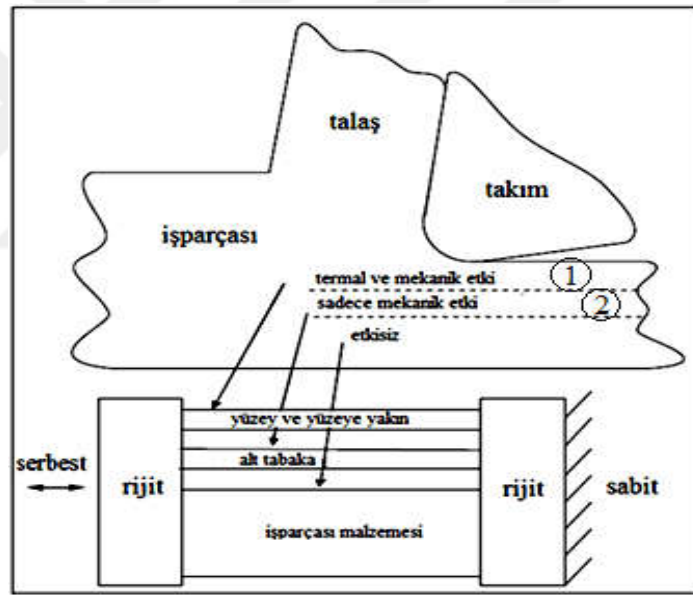
oluşum sebepleridir. Tüm bu süreçler sonlandırılıp plastik deformasyon, kimyasal veya ısıl işlemler tamamlansa bile oluşan yüklerden kaynaklanan gerilmeler iş parçası içerisinde tutulur ve tam olarak kaybolmazlar. Bu tutulmuş gerilmelere kalıntı gerilme denir (Eşit, 2006; Taş, 2010; Ulutan, 2013; Tekaslan, 2007). Başka bir ifadeyle bu gerilmeler; bir dış yük uygulaması olmaksızın üniform sıcaklık şartları altında parçanın içerisinde kalıntı olarak var olan ve kendini dengeleyen gerilmeler olarak da tanımlanabilirler. Bir parçanın ömrü, genellikle parça içerisindeki kalıntı gerilmeler ve parçanın maruz kaldığı dış gerilmelerden etkilenir. Kalıntı gerilmeler üretim ve işlem sırasında oluşabildikleri gibi servis sırasında da oluşabilirler. Ancak servis koşullarında malzeme içerisinde yüksek değerlerde bulunması çatlak ilerlemesine, beklenmeyen erken kırılmalara, gerilmeli korozyona, boyutsal hassasiyet gerektiren malzemelerde bu hassasiyetin kontrolünün zorluluğuna yol açar. Kalıntı gerilme içeren bir işparçası üzerinden gerilmeli bir bölge kaldırılırsa, yeni denge durumunda iş parçası şekil değiştirir. Ayrıca akma noktası karakteristiğine sahip bir malzeme için kalıntı gerilmeler ön gerilme durumuna benzer bir etki gösterirler ve akma mukavemeti seviyesini değiştirirler. Sonuç olarak, mukavemet oldukça değişir. Bu durum, değişken yükleme sırasında ortalama kalıntı gerilmedeki değişimle açıklanabilir (Yiğit vd., 2008; Subaşı vd., 2010).

Metallerin soğuk şekillendirilmesi ve işlenmesi gibi işlemler düzensiz elastik-plastik deformasyonla bütünleşmiştir. Talaş kaldırma yoluyla metallere uygulanan birçok biçimlendirme işlemi malzemenin yüzey topografyasında değişiklikler oluşturur. Bu işlemler sonucu yorulma çatlakları oluşur ve genişler (Sanchez vd., 2011). Kesme hızı, ilerleme miktarı, kesme derinliği (talaş kaldırma miktarı), malzeme özellikleri, takım geometrisi ve şartları, soğutma vb. gibi çeşitli parametrelere bağlı olan seviyeler alt yüzey kalıntı gerilme durumunun oluşumunu etkiler. Yüzeydeki kalıntı gerilmeler genellikle çekme alt yüzeylerde kalıntı basma gerilmeleri oluşur. Yüzeyden merkeze inildikçe kalıntı çekme gerilmeleri sıklıkla küçülür (Kafkas, 2007; Varol, 2010; Dinç, 2006). Kalıntı gerilmeler üretilen malzemenin servis ömrünü doğrudan etkiler. Çekme kalıntı gerilmeleri, malzemenin yorulma ömrünü azaltıp malzemenin erken hasara uğramasına neden olabilirken, basma kalıntı gerilmeleri ise malzemeye; yorulma ömrünü ve gerilmeli korozyona karşı direncini arttırıcı yönde faydalı bir etkiye sahiptir. Şekil 1.30' de temsili olarak talaş

kaldırılmış bir işparçası yüzeyinde termal ve mekanik etkiden dolayı meydana gelen kalıntı gerilme derinlikleri verilmiştir.

1.1.12. Tornalama işleminde kalıntı gerilme oluşumu

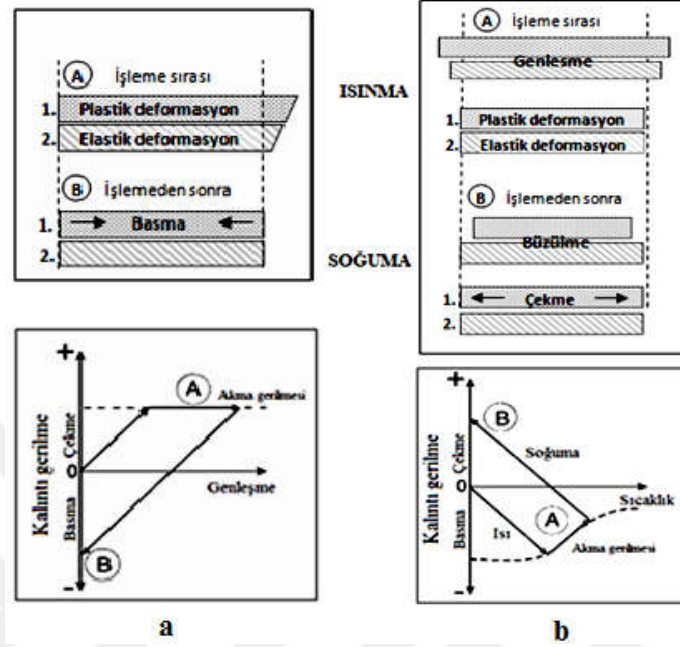
Metal kesme işlemi sırasında işparçası üzerindeki mekanik yüklere ve sürtünme kuvveti gibi dinamikler kesme bölgesinde önemli bir sıcaklık artışına sebep olurlar (Tekaslan, vd. 2009; Ulutan, 2013). Bu sıcaklık artışı işparçası yüzeyinde termal yüklere neden olur. Bölgesel sıcaklık artışıyla termal genişlemenin miktarı artar ve çekme kalıntı gerilmelerin ortaya çıkmasına sebep olur. Thermo-mekanik bir işlem olan tornalamanın kalıntı gerilme seviyelerinin oluşumunu nasıl etkilediği, kesici takım iş parçası üzerinden geçtiğinde oluşan gerilme durumlarıyla izah edilebilir (Şekil 1.15 ve Şekil 1.16).



Şekil 1.15. Tornalama işleminde kalıntı gerilme oluşum tabakaları (Su, 2006).

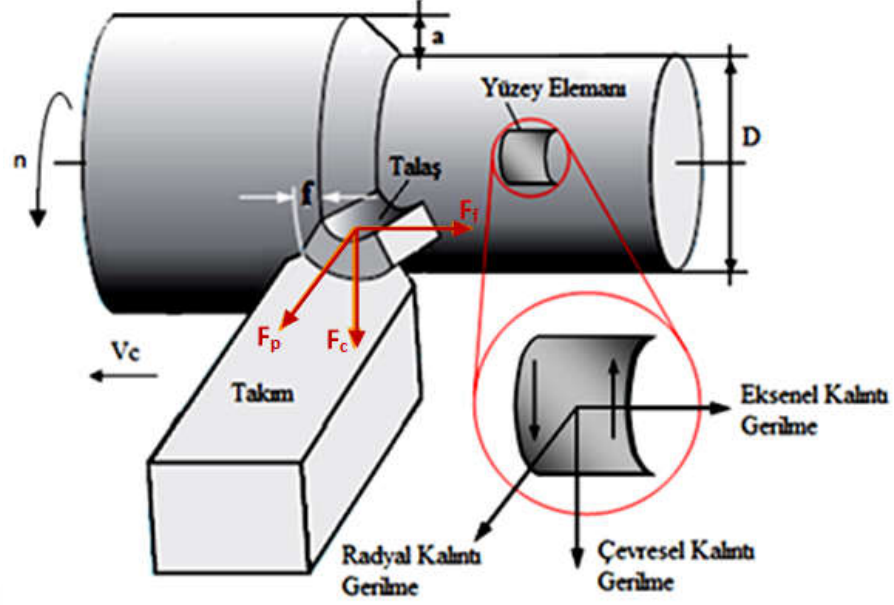
Kesme esnasında mekanik etkili kalıntı gerilme durumu (A) yüzey tabakasındaki plastik deformasyonla (1) ve yüzey tabakasının altında elastik deformasyonla (2) açıklanabilir (Şekil 1.16 a). Kesme işlemi sonrası iş parçası kuvvet dengesini ve geometrik uyumu elde etmek için elastik genişlemeye uğrar ve kalıntı basma gerilmesi içerisinde yüzeye yerleşir (B). Termal kalıntı gerilme mekanizması kesme işleminin ısısından kaynaklanır, burada yüzey katmanı genişler ve basma gerilmesi oluşur (A). Ardından iş parçası soğur (B) ve yüzey katmanında büzülme olur (1), bu

da yüzeyde çekme kalıntı gerilmesi meydana getirir (Şekil 1.16 b). Çekme kalıntı gerilmeler işparçası yüzeyinde yer alır ve alt tabakalara inildikçe azalır (Vosough, 2005; Gunnberg, 2006; Gürbüz, 2012).



Şekil 1.16. Kalıntı gerilme mekanizması, mekanik etki (Vosough, 2005).

Kalıntı gerilmeler, kesme kuvveti bileşenlerinin bulunduğu kararlı kesme bölgelerinde belirlenmektedir. Bu doğrultular temel gerilme bileşenlerinin yönlerini belirlediğinden, iş parçasının yüzeyindeki ve alt yüzeyindeki kalıntı gerilmelerin analizi için seçilirler. Şekil 1.34 bütün kalıntı gerilme bileşenleri ve yönleri gösterilmektedir.



Şekil 1.17. İş parçası yüzeyine göre kalıntı gerilme bileşenlerinin yönleri.

1.1.13. X-ışını kırınımı yöntemiyle kalıntı gerilme analizi

X-ışını kırınımı yöntemi, parçadaki kalıntı gerilme seviyesini belirlemek amacıyla yaygın olarak kullanılan bir tahribatsız muayene yöntemidir (England, 2000). Kalıntı gerilme ölçümünde kullanılan kırınım metotları, temel olarak kristal yapıya sahip bir malzemeye x-ışınları gönderilmesiyle, maksimum şiddetin elde edildiği açının ölçülmesine dayanır (Özer, 2010). Bu açılarından, Bragg kanununa göre kırınım düzlemlerindeki düzlemler arası mesafe belirlenmektedir (Taş, 2010; Eşit, 2006; Adıgüzel, 2011; Fitzpatrick vd., 2005). Kristal yapı içerisinde bulunan atomik düzlemler arasındaki mesafe, uygulanan gerilmeler veya kalıntı gerilmeler nedeniyle uzayıp kısalır. Bu mesafenin artması o bölgede oluşan bir çekme gerilmesini ifade ederken, mesafenin azalması ise basınç gerilmelerinin varlığını gösterir (Tercan, 2006; Cullity, 1978).

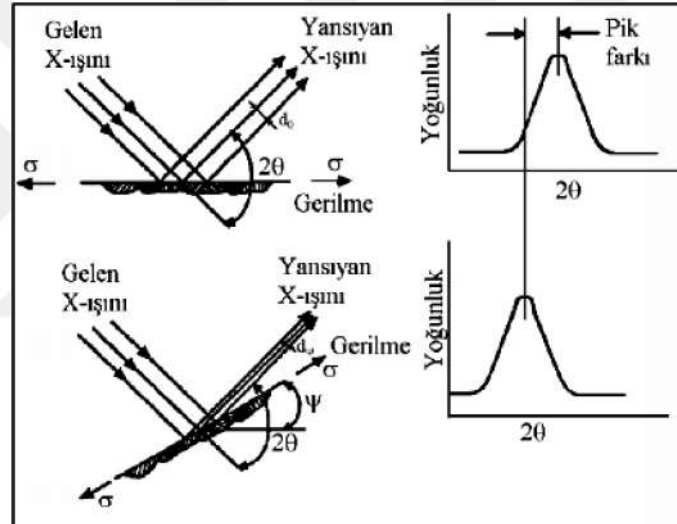
Bragg kanunu;

Bragg, 1913 yılında kristal yapılar üzerinde çalışırken önemli bir sonuç buldu. Saçılan radyasyonun açısal dağılımı, kristal örgüden geçen düzlemlerden yansımış gibi davrandığı varsayılarak açıklanabilmekteydi (Vosough, 2005). Bu yansıma, gelme ve yansıma açılarının eşit olması bakımından ayna yansımasına benzetilmektedir. Bragg

eşitliğine göre, malzeme yüzeyine gelen x-ışını 2θ açısında kırınım göstererek yansıma yapar.

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (1.26)$$

Burada λ kullanılan radyasyonun dalga boyu, n yansımanın mertebesini gösteren bir tamsayı, d kristal düzlemleri arasındaki mesafe θ ise, hem radyasyonun geliş hem de saçılma (yansıma) açısıdır. Düzlemlerden saçılan X-ışınları, gelen X-ışınlarına göre 2θ sapmış gibi düşünülebilir. Bu eşitlik, düzlemlerden yansıyan ışınlar (dalgalar) arasındaki yol farkı dalga boyunun tam katları olduğu zaman yansımanın oluşacağını ifade eder. Bu durumda her iki ışın da eş fazlıdır. Bragg yasası şematik olarak Şekil 1.18’ de gösterilmiştir.



Şekil 1.18. X-ışını kırınımı yöntemiyle kalıntı gerilme hesabı (Asi vd., 2001).

Dalga boyu sabit tutulursa, herhangi belirli düzlem üzerindeki atomlar gelen X-ışınlarının belirli bir açıda kırılmasına neden olur. Yansıyan X-ışınları huzmesi kesişir ve numune çevresinde bulunan film üzerinde iz bırakır. Sadece düzlemler arası mesafeleri Bragg kanununu sağlayan düzlemlerde, radyasyon konisi filmi keser. Film analiz edilerek 2θ açısı hesaplandığında düzlemler arası mesafe belirlenir.

Numune ψ açısı kadar eğilirse, atomik düzlemler de ψ açısı kadar eğilecektir. Eğer numunede artık gerilme yoksa kırılan eğrilerin ikisi de üst üste gelecektir. Ancak eğer artık gerilme varsa farklı yönlerdeki atomik düzlemler sıkışacak veya genişleyecek ve

pik değeri değişecektir (Prevéy, 1996). Gerilme, σ , aşağıdaki denklem 1.27' de verilen eşitliğe bağlı olarak tespit edilir.

$$\sigma = \frac{E}{1 + \nu} \frac{1}{\sin^2 \psi} \frac{(d_\psi - d_0)}{d_0} \quad (1.27)$$

Burada, d_ψ ; ψ eğim açısındaki düzlemler arası mesafedir, E ; Elastisite modülü
 ν ; Poission oranıdır (Asi vd., 2001).

1.1.14. Matematiksel model ve sonlu elemanlar metodu

Metal kesme işlemi endüstride en çok kullanılan imalat tekniklerinden biridir ve hem akademik hem de endüstri dünyasında bu karmaşık işlemi inceleyen birçok çalışma vardır. Araştırmacılar süreç verimliliği açısından en iyi kesme şartları ve takım geometrilerinin ne olduğunu belirlemeye odaklanmaktadır. Sıcaklık, kesme kuvvetleri ve gerilme dağılımları gibi önemli işlem değişkenlerinin tahmini, takım geometrilerinin tasarımında ve kesme koşullarının eniyilenmesinde önemli bir rol oynar. Araştırmacılar bu değişkenleri, araştırmayı çok zaman alıcı ve pahalı hale getiren deney teknikleri kullanarak bulurlar. Bu noktada sonlu elemanlar yöntemi (FEM; Finite Element Method) kullanarak işleme sürecinin modellenmesi ve benzetimi ana araç haline gelir (Arrazola, 2008; Lazoğlu, 2008). Bu önemli kesme değişkenleri herhangi bir deneye gerek kalmadan sonlu elemanlar metodu ile tahmin edilebilirler.

Metal kesme işleminin sonlu elemanlarla simülasyonunda üç temel yaklaşım kullanılır. Bunlar; Lagrange, Euler ve keyfi (rastgele) Lagrange-Euler (ALE) yöntemidir. Metal kesme simülasyonlarında en çok kullanılan Oxley, Johnson-Cook ve Zerilli-Armstrong modelleridir.

Oxley'in malzeme modeli

Bu eşitlikte σ_1 , malzemenin $\varepsilon=1$ deki akma gerilmesi, n ise deformasyon sertleşmesi indeksidir. σ_1 ve n değerleri Eşitlik (1.29)'da gösterilen hız ve modifiye edilmiş sıcaklık değerine bağlıdır.

$$\sigma = \sigma_1 \varepsilon^n \quad (1.28)$$

$$T_{mod} = [1 - \nu \log(\dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0)] T \quad (1.29)$$

Bu eşitlikte ν ve $\dot{\varepsilon}_0$ verilen belirli bir malzeme ve test koşulları altında verilen iki sabittir.

Johnson-Cook malzeme modeli

Johnson-Cook, çeşitli mühendislik malzemelerini geniş deformasyon, deformasyon hızı ve sıcaklık aralıklarında torsiyon ve dinamik Hopkinson çekme testlerine tabi tutmuş ve Eşitlik 1.30'da verilen denklemi elde etmiştir (Kılıçaslan, 2009).

$$\sigma_{eq} = [A + B\varepsilon^n] \left[1 + C \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right)^m \right] \quad (1.30)$$

Bu eşitlikte A akma dayanımı (MPa), B sertleşme modülü (MPa), C deformasyon hızı duyarlılığı katsayısı, n sertleşme modülü, m ısı yumuşama katsayısı, ε plastik deformasyon, $\dot{\varepsilon}$ plastik deformasyon hızı (s^{-1}), $\dot{\varepsilon}_0$ referans plastik deformasyon hızı (s^{-1}), T iş parçasının sıcaklığı (K), T_r oda sıcaklığı (K), T_m iş parçasının ergime sıcaklığıdır(K).

Metal kesmede sürtünme modeli

Talaşlı imalata yönelik ilk yapılan araştırmalarda takım ile iş parçası arasındaki sürtünmenin, Eşitlik 1.31'da gösterilen Coulomb Kanunu'na bağlı kaldığı kabul edilmiştir.

$$\tau = \mu \cdot \sigma_n \quad (1.31)$$

Bu eşitlikte τ sürtünme gerilmesi, μ sabit sürtünme katsayısı ve σ_n talaş takım arasında oluşan normal gerilmedir. Bu yasaya göre sürtünme gerilmesi, normal gerilmeye sürtünme katsayısı ile bağlıdır. Düşük kesme hızlarında Coulomb sürtünme modeli kullanılabilir. Ancak yüksek kesme hızlarında yüksek sıcaklıklar ve yüksek normal gerilmeler oluşur. Dolayısıyla sıcaklık ve normal gerilme dağılımı

sürtünme davranışında etkili olduğundan sürtünme katsayısının sabit alınması ve bu modelin kullanılması uygun değildir. Bunun yerine diğer bir sürtünme modeli Eşitlik 1.32'de gösterilen sabit kayma modelidir. Bu modelde takım ile talaş arasındaki temas uzunluğu boyunca sabit sürtünme-kayma gerilmesi olduğu varsayımı yapılır.

$$\tau = m.k \quad (1.32)$$

Bu eşitlikte τ sürtünme gerilmesi, m sürtünme faktörü, k iş parçası malzemesinin kesme-akma gerilme değeridir. Bu Kanun'a göre sürtünme gerilmesi, iş parçasının kayma-akma gerilmesi değerine sürtünme faktörüyle bağlıdır.

1.1.15. Taguchi deney tasarımı ve analizi

Deney Tasarımı (DT), bir prosesteki girdi değişkenleri üzerinde istenilen değişikliklerin yapılmasıyla cevap değişkeni üzerindeki değişkenliğin gözlenmesi elde edilmesi ve yorumlanması olarak tanımlanabilir (Atakök, 2008). Taguchi Metodu deney tasarım tekniğidir. Deney sayısını azaltma ve deneylerin değerlendirilmesinde verimliliği arttıracak bir metottur. Günümüzde yapılan birçok çalışmada zaman ve ekonomik kısıtlılık nedeniyle Taguchi ve benzeri deney tasarım metodları kullanılmaktadır. Bu teknikle; deney sayısı en aza indirilerek araştırma ve hesaplama işlemleri yapılmaktadır. Taguchi Metodunda deneye başlamadan önce parametreleri seçerek ve parametrelerin kendi aralarındaki etkileşimlerini değerlendirerek deney sayısını azaltmak mümkündür. Parametreleri birbirinden bağımsız olarak değerlendirdiği için eşit sayıda örnekleme yapılarak dengeli bir tasarım sağlanmış olur. Böylece her bir parametrenin etkisi bulunmuş olunur.

Varyans analizi (ANOVA)

Varyans analizi (Analysis of Variance: ANOVA) ile hangi işlem üzerinde hangi faktörlerin ne derecede etkili oldukları istatistiki olarak ortaya konur (Ovalı, 2008). Varyans analizinde amaç, incelenen faktörlerin, kaliteyi ölçebilmek için seçilen çıktı değerlerini ne oranda etkilediklerini ve farklı seviyelerin nasıl bir değişkenliğe sebep olduklarını ortaya koyabilmektir. Taguchi, varyasyonu azaltmak amacıyla, deney tasarımında performans kriteri olarak kullanılmak üzere, sinyal/gürültü (S/N) oranı olarak adlandırılan bir dizi istatistik geliştirmiştir. Taguchi, uygulamadaki

problemleri, hedefin türüne göre üçe ayırmış ve her biri için farklı bir sinyal/gürültü oranı tanımlamıştır. Buna göre, amacın “en küçük en iyi”, “en büyük en iyi” ve “nominal en iyi” olmasına göre aşağıdaki eşitlikler (Eşitlik 1.28-1.32) kullanılarak S/N oranları hesaplanır.

En düşük (küçük) en iyi olduğu durumda:

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n yi^2 \right) \quad (1.33)$$

En yüksek (büyük) en iyi olduğu durumda:

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{yi^2} \right) \quad (1.34)$$

Nominal en iyi olduğu durumda:

$$S/N = 10 \log \left(\frac{\bar{y}^2}{S^2} \right) \quad (1.35)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n yi \quad (1.36)$$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (yi - \bar{y})^2 \quad (1.37)$$

Eşitliklerde yi : Performans yanıtının, i : gözlem değeri, n : bir denemedeki test sayısı, $\bar{y}$: Gözlem değerlerinin ortalaması ve S^2 : Gözlem değerlerinin varyansını ifade etmektedir (Yıldırım, 2011).

Regresyon analizi

Regresyon analizi, aralarında sebep-sonuç ilişkisi bulunan iki veya daha fazla değişken arasındaki ilişkiyi, tahminler ya da kestirimler yapabilmek amacıyla matematiksel bir model ile karakterize eden bir istatistik analiz tekniğidir. Verilen noktaları temsil eden en iyi eğriyi bulma işleminde genellikle en küçük kareler

yöntemi kullanılır. En küçük kareler yöntemi, hataların kareleri toplamı minimum olacak şekilde bir eğri denklemi bulma esasına dayanmaktadır (Çetin, 2010).

Bağımlı değişken (Y) ile bir bağımsız değişken (X_1) arasındaki bağıntıyı inceleyen yönteme basit regresyon, bir bağımlı değişken (Y) ile iki ya da daha fazla bağımsız değişken ($X_1, X_2, X_3, \dots, X_p$) arasındaki bağıntıları modeller aracılığı ile inceleyen yönteme ise çoklu regresyon adı verilmektedir. Burada verilen bağımlı değişkenlerin deney esnasında ardışık olarak eklenerek çoklu regresyon analizini oluşturur.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + e_{ij} \quad \text{Basit doğrusal model} \quad (1.38)$$

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_p X_p + e_{ij} \quad \text{Çoklu doğrusal model} \quad (1.39)$$

$$Y_1, Y_2 = f(X_1, X_2, \dots, X_p) \quad \text{Çok değişkenli doğrusal model} \quad (1.40)$$

Çok Değişkenli Doğrusal Regresyon Analizi cevap değişkeninin iki veya daha fazla olduğu bağımsız değişkenin ise bir ya da daha fazla olduğu regresyon modellerini ifade etmektedir.

Doğrusal regresyon modeli

Bağımlı değişken T, bağımsız değişken x, y, z kabul edilirse lineer regresyon Eşitliği 1.41'deki denklemle ifade edilir.

$$T = k_0 + k_1 x + k_2 y + k_3 z \quad (1.41)$$

Burada k_0 sabit; k_1, k_2, k_3 ise x, y, z bağımsız değişkenlerinin katsayılarıdır (Akkuş, 2010).

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Havacılık ve medikal alanda yaygın kullanım alanına sahip Ti-6Al-4V (Ti64) ve Inconel 718 süper alaşımların işlenmesi ve nihai durumdaki yüzey bütünlükleri ile ilgili araştırma geliştirme süreci işletmelerde büyük bir dikkatle takip edilmektedir. Bu malzemelerin işlenmesinde kullanılan ek prosesler ve etkileri de yine çalışma konularındandır. Çalışmanın bu kısmında talaşlı imalat sürecinde yüksek basınçlı soğutma sıvısı kullanımının kesme sıcaklığı ve yüzey bütünlüğü çıktılarındaki etkileri ve bunların simülasyonlarla karşılaştırılmaları üzerine literatür özetleri aşağıda sunulmuştur.

Choudhury vd. (1998), yaptıkları çalışmada nikel bazlı süper alaşımların işlenebilirliğini kesici takım ve kesici takım aşınmasını ağırlıklı olarak incelemiştir. Ayrıca ısıtma işlem ve kesici takım çeşitlerine değinilmiştir. İşleme esnasında çabuk sertleşmesi ve paslanmaz çelikler gibi östenitli yapıya sahip olmaları nedeniyle nikel bazlı süper alaşımların işlenebilirliklerinin zor olduğu belirtilmiştir. Takım aşınmasında en önemli unsurun sıcaklık olduğu, ikinci unsurun da kalıntı gerilmeler olduğunu belirtmiştir. Inconel 718'in işlenmesinde kaplamasız karbür takımların kaplamalıları göre daha verimli olduğu ve kaplamanın performansı etkilemeyen bir özellik olduğu sonucuna ulaşırken seramik kesici takımlar incelendiğinde yüksek hızla işleme veya yüksek ilerlemeler için alüminyum oksit (Al_2O_3) seramik takımlar daha avantajlı olduğunu ortaya koymuştur. Benzer olarak bu takımların orta kesme hızları ve düşük ilerlemeler için de avantajlı olduğunu ifade etmişlerdir. Yine aynı malzemenin işlenebilirliği üzerine doktora çalışması yapan Altın (2005), kesme parametrelerinin karbür ve seramik kesici takımlar için takım ömrü, kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini analiz etmiştir. Bu analizler sonucunda optimum işleme şartlarını belirlemeye çalışmıştır. Dört tip kesici uç ve her kesici uç için yuvarlak ve kare geometrili uç kullanarak toplam sekiz farklı kesici uçla çalışma yapmıştır. Sonuç olarak yüzey kalitesinin geliştirilmesi için talaş derinliği ve ilerlemenin azaltılması gerektiğini belirtmiştir. Ayrıca seramik uçlu takımların Inconel 718 süper alaşımının yüksek hızlarda tornalanmasında uygun olmadığını, takım aşınmalarının çabuk gerçekleştiğini tespit etmiştir. Son olarak sementit karbür kesici takımlar ile Inconel 718 işlenirken yuvarlak geometrili takımların tercih edilmesini, seramik

kesici takımlar ile işlemede kaliteli bir yüzey için kare profilli takımlar seçilmesini ve kaba tornalamada ise yuvarlak geometrilili seramik kesici takımların seçilmesini tavsiye etmiştir.

Ezugwu vd. (2004), tarafından yapılan çalışmada yüksek basınçlı soğutucu desteği ile kaplamalı karbür kesici uç kullanılarak Inconel 718 süper alaşımın işlenmesi araştırılmıştır. Inconel 718 üç karışimli PVD kaplamalı karbür takım ile geleneksel ve değişik yüksek basınçlarda (203 bar'a kadar) soğutucu ile 50 m/dak. hıza kadar işlenmiştir. Bu çalışma ile takım ömrü, takım aşınması, yüzey kalitesi ve bileşke kuvvetler ölçülmüş, yüksek basınçta ortaya çıkan talaş yapısı hakkında bir değerlendirme yapılmıştır. Deneyler 20, 30, 50 kesme hızı (m/dak), 0.25, 0.3 ilerleme oranı (mm/dev) 2.5, 3.0 mm kesme derinliği, soğutucu basıncı olarak geleneksel, 110, 150 ve 203 bar değerleri kullanılarak deney gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda YBS ile inconel 718 işlendiğinde yüzey kalitesinde ve takım ömründe kabul edilebilir bir iyileşme olduğu görülmüştür. 203 bar soğutma basıncı ve 50 m/dak hızla yapılan bir işlemede geleneksel soğutma ile basınçlı soğutma karşılaştırıldığında takım ömründe % 740 yakın bir iyileşme olurken takım ömründe de artan soğutma basıncı ile birlikte iyileşme görülmüştür. İşleme esnasında kesme ısısında ve bileşke kuvvetlerde azalma meydana gelmiştir. İşleme esnasında talaşın kırılabilirliği yüksek basınçlı soğutma ile birlikte kesme derinliğine, ilerleme oranına ve kesme hızına bağlı olduğu tespit edilmiştir. Inconel 718'in 203 bar basınca kadarki işlenmesinde talaşın kırılmadığı, 203 bar basınçta yapılan işlemede talaşın kırıldığı ancak yüksek basınçla sürekli işlemede takım aşınmasının yavaş yavaş arttığını ifade etmiştir.

Kramar vd. (2009), yapmış oldukları çalışmada Inconel 718 süper alaşım malzeme ve yüzey sertleştirme işlemi görmüş C45E çeliğinin TiAlN karbür kaplamalı takımlarla işlemişlerdir. Deneylerde malzemelerin farklı özelliklerinden dolayı her ikisi için farklı kesme ve soğutma basınç parametreleri kullanmışlardır. C45E malzemesi için; 98.5 m/dak kesme hızı, 0.25 mm/dev ilerleme miktarı ve 2 mm kesme derinliği kullanmıştır. Soğutma basıncı olarak; kuru, geleneksel ve 2000 bar basıncına kadar değişken basınç değerleri uygulamışlardır. Aynı parametreler Inconel 718 için şu şekildedir: 50 m/dak, kesme hızı, 0.25 mm/dev, ilerleme miktarı ve 2 mm kesme derinliği soğutma basıncı olarak aynı değerler uygulanmıştır. Bu

testler sonucunda C45E malzemesi için talaş kırıcılık oranı kuru kesmeye göre yüksek basıncın etkisinin daha belirgin olduğunu savunmuşlardır. 100 bar basıncın üzerinde talaş boyutlarında açık bir değişim oluşurken bu değer Inconel 718 malzeme için 700 bar ve üzerinde gerçekleşmiştir. Takım ömrü değerleri C45E malzemesi için geleneksel soğutma ile yaklaşık 2 dakika iken yüksek basınç uygulamasında bu değer 10 dakikanın üzerinde olmuştur. Inconel 718 malzeme için takım ömrü geleneksel soğutma ile yaklaşık 4 dakika iken yüksek basınç için bu değer 8 dakikanın üzerinde olmuştur. Inconel 718 malzeme için ölçülen maksimum sıcaklık kuru kesme için; 400° C, geleneksel soğutma için 200 °C, yüksek basınçla soğutma için 60° C olarak ölçmüştür. Sonuç olarak yüksek basıncın etkisiyle %70 'e varan bir sıcaklık azalmasının olduğunu çalışmasının sonucunda ortaya koymuşlardır.

Kamruzzaman vd. (2008), yapmış oldukları çalışmada 42CrMo4 çeliğini kuru ve yüksek basınç (80 bar) şartları altında 93, 133, 186, 266 ve 193 m/dak kesme hızlarında, 0.10, 0.14, 0.18 ve 0.22 mm/dev ilerleme oranlarında işlemişlerdir. Kesme derinliği olarak 1.0 ve 1.5 mm değerlerini kullanmışlardır. Kaplamasız karbür takımlar kullanılarak yapılan testlerde takım-işparçası arasında oluşan kesme sıcaklığını, yüzey pürüzlülük değerlerini ve takım aşınması gibi değerlerin sonuçlarına ulaşmıştır. Deney sonuçlarının verileri altında en uzun takım ömrü değerine; 193 m/dak kesme hızı, 0.18 mm/dev ilerleme oranı ve 1.5mm kesme derinliğinde ulaşmıştır. Bu parametrelerde yapılan testlerde kuru kesme için takım ömrü 13 dakika iken yüksek basınçla işlemede bu süre 23 dakikaya kadar çıktığını gözlemlemiştir. Kesme hızlarına göre elde ettiği maksimum kesme sıcaklıkları kuru kesmede 760° C iken yüksek basınçlı soğutmada bu değer 610 °C dir. Benzer olarak farklı kesme hızlarının uygulandığı testlerde 1mm sabit kesme derinliği kullandığında kuru kesme için maksimum yüzey pürüzlülüğünün olduğu şartlarda Ra değeri yaklaşık olarak 3,9 µm iken yüksek basınçta bu değer 2,4 µm olarak okunmuştur. Sonuç olarak yaptığı bu çalışmada yüksek basınçlı soğutma sisteminin takım ve iş parçası üzerindeki olumlu etkisini ortaya koymuşlardır. Kamruzzaman vd. (2009), yaptıkları benzer bir çalışmada yukarıdaki kesme parametreleri için kesme kuvveti değerlerini araştırmışlardır. Buna göre, kuru kesme şartlarında 450 N iken yüksek basınçta 340 N olarak okunmuştur. En yüksek takım ömrü; yüksek

basınç için 0.14 mm/dev. değerinde 91 dakika iken, kuru kesme işleminde 40 dakika olarak hesaplamışlardır.

Courbon vd. (2011), yapmış oldukları çalışmada Inconel 718 süper alaşım malzemenin yüksek basınçlı soğutma sistemi (YBS) yardımıyla tornalanmasında işleme performansını sonlu elemanlar metodu kullanarak araştırmışlardır. YBS değerleri olarak 500 bar ile 1300 bar arasında değişken basınçlar kullanarak geleneksel soğutma ile karşılaştırma yapmışlardır. Testleri TiAlN kaplamalı karbür uçlarla ve farklı kesme parametrelerinde gerçekleştirmişlerdir. Deney sayısını ve parametreleri belirlemek için deney tasarımı modeli kullanarak 27 adet deney gerçekleştirmişlerdir. Yapılan deney ve simülasyonlarla ortaya koydukları yorumlarda; basıncın artmasıyla takım-talaş temas mesafesinin azaldığını, sıvının mekanik ve soğutma etkisiyle talaş boyunun kısa ve talaş eğrilik yarıçapının daha düşük olduğunu ortaya koymuşlardır. Artan soğutma basıncı ile birlikte sıcaklık dağılımının kesme bölgesinden çevreye doğru olan mesafesinin daha az olduğunu ifade etmişlerdir.

Ezugwu vd. (2005) inconel 718 malzemeyi kullanarak yaptıkları bir diğer çalışmada seramik kesici uç kullanılarak 200, 270, 300 kesme hızı (m/dak), 0.1, 0.2 ilerleme oranı (mm/dev), 0.5 talaş derinliği (mm), 11, 15, 20, 20.3 (MPa) soğutucu destek basıncı ile deney gerçekleştirmişlerdir. İşleme sonucunda şu sonuçlara ulaşmışlardır. Şekil 2.2’de görüldüğü gibi 15 MPa’a kadar soğutucu basıncı ile yapılan işlemede takım ömrü çizgisinde aşamalı bir artış gözlemlenmiştir. 250 m/dak kesme hızında ve 0.2 mm/dev ilerleme oranında takım ömründe %71’lik bir artış olduğu gözlemlenmiştir. 203 bar’a kadar soğutma basıncı ile kaba işleme şartları altında elde edilen sonuçları kıyaslandıklarında seramik takımların performansının kesme derinliğinde oluşan aşırı çentikten dolayı önemli oranda azaldığı sonucuna varmışlardır. 15 MPa değerine kadar soğutucu desteği ile işleme yaptıklarında takım performansındaki iyileşme (eğer doğru kesme şartları uygulanırsa ve kritik soğutucu basıncı aşılmazsa) yüksek basınçlı soğutucu desteği altında seramik takımların iyi sonuç verdiklerini ortaya çıkarmışlardır. 270 m/dak kesme hızı ve 0.2 m/dev ilerleme oranı ile 20.3 MPa soğutucu basıncı altında bitirme yüzey işleme işlemi yaptıklarında takım ömründe %63’lük bir düşüş meydana geldiğini görmüşlerdir. Bunun sonucu olarak da 20.3 MPa soğutma basıncı ile işleme yaptıklarında seramik takımın, çentik aşınma oranının hızlanmasına neden olduğunu savunmuşlardır.

Motorcu (2010), yapmış olduğu nikel ve titanyum esaslı süper alaşımların işlenebilirliği isimli tarama makalesinde, nikel ve titanyum alaşımlarının farklı operasyonlarla işlenmesinde seramik takımların performanslarını literatürde yapılan çalışmaları inceleyerek değerlendirmiştir. Çalışmasında artan oranlarla kullanım alanı bulan bu malzemelerin seramik takımlarla işlenebilirliğini incelemiş, seramik takımında oluşan aşınma mekanizmalarını ve bu mekanizmalar sonucu oluşan aşınma tiplerini değerlendirmiştir. Geleneksel soğutma sıvısı uygulama tekniklerinin yanı sıra yüksek basınçlarda uygulanan soğutma tekniğinin nikel esaslı süper alaşımların işlenmesinde seramik takımların performansını arttırdığını ve yüksek basınçlarda uygulanan soğutma uygulamalarının bir önemli katkısının ise talaşın kırılmasını ve segmentli tip talaş oluşumunun sağlayarak çentik oluşumunun da engellendiği bilgisine ulaşmıştır. Yüksek basınçlarda uygulanan soğutma tekniklerinin imalat endüstrisinde oldukça yaygın tercih edilme sıklığını ifade etmiş ve bu tür işlemesi zor alaşımların imalatında takım performansını yaklaşık 7-8 kat artırdığını ifade etmiştir. Al_2O_3/SiC_w takviyeli seramik takımlar, saf ve karma esaslı seramik takımlardan daha iyi takım ömrü performansı sergilediği ve nikel esaslı süper alaşımların işlenmesinde negatif açılı yuvarlak SiAlON uçlar en iyi tercihler olduğunu ortaya koymuştur. Kesici takım geometrisine bağlı olarak elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri açısından değerlendirdiğinde üçgen geometrili takımlar kare ve yuvarlak geometrili takımlardan daha kötü yüzeyler oluşturduğunu da yine yapmış olduğu makalede ortaya koymuştur.

Secotools (2015), yapılan araştırma geliştirme faaliyetlerinde titanyum işparçasının yüksek debili geleneksel soğutma şartlarında 40 m/dakika kesme hızı, 0.25 mm/devir ilerleme hızı ve 2 mm kesme derinliği değerlerinde tornalama işleminde beş dakikalık takım ömrü değeri elde edilmiştir. Daha sonra araştırmacılar aynı işparçasını yüksek basınçlı soğutma sıvısı özellikli takıma uygulamış ve tüm parametreleri iki kat arttırırken takım ömründe %100'e varan oranda artış elde etmişlerdir. Bu sonuçla birlikte talaş kontrolünün de sağlandığını ortaya koymuşlardır. İşleme performansının soğutma sıvısı basıncı ve akış (l/dak) miktarıyla arttığını, yaklaşık 70 bar basınçtaki sıvının en zorlu talaşları bile koparmaya yettiğini belirtmişlerdir. Devam eden kesme deneylerinde bu sistemin farklı alaşımlara da uygulandığında talaş kaldırma oranlarında, kesme verilerinde, talaş kontrolünde, yüzey finiş kalitesinde önemli artışların yanı sıra, üretim süresinde

önemli azalma elde edilmesine olanak sağladığını ifade etmişlerdir. Aynı zamanda YBS sisteminin talaş boşaltma ile ilgili sorunları giderirken operatör müdahalesine olan ihtiyacı da ortadan kaldırdığını belirtmişlerdir. Soğutma sıvısının olumlu etkisinin tornalama gibi kesmenin sürekli olduğu operasyonlarda en iyi sonuçları verdiğini açıklamışlardır.

Palanisaym vd. (2009), Ti-6Al-4V süper alaşımın yüksek basınçlı jet soğutma ile tornalanması işleminde takım aşınması ve talaş geometrisi yönünden geleneksel soğutmaya göre performansını değerlendirmişlerdir. Deneylerinde geleneksel soğutma şartları için 6 bar, yüksek basınç şartları için ise 90 bar soğutma basıncı kullanmışlardır. Kesme parametrelerinde 75 m/dak kesme hızı, 0.25mm/dev ilerleme oranı ve 2mm kesme derinliği kullanmışlardır. Tüm kesme işlemleri CNMG 120408 kaplamasız karbür takımlarla ve SECO HPC takım tutucularla gerçekleştirilmiştir. Yüksek basınçlı soğutma sıvısı takım talaş arayüzüne, kesme bölgesine çok yakın bir bölgeye nüfuz ettirilmiştir. Takım aşınması miktarı ölçümü için standartlarda yer alan $VB_{max} = 0.6$ mm veya 10 dakikalık işleme süresini referans olarak belirlemişlerdir. Deneyler sonucunda kritik aşınma miktarının 10 dakika veya 0.6mm sınırları göz önüne alındığında; geleneksel soğutma şartlarında kritik aşınma miktarına 3,5 dakikada ulaşılırken yüksek basıncın uygulandığı durumda kritik aşınma değerine 10 dakikalık işleme süresi içerisinde ulaşılammıştır. Aynı işlem süresinde elde edilen talaş geometrileri incelendiğinde 6 bar için ortalama 30 mm talaş boyu oluşurken 90 bar da 5 mm civarında olmuştur. Tüm bu testler sonunda yazarlar yüksek basınç destekli tornalama işleminin titanyum alaşımların işlenmesinde takım aşınması ve talaş kırıcılık yönünden üstün kullanma avantajına sahip olduğunu ifade etmişlerdir.

Nandy vd. (2012), Ti-6Al-4V süper alaşım malzemeyi yüksek basınç şartları altında tornalama işlemi yapmışlardır. Bu işlem sırasında soğutma sıvısı jet çapının, jet açısının etkisini ve jetin çarpma açısının, çarpma mesafesinin takım aşınması ve talaş oluşumu üzerinde ne gibi etkileri olduğunu araştırmışlardır. Kaplamasız karbür uçlar kullanılarak yaptıkları bu çalışmada; 85m/dak kesme hızı, 0.20mm/dev. ilerleme oranı ve 2mm kesme derinliği sabit parametreler olarak seçmişlerdir. 120 bar yüksek basınç değeri olarak kullanmışlardır. 1 dakikalık bir işleme süresi sonrasında ölçtükleri takım aşınması değeri için; kuru kesmede yaklaşık olarak 170µm aşınma

değeri okumuşlardır, bu değer yüksek basınç için 70µm olarak okunmuştur. Daha düşük basınçlarda jet açısının ve çarpma mesafesinin olumlu bir etkisinin olmadığını belirtmişlerdir. Takım aşınması ve talaş oluşumunun karşılaştırıldığı sonuçlarda 0.8mm jet çapının 0.6 ve 1mm jet çapına kıyasla daha verimli sonuçlar çıkardığını belirtmişlerdir. VB=0.3mm aşınma kritik değeri referans alınarak yapılan takım ömrü hesaplamaları için kuru kesme şartlarında takım ömrü değerinin 7 dakika olarak bulunurken yüksek basınç şartları altında bu değeri 24 dakika olduğunu ifade etmişlerdir.

Dahlman (2002), yapmış olduğu çalışmada yüksek basınçlı soğutma sistemi kullanarak iki tür paslanmaz çelik ve Ti-6Al-4V alaşım malzemeyi tornalama deneyinde kullanmıştır. Çalışmasında ayrıca termokupl yardımıyla takım üzerinden sıcaklık ölçmek suretiyle yüksek basınçlı soğutma etkisinin farkını ortaya koymayı amaçlamıştır. Bu testlerde basınç ve akış hızı arasındaki ilişkinin kesme bölgesindeki ısı dağılımını nasıl etkilediğini araştırmıştır. Testlerde karşılaştırma yapabilmek için aynı basınç ve debide üç malzeme için aynı işleme parametreleri kullanmıştır. Ayrıca yüksek basıncın etkisini görmek için geleneksel soğutma sistemini de bir referans olarak kullanmıştır. Test parametreleri olarak; 3 mm kesme derinliği, 0,3 mm/dev ilerleme oranı ve 50-300m/dak kesme hızı kullanmıştır. Soğutma sistemi değerleri olarak da; 5 bar (geleneksel soğutma), 800 bar (yüksek basınç) değerlerinin yanı sıra 0,25 mm ve 1 mm arasında değişen jet çapları kullanmıştır. Testler sonunda yüksek basınçlı soğutma ile yapılan bir işlemede geleneksel soğutma sistemi ile karşılaştırıldığında sıcaklık yaklaşık olarak yüzde 50 oranında düşürülmüştür. Ulaştığı sonuçlarda farklı basınç ve debi ilişkileri için çelik malzemelerde kesme bölgesinde oluşan ısı dağılımı için küçük ama önemli bir etkiye sahip olduğunun sonucuna ulaşmıştır. Tüm bunlar sonucunda düşük sünekliğe sahip malzemelerin daha yüksek basınçta işlenmesi gerektiğini, daha yüksek bir yumuşaklığa sahip malzemelerin ise daha yüksek bir akış hızında işlenmesinin takım talaş temas mesafesinin kısa olması ve ısı dağılımının kontrol altına alınması yönünden verimli olacağı sonucuna ulaşmıştır.

Nandy vd. (2009), yapmış oldukları çalışmada havacılık ve biyomedikal alanda geniş bir kullanım alanı olan Ti-6Al-4V süper alaşım malzemeyi geleneksel ve yüksek basınçlı soğutma sistemi (YBS) kullanarak tornalama işlemi yapmışlardır.

Testlerinde her parametreden üçer farklı değer kullanmak suretiyle deney tasarımı yapmışlardır. Test esnasında kullandıkları YBS değerleri; 71, 100 ve 140 bar kesme hızı olarak da 90, 100 ve 111 m/dak son olarak kullandıkları ilerleme oranı ise 0.16, 0.20 ve 0.24 mm/dev dir. Deney çıktıları olarak kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması sonuçlarını değerlendirmişlerdir. Referans aldıkları ortak parametreler sonucunda talaş oluşumunu incelediklerinde geleneksel soğutma şartlarında oluşan talaşların YBS' ye göre daha uzun ve sürekli bir halde olduğunu gözlemlemişlerdir. Oluşan kesme kuvveti farklılıklarını incelediklerinde geleneksel soğutma şartlarında ilerleme yönünde ortalama 475 N gibi bir kuvvet oluşurken YBS de bu değer 300 N kadardır. Takım aşınması ve takım ömrü sonuçları için kesme hızının 100m/dak ilerlemenin 0,2 mm/dev ve YBS'nin 100 bar soğutma basıncı uygulandığı durumda ortaya koydukları sonuçlarda YBS'nin geleneksel soğutmaya oranla yaklaşık olarak 2/3 oranında takım ömrünün uzadığını ifade etmişlerdir.

Kramar vd. (2013), Inconel 718 malzemenin yüksek basınç şartları altında işlenmesinde kuru ve geleneksel soğutma şartlarına göre talaş boyundaki değişimleri araştırmışlardır. Değişken kesme hızlarında yapılan testlerde, kuru kesmenin yapıldığı durumda talaş boyunun sürekli ve renginin yanmadan dolayı koyulaştığını ifade etmişlerdir. Dolayısıyla kuru kesmenin bu malzemelerin işlenmesine uygun olmadıklarını ifade etmişlerdir. Geleneksel soğutma ve yüksek basıncın (500-1300 bar) uygulandığı durumlarda talaş boyundaki kısılmanın ve kırılma oranının yüksek basıncın her değerinde daha verimli olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu durumu her kesme hızında doğrulamışlardır.

Hadzley vd. (2013), Ti-6Al-4V malzemenin yüksek basınçlı jet soğutma (YBJS) şartları altında işleme performansını araştırmışlardır. Kaplamasız karbür uçlarla yaptıkları deneylerde 110m/dak kesme hızı, 0,15mm/dev ilerleme oranı ve 0,5mm kesme derinliği parametrelerini kullanmışlardır. Deneylerinde geleneksel soğutmanın yanı sıra 110 bar ve 203 bar yüksek basınç değerlerini soğutma şartlarına dahil etmişlerdir. Takım aşınması kritik değerini, $VB_{max} = 0,3$ mm olarak almışlardır. Bu değere göre her üç soğutma şartları altında ortaya çıkan takım ömrü değerleri geleneksel soğutma için 18,2 dakika, 110 bar için 29,7 dakika ve 203 bar için 53,7 dakika olarak elde etmişlerdir. Çalışmalarında YBJS destekli işlemenin geleneksel işlemeye göre %195 oranında takım ömrü artışı sağladığını ortaya koymuşlardır.

Kenda vd. (2011), işlenmesi zor ve yüksek yüzey bütünlüğü ve hassasiyeti beklenen Inconel 718 malzemenin kryojenik soğutma şartları altında tornalanması sonucu oluşan kalıntı gerilme durumunu araştırmışlardır. Kesme parametreleri olarak 60 m/dak. kesme hızı, 0,05 mm/dev. ilerleme oranı ve 0,63 mm kesme derinliği değerlerini kullanmışlardır. Kryojenik soğutmanın diğer soğutma şartlarına göre düşük yüzey pürüzlüğü oluşturduğunu ($Ra_{kuru}=0,46\mu m$, $Ra_{MQL}=0,40\mu m$, $Ra_{kryo}=0,32\mu m$) ifade etmişlerdir. X-ışını kırınım yöntemi kullanılarak ölçülen kalıntı gerilme sonuçlarında 150 μm elektro-parlatma işlemi yaparak tabaka kaldırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlarda teğetsel yönde ölçülen kalıntı gerilme değeri eksenel yönde ölçülen değerden bariz bir şekilde daha büyük olmuştur. Sırasıyla teğetsel ve eksenel yönlerde maksimum çekme ve basma kalıntı gerilme değerleri 661 MPa, 147 MPa ve -444 MPa, -698 MPa olarak hesaplanmıştır. Çalışmalarının sonucunda kryojenik soğutmanın etkisiyle basma kalıntı gerilme değerinin % 60 oranında bir artışa sebep olduğu bunda yüzey bütünlüğü ve çatlak oluşumunun engellenmesi yönünde olumlu sonuçlar çıkardığını ifade etmişlerdir.

Vosough (2005), yapmış olduğu tez çalışmasında Ti-6Al-4V süper alaşım malzemeyi yüksek basınçlı soğutma sistemi yardımıyla tornada işlemiştir. 5 bar (geleneksel soğutma) ve 280 bar (yüksek basınçlı soğutma) basıncın kullanıldığı testlerde 70 m/dak. kesme hızı, 0,4 mm/dev ilerleme oranı ve 3 mm kesme derinliği deney parametreleri olarak kullanılmıştır. Yüzey tornalama işleminin yapıldığı testlerde takım ömrü ve yüzey pürüzlülük değerleri deney sonuçları ile hesaplanmıştır. Geleneksel soğutmaya göre %50 oranında bir takım ömrü artışı kaydetmiştir. Kesme bölgesindeki sıcaklığı simülasyon yöntemiyle 800 °C olarak ölçmüştür. Yüzeyden 50 μm derinliğe kadarki mesafede oluşan kalıntı gerilmeyi ilerleme ve kesme yönünde x-ışını kırınım yöntemi ve simülasyon yöntemi ile belirlemiştir. İlerleme yönünde hesaplanan kalıntı gerilme deneysel olarak -300 MPa iken simülasyonda -200 MPa olmuştur. Kesme yönündeki kalıntı gerilme, deneysel olarak -200 MPa iken simülasyonda -350 MPa olarak ölçmüştür. Sonuç olarak yüksek basıncın takım aşınması ve kalıntı gerilme üzerinde olumlu etkilerinin olduğunu açıklayarak basma şeklinde çıkan kalıntı gerilmenin malzemede yorulma direncini arttırdığını ve çatlak ilerlemesinin önüne geçtiğini ifade etmiştir.

Braham vd. (2010), yapmış oldukları çalışmada X2CrNiMo22-5 dubleks paslanmaz çeliğini yüksek basınçlı jet soğutma (YBJS) ve geleneksel soğutma şartları altında

tornada işlemişlerdir. Deney sonuçları olarak takım aşınması, takım ömrü ve kalıntı gerilme yönünden soğutma yöntemlerini karşılaştırmışlardır. Deneylerde değişken kesme hızlarının yanı sıra 0,5mm kesme derinliği ve 0,15mm/dev ilerleme oranı sabit parametreler olarak belirlenmiştir. % 5 yağ katkılı soğutma sıvısı 50 barlık artışlarla 450 bar'a kadar farklı basınçlarla talaş-takım arayüzeyine enjekte etmişlerdir. Talaş sürekliliği konusunda 50 bar için elde edilen talaş boyu 100 mm kadar ölçülürken 250 bar basınçta bu değer 10 mm kadar olduğunu gözlemlemişlerdir. X-ışını kırınım yöntemiyle ölçülen yüzeydeki kalıntı gerilme değerlerinde farklı basınçlardaki soğutmanın geleneksel soğutmaya göre % 20 ile 40 arasında bir azalmaya sebep olduğunu açıklamışlardır. Hesaplanan takım ömrü değerlerinde 350 bar YBS için 19 dakika 45 saniye gibi bir süre elde edilirken geleneksel soğutmaya göre bu değer %130 daha fazla olduğunu açıklamışlardır.

Habak vd. (2011), işlenmesi zor olan 316L paslanmaz çeliğini yüksek basınçlı jet soğutma yardımıyla işlemişler ve bunun sonucunda malzemenin yüzey bütünlüğü oluşturan yüzey pürüzlüğü ve kalıntı gerilme hakkında bilgi sahibi olmuşlardır. Testlerde 0,1mm/dev ilerleme oranı ile 1mm kesme derinliği değerlerini sabit almışlardır. Kaplamasız karbür takımlarla yapılan deneylerde kesme hızı olarak 80, 150 m/dak. yüksek basınç değerlerini ise 200, 500 ve 800 bar olarak almışlardır. Aynı işlemleri kuru kesme şartları altında da tekrarlamışlar ve oluşan farklılıkları karşılaştırmışlardır. Sonuçlarda kuru kesmede daha uzun talaşlar elde edilirken yüksek basınçla birlikte kısa talaş boyları elde etmişlerdir. X-ışını kırınım yöntemiyle eksenel ve teğetsel yönde ölçülen kalıntı gerilme değerlerinde kesme hızıyla birlikte kalıntı gerilmenin arttığını gözlemlemişler. Bununla birlikte yüksek basınç şartlarında kuru kesmeye göre kalıntı gerilme değerinin azaldığını, dolayısıyla yüksek basınçlı jet soğutma yardımıyla işlemenin yüzey bütünlüğünün üzerinde olumlu etkiye sahip olduğunu ifade etmişlerdir.

Coz vd, (2011), yaptıkları çalışmada Inconel 718 malzemenin kuru ve geleneksel soğutma şartlarında, 4 µm kalınlıkta TiCN+Al₂O₃+TiN karbür kaplamalı takımlarla işlemişlerdir. 40, 60 ve 80 m/dak. kesme hızlarının kullanıldığı testlerde 6 metre kesme uzunluğunu hesaplamalarda referans alarak kalıntı gerilme ve kesme kuvveti değerlerini ölçerek elde ettikleri sonuçları sonlu elemanlar metodu ile karşılaştırmışlar. Kalıntı gerilme sonuçlarını 200 µm derinliğe kadar x-ışını kırınım

metodu kullanarak ölçmüşler ve 50 µm de bir yüzey fosforik ve sülfürik asit çözeltisi ile elektro-parlatma işlemi uygulayarak tabaka kaldırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlarda en yüksek çekme kalıntı gerilme değerinin kesme yönünde ve 1210MPa okumuşlardır. 20 µm derinlikte 500 MPa ve 80 µm de 410 MPa olarak okumuşlardır. 180 µm derinliğe kadar malzemenin etkilendiğini gözlemlemişlerdir. Her iki ölçüm sonucu için en yüksek kesme kuvvetinin kuru kesme şartlarında ve 550 ile 700 N aralığında kesme yönünde oluştuğunu ifade etmişlerdir. Sonuç olarak kuru kesmenin soğutma sıvısı yardımıyla kesme durumuna göre daha fazla kalıntı gerilme ve kesme kuvveti oluşturduğunu ifade ederek soğutma sıvısının sürtünmeyi azaltıcı ve sıcaklığı azaltma yönünde olumlu katkı sağladığını ifade etmişlerdir.

Outeiro vd. (2008), AISI 316L paslanmaz çeliğin tornalanmasının neden olduğu kalıntı gerilme durumlarını incelemişlerdir. Özellikle kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliği gibi kesme şartlarının etkisini ele almışlardır. Kalıntı gerilmeleri x-ışını ile ölçmüşler ve kalıntı gerilmeler üzerine kesme şartlarının etkisini kesme kuvvetlerinin deneysel olarak belirlenmesiyle analiz ederek sonuçta, kalıntı gerilmeler üzerine kesme kuvvetlerinin önemli bir role sahip olduğunu ifade etmişlerdir.

Sharman vd. (2006), sahip olduğu yüksek mukavemet ve ısıya dayanıklı olma özelliklerinden dolayı havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılan Inconel 718 süper alaşım malzemenin tornalanması sonucu oluşan kalıntı gerilme değişimi üzerine çalışma yapmışlardır. Kesme işlemi; 0,25 mm kesme derinliğinde geleneksel soğutma şartları altında kaplamasız ve TiCN/Al₂O₃/TiN kaplamalı takım ile iki farklı ilerleme oranı (0,15- 0,25mm/dev) ve üç farklı kesme hızında (40-80-120 m/dak,) gerçekleştirilmiştir. Testlerde kullanılan takımlar aşınmış ve yeni takımlar olarak testlere dahil edilmiş ve değişim gözlenmiştir. Elde ettikleri sonuçlarda aşınmış takıma ait kalıntı gerilme değeri daha yüksek çıkarken eksenel yöndeki gerilme durumu teğetsel yönden daha düşük çıkmıştır. Kesme hızının artmasıyla birlikte basma kalıntı gerilme değerlerinde önemli bir artış gözlemişlerdir. En fazla basma kalıntı gerilme değeri en düşük ilerleme oranı ve en yüksek kesme hızı değerlerinde aşınmış takımla yapılan testlerde ortaya çıkmıştır ve değeri yaklaşık olarak -1200 MPa dır. Ortaya çıkan çekme kalıntı gerilme değeri ise 300 MPa dır. Bu kalıntı gerilme durumu işparçasının yaklaşık 500 µm derinliğine kadar azalan bir değerle devam etmektedir. Yeni takımla yapılan aynı parametreye ait kalıntı gerilme

değerlerinde ± 200 MPa gerilme değeri ölçmüşlerdir ve bu değer 100 μm derinlikte son bulmaktadır. Sonuç olarak; yapılan çalışmada çalışma ortamında çok hassas yüzey bütünlüğüne sahip olması gereken bu malzemelerde aşınmış takımın yeni takıma göre yüzeyde daha fazla kalıntı gerilme oluşumuna sebep olduğunu ve bunun işleme şartlarını belirlemede etkili olduğunu ortaya koymuşlardır.

Özek vd. (2004), yapmış oldukları çalışmada, CNC torna tezgahında östenitik paslanmaz çeliğin işlenmesi esnasında oluşan takım-talaş ara yüzey sıcaklığını deneysel olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışmalar, kesme hızı, ilerleme hızı ve talaş derinliği gibi kesme parametrelerinin değişik değerlerinde yapılmıştır. Deneylerde iş parçası olarak AISI 304 östenitik paslanmaz çelik, kesici takım olarak P10 sert metal uç takım kullanmışlardır. Deneylerden elde edilen veriler yardımıyla regresyon analiz yöntemi kullanılarak takım-talaş ara yüzey sıcaklığının matematiksel modelini elde etmişlerdir. İki tip malzemeyi farklı kesme hızı ve ilerleme oranlarında işlemişlerdir. Sonuç olarak en yüksek kesme hızı ve ilerleme oranında en yüksek sıcaklığın oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Buna göre; takım ve iş parçası ara yüzeyinde oluşan kesme sıcaklığının takım aşınması, yüzey kalitesi ve talaş oluşum mekanizmasını kontrol eden önemli bir faktör olduğunu ifade etmişlerdir. Oluşan sıcaklığın kontrol altına alınması ve azaltılması işleminin üretim sürecindeki yerini ve önemini belirtmişlerdir.

Kamruzzaman vd. (2009), AISI 1060 çeliğini kaplamasız karbür uçlarla tornada işlemişlerdir. Yaptıkları bu çalışmada yüksek basınçlı soğutma sistemi ile işleminin kuru kesme şartlarındaki sıcaklık, kesme kuvveti, talaş geometrisi, takım aşınması, takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğü değerlerindeki değişimi araştırmışlardır. Kesme parametreleri olarak; 93-133-186-266 ve 193 m/dak kesme hızı, 0,1-0,14-0,18 ve 0,22 mm/dev ilerleme oranı ve 1,0-1,5 mm kesme derinliği değerlerini kullanmışlardır. Kuru kesme ile birlikte 80 bar yüksek basınçlı soğutma destekli kesme testleri yapılmıştır. Elde ettikleri sonuçlarda; en yüksek sıcaklığa en yüksek kesme hızı ve ilerleme oranında ulaşmışlardır. Bununla birlikte yüksek basınçlı soğutma yardımıyla kesmenin etkisiyle kuru kesmeye göre daha düşük sıcaklık oluştuğunu ifade etmişlerdir. İlerleme oranının ve kesme hızının en yüksek değerde seçildiği testlerde en düşük kesme kuvvetleri elde etmişlerdir. Bu değerlerde de yine yüksek basınç destekli soğutmanın kullanıldığı testlerde kuru kesmeye göre daha

düşük kesme kuvveti sonucu elde etmişlerdir. Takım ömrü ve takım aşınması sonuçlarının belirlenmesi için testlerde en yüksek sıcaklığa ve kesme kuvveti oluşumuna sebep olan parametreler seçilmiştir. Maksimum kenar aşınması değerini 0.3mm olarak belirlemişler ve bu değere göre yapılan testlerde yüksek basınç destekli soğutma ile işleme şartları için 67 dakika olan takım ömrü kuru kesmede 41 dakika olarak hesap edilmiştir. Sonuç olarak; yüksek basınçlı jet destekli soğutma sisteminin metallerin kesilmesinde çıktı faktörleri üzerinde olumlu etkilere sahip olduğunu ve kuru kesmeye göre daha verimli olduğunu ifade etmişlerdir.

Khoda vd. (2007), orta karbonlu bir çeliği kuru ve yüksek basınçlı soğutma (YBS) şartları altında torna tezgahında işlemişler ve takım-talaş arayüzeyinde oluşan sıcaklıkları işparçası içerisine gömdükleri termokupl ile belirlemişlerdir. Kalibrasyon işleminde ısı kaynağı ile termokupl arasındaki ısı transfer katsayısı ve oluşan ısıyı bir korelasyon yardımıyla hesaplamışlardır. Tungsten karbür takımlarla yapılan kesme işleminde ortaya çıkan deneysel sonuçları bir simülasyon programı (Nastran/Patran) yardımıyla karşılaştırmışlardır. İşleme parametreleri olarak dört farklı kesme hızı ve ilerleme oranı belirlemişler. Kesme derinliğini 1mm sabit değer olarak almışlardır. YBS basınç değerini 80 bar olarak testlerinde kullanmışlardır. Sonuç olarak; kuru ve YBS şartlarındaki kesme işleminde kesme hızı arttığında sıcaklığın arttığını ifade ederek deneysel sonuçlardaki değerleri %5 hata ile simülasyon sonuçlarında da gözlemlemişlerdir. Farklı kesme parametrelerinin bir arada değerlendirildiği durumlarda YBS destekli kesme işleminde takım-talaş arayüzünde oluşan sıcaklıkta kuru şartlardaki işlemeye göre % 20 ile %35 oranında azalma olduğunu ve talaş boylarında gözle görülür bir kısalma olduğunu ifade etmişlerdir. YBS sisteminin sıcaklığın düşürülmesi, takım-talaş temas mesafesinin azaltılması ve oluşan talaş boyunun üzerinde olumlu etkiye sahip olduğunu ortaya koymuşlardır.

Kaminski vd. (2000), çalışmalarında; yüksek ve ultra yüksek basınçlı jet destekli soğutma sisteminin tornalama işlemi sırasında sıcaklık, kesme kuvvetleri, talaş şekli ve yüzey pürüzlülüğü değişimini araştırmışlardır. Testlerinde SS2541-03 çelik işparçasını 1,2 mm uç yarıçaplı Al₂O₃ kaplamalı karbür takımlar kullanarak, üç farklı kesme hızında (150-225 ve 300 m/dak.), 0,3mm/dev, ilerleme oranında ve sabit 3mm kesme derinliğinde işlemişlerdir. Kesme anındaki sıcaklığın ölçülmesi için yeni bir yöntem olan ve kesici takımın yan yüzeyi üzerine 15 µm yalıtkan bir film

tabakası altına yerleştirilen termokupl tekniğiyle ölçülmüşlerdir. Altın ve platin gibi yüksek iletkenliğe sahip hatlar yardımıyla termokuplden alınan çok düşük voltajlar bir yükseltece gönderilip oradan da bilgisayar yazılımı vasıtasıyla sıcaklık değerlerine dönüştürülmüştür. Soğutma şartları için kuru, geleneksel ve sırasıyla 250, 500, 800, 1000, 2000 ve 3000 bar soğutma basınçları kullanmışlardır. Soğutma etkilerinin değerlendirilmesi için gömülü termokupllerle özel uçlar kullanmışlardır. Sonuçlar kenar sıcaklığında önemli bir azalma, %40-45 ile mümkün olduğunu açıklamışlardır. Bu aralık 400-3000 bar jet basınçları kullanılarak elde etmişlerdir. Takım- talaş ve işlenmiş malzeme arasındaki temas bölgesinde oluşturulan ısının işleme verimliliğini ve takım ömrünü belirlemede önemli bir faktör olduğunu ifade etmişlerdir. Geleneksel veya düşük basınçlı soğutma yöntemleri bölge nüfuz eder ve kesme bölümü içinde, termal ve mekanik sürtünme koşullarını değiştirmek için yeterince etkili olmadığını belirtmişlerdir.

Yaseen (2012), yapmış olduğu çalışmada metal kesme işleminde oluşan sıcaklık dağılımını 3-D sonlu elemanlar metodu kullanarak analiz etmiştir. Simülasyon şartları olarak Oxley deformasyon modeli ve Coulomb sürtünme modellerini kullanmıştır. Ortaya koyduğu sonuçlarda takım ve iş parçası malzemesinin özellikleri, kesme hızı, ilerleme ve eğim açısı gibi parametrelerin ısı ve sıcaklık üzerindeki etkilerini araştırmıştır. AISI 1045 çeliğinin işlenmesi esnasında kaplamasız karbür uçlar kullanmıştır. Ulaştığı sonuçlarda kesme hızının artması ile sıcaklık artarken eğim açısının artmasının kesme sıcaklığını düşürdüğünü ifade etmiştir. Kesme hızının 103,2 m/dak dan 250 m/dak ya yükseltilmesinde sıcaklığın % 21,9 oranında yükseldiğini ortaya koymuştur. Ayrıca ilerleme oranının 0,16 mm/dev den 0,25 mm/dev'e yükseltildiğinde sıcaklığın yaklaşık olarak %14 oranında arttığını ifade etmiştir.

Shet vd. (2003), yapmış oldukları çalışmada, AISI 4340 çeliğinin yüksek basınçlı soğutma sistemi ile tornalanması işlemini sonlu elemanlar metodu (ABAQUS) kullanarak incelemişlerdir. Simülasyonlarda üç farklı soğutma basıncı (200, 400, 600 bar) kullanmışlardır. Ne kadar uzun takım talaş mesafesi olursa o kadar sıcaklık ve kalıntı gerilme artışı olabileceği yaklaşımıyla takım-talaş arayüzüne üç farklı yerden soğutma basıncını enjekte etmişlerdir. Bu bölgelerin konumunu belirlerken işlenmemiş iş parçası yüzeyinden uzaklığı dikkate almışlardır. Bunlar sırasıyla; ilk

talaş oluşum noktası ve bu noktadan 0,2 mm ve 0,3mm uzaklıklar olarak belirlenmiştir. Takım-talaş arayüzündeki sürtünmeyi, Coulomb sürtünme yasası ile modellemişlerdir. Simülasyon sonuçlarından elde ettikleri veriler olarak; sıcaklık değişimi, kesme kuvveti değişimi, kalıntı gerilme değişimi ve kontak noktasının mesafesine bağlı olarak takım ömrü gibi sonuçlar olarak belirlemişlerdir. Hesaplamalar sonucunda ortaya çıkan sonuçları şöyle ifade etmişlerdir. Üç farklı basınç sırasıyla uygulandığında sıcaklıklarda %15, %16 ve %19 azalma olarak hesaplamışlardır. Bunun yanı sıra %16, %30 ve %34 oranlarında bir kesme kuvveti azalması gözlemlemişlerdir. Diğer bir sonuç olarak geleneksel soğutma (5 bar) şartlarında işleme ile, yüksek basınçlı soğutma (600 bar) ile işleme sonunda malzemede oluşan kalıntı gerilmede % 38 lik bir azalma olduğunu ortaya koymuşlardır.

Sekulic vd. (2013), Inconel 718 süper alaşım malzemenin yüksek basınç şartları altında TiAlN kaplamalı karbür takımlarla işleme performanslarını araştırmışlardır. Deneylerinde Taguchi deney tasarımından faydalanarak L27 tasarım modelini kullanmışlardır. Tornalama parametrelerinden üçer değişkenin kullanıldığı testlerde 500, 900 ve 1300 bar basınç değerleri soğutma basıncı parametrelerini oluşturmuştur. Deney sonuçlarında varyans analizi (Anova) yapılarak kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değerlerinin değişmesinde işleme parametrelerinin etkisini inceleyerek optimum kesme parametrelerini tespit etmeye çalışmışlardır. Çıkardıkları sonuçlarda kesme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığını ifade etmişlerdir. Yüzey pürüzlülüğü yönünden en etkili parametreyi ilerleme oranı olarak ifade etmişlerdir. Kesme kuvveti yönünden değerlendirdiklerinde basıncın kuvvet üzerindeki etkisinin ilerleme oranı kadar olmadığını savunmuşlardır. Genel sonuç olarak ortaya çıkarılan ifadede ilerleme oranının; kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünün değişimi üzerinde en önemli parametre olduğunu belirlemişlerdir.

Kurt (2006), hazırlamış olduğu doktora tezinde; talaş kaldırma sırasında oluşan kesme kuvvetlerinin deneysel olarak belirlenmesini, kesme kuvvetlerinin kesici takım üzerindeki etkilerinin sonlu elemanlar programı kullanarak analizini yapmıştır. Elde edilen bulgular ışığında esas kesme kuvveti ve kalıntı gerilmelerin matematiksel olarak modellenmesini yapmıştır. Deneylerinde Inconel 718 ve AISI 1117 çeliğini farklı kesme hızlarında farklı kaplamaya sahip takımlarla işlemiştir. Elde ettiği

sonuçlarda tüm kesme hızları için kesme derinliği ve ilerleme değerindeki artışa paralel olarak artan kesme kuvvetleri sebebiyle tüm gerilme bileşenlerinde de yükselmelerin olduğunu ifade etmiştir. Kesme deneyleriyle ölçülen kesme kuvvetleri ile simülasyon programı yardımıyla elde edilen gerilme bileşenleri arasında çok yakın ilişkiler olduğunu ve geliştirilen modellerin pratik uygulamalarda kullanılabileceğini ifade etmiştir.

Özel vd. (2012), çalışmalarında. Ti-6Al-4V ve Inconel 100 havacılık süper alaşımlarını kaplamasız ve TiAlN kaplamalı takımlarla yüzey tornalama işlemi gerçekleştirerek sonlu elemanlar simülasyonları ile karşılaştırmışlardır. Farklı uç yarıçaplarına ait takımlarla yapılan testlerden sonra X-ışını kırınım metodu kullanarak eksenel ve teğetsel yönde kalıntı gerilmeleri hesaplamışlardır. Elde ettikleri sonuçlarda takım uç yarıçapının ve kaplamanın kalıntı gerilme üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Deneylerinde 90 ve 55 m/dak kesme hızı, 0,1mm/dev ilerleme oranı, 2 mm kesme derinliği değerlerini kullanmışlardır. Deneysel ve sonlu elemanlar metodu ile buldukları sonuçlarda takım kaplama özelliğinin kalıntı gerilme üzerinde bir etkisinin olmadığını ifade etmişlerdir. Ti64 malzeme için yüzeyden 80 µm derinlikte -100 MPa (eksenel ve teğetsel) kalıntı gerilme değeri ölçülmüş ve bu sonucun her iki ölçüm yönteminde de yaklaşık değerde olduğunu ifade etmişlerdir. Aynı derinlikte In100 malzeme için teğetsel yönde ölçülen kalıntı gerilme durumunda -250 ile -400 MPa arasında değişen kalıntı gerilme değerleri hesaplanmıştır. Her iki yönde ölçülen kalıntı gerilme değerlerinde takım uç yarıçapının artmasıyla birlikte gerilme değerinin de arttığını ortaya koymuşlardır. Sonuç olarak çalışmalarında bu malzemelerin yorulma ömrünü ve yüzey özelliklerini tahmin etmede büyük avantaj elde ettiklerini ifade etmişlerdir.

Zhang (1999), geometrik ayrılma kriterlerini geliştirmiştir. Geometrik ayrılma kriterleri takım-iş parçası arayüzünün nümerik modellemesinde önemli bir parametre olduğunu ifade ederek gerilme oranını ve sıcaklığı metal kesmede gerçek davranışını yansıtmak için kullanmışlardır. Çalışmada değişik ortogonal kesme simülasyonları yapmış ve deneysel sonuçlar ile uygulama modelinin uygunluğunu vurgulamıştır.

Abboud vd. (2013), Havacılık sektöründe önemli bir kullanım alanına sahip Ti-6Al-4V malzemeyi tornada işlemişlerdir. İki farklı kesme hızı; 20 ve 90 m/dak, iki farklı

ilerleme oranı; 0,05- 0,25mm/dev ve 2,5mm kesme derinliği değerlerini işleme parametreleri olarak seçmişlerdir. 10 µm ve 60 µm uç yarıçapına sahip kaplamasız karbür takımlarla yapılan deneylerde yüzeyden X-ışını kırınım metodu kullanarak kalıntı gerilme ölçümü yapmışlardır. Kesme esnasında oluşan sıcaklık değişimini belirlemek için termal kamera ile ortaya çıkan sıcaklığı kayıt altına almışlardır. Elde ettikleri kalıntı gerilme sonuçlarını sonlu elemanlar programı (Deform 3D) kullanarak simüle etmişler ve deneysel bulgularla karşılaştırma yapmışlardır. Sonuç olarak; kesme hızı ve ilerleme oranı arttığında kalıntı gerilmenin arttığını ifade ederek deneysel sonuçların simülasyondan %20 daha fazla çıktığını belirtmişlerdir. Kesici takımın uç yarıçapının büyük seçilmesi durumunda kalıntı gerilmede %30 oranında bir düşme olduğunu ifade etmişlerdir. Bu kesme parametrelerinde oluşan sıcaklık termal kamera ile 380-450°C olarak ölçülmüştür. Simülasyonla elde edilen sıcaklık değerinde kesici takımın uç yarıçapının artmasıyla sıcaklığın arttığını ve oluşan talaşın daha kıvrımlı olduğunu ortaya koymuşlardır. İfadelerinde; kalıntı gerilmenin artmasında kesme hızının ve ilerleme oranının takım ucu yarıçapına göre daha fazla etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Hadzley vd. (2012), yapmış oldukları çalışmada sonlu elemanlar metodu kullanarak Ti-6Al-4V süper alaşım malzemeyi geleneksel ve yüksek basınçla soğutma (YBS) şartlarında simüle etmişlerdir. Soğutma basıncı olarak 5, 70, 110, 150 ve 203 bar değerlerini kullanmışlardır. Çalışmalarında takım-talaş ara yüzeyindeki sıcaklıklar, oluşan kesme kuvvetleri ve basıncın talaş oluşumu üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Elde ettikleri simülasyon sonuçlarını deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Talaş geometrilerini deneysel sonuçlarla kıyasladıklarında birbirini doğrular sonuçlar elde etmişlerdir. Oluşan kesme kuvvetleri geleneksel ve YBS şartları altında karşılaştırıldığında; geleneksel soğutmada 260 N gibi bir kesme kuvveti elde edilirken YBS şartlarında bu değer 180 N 'a kadar düşmüş ve deneysel ile simülasyon sonuçları birbirini doğrulamıştır. Kesme anında ortaya çıkan sıcaklığın karşılaştırılmasını yaptıklarında geleneksel soğutma durumunda yaklaşık olarak 888°C bir sıcaklığa ulaşılırken YBS şartlarında bu değer 477°C gibi bir değere kadar düştüğünü gözlemlemişlerdir. Bu durumda yaklaşık olarak % 38 lik bir soğutma verimliliği kazandırıldığını ortaya koymuşlardır.

Courbon vd. (2009), yapmış oldukları çalışmada Inconel 718 süper alaşım malzemeyi TiAlN kaplamalı karbür takım kullanarak tornalama işlemi

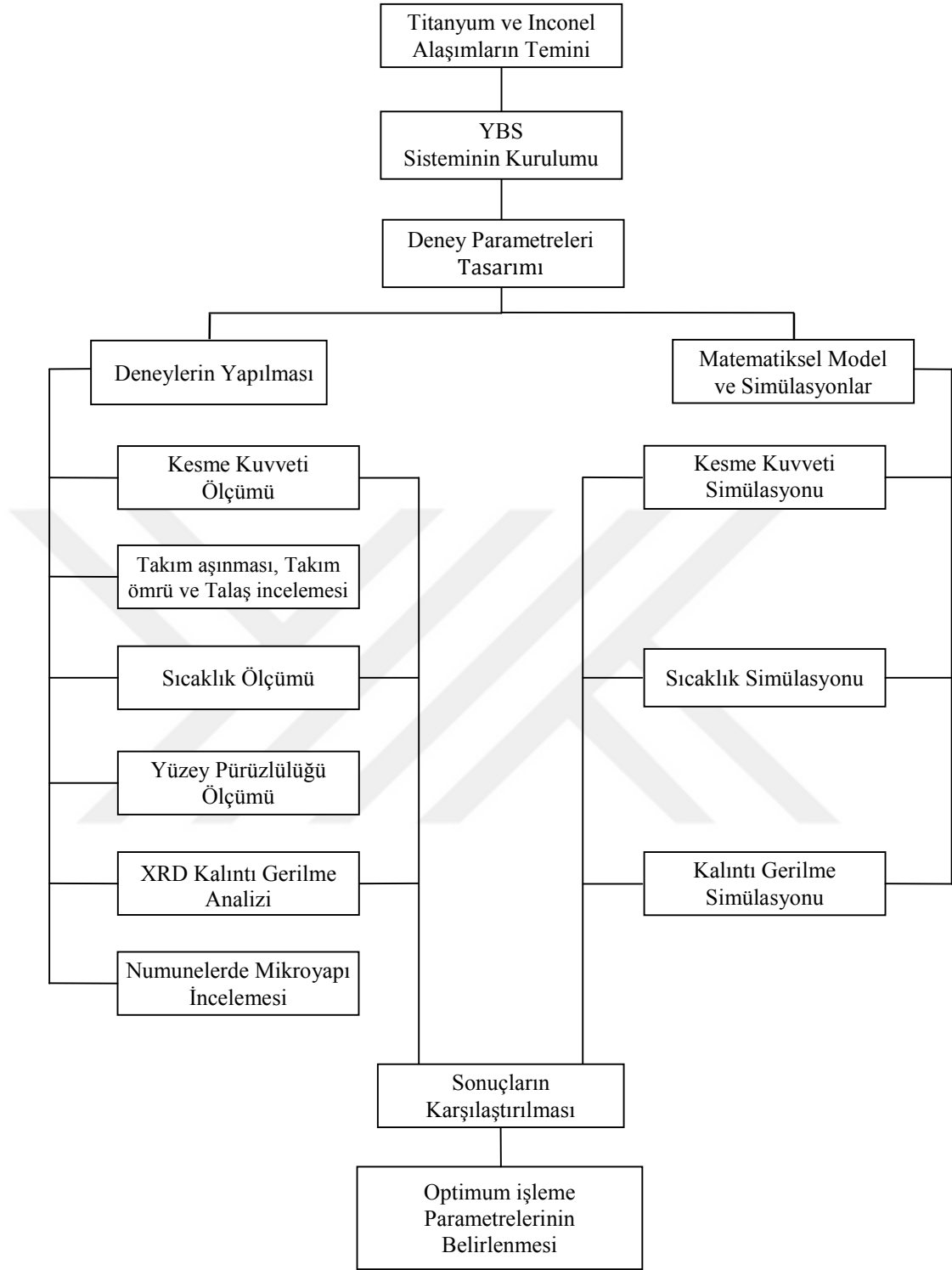
gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları bu testlerde her kesme faktöründen üçer adet farklı parametreler kullanarak deneyler yapmışlardır. Kullandıkları bu parametreler; 50-90 ve 130 bar soğutma basıncı, 46, 57 ve 74 m/dak kesme hızı, 0,2- 0,25- 0,224 mm/dev ilerleme oranı ve son olarak ta 1-1,5-3 mm kesme derinliği kullanmıştır. Tüm bu değerleri yüzey yanıt metodu kullanarak deney tasarımı yapmışlardır. Anova varyans analizi kullanarak kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü ve takım sıcaklıklarını bir çıktı olarak belirlemişlerdir. İşleme anında oluşan sıcaklığı tespit etmek için takımın içine termokupl yerleştirmişlerdir. Sonuç olarak soğutma basıncının artmasıyla kesme kuvvetlerinde bir azalma olduğunu açık bir şekilde ifade etmişlerdir. Benzer olarak, ilerleme miktarının düşmesiyle kesme kuvvetindeki düşüşü grafiklerden elde etmişlerdir. Soğutma basıncının artmasıyla birlikte takım üzerinde okunan sıcaklıkta azalma olduğunu ayrıca takım-talaş temas uzunluğunda hızlı bir azalmanın olduğunu da deneyler sonucunda ortaya koymuşlardır.

Yüksek basınçlı soğutma şartları altında Ti-6Al-4V ve Inconel 718 havacılık malzemelerinin aynı ortak parametreler dikkate alınarak işlenmesi sonucunda yüzey bütünlüğünün doneleri ile kesme kuvveti, sıcaklık değişimi, talaş morfolojisi, mikroyapı analizleri ve takım ömrü gibi çıktıların tümünün elde edildiği bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bununla birlikte elde edilen sonuçların sonluelemanlar modeli ile de değerlendirilmesi, deney tasarımı ve varyans analizleri ile sonuçların optimum değerlerle olan ilişkilerinin ortaya koyulması yönünden de bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Ayrıca kesme parametrelerinin belirlenmesinde çekiç deneyi ile tezgah-takım tutucu dinamiği belirlenerek tezgaha ait rezonans ve titreşim aralıkları tespit edilmiştir. Hem literatür hem de çekiç testi sonucunda belirlenen çok fazla sayıdaki kesme parametre değişkenleri arasından uygun aralık ve sayıda kesme parametreleri belirlenerek AISI 4140 çeliği ile ön deneyler yapılmıştır, bunun sonucunda deney parametreleri ve sayıları tespit edilmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Yapılan bu tez çalışmasında, Ti-6Al-4V ve Inconel 718 süper alaşım havacılık malzemelerinin geleneksel ve yüksek basınçlı jet soğutma desteği altında CNC torna işleme merkezinde kesme işlemi gerçekleştirilmiştir. Deneylerde jet nozullu takım tutucularla PVD [TiN+Al₂O₃+Ti(C,N)] kaplamalı takımlar kullanılmıştır. Deney parametrelerinin tasarımı; Taguchi tasarım ve optimizasyon programıyla belirlenmiştir. Yapılan ön deneyler ve deney tasarımı sonucunda kesme derinliği sabit tutularak kesme hızı, ilerleme oranı ve soğutma basıncı parametrelerinin üç farklı değerinin kullanılmasına karar verilmiştir. Her parametrenin işlenmesi sonrasında numune yüzeyinden pürüzlülük değeri, takımdaki aşınma miktarı ve talaş oluşumları değerlendirmeye tabii tutulmuştur. Sıcaklık ölçümü için kesici uçta kesme bölgesinin hemen altına 1 mm çapında termokupl yerleştirilerek oluşan sıcaklık eşzamanlı olarak ölçülmüştür. Yine her bir parametre sonunda işlenen malzemeden numuneler alınarak mikroyapı analizi ve X-ışını kırınım tekniğiyle kalıntı gerilme analizi yapılmıştır. Aynı işleme parametrelerinde bir sonlu elemanlar programı (Deform 3D) yardımıyla simülasyonlar yapılmıştır. Daha sonra elde edilen her iki sonuç karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlardan faydalanılarak optimum kesme parametrelerin belirlenmesi için Regresyon ve Anova analizleri yapılmıştır.

Çalışmaların yürütülmesinde izlenen yol belli bir sistem çerçevesinde planlanmıştır. Şekil 3.1’de verilen bu sistematik yapı, çalışma başlangıcında iki farklı havacılık malzemesinin Yüksek basınçlı jet soğutma desteğiyle işlenmesinde elde edilen bilimsel verilerin aynı parametreler kullanılarak bir sonlu elemanlar programıyla simüle edilerek karşılaştırılması ve bunun sonucunda, numune, takım ve talaşların SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) görüntülerinin değerlendirilmesinden en uygun işleme parametrelerinin ortaya koyulmasına kadar ki izlenen yolları aşamalı olarak göstermektedir.



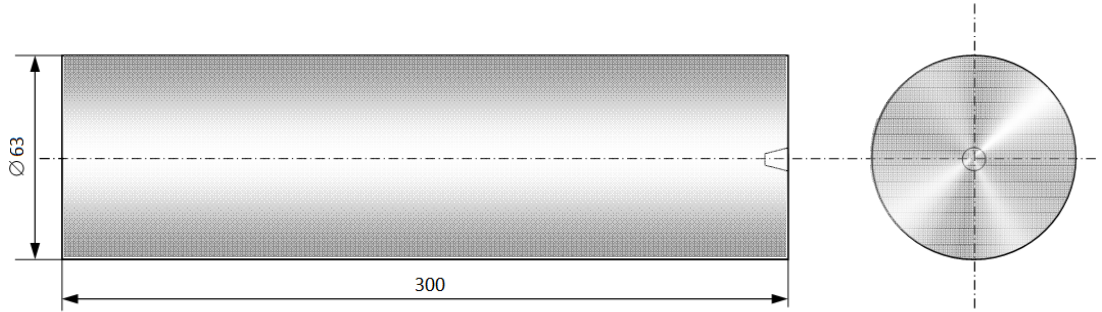
Şekil 3.1. Çalışmada izlenen yolun sistematik akış şeması

3.1. Materyal

Deneysel çalışmalarda kullanılan takım ve malzemeler, cihaz ve sistemler ile iş parçası malzemesinin kimyasal bileşimi, boyutları, mekanik özellikleri bu bölümde ele alınmıştır. Kullanılan tezgah ve sistemlere ait bilgiler detaylı olarak verilmiştir. Ayrıca deneylerde süper alaşımların tornalanmasında kullanılan kesici uçlar, uçların bağlandığı takım tutucu, kuvvet sinyallerinin ölçümü için dinamometre, sıcaklık ölçümü ve kalıntı gerilme analizinde kullanılan X-ışını kırınım cihazının tanıtımı da verilmiştir. Deneylerde işlenmiş yüzeylerin yüzey pürüzlülük değerlerinin belirlenmesinde, takım aşınması ve talaş geometrisinin analizinde kullanılan taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazının özellikleri bu bölümde verilmiştir.

3.1.1. Deney malzemesi ve özellikleri

Deneylerde havacılıkta malzemesi olarak sıklıkla tercih edilen Nikel esaslı Inconel 718 ve Titanyum esaslı Ti-6Al-4V alaşımlar kullanılmıştır. Bu malzemelerin boyutları Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Bu malzemelere ait kimyasal ve mekanik özellikler sırasıyla Çizelge 3.1, 3.2, 3.3 ve 3.4’te verilmiştir.



Şekil 3.2. Deneylerde kullanılan iş parçalarına ait boyutlar.

Çizelge 3.1. Inconel 718'in kimyasal bileşimi (%)

Ni	Cr	Co	Mo	Cu	Nb	Al	Ti	Mn	Si	C	B	P	S	Fe
50-55	17-21	1 maks	2.8-3.3	0.3 maks	4.75-5.50	0.2-0.8	0.65-1.15	0.35 maks	0.35 maks	0.08 maks	0.006 maks	0.015 maks	0.015 maks	Denge

Çizelge 3.2. Inconel 718'in mekanik özellikleri

Çekme dayanımı (MPa)	Akma dayanımı (MPa)	Elastik modül (GPa)	Sertlik HRc	Yoğunluk (g/cm ³)	Ergime sıcaklığı (°C)	Isıl iletkenlik (W/mK)
1310	1110	206	52	8.19	1300	11.2

Çizelge 3.3. Ti-6Al-4V'nin kimyasal bileşimi (%)

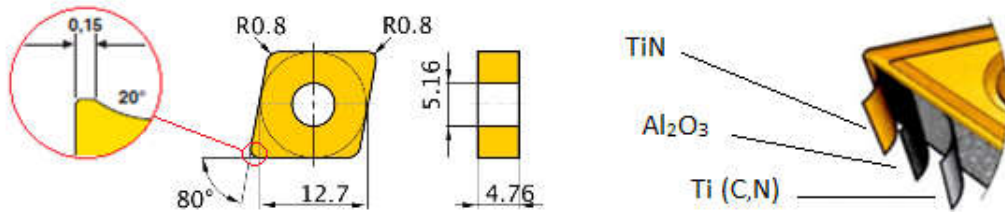
N	C	H	Fe	O	Al	V	Ti
0.05 maks.	0.08 maks.	0.015 maks.	0.40 maks.	0.20 maks.	6.75 maks.	4.5 maks.	Diğer

Çizelge 3.4. Ti-6Al-4V'nin mekanik özellikleri

Çekme dayanımı (MPa)	Akma dayanımı (MPa)	Elastik modül (GPa)	Sertlik HRc	Yoğunluk (g/cm ³)	Ergime sıcaklığı (°C)	Isıl iletkenlik (W/mK)
896	827	115	36	4.46	1650	6.6

3.1.2. Kesici takım ve takım tutucu

Kesici uç olarak Seco firmasının ISO Kodu CNMG120408 CP250 PVD (TiN,Al₂O₃,TiCN) kaplamalı takımları kullanılmıştır. Kesici uç'a ait geometrik boyutlar Şekil 3.3. ve Çizelge 3.5'te verilmiştir.



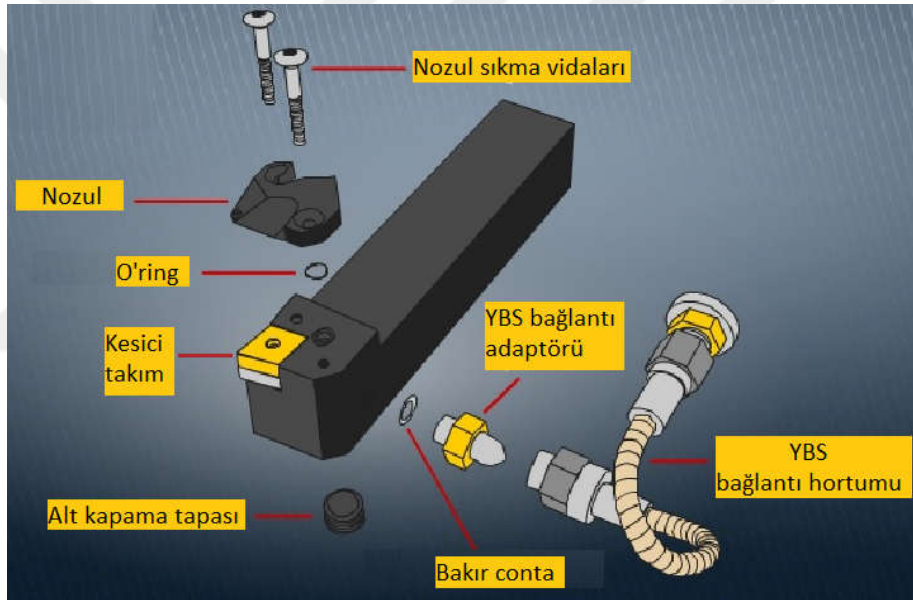
Şekil 3.3. Deneylerde kullanılan kesici uç.

TS2500 standardı CP250 sınıfı PVD [TiN,Al₂O₃,TiCN] kaplamalı takımlar özellikle inconel, titanyum gibi türbin fan disklerinin işlenmesinde kullanılan kaplamalı takımlardır. Takım kaplamaları yenilikçi bir kaplama teknolojisi olan orta sıcaklıkta yapılan kimyasal buhar banyosunda kontrollü atmosfer ortamında karbür alt tabaka üzerine Ti(C,N) ve onun üzerine Al₂O₃ malzemelerin atomik boyutta kaplanması ile üretilmiştir.

Çizelge 3.5. Deneylerde kullanılan kesici uca ait geometrik boyutlar.

Gösterim (ISO)	Sınıf	D	L	S	r
CNMG 120408-MR4 TS 2500	CP250	12,7	12,9	4,76	0,8

Tornalama testlerinde takım tutucu olarak SECO firması tarafından yüksek basınçlı soğutma sistemleri için geliştirilen özel tasarım SECO PCLNL2525M12JET kodlu “Jet Stream” (nozullu) takım tutucu kullanılmıştır. Jet Stream™ sistemindeki takım tutucunun tercih edilme sebebi 350 bar’daki maksimum çalışma basıncına cevap verebilecek özellikte olmasıdır. Nozullu takım tutucu sisteminin yapısı Şekil 3.4.’de verilmiştir.



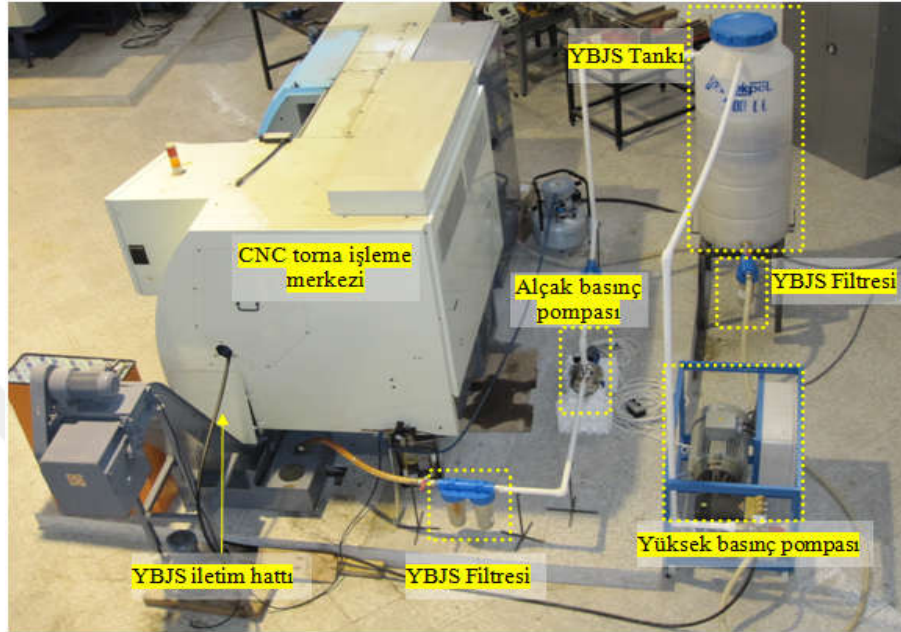
Şekil 3.4. Deneylerde kullanılan SECO Jet stream takım tutucu (Secotools, 2015).

Çizelge 3.6. Yüksek basınç nozulu hakkında bilgiler.

Nozul Sayısı	Nozul Çapı	Maksimum Ulaşılabilen Basınç	Maksimum Ulaşılabilen Soğutma Suyu Debisi
1	1,6 mm	350 Bar	21 lt/dak

3.1.3. Yüksek basınçlı soğutma (YBS) sistemi

Şekil 3.5'te gösterilen deneysel çalışmalarda kullanılan modüler yapıda tasarlanmış yüksek basınç soğutma sistemi gösterilmektedir. Soğutma sisteminin teknik özellikleri ise çizelge 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.5. Yüksek Basınç Soğutma sisteminin yapısı

Çizelge 3.7. Yüksek basınçlı soğutma sisteminin elemanları ve teknik özellikleri

YBJS Ekipmanın Adı	Teknik Özelliği
Soğutma Suyu Tankı	300 Litre kapasiteli, 150 cm yükseklikte 75 cm çapında plastik tank
Filtreler	2 Adet Alçak basınç pompası çelik filtre 20 mikron giriş filtresi 1 adet Alçak basınç pompası çelik filtre 20 mikron çıkış filtresi 1 Adet Yüksek Basınç Pompası çelik filtre 10 mikron giriş filtresi
Alçak Basınç Pompası	Max 5 bar basınçlı, çelik paslanmaz gövdeli, 220 V elektrik bağlantılı soğutma suyu geri dönüş pompası
Yüksek Basınç Pompası	Max 350 Bar basınçlı, Max 21 lt/dak debili, Pistonlu çelik gövdeli, 15 HP 380 V 3 faz elektrik bağlantı kumandalı
Yüksek Basınç Hortumu	Max 500 bar'a dayanabilen 16mm çaplı kauçuk esnek yüksek basınç hortumu

3.1.4. Soğutma sıvısı

Tez çalışmanın temelini oluşturan soğutma sıvısının basınçlı olarak kesme bölgesine nüfuz ettirilmesi durumu soğutma yağının seçilmesini de önemli kılmaktadır. Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere özel bitkisel içerikli yarı sentetik çevreye zararsız bir soğutma sıvısı tercih edilmiştir. Tercih edilen soğutma sıvısı Blaser Swisslube firmasına ait B-Cool 655 tipi soğutma sıvısıdır. Bu soğutma sıvısının özelliği yüksek basınç pompasına giren soğutma sıvısı pistonlardaki sürtünmeden dolayı oluşan 50°C sıcaklığa rağmen kararlılığını koruması ve emisyonunda ve viskozitesinde özelliğini yitirmemesidir. Çevrede ve insan sağlığında tahribata sebep olmadan kolayca kullanılabilme özelliği ile Blaser B-cool 655 su ile karışabilen yarı ve tam sentetik metal işleme sıvılarındanndır. Sahip olduğu yüksek emülsiyon dayanıklılığı, mükemmel yıkama ve sızma yeteneği ile özellikle sert alaşımlarda yüksek korozyon koruması sağlar (Blaser, 2015). Döküm, titanyum, paslanmaz çelik ve çelik alaşımlarında hafif ya da ağır talaş kaldırma ve kısmen taşlama operasyonları için sıklıkla tercih edilen bir soğutma yağıdır. Yüksek basınçlı soğutma sisteminde kullanılan bor yağı katkılı soğutma sıvısı için literatürden edinilen bilgiler dahilinde uygulamalarda %5-7 oranında yağ-su karışımı kullanıldığı dikkate alınarak %6 oranında karışım hazırlanmıştır.

3.1.5. CNC torna ve özellikleri

Çizelge 3.8’de SDÜ, Cad/Cam Araştırma Merkezinde bulunan ve işleme deneylerinin yapıldığı ANL-75T CNC torna tezgahına ait teknik özellikler verilmiştir.

Çizelge 3.8. ANL-75T CNC Torna tezgahının özellikleri

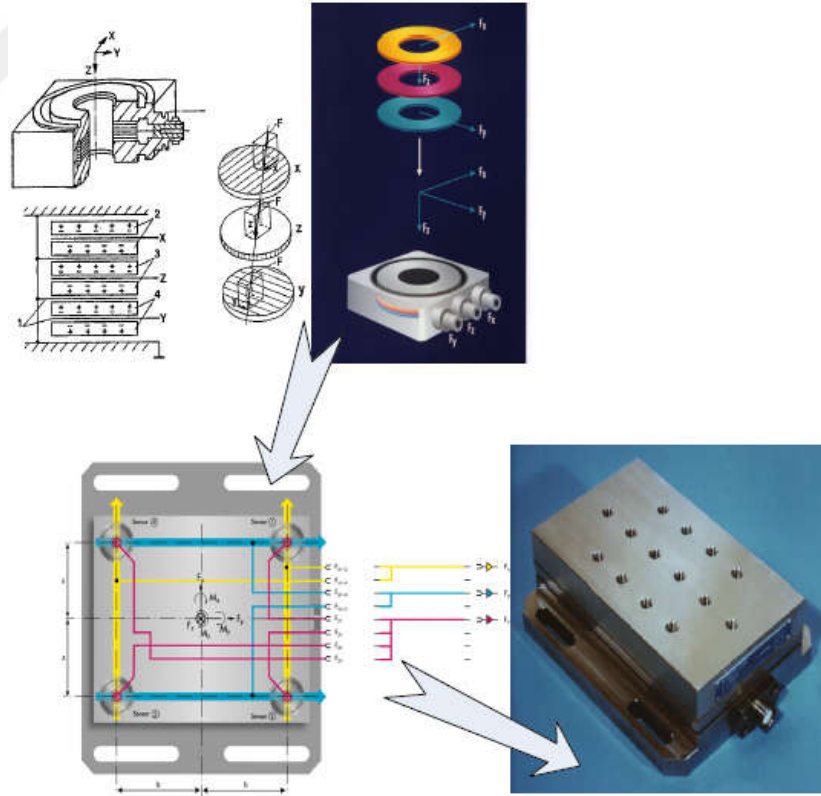
X eksen	350 mm
Z eksen	520 mm
Tezgah Gücü	15 kW
Devir sayısı (maks.)	4000 dev/dak
Hidrolik ayna çapı	250 mm
Hassasiyet	1 µm
Taretteki istasyon sayısı	12

3.1.6. Üç eksenli dinamometre

Deneylerde kesme kuvveti sinyallerinin ölçümünde dinamometre, sinyal düzenleyici, veri toplama kartı, sinyal yükseltici ve ara bağlantı kabloları kullanılmıştır. Yazılım olarak Cut-Pro programından faydalanılmıştır.

Kesme kuvveti sinyallerinin analizi, talaşlı imalatta, kesme şartlarının izlenmesinde en çok tercih edilen bir yöntemdir. Çok farklı tipteki dinamometreler farklı pozisyonlarda takım tezgahlarına monte edilerek kesme anında oluşan kesme kuvvetlerini ve momentlerini ölçmektedirler. Dinamometreler, torna tezgahlarında kesici takım tutucu mekanizmasına, freze ve matkaplarda iş parçasının bağlandığı tablaya veya iş mili yataklarına monte edilmektedirler.

Piezoelektrik eyleyicili dinamometrenin üç eksende kesme kuvvetini ölçme durumu Şekil 3.6'da şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Üç eksenli dinamometrenin yapısı, (Çolak, 2006).

3.1.7. Amplifikatör

Deneylerde Cad/Cam merkezi envanterinde bulunan kesme kuvveti sinyallerinin etkili bir şekilde kaydedilmesini sağlayan sinyal yükselteci KISTLER 5070A11100 tipi amplifikatör kullanılmıştır

3.1.8. Veri toplama kartı

Dinamometreden gelen kesme kuvveti sinyalleri sinyal düzenleyiciden geçtikten sonra National Instrument DAQ 6062E tipi veri toplama kartı ile bilgisayara aktarılması amacıyla Veri toplama Kartı kullanılmıştır.

Kartın özellikleri:

- 16 bit analog sinyali 1.25MS/s veri girişi için kullanabilme
- Analog çıkış, 8 dijital giriş/çıkış kanalı
- 24 adet bit sayıcı
- 70'den fazla sinyal izleyebilme imkanı

3.1.9. Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı

Deneylerde farklı kesme parametrelerinden elde edilen yüzey pürüzlülüğünün belirlenmesinde 0,01 μm hassasiyette ölçüm yapabilen, elmas uçlu HommelWerke firmasının T 500 yüzey pürüzlülük test cihazı kullanılmıştır. Ölçüm ayarları şu şekilde seçilmiştir.

Örnekleme uzunluğu (L) = 0,8 mm

Ölçme uzunluğu (Lm) = 5 x Lc = 5 x 0,8 = 4 mm

Toplam uzunluk (Lt) = 4,8 mm

Kesme işleminden sonra yüzey pürüzlülük değerinin ölçülmesinde silindirik iş parçası üzerinden 3 ayrı bölgeden pürüzlülük ölçümü okunarak elde edilen değerlerin ortalaması alınmış ve nihai yüzey pürüzlülüğü değeri elde edilmiştir.

3.1.10. Sıcaklık ölçümü

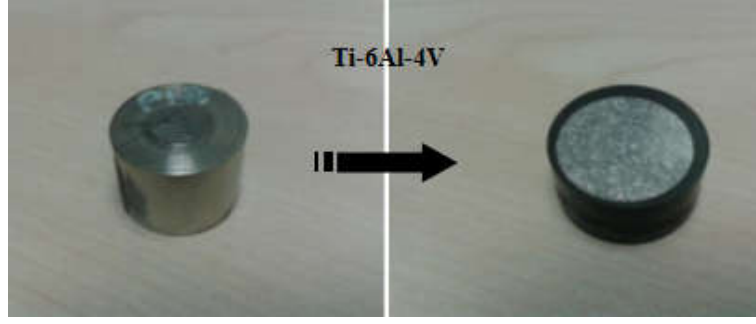
Talaş kaldırma işlemlerinde kesme bölgesindeki sıcaklığı işleme anı ile eşzamanlı olarak ölçmek için K tipi 1 mm çapında 200 °C ile +1250 °C arası ölçüm yapabilen hassas termokupl kullanılmıştır. Termal kamera sisteminden sonra en çok tercih edilen yöntem olan takım içine yerleştirilen termokupl ile ölçüm yöntemi; işleme anındaki sıcaklığın tespiti için kullanılmıştır. Yüksek basınçlı soğutmanın bir sonucu olarak ortamda atomize olarak bir buhar tabakası oluşturarak termal kamera sisteminin verimli ölçüm almasını engellemiştir. Dolayısıyla testlerde takım içerisine termokupl yerleştirilmesi ile sıcaklık ölçümü alınmıştır.

3.1.11. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

Takım aşınma miktarı, talaş geometrisi ve numunelerin derinlik mikroyapı analizi incelemelerinde Tescan firmasının ürünü olan 4x den 1.000.000x'e kadar büyütme aralığına sahip, Vega\\LSU SEM cihazı kullanılmıştır. Yapılan çalışmada, elde edilen aşınmanın ne tür çentiklenmeye benzediğini belirlemek için aşınma uzunluğu ve aşınma derinliği değerleri ölçülmüştür. Uzunluk ve derinlik değerlerinin tek aşamada ölçülebilmesi için uçlar 45° döndürüp krater ve yan kenar aşınma değerleri de gözlenmiştir. Ayrıca talaşta oluşan tabakaları ve kesit profil geometrisinin tayini için tabla 30°lik açılarla hareket ettirilmiştir.

3.1.12. Numunelerin hazırlanması

İşleme testlerinden sonra malzemelerin mikroyapı derinlik analizleri için kesit alma ve bakalite gömme işlemleri yapılmıştır. Bunun için Struers Secotom hassas kesme cihazı kullanılmıştır. Daha sonra kesilen numuneler Struers CitoPress cihazı ile bakalit tozuna gömülmüştür. SiC zımpara kağıdı ile 5 aşamalı zımparalama (240-400-600-1000) ve elmas parlatma solüsyonları ile 3 aşamalı parlatma (3µ-1µ ve NT(1µ-altı parlatma için)) basamakları takip edilerek numune yüzeyi mikroyapı derinlik analizi yapılması için taramalı elektron mikroskobuna hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.7 ve Şekil 3.8).



Şekil 3.7. Ti-6Al-4V malzemenin bakalite alınması.



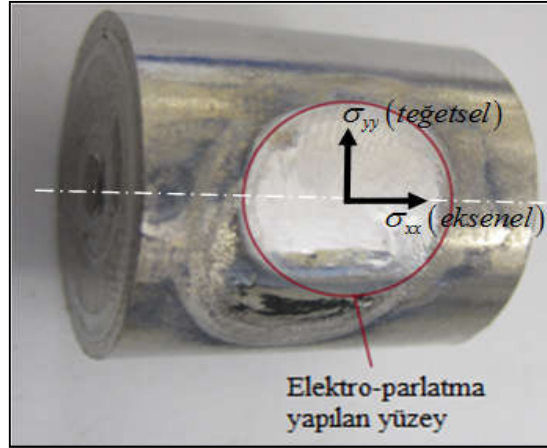
Şekil 3.8. Inconel 718 malzemenin bakalite alınması.

3.1.13. Elektro-parlatma cihazı

Kalıntı gerilmenin ölçümü esnasında X-ışınları işparçası yüzeyinden 5 μm kadar derinliğe nüfuz edebilir, daha derinlerdeki kalıntı gerilmenin tayini ancak elektro-parlatma işlemi yardımıyla tabaka kaldırarak yapılabilir. Derinlik profili elde etmek için Struer Lectropol elektro-kimyasal parlatma cihazı kullanılmıştır.

Testlerde iki farklı deney malzemesi kullanıldığı için bu malzemelerin alaşım farklılıklarına göre dağlayıcı seçimi yapmak gerekmektedir. Aynı alaşımlar göz önüne alınarak literatürde kullanılan çözeltiler tercih edilmiştir. Ti-6Al-4V alaşım için Kroll dağlayıcısı (6%- Nitrik asit, 2%-Hidroflorik asit, 92%-Saf Su), Inconel 718 için (8%- Butoksietanol, 7%-Saf su, 60%-Etanol, 25%-Perklorik asit) dağlayıcılar kullanılmıştır. Yapılan araştırmalarda numuneden 15 μm tabaka kaldırmak için parlatma gerilimi 12 V, parlatma süresi 20s olarak belirlenmiştir. Bu parametreler kullanılarak 10 adımda toplam 150 μm derinliğe inilmiştir. Her 15 μm 'lık parlatma adımı sonrasında mevcut yüzeyden eksenel ve teğetsel yönlerde kalıntı gerilme

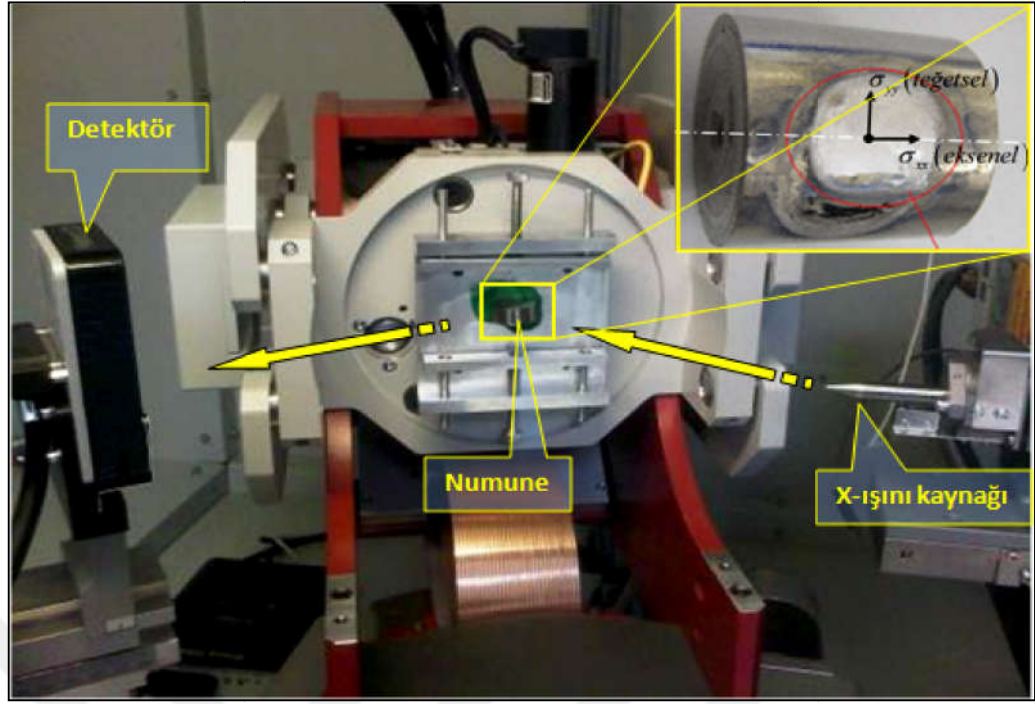
değeri hesaplanmıştır. Bu işlem toplamda on defa tekrar edilmiştir. Elektro-parlatma cihazıyla numune üzerinde yapılan parlatma işlemi Şekil 3.9’da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Numunedeki elektro-parlatma işlemi ve kalıntı gerilme ölçüm yönleri.

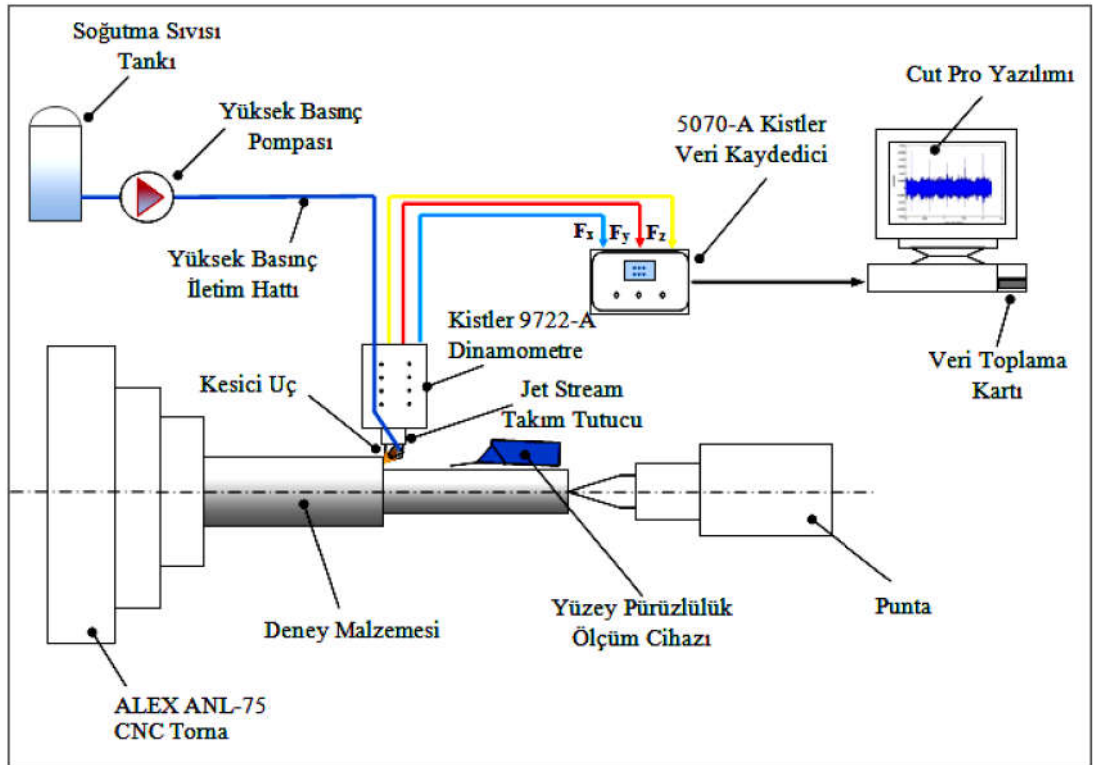
3.1.14. X-ışını kırınım cihazı (XRD)

Kalıntı gerilme analizi için Atılım Üniversitesi, Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezi bünyesinde bulunan GE–Seifert 3003 PTS model X-ışını kırınım (XRD) cihazı kullanılmıştır. Şekil 3.10’da bir X-ışını kırınım cihazının temel yapısı ve bileşenleri görülmektedir. Döner bir tabla üzerine sabitlenen numune, açısal hareket yapan ışın kaynağı ile detektör arasına konumlandırılmıştır. Temel prensip olarak kaynaktan gelen ışın huzmesi işparçası yüzeyine çarparak detektörde toplanmaktadır.



Şekil 3.10. Kalıntı gerilme analizinde kullanılan GE–Seifert 3003 XRD cihazı

Yukarıda bahsedilen cihaz ve materyallere ait sistem üzerindeki görünümü Şekil 3.11’de şematik olarak verilmiştir.



Şekil 3.11. Deney düzeneğinin şematik görünümü.

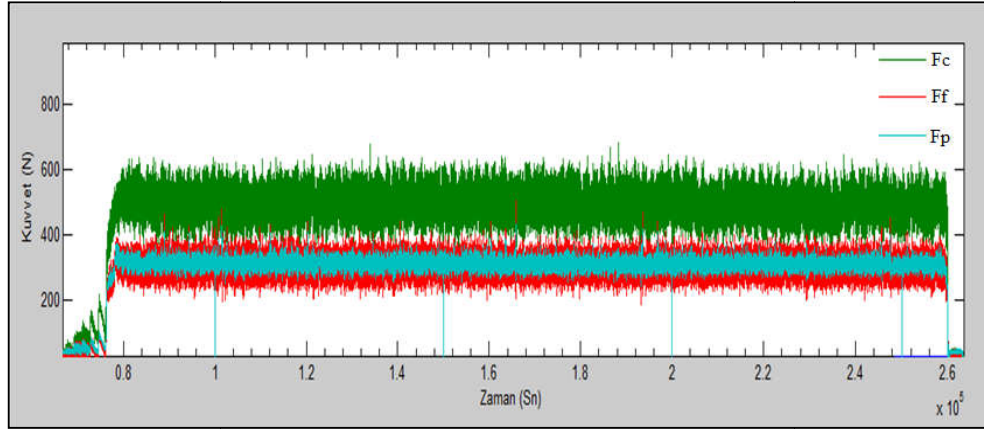
3.2. Yöntem

3.2.1. Deney çalışmalarına hazırlık

Gerçek deneylere başlamadan önce sistemin çalışmasını kontrol etmek ve kesme parametrelerini belirlemek amacıyla AISI 4140 (42CrMo4) ıslah çeliği ile bir takım ön deneyler yapılmıştır. Ön deney yapmada amaç, deney çalışmaları sırasında karşılaşılabilecek muhtemel olan sıkıntıları önceden belirlemek ve oluşabilecek problemlere çözüm üretmek olmuştur.

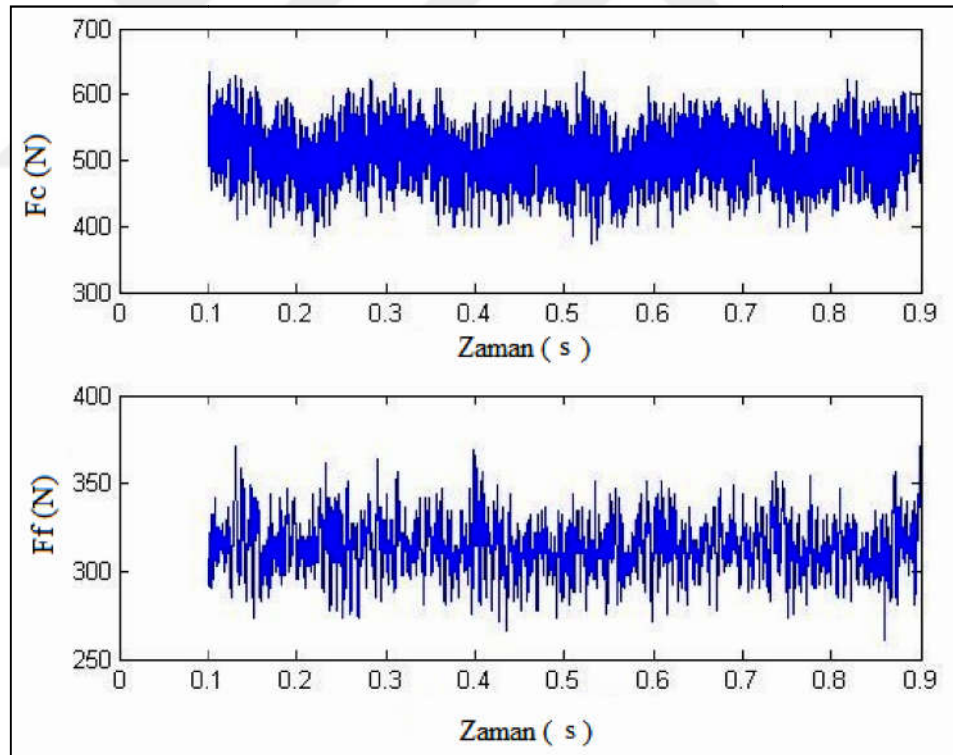
3.2.2. Kesme kuvvetlerinin ölçülmesi

Bu bölümün ilk aşamasında deneylere hazırlık kapsamında kesme esnasında uygulanan soğutma suyu basıncının ve ilerlemenin kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü üzerine ölçülen etkileri ortaya koyulmuştur. Nihai deney tasarımı ve testlerine geçilmeden önce parametrelerin etkilerini net gözlemlemek için daha fazla sayıda ilerleme ve soğutma basıncı parametre değişkenleri olarak kullanılmıştır. Kesme kuvveti olarak teğetsel veya esas kesme kuvvet (F_c), pasif veya radyal kuvvet (F_p) ve ilerleme kuvveti (F_f) ölçülmüştür. Deneylerde CNMG120408 ISO kodlu, takım uç çapı 0,8 mm olan PVD Kaplamalı [(Ti, Al) N + TiN] takım kullanılmıştır. Kesme hızı 50 m/dak ve talaş derinliği $a_p=1$ mm sabit alınmıştır. Soğutma suyu basıncı olarak geleneksel, 100 bar, 200 bar ve 300 bar kullanılmıştır. Her bir basınç parametresinde 5 farklı ilerleme (0.1 mm/dev, 0.125 mm/dev, 0.15 mm/dev, 0.175 mm/dev, 0.2 mm/dev) kullanılmıştır. Bu değişken şartlara göre elde edilen kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü verileri değerlendirilmiştir. Kesme kuvvetleri değerlendirilirken (F_p) radyal kuvvet değeri olarak (F_c) esas kesme kuvvetinden daha düşük olduğu için grafiklere dahil edilmemiş ve değerlerin birbirine yakın ölçüldüğü ilerleme kuvveti yeterli görülmüştür. Kesme kuvveti sinyallerinin ölçümünde materyal bölümünde de belirtildiği gibi dinamometre, sinyal yükseltici, amplifikatör, veri toplama kartı ve ara bağlantı elemanları kullanılmıştır. Yazılım olarak da Cut-Pro programından faydalanılmıştır. Dinamometre tezgah üzerine özel saplamalarla sabitlendikten sonra iş parçasının ve bağlantı kablolarının montajı yapılmıştır. Her üç ekseninde de kesme kuvveti sinyalleri ölçülmüştür. Kesme uzunluğu 150 mm olarak belirlenerek 3 ekseninde de (F_x , F_y , F_z) kesme kuvveti sinyalleri alınmıştır (Şekil 3.12, 3.13).



Şekil 3.12. Elde edilen kesme kuvvetlerinin tam zamanlı grafiği.

Şekil 3.12’de elde edilen grafik bilgisayar üzerinde büyük yer kapladığından, ortalama kuvvetleri göstermesi açısından zaman sınırlaması getirilerek Şekil 3.13’deki gibi daha küçük grafikler oluşturulmuştur.



Şekil 3.13. Elde edilen kesme kuvvetlerinin (F_c ve F_f) 1 saniyelik grafiği.

Cut-Pro yazılımından ham olarak alınan sinyaller Matlab içerisinde yer alan Wavelet toolbox’ı ile işlenerek sinyallerin gürültü oranları azaltılmıştır. İşlenmiş sinyallerin

aritmetik ortalamaları alınarak nihai kesme kuvveti değerleri elde edilmiştir. Ön hazırlık amaçlı yapılan bu deneysel çalışmadan elde edilen esas kesme kuvveti (F_c) ve ilerleme yönünde ölçülen kesme kuvveti (F_f) ile yüzey pürüzlülük sonuçları Araştırma bulguları ve tartışma bölümünün ilk kısmında grafikler halinde verilmiştir.

Ön hazırlık deneylerinden sonra elde edilen bulgular ışığında tez çalışmasının temelini oluşturacak deney parametreleri ve sayıları daha tutarlı olarak belirlenmiş olacaktır.

3.2.3. Deney tasarımı ve kesme parametrelerinin belirlenmesi

Deney tasarımı yapmanın amacı bir prosesteki girdi değişkenleri üzerinde istenilen müdahalelerin yapılmasıyla cevap çıktısı üzerindeki değişkenliğin gözlenmesi, elde edilmesi ve yorumlanması olarak ifade edilebilir. Bunun için; Taguchi, çok değişkenli deneyleri az sayıda deneme ile gerçekleştirmede Ortogonal Dizilerden (OD) istifade etmektedir. OD'in kullanılması, çalışılacak deneyin büyüklüğünü önemli ölçüde azaltmaktadır. OD, dengelenmiş dizi anlamında kullanılmaktadır.

Çizelge 3.9 ve Çizelge 3.10'da oluşturulan bir OD dizisinde her bir sütunda, faktör seviyelerinin bütün kombinasyonları eşit sayıda vardır. Burada, 3 faktör (A,B,C) ve her birinin üç seviyesi mevcuttur. Bu tasarım L9 tasarımı olarak adlandırılır. L harfi ortogonal diziyi, 9 da satır sayısını bir başka deyişle deneme sayısını göstermektedir. Bu çalışmada literatür ve ön deneyler sonucunda belirlenen kesme parametreleri deneysel çalışma için en uygun tasarım olan L9 ortogonal dizin seçilerek deney tasarımı elde edilmiştir. Deneyler süresince kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü değerleri kaydedilmiştir. İş parçası malzemesi olarak Inconel 718 ve Ti-6Al-4V süper alaşımları kullanılarak ayrı ayrı 9'ar adet deney yapılmıştır. Deneyler kesme derinliği 2 mm olarak sabit tutulup 3 adet kesme hızı, ilerleme oranı ve basınç değerinde gerçekleştirilmiştir. Çizelge 3.9'da deney parametreleri, Çizelge 3.10'da ise Minitab 16 istatistik yazılımı yardımı ile belirlenen L9'luk Taguchi deney tasarımı verilmiştir.

Çizelge 3.9. Deney parametreleri ve seviyeleri

	Seviye		
Parametre	1	2	3
Kesme hızı; Vc [m/dk]	50	70	90
İlerleme oranı; f [mm/dev]	0.1	0.15	0.2
Soğutma Basıncı; P [bar]	6	150	300

Çizelge 3.10. L9 deney tasarımı

Deney Numarası	Değişkenler	(A) Kesme Hızı (m/dak)	(B) İlerleme Oranı (mm/dev)	(C) Soğutma Basıncı (Bar)
1	A ₁ B ₁ C ₁	50	0,1	6
2	A ₁ B ₂ C ₂	50	0,15	150
3	A ₁ B ₃ C ₃	50	0,2	300
4	A ₂ B ₁ C ₂	70	0,1	150
5	A ₂ B ₂ C ₃	70	0,15	300
6	A ₂ B ₃ C ₁	70	0,2	6
7	A ₃ B ₁ C ₃	90	0,1	300
8	A ₃ B ₂ C ₁	90	0,15	6
9	A ₃ B ₃ C ₂	90	0,2	150

Deney tasarımı sonunda parametrelerin güvenilirliğinin teyit edilmesi için program farklı bir işleme parametresi ile ön deney doğruluk parametresi ortaya koymuştur.

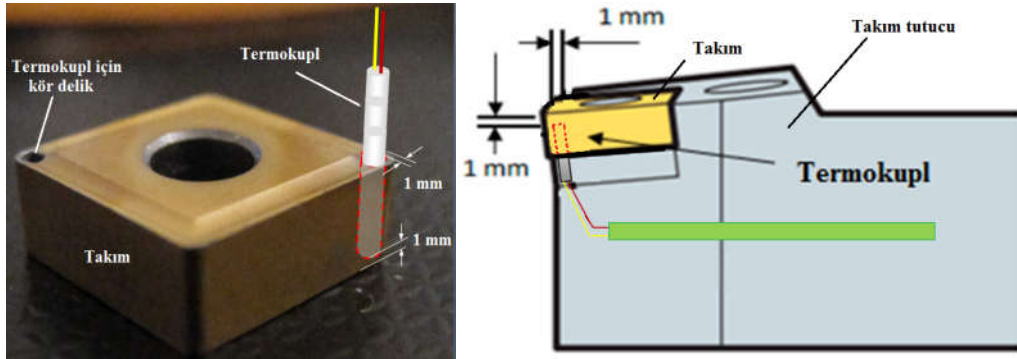
3.2.4. Yüzey pürüzlülük değerlerinin ölçülmesi

Kesme işlemi tamamlandıktan sonra işlenmiş yüzeylerin yüzey pürüzlülük değerleri Hommel Werke firmasına ait yüzey pürüzlülük cihazı ile belirlenmiştir. Silindirik iş parçası üzerinden 3 ayrı bölgeden yüzey pürüzlülüğü ölçümü yapılarak elde edilen değerlerin ortalaması alınarak, nihai yüzey pürüzlülüğü değeri elde edilmiştir.

3.2.5. Takım içi termokupl ile sıcaklık ölçümü

Takımın kesme kenarı altına kör delik şeklinde termokupl kanalları açılmıştır. Bu açılan kanallara yerleştirilen termokupl kesme kenarı ve takım uç kısmına 1 mm mesafede olacak şekilde konumlandırılmıştır. Termokuplun CNMG kesici takımın içine yerleştirilmiş hali Şekil 3.14’de verilmiştir. Takım içerisine termokupulu

yerleştirmek için takım hassas EDM tezgahında hızlı delik delme yöntemiyle tungsten elektrot kullanılarak delinmiştir.



şekil 3.14. CNMG takım içerisine K tipi termokuplun yerleştirilmesi.

Sıcaklık ölçüm testlerinden önce yaklaşık 100°C sıcaklıktaki kaynar su kullanılarak termokuplun kalibrasyonu yapılmıştır. Deneylerde elde edilen sıcaklık kesme bölgesine 1 mm uzaklıkta bulunması ve takımın kaplamalarından kaynaklanan ısı direnç şartları göz önüne alınarak hesap edilmiştir. Bu bölgede ölçülen sıcaklık değeri simülasyon şartlarında aynı mesafede okunan değerlerle yaklaşık olarak aynı olduğu görölmüş ve simülasyondaki gerçek kesme bölgesi sıcaklığı deney sonuçları için de referans kabul edilmiştir.

3.2.6. X-ışını kırınım yöntemi ile kalıntı gerilme analizlerinin yapılması

XRD cihazında kalıntı gerilme ölçümü Cr-K α radyasyonu, V filtre ve 0.2 mm'lik kolimatör kullanılarak noktasal olarak gerçekleştirilmiştir. X-ışını tüp voltajı 40 mV akım şiddeti 40 mA olarak belirlenerek cihaz 1.6 kW güçle çalıştırılmıştır.

Inconel 718 malzemede kalıntı gerilme ölçümü için gerilmesiz kırınım açısı $2\theta = 133.53^\circ$ olan yüzey merkezli kübik Ni-Co fazının $\{2\ 2\ 0\}$ kristalografik düzlem ailesi kullanılmıştır. Kırınan X-ışınlarının tespiti için konuma hassas Meteor-1D detektörü kullanılarak $120^\circ - 135^\circ$, 2θ aralığında 0.001° hassasiyetle taranmıştır. Tüm gerilme tensörünün elemanlarının belirlenmesi için 3 yönde ($\phi = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$) 7 azimut açısında ($\psi = -45.0000^\circ, -35.2640^\circ, -24.095^\circ, 0.0000^\circ, +24.095^\circ, +35.2640^\circ, +45.0000^\circ$) ölçüm alınmıştır. Her bir ölçüm için 120s içinde toplanan ortalama veri kullanılmıştır. Sonuçlar Bragg yasası yardımıyla eliptik $\sin^2\psi$ davranışı için analiz edilerek eksenel ve teğetsel yönlerin yanı sıra tüm genleme ve gerilme tensörü, asal

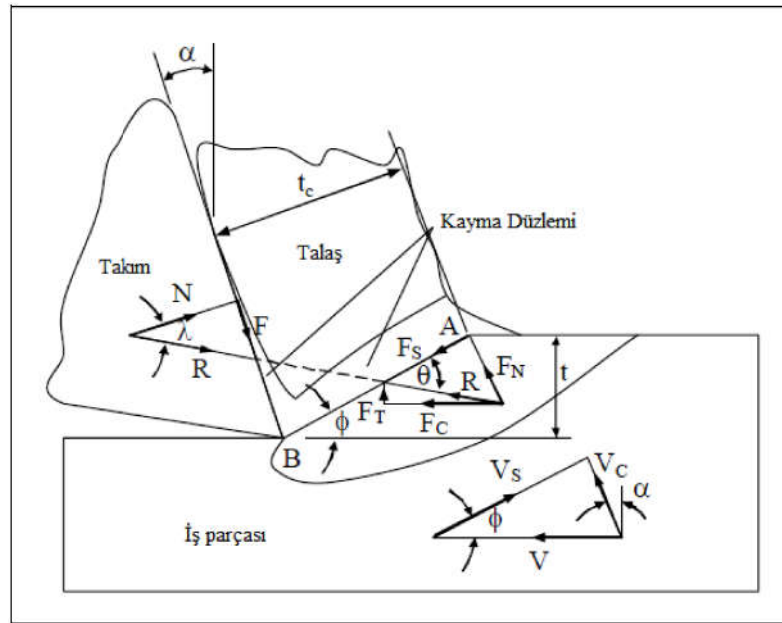
genleme ve gerilme tensörü, asal gerilme vektörünün numune eksenleriyle yaptığı açılar ve yarı maksimumdaki tam genişlik (FWHM) değerleri hesaplanmıştır.

3.2.7. Sonlu elemanlar modelinin oluşturulması

Ti-6Al-4V ve Inconel 718 malzemelerinin geleneksel ve yüksek basınçlı soğutma desteğiyle işlenmesi sırasında oluşan kalıntı gerilme, sıcaklık ve kesme kuvveti değerlerinin deney sonuçları ile de hesaplanmasından sonra sonuçların bir sonlu elemanlar programı ile karşılaştırılabilmesi için DEFORM 3D paket programı ile sonlu elemanlar modeli oluşturularak simülasyonlar yapılmıştır. Malzeme modeli (oxley) eşitlik 1.28 ve sürtünme modeli (Cloumb) eşitlik 1.31'den faydalanılarak oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar modelinin oluşturulduğu bu başlıktan 3.2.8 numaralı başlığa kadarki teorem ve yaklaşımlar Jiann-Cherng Su (Su, 2006) 'a ait tezdeki bilgilerden faydalanılarak oluşturulmuştur.

3.2.7.1. Kesme kuvvetinin modellenmesi

Simülasyonlar için oluşturulacak kesme kuvvetinin matematiksel modeli ortogonal kesme işleminde Merchant dairesi ve kesme parametrelerinin ortaya çıkarılma yaklaşımları göz önüne alınarak oluşturulmuştur..



Şekil 3.15 Oxley'in talaş kaldırma modeli.

Bununla birlikte Oxley'in talaş kaldırma yaklaşımından elde edilen verilerle AB kayma düzlemi boyunca gerilme dağılımları ve takım-talaş arayüzü analizleri Şekil 3.15'den çıkarılabilir. Ayrıca simülasyon girdi parametrelerinde yer alan kesme gerilmesi τ_s , sürtünme açısı β_a ve kesme açısı ϕ_c değerlerini hesaplamak için talaş ağırlıkları ve boyları ölçülerek talaş sıkışma oranları r_c elde edilmiştir. Buradan elde edilen sonuçlarla kesme kuvveti sabitlerine ulaşarak gerekli parametre değerleri hesaplanmıştır.

Bunun için;

$$r_c = \frac{h}{h_c} \quad (3.1)$$

$$\beta_a = \alpha_r + \tan^{-1} \left(\frac{F_{fc}}{F_{tc}} \right) \quad (3.2)$$

$$\phi_c = \tan^{-1} \frac{r_c \cos(\alpha_r)}{1 - r_c \sin(\alpha_r)} \quad (3.3)$$

$$\tau_s = \frac{[F_{tc} \cos(\phi_c) - F_{fc} \sin(\phi_c)] \sin(\phi_c)}{bh} \quad (3.4)$$

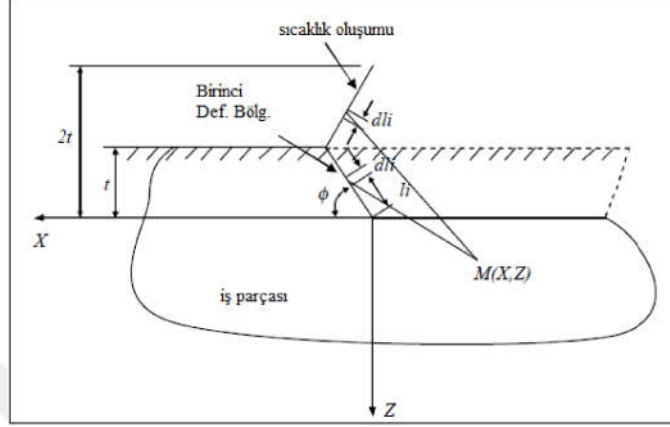
burada h_c kesilen talaşın kalınlığı, α_r kesme açısı ve b kesme genişliğidir. Buradan elde edilen parametreler Deform 3D analiz programında karşılık gelen tanımlamalarda simülasyon parametreleri olarak programa girilir ve model oluşturulur.

3.2.7.2. Kesme sıcaklığı ve soğutma sıvısının modellenmesi

Kesme sırasında oluşan sürtünme kaynaklı ısı kaynağı işparçası ve takım üzerinde olumsuz etkilere sebep olur. Bu, işparçasında termal etkiyle kalıntı gerilmelerin oluşması ve takım üzerinde de aşınma oluşumu şeklinde ortaya çıkar. Sıcaklığın modellenmesinde iki ısı kaynağı dikkate alınarak modelleme yapılır (Ulutan, 2013). Birinci deformasyon bölgesindeki kayma düzleminde oluşan sıcaklık ve ikinci deformasyon bölgesindeki takım-talaş ve işparçası arasında oluşan ısı kaynağı olarak dikkate alınır.

3.2.7.2.1. Kayma düzleminde oluşan ısı

İş parçası sıcaklığının modellenmesinde, iki ısı kaynağının olduğu kabul edilir. İlk olarak makaslama (kayma) düzleminde üretilen birincil ısı kaynağıdır. İkinci ısı; takım ve iş parçasının arasında mekanik sürtünmenin bir sonucudur (Su, 2006).



Şekil 3.16. Birincil deformasyon bölgesindeki ısı transfer modeli (Su, 2006).

Şekil 3.16'da M (X,Z) noktalarının birinci deformasyon bölgesi ve hayali ısı kaynağının birer kombinasyonu olarak eğik hareketin toplam sıcaklık artışı olarak verilmektedir.

$$\theta_{isp.-kayma}(X,Z) = \frac{q_{kayma}}{2\pi k_{isp.}} \int_0^L e^{\frac{(x-l_i \sin \varphi)V_c}{2a_{isp.}}} \left\{ K_0 \left[\frac{Vc}{2a_{isp.}} \sqrt{(X-l_i \sin \varphi)^2} \right] + K_0 \left[\frac{Vc}{2a_{isp.}} \sqrt{(X-l_i \sin \varphi)^2 + (Z+l_i \cos \varphi)^2} \right] \right\} dl_i \quad (3.5)$$

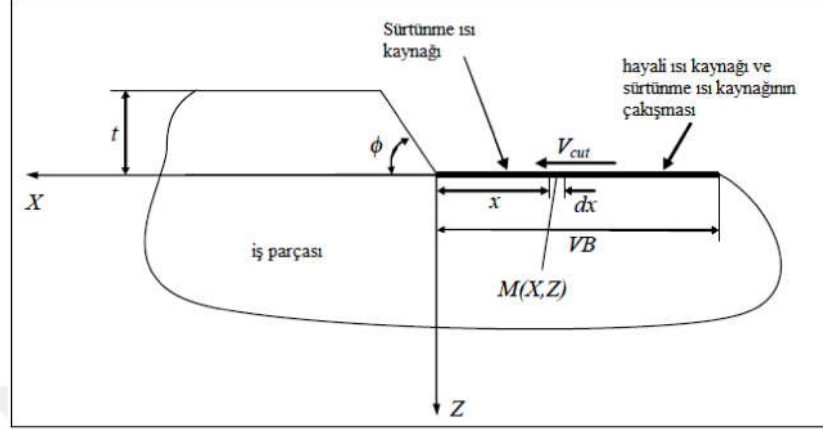
Buradan;

$$\varphi = \left(\phi - \frac{\pi}{2} \right) \text{ ve } L = \frac{t}{\sin \phi} \quad (3.6)$$

3.2.7.2.2. Takım -işparçası arasında oluşan sıcaklığın modellenmesi

Benzer bir ifade olarak; kesme hareketiyle oluşan ısı kaynağının kesme kenarı ve işparçası arasındaki sürtünme etkisiyle oluştuğunu ifade etmek için kullanılabilir. Takım kenarı ve malzeme arasındaki sürtünme etkisinden doğan ısı kaynağını yüzey boyunca gösterebiliriz. İş parçası yüzeyi yalıtımlı olarak kabul edilir, çünkü orijinal

sürtünme ısı kaynağı ile hayali bir ısı kaynağını uygun sıcaklık artışı olarak modellemek gerekmektedir. Şekil 3.17’de Sürtünme yüzeyi boyunca oluşan ısı kaynağı gösterilmektedir. Oluşan sıcaklık artışı eşitlik (3.7)’de verilmiştir.



Şekil 3.17. İşparçası üzerindeki sürtünme ısı kaynağı modeli (Su, 2006)

$$\theta_{isp.-sürt.}(X,Z) = \frac{1}{\pi k_{isp.}} \int_0^{VB} \gamma \cdot q_{sürt.}(x) e^{\frac{(X-x)Vc}{2a_{isp.}}} K_0 \left[\frac{Vc}{2a_{isp.}} \sqrt{(X-x)^2 + (Z)^2} \right] dx. \quad (3.7)$$

γ kesme sırasında işparçasına aktarılan ısıнын bir bölümüdür. İşparçasının malzeme özelliklerine bağlı ifadeler sırasıyla k ; ısı iletkenlik, ρ ; yoğunluk, c ; işparçası ve takımın özgül ısısı.

$$\gamma = \frac{\sqrt{k\rho C}}{\sqrt{k\rho C} + \sqrt{k_t\rho_t C_t}} \quad (3.8)$$

Isı kaynakları q_{kayma} ve $q_{sürt.}$ önceki bölümde açıklanan kesme parametreleri ve kesme kuvveti modellerinden belirlenir. kayma düzlemi ısı kaynağı ve sürtünme ısı kaynağı için ortaya çıkan ifadeler sırasıyla eşitlik (3.9) ve (3.10) ile verilmiştir.

$$\theta_{kayma} = \frac{(F_c \cos \phi - F_t \sin \phi)(V_c \cos \alpha / \cos(\phi - \alpha))}{(t)(w) \csc \phi} \quad (3.9)$$

$$\theta_{sürt.} = \frac{P_c V_c}{(w)VB} \quad (3.10)$$

3.2.7.2.3. Soğutma sıvısının modellenmesi

Kesme işlemi sırasında soğutma sıvısı veya soğutucunun uygulanması durumunda soğutma etkisi sabit soğutucu olarak kabul edilir. İşleme anında soğutma sıvısının nüfuz ettiği bölgede oluşan ısıl değişkenliği denkleme dahil etmek için soğutma sıvısı sabit bir ısı kaynağı olarak düşünülüp denkleme dahil edilir.

$$\theta_{soğutma} = \frac{q_{soğ.}}{2\pi k_t} \int_0^l \int_{-w/2}^{w/2} \left(\frac{1}{R_i} + \frac{1}{R'_i} \right) dy dx \quad (3.11)$$

Eşitlik (3.11)'de

l ; soğutma sıvısının etki ettiği uzunluk, w ; kesme bölgesinin genişliği
 $R_i = \sqrt{(X_2 - x_i)^2 + (Y_2 - y_i)^2 + Z_2^2}$ ve $R'_i = \sqrt{(X_2 - (2L - x_i))^2 + (Y_2 - y_i)^2 + Z_2^2}$ ısı kaybı yoğunluğu $q_{soğutma}$ eşitlik (3.8)'de verilmiştir. $\bar{h}$; Toplam ısı transferi, T_0 ; ortam ısısı, T ; Kayma düzlemi ve sürtünme ısı kaynağından kaynaklanan sıcaklık artışı.

$$q_{soğ.} = \bar{h}(T - T_0) \quad (3.12)$$

İşleme esnasında iki ısı kaynağı ve bir soğutucudan kaynaklanan net ısı değişimi eşitlik (3.13), (Su, 2006);

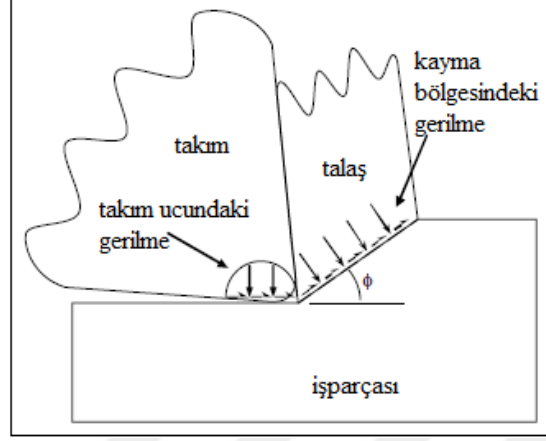
$$\theta_{toplaml}(X, Z) = \theta_{kayma}(X, Z) + \theta_{sürt.}(X, Z) + \theta_{soğ.}(X, Z) \quad (3.13)$$

3.2.7.3. Kesme işleminde kalıntı gerilmenin modellenmesi

Talaş kaldırma esnasında işparçasının maruz kaldığı gerilmenin ortaya çıkarılması kalıntı gerilmenin tahmin edilmesi için önemlidir. Mekanik etki ile yuvarlanma ve sürtünme durumu gerilme geçmişinin modellenmesi için kullanılan bir yöntemdir.

Kesme esnasında oluşan gerilmeyi mekanik ve sürtünme kaynaklı olarak kabul etmek mümkündür. Birincisi makaslama yani kayma düzleminde oluşan gerilme diğeri ise takım ile işparçası arasındaki temas nedeniyle oluşan gerilemedir. Takım ucu bu gerilme değerine teğetsel kuvvet ile bileşiminden oluşan normal yük ile

katkıda bulunur. Makaslama (kayma) bölgesi ise kesme ve normal gerilme bileşenleri ile etki eder. Bu iki kaynak işparçasının maruz kaldığı gerilme bileşenlerini oluşturur.



Şekil 3.18. Mekanik etki ile kalıntı gerilmenin oluşumu (Su, 2006).

İş parçasında ortaya çıkan gerilmeler temas bölgesi üzerinde yarı-sonsuz bünyelerde normal ve teğetsel nokta yükler için “Boussinesq” çözümünü birleştirilerek hesaplanır. Birleştirme sonucu eşitlik (3.14,15,16)'da gösterilmektedir.

İşparçası üzerinde meydana gelen kalıntı gerilmeler takım ile işparçası temas bölgesinde, kayma düzleminde oluşmaktadır (Prasad, 2009).

$$\sigma_x = -\frac{2z}{\pi} \int_{-b}^a \frac{p(s)(x-s)^2}{[(x-s)^2 + z^2]^2} ds - \frac{2}{\pi} \int_{-b}^a \frac{q(s)(x-s)^3}{[(x-s)^2 + z^2]^2} ds \quad (3.14)$$

$$\sigma_z = -\frac{2z^3}{\pi} \int_{-b}^a \frac{p(s)}{[(x-s)^2 + z^2]^2} ds - \frac{2z^2}{\pi} \int_{-b}^a \frac{q(s)(x-s)}{[(x-s)^2 + z^2]^2} ds \quad (3.15)$$

$$\tau_{xz} = -\frac{2z^2}{\pi} \int_{-b}^a \frac{p(s)(x-s)}{[(x-s)^2 + z^2]^2} ds - \frac{2z}{\pi} \int_{-b}^a \frac{q(s)(x-s)^2}{[(x-s)^2 + z^2]^2} ds \quad (3.16)$$

Daha önce Şekil 1.15’de kesme işleminde kalıntı gerilmenin ortaya çıktığı bölgelerin gösterildiği şemaya göre yüzey ve yüzey altı tabakalarda oluşan kalıntı gerilme durumunun belirlenmesi için;

$$\varepsilon_s = \varepsilon_s^e + \varepsilon_s^p + \varepsilon_s^t \quad (3.17)$$

Eşitliği kullanılır.

Burada yüzey katmandaki toplam gerinme S için; ε^e elastik gerinme, ε^p plastik gerinme, ε^t termal gerinme değerlerini ifade etmektedir.

Eşitlik (3.16) ifadesi işleme anında oluşan yüklemelerle birlikte elastik, plastik şekil değişimleri olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_{xx} &= \frac{1}{E} \left[\dot{\sigma}_{xx} - \nu(\dot{\sigma}_{yy} + \dot{\sigma}_{zz}^*) \right] + \alpha \Delta T + \frac{1}{h} (\dot{\sigma}_{xx} n_{xx} + \dot{\sigma}_{yy} n_{yy} + \dot{\sigma}_{zz}^* n_{zz} + 2\dot{\tau}_{xz}^* n_{xz}) n_{xx} \\ &= \Psi \left(\frac{1}{E} \left[\dot{\sigma}_{xx} - \nu(\dot{\sigma}_{yy} + \dot{\sigma}_{zz}^*) \right] + \alpha \Delta T + \frac{1}{h} (\dot{\sigma}_{xx} n_{xx} + \dot{\sigma}_{yy} n_{yy} + \dot{\sigma}_{zz}^* n_{zz} + 2\dot{\tau}_{xz}^* n_{xz}) n_{xx} \right) \quad (3.18) \end{aligned}$$

$$\dot{\varepsilon}_{yy} = \frac{1}{E} \left[\dot{\sigma}_{yy} - \nu(\dot{\sigma}_{xx} + \dot{\sigma}_{zz}^*) \right] + \alpha \Delta T + \frac{1}{h} (\dot{\sigma}_{xx} n_{xx} + \dot{\sigma}_{yy} n_{yy} + \dot{\sigma}_{zz}^* n_{zz} + 2\dot{\tau}_{xz}^* n_{xz}) n_{yy} = 0$$

eşitliğinden, her iki yöndeki (teğetsel ve eksenel) gerilme denklemleri;

$$\Delta \sigma_{xx} = \frac{E \Delta \varepsilon_{xx} + (1 + \nu)(\Delta \sigma_{zz} \nu - E \alpha \Delta T)}{(1 - \nu^2)} \quad (3.19)$$

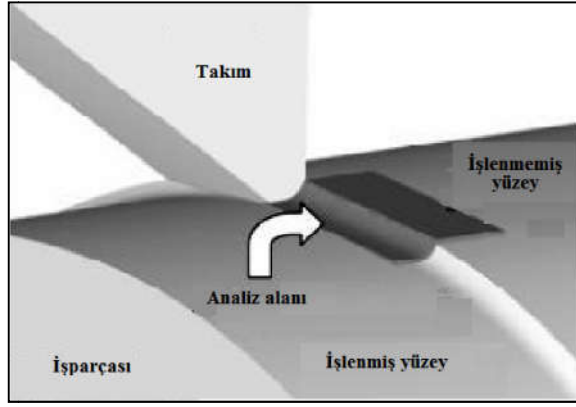
$$\Delta \sigma_{yy} = \frac{\nu E \Delta \varepsilon_{xx} + (1 + \nu)(\Delta \sigma_{zz} \nu - E \alpha \Delta T)}{(1 - \nu^2)} \quad (3.20)$$

Burada σ_{xx} ve σ_{yy} sıfırdan farklı bir gerilme değerini ifade etmektedir. Bu değerler, işparçası içerisinde basma ya da çekme yönünde hapsolmuş gerilme durumunu göstermektedir (Su, 2006).

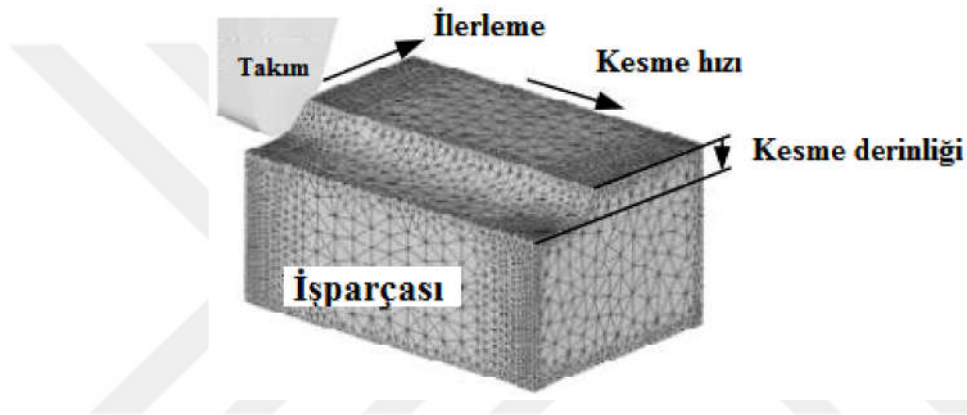
3.2.8. Deform 3D Sonlu Elemanlar programıyla simülasyonların yapılması

3.2.8.1. Tornalama işleminin 3 boyutlu simülasyonu

Bir tornalama işleminde dönen işparçası ve takım arasındaki ilişkinin meydana geldiği düzlem şekil 3.19'da, bu düzlemdeki hareket ve kafes elemanlar ise Şekil 3.20'de gösterilmiştir.



Şekil 3.19. Temel torna bileşenleri ve analiz etki ilişkisi (Deform 3D).



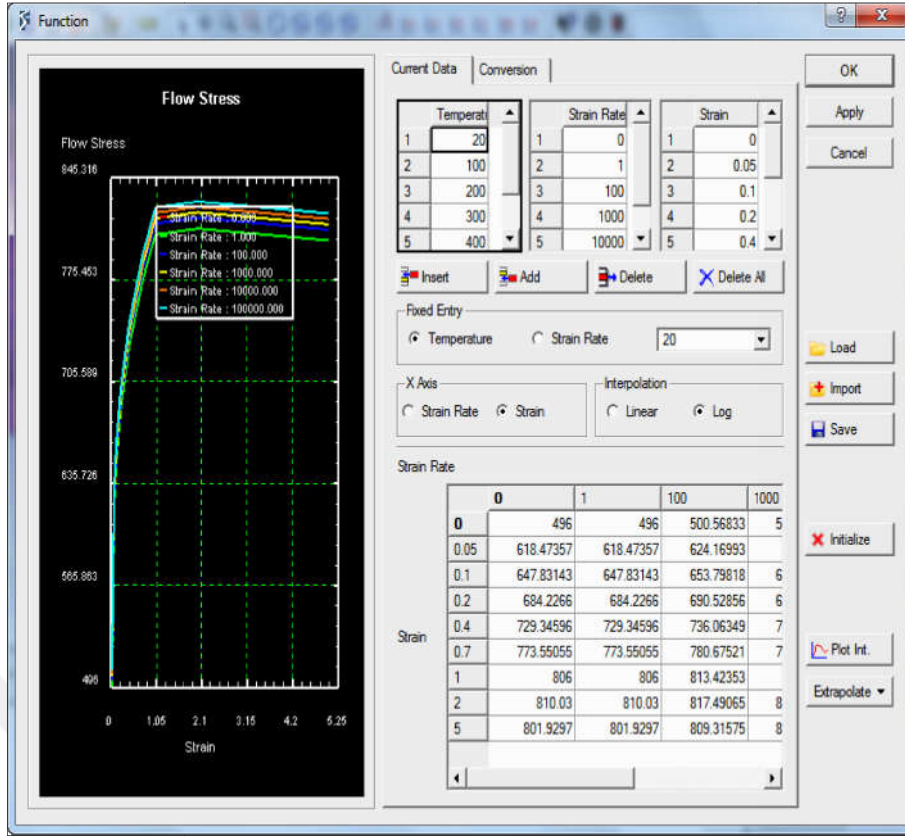
Şekil 3.20. Simülasyon modeli ve kesme parametreleri (Deform 3D).

Özellikle yüksek kesme hızlarında işlemenin modellenmesinde gerilme modelinin doğru ve güvenilir şekilde oluşturulması son derece önemlidir. Birçok model arasında Johnson-cook ve Oxley malzeme süreklilik modelleri geniş kullanım oranına sahiptir. Bu simülasyonda literatür ve malzeme özellikleri dikkate alınarak Oxley malzeme modeli kullanılmıştır. Bununla ilgili olarak Oxley malzeme modeli ve sabitleri aşağıda verilmiştir.

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}, \varepsilon, T) \quad (3.21)$$

Burada; $\bar{\sigma}$ akma gerilmesi, $\bar{\varepsilon}$ şekil değiştirme oranı, ε plastik şekil değiştirme, T sıcaklıktır.

Şekil 3.21’de gösterilen malzeme kütüphanesinden Inconel 718 ve Ti-6Al-4V alaşımlar için young modülü, ısı kapasitesi, yoğunluk, poisson oranı, ısıl genleşme ve ısı iletimi gibi değerleri adım adım belirlenmiştir.



Şekil 3.21. Oxley malzeme modeli (Deform 3D).

3.2.8.2. Sürtünme modelinin belirlenmesi

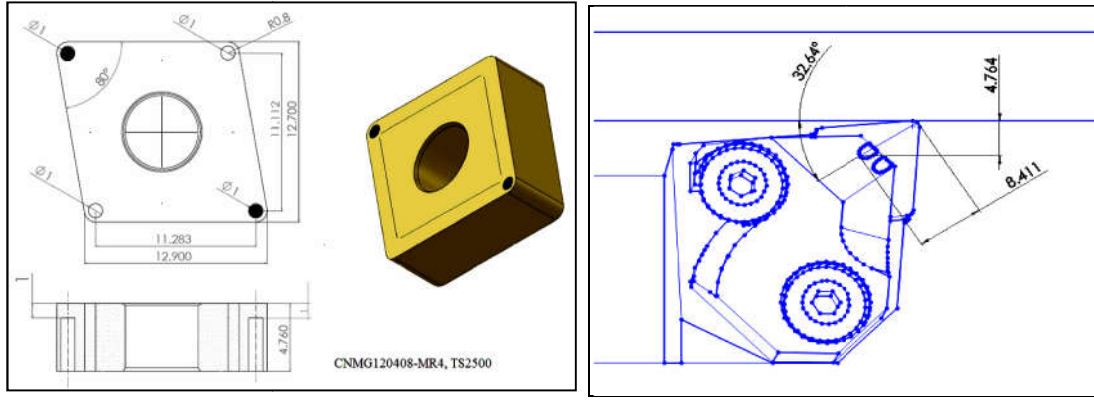
Takım ile iş parçası arasındaki sürtünmenin, Eşitlik 3.22'de gösterilen Coulomb Kanunu'na bağlı kaldığı kabul edilerek parametreler belirlenmiştir.

$$\tau = \mu \cdot \sigma_n \quad (3.22)$$

Bu eşitlikte τ sürtünme gerilmesi, μ sabit sürtünme katsayısı ve σ_n talaş takım arasında oluşan normal gerilmedir.

3.2.8.3. Takım geometrisi ve malzemesinin belirlenmesi

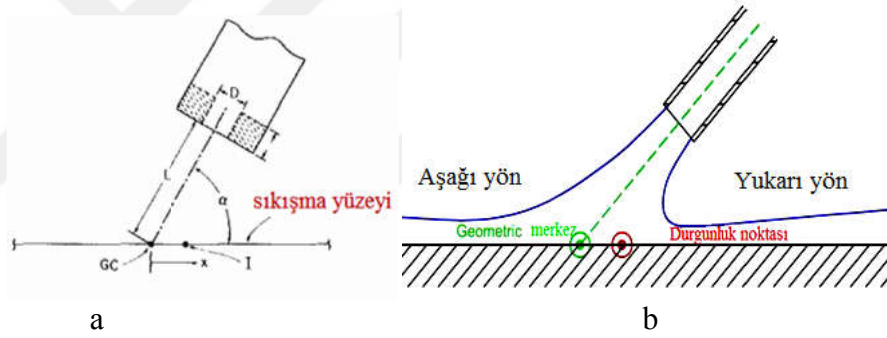
Deneylerde kullanılan takıma ait çizim ve özellikleri program kütüphanesinde yer almadığı için kesici takım belirlenen ölçülerde Solidworks programı ile modellenip, STL formatında Deform 3D program kütüphanesine yüklenmiştir. Kesici takım ve jet nozul Şekil 3.22'de verilen standart ölçülerde modellenmiştir.



Şekil 3.22. Kesici takım ve nozul'a ait çizim

3.2.8.4. Yüksek basınçlı soğutma sıvısının simülasyona dahil edilmesi

Yüksek basınçlı soğutma sıvısının kesme bölgesine yüksek hızda enjekte edilmesi esnasında oluşan akışın basınç bölgeleri ve etki mesafesi şekil 3.23'a ve b'de gösterilmiştir:



Şekil 3.23. Eğik akış sistematığı (Goldstein vd., 1988).

Yüksek basınçlı soğutmanın işleme anında kesme bölgesinde oluşan buhar tabakasını yenmesi ve talaşın kırılması üzerinde yüksek belirleyiciliğinden dolayı etki alanının ve sürtünme katsayısındaki sayısal değeri büyük önem arz etmektedir. Bundan dolayı yüksek basınçlı soğutmanın jet etkisinin sürtünme katsayısı ve ısı iletim katsayısı değerleri Reynold (Re) ve Nusselt (Nu) sayıları dikkate alınarak hesaplanmıştır.

Hesaplama da kullanılan parametreler;

$k = 0,58 \text{ W/mK}$ (ısı iletkenliği), $\nu = 128 \text{ mm}^2/\text{s}$, $\rho = 1,01 \text{ g/cm}^3$ (akışkanın yoğunluğu) $d = 1,6 \text{ mm}$ (Nozul çapı), U ; hız, Q ; debi

$$Re = Ud / \nu \quad (3.23)$$

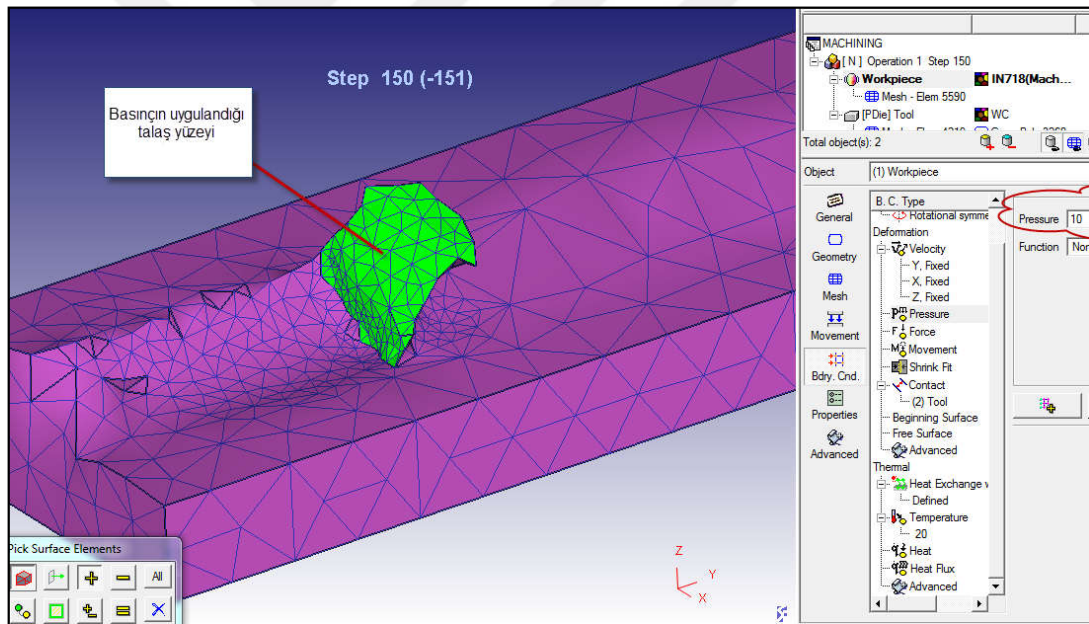
$$U = Q / A = \frac{Q}{\pi d^2 / 4} \quad (3.24)$$

$$Nu / Re^{0.7} = Ae^{-(B+C \cos \varphi)(r/d)^{0.75}} \quad (3.25)$$

Isı transfer katsayısı; h

$$h = \frac{Nuk}{d} \quad (3.26)$$

Hesaplamalar sonucunda sürtünme katsayısı, μ değeri yüksek basınç ve geleneksel soğutma durumlardaki değerleri simülasyon parametrelerine dahil edilmiştir. Uygulanan soğutma sıvısının etki ettiği talaş yüzeyi alanı (Goldstein vd., 1988) literatürden elde edilen bilgiler ile hesaplanarak takım-işparçası arasındaki talaş yüzeyine soğutma etkisi olarak etkisi olarak nüfuz ettirilmiştir (Şekil 3.24).



Şekil 3.24. YBS'nin etki ettiği talaş yüzeyi

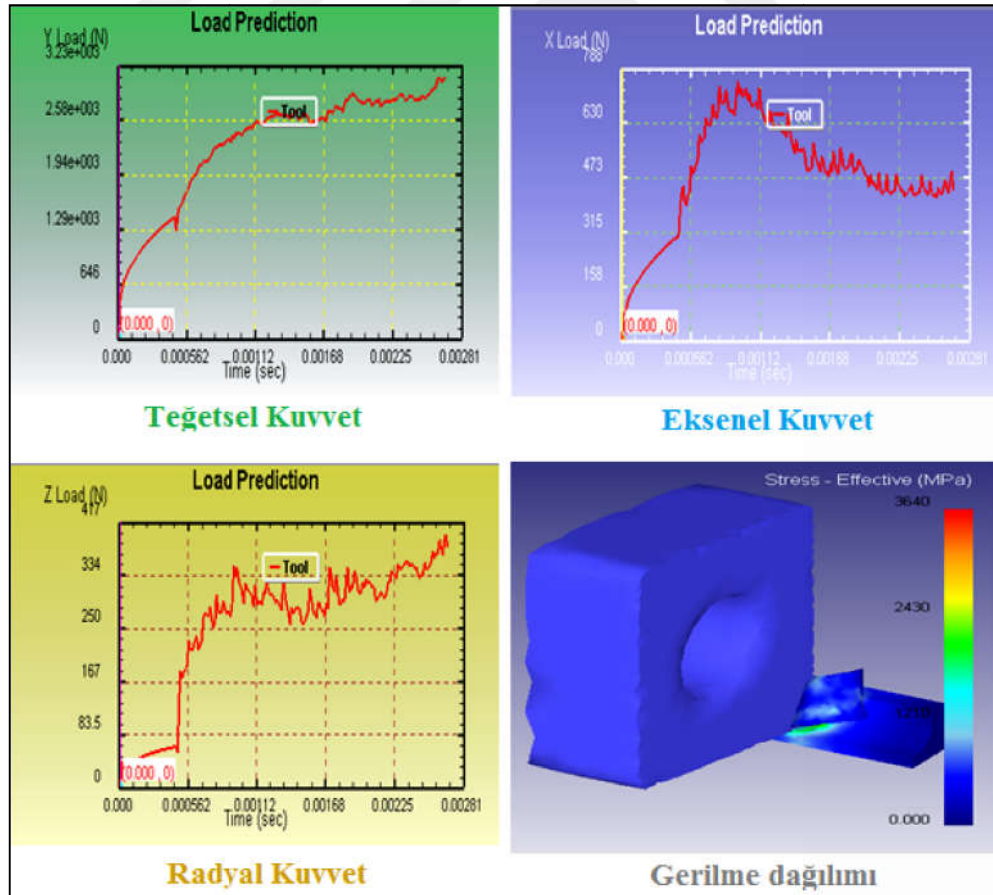
Tüm bu modeller ve tanımlamalar sonucunda simülasyonlar için deney parametreleri olarak aşağıdaki değerler kullanılmıştır.

Çizelge 3.11. Simülasyon parametreleri

Kesme Hızı (m/dak)	50; 70; 90
İlerleme Oranı (mm/dev)	0.1; 0.15; 0.2
Kesme Derinliği (mm)	2
Sürtünme Katsayısı	0.2; 0.4
Analiz mesafesi (mm)	10
Oda sıcaklığı (°C)	20
Takım-işparçası ısı transfer katsayısı (N/mm s °C)	100
YBS basıncı (bar)	6; 150; 300
Soğutma ısı transfer katsayısı (N/mm s °C)	0.6; 1.12; 1.47

3.2.8.5. Deform 3D ile kesme kuvveti simülasyonların yapılması

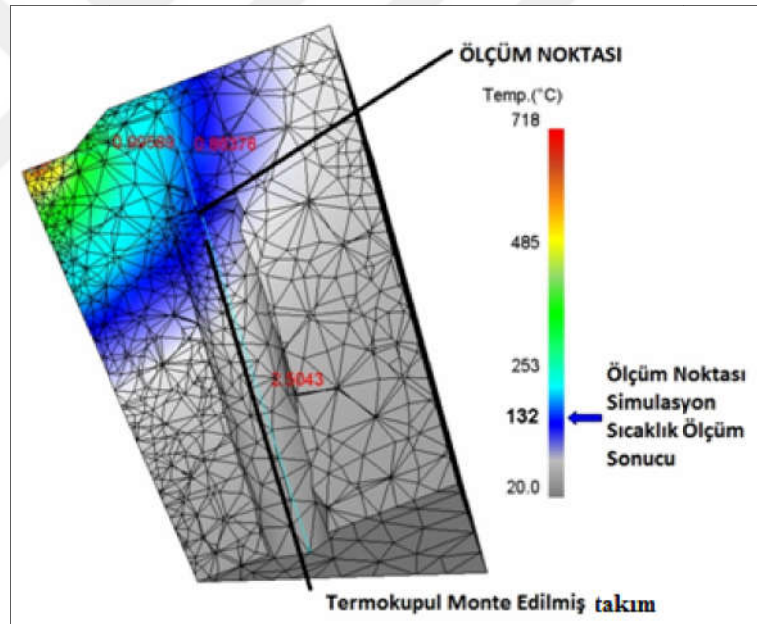
Çizelge 3.10’da verilen deney tasarım parametreleri kullanılarak yapılan simülasyon çalışmalarında elde edilen kesme kuvvetleri aşağıda Şekil 3.25’de görüldüğü gibi esas (teğetsel), ilerleme ve radyal kesme kuvvetleri şeklinde elde edilmiştir.



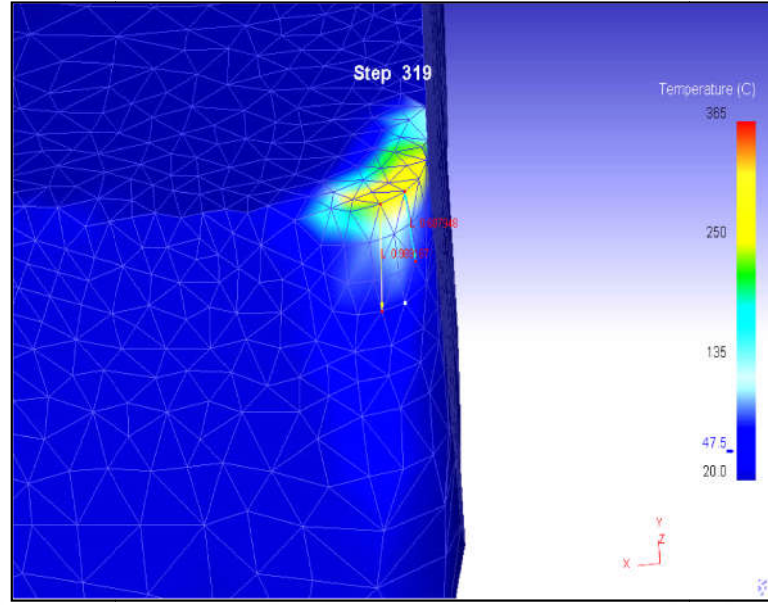
Şekil 3.25. Kesme kuvveti simülasyonları (Deform 3D).

3.2.8.6. Deform 3D ile sıcaklık simülasyonların yapılması

Deney sonuçları ile takım ucundaki ve talaştaki sıcaklıkların tespiti oldukça zor ve güvensiz olacağından takım içi ısı çift (termokupl) yöntemi ile sıcaklık kontrolü yapılmıştır. Bunun için talaş kaldırma testlerinde sıcaklıkların deney sonuçları ile belirlenmesinde takım içerisine 1 mm derinlikte yerleştirilen termokupl ile alınan değerlerin simülasyonla ortak bir paydada değerlendirilmesi amacıyla takım içerisinde aynı konumda bulunan noktalardan da sıcaklık simülasyon değerleri hesaplanmıştır. Şekil 3.26’da gösterilen birim kafes elemanlara bölünen takım içerisinde belirlenen koordinatlardan elde edilen simülasyon verileri ile deney sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ulaşılan sonuçlara göre simülasyonlardaki talaş sıcaklığı ve takım ucundaki sıcaklıklar ile deney yöntemleri ile ölçülemeyen kesme bölgesindeki sıcaklıkların tahmini yapılabilir.



Şekil 3.26. Takım içi termokupl yöntemi ile sıcaklık simülasyonu.

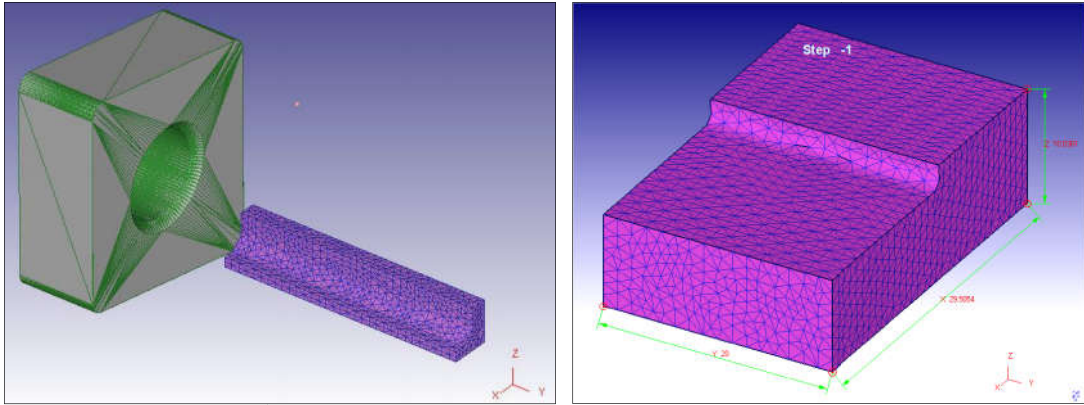


Şekil 3.27. Takım ucu sıcaklığının simülasyonla belirlenmesi.

3.2.8.7. Deform 3D ile kalıntı gerilme simülasyonların yapılması

Yapılan simülasyonlar 3 adımdan oluşmaktadır.

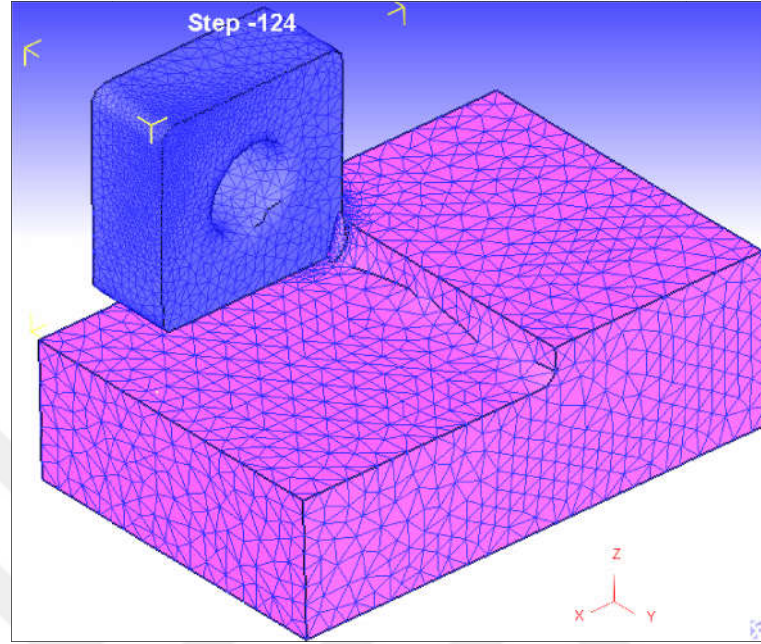
1. Adım: Bu aşamada kesici takım ve iş parçası belirlenen ölçülerde Solidworks programı ile modellenip, kafes eleman tipi belirlenerek düğüm ve nokta sayıları girilmiştir (Şekil 3.28).



Şekil 3.28. Kesici takım ve işparçası modellerinin yapılması

Takım ve iş parçası modelleme işleminden sonra gerekli simülasyon parametreleri girilerek simülasyon çalıştırılır. Simülasyon steady-state şartlara ve istenilen talaş

uzunluğuna ulaşıncaya kadar devam eder ve ardından durdurularak ikinci adıma geçilir (şekil 3.29).



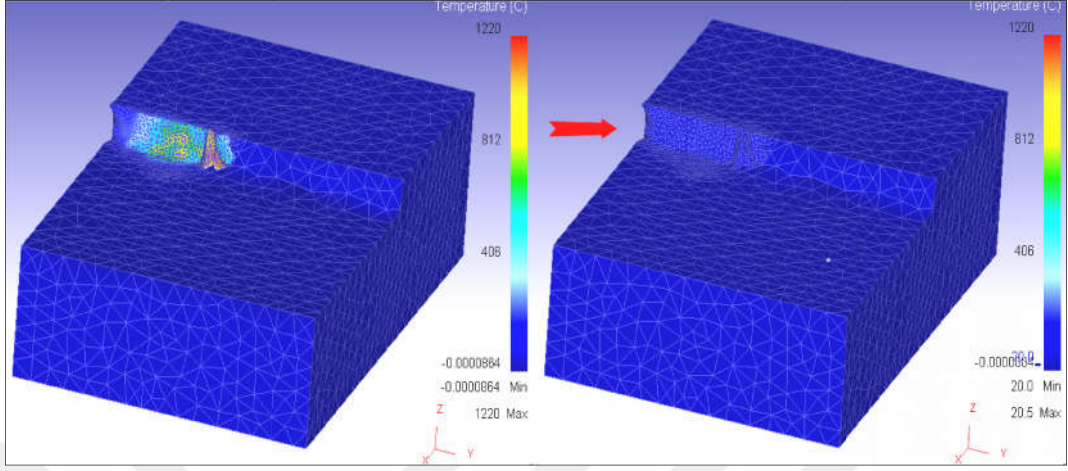
şekil 3.29. Oluşturulan 3D sonlu elamanlar modeli

2. Adım: Bu adım da ise şekil 3.30’da görüldüğü gibi talaş yüzeyine yüksek basınçlı soğutma sıvısının mekanik etkisi uygulanır. Burada uygulanan basınç üniform olarak kabul edilip ve nozul çapı kadar bir alana uygulanmıştır.



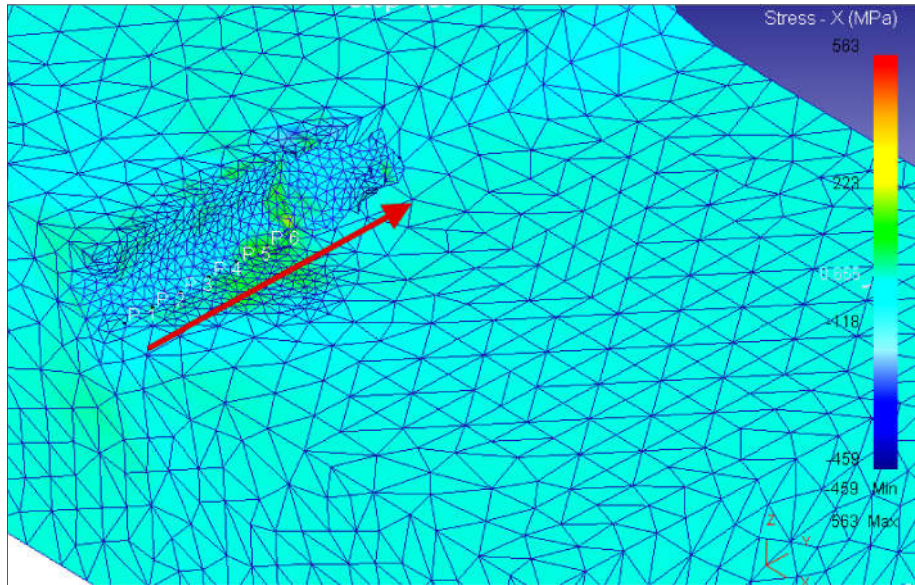
şekil 3.30. YBS mekanik etkisinin uygulanması

3. Adım: Bu adımda ise kalıntı gerilmelerin ölçülebilmesi için iş parçası Şekil 3.31’da görüldüğü gibi oda sıcaklığına kadar soğutulmaktadır.



Şekil 3.31. İş parçasının oda sıcaklığına kadar soğutulması.

Soğutma işleminin ardında kalıntı gerilme ölçme işlemine geçilmiştir. Kalıntı gerilmeler şekil 3.32’deki ölçme çizgisi boyunca 15 μm ’lik aralıklar ile işlenmiş yüzey üzerinden ölçülmüştür. σ_{xx} (eksenel) ve σ_{yy} (teğetsel) kalıntı gerilme değerleri “point-tracking” komutu ile elde edilmiştir. Burada x ekseni ilerleme yönünü, y ekseni ise kesme yönünü temsil etmektedir.



Şekil 3.32. Kalıntı gerilme değerlerinin elde edilmesi.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Inconel 718 Malzemeye Ait Deney ve Simülasyon Sonuçları

İşlenebilirlik ve simülasyon testlerinde Taguchi L9 ortogonal dizisi kullanılarak 9 adet deney parametreleri belirlenmiştir. Her bir deneyde kesme derinliği 2 mm olarak sabit tutulmuş ve 3'er adet kesme hızı, ilerleme oranı ve soğutma sıvısı basınç değerleri parametre değişkeni olarak deneylerde kullanılmıştır. Bu değerler dikkate alınarak yapılan test ve simülasyon çalışmalarına ait sonuçlar aşağıda verilmiştir.

4.1.1. Kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülük değerleri

Bu bölümde iş parçası malzemesi olarak Inconel 718 süper alaşım malzemeye yapılan deneyler neticesinde elde edilen ortalama kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü sonuçlarına yer verilmiştir. Çizelge 4.1'de elde edilen deney ve simülasyon sonuçları gösterilmektedir.

Çizelge 4.1. Inconel 718'e ait deney ve simülasyon sonuçları

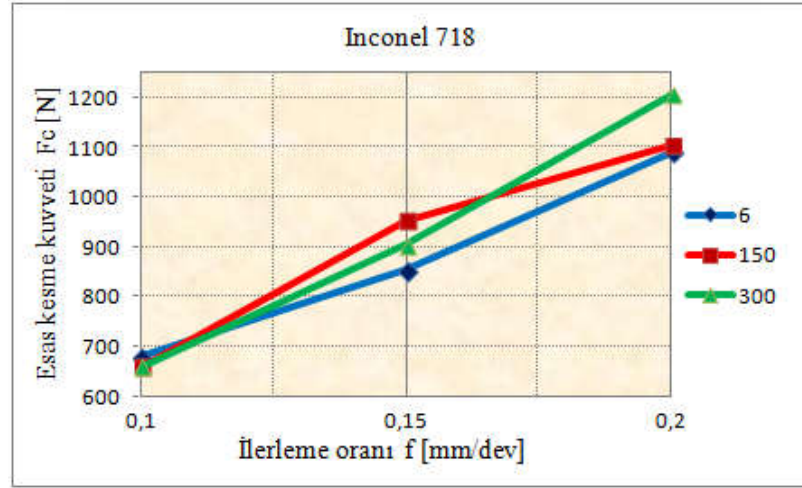
Deney	Inconel 718			Deney sonuçları				Simülasyon sonuçları		
	f [mm/dev]	Vc [m/dak]	P [bar]	Fc [N]	Fp [N]	Ff [N]	Ra [μm]	Fc [N]	Fp [N]	Ff [N]
1	0,1	50	6	681,4	140,3	140,7	0,58	581	204	211
2	0,1	70	150	661,3	129,4	127,1	1,24	787	301	313
3	0,1	90	300	660,2	116,2	115,9	0,69	704	181	179
4	0,15	50	150	953,4	165,8	166,8	1,11	870	246	231
5	0,15	70	300	904,7	162,8	163,8	1,39	652	205	237
6	0,15	90	6	856,3	162,5	159,9	1,03	809	280	298
7	0,2	50	300	1206	186,4	185,2	1,81	667	190	200
8	0,2	70	6	1092	157,1	153,2	1,74	1160	368	359
9	0,2	90	150	1105	167,7	165,9	1,53	933	320	309

Çizelge 4.1'de Inconel 718'e ait kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü sonuçlarının deney ve simülasyon çıktıları bir arada verilmiştir. Kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülük değerleri incelendiğinde en düşük ve en yüksek sonuçların belirli bir

ortak paydada değiştiği gözlenmiştir. Bu değişkenlik ilerleme oranı değerlerinin çizelgede sıraya koyulmasıyla daha net bir şekilde ortaya çıkmaktadır. İlerleme oranı parametresinin kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülük sonuçları üzerinde diğer iki parametreye göre daha belirleyici olduğu sonuçlardan görölmektedir.

Yüzey pürüzlülük değeri ilerleme oranının bir sonucu olarak değişiklik gösterdiği yapılan çalışmalarda da ortaya koyulmuş bir ifadedir (Altın, 2005; akır, 2006). En büyük ilerleme oranı parametrelerinde yapılan deneylerden en yüksek pürüzlülük değeri elde dilmiştir. Bununla birlikte aynı parametrelerde yine en yüksek kesme kuvveti değerlerine ulaşılmıştır. Bu sonuçlar ışığında artan ilerleme oranı ile birlikte kaldırılan talaş hacminin artması kesme kuvveti değerlerini arttıran bir durumdur ve literatürde de benzer sonuçlarla karşılaşılmıştır (Ezugwu vd., 1998). Elde edilen deney sonuçlarını incelediğimizde elde edilen en yüksek iki kesme kuvvetleri değerleri yine aynı kesme parametrelerinde elde dilmiştir. Tüm bu parametreler arasındaki ilişkilerin sonuçlar üzerindeki şekilsel ifadesinin net anlaşılması için şekil 4.1’de grafik hainde verilmiştir.

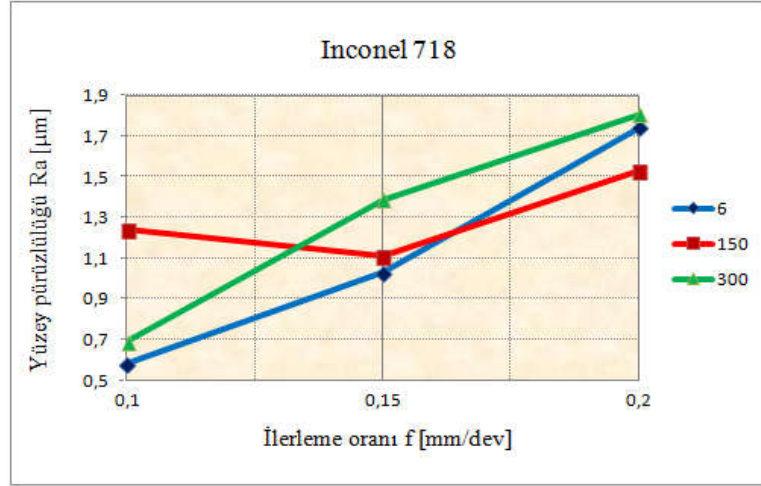
şekil 4.1’de esas kesme kuvveti F_c [N]’nin ilerleme oranı f [mm/dev]’e göre hesaplanan değişimi verilmiştir. Burada göröldüğu gibi ilerleme oranındaki artış ile esas kesme kuvvetinde artış meydana gelmektedir. İlerleme hızındaki artış ile birim zamanda kaldırılan talaş miktarı arttığı için kesme kuvvetlerindeki artış literatüre paralel olarak beklenen bir durumdur (Arunachalam vd., 2004). Bunun yanı sıra izelge 4.1 incelendiğinde kesme hızındaki artış ile esas kesme kuvvetinde bir miktar azalma görölmektedir. Kesme hızının kesme kuvvetlerine olan bu etkisi, artan kesme hızıyla birlikte talaş kaldırma esnasındaki sıcaklığın artmasına bağlanabilir. Birincil ve ikincil deformasyon bölgelerinde kesme hızıyla birlikte artan sıcaklık, işlenen malzemenin akma mukavemetini düşürerek kesme kuvvetlerinde azalmaya sebep olur. Bunun sonucunda talaş oluşumu kolaylaşacağından kesme kuvvetlerinde düşüş meydana gelmektedir (etinalı, 2010).



Şekil 4.1. Esas kesme kuvveti F_c 'nin ilerleme oranına göre değişimi.

Tornalama işlemi sırasında en yüksek kesme kuvvetinin işparçasına teğet konumdaki ekseninde oluşması kesme mekanizmasının bir sonucudur (Braham vd., 2010; Abboud vd., 2013). Bu ifade Çizelge 4.1'deki sonuçlarla benzerlik taşımakta ve en yüksek kesme kuvveti değerleri teğetsel yönde oluşmaktadır. Radyal ve ilerleme yönündeki kesme kuvveti değerleri, esas kesme kuvveti değerlerine göre genel olarak daha düşük değerde ölçülmüştür. Ortaya çıkan bu durum beklenen bir sonuç olup hem deneysel hem de simülasyon sonuçlarında da elde edilmiştir.

Şekil 4.2'de iş parçasına ait R_a ; yüzey pürüzlülük değerinin ilerleme oranına; f [mm/dev] göre değişimi verilmiştir. Yüzey pürüzlülük değeri teorik olarak ilerleme oranı ve takım uç yarıçapının bir fonksiyonudur (Altıntaş, 2000). Genel olarak ilerleme oranı arttıkça yüzey pürüzlülüğü de artmaktadır (Devillez vd., 2011). Literatürde açıklanan bu ifadeleri destekler biçimde Şekil 4.3'den de görüldüğü gibi ilerleme oranı arttıkça yüzey pürüzlülük değeri de artmaktadır. Bunun yanı sıra Çizelge 4.1 incelendiğinde kesme hızının artışı ile R_a 'nın bir miktar azaldığı görülmektedir. Kesme hızının artması ile yüzey pürüzlülüğü iyileşmesinin, yüksek hızlarda artan sıcaklıktan kaynaklandığı ileri sürülmüştür (Ezugwu vd., 2005). Kesme hızındaki artışa bağlı olarak, yüzey pürüzlülüğündeki iyileşme, beklenen bir özellik olup yüzey pürüzlülüğünü iyileştirmek için kesme hızının artırılması, literatürde önerilen en yaygın yöntemlerden biridir.



Şekil 4.2. Yüzey pürüzlülüğü; Ra'nın ilerleme oranına göre değişimi.

4.1.1.1. Kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülük sonuçları için varyans analizi

Varyans analizi ile hangi işlem üzerinde hangi faktörlerin ne derecede etkili oldukları istatistiki olarak ortaya konur. Varyans analizinde amaç, incelenen faktörlerin, kaliteyi ölçebilmek için seçilen çıktı değerlerini ne oranda etkilediklerini ve farklı seviyelerin nasıl bir değişkenliğe neden olduklarını ortaya koyabilmektir. Ayrıca elde edilen sonuçların istatistikî olarak güvenilirliği de test edilir (Çetin, 2010).

Deneyler sonucunda kesme parametrelerine bağlı olarak elde edilen kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü değerleri için Design Expert paket programını kullanarak varyans analizleri yapılmıştır. Çizelge 4.2'den 4.5'e kadar deney sonuçlarının varyans analizi bulguları gösterilmiştir. Çizelgelerdeki p değerleri deney parametrelerinin ve parametreler arasındaki etkileşimlerin fiziki ve istatistiki öneme sahip olup olmadığını belirtmektedir. %95 güvenilirlik seviyesinde p değerinin 0.05 değerine eşit ya da küçük olması, ilgili parametrenin deney çıktıları üzerinde fiziki ve istatistiki öneme sahip olduğunu belirtmektedir (Kartal, 2000).

Çizelge 4.2'de deneyler sonucu elde edilen esas kesme kuvvetine ait ANOVA analizi bulguları görülmektedir. Analiz sonucunda kesme hızı (V_c), ilerleme oranı (f) ve soğutma sıvısı basıncı (P) için hesaplanan p değerleri kesme hızı için $0,0035 (35 \cdot 10^{-4})$, ilerleme oranı için $0,0001 (1 \cdot 10^{-4})$ ve soğutma basıncı için $0,0208 (208 \cdot 10^{-4})$ değerleri hesaplanmıştır. Bu sonuçlar %5 (0.05)'den küçük olduğu için bu faktörlerin

esas kesme kuvveti üzerinde istatistiki ve fiziki öneme sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu sıralamaya göre rakamlardan da anlaşılacağı üzere kesme kuvveti üzerinde en fazla belirleyici etkiye sahip parametrenin ilerleme değeri (f) olduğu açık bir şekilde görülmektedir.

Çizelge 4.2. Esas kesme kuvveti (Fc) için ANOVA bulguları

Fc					
	Kareler toplamı	Serbestlik derecesi	Kareler ortalaması	F değeri	p
Model	338039	3	112679,6	377,75	0.0001
Vc	8015,42	1	8015,415	26,8711	0.0035
f	326713	1	326713,34	1095,28	0.0001
P	3310,04	1	3310,0357	11,0967	0.0208
Hata	1491,46	5	298,2913		
Toplam	339530	8	112679,6		

Çizelge 4.3’de Benzer olarak deneyler sonucu elde edilen radyal kuvvete ait ANOVA analizi bulguları görülmektedir. Analiz sonucunda sadece ilerleme oranı (f) için hesaplanan p değeri 0.05’den küçük olduğu için bu faktörün radyal kuvvet üzerinde istatistiki ve fiziki öneme sahip olduğu tespit edilmiştir. Diğer parametreler için hesaplanan p değeri 0.05’den büyük olduğu için, bu parametrelerin radyal kuvvet üzerinde kayda değer bir etkisinin olmadığı görülmektedir.

Çizelge 4.3. Radyal kuvvet (Fp) için ANOVA bulguları

Fp					
	Kareler toplamı	Serbestlik derecesi	Kareler ortalaması	F değeri	p
Model	2975,92	3	991,97269	6,34884	0.0370
Vc	354,202	1	354,20167	2,26697	0.1925
f	2616,68	1	2616,6817	16,7473	0.0094
P	5,03473	1	5,0347338	0,03222	0.8646
Hata	781,224	5	156,24483		
Toplam	3757,14	8			

Çizelge 4.4’de deneyler sonucu elde edilen ilerleme kuvvetine ait ANOVA analizi bulguları görülmektedir. Çizelge 4.3’e benzer olarak sadece ilerleme oranının bu parametre üzerinde etkili olduğu p değerinden anlaşılmaktadır.

Çizelge 4.4. İlerleme kuvveti (Ff) için ANOVA bulguları

Ff					
	Kareler toplamı	Serbestlik derecesi	Kareler ortalaması	F değeri	p
Model	2878,07	3	959,3565	5,46225	0.0491
Vc	433,5	1	433,5	2,4682	0.1770
f	2424,06	1	2424,06	13,8018	0.0138
P	20,5095	1	20,509506	0,11677	0.7465
Hata	878,17	5	175,6341		
Toplam	3756,24	8			

Çizelge 4.5’de deneyler sonucu elde edilen yüzey pürüzlülüğüne ait ANOVA analizi bulguları görülmektedir. Bu sonuçlara göre ilerleme oranı (f) için hesaplanan p değeri %5 sınırının altında olduğu için yüzey pürüzlülüğü değerinin ortaya koyulmasında tek etkili işleme parametresi olarak karşımıza çıkmaktadır.

Çizelge 4.5. Yüzey pürüzlülüğü (Ra) için ANOVA bulguları

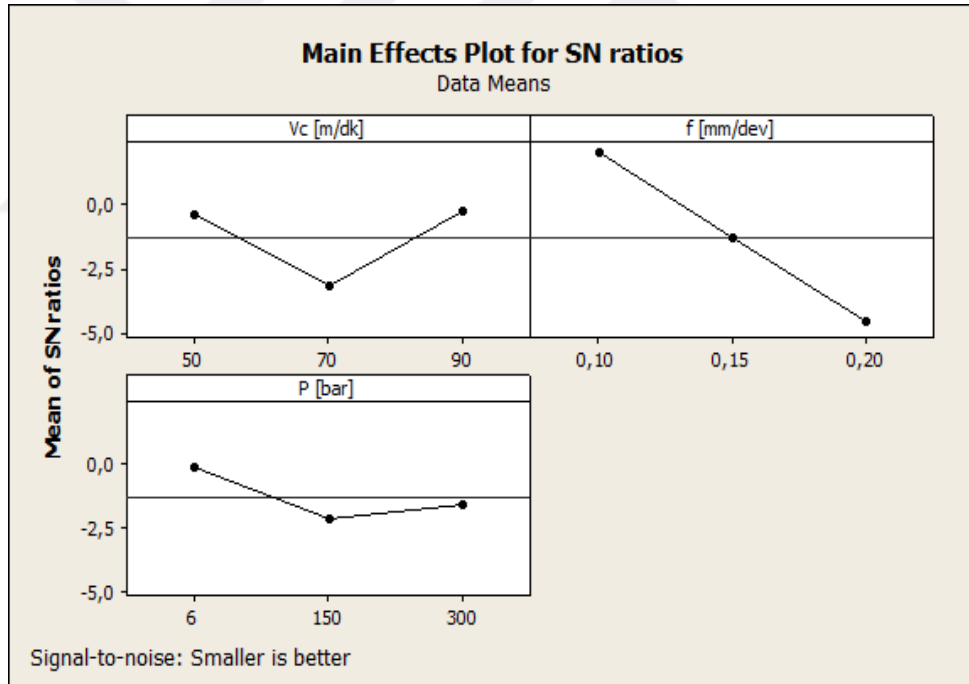
Ra					
	Kareler toplamı	Serbestlik derecesi	Kareler ortalaması	F değeri	p
Model	1,15407	3	0,384691	6,13144	0.0396
Vc	0,01042	1	0,010417	0,16603	0.7005
f	1,09511	1	1,095113	17,4546	0.0087
P	0,04854	1	0,048544	0,77373	0.4193
Hata	0,3137	5	0,062741		
Toplam	1,46778	8			

4.1.1.2. Deney sonuçlarının taguchi optimizasyonu

Taguchi deney tasarım metodunda kalite karakteristiklerinin ölçülmesinde ve değerlendirilmesinde kullanılan ölçüt S/N oranıdır. Sinyal (S), sistemin verdiği ve ölçülmek istenen gerçek değerdir. Gürültü (N) ise ölçülen değer içerisindeki kontrol edilemeyen, istenmeyen faktörlerin payını gösterir (Çetin, 2010).

Bu optimizasyon yönteminde yukarıda sözel olarak açıklamaya çalışılan hangi parametrenin çıktı üzerindeki belirleyici ağırlığını görsel ve grafiksel olarak ortaya koyma, doğrulama yöntemidir.

Deney sonuçlarında ortaya çıkan verilerde en net olan sonuç yüzey pürüzlülüğü değeridir. Bu sonuçların değerlendirilmesinde yüzey pürüzlülüğü değerinin en küçük değeri bizim için istenen optimum değer olacağından daha önce Eşitlik 1.33’de ifade edilen en küçük en iyi yaklaşımına göre hesaplanan S/N oranı kullanılmıştır. Şekil 4.3’de talaş kaldırma işleminde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini göstermektedir. Her faktör için hesaplanan S/N oranının en yüksek olduğu değer, en iyi deney sonucunu (yüzey pürüzlülüğünün en düşük olduğu deney sonucunu) göstermektedir. Kesme parametrelerinin eğimlerinden de hangi parametrenin kesme, ilerleme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkili olduğunu analiz edebiliriz. Grafikteki eğimi fazla olan parametre, çıkış parametresi üzerinde daha fazla etkiye sahiptir. Şekil 4.3’e göre ilerleme oranı (f) yüzey pürüzlülüğü üzerinde kesme hızı (Vc) ve soğutma sıvısı basıncından (P) daha fazla etkiye sahiptir.



Şekil 4.3. Ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin S/N oranları

Şekil 4.3’de görüldüğü gibi deney parametrelerinin S/N oranlarının maksimum olduğu koşullarda, yani Vc= 90 m/dk, f= 0.1 mm/dev ve P =6 bar deney şartlarında minimum yüzey pürüzlülüğü elde edilmektedir. Bu minimum yüzey pürüzlülüğü değeri Taguchi tahmini ile 0.56 μm olarak hesaplanmıştır. Teorik olarak elde edilen minimum yüzey pürüzlülüğü değerini doğrulamak için belirlen optimum deney

şartlarında bir adet doğrulama testi yapılmıştır. Yapılan doğrulama testi sonucu elde edilen kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü değeri Çizelge 4.6’da görülmektedir.

Çizelge 4.6. Doğrulama testi sonuçları

V_c [m/dk]	f [mm/dev]	P [bar]	F_c [N]	F_p [N]	F_f [N]	R_a [μm]
90	0.1	6	631,6	128,3	129,6	0.54

Çizelge 4.6’da görüldüğü gibi minimum yüzey pürüzlülüğünü elde etmek için optimum deney şartlarında teorik olarak hesaplanan yüzey pürüzlülüğü değeri doğrulama testi sonucu elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerine oldukça yakındır.

4.1.1.3. Deney sonuçları için regresyon analizi

Regresyon analizi, aralarında sebep-sonuç ilişkisi bulunan iki veya daha fazla değişken arasındaki ilişkiyi, tahminler ya da kestirimler yapabilmek amacıyla matematiksel bir model ile karakterize eden bir istatistik analiz tekniğidir. Verilen noktaları temsil eden en iyi eğriyi bulma işleminde genellikle en küçük kareler yöntemi kullanılır. En küçük kareler yöntemi, hataların kareleri toplamı minimum olacak şekilde bir eğri denklemi bulma esasına dayanmaktadır (Çetin, 2010; Kartal, 2000).

Regresyon analizi sonucu sırasıyla esas kesme kuvveti, radyal kuvvet, ilerleme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü için 0.99, 0.79, 0.76 ve 0.78 doğruluk oranlarında aşağıdaki denklemler elde edilmiştir.

$$F_c = 305.84 - 1.82 \cdot V_c + 4667 \cdot f + 0.15 \cdot P \quad (4.1)$$

$$F_p = 117.53 - 0.38 \cdot V_c + 417.66 \cdot f + 0.006 \cdot P \quad (4.2)$$

$$F_f = 120.7 - 0.42 \cdot V_c + 402 \cdot f + 0.012 \cdot P \quad (4.3)$$

$$R_a = 0.006 - 0.002 \cdot V_c + 8.54 \cdot f + 0.0006 \cdot P \quad (4.4)$$

4.1.2. Inconel 718'in farklı işleme parametrelerindeki talaş geometrileri

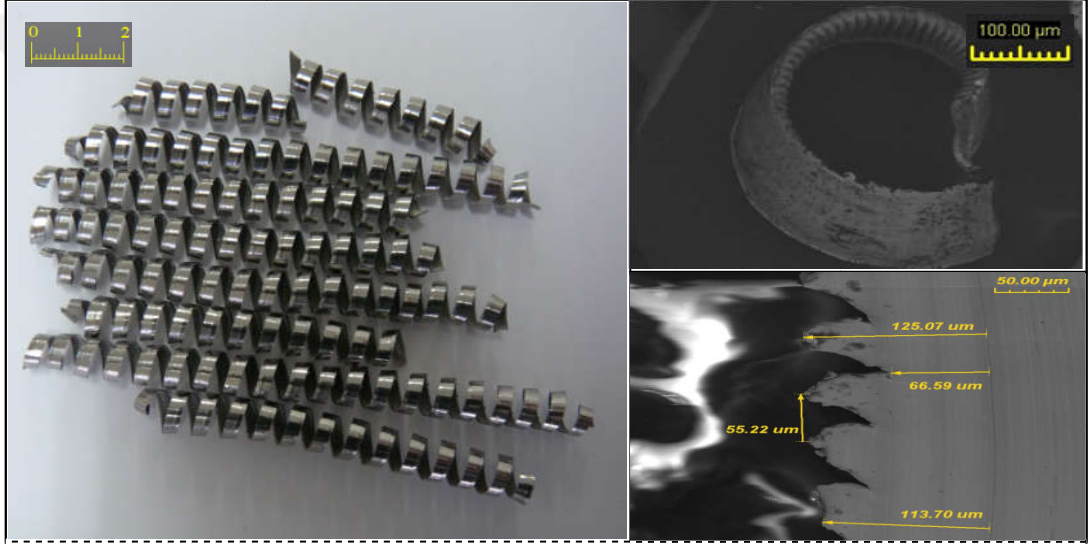
Takım-talaş arayüzüne yüksek basınçta soğutma sıvısı gönderilmesiyle talaş geometrilerinde ciddi değişiklikler meydana gelmektedir. İşlenebilirlik testleri sırasında talaşlar toplanarak yüksek basınçlı soğutma sıvısının talaş şekillerine etkisi incelenmiştir. Şekil 4.4'de deneyler sonucu elde edilen talaşların genel görünüşü verilmiştir. Burada özellikle yüksek basınç değerlerinde soğutma basıncının talaş üzerindeki mekanik etkisinden dolayı sürekli talaş yerine kesikli talaşlar meydana geldiği yapılan çalışmalarla (Ezugwu vd., (2004) tutarlılık göstermektedir. Bu da talaşın kesme bölgesinden tahliyesini kolaylaştırarak iş parçasına sarması engellenmiş oluyor (Vosough vd., 2005). Ayrıca takım-talaş temas uzunluğu azaltılarak kesme bölgesindeki sürtünme katsayısı önemli ölçüde azalmaktadır (Tali, 2010). Takım talaş temas arayüzünün talaş uzunluğundan dolayı uzun olması sıcaklığı ve beraberinde krater aşınmasını getireceğinden istenmeyen bir durumdur.

Talaş oluşumunun incelenmesi amacıyla ortak parametreler olarak 70 m/dak kesme hızı, 2 mm kesme derinliği, 0,15 mm/dev ilerleme oranı ve üç değişken soğutma basıncı (6, 150 ve 300 bar) kullanılmıştır. Burada amaç soğutma sıvısı basıncının talaş olumuna ne gibi bir katkısı olduğunu tespit etmektir. Aşağıdaki şekillerden de görüleceği gibi soğutma sıvısı basıncı artırıldığında kopan talaş boyutlarında net bir kısalma görülmektedir. Bu da basınçla birlikte kopan talaşın kesme bölgesinden hızlı bir şekilde uzaklaştığını açıklamaktadır. Elde edilen talaşlar taramalı elektron mikroskobu altında incelendiğinde oluşan talaş helislerinin soğutma sıvısı basıncının artmasıyla birlikte ters orantılı olarak daha küçük yarıçapta olduğu gözlenmiştir. Elde edilen bu sonuç Kramar ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmayla tutarlılık göstermektedir. (Kramar vd., 2009), Talaş oluşumunda meydana gelen segmentler (tabakalar) basınçla doğru orantılı olarak daha parlak ve boylarının daha uzun olduğu gözlenmiştir. Kopan talaşın parlak olmasının nedeni talaşın yanmadan koptuğunun bir göstergesi olduğu anlaşılmaktadır (Sharma vd., 2009). En düşük soğutma sıvısı basıncı olarak kullanılan 6 bar basınçta talaş segmentlerinde gelişigüzel boyutlanmalar ve süreksiz bir geometri olduğu gözlenmiştir. Yüksek basınçlı soğutmanın olumlu etkisi talaş geometrisinden net olarak gözlenmiştir.

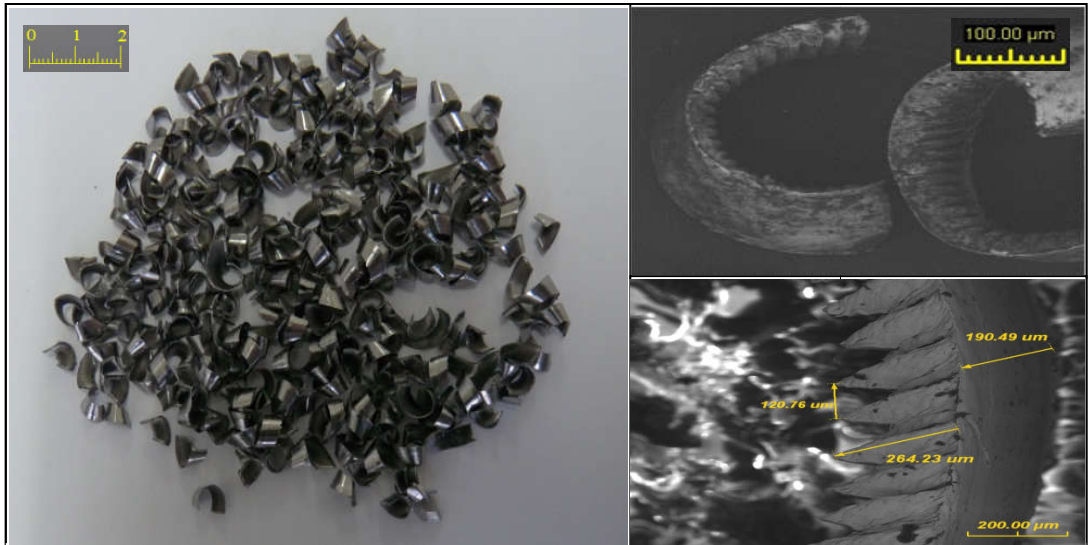
Şekil 4.4'de üç farklı soğutma sıvısı basıncında işlenen Inconel 718 süper alaşımdan elde edilen talaşlar ve elektron mikroskobu altındaki görüntüleri verilmektedir.



6 bar (Geleneksel) -Inconel 718



YBS 150 bar -Inconel 718



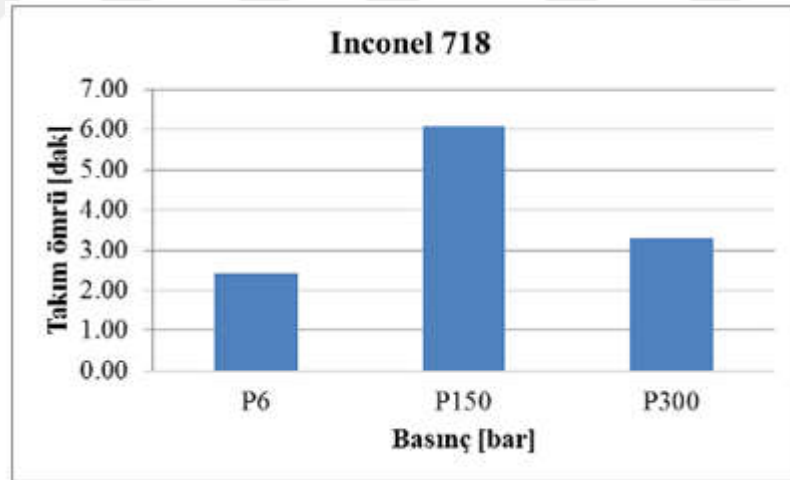
YBS 300 bar -Inconel 718

Şekil 4.4. Farklı soğutma sıvısı basınçlarında oluşan talaş geometrileri.

4.1.3. Inconel 718'in işlenmesinde takım aşınması ve SEM analizi

Bu bölümde Inconel 718 süper alaşımın işlenmesinde takım aşınma bulguları yer almaktadır. Aşınma deneylerinde talaş oluşumunun da incelendiği parametreler dikkate alınarak; $V_c=70$ m/dak. kesme hızı, $f=0.15$ mm/dev ilerleme oranı, $a=2$ mm sabit kesme derinliği ve üç farklı soğutma sıvısı basınç değerleri kullanılmıştır.

Deneyler süresince kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü kaydedilerek aşınmaya bağlı olarak değişimleri incelenmiştir. Testler sonucunda sabit kesme parametrelerinde 6, 150 ve 300 bar basınç değerleri için takım ömürleri saptanmıştır. Kesici takım aşınma kriterleri TS 10329 standardına göre yan yüzün aşınan kısmının ortalama genişliği $VBB=0,3$ mm, azami genişliği $VBB_{max}= 0,6$ mm ve aşınma çentiğinin uzunluğu $VB_N=1$ mm olarak alınmıştır. Deneyler sırasında kesici takım bu aşınma kriterlerinden herhangi birine ulaştığında takım ömrünü tamamladığı kabul edilmiştir. Şekil 4.5'de Inconel 718 süper alaşımı ile yapılan deneyler sonucunda elde edilen takım ömürleri verilmiştir.



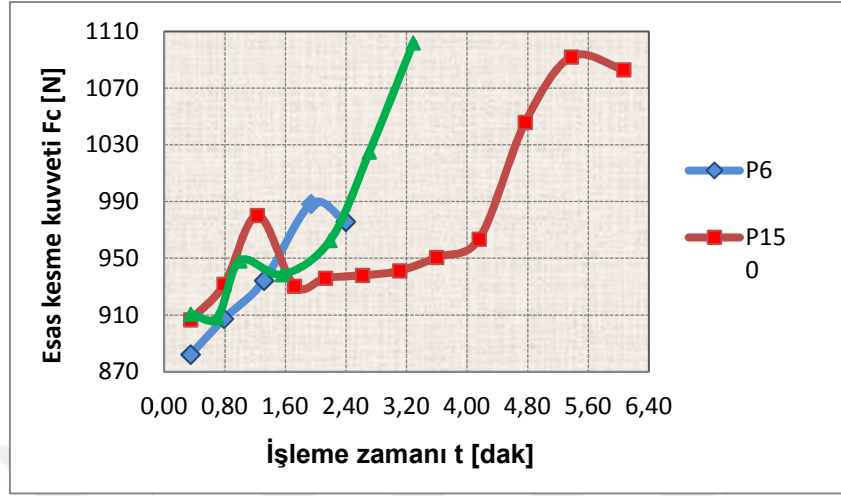
Şekil 4.5. Inconel 718 süper alaşımı için takım ömürleri

Şekil 4.5'den de görüldüğü gibi YBS şartlarında işlemede takım ömrü değerleri geleneksel soğutmaya göre daha yüksek olmaktadır. Takım ömrü $P=150$ bar ve $P=300$ bar basınç değerinde geleneksel soğutmadaki takım ömrüne göre sırasıyla yaklaşık % 153 ve % 37 oranlarında artış göstermektedir.

Yüksek sıcaklık ve aşınma direnci gibi üstün özelliğe sahip işlenmesi zor malzeme grubundaki Inconel 718 süper alaşımdan talaş kaldırmadaki temel problem kesme esnasında takım-talaş ara yüzünde meydana gelen yüksek sıcaklıktır. Bu sıcaklık kesme bölgesine yüksek basınçlı soğutma sıvısı uygulanması ile önemli ölçüde azalmaktadır. Bu da termal yolla meydana gelen aşınmaları minimize etmektedir (Ezugwu, 2004). Kesici takımda meydana gelen aşınmalar belli bir kritik basınca kadar azalarak takım ömrü artmaktadır (Nandy vd., 2009). Fakat 150 bar basınç değerinden sonra soğutma sıvısı basıncının 300 bar çıkarılması ile takım ömründe bir azalma meydana gelmektedir. Bu durum; Ezugwu'nun 2004'te yayınladığı çalışmasında berzer kesme parametreleri ile çeşitli YBS basınçlarında elde ettiği sonuçları değerlendirmesi ile açıklanabilir. Yaptığı değerlendirmede geleneksel soğutmadan başlayarak 150 bar basınca kadarki soğutma basıncı değerlerinde takım ömrü değerlerinde olumlu bir artış kaydederken 150 bardan sonraki 203 barda azalan bir takım ömrü değeri elde etmiştir. Bunun sonucunda 150 bar basınç değerinin beklentileri desteklerken bir üst basınç değeri olan 203 bar'ın kritik basınç değeri olarak ifade etmiş ve bu basınç değerinin altında soğutma durumunda takım ömründe artış sağlanabileceğini ifade etmiştir. Bu ifadelerden faydalananak kendi deneylerimde kullandığım $V_c=70$ m/dk, $f=0.15$ mm/dev ve $a=2$ mm değerlerinin ortak alındığı kesme işlemlerinde 6, 150 ve 300 bar basınç değeri ile yapılan işlemlerde ilk iki basınç değerinde olumlu takım ömrü artışı sağlanırken 300 bar basınç değerinde ise kesme bölgesindeki kritik basınçtan daha yüksek basınç uygulandığı için takım-talaş temas bölgesinde oluşan sıcaklığın giderilememesi sebebiyle takımın daha çabuk aşınmasına yol açmaktadır. Dolayısıyla bu durum, Ezugwu ve Bonney'in 2004 yılında yüksek basınç şartlarında Inconel 718 malzemesi ile gerçekleştirdiği deneylerde elde ettiği sonuçlar ile açıklanabilir. Genel olarak karşılaşılan benzer çalışmalarda (Kamruzzaman vd. 2008), yüksek basıncın etkisiyle artan takım ömrü değerlerinde bir artış görülmekle birlikte sıcaklıkta da bir azalma elde edilmektedir.

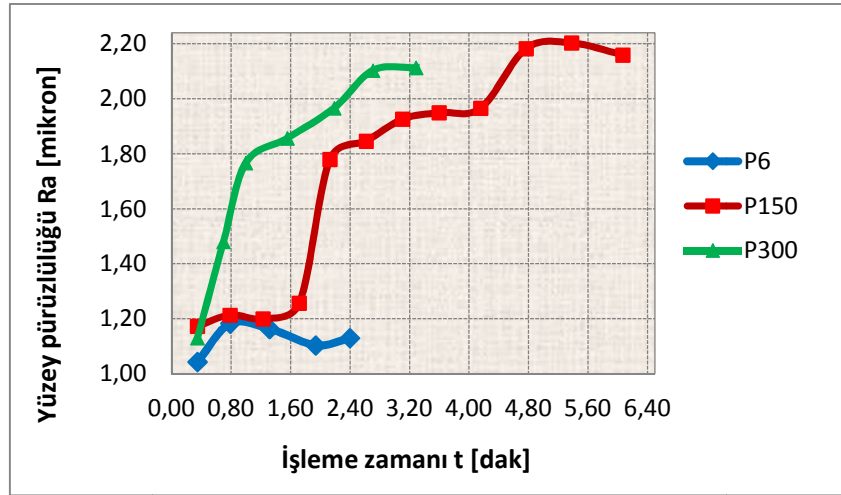
Şekil 4.6'da esas kesme kuvvetlerinin işleme zamanı ile değişimi görülmektedir. Esas kesme kuvveti işleme süresi boyunca zamanla oluşan aşınma miktarındaki artışla kesme kuvvetinde de bir artış söz konusudur. Şekil 4.5'i destekler nitelikte 300 bar soğutma basıncında takım ömrü yüksek basıncın etkisiyle talaş çarpması

sonucunda 150 bar basınca göre daha küçük bulunmuştur. Yalnız bu durum geleneksel soğutma basıncı değerinden daha fazla bir zamana karşılık gelmektedir.



Şekil 4.6. Esas kesme kuvveti; Fc'nin işleme zamanı ile değişimi

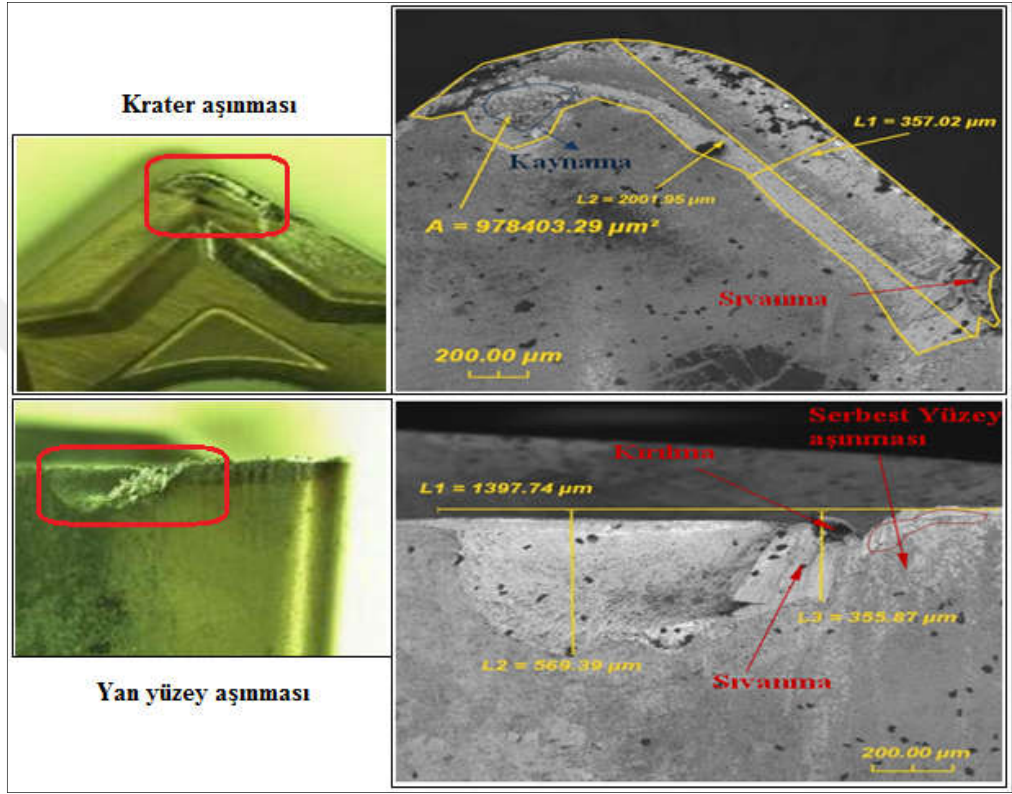
Şekil 4.7'de yüzey pürüzlülüğünün işleme zamanı ile değişimi görülmektedir. Yüzey pürüzlülüğü işleme süresi boyunca aşınmadan dolayı tüm basınç seviyelerinde genel olarak bir artış göstermektedir.



Şekil 4.7. Yüzey pürüzlülüğü; Ra'nın işleme zamanı ile değişimi.

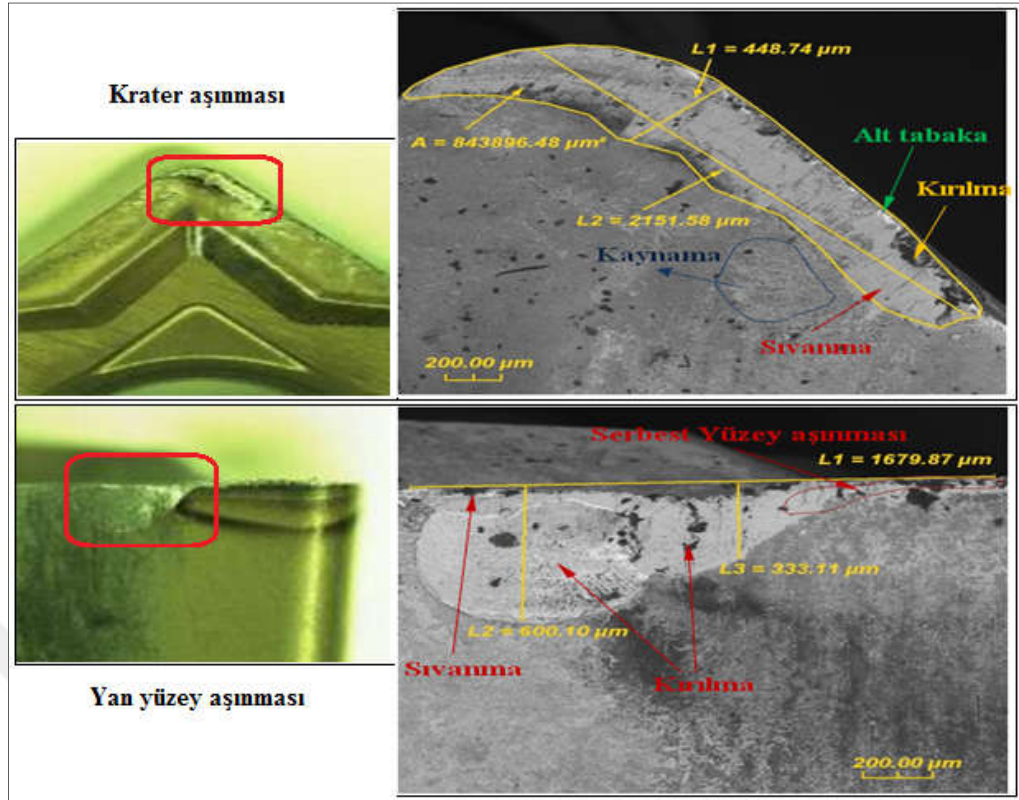
Şekil 4.8'de 6 bar basınç değerinde kesici takımdaki yan ve üst yüzey aşınma durumları görülmektedir. Kesici takımdaki aşınma süreci şu şekilde gözlenmiştir; ilk 1.32 dakikaya kadar çentik aşınması gözlemlenmiş ve bu süreden sonra kesmeye

devam edildiğinde kesici kenarda aşınma artarak yan yüzey aşınması meydana gelmekte ve takım ömrünü tamamlamaktadır. Ayrıca düşük soğutma basıncı etkisiyle krater bölgesinde yüksek sıcaklığın bir sonucu olarak kaynama ve kırılmalar meydana gelmiştir. En düşük takım ömrünü açıklar nitelikte en fazla aşınma alanına ($0,978 \text{ mm}^2$) 6 bar soğutma basıncında karşılaşılmıştır.



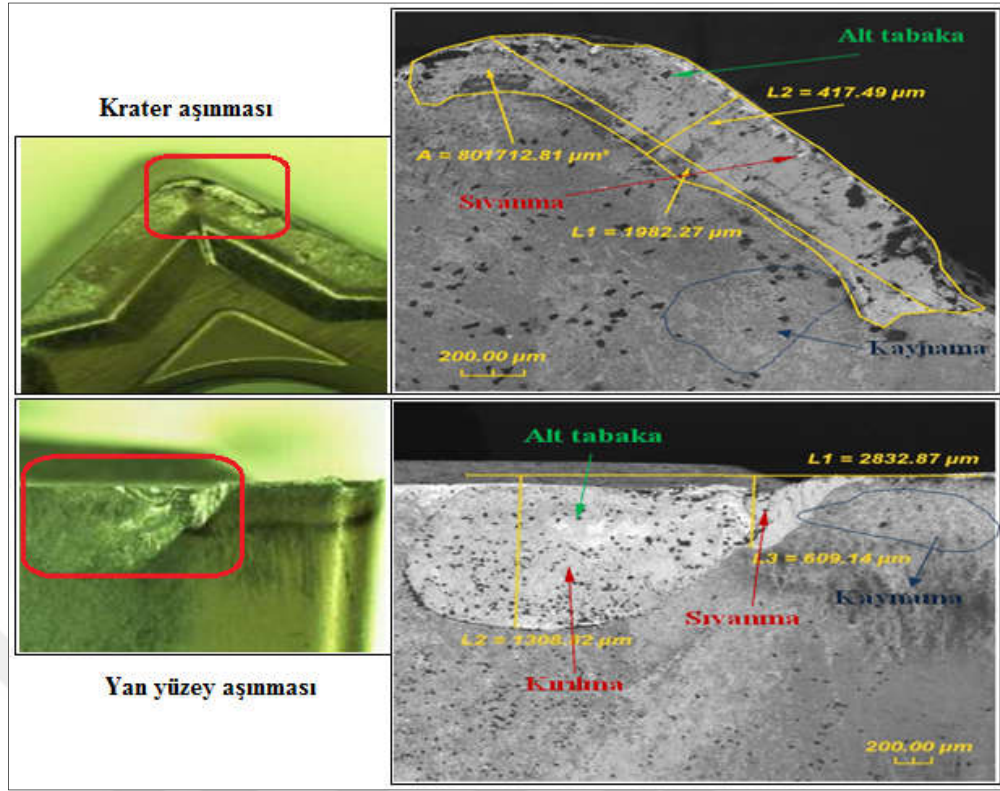
Şekil 4.8. 6 bar soğutma basıncında takım yan yüzey ve krater aşınmaları.

Şekil 4.9’da 150 bar soğutma sıvısı basıncı değerinde kesici ucun yan yüzey ve krater aşınmaları görülmektedir. Kesici takımdaki aşınma süreci şu şekilde gözlenmiştir; Kesici takım ucunda sıvanma ve kırıklarla başlayan deformasyon malzemede alt tabakaya ulaşılan kadar devam ettiğini göstermektedir. Kraterdeki aşınma yüzey alanı ($0,843 \text{ mm}^2$) geleneksel soğutma durumundaki alandan daha az miktarda oluşmuştur. Bu da Kramar ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada ortaya çıkan sonuçlarla uyumluluk göstererek talaşın küçük parçalar halinde koparak uzaklaşmasının olumlu bir etkisi olarak değerlendirilebilir (Kramar vd., 2013).



Şekil 4.9. 150 bar soğutma basıncında takım yan yüzey ve krater aşınmaları.

Şekil 4.10'da 300 bar soğutma sıvısı basıncı değerinde kesici ucun yan yüzey ve krater aşınma durumları görülmektedir. Yan yüzey aşınma mesafesi incelendiğinde yaklaşık olarak 1,3 mm aşınma miktarı ile 150 bar'a göre daha fazla aşındığı gözlenmektedir. Bu durum yüksek basıncın etkisiyle kopan talaşın takım ve işparçası yüzeyine çarpması sonucu aşınmayı ve yüzey pürüzlülüğünü arttıran bir etki olarak bu sonucu ortaya çıkardığı söylenebilir. Benzer şekilde bu ifade 300 bar soğutma durumundaki yüzey pürüzlülüğü değerleri ile de desteklenmektedir. Bu değerlendirmeye ek olarak Ezugwu, 2004'te ifade edilen kritik basıncın aşılması ile ortaya çıkan olumsuz takım ömrünün oluşması sonucu da ifade edilebilir.



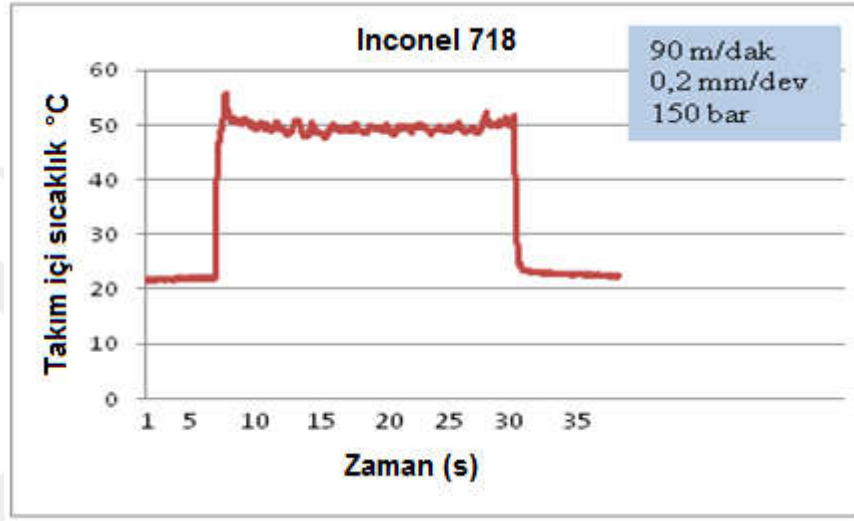
Şekil 4.10. 300 bar soğutma basıncında takım yan yüzey ve krater aşınmaları.

4.1.4. Inconel 718'in işlenmesinde oluşan sıcaklığın deney ve simülasyon sonuçları

Tezin bu bölümünde işleme anında kesme bölgesinde ortaya çıkan sıcaklığın deney sonuçları yer almaktadır. Deney parametreleri olarak diğer testlerde kullanılan Taguchi L9 deney tasarımında belirlenen işleme parametreleri kullanılmıştır (Çizelge 4.7). Sıcaklık ölçümü takım içerisine ve kesme kenarına 1 mm uzaklıkta açılan ceplere termokupl yerleştirilmesiyle eş zamanlı olarak yapılmıştır. Kesme bölgesindeki sıcaklığın tespit edilmesinde soğutma sıvısından kaynaklanan buhar tabakası gibi sebeplerden dolayı ortamdaki sıcaklığın gözlenmesi imkansız olmaktadır. Bu gibi olumsuzluklardan dolayı literatürdeki benzer çalışmalar incelenmiş ve takım içi termokupl yöntemi sıcaklık ölçümünde tercih edilmiştir. Hesaplanan sıcaklık değeri takım içerisinde 1 mm mesafedeki bölgenin sıcaklığı olduğundan asıl önemli olan kesme bölgesi sıcaklığının tahmini için simülasyon sonuçlarından faydalanılmıştır. Bu tahminin yapılması için Şekil 4.11'de gösterilen maksimum termokupl sıcaklık değerinin aynı konumdaki simülasyon sonuçlarıyla

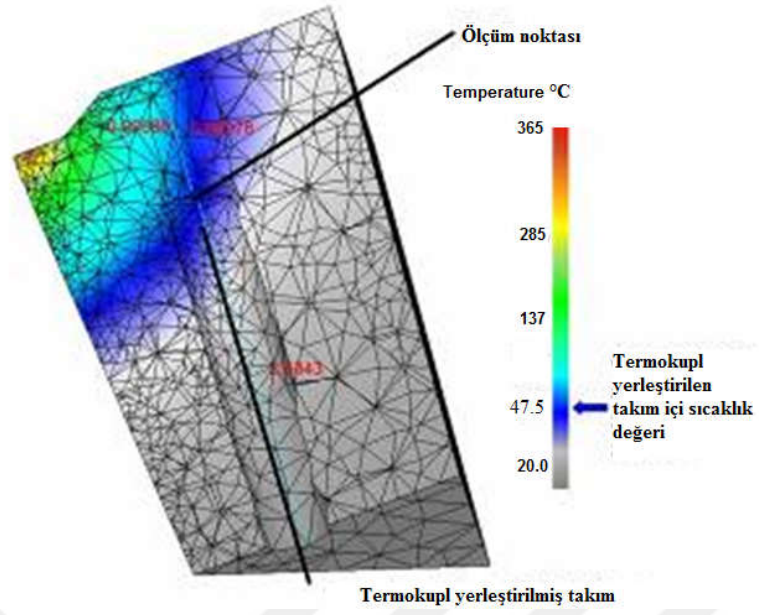
karşılaştırılmış ve sonuçların doğruluğu dikkate alınarak simülasyondaki kesme bölgesi sıcaklık tahminleri muhtemel sıcaklık değeri olarak kabul edilmiştir.

Şekil 4.11’de deney parametreleri içinde yer alan örnek bir takım içi sıcaklık sonucu verilmiştir. Burada maksimum sıcaklık değeri takım içerisinde ölçülen en yüksek sıcaklık değeri olarak kayıt edilmekte ve bu değer takım içi simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmaktadır.

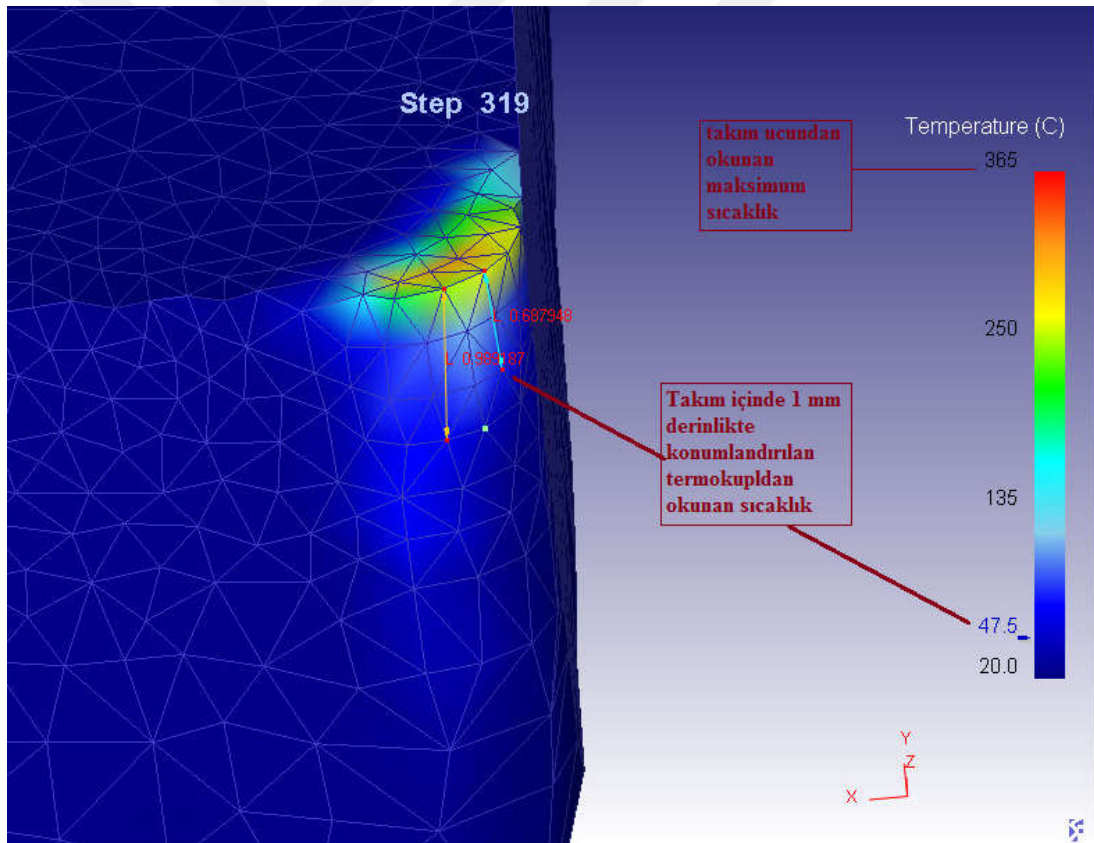


Şekil 4.11. Altı (6) numaralı kesme deneyi için takım içi maksimum sıcaklık değeri

Şekil 4.12 ve 4.13’de Deform 3D sonluelemanlar paket programıyla yapılan sıcaklık simülasyonu görülmektedir. Burada takım ve işparçası modellenmiş ve deney sistematığı simülasyonlara da uygulanmıştır. Kesici takımın içerisine yerleştirilen termokuplun bulunduğu mesafede simülasyon sıcaklıkları hesap edilmiştir. Bu simülasyon ile elde edilen sıcaklık değerleri ve takım ucu maksimum sıcaklık değerleri deneysel olarak elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.12. Takım içine yerleştirilen termokuplun gösterimi



Şekil 4.13. Sekiz (8) numaralı kesme deneyi için takım içi maksimum sıcaklık simülasyonu.

Çizelge 4.7. Kesme anında oluşan sıcaklığın deney ve simülasyon sonuçları

Deney	Inconel 718			Deney	Simülasyon	
	P [bar]	f [mm/dev]	Vc [m/dak]	Takım içi maks. sıcaklık [°C]	Takım içi maks. sıcaklık [°C]	Kesme bölgesi maks. sıcaklık [°C]
1	6	0,1	50	68.5	66	891
2	6	0,15	90	77	82.1	1048
3	6	0,2	70	75.2	71	917
4	150	0,1	70	47.9	50.3	506
5	150	0,15	50	45	47.9	499
6	150	0,2	90	55.5	51.3	553
7	300	0,1	90	39.2	44	384
8	300	0,15	70	44.1	47.5	365
9	300	0,2	50	36.7	40.3	352

Çizelge 4.7’de deney ve simülasyon sıcaklık sonuçları bir arada verilmiştir. Takım içi sıcaklık değerleri hem deney hem de simülasyon yoluyla hesaplandığında en yüksek sıcaklık değerlerinin ölçüldüğü ortak parametre değerleri soğutma basıncının 6 bar olarak seçildiği deneylerdir. Buradan da çok açık bir şekilde görüldüğü gibi kesme bölgesinde oluşan sıcaklığın azaltılmasında soğutma sıvısının basıncının büyük bir etkisi vardır. Deneysel olarak takım içi sıcaklığın karşılık geldiği simülasyon sonuçlarının birbirine yakın olması, kesme sıcaklığının olası değerlerini de tahmin etmemizi sağlamaktadır. Benzer bir incelemeyle en düşük sıcaklığın en yüksek soğutma basıncında oluştuğu ifade edilebilir.

Deney parametrelerindeki farklılıklar göz önüne alındığında soğutma sıvısı basıncı ve kesme hızı değerleri sıcaklığın oluşumunda önemli etkiye sahip olduğu gözlenmiştir. Buna göre geleneksel soğutma şartlarında (6 bar) kesme işleminde sıcaklığın belirgin bir şekilde daha yüksek değerde ölçülmüş ve bu simülasyon sonuçlarıyla da doğrulanmıştır. Soğutma sıvısı basıncı ile birlikte takım ucu maksimum sıcaklık değerlerinde en düşük değere inildiği yine simülasyonlardan hesaplanmıştır. En yüksek kesme bölgesinde oluşan sıcaklığa 1048 °C olarak hesap edilen 6 bar soğutma ve 90 m/dak kesme hızında erişilmiştir. Hem deneysel hem de simülasyonlarda en düşük sıcaklık değerine (352°C), 300 bar soğutma sıvısı basıncı ve 50 m/dak kesme hızı değerlerinde ulaşılmıştır. Burada aynı basınç değeri için

kesme hızı değeriyle birlikte yine sıcaklığın arttığı da gözlenerek literatürde ifade edilen sonuçları doğrular şekilde olduğu belirlenmiştir (Yaseen, 2012). Aynı soğutma sıvısı basıncında farklı kesme hızlarında farklı sıcaklık değerine ulaşılması kesme hızı parametrelerinin soğutma basıncından sonra ikinci önemli parametre olduğunu ortaya koymuştur. İlerleme oranı değeri bu iki parametre kadar etkili olmadığı yine deney ve literatür (Courbon vd., 2011; Özek vd., 2004; Khoda vd., (2007) bilgilerinden elde edilen sonuçlarla benzerlik göstermektedir. Bu da beklenen bir durum olmakla birlikte soğutma sıvısı basıncının önemini ortaya koymaktadır.

4.1.5. Inconel 718'in işlenmesinde oluşan kalıntı gerilmenin deney ve simülasyon sonuçları

Tez çalışmasının bu kısmında 3. Bölümde anlatılan materyal ve yöntemler uygulanarak kalıntı gerilme analizi ve simülasyon sonuçlarına ulaşılmıştır. Kalıntı gerilme değerlerinin deneysel olarak hesaplanması amacıyla X-ışını kırınım yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemin tercih edilmesinin sebebi hasarsız bir muayene yöntemi olması ve 5µm gibi hassas mesafelerde atomik boyuttaki gerilme-gerinme değişimlerinin gözlenmesi, analizlerinin yapılması amacıyla en çok kullanılan yöntem olmasıdır.

Kalıntı gerilme analizleri Atılım üniversitesi metal şekillendirme mükemmeliyet merkezi laboratuvarında bulunan GE – Seifert 3003 PTS X-ışını kırını cihazında 0.2 mm'lik kolimatör kullanılarak noktasal olarak gerçekleştirilmiştir. Numuneleri hazırlama aşamasında yüzey bütünlüğü değerlendirmesinde ortak payda olması açısından Ra yüzey pürüzlülük değeri en az olduğu parametrenin belirlendiği anova analizindeki sonuçlar kalıntı gerilme analizinde ölçüm parametresi olarak belirlenmiştir. Bu değer 90 m/dak kesme hızı ve 0,1 mm/dev ilerleme oranı değerleridir. Soğutma sıvısı basıncı olarak her üç basınç değeri de analizlerde ayrı ayrı deney ve simülasyon ile hesaplamaya dahil edilmiştir. Bu şekilde bir parametre belirlenmesindeki amaç; deney ve simülasyon sonuçlarına ulaşmanın hem uzun ve maliyetli olması hem de tez'de amaçlanan Yüksek basınçlı soğutma desteğinin katkısının temel araştırma konusu olmasıdır. Bunun için numuneler silindirik diskler halinde son işleme analiz yüzeyi korunarak XRD cihazına yerleştirilmiştir.

Analiz için cihaza yerleştirilen numunelerin hesabında; $\{2\ 2\ 0\}$ düzlemi içim yönelimli X-ışını elastik sabitleri literatürden $S1 = 1.25 \cdot 10^{-6}$ ve $0.5\ S2 = 5.88 \cdot 10^{-6}$ olarak tespit edilmiştir. Kırınım düzlemi pozisyonundaki kaymaları tespit etmek için parabol, ağırlık merkezi ve çapraz ilişkilendirme tekniklerinin hepsi ayrı ayrı kullanılmış. Nihai değerlendirmede en iyi korelasyon faktörü değerini veren ağırlık merkezi yöntemi sonuçları kullanılmıştır. Şekil 4.14’de gösterildiği gibi her üç basınçta işleme sonrası hazırlanan numuneler aşağıda belirlenen parametrelerle XRD cihazında analiz edilerek hesaplanmıştır.



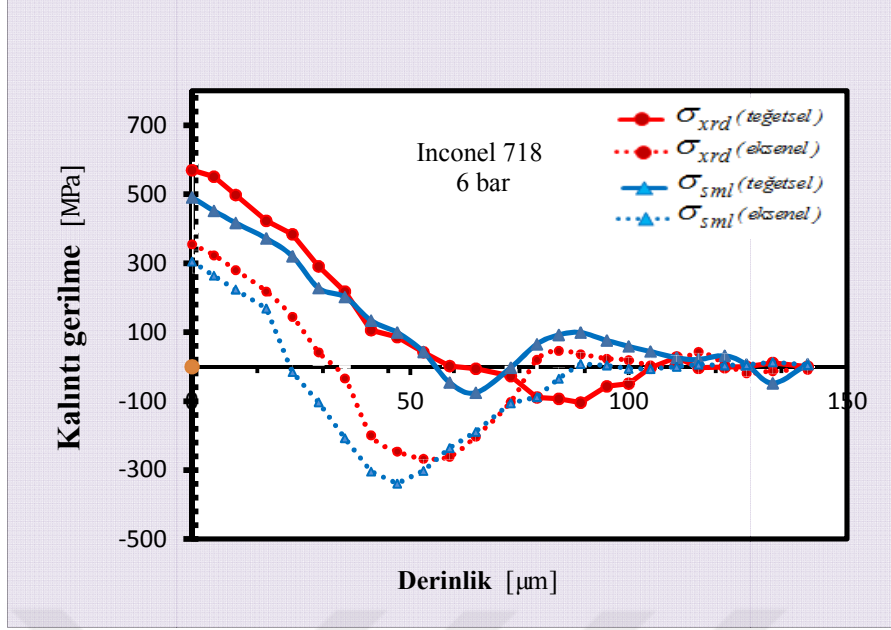
Şekil 4.14. Inconel 718’e ait farklı basınçta işlenen numuneler

Kalıntı gerilme değerinin yüzeyden ne kadar derinlikte ne oranda meydana geldiğinin tespit edilmesi için numune yüzeyinden her ölçüm sonrasında belli bir miktar parlatma yapılarak tabaka kaldırmak gerekmektedir. Çünkü bir defada x-ışını en fazla $5\ \mu\text{m}$ kadar derinliğe nüfuz edebilmektedir (Yelbay, H. İ., 2008), daha derinlerdeki gerilme-gerinme durumu için derinlik profili sağlanması gerekmektedir. Derinlik profili elde etmek için Struers Lectropol elektro-kimyasal parlatma cihazı kullanıldığını daha önceki yöntem kısmında açıklanmıştır. Yapılan gerilme analizi için toplam da $150\ \mu\text{m}$ derinliğe 10 adımda inilmiştir. Deney ve simülasyon sonuçları bu derinliklerden alınan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sıcaklık ve mekanik yüklerin bileşiminin bir sonucu olan kalıntı gerilmeler için mekanik yükün oluşmasında takımın yönü ve hareketi önemlidir (Vosough, 2005). Bu yüzden takımın teğetsel ve ilerleme yönündeki hareketiyle ortaya çıkan kesme gerilmelerinin

bir sonucu olarak farklılıkların tayini amacıyla literatüre paralel olarak (Outerio vd., 2008) her iki yönde (teğetsel (σ_{yy} , $\phi=0^\circ$) ve eksenel (σ_{xx} , $\phi=90^\circ$)) kalıntı gerilme analizi yapılmıştır.

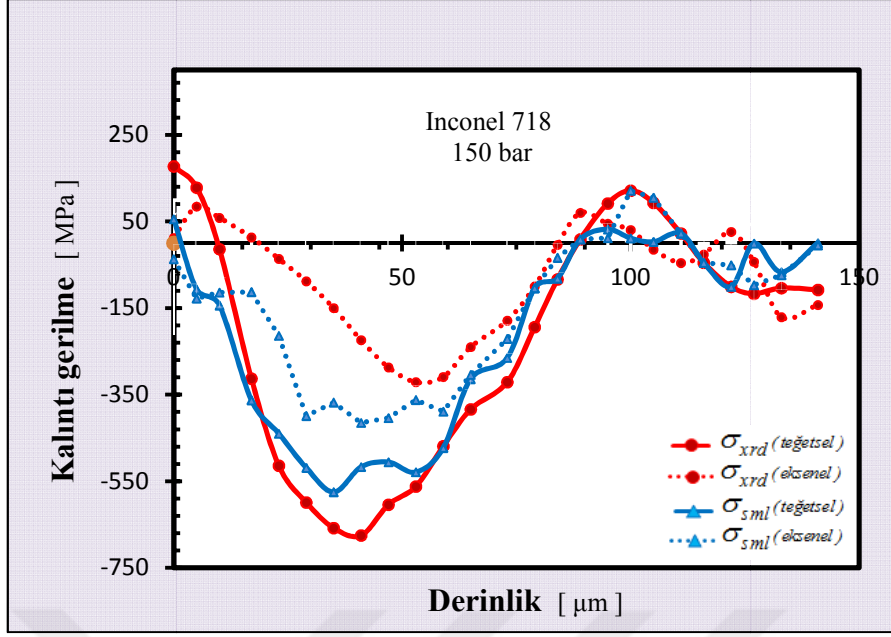
Metal kesme işleminde yüzeyde oluşan mekanik yükler kesme kuvvetlerinin bir neticesidir. Dolayısıyla yüzey tornalama işlemi neticesinde deney ve simülasyonlardan alınan sonuçlara göre en yüksek kesme kuvveti; teğetsel (esas kesme kuvveti) olarak ortaya çıkmaktadır (Günay vd., 2013). Bu sonuçlara göre teğetsel kesme kuvveti etkisinden dolayı teğetsel kalıntı gerilme değerinin de büyük çıkması beklenen bir durumdur.

Şekil 4.15’de 6 bar soğutma basıncında işlenen malzemede teğetsel ve eksenel yöndeki kalıntı gerilme durumu görülmektedir. Geleneksel soğutma şartları uygulanan bu deneyde işleme anında yüzeyde oluşan yüksek talaş kaldırma sıcaklığı işparçası yüzeyinde çekme kalıntı gerilmelere neden olmaktadır. Maksimum çekme kalıntı gerilme değeri xrd analizinden elde edilen sonuçlara göre 592 MPa olarak ölçülmüştür. Simülasyonlardan alınan sonuçlarda ise 500MPa değerlerinde okunmuştur. İşparçasının yüzeyinden yaklaşık 60 μm derinliğe kadar çekme gerilmelerinin oluştuğu gözlemlenmekle birlikte buradaki teğetsel kuvvetin literatürü (Vosough vd., 2005) destekleyecek şekilde yüzeyde oluşan düşük soğutma basıncından dolayı sıcaklığın artmasında etkili olduğunu söylemek mümkündür. Eksenel yöndeki kesme kuvvetinin talaş kaldırmada esas kesme kuvvetine göre daha az etkili olduğu literatürde (Ulutan, 2013) belirtilmekte olup bunun sonucunda da daha düşük kalıntı gerilme değerlerine neden olduğu yine grafikten anlaşılmaktadır. Kalıntı gerilme durumunun işparçası yüzey altı katmanlarda 100 μm derinlikten sonra azalma yönünde devam ettiği grafikten anlaşılmaktadır.



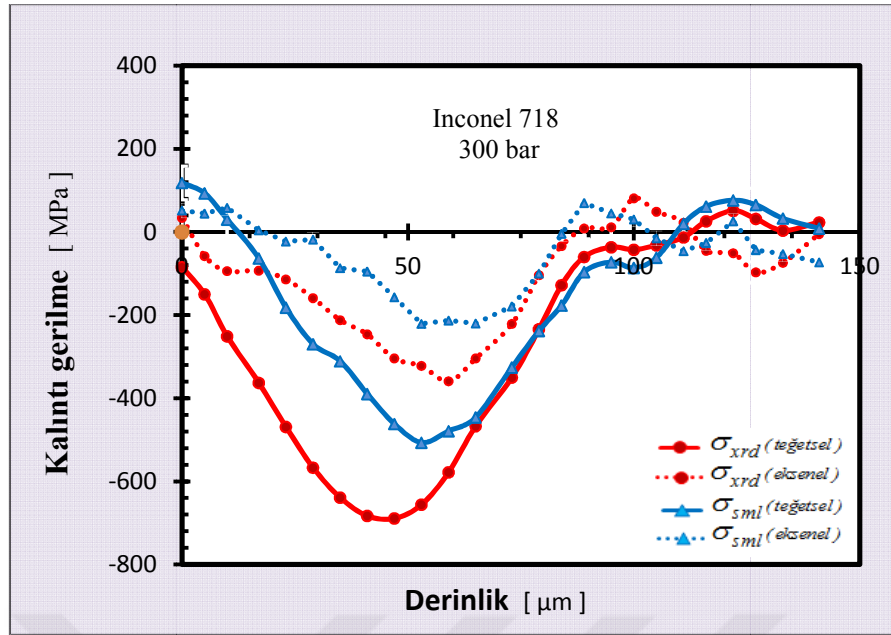
Şekil 4.15. 6 bar soğutma basıncında kalıntı gerilme XRD ve simülasyon sonuçları.

Şekil 4.16'da 150 bar soğutma basıncında işlenen malzemede yüzeyde maksimum çekme gerilmesi xrd sonuçlarıyla 176 MPa olarak ölçülmüştür. Aynı derinlik ve soğutma basıncı için simülasyon sonucunda ise yüzeyde 56 MPa çekme kalıntı gerilmesi değeri hesaplanmıştır. Numune yüzeyinde ve yüzey altı tabakalarda daha çok basma yönünde kalıntı gerilme değeri ölçülmüştür. Geleneksel soğutma basıncına göre çok daha yüksek değerde ölçülen basma kalıntı gerilmeler simülasyon sonuçlarında -587 MPa olarak hesaplanmıştır. X-ışını kırınım yöntemiyle analitik olarak hesaplanan kalıntı gerilme değerinde 670 MPa basma kalıntı gerilme değeri hesaplanmıştır. Yaklaşık 80 μm derinliğe kadar devam eden basma yönündeki kalıntı gerilme değeri geleneksel soğutma ile karşılaştırıldığında YBS'nin kesme bölgesindeki sıcaklığın azaltılarak talaşla birlikte ortamdan uzaklaştırılmasının olumlu sonuçları olarak karşımıza çıkmaktadır. Sıcaklığın işparçası yüzeyine daha az nüfuz etmesi ile birlikte kesme işlemi için etkiyen mekanik baskı kuvvetinin malzeme yüzeyi ve alt tabakalarında basma yönünde kalıntı gerilmelerin oluşmasına neden olacaktır. Beklenen bir sonuç olan bu durumun malzemede aşınma direncinin artması, çarpılma ve çatlak oluşumunun azaltılması gibi olumlu etkiler oluşturacaktır.



Şekil 4.16. 150 bar soğutma basıncında kalıntı gerilme XRD ve simülasyon sonuçları

Şekil 4.17’de 300 bar soğutma basıncında işlenen malzemede yüzeyde maksimum çekme gerilmesi xrd sonuçlarıyla 124 MPa olarak teğetsel yönde simülasyon sonuçlarında karşılaşılmıştır. Aynı yöndeki analitik hesaplama da ise bu değer 34 MPa olarak ölçülmüştür. Numune yüzeyinde ve yüzey altı tabakalarda daha çok basma yönünde kalıntı gerilme değeri oluşmaktadır. Maksimum basma kalıntı gerilme durumu teğetsel yönde 650 MPa olarak hesaplanmıştır. Her iki Yüksek basınçlı soğutma şartları altında işleme durumunda işparçası yüzeyinden yaklaşık 80-100μm derinliğe kadar basma kalıntı gerilmesi oluşmuş ve yüzeyde sıcaklığın bir etkisi olarak ortaya çıkan çekme kalıntı gerilmeler geleneksele göre (6 bar) çok daha az miktarda olduğu hesaplanmıştır. İş parçası yüzeyindeki çekme gerilmesi (pozitif değer) P=6 bar’da yüksek basınç değerlerindeki gerilmelere göre oldukça yüksektir. Genel olarak iş parçası yüzeyinde oluşan çekme gerilmeleri kesme esnasında ortaya çıkan yüksek sıcaklıklardan kaynaklanmaktadır (Şahin, 2003). İş parçası yüzeyindeki bu gerilmeler parçanın yorulma dayanımını olumsuz yönde etkilemekte ve çatlak oluşumu ve ilerlemesine sebep olmaktadır (Tekaslan vd., 2009).



Şekil 4.17. 300 bar soğutma basıncında kalıntı gerilme XRD ve simülasyon sonuçları

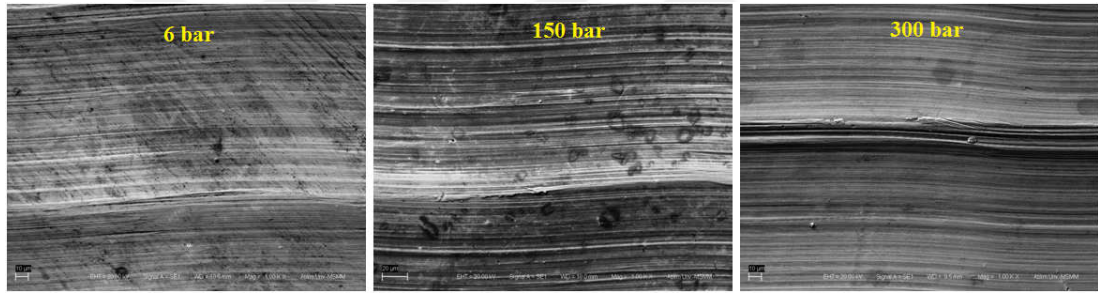
Yüksek basınçlı soğutma sıvısının takım-talaş arayüzüne uygulanması ile burada oluşan sürtünme önemli ölçüde azaldığı literatürde ifade edilen bir durumdur. Dolayısıyla kesme bölgesindeki sıcaklık da düşmektedir. Bunun sonucu olarak iş parçası yüzeyinde oluşan çekme gerilmesi kayda değer bir miktarda azalmaktadır (Habak vd., 2011).

Yukarıda verilen grafikler değerlendirildiğinde P=150 ve P=300 bar basınç değerlerinde iş parçası yüzeyindeki çekme gerilmesi birbirine yakın ve çok düşük değerdedir. Yüzeyden içeriye doğru inildikçe çekme kalıntı gerilmeleri giderek azalmaktadır. P=6 bar'da yüzeyde ve alt tabakalarda çekme gerilmesi hakimken 150 ve 300 bar basınçlarda genel olarak iş parçasında basma gerilmesi oluşmaktadır.

4.1.6. Inconel 718'in işleme sonrası ortaya çıkan yüzey özellikleri ve mikroyapı analizi.

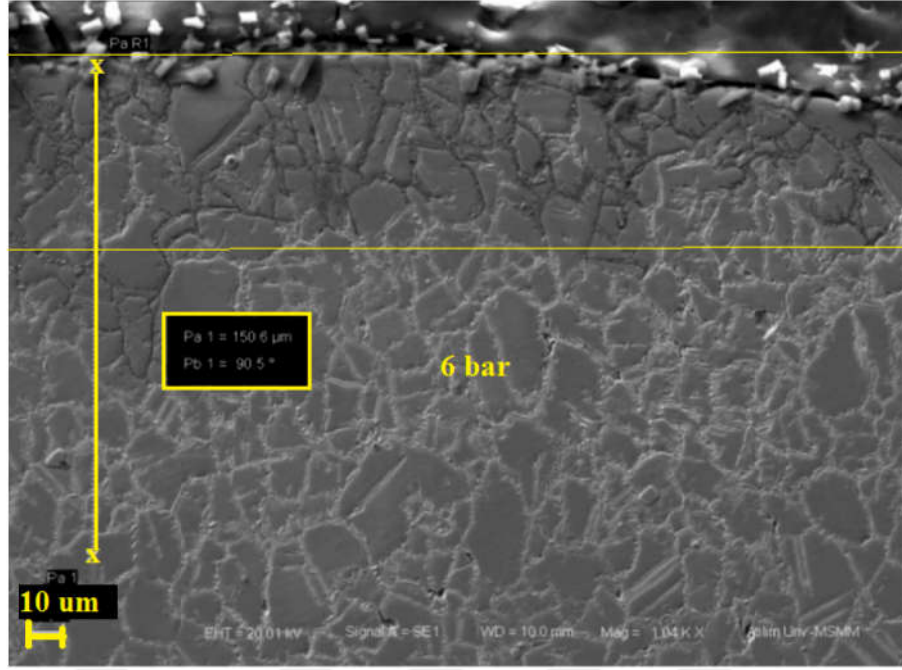
Şekil 4.18'de 50 μm büyütme değerinde her üç soğutma basıncında işlenen Inconel 718'e ait ham yüzey taramalı elektron mikroskopu görüntüleri verilmektedir. Bu verilerde Şekil 4.3'de açıklanan yüzey pürüzlülüğü ölçüm testleri için taguchi optimizasyonu yapılan 90 m/dak kesme hızı 0,1mm/dev ilerleme oranı ve 6 bar soğutma basıncında minimum yüzey pürüzlülüğü elde edildiği analizine ulaşılan

parametrelerin görüntülerine yer verilmiştir. Görüntülerde yapılan malzeme yüzeyinde oluşan takım izleri net bir şekilde görülürken geleneksel soğutma durumunda izler daha az fark edilmektedir. Bu durum sinyal/gürültü oranından elde edilen sonuçlarla uyuşmakla birlikte yüzey pürüzlülüğü üzerinde en önemli belirleyiciliğe sahip parametrenin ilerleme oranı olduğunu teyit eder niteliktedir (Tali, 2010). Burada soğutma basıncının etkisiyle işparçası yüzeyine talaş çarpması ve tezgah rijitliği gibi etkenlerinde işparçası yüzeyinde belirleyici olduğu unutulmamalıdır. Ayrıca düşük soğutma basıncında işleme durumunda yüzeyde soğuk sertleşme oluşturmada yüksek kesme sıcaklığından dolayı daha kolay talaş kaldırma ve daha az takım izi ortaya çıkarması yönünden etkili olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Bununla birlikte yüzey ve alt tabakada oluşan çekme kalıntı gerilme ve yüksek sıcaklık etkisiyle takım aşınması gibi faktörler de olumsuz sonuçlar olarak ortaya çıkmaktadır (Sharman vd., 2006).



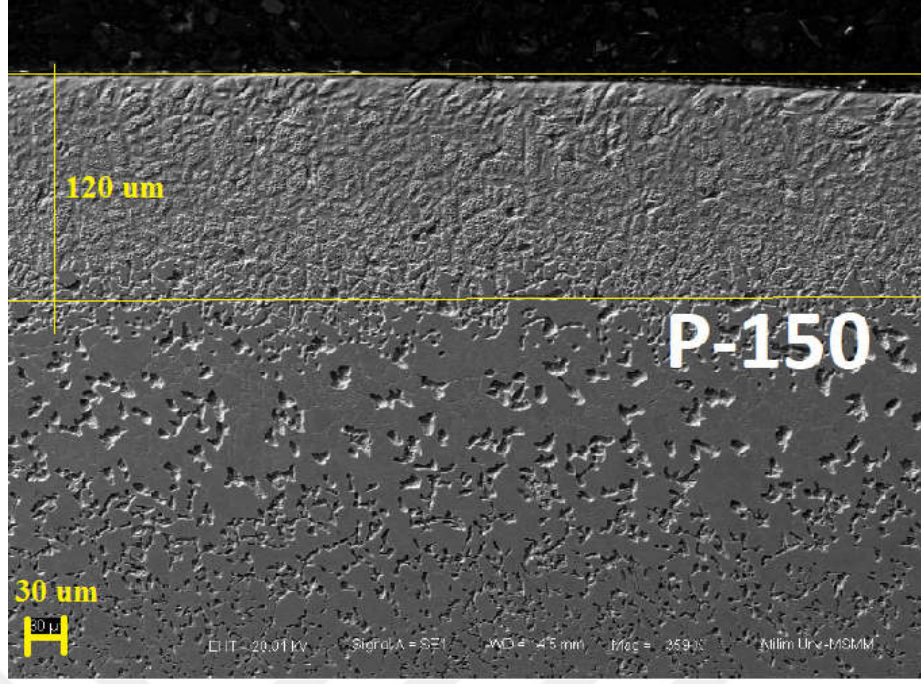
Şekil 4.18. Inconel 718 alaşımın işleme sonrası ham yüzey görüntüleri.

Şekil 4.19 da Inconel alaşımın 6 bar soğutma basıncı altında işlenmesi sonrasında oluşan yüzey mikroyapı analiz görüntüleri verilmiştir. Numunelerin yüzeyden 150 μm alt tabakalara doğru analiz edildiğinde yaklaşık 50 μm derinliğe kadarki yüzey altı tabakada (bu mesafe Şekil 4.15'deki çekme kalıntı gerilmenin olduğu mesafeye karşılık gelmektedir) daha koyu bölgelerin ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Daha alt tabakalarda tane sınırlarının belirginliği net olmakla birlikte tane boyu ve yönelimi konusunda genel bir açıklama yapmak mümkün olmamaktadır. Bununla birlikte literatürde karşılaşılan benzer çalışmalarda soğutma sıvısı basıncının malzemede tane boyutu, tane yönelimi veya çökelti oluşumu açısından önemli olduğu ortaya koyulmaktadır.



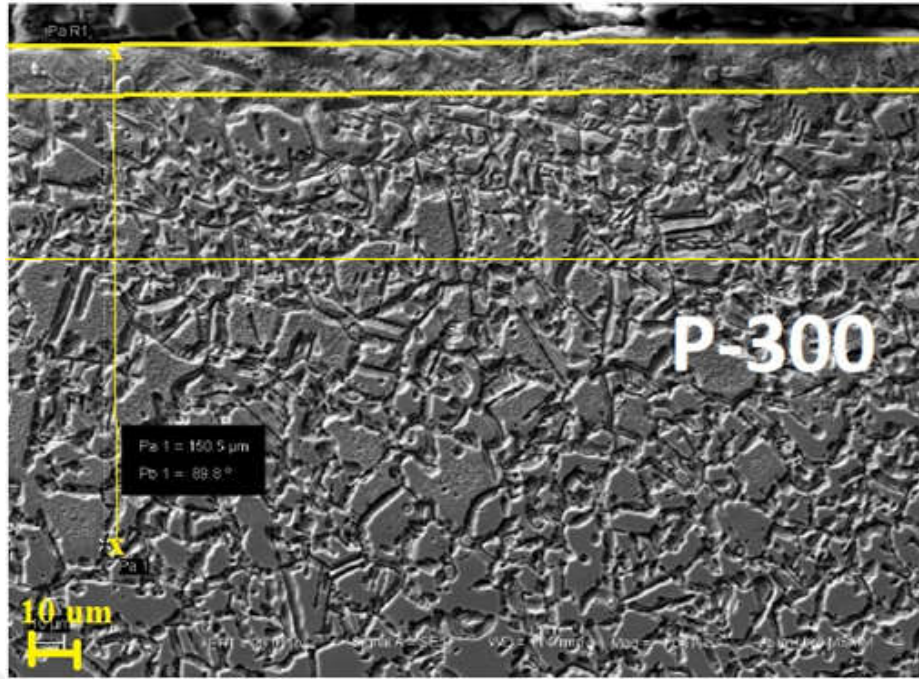
Şekil 4.19. Inconel 718 alaşıımının 6 bar, 150 µm derinlikteki mikroyapı görüntüleri

Şekil 4.20’de numunenin 150 bar basınçta yüzeyden 150 µm içeri doğru incelenmesini gösteren SEM görüntüsü verilmektedir. Yüzeyden derinlere doğru ilerleme sırasında yüzeyden 120 µm (Şekil 4.16, basma yönünde kalıntı gerilmenin olduğu derinlik) içeri gidildiğinde tane boyutunda azalmanın olduğu bölgeler görülmüştür. Buradan da literatürü destekler şekilde (Sanchez vd., 2011) soğutma basıncının yüzeydeki talaş kaldırma sıcaklığını azalmada etkili olduğunun ve tane boyutundaki küçülmeye birlikte basma kalıntı gerilmelerin oluşmasına sebep olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 4.20. Inconel 718 alaşımin 150 bar basınçta mikroyapı görüntüleri.

Şekil 4.21’de numunenin 300 bar basınçta yüzeyden 150 μm içeri doğru incelenmesini gösteren SEM görüntüsü verilmektedir. Yüzeyden alt tabakalara doğru ilerleme sırasında yüzeye yakın bir bantta (yaklaşık 10 μm kalınlıkta) deforme olmuş bir tabaka görülmüştür. Bunun dışında, yüzeyden 45 μm derinliğe kadar kısmen daha küçük tane boyutlarının olduğu gözlenmiştir. Bu derinlikten sonra tanelerde büyüme oluşurken bu derinlik kalıntı gerimle grafiğindeki (Şekil 4.17) maksimum teğetsel basma gerilmesi değerinin olduğu bölgeye yakın bir mesafenin olması basma gerilme oluşumunun bir açıklaması olarak ifade edilebilir.



Şekil 4.21. Inconel 718 alaşımının 300 bar basınçta mikroyapı analiz görüntüleri

Soğutma basıncının 150 bardan 300 bara yükseltildiğinde işparçası malzeme yüzeyinden derinlere inildiğinde basınçtaki artışa paralel olarak orantılı bir artış gözlenmemiştir. Bu sonuç kalıntı gerilme analizinde de benzer şekilde ortaya koyulmuştur. Beklenen sonuçlara orta basınç değerinde de ulaşıldığı görülmüştür. Şekil 4.18’de de görüldüğü gibi basıncın yüksek olduğu değerde de ham yüzeyde takım izlerine rastlanılmıştır.

4.2. Ti-6Al-4V Malzemeye Ait Deney ve Simülasyon Sonuçları

Tez çalışmasında yer alan diğer bir süper alaşım malzeme olan Ti-6Al-4V’un işlenebilirlik ve simülasyon testleri için bir önceki malzemede oluşturulan deney tasarımı ve parametreleri bu malzeme için de kullanılmıştır. Aynı şekilde deneyler süresince kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü değerleri kaydedilmiştir.

4.2.1. Kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülük değerleri

Ti-6Al-4V süper alaşım malzemeyle yapılan deneyler neticesinde elde edilen ortalama kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü sonuçları ile simülasyon sonuçları Çizelge 4.8’de verilmiştir.

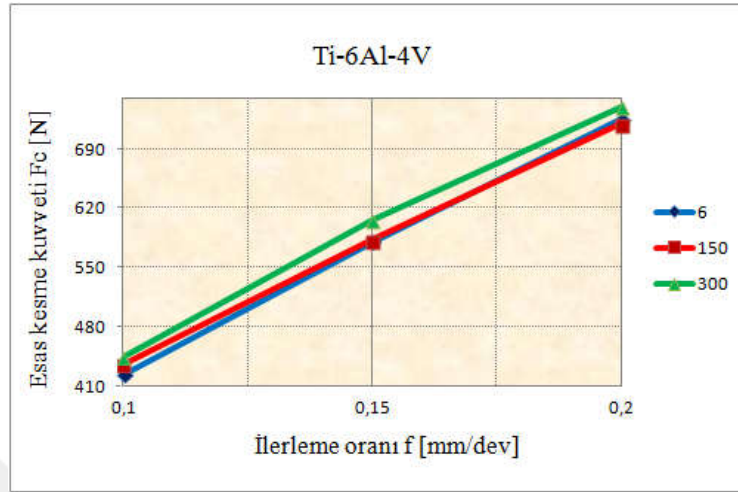
Çizelge 4.8. Ti-6Al-4V'ye ait deney ve simülasyon sonuçları

Deney	Ti-6Al-4V			Deney sonuçları				Simülasyon sonuçları		
	f [mm/dev]	Vc [m/dak]	P [bar]	Fc [N]	Fp [N]	Ff [N]	Ra [μm]	Fc [N]	Fp [N]	Ff [N]
1	0,1	50	6	424,1	95,3	95,9	0,45	501	164	179
2	0,1	70	150	436,5	81,9	82,7	0,54	554	209	187
3	0,1	90	300	445,3	91,8	92,6	0,58	538	151	170
4	0,15	50	150	583,1	102,3	108,3	1,16	658	221	254
5	0,15	70	300	605,8	111,1	110,8	1,06	570	177	183
6	0,15	90	6	580,8	134,9	135,8	0,96	756	235	271
7	0,2	50	300	740,8	121,5	119,7	1,66	815	268	249
8	0,2	70	6	725,7	120,5	121,6	1,51	935	204	223
9	0,2	90	150	720,5	122	121,5	1,49	982	340	312

Çizelge 4.8'de titanyum alaşıma ait kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değerlerinin deney ve simülasyon sonuçları verilmiştir. Tüm bu sonuçlardan elde edilen çıkarımlarda ilerleme oranına göre sonuçların sıralandığı dizilim bize kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değerlerinin en düşük veya en yüksek olduğu halini vermektedir. Buna göre, en yüksek ilerleme oranında en yüksek kesme kuvvetleri ve pürüzlülük değerlerine ulaşılırken ilerleme oranının minimum alındığı deneylerde ise sonuçlar her iki çıktı için de en düşük değerler olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar ışığında Inconel alaşıma benzer olarak en etkili parametrenin ilerleme oranı olduğunu söylemek mümkündür. Metal kesme işlemi için gerekli olan en yüksek esas kesme kuvveti değerleri de yine bu parametrede elde edilmiştir. Çizelgeden okunan sonuçların daha rahat yorumlanması açısından grafik halinde Şekil 4.22'de verilmiştir.

Kesme kuvveti değerinin belirlenmesinde ilerleme oranı rolünün çok fazla olduğu mevcut literatüre (Atakök, 2010) ek olarak deney sonuçları ile de ortaya koyulmuştur. Bu beklenen durumun yanısıra kesme hızı değerleri de kesme kuvvetleri oluşumu üzerinde çok daha az olmak kaydıyla bir etkiye sahiptir. Bununla birlikte Çizelge 4.8 ve Şekil 4.22'den de net olarak gözlenebileceği gibi titanyum

alaşımın işlenmesinde sırasında soğutma sıvısının kesme kuvveti üzerinde az da olsa etkili olduğunu söylemek mümkündür.



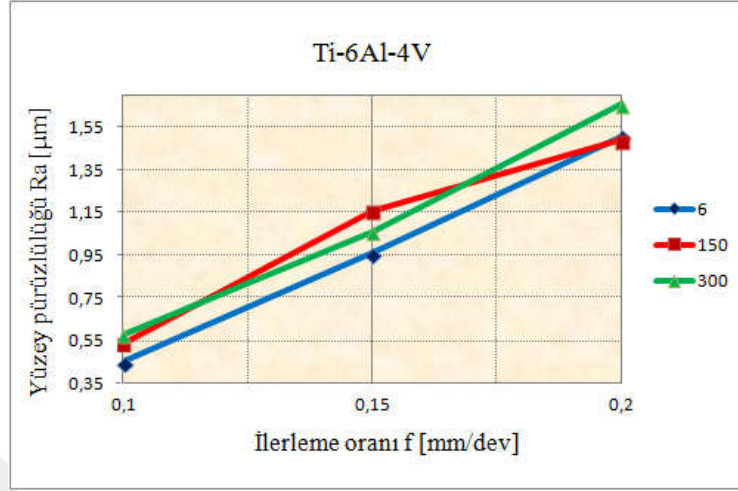
Şekil 4.22. Esas kesme kuvveti; F_c 'nin kesme hızına ve ilerleme oranına göre değişimi

Soğutma sıvısı basıncının artışı ile esas kesme kuvvetinde çok az miktarda bir artış görülmektedir. Elde edilen en yüksek kesme kuvveti değeri en yüksek ilerleme oranında elde edilmiş ve 740,8 N olarak ölçülmüştür. Bu değer simülasyon sonuçlarında 815 N olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak soğutma sıvısı basıncının kesme kuvvetleri üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olmadığı anlaşılmaktadır.

Şekil 4.23'de iş parçası yüzey pürüzlülüğünün ilerleme oranına f [mm/dev] göre değişimi verilmiştir. Grafikten de görüldüğü gibi ilerleme oranı ile birlikte yüzey pürüzlülüğü değeri de artmaktadır. Bununla birlikte kesme hızının artışı ile de bir miktar azalma görülmektedir. Literatürde gözlenen sonuçlarla birlikte yüksek kesme hızına ulaşılması durumunda pürüzlülük değerinde azalma sağlanmaktadır (Palanisamy vd., 2009). Kesme hızındaki artışa bağlı olarak, yüzey pürüzlülüğünde iyileşme sağlanabilmektedir (Nandy vd., 2009).

Çizelge 4.8'de ortaya çıkarılan sonuçlarda arzu edilen en düşük yüzey pürüzlülük değeri, en küçük ilerleme oranı değerlerinde sağlanmıştır. Bu değer 0.1 mm/dev ilerleme oranı için yaklaşık olarak 0,58 μ m pürüzlülük değeri hesaplanmıştır. Bu tüm

deneyler süresince ulaşılan en küçük pürüzlülük değeridir. Aynı ilerleme oranı için en yüksek pürüzlülük değeri 0,54 μm olarak en düşük kesme hızında elde edilmiştir.



Şekil 4.23. Yüzey pürüzlülüğü; Ra'nın ilerleme oranına göre değişimi

Çizelge 4.8'den Yüzey pürüzlülüğünün Ra [μm] basınca P [bar] göre değişimi incelendiğinde diğer deney malzemesinde (Inconel 718) ulaşılan sonuçlara benzer olarak titanyum alaşımında yapılan testlerde de soğutma sıvısı basıncındaki artış ile birlikte yüzeyde bozulmalar görülmüştür. Bu artışın Literatürdeki (Courbon vd.,2009) bu konuyla ilgili ulaşılan yorumlara dayanılarak kesme işlemi sırasında oluşan talaşlardan ya da yüksek basıncın etkisi ile oluşan titreşimden kaynaklandığı düşünülmektedir.

4.2.1.1. Kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü sonuçları için varyans analizi

Deneyler sonucunda kesme parametrelerine bağlı olarak elde edilen kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü değerleri için varyans analizleri yapılmıştır. Burada da Çizelge 4.2. ye benzer olarak aynı istatistiki yaklaşımlar referans alınmıştır.

Çizelge 4.9'da Titanyum alaşımıyla yapılan deneylerden elde edilen esas kesme kuvvetine ait ANOVA analizi bulguları görülmektedir. Analiz sonucunda ilerleme oranı (f) ve soğutma sıvısı basıncı (P) için hesaplanan p değeri 0.05'den küçük olduğu için bu faktörlerin esas kesme kuvveti üzerinde istatistiksel olarak belirleyiciliğe sahiptir (Yıldırım, 2011). Bu p değerlerine göre esas kesme kuvveti üzerindeki etki faktörü sarı renkte işaretlenmiştir. Buna göre esas kesme kuvveti için

0,05 (%5) hata değerinden küçük olan değerler ilerleme oranı ve soğutma basıncı değerleridir. Bunların da kendi aralarındaki önem sırasını tespit etmek için 0,05 hata değerinden en uzak değeri olarak dikkate almak gerekmektedir. Bu ifadeye göre ilerleme oranı (f) Titanyum alaşımla yapılan testler için kesme kuvveti üzerinde en büyük etki faktörüne sahip parametre değeri olarak karşımıza çıkmaktadır Bu değerler yaklaşık olarak “f” için $0,0001 (1 \cdot 10^{-4})$, “P” için $0,0254 (254 \cdot 10^{-4})$ dir.

Çizelge 4.9. Esas kesme kuvveti (Fc) için ANOVA bulguları

Fc					
	Kareler toplamı	Serbestlik derecesi	Kareler ortalaması	F değeri	p
Model	130022	3	43340,65	679,681	0.0001
Vc	0,32667	1	0,3266667	0,00512	0.9457
f	129390	1	129389,54	2029,13	0.0001
P	632,088	1	632,08751	9,91258	0.0254
Hata	318,831	5	63,766165		
Toplam	130341	8			

Çizelge 4.10’da deneyler sonucu elde edilen radyal kuvvete ait ANOVA analizi bulguları görülmektedir. ANOVA analizi sonucunda ilerleme oranı (f) için hesaplanan p değeri 0.05’den küçük olduğu için bu faktörün radyal kuvvet üzerinde istatistiki ve fiziki öneme sahip olduğu tespit edilmiştir. Diğer parametreler için hesaplanan p değeri 0.05’den büyük olduğu için, bu parametrelerin radyal kuvvet üzerinde kayda değer bir etkisinin olmadığı görülmektedir.

Çizelge 4.10. Radyal kuvvet (Fp) için ANOVA bulguları

Fp					
	Kareler toplamı	Serbestlik derecesi	Kareler ortalaması	F değeri	p
Model	1761,75	3	587,25019	4,63285	0.0660
Vc	146,027	1	146,02667	1,15201	0.3322
f	1504,17	1	1504,1667	11,8665	0.0183
P	111,557	1	111,55725	0,88008	0.3912
Hata	633,789	5	126,75788		
Toplam	2395,54	8			

Çizelge 4.11’de deneyler sonucu elde edilen ilerleme kuvvetine ait ANOVA analizi bulguları görülmektedir. ANOVA analizi sonucunda sadece ilerleme oranı (f) için hesaplanan p değeri 0.05’den küçük olduğu için bu faktörün ilerleme kuvveti üzerinde istatistiksel ve fiziksel öneme sahip olduğu tespit edilmiştir. Diğer parametreler için hesaplanan p değeri 0.05’den büyük olduğu için, bu parametrelerin ilerleme kuvveti üzerinde kayda değer bir etkisinin olmadığı görülmektedir.

Çizelge 4.11. İlerleme kuvveti (Ff) için ANOVA bulguları

Ff					
	Kareler toplamı	Serbestlik derecesi	Kareler ortalaması	F değeri	p
Model	1659,58	3	553,19328	4,48136	0.0700
Vc	112,667	1	112,66667	0,9127	0.3833
f	1398,43	1	1398,4267	11,3285	0.0200
P	148,487	1	148,48652	1,20287	0.3227
Hata	617,216	5	123,44314		
Toplam	2276,8	8			

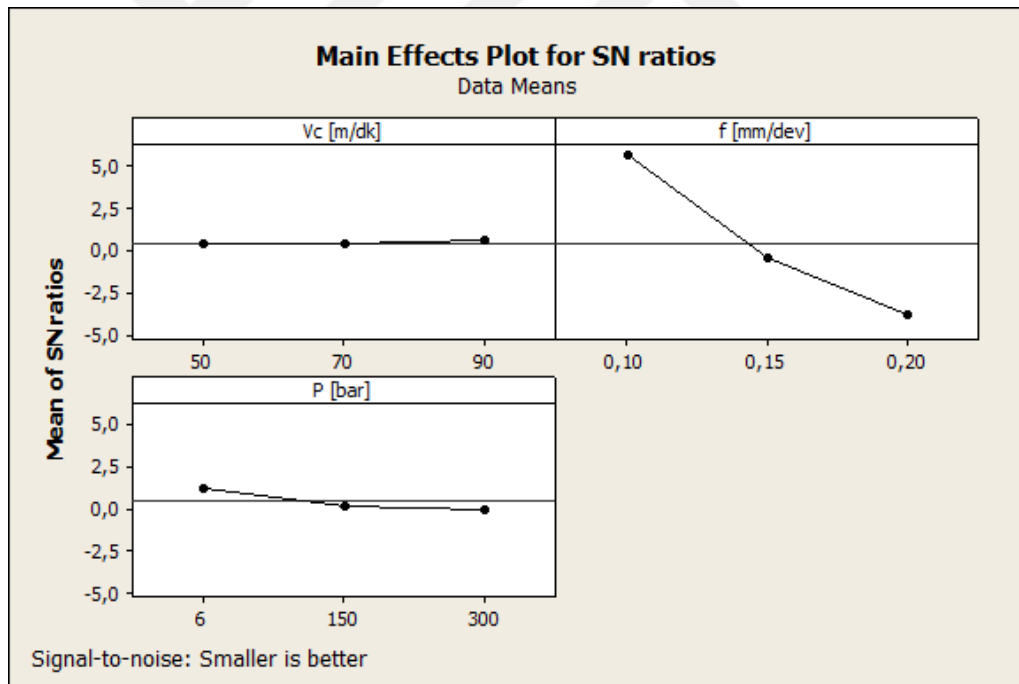
Çizelge 4.12’de deneyler sonucu elde edilen yüzey pürüzlülüğüne ait varyans analizi bulguları görülmektedir. Analizi sonucunda ilerleme oranı (f) ve soğutma sıvısı basıncı (P) için hesaplanan p değeri 0.05’den küçük olduğu için bu faktörün yüzey pürüzlülüğü üzerinde istatistiksel ve fiziki öneme sahip olduğu tespit edilmiştir. Diğer parametreler için hesaplanan p değeri 0.05’den büyük olduğu için, bu parametrelerin yüzey pürüzlülüğü üzerinde kayda değer bir etkisinin olmadığı görülmektedir.

Çizelge 4.12. Yüzey pürüzlülüğü (Ra) için ANOVA bulguları

Ra					
	Kareler toplamı	Serbestlik derecesi	Kareler ortalaması	F değeri	p
Model	1,62832	3	0,542772	198,296	0.0001
Vc	0,0096	1	0,0096	3,50726	0.1200
f	1,59479	1	1,594785	582,639	0.0001
P	0,02393	1	0,023931	8,7431	0.0316
Hata	0,01369	5	0,002737		
Toplam	1,642	8			

4.2.1.2. Deney sonuçlarının taguchi optimizasyonu

Deney sonuçlarının analizinde kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü sonuçları değerlendirildiği için, daha önce Eşitlik 1.33’de ifade edilen en küçük en iyi yaklaşımına göre hesaplanan S/N oranı kullanılmıştır deneylerin analizinde en küçük en iyi yaklaşımına göre hesaplanan S/N oranı kullanılmıştır. Şekil 4.24’de talaş kaldırma işleminde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini göstermektedir. Her faktör için hesaplanan S/N oranının en yüksek olduğu değer, en iyi deney sonucunu (yüzey pürüzlülüğünün en düşük olduğu deney sonucunu) göstermektedir. Kesme parametrelerinin eğimlerinden de hangi parametrenin kesme, ilerleme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkili olduğunu analiz edebiliriz. Grafikteki eğimi fazla olan parametre, çıkış parametresi üzerinde daha fazla etkiye sahiptir. Şekil 4.24’ye göre; ilerleme oranı (f) yüzey pürüzlülüğü üzerinde kesme hızı (Vc) ve soğutma sıvısı basıncından (P) daha fazla etkiye sahiptir.



Şekil 4.24. Ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin S/N oranları

Şekil 4.24’de görüldüğü gibi deney parametrelerinin S/N oranlarının maksimum olduğu koşullarda, yani Vc= 90 m/dk, f= 0.1 mm/dev ve P =6 bar deney şartlarında minimum yüzey pürüzlülüğü elde edilmektedir. Yukarıdaki analiz grafiğinde elde edilen değerler anova analizinde rakamsal olarak hesaplanan değerleri grafik olarak

ortaya koymaktadır. Bu tahmin edilen kesme parametrelerine göre en düşük yüzey pürüzlülüğü değerine ulaşılabacaktır. Bu minimum yüzey pürüzlülüğü değeri Taguchi tahmini ile 0.44 μm olarak hesaplanmıştır. Teorik olarak elde edilen minimum yüzey pürüzlülüğü değerini doğrulamak için belirlen optimum deney şartlarında bir adet doğrulama testi yapılmıştır. Yapılan doğrulama testi sonucu elde edilen kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü değeri Çizelge 4.13’de görülmektedir.

Çizelge 4.13. Doğrulama testi sonuçları

V_c [m/dk]	f [mm/dev]	P [bar]	F_c [N]	F_p [N]	F_f [N]	R_a [μm]
90	0.1	6	439.1	108.7	112.5	0.44

Çizelge 4.13’de görüldüğü gibi minimum yüzey pürüzlülüğünü elde etmek için optimum deney şartlarında teorik olarak hesaplanan yüzey pürüzlülüğü değeri doğrulama testi sonucu elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerine oldukça yakındır.

4.2.1.3. Deney sonuçları için regresyon analizi

Regresyon analizi sonucu sırasıyla esas kesme kuvveti, radyal kuvvet, ilerleme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü için 0.99, 0.73, 0.72 ve 0.99 doğruluk oranlarında aşağıdaki denklemler elde edilmiştir.

$$F_c = 134.38 - 0.011 \cdot V_c + 2937 \cdot f + 0.06 \cdot P \quad (4.5)$$

$$F_p = 48.72 + 0.24 \cdot V_c + 316.66 \cdot f - 0.02 \cdot P \quad (4.6)$$

$$F_f = 54.05 + 0.21 \cdot V_c + 305.33 \cdot f - 0.03 \cdot P \quad (4.7)$$

$$R_a = -0.42678 - 0.002 \cdot V_c + 10.31 \cdot f + 0.0004 \cdot P \quad (4.8)$$

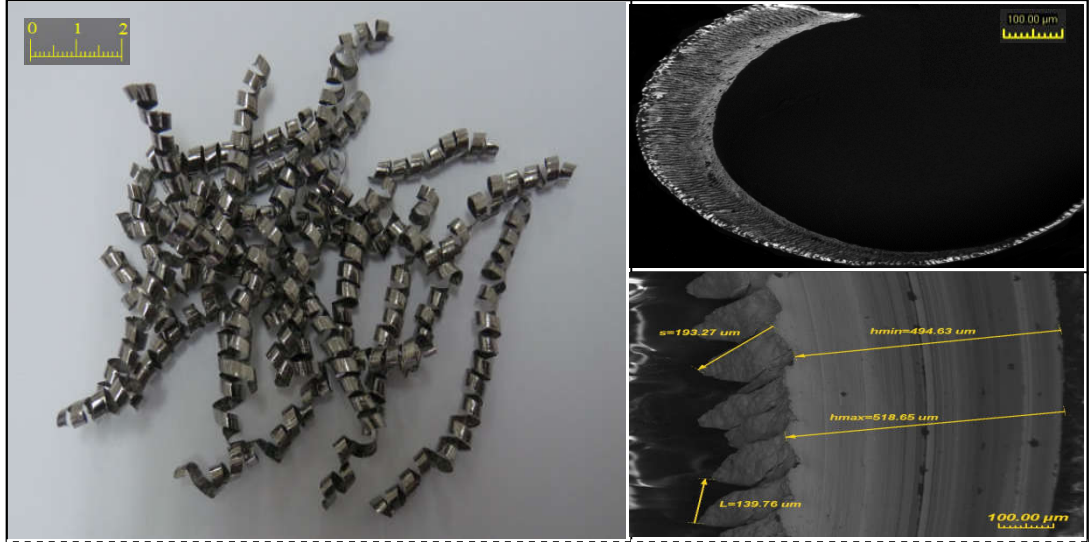
4.2.2. Ti-6Al-4V’nin farklı işleme parametrelerindeki talaş geometrileri

İşleme esnasında farklı kesme şartlarına bağlı olarak ortaya çıkan talaşın görünümünde de belirgin farklılıklar oluşmaktadır. Bu durum ilerleme oranı, soğutma şartları, kesme hızı gibi parametrelerin bir sonucudur (Nandy vd., 2009). İşlenebilirlik testleri sırasında talaşlar toplanarak yüksek basınçlı soğutma sıvısının

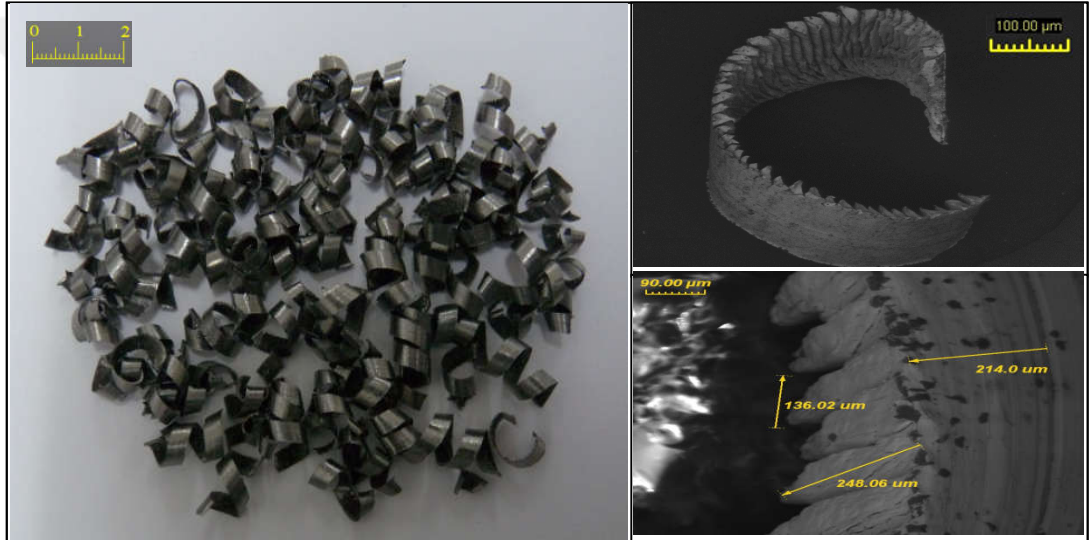
talaş şekillerine etkisi incelenmiştir. Şekil 4.25’de deneyler sonucu elde edilen talaşların genel görünüşü verilmiştir. Bu sonuçlara göre talaş görünümünde oluşan koyu mavi renkler kesme anındaki sıcaklığın talaşta bıraktığı bir etki olarak anlaşılırken talaşın şeklindeki süreklilik ve eğrilik yarıçapı gibi durumlar ise ilerleme oranı ile kesme hızından kaynaklanan bir sonuç olduğu anlaşılmaktadır. Bununla birlikte kesme sıcaklığının azaltılması talaşın daha parlak olmasını sağlarken ilerleme ve kesme hızlarında bir değişikliğe gitmeden dahi soğutma sıvısının basıncında bir artışın olması talaş boyutunda daha kısa kopmalara ve daha düşük eğrilik yarıçaplarına sebep olmaktadır, bu literatürde açıklanan sonuçlarla uyumlu bir görünüm ortaya koymuştur (Kramar vd., 2013).

Bu incelemeler için yüzey pürüzlülüğü araştırmaları için belirlenen ve Inconel alaşımıyla aynı ortak parametreler olan 70 m/dak kesme hızı, 2 mm kesme derinliği, 0,15 mm/dev ilerleme oranı ve üç değişken soğutma basıncı (6, 150 ve 300 bar) kullanılmıştır. Burada temel amaç soğutma sıvısı basıncının artışıyla birlikte talaş olumuna ne gibi bir etkisi olduğunun araştırılmasıdır. Aşağıdaki şekillerden de görüleceği gibi soğutma sıvısı basıncı arttırıldığında kopan talaş boyutlarında ve eğrilik yarıçaplarında net bir azalma görülmektedir. Bu da basınçla birlikte kopan talaşın kesme bölgesinden hızlı bir şekilde uzaklaştığını açıklamaktadır.

Elde edilen talaşlar taramalı elektron mikroskobu altında incelendiğinde oluşan talaş helislerinin soğutma sıvısı basıncının artmasıyla birlikte ters orantılı olarak daha küçük yarıçapta oluştuğu gözlenmiştir buda literatürdeki sonuçlarla paralellik oluşturmaktadır (Kamruzzaman vd., 2009; Palanisamy vd., 2009). Soğutma sıvısının basıncındaki artışla birlikte kopan talaş boyutlarının kısalığı yüksek basıncın kesme bölgesinde hem sıcaklığın azaltılmasını hem de talaşın basınç etkisiyle ortamdan kısa parçalar halinde koparak uzaklaşmasını sağladığının bir göstergesidir. Şekil 4.25’de üç farklı soğutma sıvısı basıncında işlenen Ti-6Al-4V süper alaşımdan elde edilen talaşlar ve elektron mikroskobu altındaki görüntüleri verilmektedir.



6 bar (Geleneksel) -Ti-6Al-4V



YBS 150 bar -Ti-6Al-4V

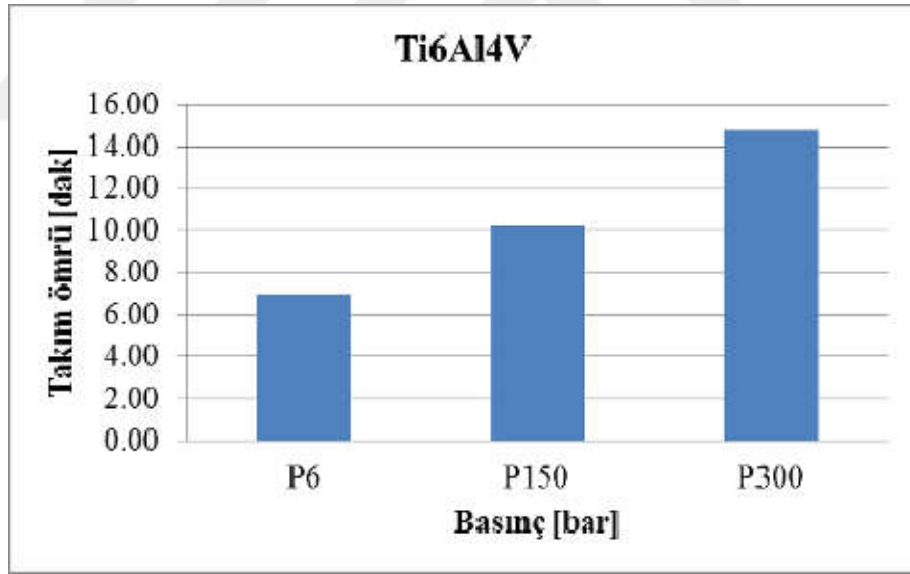


YBS 300 bar -Ti-6Al-4V

Şekil 4.25. Farklı soğutma sıvısı basınçlarında oluşan talaş geometrileri

4.2.3. Ti-6Al-4V'nin işlenmesinde takım aşınması ve SEM analizi

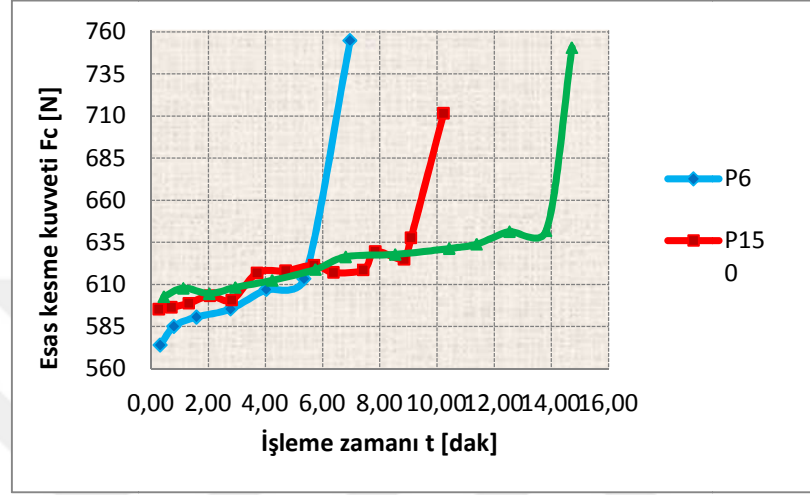
Bu bölümde Ti-6Al-4V süper alaşımın işlenmesinde takım aşınma bulguları yer almaktadır. Aşınma testleri için kullanılan parametreler yüzey pürüzlülüğü ve talaş oluşumunun incelenmesi için kullanılan parametrelerle aynı değerler olarak belirlenmiştir. Bu test parametreleri; $V_c=70$ m/dak kesme hızı, $f=0.15$ mm/dev ilerleme oranı, $a=2$ mm sabit kesme derinliği ve üç farklı soğutma basıncıdır. Ayrıca, deneyler süresince kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü değerleri kaydedilerek aşınmaya bağlı olarak değişimleri incelenmiştir. Testler sonucunda sabit kesme parametrelerinde üç farklı soğutma basıncındaki takım ömürleri değerleri hesaplanmıştır. Yapılan bu hesaplamada Inconel alaşımıyla aynı ortak kesici takım aşınma standardına göre kritik referans değerler ortak alınmıştır. Deneyler sırasında kesici takım bu aşınma kriterlerinden herhangi birine ulaştığında takım ömrünü tamamladığı kabul edilmiştir. Şekil 4.26'da Ti-6Al-4V süper alaşımı ile yapılan deneyler sonucunda elde edilen takım ömürleri verilmiştir.



Şekil 4.26. Ti-6Al-4V süper-alaşımı için takım ömürleri

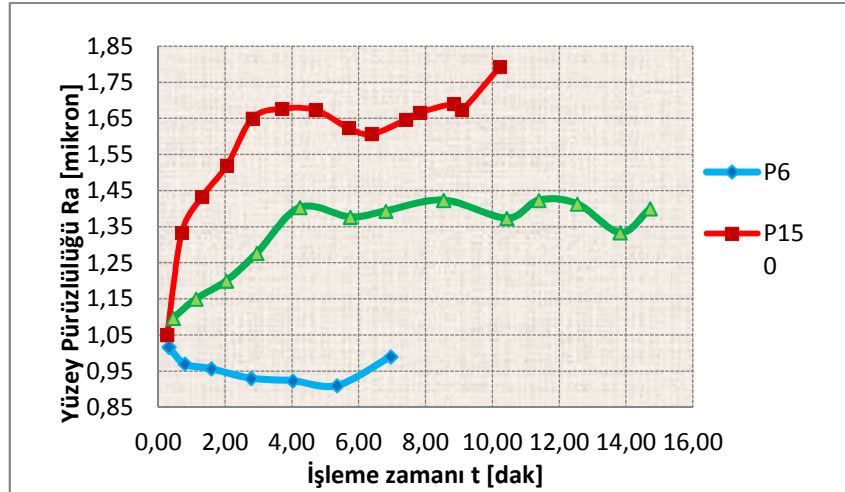
Burada takım ömrü miktarı literatürü destekler şekilde (Vosough vd., 2008) soğutma sıvısı basıncının artması ile doğru orantılı olarak artma eğilimi göstermektedir. Takım ömrü 150 bar ve 300 bar değerinde geleneksel kesmeye göre sırasıyla yaklaşık % 47 ve % 111.5 oranlarında artış meydana gelmektedir.

Şekil 4.27’de esas kesme kuvvetinin işleme zamanı ile değişimi görülmektedir. Kesme kuvveti işleme süresi boyunca aşınmadan dolayı tüm basınç seviyelerinde genel olarak bir artış göstermektedir literatürde de doğrulandığı gibi bu durum talaş kaldırma oranını düşüren bir sonuçtur (Devillez vd., 2011). Talaş kaldırmak için harcanan kesme kuvveti takımın aşınması ile birlikte artarak devam etmektedir.



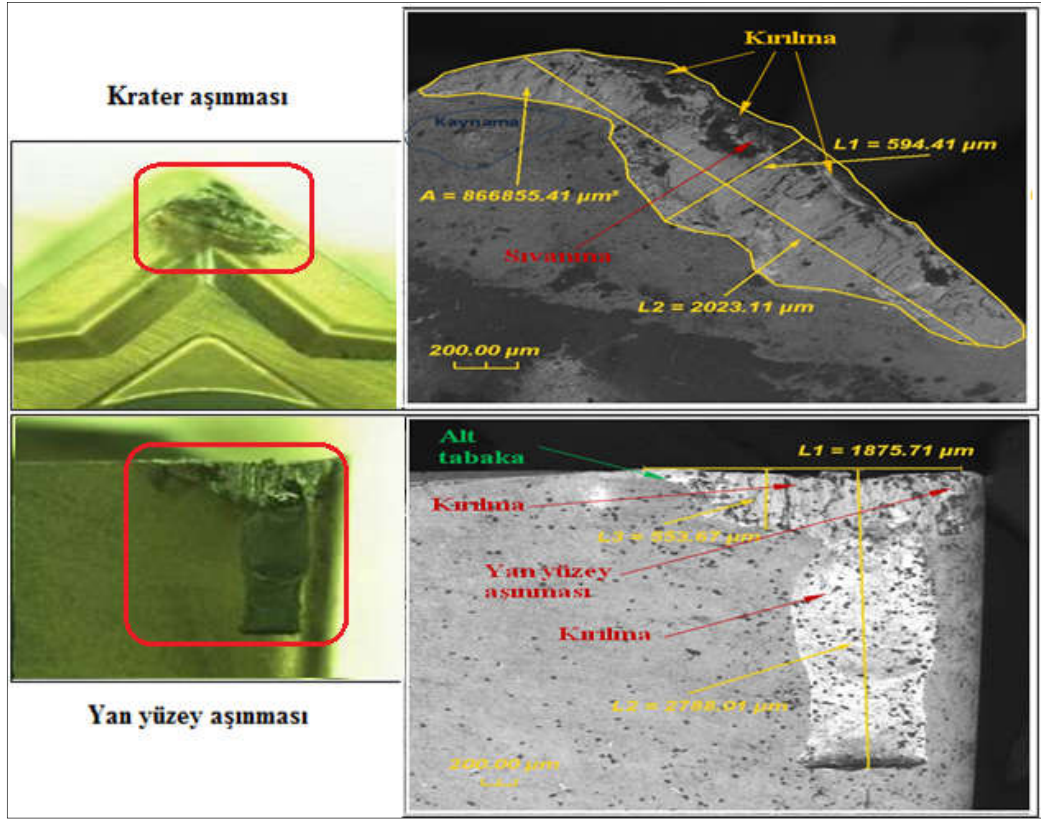
Şekil 4.27. Esas kesme kuvveti; F_c 'nin işleme zamanı ile değişimi

Şekil 4.28’de yüzey pürüzlülüğü işleme süresi boyunca aşınmadan dolayı yüksek basınç seviyelerinde genel olarak bir artış göstermektedir. Düşük basınç değerinde ise bir miktar azalma söz konusudur.



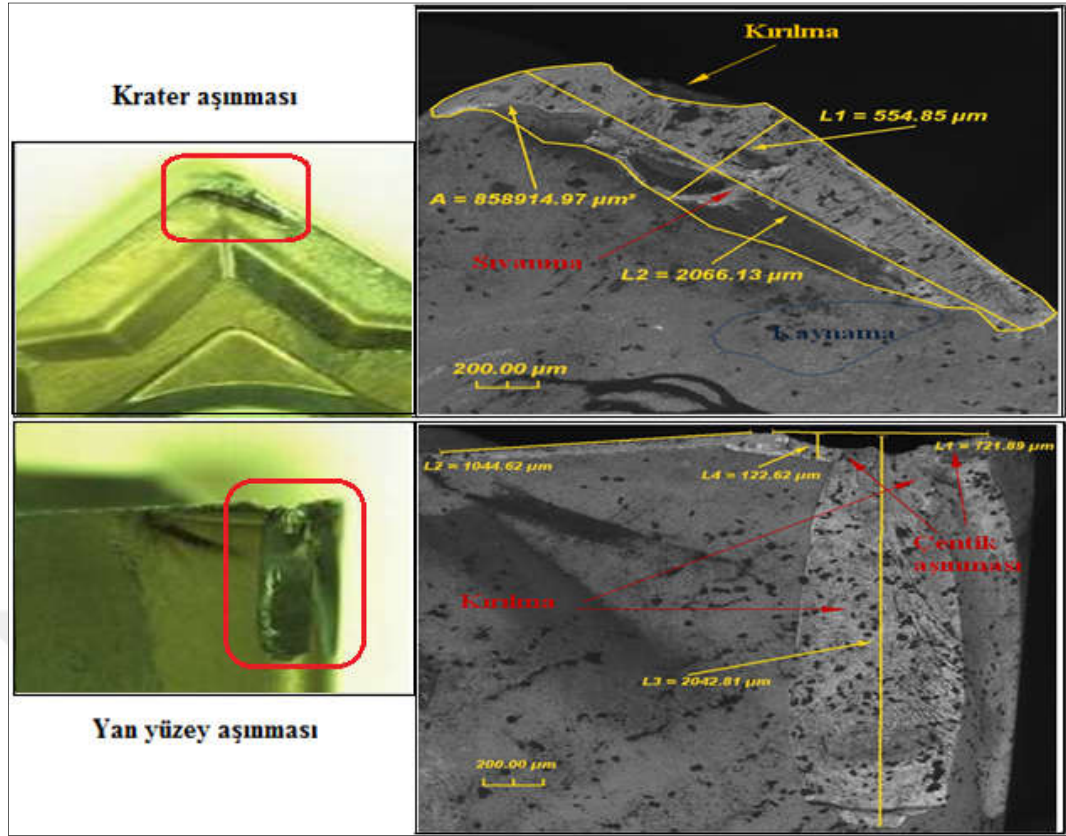
Şekil 4.28. Yüzey pürüzlülük; R_a 'nın işleme zamanı ile değişimi

Şekil 4.29'da 6 bar basınç değerinde kesici uçtaki yan yüzey ve krater aşınma miktarları görülmektedir. Kesici takımda izlenen değişiklik şu şekilde gözlenmiştir; ilk 5.35 dakikaya kadar az miktarda yan yüzey aşınması ve talaş yapışmaları (BUE) gözlemlenmiş ve bu süreden sonra kesmeye devam edildiğinde kesici kenarda aniden kırılma meydana gelmiş ve takım ömrünü tamamlamıştır.



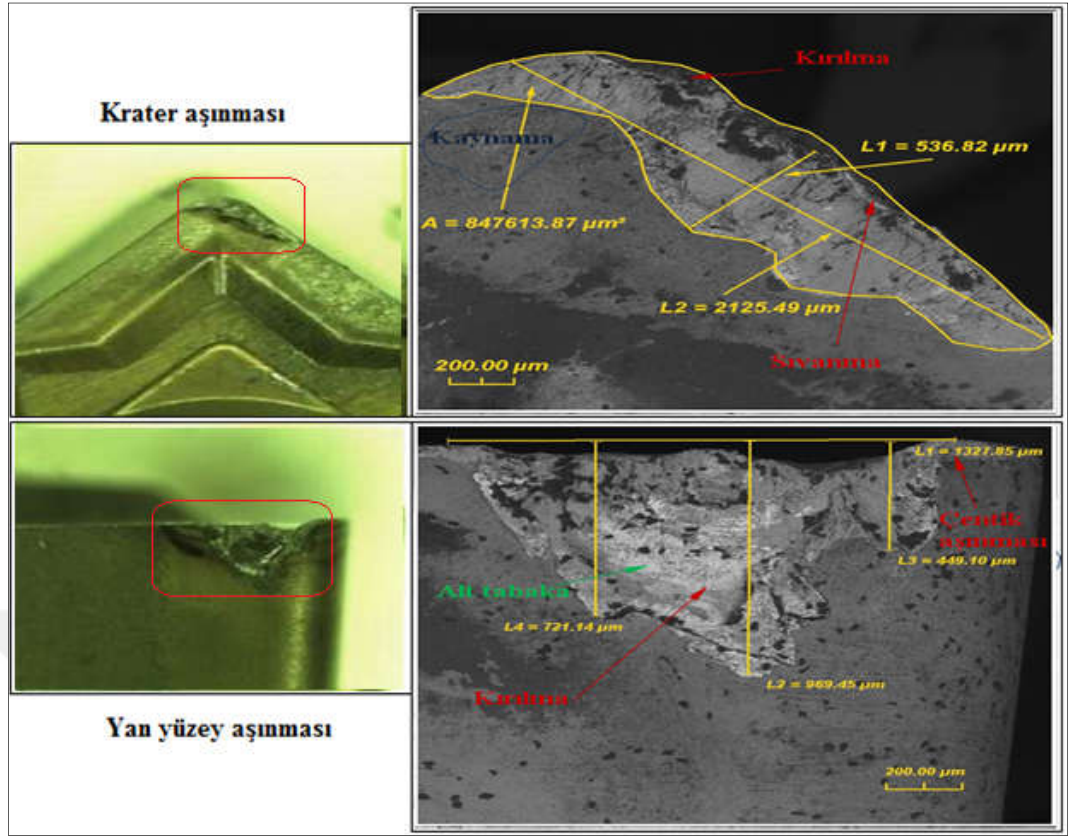
Şekil 4.29. 6 bar soğutma basıncında takım yan yüzey ve krater aşınmaları.

Şekil 4.30'da 150 bar soğutma sıvısı basıncında kesici takım yan yüzeyi ve krater aşınma oluşumları görülmektedir. Takım aşınması şu şekilde gözlenmiştir; Kesici takımında 9.09 dakikaya kadar az miktarda yan yüzey aşınması ve talaş yapışmaları (BUE) gözlemlenmiş bu dakikadan sonra kesmeye devam edildiğinde kesici kenarda aniden kırılma meydana gelmiş ve takım ömrünü tamamlamıştır.



Şekil 4.30. 150 bar soğutma basıncında takım yan yüzey ve krater aşınmaları.

Şekil 4.31’de 300 bar soğutma sıvısı basıncında kesici takım yan yüzeyi ve krater aşınma oluşumları görülmektedir. Takım aşınması şu şekilde gözlenmiştir; Kesici takımda 13.82 dakikaya kadar az miktarda yan yüzey aşınması ve talaş yapışmaları (BUE) gözlemleniyor. Bu andan itibaren kesmeye devam edildiğinde kesici kenarda aniden kırılma meydana gelmiş ve takım ömrünü tamamlamıştır.

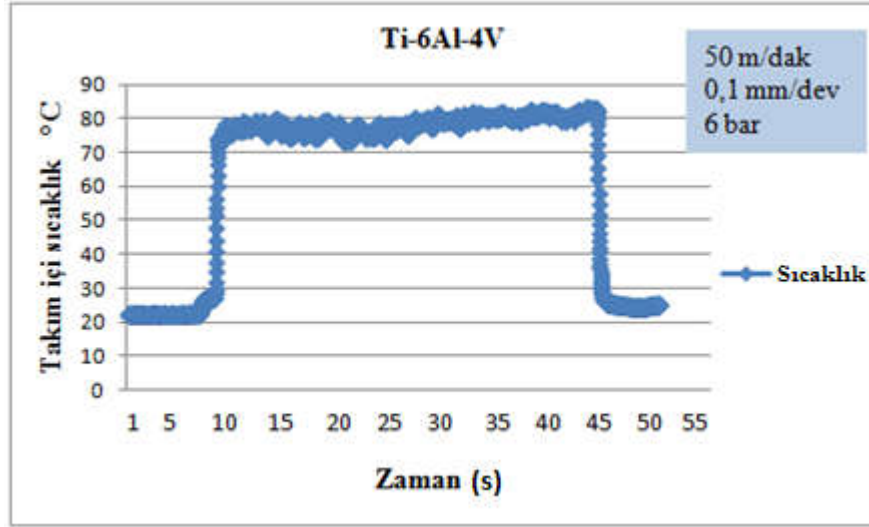


Şekil 4.31. 300 bar soğutma basıncında takım yan yüzey ve krater aşınmaları.

4.2.4. Ti-6Al-4V'nin işlenmesinde oluşan sıcaklığın deney ve simülasyon sonuçları

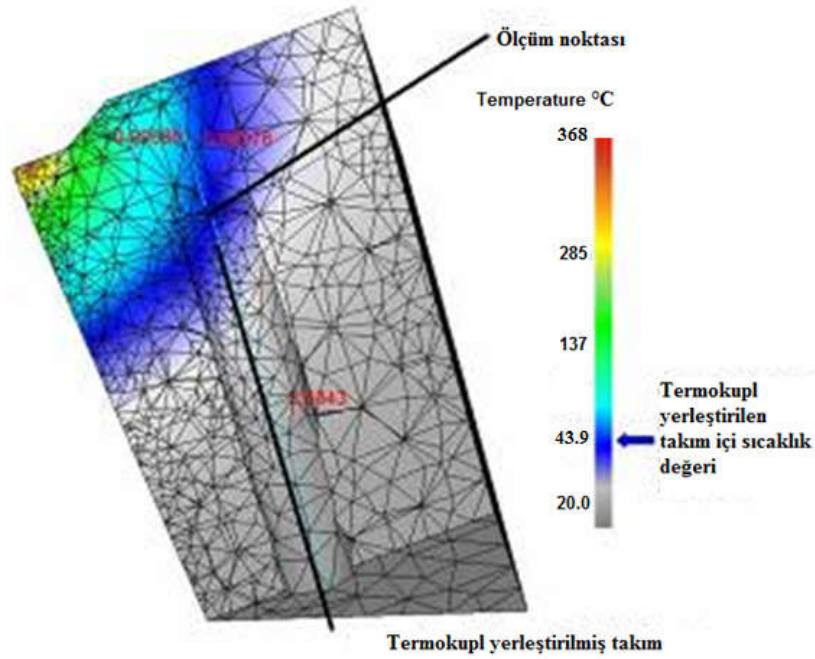
Bu bölümde Titanyum alaşımının işlenmesi esnasında kesme bölgesindeki sıcaklığın deney ve simülasyon yöntemiyle ortaya koyulmasına yönelik yapılan çalışma yer almaktadır. Deney tasarımı yöntemiyle belirlenen parametreler çerçevesinde yapılan testlerde takım içerisine yerleştirilen termokuplun en yüksek sıcaklık değeri dikkate alınarak simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılarak işleme bölgesindeki sıcaklık değerleri tahmin edilmiştir.

Şekil 4.32'de deney parametreleri içinden örnek olarak seçilen bir (1) numaralı parametreye ait takım içi sıcaklık değerinin deney sonuçları verilmiştir. Burada maksimum sıcaklık değeri takım içerisinde ölçülen en yüksek sıcaklık değeri olarak kayıt edilmekte ve bu değer takım içi simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmaktadır.



Şekil 4.32. Bir (1) numaralı kesme deneyi için takım içi maksimum sıcaklık değeri

Şekil 4.33’de sonluelemanlar programıyla yapılan sıcaklık simülasyonu görülmektedir. Burada 9 numaralı parametreye denk gelen parametre örnek olarak alınarak kesici takımın içerisine yerleştirilen termokuplun bulunduğu mesafedeki simülasyon sıcaklıkları hesap edilmiştir. Bu simülasyon ile elde edilen sıcaklık değerleri ve takım ucu maksimum sıcaklık değerleri deneysel olarak elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.33. Simülasyon olarak hesaplanan takım içi maksimum sıcaklık değeri

Çizelge 4.14. Kesme anında oluşan sıcaklığın deney ve simülasyon sonuçları

Deney	Ti-6Al-4V			Deney	Simülasyon	
	P [bar]	f [mm/dev]	Vc [m/dak]	Takım içi maks. sıcaklık [°C]	Takım içi maks. sıcaklık [°C]	Kesme bölgesi maks. sıcaklık [°C]
1	6	0,1	50	85	81.4	933
2	6	0,15	90	94.8	89.9	989
3	6	0,2	70	88.5	84	961
4	150	0,1	70	60	56.1	481
5	150	0,15	50	55	51.2	412
6	150	0,2	90	63.8	58.5	445
7	300	0,1	90	49.2	43	450
8	300	0,15	70	46.7	41.3	437
9	300	0,2	50	40.7	43.9	368

Çizelge 4.14’de deney ve simülasyon sıcaklık sonuçları bir arada verilmiştir. Yapılan bu testler sonucunda hem deney hem de simülasyon olarak hesaplanan sıcaklık değerlerinde en yüksek sıcaklıklar en düşük soğutma basıncında elde edilmiştir. Diğer bir ifadeyle en düşük sıcaklıklar en yüksek soğutma sıvısı basıncı değerlerinde sağlanmıştır ve bu iki ifade birbiri ile ters orantılı olarak gerçekleşmiştir (Carvalho vd., 2006; Şahin vd., 2003; Shet vd., 2003). Amaç kesme anındaki sıcaklığı düşürmek olduğundan bu sıcaklık sonuçları üzerinde yüksek basınçlı soğutma parametrelerinin etkisini ortaya koymaktadır. Diğer parametrelerin etkisi üzerine yapılan inceleme de ise kesme hızı değerlerinin sıcaklık oluşumu üzerindeki etkisinin ikinci önemli parametre olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçlara bakılacak olursa kesme bölgesinde oluşan en yüksek sıcaklık 989 °C olarak hesap edilen 6 bar soğutma ve 90 m/dak kesme hızında erişilmiştir. Hem deney hem de simülasyonlarda en düşük sıcaklık değerine (368°C), 300 bar soğutma sıvısı basıncı ve 50 m/dak kesme hızı değerlerinde ulaşılmıştır. İlerleme oranı değerinin bu iki parametre kadar etkili olmadığı yine deney ve literatür bilgilerinden elde edilen sonuçlarla doğrulanmıştır (Özek vd., 2004; Ovalı, 2008; Da Silva, 2006).

4.2.5. Ti-6Al-4V’nin işlenmesinde oluşan kalıntı gerilmenin deney ve simülasyon sonuçları

Titanyum alaşım için yapılan kalıntı gerilme analiz çalışmalarında daha önce 3. bölümde anlatılan materyal ve yöntemler uygulanarak kalıntı gerilme analizi ve

simülasyon sonuçlarına ulaşılmıştır. Deney ve simülasyon sonuçları için izlenen yol bir diğer deney malzemesi olan Inconel 718 ile aynı olduğundan ortak bilgiler ve açıklamalar bu bölümde tekrar verilmemiştir. Titanyum alaşım için yapılan sonuçlar aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

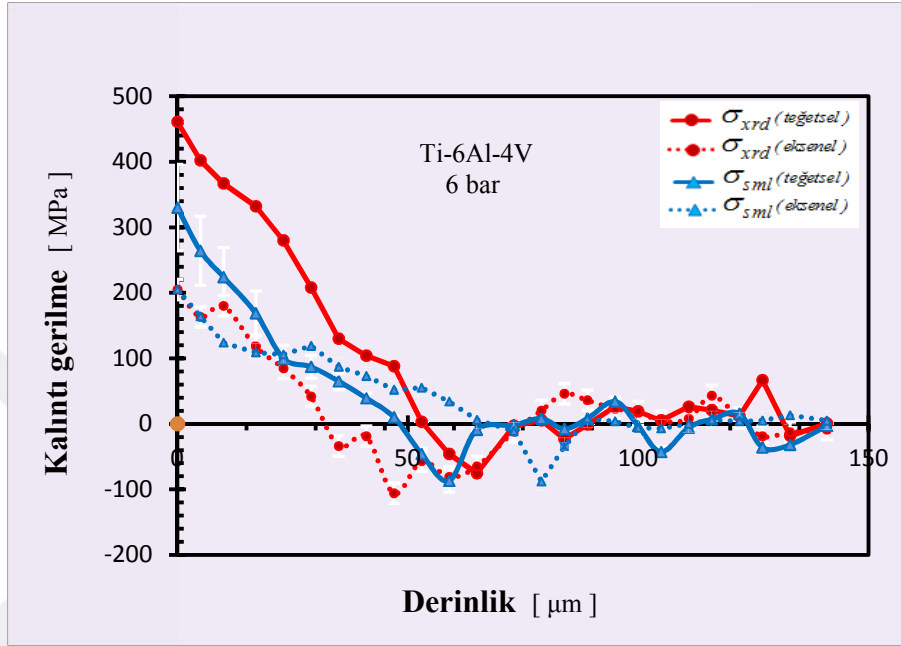


Şekil 4.34. Ti-6Al-4V'e ait farklı basınçta işlenen numuneler

Şekil 4.34' de titanyum alaşıma ait numunelerin analiz yüzeyleri görülmektedir. Burada parlak renkte olan bölgeler bu alaşımın literatürdeki karşılığı dikkate alınarak dağlayıcı hazırlanmış ve bu dağlayıcıların elektro-parlatma işlemi ile numune yüzeyinden malzeme kaldırılması sonrasındaki görüntüsü bu şekilde oluşmaktadır.

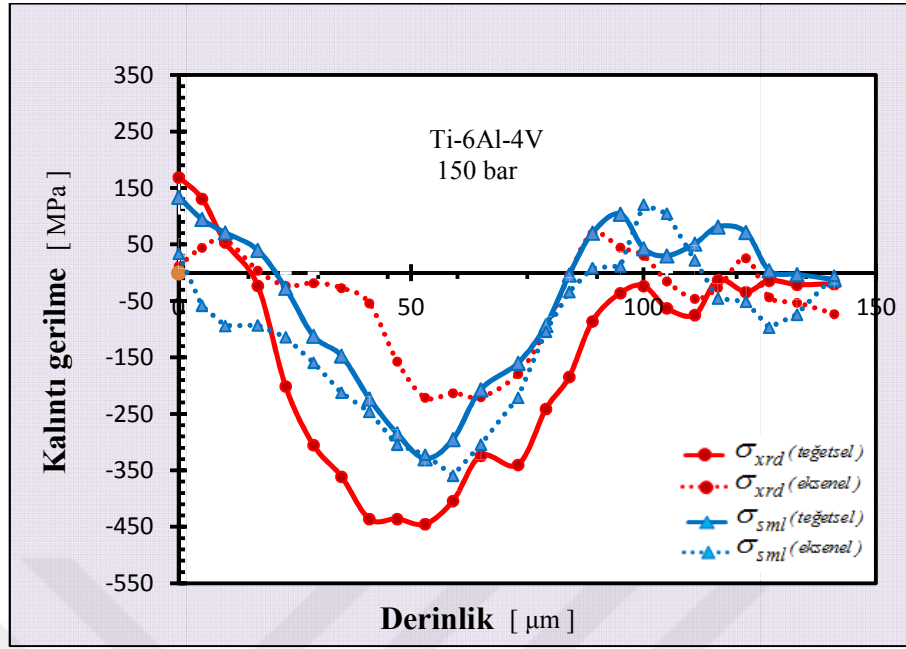
Şekil 4.35'de 6 bar soğutma basıncında işlenen malzemede yüzeyde maksimum çekme gerilmesi x-rd sonuçlarıyla 478 MPa olarak ölçülmüştür. Aynı derinlik ve soğutma basıncı için simülasyon sonucunda ise 340 MPa çekme gerilmesi değeri hesaplanmıştır. İşparçası yüzeyinden 150 μm inilerek kalıntı gerilme sonuçları alınmıştır. Yaklaşık 50 μm derinliğe kadar malzeme yüzeyinde çekme kalıntı gerilmelerin bulunduğu grafikten görülmektedir. Bu derinlikten sonra -100 MPa değere kadar basma kalıntı gerilmelerle birlikte derinlik arttıkça gerilmeler dengelenmektedir. Sıcaklığın ve mekanik yüklerin bir sonucu olarak ortaya çıkan kalıntı gerilme durumu sıcaklık ve kesme kuvveti değerlerinden de anlaşılacağı üzere geleneksel (6 bar) soğutma durumunda numune yüzeyinde yüksek değerlerde çekme gerilmesi şeklinde bulunmaktadır. Teğetsel ve eksenel yönler sırasıyla esas kesme ve ilerleme yönündeki kesme kuvvetlerinin doğrultularını ifade etmektedir. Buradan da

anlaşılabacağı gibi teğetsel yönde oluşan kalıntı gerilme değeri eksenel yönden daha yüksek değerde meydana gelmiştir. Deneysel ve simülasyon sonuçları numune derinliği boyunca bir birine yakın değerde ve yönde değişmektedir. Buradan çıkan sonuçta sonluelemanlar programı yardımıyla kalıntı gerilme değerinin hesaplanmasında tutarlı bir prosedür takip edildiği sonucunu desteklemektedir.



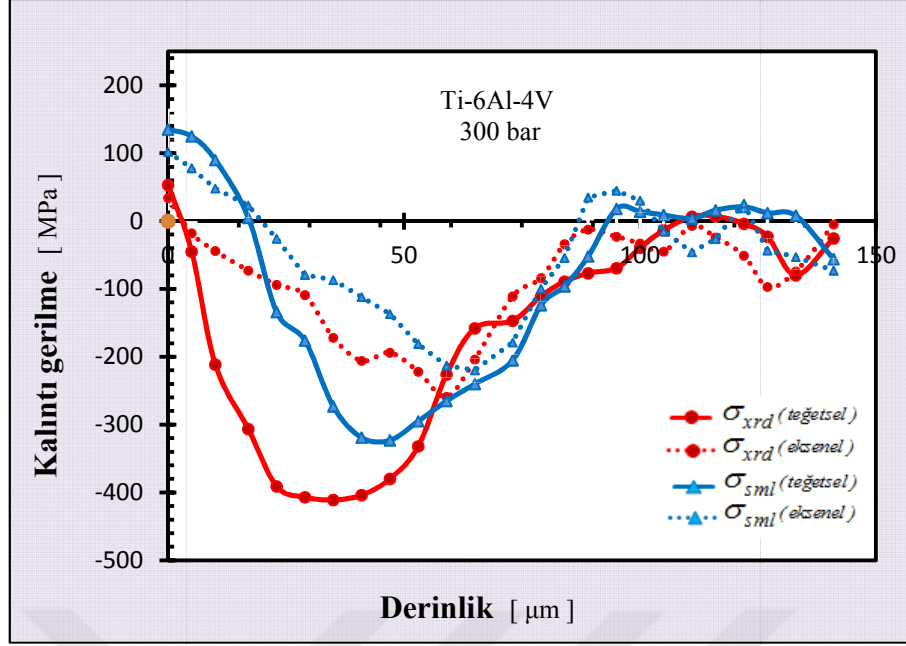
Şekil 4.35. 6 bar soğutma basıncında kalıntı gerilme XRD ve simülasyon sonuçları

Şekil 4.36’da Titanyum alaşımının 150 bar soğutma basıncında işlenmesi durumuna ait kalıntı gerilme grafiği görülmektedir. İş parçası yüzeyinden yaklaşık 20 μm derinliğe kadar yüzeyde 163 MPa X-rd ve 146 MPa simülasyona ait çekme kalıntı gerilme değerleri hesaplanmıştır. Bu derinlikten sonra yaklaşık 100 μm ’ye kadar basma yönünde kalıntı gerilme oluşmaktadır. Bu değerler X-rd analizi için maksimum -450 MPa iken simülasyon değerleri için -345MPa olarak hesaplanmıştır. Sıcaklık sonuçları ile birbirini destekler şekilde ortaya çıkan sonuçlarda 150 bar soğutma sıvısı basıncında elde edilen kalıntı gerilmenin soğutmanın etkisiyle malzeme bünyesinde basma yönünde oluştuğunu ve bununla malzemenin tokluk ve mukavemetini artırıcı bir etkiye neden olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum literatürde açıklanan ifadelerle aynı olmakla birlikte yüksek basınçlı soğutmanın etkisiyle oluşan kalıntı gerilme durumunun malzemede aşınma direnci ve çatlak oluşumunun engellenmesi olumlu sonuçlar ortaya koymaktadır.



Şekil 4.36. 150 bar soğutma basıncında kalıntı gerilme XRD ve simülasyon sonuçları

Şekil 4.37’de görüldüğü üzere 300 bar soğutma basıncında işlenen malzemede yüzeyde maksimum çekme gerilmesi simülasyon yöntemiyle 135 MPa olarak ölçülmüştür. Aynı derinlik ve soğutma basıncı için xrd sonucunda ise yüzeyde 60 MPa çekme gerilmesi değeri hesaplanmıştır Bu gerilme değerleri ortalama 15 μm derinlikte oluşmaktadır. Bu derinlikten sonra malzemede daha çok basma kalıntı gerilmeler oluşmaktadır. X-rd sonuçları için -402 MPa iken simülasyon için bu değer -317 MPa basma kalıntı gerilme değeridir. Malzemenin yaklaşık 100 μm derinliğine kadar (150 bar’daki ile aynı derinlik) basma yönünde kalıntı gerilme değeri hesaplanmıştır.



Şekil 4.37. 300 bar soğutma basıncında kalıntı gerilme XRD ve simülasyon sonuçları.

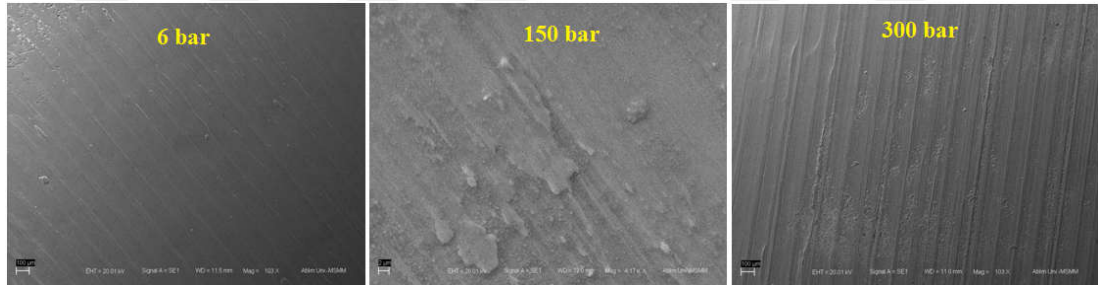
Yukarıda verilen her üç soğutma sıvısı basıncında elde edilen kalıntı gerilme grafiklerine bakıldığında iş parçası yüzeyindeki çekme gerilmesi (pozitif değer) P=6 bar'da yüksek basınç değerlerindeki gerilmelere göre oldukça yüksektir. Genel olarak iş parçası yüzeyinde oluşan çekme gerilmeleri kesme esnasında ortaya çıkan yüksek sıcaklıklardan kaynaklanmaktadır. İş parçası yüzeyindeki bu gerilmeler parçanın yorulma dayanımını olumsuz yönde etkilemektedir.

Yüksek basınç testlerinde ise (150-300 bar) en belirgin değişiklik yüzey ve yüzeye yakın bölgedeki değişim olarak öne çıkmaktadır. Burada soğutma sıvısının basıncı daha iyi anlaşılmaktadır. Her iki grafikte de maksimum basma kalıntı gerilme değerleri ve derinlikleri birbirine yakın olmakla birlikte yüzeydeki kalıntı gerilme durumu açık bir şekilde farklılık oluşturmaktadır. Bu tür özel çalışma bölgelerine sahip malzemelerin maruz kalacağı yüksek sıcaklık ortamı yüzey ve yüzey alt bölgelerinde oluşacak gerilme durumlarına göre davranış ve operasyon ömürlerini etkileyeceğinden 300 bar soğutma basıncının önemi ve etkisi daha açık şekilde anlaşılmaktadır.

4.2.6. Ti-6Al-4V'nin işleme sonrası ortaya çıkan yüzey özellikleri ve mikroyapı analizi.

Şekil 4.38'de 50 µm büyütme değerinde her üç soğutma basıncında işlenen Ti-6Al-4V'e ait ham yüzey taramalı elektron mikroskobu görüntüleri verilmektedir. Bu görüntülerde yüzey pürüzlülüğü ölçüm testleri için belirlenen 90 m/dak kesme hızı 0,1mm/dev ilerleme oranı ve üç farklı basınca ait mikroyapı incelemeleri yapılmaktadır.

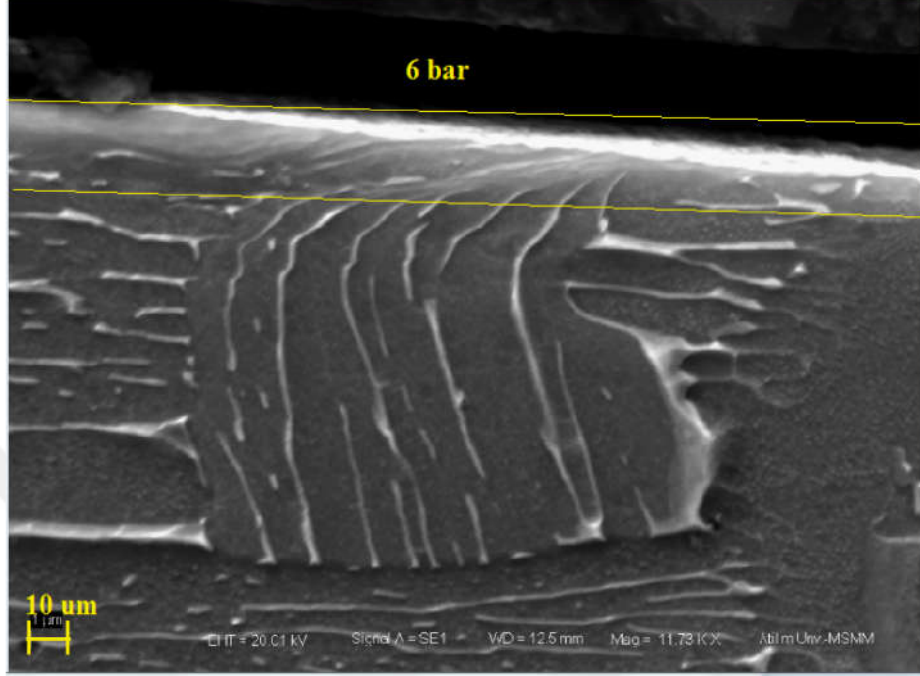
Taramalı elektron mikroskobu ile alınan görüntülerde her üç basınçta işlemedeki yüzeyde oluşan takım izleri değerlendirildiğinde yüksek basınç değerlerinde takım izleri yüzeyde daha belirgin olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlar soğutma basıncı dikkate alınarak yapılan gözlemleri doğrular nitelikte olmaktadır. Ayrıca literatürde benzer sonuçlarla karşılaşıldığı üzere (Tali, 2010; Sharman vd., 2006) düşük soğutma basıncında işleme durumunda yüzeyde soğuk sertleşme oluşturmada yüksek kesme sıcaklığından dolayı daha kolay talaş kaldırma ve daha az takım izi ortaya çıkarması yönünden etkili olduğu açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 4.38. Ti-6Al-4V alaşımın işleme sonrası ham yüzey görüntüleri

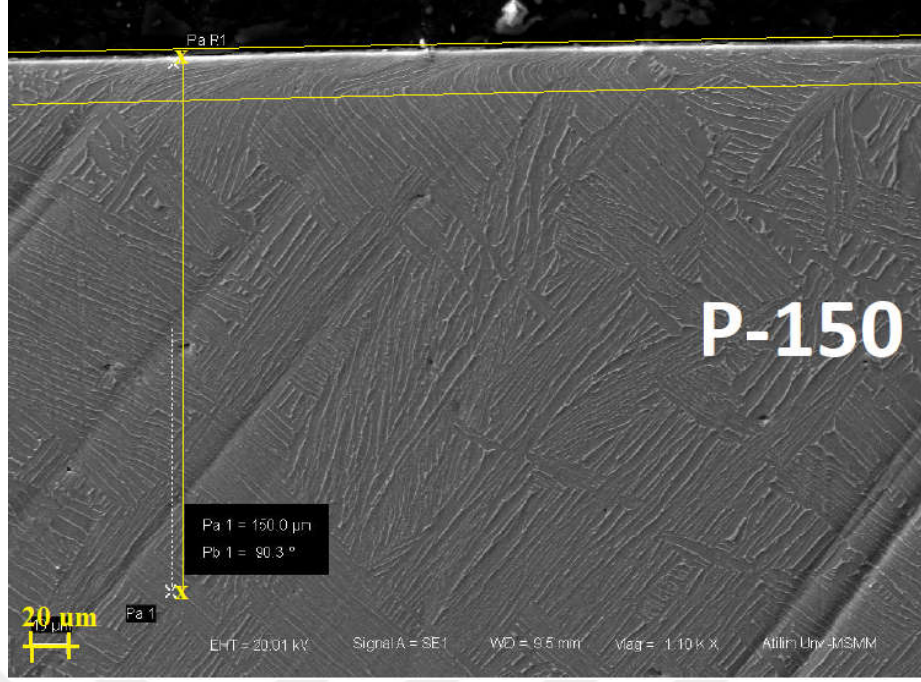
Şekil 4.39 da Titanyum alaşımın 6 bar soğutma basıncı altında işlenmesi sonrasında oluşan yüzey mikroyapı analiz görüntüleri incelendiğinde yaklaşık 30 µm yüzey altı tabakada oluşan sıcak bölge malzemenin tane sınırlarının yönlenmesine sebep olmuştur. Bu durum işparçsı yüzeyinde tane boyutu, tane yönelimi veya çökelti oluşumu açısından soğutma durumunun etkisi konusunda bir örnek oluşturmaktadır. 6 bar soğutma şartlarında daha detaylı analizler yapıldığında, yüzeye yakın bir bölgede katmanlı yapıda meydana gelen değişim net olarak çözümlenememekle birlikte, bu bölgenin yaklaşık 30 µm genişlikte bir bantta yer aldığı ve bu bölge içerisinde katmanlar arası mesafenin numune geneline göre azaldığı görülmüştür. Bu

da geleneksel soğutma durumunda basma kalıntı gerilmenin olduğu tabaka kalınlığının YBJS şartlarındakine göre daha az bir kalınlıkta meydana geldiğini göstermektedir.



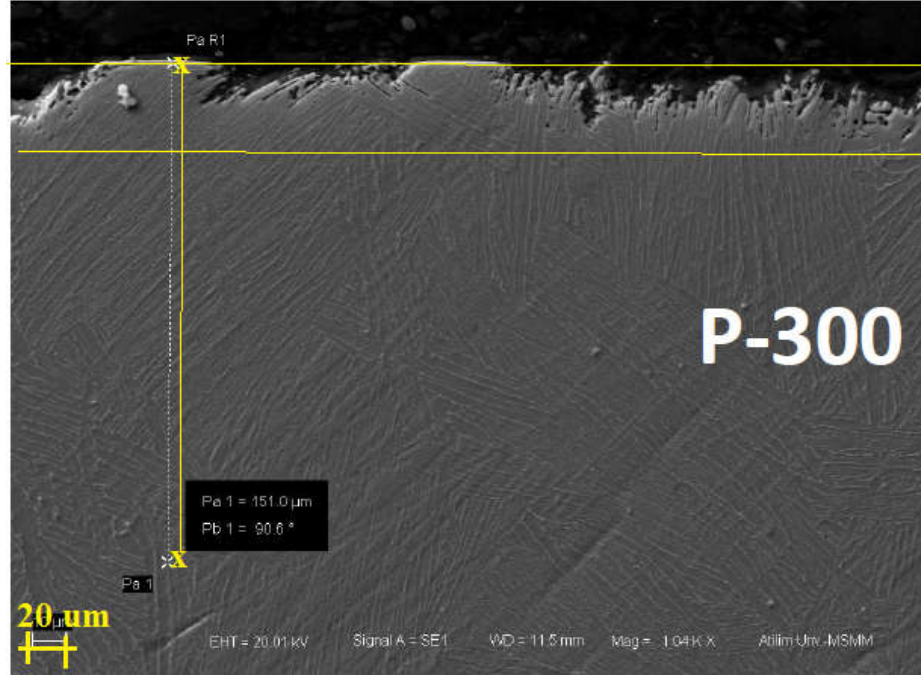
Şekil 4.39. Ti-6Al-4V alaşımın yüzey alt tabakadaki mikroyapı analiz görüntüleri

Şekil 4.40’da numunenin 150 bar basınçta işlenmesi sonrası SEM analizi görülmektedir. Yüzeyden derinlere doğru ilerleme sırasında yüzeye yakın bir bantta (yaklaşık 20 µm kalınlıkta) aşırı soğuk deforme olmuş bir tabaka görülmüştür. Bu tabaka kalıntı gerilme grafiğinde basma kalıntı gerilmenin olduğu sınırı göstermektedir. Bunun dışında, yüzeyden içeri gidildiğinde tane boyutunda azalmanın olduğu bölgeler görülmüştür. Buda literatürde (Li vd., 2009) ifade edilen talaş kaldırmadaki sıcaklığın düşmesinden kaynaklanan bir durum olduğunu açıklamaktadır.



Şekil 4.40. Ti-6Al-4V alaşımanın yüzey alt tabakadaki görüntüleri

Şekil 4.41’de numunenin 300 bar basınçta işlemeye ait SEM analizi görülmektedir. Yüzeyden derinlere doğru ilerleme sırasında yüzeye yakın bir bantta (yaklaşık 30 µm kalınlıkta) aşırı soğuk deforme olmuş bir tabaka görülmüştür.



Şekil 4.41. Ti-6Al-4V alaşımanın yüzey alt tabakadaki görüntüleri

Bu bölge kalıntı gerilme grafiğindeki basma kalıntı gerilme değerlerinin ortaya çıktığı sınırı ifade etmektedir. Bu durum Şekil 4.38'den de net olarak görülebileceği gibi numune üzerindeki takım izlerinden ve yüzeye basıncın etkisiyle talaş çarpması neticesi ile birlikte, muhtemel tezgah dinamiğinden kaynaklanan rezonans haliyle meydana gelen titreşimler sonucunda iş parçası yüzeyinde bozulmalar ve aşırı soğuk kopmalar olarak açıklanabilir (Sanchez vd., 2011).



5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında; havacılık ve uzay sanayi başta olmak üzere medikal ve kimya endüstrisinde en fazla kullanılan işlenmesi zor malzemelerden hafifliği, yüksek mukavemet ve aşınma direnci, düşük ısıl iletkenlik ve korozyon dayanımı gibi üstün özelliklere sahip Inconel 718 ve Ti-6Al-4V alaşımların yüksek basınçlı soğutma desteği ile talaşlı işleminde sıcaklık ve kalıntı gerilme değişimlerinin analizi amaçlanmıştır.

Yüksek aşınma direnci ve düşük ısıl iletim gibi özelliklerinden dolayı işlenmesi zor malzemeler olarak kabul edilen bu havacılık malzemelerinin işlenmesinde ihtiyaç duyulan yüksek kesme hızları, kesme bölgesinde aşırı sıcaklıkların oluşmasına sebep olmaktadır. Bu sıcaklıklar malzemede yüzey ve yüzeyaltı tabakalarda çekme kalıntı gerilmesi oluştururken aynı zamanda takım ömrünü de azaltan bir etki ortaya çıkarmaktadır. Geleneksel soğutma metodu kullanılmasıyla kesme bölgesinde oluşan buhar tabakası normal basıncın yenemediği bir duvar oluşturmakta ve bu buhar duvarı soğutma etkisini başarısız kılmaktadır. Bu gibi olumsuz durumlardan Yüksek Basınçlı Soğutma desteği kullanılarak kesme bölgesine soğutma sıvısının erişmesi ve en fazla sıcaklığın ortaya çıktığı ikinci deformasyon bölgesinden talaşın ortamdaki koparak uzaklaştırılması ile sıcaklık büyük oranda azaltılmakta ve takım aşınması sebeplerinden biri olan takım-talaş arası sürtünme kuvvetini sürekli yağlama tabakası oluşturarak minimum oranda azaltmaktadır.

Kesme bölgesinde oluşan sıcaklığın analiz ve simülasyonları sonucunda yüksek basınçla soğutmanın kesme bölgesindeki sıcaklığın düşürülmesinde olumlu etkiye sahip olduğu ortaya koyulmuştur. Her iki malzeme için de geleneksel ve maksimum YBS şartlarında kesme işlemi yapıldığında yaklaşık üç kat sıcaklık farkının ortaya çıktığı simülasyon sonuçlarından elde edilmiştir. Bu sıcaklık değerleri Inconel malzeme için geleneksel soğutma durumunda 1048°C iken 300 bar YBS şartlarında 365°C 'ye kadar düşürülmüştür. Benzer parametrelerde Titanyum malzeme için maksimum sıcaklık geleneksel soğutmada 989°C iken 300 bar soğutma basıncında 437°C olarak simülasyon sonuçlarından elde edilmiştir.

Inconel 718 ve Ti-6Al-4V malzemelerin işlenmesinde sorun oluşturan uzun ve sarmal yapıdaki talaşlar, soğutma suyu basıncının artırılmasıyla kısa ve helisel bir yapıya dönüştüğü görülmüş ve daha küçük boyutlarda kesme bölgesinden uzaklaştırılmıştır. Bunun bir sonucu olarak YBS'nin verimli bir talaş kırıcılık özelliği gösterdiği ortaya koyulmuştur.

Deneyler sonunda incelenen talaş geometrilerinde geleneksel soğutma şartlarında işlenen alaşımlardan elde edilen talaşın yüksek sıcaklıktan kaynaklanan yanma ve talaş tabaka oluşumlarında düzensiz şekillenmeler olduğu gözlenmiştir. Yüksek basınç şartlarında ise talaşların daha parlak ve talaş testere dişi boylarının daha uzun ve düzenli tabakalar halinde şekillendiği gözlenmiştir.

Talaş kaldırma deneyleri sonunda analizi yapılan takım aşınma miktarlarında takım üst bölgesinde oluşan krater aşınma durumları incelendiğinde krater aşınma miktarı; her takımın ömür miktarı dikkate alındığında en fazla krater aşınma alanının olduğu soğutma parametresinin geleneksel soğutma durumunda olduğu ortaya koyulmuştur. Bu da uzun, sarmal haldeki yüksek sıcaklıktaki talaşın takım üzerine temas ettiği krater aşınmasına sebep olduğunu ortaya çıkarmıştır.

Yüksek basınçlı soğutma sıvısı kullanılarak kesici takıma temas eden talaş uzunluğu azaltılıp, kesici takım ömründen daha uzun süre istifade edilmiştir. Üretim ve imalat sektörünün ürün ve çıktı maliyetlerini belirleyen önemli bir parametre olan kesici takım sarfiyatının azaltılması, takım ömrü arttırılarak sağlanan bir yöntemdir. Bu amaçla yapılan testlerde Inconel 718 alaşım için 150 ve 300 bar soğutma basınçlarının kullanıldığı deneylerde sırasıyla yaklaşık % 153 ve % 37 oranlarında takım ömürlerinde artış kaydedilmiştir. Ti-6Al-4V alaşımının kullanıldığı deneylerde ise 150 ve 300 bar soğutma şartlarında sırasıyla yaklaşık olarak % 47 ve % 111,5 oranlarında takım ömürlerinin artış gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır. Takım ömrü Inconel 718 parçalar için 150 bar soğutma basınçlarında optimum değerine ulaşmaktadır.

Malzemelerin servis ve çalışma ömürleri ile direkt ilgili olan kalıntı gerilmelerin kontrolü ve azaltılması konusu bu tür özel ve hayati öneme sahip alaşımların işlenmesinde önemli bir çıktı olarak dikkate alınmaktadır. Her iki süperalaşım

malzemenin YBS şartlarında işlenmesi esnasında oluşan kalıntı gerilmelerin eksenel (ilerleme) ve teğetsel (kesme) yönünde basınçla birlikte basma gerilmesi olarak düştüğü hem deneysel hem de simülasyon olarak ortaya koyulmuştur.

Inconel 718 malzemede maksimum çekme kalıntı gerilme değeri xrd analizinden elde edilen sonuçlara göre 592 MPa olarak geleneksel soğutma şartlarında ölçülmüştür. Maksimum kalıntı gerilme değeri ise -670 MPa ile 150 bar soğutma basıncında kaydedilmiştir.

Ti-6Al-4V malzemede ise maksimum çekme kalıntı gerilme değeri xrd analizinden elde edilen sonuçlara göre 470 MPa olarak geleneksel soğutma şartlarında ölçülmüştür. Maksimum kalıntı gerilme değeri ise -4500 MPa ile 150 bar soğutma basıncında kaydedilmiştir.

Her iki malzemenin geleneksel (6 bar) ve YBJS şartları altında işlenmesi sonucunda numunelerin mikroyapı analizleri yapıldığında genel olarak 6 bar soğutma durumunda yüzeye yakın bölgelerde tane sınırlarının uzadığı ve tane boyu ve yönelmelerinin az da olsa büyüdüğü gözlenmiştir. YBS şartlarındaki işleme sonunda yapılan numune mikroyapı analizlerinde yüzey üst tabakalarında az miktarda da olsa soğuk sertleşme, tane boyutlarında küçülme ve tane yönelmeleri gözlenmiştir.

Inconel 718 ve Ti-6Al-4V numunelerde her 3 soğutma basıncı (6, 150 ve 300 bar) için yapılan ham yüzey incelemeleri sonucunda dış yüzeyde tornalama izleri haricinde belirgin bir değişik yapı görüntüsüne rastlanmamıştır. Numuneler karşılaştırıldığında, titanyum numunelerde yüzey hasarının Inconel 718 numunelere göre daha fazla olduğu gözlenmiştir.

Bu sonuçlar göz önüne alınarak hangi çıktı üzerinde hangi faktörlerin etkili olduğu daha net anlaşılmıştır, Buna göre daha iyi bir yüzey pürüzlülüğü değeri elde edilmek isteniyorsa doğrulama parametreleri sonucundan da ulaşılan en düşük ilerleme oranı kullanılarak iyi bir yüzey toleransı elde edilebilir.

Her iki malzeme için en düşük yüzey pürüzlülük değerine 90 m/dak kesme hızı, 0.1mm/dev ilerleme ve 6 bar soğutma basıncında ulaşılmıştır.

Öneriler

YBSS yardımıyla farklı kesici takım geometrileri ve kaplamaları kullanılarak Inconel 718 ve Ti-6Al-4V süper alaşımı için ideal şartları taşıyabilecek kesici takımların aşınma performansları incelenebilir.

Talaş derinliği takım ömrüne etki eden bir faktör olduğundan farklı kesme derinliklerinde tezgah dinamiği gibi temel koşullar göz önüne alınarak YBS şartlarında testler gerçekleştirilebilir.

Süper alaşımların işlenmesinde YBS işleme şartlarının oluşturduğu avantajlar özellikle sert çelikler olmak üzere işlenebilirliği zor olan farklı malzemelerin işlenmesinde de kullanılabilir.

Yüksek basınç sisteminin endüstriyel şartlarda kullanılabilmesi için mutlaka tezgah otomasyon sistemine adaptasyonu gerekmektedir. Çalışma şartlarının CNC ISO kodları ile ayarlanabilmesi, tezgah ve pompa kontrolünün otomasyona uygun olması gerekmektedir.

İleride yapılacak çalışmalarda farklı süper alaşım malzemeler ortak parametreler dikkate alınarak deney ve simülasyon yöntemleri ile araştırılıp mevcut literatürde bir kaynak sağlanabilir. Bununla birlikte yüksek basınçlı soğutma sistemi geliştirilerek basınç değerleri yükseltilebilir ve soğutma sıvısı için farklı özellikte yağların performansı incelenebilir. Ayrıca, kuru, kriyojenik ve minimum miktarda yağlama yöntemlerinin uygulandığı deneylerin yüzey bütünlüklerine ait sonuçlar karşılaştırılabilir. Kalıntı gerilme ölçümleri için mümkün olan tahribatlı ve tahribatsız metotlar deneysel olarak araştırılabilir ve karşılaştırılması yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Abboud, E., Shi, B., Attia, H., Thomson, V., Mebrahtu, Y., 2013. Finite Element-Based Modeling of Machining-Induced Residual Stresses in Ti-6Al-4V under Finish Turning Conditions. 14th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations, Procedia CIRP 8, 63 – 68.
- Adıgüzel, S., 2011. Determining Surface Residual Stress in Steel Sheets After Deep Drawing and Bulging Processes. Middle East Technical University, Metallurgical and Materials Engineering. M. Sc. Thesis, 101p, Ankara.
- Akkurt, M., 2004. Talaş Kaldırma Yöntemleri ve Takım Tezgahları, Birsen Yayınevi, 312s. İstanbul.
- Akkuş, H., 2010. Tornalama İşlemlerinde Yüzey Pürüzlülüğünün İstatistiksel ve Yapay Zeka Yöntemleriyle Tahmin Edilmesi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 125s. Konya.
- Altın, A., 2005. Inconel 718 Süper Alaşımli Çeliğin İşlenebilirliğinin İncelenmesi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 200s, Ankara.
- Altıntaş, Y., 2000. Manufacturing Automation. Cambridge University Pres, 275s. Vancouver.
- Altıntaş, Y., 2000. Manufacturing Automation-Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design, Cambridge University Press, 380s. Cambridge.
- AMG Corporate Strategy, 2013. Erişim Tarihi: 17.08.2015.
<http://www.slideshare.net/jdiluzio/amg-corporate-strategy-presentation-december-2013>.
- Anderoğlu, O., 2004. Residual Stress Measurement Using X-Ray Diffraction. Texas A&M University, Mechanical Engineering, M. Sc. Thesis, 76p, Texas.
- Arrazola, P. J., 2008. Numerical Modelling of 3d Hard Turning Using Arbitrary Lagrangian Eulerian Finite Element Method. Int. J. Machining and Machinability of Materials, 3(3), 238-249.
- Arslan, T., 2010. X-Işınları ve Kullanım Alanları. Gazi Üniversitesi Gazi Eğitim Fakültesi Orta Öğretim Fen ve Matematik Alanları Eğitimi Bölümü, Fizik Eğitim Anabilim Dalı, Bitirme Ödevi, 24s, Ankara.
- Arunachalam, R. M., Mannan, M. A., Spowage, A. C., 2004. Surface Integrity when Machining Age Hardened Inconel 718 with Coated Carbide Cutting Tools. International Journal of Machine Tools & Manufacture 44, 1481–1491.
- Asi, O., Can, A. Ç., 2001. Sementasyon Çeliklerinde Körsertleştirilmiş ve Sementasyon Yapılmış Durumlarda Meydana Gelen Artık Gerilmelerin

Karşılaştırılması, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, 7 (2), 183-187.

Atakök, G., 2008. CNC Tornada Talaş Kaldırma İşlemlerinde Talaş Kırıcı Geometrisinin İşlenebilirliğe Etkilerinin Deneysel ve Sonlu Elemanlar Yöntemiyle İncelenmesi. Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 133s, İstanbul.

Atakök, G., 2010. Kesme Kuvvetleri, Sıcaklık, Titreşim, Ses ve Yüzey Pürüzlüğünün Ölçülmesi. Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Ders Notları, 15s. İstanbul.

Atlıhan, G., Topçu, M., Çallıoğlu, H., Altan, G., 2007. Soğuk Şekillendirilmiş Çelik Çubukların Eğilmesi Durumunda Oluşan Artık Gerilmelerin Hesabı. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi, 13 (1), 111-118.

Ay, İ., 2010. Süper Alaşımların Aşındırıcı Su jeti İle İşlenebilirliğinin Araştırılması. Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 109s, İstanbul.

Blaser, Swisslube B-Cool 655., Erişim Tarihi 24.04.2015.
<http://www.blaser.com/index.cfm?type=land&navid=487&subid=747&land=tr>

Braham, T., Germain, G., Robert, P., Lebrun, J. L., 2010. High Pressure Water Jet Assisted Machining of Duplex Steel: Machinability and Tool Life. Int J Mater Form. 3 (1):507 510.

Bushlya, V., Zhou, J., Ståhl, J. E., 2012. Effect of Cutting Conditions on Machinability of Superalloy Inconel 718 During High Speed Turning with Coated and Uncoated PCBN Tools. 45th CIRP Conference on Manufacturing Systems Procedia CIRP, 3, 370 – 375.

Carvalho, S. R., Lima e Silva, S. M. M., Machado, A. R., Guimaraes, G., 2006. Temperature Determination at The Chip–Tool Interface Using an Inverse Thermal Model Considering The Tool and Tool Holder. Journal of Materials Processing Technology, 179, 97–104.

Cerettia, E., Lazzaronia, C., Menegardo, L., Altan, T., 2000. Turning Simulations Using A Three-Dimensional FEM Code, Journal of Materials Processing Technology, 98, 99-103.

Choudhury, I. A., Baradie, M. A., 1998. Machinability of Nickel Base Superalloys: A General Review. Journal of Materials Processing Technology, 77, 278-284.

Courbon, C., Sajin, V., Kramar, D., Recha, J., Koselb, F., Kopac, J., 2011. Investigation of Machining Performance in High Pressure Jet Assisted Turning of Inconel 718: A Numerical Model. Journal of Materials Processing Technology 211 1834– 1851.

- Courbon, C., Kramar, D., Krajnik, P., Pusavec, F., Rech, J., Kopac, J., 2009. Investigation of Machining Performance in High-Pressure Jet Assisted Turning of Inconel 718: An Experimental Study. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 49, 1114–1125.
- Cullity, B. D., 1978. *Elements of X-Ray Diffraction*. Metallurgy University of Notre Dame, third edition, 520p. Notre Dame.
- Coz, G. L., Marinescu, M., Moufki, A., Dudzinski, D., 2011. Residual Stresses after Dry Machining of Inconel 718, Experimental Results and Numerical Simulation. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 133 (4), 632-641.
- Çakır, M.C., 2006. *Modern Talaşlı İmalat Yöntemleri*. Nobel Yayın No: 993, Nobel yayın dağıtım, 267 s. Ankara.
- Çapkın, A., 2007. *Talaşlı Üretimde Kesme İşleminin Sonlu Elemanlar Modeli İle İncelenmesi*. Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 57s, İstanbul.
- Çelik, A., 2006. *Nikel Esaslı Süper alaşımların Talaşlı İşlenmesi İçin SiAlON Esaslı Kompozit Malzemelerin Geliştirilmesi*. Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 109s, Eskişehir.
- Çetin, M.S., 2010. *Bitkisel Esaslı Kesme Sıvılarının Tornalamadaki Performansının Araştırılması*, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 190s, Gebze.
- Çetincalı, R., 2010. *AISI 316L Paslanmaz Çeliğin Kaplamalı ve Kaplamasız Kesici Takımlarla İşlenilebilirliğinin Araştırılması*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 91s. Ankara.
- Çevik, E., 2006. *Tornalama İşleminde Kesici Takım Ömrünün İyileştirilmesine Yönelik Alternatif Bir Yaklaşım*. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 84s, Ankara.
- Çolak, O., 2006. *CNC Freze Tezgahı İçin Kesme Parametrelerinin Akıllı Yöntemlerle Elektronik Ortamda Optimizasyonu*, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 312s, Isparta.
- Dahlman, P., 2002. A Comparison of Temperature Reduction in High-Pressure Jet-Assisted Turning Using High Pressure Versus High Flowrate. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 216, 467-473.
- Da Silva, R. B., 2006. *Performance of Different Cutting Tool Materials in Finish Turning Of Ti-6Al-4V Alloy With High Pressure Coolant Supply Technology*. Universidade Federal De Uberlândia Faculdade De Engenharia Mecânica, Ph. D. Thesis, 327p, Uberlândia.

- Devillez, A., Coz, Le. G., Dominiak, S., Dudzinski, D., 2011. Dry Machining of Inconel 718, Workpiece Surface Integrity. *Journal of Materials Processing Technology* 211, 1590– 1598.
- Dinç, C., 2006. Analysis of Thermal Fields in Orthogonal Machining. the Degree of Master of Science in Mechanical Engineering, Koç University, M.Sc Thesis, 249p, İstanbul.
- Dinçer, İ., 2005. RMn2-XTxX2 (R: Hafif Nadir Yer Elementi, T: Fe, Co, X: Si, Ge) Alaşımlarının Kristal ve Manyetik Yapılarının X-Işını Ve Nötron Toz Kırınımı İle İncelenmesi. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 161s, Ankara.
- England R. D., 2000. Measurement of Residual Stresses in Diesel Components Using X-ray, Synchrotron, and Neutron Diffraction. *Materials Engineering Department of the University of Cincinnati*, M.Sc Thesis, 115p, Ohio.
- Eşit. F., 2006. Soğuk ve Sıcak Haddelenmiş Alüminyum 6016 Alaşımlarının Kaynak Davranışları ve Kalıntı Gerilme Analizi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 67s, İstanbul
- Ezugwu, E. O., Bonney, J., Fadare, D. A., Sales, W. F., 2005. Machining of Nickel-Base, Inconel 718, Alloy with Ceramic Tools Under Finishing Conditions with Various Coolant Supply Pressures. *Journal of Materials Processing Technology*, 162, 609–614.
- Ezugwu, E.O., 2005. Key Improvements in the Machining of Difficult-to-Cut Aerospace Superalloys. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45, 1353-1367.
- Ezugwu, E. O., Bonney, J., 2004. Effect of High-Pressure Coolant Supply When Machining Nickel-Base, Inconel 718, Alloy With Coated Carbide Tools, *Journal of Materials Processing Technology*, 153(154), 1045–1050.
- Ezugwu, E.O., Bonney, J., Yamane, Y., 2003. An Overview of The Machinability of Aeroengine Alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, 134, 233-253.
- Ezugwu, E. O., Wang, Z. M., Machado, A. R., 1998. Machinability of Nickel Base Superalloys: A General Review, *Journal of Materials Processing Technology*, 86, 1-16.
- Ezugwu, E. O., Wang, Z. M., 1997. Titanium Alloys and Their Machinability- A Review, *Journal of Materials Processing Technology*, 68, 262-274.
- Fitzpatrick, M. E., Fry, A. T., Holdway , P., Kandil, F. A., Shackleton, J., Suominen, L., 2005. Determination of Residual Stresses by X-ray Diffraction. *Measurement Good Practice Guide*, 52 (2), United Kingdom.

- Goldstein, R. J., Franchett, M. E., 1988. Heat Transfer From a Flat Surface to an Oblique Impinging Jet, *Journal of Heat Transfer*. 110, 84-90.
- Gökçe, A. G., 2011. Kristallerde X-Işını, Nötron ve Elektron Kırınımı. *Katıhal Fiziği-I Ders Notları*, 52s, İzmir.
- Gökkaya, H., Nalbant, M., 2006. Talaş Kaldırma Sırasında Isı Oluşumu ve Dağılımı, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2, 33-43.
- Gökkaya, H., Nalbant, M., Şeker, U., 2004. Talaş Kaldırma Sırasında Açığa Çıkan Isının Kesme Bölgesinde Oluşturduğu Sıcaklıkların Ölçülmesinde Kullanılan Yöntemler. *Journal of Polytechnic*, 7 (4) 297-305.
- Groover, M., 2010. *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems*, 4th ed. Lehigh University, 1025 s. Pennsylvania.
- Gunjan 2012. Erişim Tarihi 06.07.2015.
http://www.slideshare.net/gauravgunjan24/theoryofmetalcutting?from_action=save
- Gunnberg, F., Escursell, M., Jacobson, M., 2006. The Influence of Cutting Parameters on Residual Stresses and Surface Topography During Hard Turning of 18MnCr5 Case Carburised Steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 174, 82–90.
- Günay, M., 2009. Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilmiş Al-Si/SiCp Kompozitlerin Mekanik ve İşlenebilirlik Özelliklerinin Araştırılması, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*, 209s. Ankara.
- Günay, M., Yücel, E., 2013. An Evaluation on Machining Processes for Sustainable Manufacturing. *Gazi University Journal of Science*, 26(2): 241-252.
- Gündoğdu, H. E., 2006. Kesme Sıvılı ve Kuru Talaşlı İşlemenin İş Parçası ve Kesici Takım Üzerindeki Etkileri. *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 180s, İstanbul.
- Gürbüz, H., Kafkas, F., Şeker, U., 2012. AISI 316L Çeliğinin İşlenmesinde Kesici Takım Burun Yarıçapının Kalıntı Gerilmeler Üzerine Etkisi. 3. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu, 35-50. Ankara.
- Güzel, G., 2006. Lityum ve Borca Zengin Bazı Kimyasal Bileşiklerin Sentezi ve Yapısal Özelliklerinin XRD ile İncelenmesi. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 100s, Balıkesir.
- Habak, M., Lebrun, J. L., 2011. An Experimental Study of The Effect of High-Pressure Water Jet Assisted Turning (HPWJAT) on The Surface Integrity. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 51, 661–669.
- Hadzley, A. B. M., Izamshah, R., Sarah, A. S., Fatin, M. N., 2012. Finite Element Model of Machining with High Pressure Coolant for Ti-6Al-4V Alloy.

Malaysian Technical Universities Conference on Engineering & Technology. 53, 624 – 631.

Hadzley, A. B. M., Izamshah, R., Abdullah, R., 2013. Machining Performance of Ti-6Al-4V Titanium Alloy Assisted by High Pressure Waterjet. World Applied Sciences Journal 21, 98-104.

Jacobus, K., DeVor, R. E., Kapoor, S. G., 2000. Machining-Induced Residual Stress: Experimentation and Modeling, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 122, 20-31.

Kafkas, F., 2007. Vidaların Talaşlı İmalatında İmalat Parametrelerinin Vida Diş Dibiindeki Kalıntı Gerilmeler Üzerine Etkilerinin Deneyisel Olarak Araştırılması. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 229s, Ankara.

Kahraman, F., 2008. Süper alaşımların Nitritlenerek Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 92s, İzmir.

Kalhorı, V., 2001. Modelling and Simulation of Mechanical Cutting. Luleå University of Technology, Department of Engineering Sciences and Mathematics, Ph. D Thesis, 36p, Lulea.

Kaminski, J., Alvelid, B., 2000. Temperature Reduction in the Cutting Zone in Water-Jet Assisted Turning. Journal of Materials Processing Technology 106, 68-73.

Kamruzzaman, M., Dhar, N. R., 2009. Effect of High-Pressure Coolant on Temperature, Chip, Force, Tool Wear, Tool Life and Surface Roughness in Turning AISI 1060 Steel. G.U. Journal of Science 22 (4): 359-370.

Kamruzzaman, M., Dhar, N. R., 2009. Effects of High-Pressure Coolant (HPC) Jet on Temperature, Chips and Forces in Turning AISI 1060 Steel and AISI 4320 Steel. Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering, (ICME2009).

Kamruzzaman, M., Dhar, N. R., 2008. The Effect of Applying High-Pressure Coolant (Hpc) Jet in Machining of 42CrMo4 Steel by Uncoated Carbide Inserts. Journal of Mechanical Engineering, 39 (2), 71-77.

Karabulut, Ş., 2006. Inconel 718 Süper alaşımların İşlenmesinde Talaş Kırılma Problemleri ve Talaş Kırıcı Tasarımı. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 122s, Ankara.

Karasan, M. M., 2007. Residual Stress Analysis of Riveting Process Using Finite Element Method. The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University. M. Sc. Thesis, 113p, Ankara.

- Kartal, M. S., 2000. Alaşımsız Çeliklerin CNC Torna Tezgahında İşlenmesinde Yüzey Pürüzlülüğü ve Takım Aşınmasının Taguchi Yöntemiyle İncelenmesi. Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 98s, İstanbul.
- Kenda, J., Pusavec, F., Kopac, J., 2011. Analysis of Residual Stresses in Sustainable Cryogenic Machining of Nickel Based Alloy-Inconel 718. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 133, 1-7.
- Khoda, A. K. M. B., Dhar, N. R., 2007. Role of High-Pressure Jet Cooling on Cutting Temperature in Turning Steel. Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering, (ICME2007).
- Kılıçaslan, C., 2009. Modelling and Simulation of Metal Cutting by Finite Element Method. A Thesis Submitted to Engineering and Sciences of İzmir Institute of Technology, M. Sc. Thesis, 86p, İzmir.
- Kramar, D., Kopač, J., 2009. High Pressure Cooling in the Machining of Hard-to-Machine Materials. Journal of Mechanical Engineering 55, (11), 685-694. .
- Kramar, D., Sekulić, M., Jurković, Z., Kopač, J., 2013. The Machinability of Nickel-Based Alloys in High-Pressure Jet Assisted (Hpja) Turning. Journal of Metalurgija 52 (4), 512-514.
- Kurt, A., 2006. Talaş Kaldırma Sırasında Oluşan Kesme Kuvvetleri ve Mekanik Gerilmelerin Deneysel Olarak İncelenmesi ve Matematiksel Modellerinin Oluşturulması, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 266s. Ankara.
- Lazoglu, İ., Ulutan, D., Alaca, B. E., Engin, E., Kaftanoglu, B., 2008. An Enhanced Analytical Model for Residual Stress Prediction in Machining. CIRP Annals - Manufacturing Technology 57, 81-84.
- Leppert, T., Peng, R. L., 2009. Surface Residual Stresses in Dry Turning of 0.45% C Steel. JCPDS-International Centre for Diffraction Data, 1097.
- Li, L., He, N., Wang, M., Wang, Z. G., 2002. High speed cutting of Inconel 718 with coated carbide and ceramic inserts. Journal of Processing Technology, 129; 127-130.
- Li, W., Withers, P. J., Axinte, D., Preuss, M., Andrews, P., 2009. Residual Stresses in Face Finish Turning of High Strength Nickel-Based Superalloy. Journal of Materials Processing Technology, 209, 4896-4902.
- Ma, K., Goetz, R., 2010. Modeling of Residual Stress and Machining Distortion in Aerospace Components. Chapter submitted for publication in the American Society for Metals (ASM) Handbook. PAO Case Number: 88ABW-1307.
- Maranhao, C., Davim, J. P., 2012. Residual Stresses in Machining Using Fem Analysis -A Review. Rev. Adv. Material Science. 30, 267-272.

- Marusich, T. D., Askari, E., 2001. Modeling Residual Stress and Workpiece Quality in Machined Surfaces. Third Wave Systems, Inc. Minneapolis, MN USA and Boeing Seattle, WA USA.
- M'Saoubi, R., Outeiro, J. C., Changeux, B., Lebrun, J. L., Dias, A. M., 1999. Residual Stress Analysis in Orthogonal Machining of Standard and Resulfurized AISI 316L Steels. *Journal of Materials Processing Technology* 96, 225-233.
- Motorcu, A. R., 2010. Nikel Esaslı Süper alaşımların ve Titanyum Alaşımlarının İşlenebilirliği. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7 (2), 1-17.
- Nandy, A. K., Paul, S., 2012. Effect of Coolant Pressure, Nozzle Diameter, Impingement Angle and Spot Distance in High Pressure Cooling with Neat Oil in Turning Ti-6Al-4V. *Machining Science and Technology*, 12:445–473.
- Nandy, A. K., Gowrishankar, M. C., Paul, S., 2009. Some Studies on High-Pressure Cooling in Turning of Ti-6Al-4V. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 49, 182–198.
- Outeiro, J. C., Pina, J. C., M'Saoubi, R., Pusavec, F., Jawahir, I. S., 2008. Analysis of Residual Stresses Induced by Dry Turning of Difficult-To-Machine Materials. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 57, 77–80.
- Ovalı, S., 2008. Metal Kesme İşleminde Soğutucu Akışkanın Isıl Analizi. *Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 93s, Gebze.
- Özçatalbaş, Y., 1996. 1050, 4140 ve 8620 Çeliklerin Isıl İşlemle Değişen Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine Bağlı İşlenebilirlikleri, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*, 237s. Ankara.
- Özdemir H., 2006. Tornalama İşleminde Kesme Kuvveti Ölçümünde Kullanılacak Dinamometre Tasarımı ve Üretimi. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 66s, Sakarya.
- Özek, C., Tosun, N., 2004. Tornalama İşleminde Takım-Talaş Ara Yüzey Sıcaklığının Belirlenmesi. *On Birinci Uluslararası Makina Tasarım ve İmalat Kongresi*, 1-10. Antalya.
- Özel, T., Ulutan, D., 2012. Prediction of Machining Induced Residual Stresses in Turning of Titanium and Nickel Based Alloys with Experiments and Finite Element Simulations. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 61, 547-550.
- Özgür, I., 2008. Nanotüp ve Nanotel Yapılarının XRD ile Karakterizasyonu. *Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 84s, Ankara.

- Özkan, İ. A., 2006. Tornalamada Kesme Kuvvetlerinin ve Takım Ucu Sıcaklığının Bulanık Mantık ve Yapay Sinir Ağı Teknikleriyle Tahmin Edilmesi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 105s. Konya.
- Palanisamy, S., McDonald, S. D., Dargusch, M. S., 2009. Effects of Coolant Pressure on Chip Formation while Turning Ti6Al4V Alloy. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 49, 739–743.
- Paolis, F. De., Caroselli, C., Riscifuli, S., 2001. Mechanical Treatments Evaluation on Ti-6Al-4V Alloy by Means of XRD Residual Stress Measurement Technique. Meeting on Cost Effective Application of Titanium Alloys in Military Platforms, RTO-MP-69. 1-11.
- Prasad, C. S., 2009. Finite Element Modeling to Verify Residual Stress in Orthogonal Machining. Department of Mechanical Engineering Blekinge Institute of Technology Karlskrona, M. Sc. Thesis, 124p, Sweden.
- Prevéy, P. S., 1996. Current Applications of X-Ray Diffraction Residual Stress Measurement. ASM International, Materials Park, 103-110. USA.
- Rossini, N. S., Dassisti, M., Benyounis, K. Y., Olabi, A. G., 2012. Methods of Measuring Residual Stresses in Components, *Materials and Design* 35, 572–588.
- Sanchez, A. M., Canteli, J. A., Cantero, J. L., Miguelez, M. H., 2011. Numerical Analysis of the Tool Wear Effect in the Machining Induced Residual Stresses. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 19(2), 872–886.
- Sandvik, 2014. Erişim Tarihi: 10.07.2015. http://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/materials/cutting_tool_materials/wear_on_cutting_edges.
- Schajer, G. S., Ruud, C. O., 2013. Overview of Residual Stresses and Their Measurement, *Practical Residual Stress Measurement Methods*, John Wiley & Sons, Ltd. First Edition, 1-28, Canada.
- Secotools, 2014. Erişim Tarihi: 13.07.2015. <https://www.secotools.com/en/Global/presscentre/Left/Archive-2014/Seco-increases-Jetstream-Tooling-performance/>
- Secotools, 2015. Erişim Tarihi: 17.08.2015. www.secotools.com/en/Global/presscentre/Left/Archive-2013/Directed-High-Pressure-Coolant-Tooling/
- Sekulic, M., Kovac, P., Gostimirovic, M., Kramar, D., 2013. Optimization of High-Pressure Jet Assisted Turning Process by Taguchi Method. *Advances in Production Engineering & Management*, 8 (1) 5–12.
- Sharma, V. S., Dogra, M., Suri, N. M., 2009. Cooling Techniques for Improved Productivity in Turning. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 49, 435–453.

- Sharman, A. R. C., Hughes, J. I., Ridgway, K., 2006. An Analysis of the Residual Stresses Generated in Inconel 718 When Turning. *Journal of Materials Processing Technology*, 173, 359–367.
- Shet, C., Deng, X., Bayoumi, A. E., 2003. Finite Element Simulation of High-Pressure Water-Jet Assisted Metal Cutting. *International Journal of Mechanical Sciences* 45, 1201–1228.
- Spence, T. W., 2010. The Effect of Machining Residual Stresses on The Dimensional Stability of Aluminum alloys used in Optical Systems. Worcester Polytechnic Institute, Materials Science and Engineering, Ph. D. Thesis, 158p, Massachusetts.
- Su, J. C., 2006. Residual Stress Modeling in Machining Processes. George W. Woodruff School of Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology, Ph. D. Thesis, 186p, Atlanta.
- Subaşı, M., Kafkas, F., Karataş, Ç., 2010. AISI 4140 Çeliğinde Sertlik ve Kalıntı Gerilme İlişkisi, 2. Ulusal Tasarım, İmalat ve Analiz Kongresi, 211-220.
- Subaşı, M., 2006. AISI 4140 Çeliğinde Sertlik, Yorulma Dayanımı ve Kalıntı Gerilme İlişkisi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 122s, Ankara.
- Şahin, H. M., Acır, A., 2003. Talaş Kaldırma İşlemlerinde Kesici Takım ve Talaş Arasında Oluşan Sıcaklık Dağılımının Sonlu Farklar Metodu İle Analizi. AISI 4140 Çeliğinde Sertlik, Yorulma Dayanımı ve Kalıntı Gerilme İlişkisi. *Politeknik Dergisi*, 6 (3), 541-549.
- Tali, D., 2010. Nikel Esaslı Inconel 718 Süper Alaşımının Tornalanmasında Yüzey Pürüzlülüğünün İncelenmesi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi, 170s. Eskişehir.
- Taş, S., 2010. Çeliklerde X-Işınları Yöntemi İle Artık Östenit ve İndentasyon Yöntemi İle Artık Gerilme Tayini, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi, 92s, İzmir.
- Taylan, F., 2009. Sert Malzemelerin Frezelenmesinde Takım aşınma davranışlarının belirlenmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 240s. Isparta.
- Tekaslan Ö., 2007. AISI 304 Östenitik Paslanmaz Çeliklerde İşlenebilirliğe Bağlı Olarak Kalıntı Gerilme Problemlerinin Araştırılması. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora tezi, 246s, Balıkesir.
- Tekaslan, Ö., Gerger, N., Şeker, U., 2009. 304 Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Farklı Kesme Parametreleri İle Tornalama İşleminde Sonra Oluşan Kalıntı Gerilmelerin Araştırılması. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi 24 (3), 443-452.

- Tercan, M. B., 2006. X-Işını Kırınımı Yöntemiyle Kripta-Fosfazen Türevlerinin Kristal Yapı Analizi. Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, 204s, Ankara.
- Ulutan, D., 2013. Predictive Modeling and Multi-Objective Optimization of Machining-Induced Residual Stresses: Investigation of Machining Parameter Effects. The State University of New Jersey, Ph. D. Thesis, 242p, New Jersey.
- Vagnorius, Z., Sorby, K., 2011. Effect of High-Pressure Cooling on Life of SiAlON Tools in Machining of Inconel 718. *Int J Adv Manuf Technol* 54:83–92
- Varol, Z., İpekçi, 2010. M., Kalıntı Gerilmelerin Ölçülmesi. Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim dalı, Malzeme Mühendisliği Yüksek Lisans Programı Ders Notları, 57s, İstanbul.
- Vosough, M., 2005. Effect of High-Pressure Cooling on the Residual Stress in Ti-Alloys during Machining. Luleå University of Technology Department of Applied Physics and Mechanical Engineering Division of Manufacturing Systems Engineering. Ph.D. Thesis 83p, Sweden.
- Vosough, M., Dhar, N. R., 2008. The Effect of Applying High-Pressure Coolant (Hpc) Jet in Machining of 42CrMo4 Steel by Uncoated Carbide Inserts. *Journal of Mechanical Engineering*, 39, 2.
- Vosough, M., Liu, P., Svenningsson, I., 2005. Depth Profile Of Titanium Alloy (Ti-6Al-4V) and Residual Stress Measured by Using X-Ray Diffraction after Metal Cutting Assisted by High-Pressured Jet Cooling Evaluation of Etching Methods: ION Beam (EDOS) and Electro- Chemical Etching. *Materials Science Forum*, 491, 545-551.
- Yaseen, S. J., 2012. Theoretical Study of Temperature Distribution and Heat Flux Variation in Turning Process. *Al-Qadisiya Journal for Engineering Sciences*, 5(3), 299-313.
- Yıldırım, S., 2011. Ürün Tasarımı Geliştirilmesi: Taguchi Tasarımı. Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 70s, Ankara.
- Yiğit, O., Dilmeç, M., Halkacı, H. S., 2008. Tabaka Kaldırma Yöntemi ile Kalıntı Gerilmelerin Ölçülmesi ve Diğer Yöntemlerle Karşılaştırılması. *Mühendis ve Makine Dergisi*, 49 (579), 20-27.
- Zhang, L., 1999. On the Separation Criteria in the Simulation of Orthogonal Metal Cutting Using the Finite Element Method. *Journal of Materials Processing Technology*, 89 (90), 273–278.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Lokman YÜNLÜ
Doğum Yeri ve Yılı : Kahramanmaraş, 1981
Medeni Hali : Bekar
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : lokmanyunlu@sdu.edu.tr



Eğitim Durumu

Lise : Osmaniye Teknik ve Endüstri Meslek Lisesi, Elektronik
Lisans : SDÜ, Teknik Eğitim Fakültesi
Yüksek Lisans : SDÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi

Mesleki Deneyim

SDÜ Araştırma Görevlisi 2006-2014

Yayınlar

SCI, SSCI ve AHCI dışındaki indeks ve özler tarafından taranan dergilerde yayımlanan teknik not, editöre mektup, tartışma, vaka takdimi ve özet türünden yayınlar dışındaki makale

Usal, M., Yünlü, L., 2011. On Constitutive Equations for Anisotropic Nonlinearly Piezoelectric Materials, Mathematical and Computational Applications, Vol. 16, No. 4, pp. 839-848.

Yünlü, L., Çolak, O., Kurbanoglu, C., 2014. Yüksek Basıncılı Soğutma Sistemiyle İşlenmiş Titanyum Alaşımlardaki Kalıntı Gerilmelerin X-ışını Kırınımı Metodu ile İncelenmesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi.

SCI, SSCI ve AHCI tarafından taranan dergilerde yayımlanan teknik not, editöre mektup, tartışma, vaka takdimi ve özet türünden yayınlar dışındaki makale

Usal, M., Kurbanoglu, C., Yünlü, L., 2014. Mathematical Model for the Magnetoelastic Behavior of Anisotropic Magnetic Sensitive Materials Based on Continuum Theory", International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation, September 2014, Volume 15, Issue 6, pp. 387–396.

Uluslararası toplantıda sunularak tam metin olarak yayımlanan bildiri

Çini, A., Çolak, O., Yünlü, L., Kurbanoglu, C., 2010. Modelling of Orthogonal Cutting Parameters in High Pressure Jet-Assisted Machining of Inconel 718, Proceeding of the 1st International Conference on Sustainable Life in Manufacturing, SLIM2010, 24th–25th June 2010, Eğirdir, Turkey.

Çolak, O., Çini, A., Yünlü, L., Kurbanoglu, C., 2011. Machining of Ti-6Al-4V Super alloy with Using High Pressure Jet-Assisted Cooling, 44th CIRP International Conference on Manufacturing Systems, 1-3 June 2011, Madison, Wisconsin, USA.

Yünlü, L., Çolak, O., Kurbanoglu, C., 2013. Chip Formation Analysis of High Pressure Jet Assisted Machining of Ti-6Al-4V, Proceeding of the 4th International Conference on Sustainable Life in Manufacturing, SLIM2013, 22nd – 24th September 2013, Fiesla, Slovenia.

Yünlü, L., Çolak, O., Kurbanoglu, C., 2014. Taguchi DOE Analysis of Surface Integrity for High Pressure Jet Assisted Machining of Inconel 718, 2nd CIRP Conference on Surface Integrity (CSI), 28th-30th May 2014, Nottingham, United Kingdom.