MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ti-5553 ALAŞIMIN TALAŞLI İMALAT SÜRECİNİN VE YÜZEY BÜTÜNLÜĞÜNÜN DENEYSEL VE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE ANALİZİ

MELİH ÖZKÜTÜK

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Makine Mühendisliği
Anabilim Dalı

DANIŞMAN
Doç. Dr. Yusuf KAYNAK

İSTANBUL, 2018

MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ti-5553 ALAŞIMIN TALAŞLI İMALAT SÜRECİNİN VE YÜZEY BÜTÜNLÜĞÜNÜN DENEYSEL VE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE ANALİZİ

MELİH ÖZKÜTÜK

(523215006)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Makine Mühendisliği
Anabilim Dalı

DANIŞMAN
Doç. Dr. Yusuf KAYNAK

İSTANBUL, 2018

MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Öğrencisi Melih ÖZKÜTÜK'ün "Ti-5553 Alaşımın Talaşlı İmalat Sürecinin ve Yüzey Bütünlüğünün Deneysel ve Sonlu Elemanlar Yöntemiyle İncelenmesi" başlıklı tez çalışması, 12/04/2018 tarihinde savunulmuş ve jüri üyeleri tarafından başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Yusuf KAYNAK (Danışman)
Marmara Üniversitesi Teknoloji Fak. Makine Müh. Bölümü.....

Prof. Dr. Bülent EKİCİ (Üye)
Marmara Üniversitesi Mühendislik Fak. Makina Müh. Bölümü .....

Prof. Dr. Erhan ALTAN (Üye)
Yıldız Teknik Üniversitesi Makina Fak. Makina Müh. Bölümü.....

ONAY

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ……tarih ve ……sayılı kararı ile Melih ÖZKÜTÜK'ün Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans derecesi alması onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü
Prof. Dr. Bülent EKİCİ

ÖNSÖZ

Uzun emekler sonucunda ortaya çıkan bu tezin hazırlanmasında bana tecrübesiyle yol gösteren, BAPKO ve TÜBİTAK 1001 projelerinde çalışma fırsatı veren, laboratuvarını açan tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Yusuf KAYNAK'a çok teşekkür ediyorum.

Lisansüstü çalışmalarım süresince İleri İmalat Teknolojileri Laborauvarında beraber çalıştığım ve tez çalışmalarım süresince tecrübelerinden faydalandığım yol arkadaşlarım Armin GHARİBİ, Erkin DUMAN, Ümit YILMAZ ve Emre TAŞCIOĞLU'na çok teşekkür ediyorum.

Tez çalışmalarım süresince yardımlarını esirgemeyen Özhan KITAY, Ebru KIRMACIOĞLU, Ali Osman KABİL ve Çoşkun Anıl BOZKURT'a çok teşekkür ediyorum.

Bu tez çalışması FEN-C-YLP-090217-0062 Proje Numarası ile Marmara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (BAPKO) tarafından desteklenmiştir. Desteğinden dolayı Marmara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne çok teşekkür ediyorum.

Son olarak ve en önemlisi her koşulda bana her türlü desteği sağlayan, bugünleri görmemde en büyük emeğe sahip olan babam Mehmet ÖZKÜTÜK, annem Nesrin ÖZKÜTÜK, kardeşim Ömer ÖZKÜTÜK ve anneannem Şükran KESKİNER'e teşekkürü bir borç bilirim.

Nisan,2018 **Melih ÖZKÜTÜK**

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ i
İÇİNDEKİLER ii
ÖZET iv
ABSTRACT vi
SEMBOLLER viii
KISALTMALAR ix
ŞEKİL LİSTESİ x
TABLO LİSTESİ xvi
1. GİRİŞ 1
2. DENEYSEL ÇALIŞMA VE DÜZENEKLER 11
2.1 Deneysel Çalışmada Kullanılan İş Malzemesi 11
2.2 CNC Torna Tezgahı, Takım Tutucular ve Kesici Takım 15
2.3 Soğutucu ve Yağlayıcılar 17
2.4 Kesme Parametleri 18
2.5 Kesme Kuvvetleri Ölçümü 19
2.6 Kesme Sıcaklıkları Ölçümü 20
2.7 İşlenen Parçaların Mikroyapı ve XRD İncelemeleri için Metalografik Numune Hazırlama 20
2.8 XRD Faz Analizi Ölçümü 22
2.9 Mikroyapı Görüntüleme 23
3. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA 24
3.1 Kesme Kuvvetleri 24
3.2 Kesme Sıcaklığı 30
3.3 Kesici Takım-Talaş Temas Uzunluğu 34
3.4 Talaş Formu ve Morfolojisi 36
3.5 XRD Faz Analizi 45
3.6 Mikroyapı Analizi 49
4. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ VE DENEYSEL VERİLERLE KARŞILAŞTIRMA 52
4.1 Ti 5553 Alaşım Malzemesinden Talaş Kaldırma Sürecinin Modellenmesi 52
4.1.1 Malzeme Modeli 55

4.1.2 Kırılma Kriteri ve Kesici Takım-Talaş Arayüzey Sürtünmesi 55
4.1.3 Ti-5553 Alaşımı için Hassasiyet Analizi 56
4.1.4 Farklı Kesme Koşullarında ve Parametrelerinde Kesme Kuvvetlerinin Deneysel Verilerle Kıyaslanması 65
4.1.5 Farklı Kesme Koşullarında ve Parametrelerinde Kesme Sıcaklıklarının Deneysel Verilerle Kıyaslanması 73
4.1.6 Farklı Kesme Koşullarında ve Parametrelerinde Kesici Takım-Talaş Temas Uzunluğunun Deneysel Verilerle Kıyaslanması 78
4.1.7 Farklı Kesme Koşullarında ve Parametrelerinde Talaş Morfolojisinin Deneysel Verilerle Kıyaslanması 81
4.2 Ti-5553 Alaşım Malzemesinin İşlenmiş Yüzey ve Yüzeyaltı Tane Boyutundaki Değişimin Modellenmesi ve Simülasyonu 92
4.2.1 Mikroyapı Modeli 92
4.2.2 Kesme Koşulları ve Kesme Parametrelerinin Tane Boyutu Değişimine Etkisi 94
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 104
KAYNAKLAR 106
ÖZGEÇMİŞ

ÖZET

Ti-5553 ALAŞIMIN TALAŞLI İMALAT SÜRECİNİN VE YÜZEY BÜTÜNLÜĞÜNÜN DENEYSEL VE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE ANALİZİ

Havacılık sektöründe Ti6Al4V alaşım malzemesine oranla gün geçtikçe kullanımı ve önemi artan Ti-5553 alaşım malzemesinin talaşlı işlenebilirliği ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır. Ti-5553 alaşım malzemesinin Ti6Al4V alaşım malzemesine oranla çekme ve yorulma dayanımı gibi özelliklerinin daha yüksek olması talaşlı işlenebilirlikte problemler çıkarmaktadır. Meydana gelen bu problemleri daha iyi anlayabilmek ve çözüm üretebilmek için sonlu elemanlar yöntemlerinden yararlanılmaktadır.

Bu tez kapsamında, Ti-5553 havacılık alaşım malzemesinin dik kesme işleminde talaş açısının, kesme hızının ve kriyojenik, minimum miktarda yağlama (MQL) gibi kesme koşullarının kesme kuvvetleri, kesme sıcaklıkları, talaş morfolojisi ve yüzey bütünlüğü gibi çıktılara etkileri ilk kez araştırılmıştır. Ti-5553 alaşım malzemesi için sonlu elemanlar yöntemiyle farklı kesme koşulları ve parametrelerinde dik kesme simülasyonları yapılmıştır. Farklı koşullar ve farklı kesme parametreleri altında kesme kuvvetleri, talaş morfolojisi ve sıcaklıkların tahmin edilebilmesi için Johnson-Cook bünye denkleminden yararlanılmıştır. Model Fortran dilinde kod olarak yazılmış ve Deform-2D sonlu elemanlar yazılımına entegre edilmiştir. Böylece çok farklı kesme koşulları ve parametrelerinde meydana gelen kesme kuvvetleri, talaş morfolojisi ve sıcaklıklar tahmin edilerek, deneysel olarak elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Modelin Ti-5553 alaşımın talaş kaldırma sürecini çok iyi tahmin edebilme kabiliyetine sahip olduğu görülmüştür.

Dik kesme sonucu elde edilen numunelerin yüzey bütünlüğü analizleri kapsamlı şekilde yapılmıştır. Kesme koşullarının ve kesme parametrelerinin iş parçası yüzey bütünlüğü karakteristiklerini önemli ölçüde etkilediği gözlemlenmiştir. Farklı koşullarda talaş kaldırma operasyonu sonucu faz dönüşümleri ve tane küçülmeleri gözlemlenmiştir. Bu malzemenin yüzey bütünlüğü özelliklerinin talaş açısı, kesme hızı ve kesme koşulları ile doğrudan ilişkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Ti-5553 alaşımın yüzey bütünlüğü tahmini kapsamında Zener-Hollomon modeli Fortran dilinde kod olarak yazılarak, Deform-2D sonlu elemanlar yazılımında talaş kaldırma simülasyonuna entegre edilmiş ve farklı kesme koşulları, kesme parametreleri için tane küçülmesini tahmin edebilen simülasyonlar gerçekleştirilerek deneysel verilerle kıyaslanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Ti-5553, Talaş açısı, Dik kesme, Yüzey bütünlüğü, Sonlu elemanlar analizi

ABSTRACT

FINITE ELEMENT MODELING AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF METAL CUTTING PROCESS AND SURFACE INTEGRITY OF Ti-5553 ALLOY

In the aviation sector, studies are being conducted on the machinability of Ti-5553 alloy material, which is increasingly used and increasing in importance compared to Ti6Al4V alloy material. Ti-5553 alloy material has higher properties such as tensile strength and fatigue strength compared to Ti6Al4V alloy material, which causes problems in machinability. In order to better understand these problems and to be able to produce solutions, finite element methods are used.

In this thesis, in the machinability of Ti-5553 aerospace alloys, the effects of rake angle, cutting speed and dry, MQL and cryogenic coolant on machining performance of this Ti-5553 alloy by measuring cutting forces, cutting temperature, chip morphology etc. were investigated. Ti-5553 alloy material, different cutting conditions and parameters were simulated by finite element method. The Johnson-Cook constitutive equation has been used to estimate cutting forces, chip morphology and temperatures under different conditions and different cutting parameters. The model was written as subroutine using Fortran and integrated into Deform-2D finite element model software to simulate chip formation process. Thus, cutting forces, chip morphology and temperatures were predicted and compared to the experimental results obtained in very different cutting conditions and parameters. Experimental comparision shows that the model is well capable of predicting chip formation process of this alloy.

Surface integrity characteristics of the parts obtained from orthogonal cutting tests have been extensively investigated. It was found that cutting conditions and parameters substantially affects surface integrity characteristics. Machining process leads to occuring phase transformation and grain refinement under various conditions. It was demonstrated that surface integrity characteristics of this alloy is very sensitive to rake angle, cutting speed and cutting conditions.

Zener-Hollomon model was utilized to predict surface integrity characteristcs of this alloy. The model was written as Fortran code and integrated into Deform 2D during cutting simulation to predict surface integrity characteristics including grain size induced from cutting parameters and conditions. Simulation results are compared with experimental data.

Keywords: Ti-5553, Rake angle, orthogonal cutting, Surface integrity, Finite element method

SEMBOLLER

A : Akma gerilmesi (MPa)
b : Talaş en küçük et kalınlığı (µm)
B : Sertleşme modülü (MPa)
C : Şekil değiştirme hızı hassasiyet katsayısı
d : Yeniden kristallenmiş tane boyutu (µm)
D_{kritik} : Malzeme katsayısı
F_c : Kesme kuvveti (N)
F_t : İtme kuvveti (N)
l_c : Temas uzunluğu (mm)
m : Kayma faktörü
n : Sertleşme katsayısı
Q : Aktivasyon enerjisi (J/mol)
R : Evrensel gaz sabiti (J/Kmol)
t_0 : Kesme derinliği (mm)
t_c : Talaş kalınlığı (µm)
T : Mutlak sıcaklık (°K)
T_m : İş parçasının ergime sıcaklığı (ºC)
T_o : Oda sıcaklığı (ºC)
V_c : Kesme hızı (m/dk)
^{a} : Alfa fazı
β : Beta fazı
$^{a}_{p}$: Primary alfa
$^{a}_{s}$: Secondary afa
α : Talaş açısı (°)
ε_{kritik} : Kritik birim şekil değiştirme
$\bar{\varepsilon}$: Şekil değiştirme
$\dot{\bar{\varepsilon}}$: Şekil değiştirme hızı (sn^{-1})
$\dot{\bar{\varepsilon}}_0$: Referans şekil değiştirme hızı
ϕ : Kayma açısı (°)
$\bar{\sigma}$: Plastik akma
w : Geçiş fazı
Ø : Çap

KISALTMALAR

BM : Bimodal

HMK : Hacim merkezli kübik

J-C : Johnson-Cook bünye denklemi

LN_2 : Sıvı azot

MQL : Minimum miktarda yağlama

SDH : Sıkı düzen hegzagonal

SEM : Taramalı elektron mikroskobu

XRD : X Işınımı kırınım yöntemi

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1. α ve β titanyum alaşımların kafes yapısı (Lenain, 2007). 1

Şekil 1.2. (a) Uçak motoru ve (b) iniş takımları (Bruhis ve ark., 2008,Ulutan ve Ozel, 2011). 2

Şekil 1.3. Boeing 787 iniş takımlarında Ti-5553 alaşımın kullanım alanları (Boyer, 2010). 3

Şekil 1.4. Boeing 787 iniş takımlarında Ti-5553 alaşımın kullanım alanları (Tomchik ve Dunder, 2006). 3

Şekil 1.5. Titanyum alaşımları faz diyagramı(Aeby-Gautier ve Appolaire). 4

Şekil 1.6. Ti 5553 alaşım malzemelerinin TTT diyagramı (Nag, 2008). 5

Şekil 2.1. Ti-5553 alaşım malzemesi. 11

Şekil 2.2. Ti-5553 disk malzeme. 11

Şekil 2.3. Dik kesme için iş parçasının bağlantısı. 12

Şekil 2.4. a)İşlem görmemiş, sıcak haddelenmiş Ti-5553 iş parçası malzemesinin optik mikroskop, (b) taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri. 13

Şekil 2.5. İş parçasının (Ti-5553 alaşımının) işlem görmemiş haline ait XRD sonucu. 14

Şekil 2.6. Doosan Puma GT2100 CNC torna tezgahı. 15

Şekil 2.7. Deneylerde kullanılan kesici takımın görüntüsü. 16

Şekil 2.8. a) 0° b) +2° talaş açısına sahip takım tutucuların gösterimi. 16

Şekil 2.9. Deney ve ölçüm düzeneği (Kaynak ve ark., 2018). 17

Şekil 2.10. Soğutucu ve yağlayıcıların uygulanışı (Kaynak ve ark., 2018). 18

Şekil 2.11. Kuvvet ölçüm sistemi (a)dinamometre, (b)amplifikatör ve veri toplayıcı. .. 19

Şekil 2.12. Kesme süresince ölçülen kuvvetlerin şematik gösterimi. 19

Şekil 2.13. (a) Infrared kamera, (b) kamera pozisyonu, (c) yazılımdan alınan görüntü (Kaynak ve ark., 2018). 20

Şekil 2.14. İşlenen parçalardan metalografik numune hazırlama aşamaları. 21

Şekil 2.15. İşlenen Ti-5553 alaşım malzemelerden metalografik numune hazırlama aşamasında kullanılan hassas kesme cihazı. 21

Şekil 2.16. Mikroyapı analizleri için hazırlanan numunedeki incelenen yüzey. 22

Şekil 2.17. Multipol Advanced Plus Zımparalama ve Parlatma Cihazı. 22

Şekil 2.18. XRD ölçüm sistemi ve ölçülen numunelere ait görüntü. 23

Şekil 2.19. Ti-5553 alaşım malzemesi numunelerinin incelendiği Keyence marka VHX 6000 serisi dijital mikroskop. 23

Şekil 3.1. Kuru kesme koşulunda ve farklı talaş açılarında oluşan kesme kuvvetleri.... 24

Şekil 3.2. Sıvı azot yardımlı kesme koşulunda ve farklı talaş açılarında oluşan kesme kuvvetleri. 25

Şekil 3.3. Minimum miktarda yağlama koşulunda ve farklı talaş açılarında oluşan kesme kuvvetleri. 26

Şekil 3.4. 210 m/dk kesme hızında farklı kesme koşullarında ve farklı talaş açılarında oluşan kesme kuvvetleri. 27

Şekil 3.5. Kuru kesme koşulunda ve farklı talaş açılarında oluşan itme kuvvetleri. 28

Şekil 3.6. Sıvı azot yardımlı kesme koşulunda ve farklı talaş açılarında oluşan itme kuvvetleri. 29

Şekil 3.7. Minimum miktarda yağlama koşulunda ve farklı talaş açılarında oluşan itme kuvvetleri. 29

Şekil 3.8. Kuru kesme koşulunda farklı kesme hızlarında ve farklı talaş açılarındaki ortalama sıcaklık değerleri..... 31

Şekil 3.9. Sıvı azot yardımlı kesme koşulunda farklı kesme hızlarında ve farklı talaş açılarındaki ortalama sıcaklık değerleri..... 32

Şekil 3.10. Minimum miktarda yağlama koşulunda farklı kesme hızlarında ve farklı talaş açılarındaki ortalama sıcaklık değerleri..... 32

Şekil 3.11. 20 ve 210 m/dk kesme hızında farklı koşullarda ve farklı talaş açılarındaki ortalama sıcaklık değerleri..... 33

Şekil 3.12. Kesici takımların talaş yüzeyinde takım-talaş temas uzunluğu. 34

Şekil 3.13. Farklı kesme koşulları ve talaş açılarında meydana gelen talaş yüzeyi görüntüleri. 35

Şekil 3.14. 120 m/dk kesme hızında farklı kesme koşullarında ve talaş açılarında elde edilen talaş temas uzunluğu değerlerinin karşılaştırılması. 36

Şekil 3.15. Farklı kesme koşulları ve talaş açılarında elde edilen talaş formları. 37

Şekil 3.16. Talaş formu ölçümünün gösterimi. 38

Şekil 3.17. Kuru kesme koşulunda farklı kesme hızlarında ve farklı talaş açılarındaki talaş kalınlığı değerleri. 38

Şekil 3.18. Minimum miktarda yağlama koşulunda farklı kesme hızlarında ve farklı talaş açılarındaki ortalama sıcaklık değerleri..... 39

Şekil 3.19. Sıvı azot ile kesme koşulunda farklı kesme hızlarında ve farklı talaş açılarındaki ortalama sıcaklık değerleri..... 39

Şekil 3.20. 120 m/dk kesme hızında farklı talaş açılarında ve kesme koşullarında elde edilen talaş kalınıklarının karşılaştırılması. 40

Şekil 3.21. 120 m/dk kesme hızında farklı talaş açılarında ve kesme koşullarında elde edilen *b* değerlernin karşılaştırılması..... 40

Şekil 3.22. Kayma bantlarının ve kayma açısının ölçümünün gösterimi(2000x). 41

Şekil 3.23. Kuru kesme işlemi için farklı talaş açıları ve kesme hızlarında ölçülen kayma açıları. 42

Şekil 3.24. Sıvı azot ile kesme işleminde farklı talaş açıları ve kesme hızlarında ölçülen kayma açıları..... 42

Şekil 3.25. MQL işlemi için farklı talaş açılarında ve kesme hızlarında ölçülen kayma açıları. 43

Şekil 3.26. α(+2°) talaş açısında farklı kesme hızları ve koşullarında elde edilen kayma açıları. 43

Şekil 3.27. Farklı kesme koşulları ve parametrelerinde oluşan talaşların fotoğrafları. .. 44

Şekil 3.28. İşlenmemiş Ti-5553 alaşım malzemesinin faz pikleri..... 46

Şekil 3.29. α(0°) talaş açısında farklı kesme koşulları ve hızlarında işlenen parçaların yüzeylerinin XRD analizi. 47

Şekil 3.30. α(+2°) talaş açısında farklı kesme koşulları ve hızlarında işlenen parçaların yüzeylerinin XRD analizi. 48

Şekil 3.31. Kuru kesme koşulunda işlenmiş yüzey altındaki mikroyapı görüntüleri. 49

Şekil 3.32. Sıvı azot yardımlı kesme koşulunda işlenmiş yüzey altındaki mikroyapı görüntüleri. 50

Şekil 3.33. Minimum miktarda yağlama koşulunda işlenmiş yüzey altındaki mikroyapı görüntüleri. 51

Şekil 4.1. Ti 5553 alaşımın malzemesinden talaş kaldırma süreci için hazırlanmış sınır koşulları ve ağ yapısı, a) iş parçası, b) kesici takım. 53

Şekil 4.2. Kesici takım açılarının simülasyonda gösterimi a)0°, b)+2°..... 54

Şekil 4.3. Ti-5553 alaşımı sonlu elemanlar kalibrasyonu için akış diyagramı..... 57

Şekil 4.4. Kriyojenik talaş kaldırma işlemi için sınır koşulları gösterimi. 58

Şekil 4.5. Ti-5553 alaşımdan talaş kaldırma simülasyonu sonuçları, m_f = 0.4, D=250 a) 30 m/dk sıcaklık dağılımı b) 90 m/dk sıcaklık dağılımı c) 30 m/dk birim şekil değiştirme dağılımı d) 90 m/dk birim şekil değiştirme dağılımı. 59

Şekil 4.6. Simülasyon sonucunda elde edilen kesme kuvveti verisinin grafik örneği.... 60

Şekil 4.7. Farklı kayma faktörüne bağlı olarak tahmin edilen kesme kuvvetleri,(D=250). 61

Şekil 4.8. Farklı kayma faktörüne bağlı olarak tahmin edilen itme kuvvetleri,(D=250).61

Şekil 4.9. Simülasyon sonucu tahmin edilen talaş üzerinden alınan ölçüler. 62

Şekil 4.10. Farklı D malzeme sabitine bağlı olarak tahmin edilen talaş kalınlıkları, (m_f =0.4)..... 63

Şekil 4.11. Farklı D malzeme sabitine bağlı olarak tahmin edilen b değerleri, (m_f =0.4). 63

Şekil 4.12. Farklı D malzeme sabitlerine bağlı olarak tahmin edilen talaş morfolojisi, (m_f =0.4)..... 64

Şekil 4.13. 120 m/dk kesme hızında tahmin edilen asal gerilme dağılımları a)Kuru kesme b)MQL c)Kriyojenik (α(+2°)). 65

Şekil 4.14. Kuru kesme için farklı kesme parametlerinde kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması..... 66

Şekil 4.15. Kuru kesme için farklı kesme parametlerinde itme kuvvetlerinin karşılaştırılması..... 67

Şekil 4.16. Minimum miktarda yağlama işlemi için farklı kesme parametrelerinde kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması. 68

Şekil 4.17. Minimum miktarda yağlama işlemi için farklı kesme parametrelerinde itme kuvvetlerinin karşılaştırılması. 68

Şekil 4.18. Sıvı azot ile kesme işlemi için farklı kesme parametlerinde kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması. 69

Şekil 4.19. Sıvı azot ile kesme işlemi için farklı kesme parametlerinde itme kuvvetlerinin karşılaştırılması..... 69

Şekil 4.20. 210 m/dk hızında farklı kesme koşullarında ve parametrelerinde kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması. 70

Şekil 4.21. 210 m/dk hızında farklı kesme koşullarında ve parametrelerinde itme kuvvetlerinin karşılaştırılması. 70

Şekil 4.22. 210 m/dk kesme hızında farklı koşullarda tahmin edilen sıcaklık dağılımları a) Kuru kesme b)MQL c)Kriyojenik (α(+2°)). 73

Şekil 4.23. Kuru kesme işlemi için farklı kesme parametrelerinde ortalama sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması. 74

Şekil 4.24. MQL işlemi için farklı kesme parametrelerinde ortalama sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması..... 75

Şekil 4.25. Sıvı azot ile kesme işlemi için farklı kesme parametrelerinde ortalama sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması. 76

Şekil 4.26. Simülasyonda temas uzunluğu ölçümünün gösterimi. 78

Şekil 4.27. Kuru kesme işleminde farklı kesme parametlerinde talaş temas uzunluğu değerlerinin karşılaştırılması. 78

Şekil 4.28. MQL işlemi içn farklı kesme parametrelerinde talaş temas uzunluğu değerlerinin karşılaştırılması. 79

Şekil 4.29. Sıvı azot ile kesme işlemi için farklı kesme parametrelerinde talaş temas uzunluğu değerlerinin karşılaştırılması. 79

Şekil 4.30. Kuru kesme işlemi için farklı kesme parametrelerinde talaş kalınlıklarının karşılaştırılması..... 81

Şekil 4.31. MQL işlemi için farklı kesme parametrelerinde talaş kalınlıklarının karşılaştırılması..... 82

Şekil 4.32. Sıvı azot ile kesme işlemi için farklı kesme parametrelerinde talaş kalınlıklarının karşılaştırılması. 82

Şekil 4.33. Kuru kesme koşulu için farklı kesme parametrelerinde *b* değerlerinin karşılaştırılması..... 83

Şekil 4.34. MQL işlemi için farklı kesme parametrelerinde *b* değerlerinin karşılaştırılması..... 83

Şekil 4.35. Sıvı azot ile kesme işlemi için farklı kesme parametrelerinde *b* değerlerinin karşılaştırılması. 84

Şekil 4.36. Kuru kesme işlemi için farklı kesme parametrelerinde tahmin edilen talaş morfojilerinin karşılaştırılması. 87

Şekil 4.37. MQL işlemi için farklı kesme parametrelerinde tahmin edilen talaş morfolojilerinin karşılaştırılması. 87

Şekil 4.38. Sıvı azot ile kesme işlemi için farklı kesme parametrelerinde tahmin edilen talaş morfolojisinin karşılaştırılması. 88

Şekil 4.39. Simülasyonda kayma açısı ölçümünün gösterimi (Kaynak ve ark., 2018). . 89

Şekil 4.40. Kuru kesme işlemi için farklı kesme parametrelerinde tahmin edilen kayma açısı değerlerinin karşılaştırılması. 89

Şekil 4.41. MQL işlemi için farklı kesme parametrelerinde tahmin edilen kayma açısı değerlerinin karşılaştırılması. 89

Şekil 4.42. Sıvı azot ile kesme işlemi için farklı kesme parametrelerinde kayma açısı değerlerinin karşılaştırılması. 90

Şekil 4.43. Mikroyapı modeli çalışma prensibi. 93

Şekil 4.44. Mikroyapı modeli ile tane boyutu değişiminin gösterilmesi (Kuru kesme, . 94

Şekil 4.45. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile elde edilen mikroyapı görüntüsünde α ve β fazı tane boyutlarının gösterimi. 95

Şekil 4.46. MQL işleminde farklı kesme hızlarında tahmin edilen tane boyutu değişiminin gösterimi a)20 m/dk b)210 m/dk, α(+2°). 96

Şekil 4.47. α(0°) Talaş açısında farklı kesme hızlarında kuru kesme işleminde tahmin edilen tane boyutu değişiminin yüzdesel gösterimi a)20 m/dk b)60 m/dk c)120 m/dk d)210 m/dk. 97

Şekil 4.48. α(+2°) Talaş açısında farklı kesme hızlarında kuru kesme işleminde tahmin edilen tane boyutu değişiminin yüzdesel gösterimi a)20 m/dk b)60 m/dk c)120 m/dk d)210 m/dk. 98

Şekil 4.49. Farklı kesme koşulları ve talaş açılarında, 20 m/dk ve 210 m/dk kesme hızlarında mikroyapı modeliyle tahmin edilen tane boyutu değişiminin yüzdesel olarak karşılaştırılması (d<0.25 μm). 99

Şekil 4.50. Kuru kesme işlemi için farklı kesme hızlarında etkilenmiş derinliğin gösterimi a)20 m/dk b)210 m/dk, α(0°). 99

Şekil 4.51. Kuru kesme işlemi için farklı kesme hızlarında işlenmiş yüzeyden itibaren etkilenen derinliğin simülasyonla tahmin edilen değerlerinin karşılaştırılması, α(+2°). 100

Şekil 4.52. Kuru kesme işlemi için farklı talaş açılarında ve yüksek kesme hızlarında işlenmiş yüzeyden itibaren etkilenen derinliğin simülasyonla tahmin edilen değerlerinin karşılaştırılması. 101

Şekil 4.53. MQL ile kesme işlemi için farklı talaş açılarında, düşük ve yüksek kesme hızlarında işlenmiş yüzeyden itibaren etkilenen derinliğin simülasyonla tahmin edilen değerlerinin karşılaştırılması. 102

Şekil 4.54. Farklı kesme koşullarında işlenmiş yüzeyden itibaren etkilenen derinliğin simülasyonla tahmin edilen değerlerinin karşılaştırılması, (V_C=210 m/dk, α(0°)).... 103

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1. Yüzey bütünlüğü kriterleri (Field ve ark., 1972). 7

Tablo 2.1. Ti-5553 malzemesinin yüzdesel kimyasal kompozisyonu. 12

Tablo 2.2. Ti-5553 malzemesine ait mekanik özellikleri. 13

Tablo 2.3. Doosan Puma GT2100 CNC torna tezgahı teknik özellikleri. 15

Tablo 2.4. Farklı talaş açısı ve kesme hızında gerçekleştirilen deney parametreleri. 18

Tablo 4.1. Kesici takım malzemesinin özellikleri (Özel ve Zeren, 2007). 52

Tablo 4.2. Ti-5553 alaşımının ısı iletim katsayısı ve ısı kapasitesi değerleri(Wagner ve ark., 2015). 54

Tablo 4.3. Ti-5553 alaşımının elastiklik modülü değerleri (Manual, 2015). 54

Tablo 4.4. Ti-5553 J-C bünye denklemi sabitleri (Germain ve ark., 2013). 55

Tablo 4.5. Farklı kesme parametreleri ve koşullarında deneysel ve tahmin edilen kesme kuvvetlerinin sayısal olarak karşılaştırılması, F_c(N). 71

Tablo 4.6. Farklı kesme parametreleri ve koşullarında deneysel ve tahmin edilen itme kuvvetlerinin sayısal olarak karşılaştırılması, F_t(N). 72

Tablo 4.7. Farklı kesme parametreleri ve koşullarında deneysel ve tahmin edilen ortalama sıcaklık değerlerinin sayısal olarak karşılaştırılması, T(°C). 77

Tablo 4.8. Farklı kesme parametreleri ve koşularında deneysel ve tahmin edilen talaş temas uzunlukların sayısal olarak karşılaştırılması, l_c(µm). 80

Tablo 4.9. Farklı kesme parametreleri ve koşullarında deneysel ve tahmin edilen talaş kalınlıklarının yüzdesel olarak kıyaslanması, t_c(µm). 85

Tablo 4.10. Farklı kesme parametreleri ve koşullarında deneysel ve tahmin edilen talaşın en küçük et kalınlıklarının yüzdesel olarak kıyaslanması, b (µm). 86

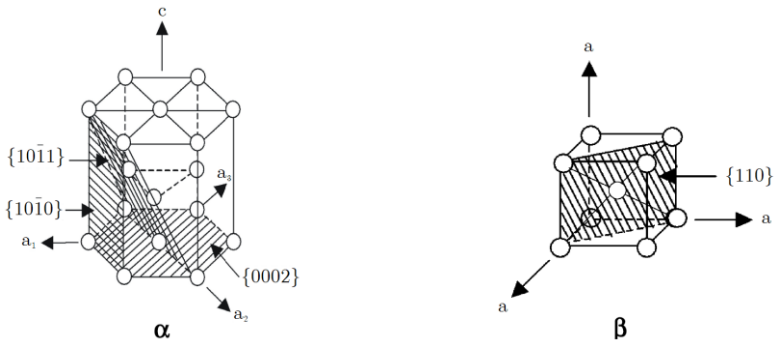
Tablo 4.11. Farklı kesme parametreleri ve kesme koşullarda deneysel ve tahmin edilen kayma açılarının yüzdesel olarak karşılaştırılması, ϕ(°). 91

Tablo 4.12. Kritik birim şekil değiştirme için denklem parametreleri (Hajari ve ark., 2017). 92

1. GİRİŞ

Titanyum alaşımlar başta otomotiv, kimya, biyomedikal, havacılık endüstrisi olmak üzere gaz türbin motorları, nükleer atık depolama tankları, petrol rafineri, uçak motor bıçakları (compression blade), uçak gövdesi, iniş takımları gibi yapısal komponentlerin üretilmesinde, yüksek mekanik özellikleri, hafiflik, yüksek korozyon direnci, kırılma tokluğu, yüksek sıcaklıklarda mekanik özelliklerini koruması gibi üstün özelliklerinden ötürü yaygın olarak kullanılırlar (Ezugwu ve Wang, 1997,Arrazola ve ark., 2009) (Ezugwu ve ark., 2003), (Boyer, 1996,Ginting ve Nouari, 2009).

Saf titanyum allotropik özelliğe sahip olması dolayısıyla oda sıcaklığında α faz ve sıkı düzen hegzagonal (SDH) birim hücre yapıda iken, yüksek sıcaklıklarda (882 °C) β fazında ve hacim merkezli kübik (HMK) birim hücresi yapıda bulunmaktadır (Lenain, 2007). β faz hacim merkezli kübik (HMK) yapıya sahip titanyum alaşımları yüksek sıcaklıklarda kararlı mevcut kayma sistemine sahip olmaları dolayısıyla ikizlenme mekanizması çok sık görülmemektedir (Lenain, 2007). Titanyum alaşımlarında ikizlenme mekanizması (112) düzlemi ve [111] doğrultusunda gerçekleşmektedir (Lenain, 2007). α faz durumuna sahip Ti-64 alaşımın sahip olduğu sıkı düzen hegzagonal (SDH) kafes yapısına ait düzlemler bazal (0002) düzlemi, üç prizmatik $(10\bar{1}0)$ düzlem, altı $(10\bar{1}1)$ doğrusal piramit düzlem ve $[11\ \bar{2}\ 0]$ doğrultusu iken, metastabil β Ti-5553 alaşımının kristal doğrultusu (110) düzleminde, [111] doğrultusundadır (Gerday, 2009). α ve β titanyum alaşımlarına ait kafes yapıları Şekil 1.1'de görülmektedir (Lenain, 2007).

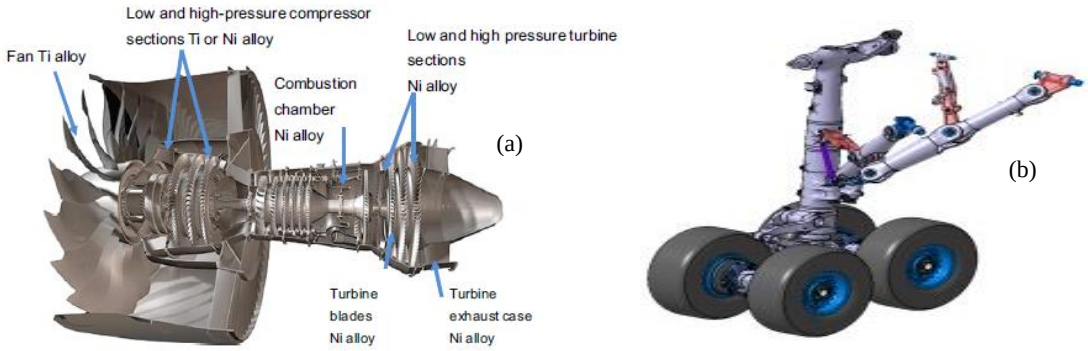


Şekil 1.1. α ve β titanyum alaşımların kafes yapısı (Lenain, 2007).

İlaveten, Titanyum alaşımlarında yer alan elementler allotropik dönüşüm sıcaklığını ve alaşımın mekanik özelliklerini doğrudan etkilemektedirler (Nouari ve Makich,

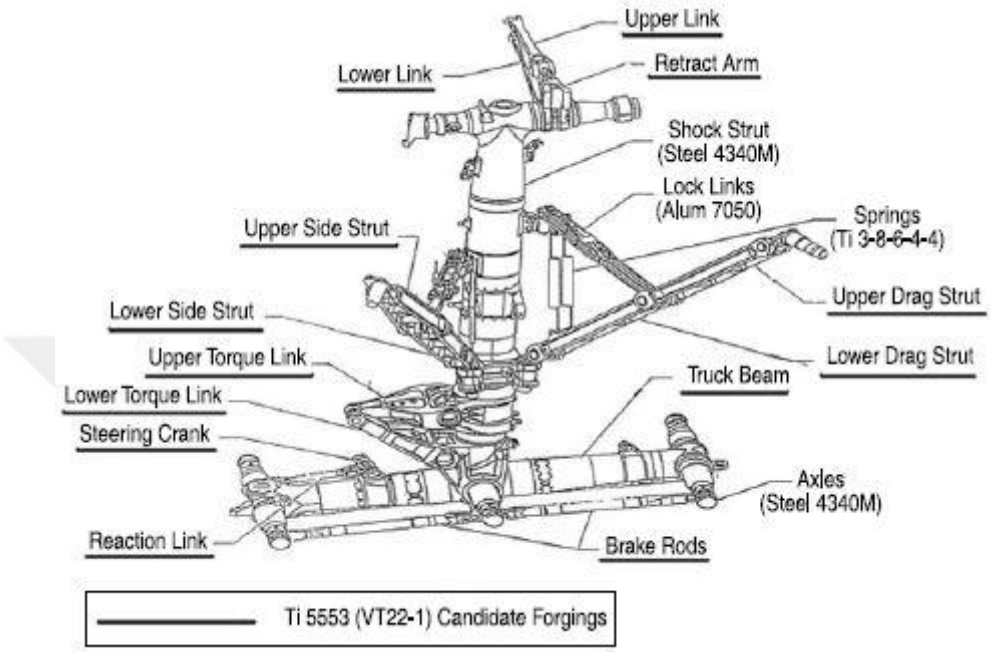
2013).Titanyum alaşımları bileşimlerindeki elementlere bağlı olarak α ve β olarak gruplandırılırlar. Al, Ga, Sn, Ge, La, O, N, B, C elementleri alaşım içerisinde α faz stabiller olarak yer alırken, Mo, V, Nb, Ta, Re, Fe, Cr, Ni, Cu, W, Co gibi elementler β faz stabilleri olarak yer almaktadırlar (Arrazola ve ark., 2009,Nouari ve Makich, 2013). Ayrıca bileşimlerinde yer alan elementlerin yüzdece miktarı malzemenin mukavemet değerlerini ve dolayısıyla işlenebilirlik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Al elementi sertlik değerini etkilerken, Mo elementinin yüzde miktarı çekme dayanımını etkilemektedir (Arrazola ve ark., 2009,Wagner ve ark., 2015). Alaşımın mikroyapısı içerisinde ise α faz yoğunluğu kırılma tokluğu değerini doğrudan etkilerken, β fazına sahip tane içerisinde yer alan α fazlar çatlak oluşumunu ve ilerlemesini engelleyerek yapının yüksek tokluğa sahip olmasını sağlarlar (Greenfield ve Margolin, 1971).

Ti-5553 alaşım malzemeleri Boeing 787, Airbus A380 uçakları (Nouari ve Makich, 2013) başta olmak üzere havacılık sektöründe uçak iniş takımlarında kullanılmaktadırlar. Boing uçaklarında, uçak motor ve gövde kısımlarında bu malzemelerin yüzdece kullanım oranları sırasıyla % 18 ve 36'dır (Peters ve ark., 2003). Boing'in yeni seri uçaklarından birisi olan Boing 787'de Ti alaşım malzemelerinin kullanım oranı artmıştır (Bruhis ve ark., 2008). Bunun temel nedeni, Ti alaşım malzemelerinin sahip olduğu yüksek sıcaklık altında mukavemetini muhafaza etmesi, hafif olması, korozyona karşı direncinin yüksek olması, yorulma dayanımı gibi bazı önemli özellikleridir (Ezugwu ve Wang, 1997,Ezugwu, 2005). Bahsedilen özellikler bu malzemelerin havacılıkta ve uçaklarda, uçak motorları (Şekil 1.2a) ve iniş takımları (Şekil 1.2b) gibi en kritik yerlerde kullanılmalarını sağlamaktadır.



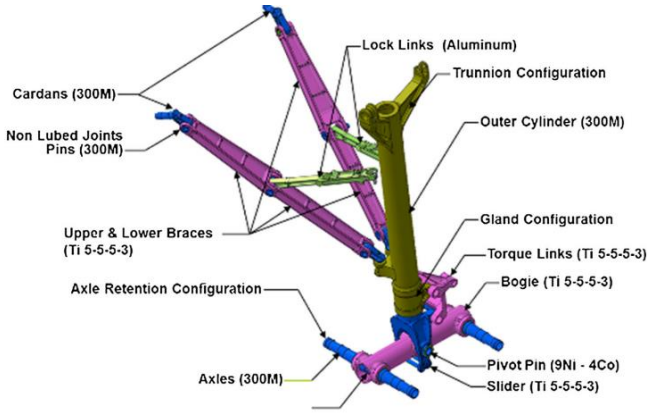
Şekil 1.2. (a) Uçak motoru ve (b) iniş takımları (Bruhis ve ark., 2008,Ulutan ve Ozel, 2011).

Titanyum alaşımlarına, özellikle Ti-64 alaşımına alternatif olarak geliştirilen Ti-5553 alaşım malzemesi havacılıkta uçakların iniş takımlarında kullanılmaya başlanmıştır (Braham-Bouchnak ve ark., 2013). Şekil 1.3'te Ti-5553 alaşımın kullanıldığı iniş takımı görülmektedir.



Şekil 1.3. Boeing 787 iniş takımlarında Ti-5553 alaşımın kullanım alanları (Boyer, 2010).

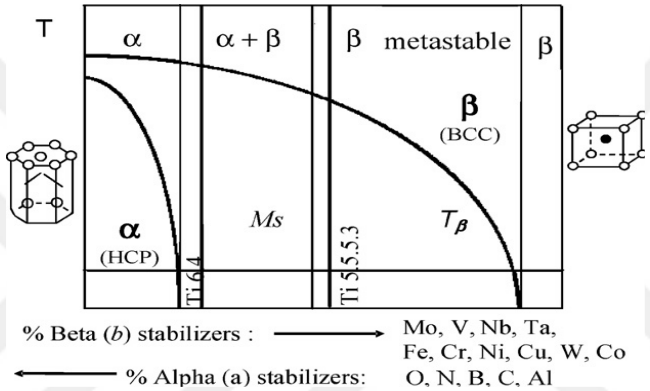
Ti-5553 alaşımın Boeing 787 uçağı iniş takımlarında kullanıldığı parçalar detaylı olarak aşağıda Şekil 1.4'te sunulmuştur.



Şekil 1.4. Boeing 787 iniş takımlarında Ti-5553 alaşımın kullanım alanları (Tomchik ve Dunder, 2006).

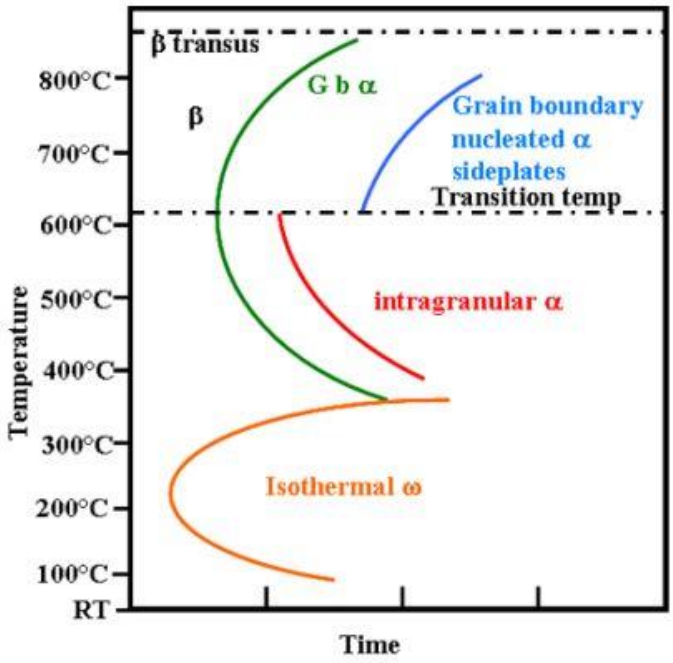
Son zamanlarda özellikle havacılık sektöründe yüksek dayanım, kırılma tokluğu, uzun yorulma ömrü, hafiflik, düşük yakıt tüketimi ve emisyonunu, emniyet gibi kriterleri sağlamaları sebebiyle kullanım alanları artan bu malzemelerin performans özelliklerinin geliştirilmesi hususunda çalışmalar devam etmektedir (Ezugwu ve ark., 2003).

Havacılık endüstrisinde toplam titanyum ürünlerinin yaklaşık % 50 sini oluşturan ve bugün hala yaygın olarak kullanılmakta olan α+β Ti-64 alaşımı ve bu malzemeye alternatif olarak geliştirilen Ti-5553 alaşımlarına ait faz diyagramı Şekil 1.5'te gösterilmektedir.Ti-5553 alaşımının β faz dönüşüm sıcaklığı 850 °C (Nag ve ark., 2009) iken, Ti-64 alaşımı için bu değer 950-1000°C (Nicolaou ve ark., 2005) aralığındadır.



Şekil 1.5. Titanyum alaşımları faz diyagramı(Aeby-Gautier ve Appolaire).

Mekanik özelikler açısından değerlendirildiğinde Ti-5553 alaşım malzemesinin Ti-64 malzemesine göre çekme dayanımı %25, akma dayanımı %27, sertliği %18 daha fazladır (Khanna ve Sangwan, 2013). Ti-5553 alaşımı bileşiminde yer alan β elementlerin dominant olmasından kaynaklı olarak β dönüşüm sıcaklığı (850 °C), α+β Ti 64 alaşımına göre daha düşüktür (1000 °C). İşlenebilirlik perspektifinden değerlendirildiğinde bu fark önemlidir çünkü Ti-64 malzemelerin işlenmesi esnasında 750-940 °C ısı oluşmakta ve α+β yapı korunmaktadır (Özel ve Zeren, 2006). Ti-5553 alaşım Ti-64'e göre daha yüksek mekanik ve termal özellikleri dolayısıyla bu malzemenin talaşlı imalatı sırasında β dönüşüm sıcaklığı üzerinde daha yüksek ısı oluşumu gözlemlenebilir ve bu durum talaşlı imalatı sırasında malzemenin muhtemel faz dönüşümüne sebep olabilecektir (Wagner ve ark., 2009). Ti-5553 alaşım malzemelerine ait zaman sıcaklık dönüşüm (TTT) diyagramı Şekil 1.6'da verilmektedir.



Şekil 1.6. Ti 5553 alaşım malzemelerinin TTT diyagramı (Nag, 2008).

α hekzagonal sıkı paket yapıdaki Ti 64 alaşımın yerine kullanılmaya başlanan bu malzemenin yüksek mekanik özelliklerinin yanı sıra tane boyutu, α-β fazlarının morfolojisi ve yüzdece bileşimi, oda sıcaklığın atomik dolgu faktörü %68 olan hacim merkezli kübik yapıda bulunması gibi mikroskobik özellikleri işlenebilirlik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir(Arrazola ve ark., 2009). Yapılan deneysel çalışmalarda Ti 5553 alaşımın işlenebilirliği Ti 64 alaşıma göre yaklaşık %56 daha zor olduğu görülmüştür

Bu malzeme düşük termal iletkenlik katsayısına sahip olmasından kaynaklı talaşlı imalatı sırasında kesici takım-talaş arayüzeyinde ısı transferi sınırlanır ve yüksek ısı oluşumu takım ömrünü azaltmakta buna ilaveten düşük elastikiyet modülüne sahip olması, yüksek sıcaklılarda dayanımını koruması ve talaşlı imalat sürecinde pekleşme kabiliyeti sergilemesi talaşlı imalat açısından diğer olumsuz özellikler olarak göze çarpmaktadır(Arrazola ve ark., 2009,Ugarte ve ark., 2012). Ti 5553 alaşım malzemesi bahsi geçen özelliklerinden dolayı "kesilmesi zor malzeme" grubunda yer alıp, talaşlı imalatında karşılaşılan en büyük zorluklar yüksek kesme hızlarında çalışılamaması, hızlı takım aşınması, kısa takım ömrü, yüksek kesme kuvvetleri oluşumu, yüksek dinamik yüklerin ve yüksek kesme sıcaklığının oluşması ve bütün bu tesirlerin sonucu yüksek talaş segmentasyon frekansı ve adyabatik kayma bandı oluşumu, iş parçasından kesici takıma adezyon eğiliminin artması olarak göze çarpmaktadır(Arrazola ve ark., 2009,Ugarte ve

ark., 2012) Talaşta yer alan adyabatik kayma bandı işleme sırasında termal ve mekanik yükleri arttırarak difüzyon mekanizması ile talaş yüzeyinde hızlı aşınmaya yol açar (Sun ve ark., 2015). Literatürde Ti-5553 alaşım malzemesinin işlenmesinde T-64 ile kıyaslandığında daha yüksek kesme kuvvetleri, daha fazla takım aşınması ve dolayısı ile daha kısa takım ömrü ve daha yüksek sıcaklıklar gözlemlenmiştir (Arrazola ve ark., 2009,Sun ve ark., 2015).

Bilindiği üzere talaşlı imalat sürecinde birçok mühendislik malzemesinin özellikle Ti alaşım malzemelerininde dahil olduğu işlenmesi zor malzemelerin takım aşınmasını ve kesme kuvvetlerini azaltmak suretiyle işleme performansını arttırmak için farklı yağlayıcı ve soğutucular literatürde ve endüstride yoğun olarak kullanılmaktadır. Özellikle işlenmesi zor malzemelerin talaşlı imalatında hiçbir yağlayıcı veya soğutucunun kullanılmadan (kuru kesme) talaş kaldırma uygulamaları endüstride yok denilecek kadar azdır. Literatüre bakıldığında, özellikle farklı yağlayıcı veya soğutucuların kullanılması ile takım ömründe ciddi iyileştirmeler olduğu aşikardır. Ti-5553 alaşımın talaşlı imalat sürecinde şimdiye kadar yapılan çalışmalar daha çok problemlerin tespitine yönelik olup bu malzeme için bahsi geçen problemleri çözmeye yönelik yukarıda bahsedilen yağlama ve soğutma yöntemleri ile ilgili sınırlı sayıda çalışma mevcuttur.

Braham ve Ark. (Braham-Bouchnak ve ark., 2015) Ti-5553 alaşımın işlenmesinde yüksek basınçlı soğutmanın kesme kuvvetleri, kesici takım aşınması, talaş kırılabilirliği gibi talaşlı imalat performansı ve yüzey bütünlüğü karakteristiklerine etkisini incelemişlerdir. Yüksek basınçlı soğutma desteği ile özgün kesme kuvveti %23 azalmış, talaş kırılabilirliği artmış daha iyi bir yüzey kalitesi elde edilmiştir. Bu yöntem yüzey bütünlüğü karakteristikleri perspektifinden yüzey pürüzlülüğü değerini düşürmüştür (Braham-Bouchnak ve ark., 2015). Sun ve Ark. (Sun ve ark., 2015) bu malzemenin işlenmesinde karşılaşılan bahsi geçen sorunların çözümüne yönelik minimum miktarda yağlama (MQL) ve sıvı azot (LN_2) yöntemini kullanarak elde edilen bulguları konvansiyonel kesme sıvısı ile kıyaslayarak değerlendirmişlerdir. Kriyojenik yöntem, MQL ve kesme sıvısı yöntemlerine göre kesme kuvvetlerinde %30 azalmaya ve dolayısıyla daha az kesici takım aşınması elde edilmesini sağlarken MQL yöntemi diğer yöntemlere kıyasla kesme boyunca iş parçası sıcaklığını arttırarak daha yüksek süneklik oluşumu sağlayarak yüzey kalitesini geliştirmiştir (Sun ve ark., 2015). Tarek Braham ve Ark (Braham-Bouchnak ve ark., 2013) laser desteği ile termal yumuşa sağlayarak malzemenin işlenebilirlik özelliklerini geliştirmişlerdir.

Yüzey bütünlüğü özellikle dinamik yüklere maruz kalan parçaların, birbiri ile temas halinde olan parçaların ve korozyona maruz kalması söz konusu parçaların imalatında önemli bir parametre olarak değerlendirilmektedir (Ulutan ve Ozel, 2011,Kaynak ve ark., 2014). Ti-5553 alaşımlar uçakların iniş takımları gibi sürekli olarak dinamik yüklere maruz kalma potansiyeli olan uygulama alanına sahip olması nedeniyle (Tomchik ve Dunder, 2006), bu konudaki çalışmalar önem arz etmektedir. Yüzey bütünlüğü konusunda ilk kayda değer çalışmalar ve bu terminolojinin tanımlanması 1972 yılında Field ve arkadaşları (Field ve ark., 1972) tarafından yapılmıştır. Tablo 1.1'de yüzey bütünlüğünü oluşturan kriterler yer almaktadır. Tablo 1.1'de görüldüğü üzere Field ve arkadaşları yüzey bütünlüğünü üç ana kategoride değerlendirmişlerdir. Bu kapsamda yapılan çalışmalar genellikle minimum ve standart yüzey bütünlüğü kriterlerine göre yapılmaktadır bazı çalışmalarda ise genişletilmiş yüzey bütünlüğü kriterleri de araştırmacılar tarafından irdelenmektedir (Jawahir ve ark., 2011).

Tablo 1.1. Yüzey bütünlüğü kriterleri (Field ve ark., 1972).

Minimum Yüzey Bütünlüğü Kriterleri	Standart Yüzey Bütünlüğü kriterleri	Genişletilmiş Yüzey Bütünlüğü kriterleri
Makroyapı (10x veya daha az)	Minimum Yüzey Bütünlüğü kriterleri	Standart Yüzey Bütünlüğü kriterleri
Mikroyapı	Yorulma testleri	Yorulma testleri (tasarım için)
Mikro boyutta çatlaklar	Gerilim korozyon testleri	
Plastik defomasyon	Kalıntı gerilme ve distorsiyon (çarpılma)	İlave mekanik testler; çekme, sürünme
Faz dönüşümü		Gerilme kırılması
Taneler arası atak		
Yüzeyde çukurlaşma, yırtılma oluşumu		
Yüzeye sıvanmış malzeme birikintileri (Build up layer)		
Mikrosertlik değişimi		

Literatürde birçok farklı malzemenin talaş kaldırmaya bağlı olarak yüzey ve yüzey altındaki karakteristikler incelenmiştir/incelenmektedir(Jawahir ve ark., 2011). Bu malzemelerin başında Titanyum ve alaşımları, Ni esaslı alaşımlar, farklı özelliklerde çelikler gelmektedir(M'Saoubi ve ark., 2008,Ulutan ve Ozel, 2011). Ayrıca farklı soğutucu

ve yağlayıcıların talaşlı imalat süreçlerinde kullanılması ve bunların yüzey bütünlüğüne etkisi konusunda da çalışmalar yapılmıştır (Kaynak ve ark., 2014). Ti alaşımlar içinde nispeten yeni kabul edilen Ti-5553 alaşımlar konusunda ise literatürde yüzey bütünlüğü çalışmaları sınırlıdır. Baili ve Ark. (Baili ve ark., 2011) yaptıkları çalışmada iş parçasının ısıtılmasının iş parçası yüzey sertliğinde artışa neden olduğunu ifade etmişlerdir. İlaveten artan sıcaklığında yüzey kalitesinde iyileşmeye neden olduğu rapor edilmiştir. Sun ve arkadaşları (Sun ve ark., 2015) ise yaptıkları çalışmada yüzey pürüzlüğünün kesme koşullarına ve parametrelerine bağlı olarak değişim gösterdiğini rapor etmişlerdir. Yan ve arkadaşları (Yan ve ark., 2011) yaptıkları çalışmada talaş kaldırma sonucunda Ti-5553 alaşımda faz dönüşümü olduğunu ifade etmişlerdir ve faz dönüşümü ile ilgili kapsamlı bilgiye ulaşmak için XRD analizinin yapılması gerektiğini vurgulamışlardır. Diğer taraftan talaş kaldırmanın Ti-5553 alaşımda kalıntı gerilmeler etkisi konusunda çalışmalar Braham-Bouchnak ve arkadaşları (Braham-Bouchnak ve ark., 2013,Braham-Bouchnak ve ark., 2015) tarafından yapılmıştır ve bu alaşımlarda işleme esnasında malzemenin ısıtılması ve farklı soğutucuların kullanılması dikkate alınmıştır.

Farklı talaş açılarında gerçekleştirilmiş modelleme ve simülasyon çalışmaları bulunmaktadır. Shih dört farklı talaş açısında dik kesme esnasında oluşan gerilmeleri incelemiştir (Shih, 1995). Cerette ve ark. farklı takım geometrileri ve kesme hızlarında dik kesme simülasyonları gerçekleştirmişlerdir. Sünek kırılmanın başlangıcını ve yayılımı üzerine tahminler yapmışlardır(Ceretti ve ark., 1999). Ship-Peng Lo farklı talaş açılarına sahip takım tutucularla yapılan kesme simülasyonlarında farklı talaş açılarının kesme kuvveti ve talaş morfolojisine etkisini incelemiştir. Talaş açısının artmasıyla kesme kuvvetlerinin düştüğünü gözlemlemiştir. Bu sayede takım ömrünün arttığını bildirmiştir(Lo, 2000). Strenkowski ve Moon 6061-T6 alüminyum alaşımı için farklı talaş açıları, kesme derinlikleri ve kesme hızlarında kesme sıcaklığı, kesme kuvveti ve talaş morfolojisi tahmininde bulunmuşlardır. Talaş açısının artması ve kesme derinliğinin azalması ile kesme kuvvetlerinde düşüş olduğu sunulmuştur(Strenkowski ve Moon, 1990). Sima ve Özel Ti-64 alaşımının farklı talaş açılarında talaşlı imalatının modellenmesi sonucu talaş morfolojisini incelemişlerdir(Sima ve Özel, 2010). Ding ve Shin farklı talaş açısının tane boyutuna ve sıcaklığa etkisini saf titanyum üzerinde dislokasyon temelli model kullanarak gözlemlemiştir. Talaş açısı +20° iken kesme sıcaklığı -20°'ye göre daha

düşük bunun yanında tane boyutunun daha büyük olduğu rapor edilmiştir(Ding ve Shin, 2014).

Ti-5553 alaşımının talaş kaldırma süreci için henüz geniş çapta çalışmalar olmadığından, Ti-5553 alaşımının modelleme süreci ile ilgili açık literatürde çok az sayıda çalışma mevcuttur.Wagner ve arkadaşları (Wagner ve ark., 2010) Ti-5553 alaşımı için üç Johnson-Cook sabitini (*A,B,n*) belirlemiştir. Germain ve ark. (Germain ve ark., 2013), dinamik kayma testleri kullanarak tüm Johnson-Cook sabitlerini belirlemişlerdir. Bir başka çalışmada, bu özel alaşımın modelleme süreci Sun ve ark. tarafından sunulmuştur (Sun ve ark., 2015). Bu çalışmada, yazarlar Ti-5553 alaşımının tornalama sürecini kuru ve kriyojenik işleme koşulları altında çalışmışlardır. Ayrıca, Johnson-Cook malzeme modeli kullanılarak kesme kuvvetleri tahmin edilmiştir (Sun ve ark., 2015). Ozkutuk ve Kaynak Ti-5553 alaşımının talaş kaldırma sürecinin kolaylıkla simüle edebilmesi için gereken hassasiyet analizi çalışmasını yapmışlardır(Ozkutuk ve Kaynak, 2017). Kaynak ve ark. kuru kesme ve kriyonejik kesme koşulları altında Ti-5553 alaşımının modellenmesini gerçekleştirip kesme kuvvetlerini, kesme sıcaklıklarını ve talaş morfolojisini tahmin etmişlerdir(Kaynak ve ark., 2018).

Ti-5553 alaşımı için açık literatürde yüzey bütünlüğünün modellenmesi ile ilgili herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Yapılan bu çalışma literatüre önemli ölçüde katkı sağlayacak ve Ti-5553 alaşım malzemesinin yüzey bütünlüğü davranışının modellenmesinde başlangıç noktası olarak kabul edilebilir. Talaşlı imalatta yaygın olarak kullanılan malzemeler için tane küçülmesi, sertlik ve işlenmiş yüzeyden itibaren etkilenen derinlik gibi gibi yüzey bütünlüğü tahmin analizleri yapılan çalışmalar bulunmaktadır. Rotella ve Umbrello, Ti-64 alaşımının kuru ve kriyojenik kesme koşulları altında yüzey bütünlüğünün modellenmesini araştırmışlardır. Bu çalışmada farklı koşullar altında mikroyapı modellemesi kalibre edilerek tane küçülmesi, sertlik ve talaşlı imalattan etkilenmiş derinlik tahmin edilmiştir (Rotella ve Umbrello, 2014). Wang ve arkadaşları ise Ti-64 alaşımında tane küçülmesinden kaynaklanan kayma açıları ve talaş formunu incelemişlerdir (Wang ve ark., 2016). Inconel 718 alaşımın talaşlı imalatında sonlu elemanlar yöntemi kullanarak yapılan mikroyapı modellenmesinde mikrosertlik ve kristalleşmiş tane boyutu tahminleri deneysel datalara karşılaştırılmıştır (Jafarian ve ark., 2014,Rana ve ark., 2016). Caruso ve arkadaşları AISI 52100 çeliğinin tornalanmasında tane boyutu değişiminde kesme hızlarının etkisine odaklanmıştır (Caruso ve ark., 2011).

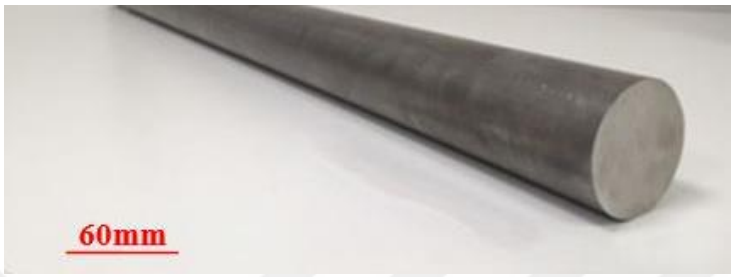
Umbrello ve arkadaşları aynı çelik malzemenin hem kuru kesme hem de kriyojenik koşul altında mikroyapı değişimlerini araştırmışlardır (Umbrello ve ark., 2016).

Yukarıda bahsedilen tüm çalışmaların en önemli ve ortak özelliği olarak sonlu elemanlar yönteminde tane küçülmesi tahmini yapabilmek için Zener-Hollomon denklemini kullanmış olmalarıdır. Literatürde yaygın olarak kullanılan bu denklem bu tez çalışmasında da kullanılmıştır. Zener-Hollomon temelli modelde Ti-5553 alaşım malzemesi veya β fazı esaslı malzemeler için malzeme sabitleri farklı deformasyon operasyonlarında kullanılmıştır (Fan ve ark., 2017). Dolayısı ile yapılacak çalışmada yakınsamanın daha gerçekçi olacağı öngörülerek, Zener-Hollomon yaklaşımı kullanılarak talaş kaldırmadan etkilenmiş yüzeyde tane boyutundaki değişim modellenmiş ve simülasyonu gerçekleştirilmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA VE DÜZENEKLER

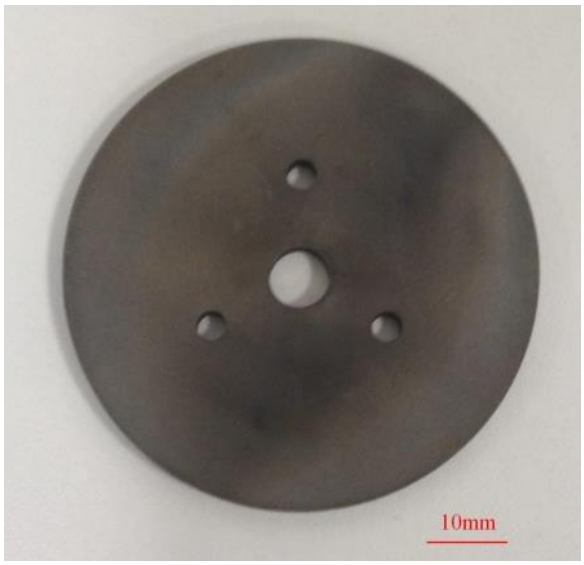
2.1 Deneysel Çalışmada Kullanılan İş Malzemesi

Ø63 x 1000 mm boyutlarında 15 kg ağırlığında Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr (Ti-5553) malzeme sıcak haddelenmiş olarak temin edilmiştir. Ti-5553 alaşımı Şekil 2.1'de gösterilmektedir.

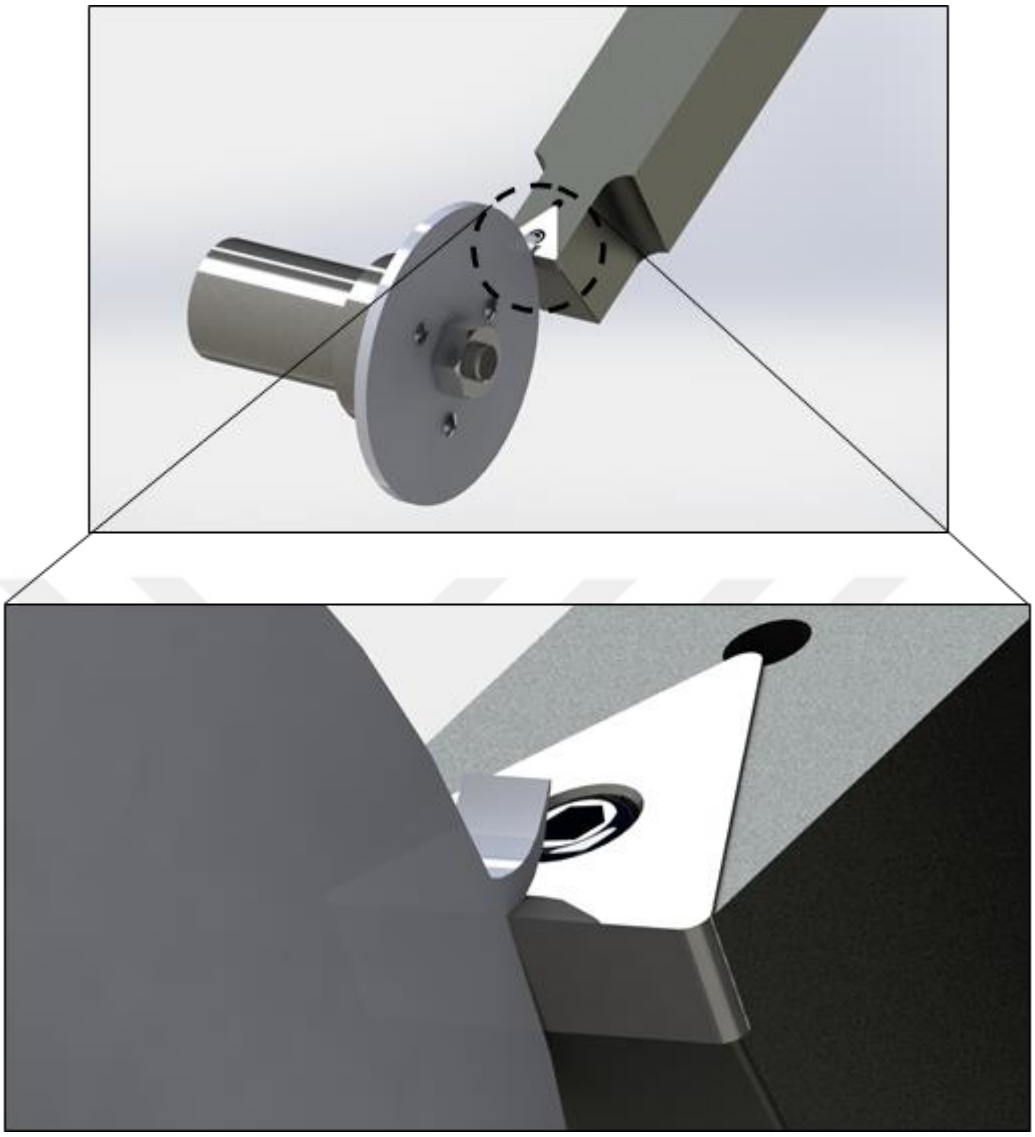


Şekil 2.1. Ti-5553 alaşım malzemesi.

Dik kesme testlerini gerçekleştirebilmek için ve kesici takımın kesici ağzı ile iş parçası ekseni arasında 90° lik açı elde edebilmek için literatürde mevcut olan (Kaynak ve ark., 2014) disk işleme yöntemi kullanılmıştır. Silindirik iş parçası (Ø63x100 mm) malzemesi tel erozyon ile 3 mm kalınlığında dilimlenerek diskler elde edilmiştir. Disk şeklinde hazırlanan numune örneği Şekil 2.2'de görülmektedir.



Şekil 2.2. Ti-5553 disk malzeme.



Şekil 2.3. Dik kesme için iş parçasının bağlantısı.

Dik kesme için hazırlanan Ø63x3mm kalınlığındaki diskler bir adet M8 ve 3 adet M4 civatalar ile Şekil 2.3'te gösterilen aparatla bağlanmıştır.

Ti-5553 alaşım malzemesinin kimyasal kompozisyonu Tablo 2.1'de mekanik özellikleri ise Tablo 2.2'de sunulmuştur.

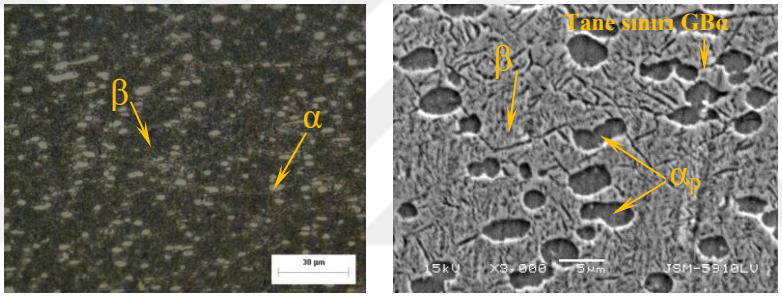
Tablo 2.1. Ti-5553 malzemesinin yüzdesel kimyasal kompozisyonu.

İş parçası	Al	V	Mo	Cr	Fe
Ti-5553	5,532	4,96	5,09	2,96	0.34

Tablo 2.2. Ti-5553 malzemesine ait mekanik özellikleri.

İş Parçası	Akma Gerilmesi (MPa)	Çekme Gerilmesi (MPa)	% Uzama	Sertlik (HV)	Beta (β) fazına dönüşüm sıcaklığı (°C)	Isıl İletim Katsayısı (W/m°C)
Ti-5553	1171	1412	10	317±5	850	8

Ti-5553 numunelerinin talaş kaldırma operasyonu öncesi işlem görmemiş (as-received) mikroyapılarına ait optik mikroskop görüntüleri Şekil 2.4(a)'da gösterilmektedir. Şekil 2.4 (b)' de Ti-5553 malzemesine ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) yöntemi ile elde edilen mikroyapı görüntüsü gösterilmektedir.



(a) (b)

Şekil 2.4. a)İşlem görmemiş, sıcak haddelenmiş Ti-5553 iş parçası malzemesinin optik mikroskop, (b) taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri.

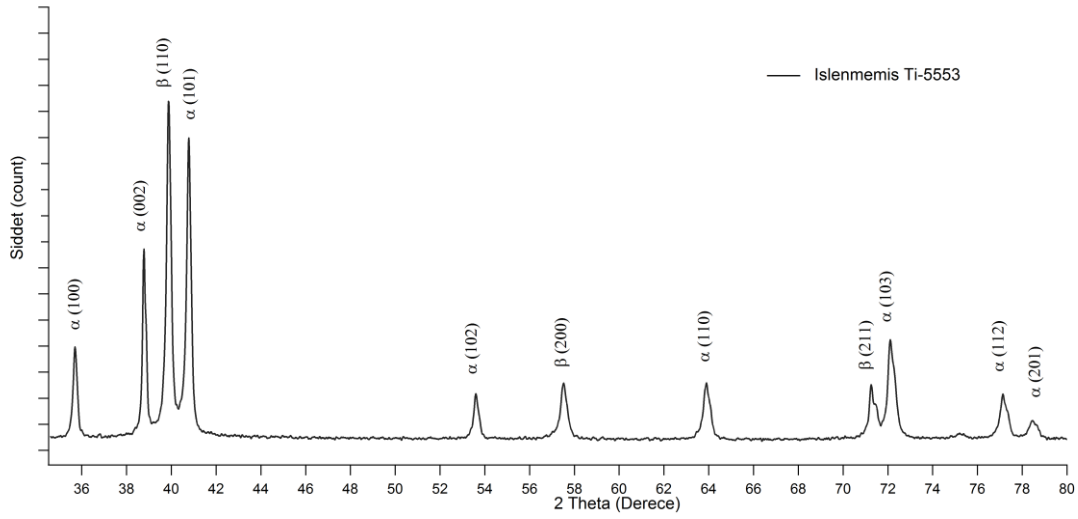
Ti-5553 alaşım malzemeleri metastabil β alaşım grubundadır ve mikroyapı-özellik ilişkileri bakımından bimodal (BM) veya lamelli mikroyapılara sahip olabilmektedir (Huang ve ark., 2011,Srinivasu ve ark., 2013,Li ve ark., 2015). Titanyum alaşımlarının mekanik özellikleri alaşımın kimyasal bileşimi ve bu elementlerin yüzdece miktarı ile (Grosdidier ve ark., 1997) büyük ölçüde malzemenin tane boyutu, morfolojisi, α ve β fazların hacimsel miktarına, tanelerin mikroyapı içinde dağılımı ve oryantasyonu gibi mikroyapı karakteristiklerine bağlıdır (Lütjering ve Williams, 2003,Jones ve ark., 2009,Wu ve ark., 2013,Osovski ve ark., 2015).

Ti-5553 alaşım iş parçasının işlem görmemiş hali için elde edilen SEM görüntüleri (Şekil 2.4b) malzemenin bimodal yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Bimodal (BM) yapının

lamelli yapıya göre daha yüksek dayanıma sahip olduğu, sünekliğinin ise lamelli yapı ile çok yakın olduğu rapor edilmiştir (Huang ve ark., 2017). İlaveten Bimodal yapının deformasyon davranışının α_p 'ın kaymasından oldukça etkilendiği ifade edilmektedir (Huang ve ark., 2017)

Şekil 2.4 (b)'de sunulan SEM görüntüsündeki gri renkli ana yapı β fazları temsil ederken küresel olarak görünen koyu bölgeler birincil (primary) α_p fazları temsil etmektedir. Görüldüğü gibi yapıda çok sayıda küresel birincil α_p (primary α) faz bulunmaktadır. Aynı zamanda β matris içerisinde tane sınırları alfa (GBα) boyunca iğnemsi ikincil α_s (secondary alfa) faz bölgeleri bulunmaktadır (Huang ve ark., 2017). Yapıda bulunan ve β faza göre göreceli olarak daha yumuşak olan (Xin ve Zhao, 2006), eş eksenli α_p fazlar yapı ile iyi bir uyum sergileyebilir ve deformasyon süresince alaşım malzemesinde birim şekil değiştirmenin meydana geldiği noktalarda önemli bir rol oynar (Huang ve ark., 2011).

Şekil 2.5'te işlem görmemiş Ti-5553 alaşım malzemesinden alınan numunenin kristalografik dokusunu temsil eden faz pikleri, bölgeleri ve düzlemleri (miller indisleri) yer almaktadır.



Şekil 2.5. İş parçasının (Ti-5553 alaşımının) işlem görmemiş haline ait XRD sonucu.

2.2 CNC Torna Tezgahı, Takım Tutucular ve Kesici Takım

Dik kesme testleri Şekil 2.6'da gösterilen ve teknik özellikleri Tablo 2.3'te sunulan Doosan Puma GT2100 CNC Torna Tezgâhı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.6. Doosan Puma GT2100 CNC torna tezgahı.

Tablo 2.3. Doosan Puma GT2100 CNC torna tezgahı teknik özellikleri.

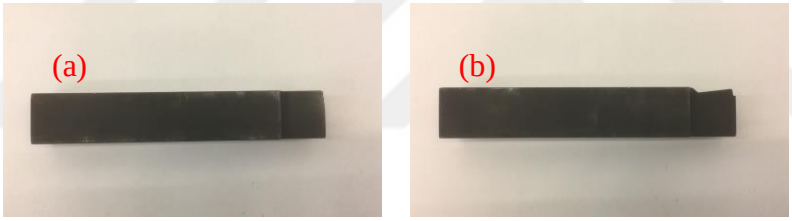
Azami Tornalama Çapı	**390 mm**
Azami Tornalama Boyu	**562 mm**
Azami Çubuk Sürme Çapı	**65 mm**
Ayna Ölçüsü	**8 inç**
İş mili Motor Gücü	**18,5 kW**
Azami İş mili Devri	**4500 dev/dk**
İş mili Torku	**183.1 Nm**
Güç Aktarma Metodu	**Kayışlı Tip**
Boştaki Eksen Hızları	**X=24 m/dk, Z=30 m/dk**
Takım Adedi	**12**
Dış Çap Takım Tutucusu	**25×25 mm**
Dış Çap Takım Tutucusu	**40 mm**
Boyutlar(Uzunluk-Genişlik-Yükseklik)	**2940-1628-1700 mm**

Dik kesme oprerasyonunda kullanılan TCMW 16T308 H13A kesici takımın görüntüsü Şekil 2.7'de gösterilmektedir. Testlerde kullanılan kesici takım 94% WC ve 6% Co içeren, tane boyutu 1 µm'den daha küçük, yuvarlanma yarıçapı yaklaşık 25 µm ve boşluk açısı 7° olan karbür kesici takımdır.



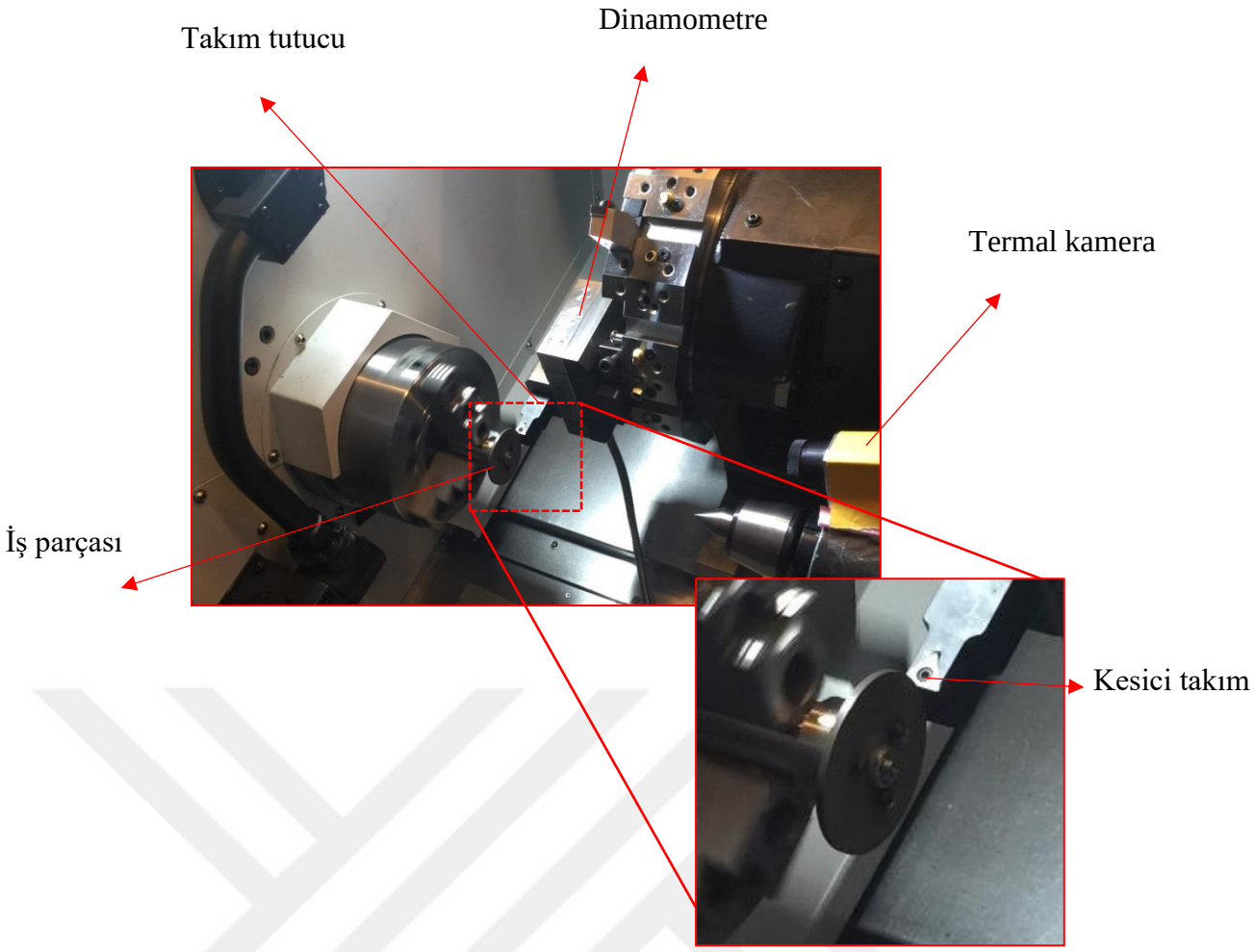
Şekil 2.7. Deneylerde kullanılan kesici takımın görüntüsü.

STNCN 2525M16 (0°, +2°) takım tutucular iki farklı talaş açısında özel olarak ürettilerek testlerde kullanılmıştır. (Şekil 2.8)



Şekil 2.8. a) 0° b) +2° talaş açısına sahip takım tutucuların gösterimi.

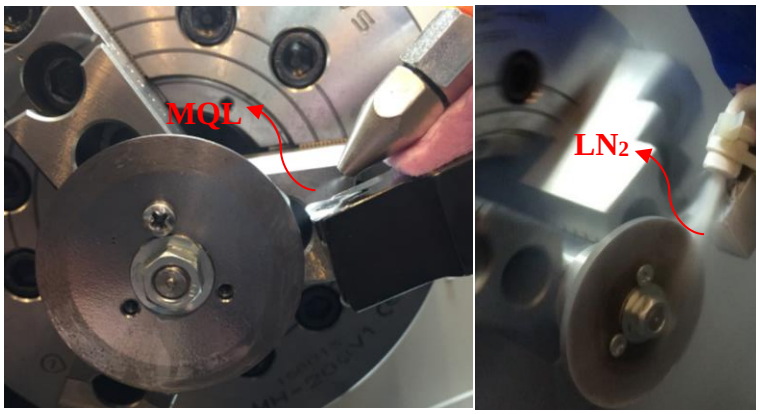
Şekil 2.9'da testlerde kullanılan deney ve ölçüm düzeneği gösterilmektedir. Kesme kuvvetleri ve kesme sıcaklıkları ölçümü Bölüm 2.5 ve 2.6'da detaylı olarak tanıtılacaktır.



Şekil 2.9. Deney ve ölçüm düzeneği (Kaynak ve ark., 2018).

2.3 Soğutucu ve Yağlayıcılar

Kesme işlemlerinde yağlayıcı olarak minimum miktarda yağlama (MQL) ve soğutucu olarak da kriyojenik soğutucu olan sıvı azot (LN_2) kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar kuru kesme ile karşılaştırılmıştır. LN_2 kullanılan testlerde, soğutucu takım tutucu vasıtasıyla talaş yüzeyinden kesme bölgesine gönderilmiştir. Sıvı azotun kullanıldığı testler boyunca basınç (15 Bar) sabit tutulmuştur. Minimum miktarda yağlama (MQL) sisteminde akış oranı 21 ml/saat olarak kullanılmıştır. MQL yağı olarak kaynama noktası 232 ˚C, viskozitesi 40 ˚C sıcaklıkta 68 cSt olan Hangsterfer's Way Oil 2 kesme yağı kullanılmıştır. Testlerde yağlayıcı ve soğutucu tek bir konumlama ile kesme bölgesine gönderilmiştir. Yağlayıcı ve soğutucuların uygulanması kesici takım talaş yüzeyinden gerçekleştirilmiştir. Soğutucu ve yağlayıcıların uygulanışı Şekil 2.10'da gösterilmektedir.



Şekil 2.10. Soğutucu ve yağlayıcıların uygulanışı (Kaynak ve ark., 2018).

2.4 Kesme Parametleri

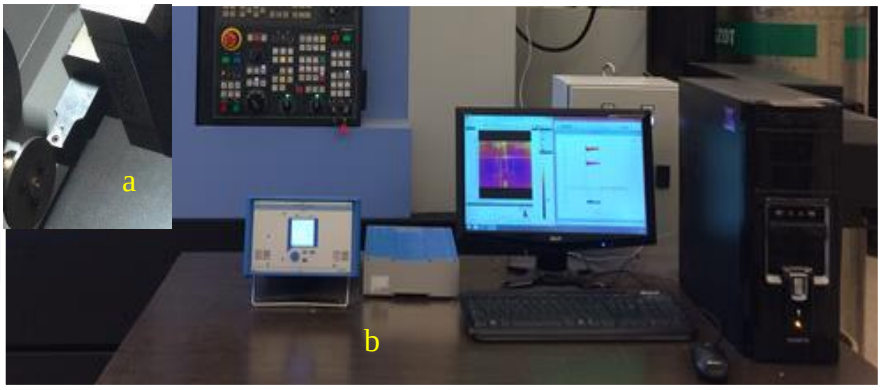
Ti-5553 alaşım malzemesinin dik işlenmesi süreci için Tablo 2.4'te sunulan parametreler ve koşullar kullanılarak kesme performansı ve yüzey bütünlüğü analizleri yapılmıştır. Bu çalışmada Ti-5553 alaşımının geniş kesme aralığında ve farklı talaş açılarında işlenmesi ön planda tutulmuştur. Bu sayede bu parametrelerin talaşlı imalat ve yüzey bütünlüğü performansına etkileri incelenebilmiş ve modelleme ve simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Uygun kesme parametre aralığının belirlenmesi aşamasında Ti-5553 alaşımının literatürde kullanılan kesme parametreleri incelenmiştir. Literatürde bu malzemenin işlenmesinde bilindiği kadarıyla seçilen en yüksek kesme hızı 90 m/dk'dır (Braham-Bouchnak ve ark., 2013,Braham-Bouchnak ve ark., 2015). Dolayısı ile bu çalışmada bu değerin üzerinde ve altında değerler seçilmiştir. Seçilen kesme derinliği de literatürdeki mevcut çalışmalar dikkate alınarak ortalama bir değer seçilmiştir(Sun ve ark., 2015).

Tablo 2.4. Farklı talaş açısı ve kesme hızında gerçekleştirilen deney parametreleri.

Kesme hızı, V_c (m/dk)	**Talaş açısı,α (°)**	**Kesme koşulları**	**Kesme derinliği, t_0 (mm)**
20	0	Kuru Kesme	0.1
60	+2	MQL (21 ml/saat)	
120		Kriyojenik (15 Bar)	
210			

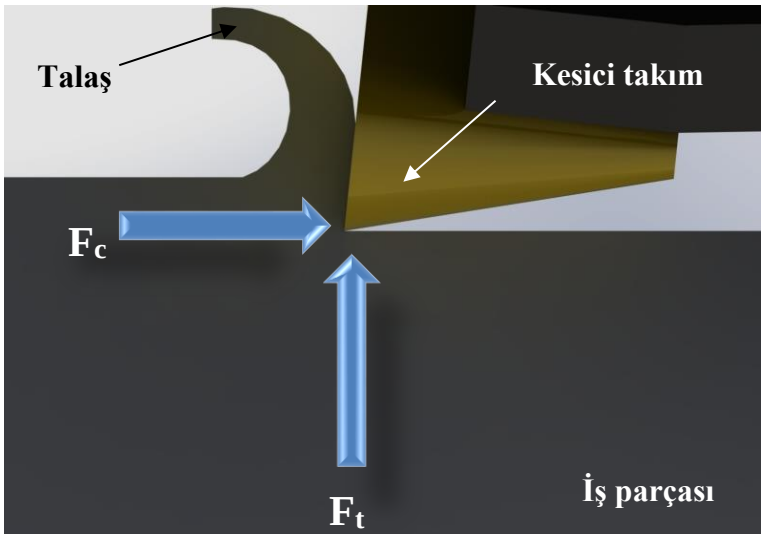
2.5 Kesme Kuvvetleri Ölçümü

Kesme testlerinde Fx ve Fy kesme kuvvetleri 10 kN'a kadar ölçüm yapabilen ve 0-70 °C sıcaklık aralığında çalışabilen Kistler 9129AA tipi dinamometre kullanılarak ölçülmüştür ve elde edilen ölçümler ve datalar Dynoware yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Kistler 9129AA ve ölçüm sistemi Şekil 2.11'de sunulmuştur.



Şekil 2.11. Kuvvet ölçüm sistemi (a)dinamometre, (b)amplifikatör ve veri toplayıcı.

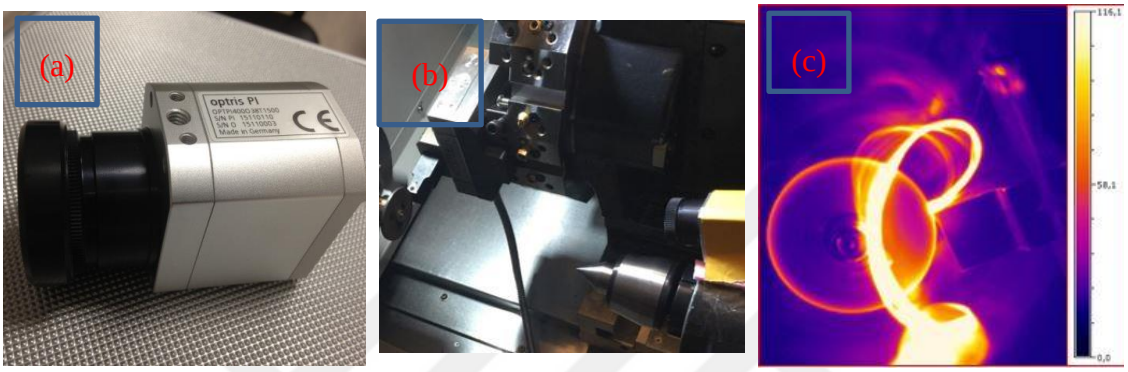
Kesme sürecinde ölçülen kuvvet komponentleri şematik olarak Şekil 2.12'de görülmektedir. Dik kesme sürecinde F_c kuvveti ana kesme kuvvetini ifade etmekte ve F_t kuvveti ise itme kuvvetini ifade etmektedir.



Şekil 2.12. Kesme süresince ölçülen kuvvetlerin şematik gösterimi.

2.6 Kesme Sıcaklıkları Ölçümü

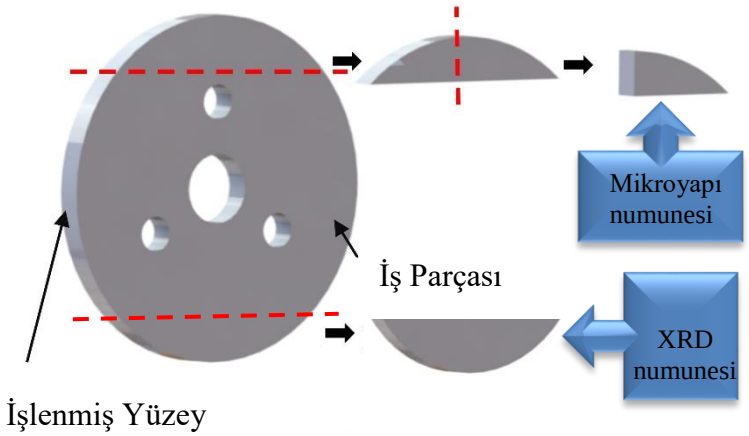
Talaş kaldırma sürecinde sıcaklık ölçümleri ±2°C veya %±2 hassasiyetinde ve 382x288 piksel çözünürlükte Optris PI 400 infrared kamera ile yapılmıştır. Kamera ile -20-100, 0-250, 150-900 ve 200-1500 °C temel aralıklarında sıcaklık ölçümleri yapılabilmektedir. Infrared kamera fotografı, kameranın pozisyonlanması ve yazılımdan elde edilen görüntüler aşağıda Şekil 2.13'de gösterilmiştir.



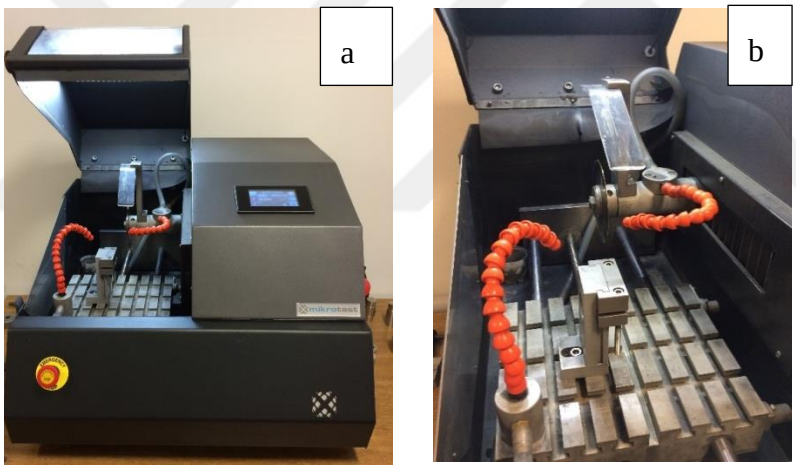
Şekil 2.13. (a) Infrared kamera, (b) kamera pozisyonu, (c) yazılımdan alınan görüntü (Kaynak ve ark., 2018).

2.7 İşlenen Parçaların Mikroyapı ve XRD İncelemeleri için Metalografik Numune Hazırlama

Testler sonucunda elde edilen işlenmiş parçalar Şekil 2.14'de gösterildiği gibi hassas kesme cihazı ile kesim yapılarak metalografi analizleri için hazırlanmıştır. İşlenmiş diskin iki tarafından birer parça kesilmiştir. Bu parçalardan biri XRD analizi için kullanılmış diğeri ise tekrar ikiye bölünerek mikroyapı analizi için hazır hale getirilmiştir. Numunelerin dilimlenmesinde kullanılan hassas kesme cihazı Şekil 2.15'de görülmektedir.

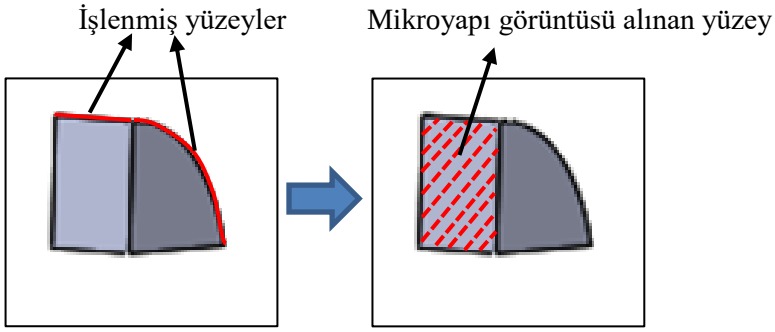


Şekil 2.14. İşlenen parçalardan metalografik numune hazırlama aşamaları.



Şekil 2.15. İşlenen Ti-5553 alaşım malzemelerden metalografik numune hazırlama aşamasında kullanılan hassas kesme cihazı.

Kesilen parçalarda mikroyapı analizleri için Şekil 2.16'da gösterilen noktalardan ölçümler ve görüntüler alınmıştır.



Şekil 2.16. Mikroyapı analizleri için hazırlanan numunedeki incelenen yüzey.

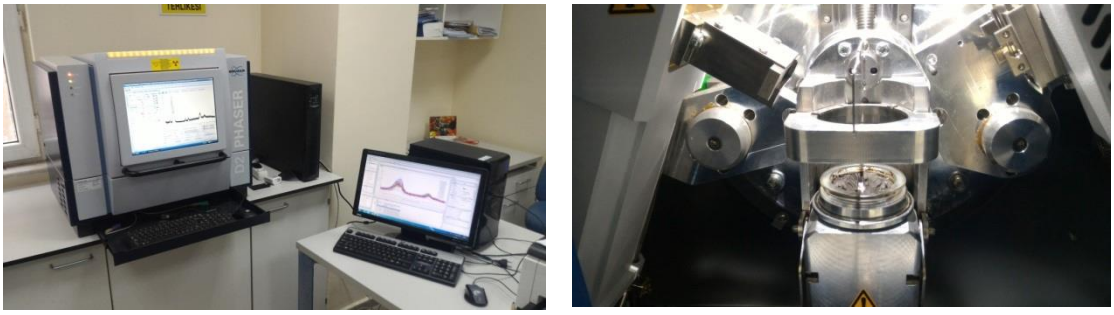
Kesilen numuneler öncelikli olarak soğuk bakalite alınmıştır. Bakalite alınan numuneler Şekil 2.17'de fotoğrafı görülen 150 rpm devir ve numune üzerine 300 N yük uygulayabilen otomatik zımparalama ve parlatma cihazında zımparalanıp parlatılmıştır. Parlatılan numuneler 2ml HF+ 6ml HNO_3 + 92 ml H_2O reaktifi kullanılarak dağlanmıştır.



Şekil 2.17. Multipol Advanced Plus Zımparalama ve Parlatma Cihazı.

2.8 XRD Faz Analizi Ölçümü

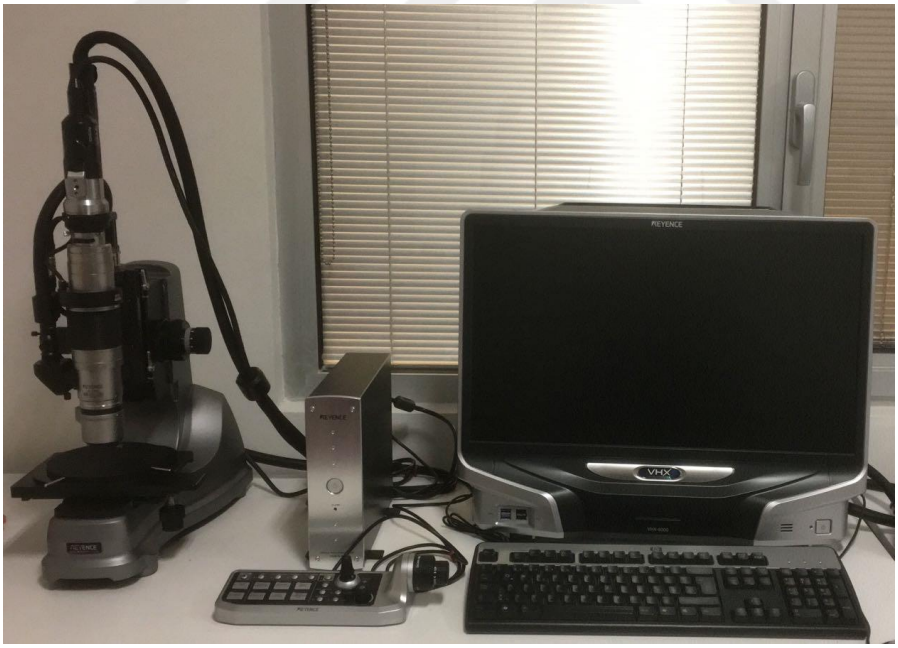
X-ışını difraksiyonu (XRD) ölçümleri için Bruker AXS Marka D2 Phaser cihazı kullanılmıştır (Şekil 2.18). Faz analizi kapsamında gerçekleştirilen XRD ölçümlerinde 1,54060 *A* dalga boyuna sahip CuKα katot kullanılmış, akım ve voltaj değeri sırasıyla 10mA ve 30kv olarak seçilmiştir.2 Theta ölçüm aralığı literatür dikkate alınarak (Campo ve ark., 2016) 30-90° seçilmiştir. Ölçümler işlenmiş parçaların işlenen yüzeylerinden yapılmıştır.



Şekil 2.18. XRD ölçüm sistemi ve ölçülen numunelere ait görüntü.

2.9 Mikroyapı Görüntüleme

Mikroyapı görüntülerinin alınması için Şekil 2.19'da gösterilen Keyence marka VHX 6000 serisi dijital mikroskop kullanılmıştır. Bu dijital mikroskop 250x-2500x büyütme aralığına sahiptir. Bu sayede işlenen parçaların mikroyapı değişimleri(tanelerin uzaması gibi) gözlemlenmiştir. 2 boyutlu ve 3 boyutlu çekimler yapabilen bu cihaz otomatik odaklanma özelliği sayesinde optimum görüntüleri almamızı sağlamıştır.



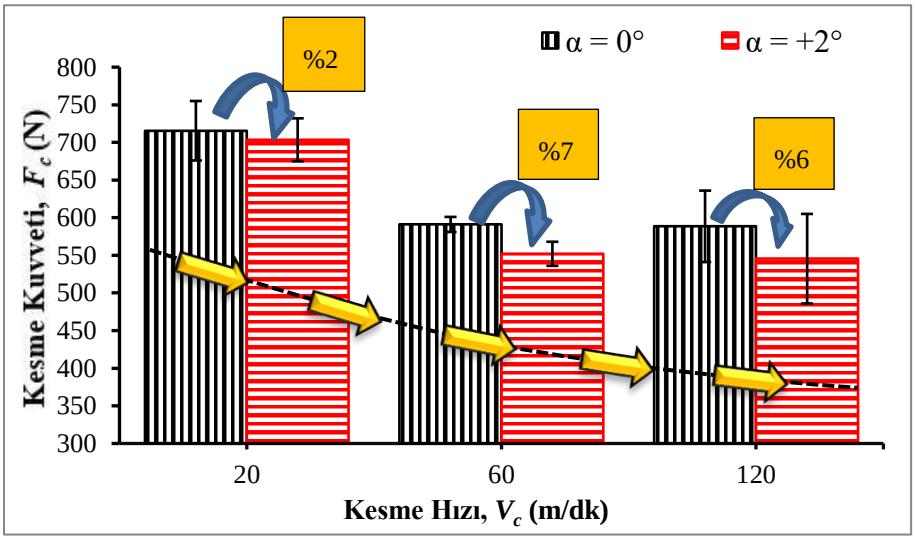
Şekil 2.19. Ti-5553 alaşım malzemesi numunelerinin incelendiği Keyence marka VHX 6000 serisi dijital mikroskop.

3. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1 Kesme Kuvvetleri

Şekil 3.1'de kuru kesme koşulunda yapılan testler sonucunda farklı talaş açılarına sahip kesici takımlarda meydana gelen kesme kuvvetleri sunulmuştur. Kesme hızının 20 m/dk 'dan 120 m/dk' ya artması ile iki talaş açısında da kesme kuvvetlerinde net bir azalma gözlemlenmiştir. Kesme kuvvetlerinin kesme hızının artması ile azalması olayı kesici takım ile talaş arasında oluşan takım talaş temas uzunluğunun azalması ve kesme hızının artmasından dolayı artan kesme sıcaklığı ile açıklanabilir(Trent ve Wright, 2000). Kesme kuvvetlerinde 20 m/dk ve 120 m/dk kesme kuvvetleri dikkate alındığında talaş açısının 0° olduğu durumda yaklaşık %18 azalma gözlemlenirken +2° talaş açısına sahip kesici takımda yaklaşık %22 azalma gözlemleniştir. Bu durumda kesme hızının artması ile kesme kuvvetlerindeki azalma oranı en fazla +2° talaş açısında oluşmuştur.

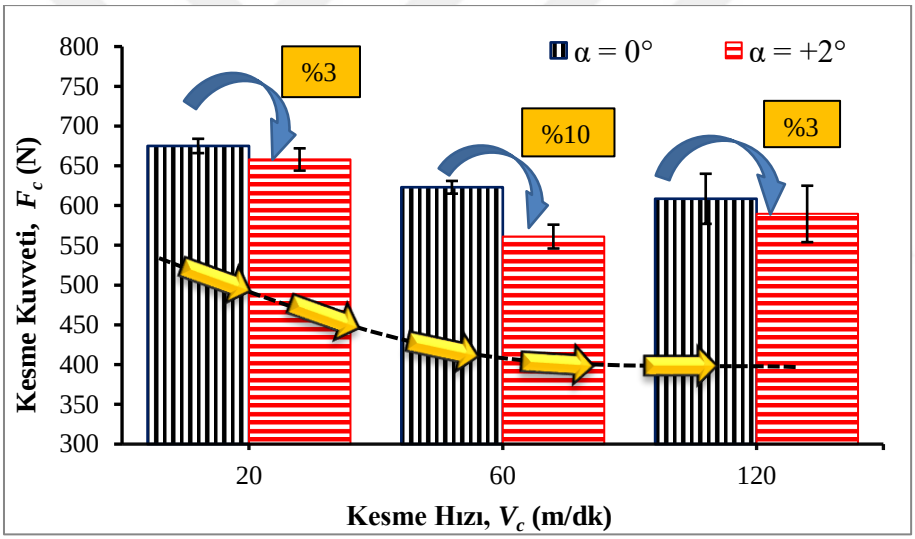
Talaş açısının pozitif yönde değişimi ile kesme kuvvetlerinde düşüş gözlemlenmiştir. 0° talaş açısı referans alındığında +2° talaş açısına doğru kesme kuvvetlerindeki azalma 20 m/dk kesme hızında yaklaşık %2 olmuştur. Bu azalma 60 m/dk kesme hızında yaklaşık % 7 iken, 120 m/dk kesme hızında yaklaşık %6 olarak ölçülmüştür. Şekil 3.1'de en yüksek kesme kuvveti 20 m/dk kesme hızında ve 0° talaş açısına sahip kesici takımda meydana gelmiştir. En düşük kesme kuvveti ise 120 m/dk kesme kuvvetinde ve +2° talaş açısına sahip kesici takımda oluşmuştur.



Şekil 3.1. Kuru kesme koşulunda ve farklı talaş açılarında oluşan kesme kuvvetleri.

Sıvı azot yardımlı kesme koşulu ile yapılan testler sonucunda oluşan kesme kuvvetleri farklı talaş açılarına bağlı olarak Şekil 3.2'de sunulmuştur. Şekil 3.2'de görüldüğü üzere kesme kuvvetleri kesme hızının artması ile azalmıştır. Şekil 3.2'deki düşük kesme hızı olan 20 m/dk kesme hızı ile yüksek kesme hızı olan 120 m/dk kesme hızı dikkate alındığında, 0° ve +2° talaş açısındaki kesme kuvvetlerindeki azalmalar yaklaşık %10 oranında olmuştur.

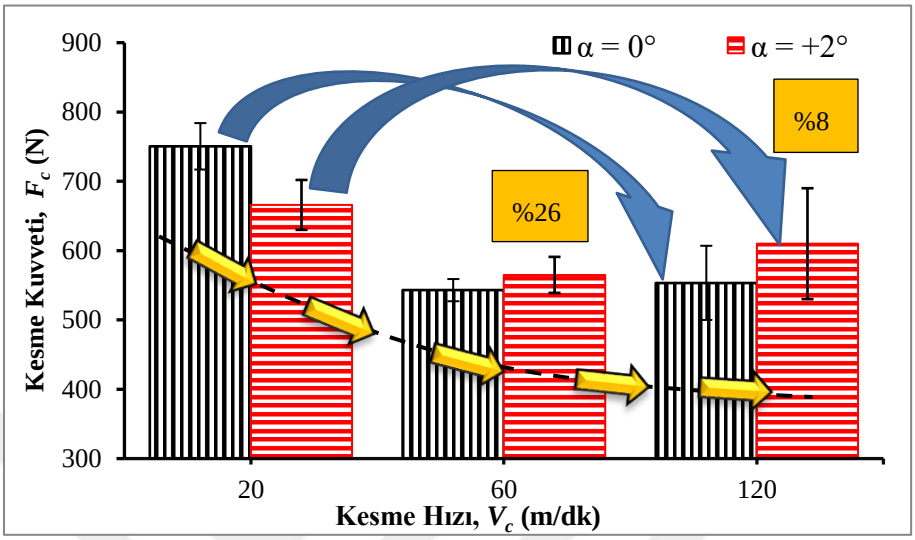
Sıvı azot yardımlı kesme koşulunda yapılan testler sonucunda ortaya çıkan kesme kuvvetlerinde 0° talaş açısı referans alındığında +2° talaş açısındaki azalma 20 m/dk kesme hızında yaklaşık %3 oranında olmuştur. Kesme hızının 60 m/dk olduğu durumda ise bu azalma yaklaşık olarak %10 iken 120 m/dk kesme hızındaki azalma yaklaşık %3 oranında meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 3.2. Sıvı azot yardımlı kesme koşulunda ve farklı talaş açılarında oluşan kesme kuvvetleri.

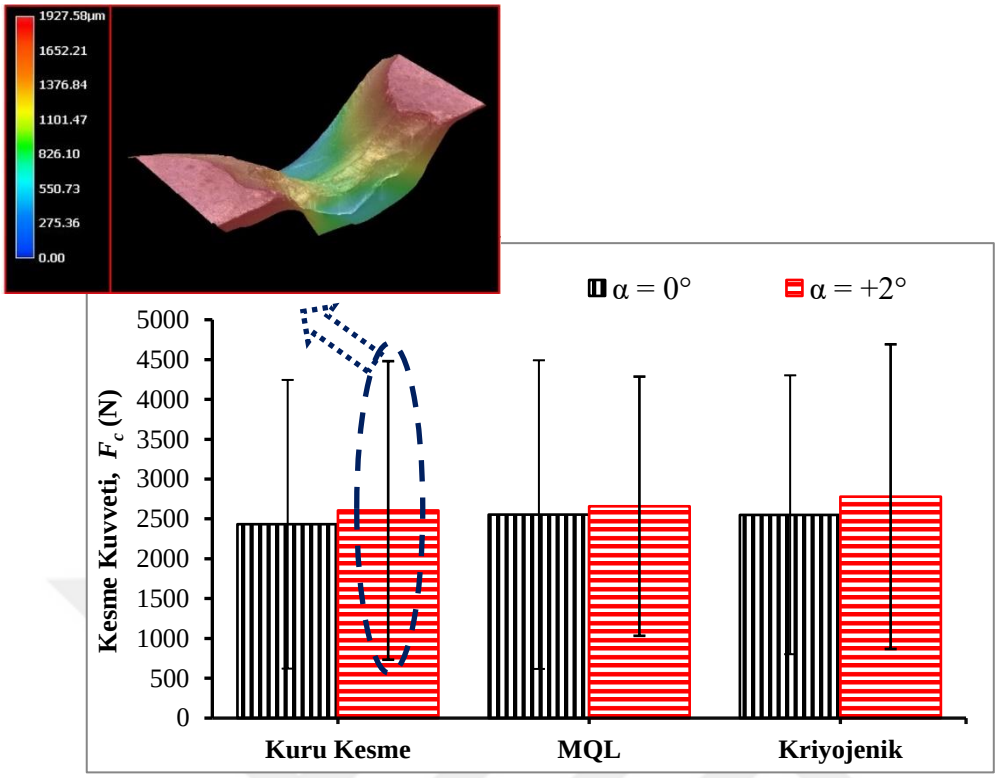
Minimum miktarda yağlama koşulu ile yapılan kesme operasyonları sonucunda ortaya çıkan kesme kuvvetleri değerleri talaş açısına bağlı olarak Şekil 3.3'te ki grafikte sunulmuştur. Grafikte de net olarak gördüğümüz kesme hızının artması ile azalan kesme kuvvetleri diğer kesme koşullarında(kuru kesme koşulu ve sıvı azot yardımlı soğutma koşulu) da olduğu gibidir.

Kesme hızının artması ile kesme kuvvetlerindeki bu azalma 20 m/dk kesme hızı ile 120 m/dk kesme hızı kıyaslandığında 0° talaş açısında yaklaşık %26 oranında olmuştur. Talaş açısının +2° olduğu durumdaki azalma yaklaşık %8 oranında olmuştur.



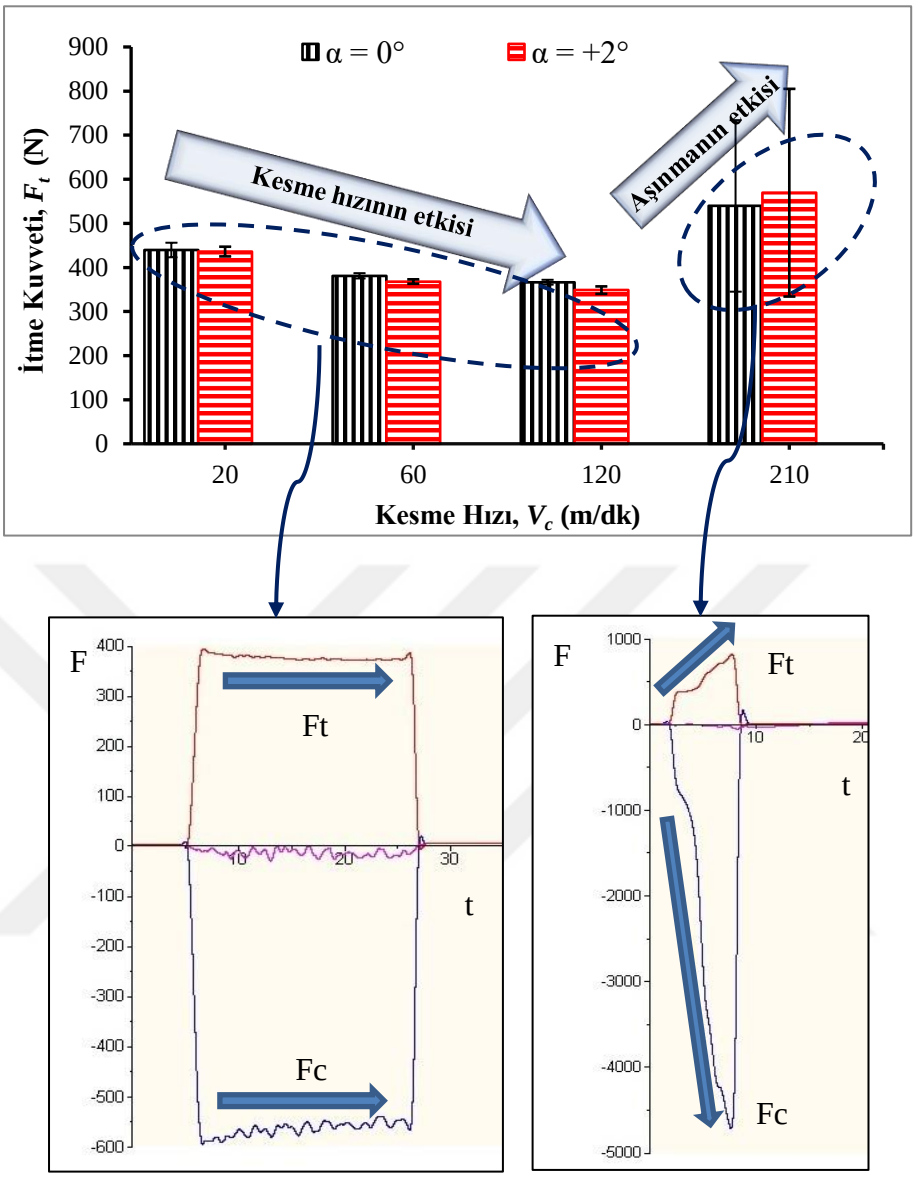
Şekil 3.3. Minimum miktarda yağlama koşulunda ve farklı talaş açılarında oluşan kesme kuvvetleri.

210 m/dk kesme hızında yapılan testler sonucunda elde edilen kesme kuvvetleri kesme hızına ve kesme koşuluna bağlı olarak Şekil 3.4'te sunulmuştur. Şekil 3.4'te 210 m/dk kesme hızında kesme kuvvetlerine, farklı kesme koşullarının ve talaş açısının bariz bir etki etmediği görülmektedir. Bununla birlikte iki talaş açısında da kesici takım aşınmasının fazla olmasından dolayı kuvvetler tüm kesme koşullarında oldukça yüksek çıkmıştır. Kesici takım aşınmasından kaynaklı hata paylarının da oldukça geniş bir yelpazede olduğu görülmektedir.



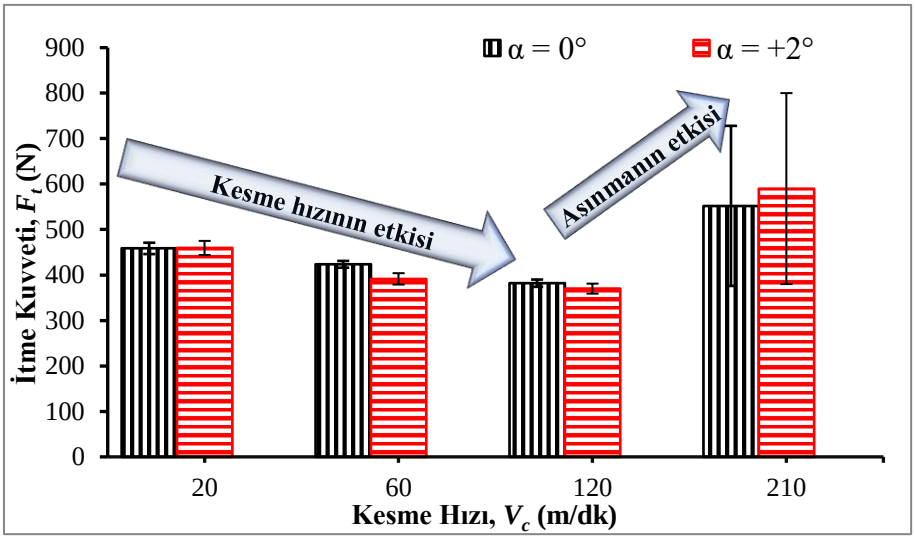
Şekil 3.4. 210 m/dk kesme hızında farklı kesme koşullarında ve farklı talaş açılarında oluşan kesme kuvvetleri.

Şekil 3.5'te kuru kesme koşulu ile yapılan testler sonucunda elde edilen kesme kuvvetleri talaş açısına bağlı olarak grafikte sunulmuştur. Grafikte 20, 60, 120 ve 210 m/dk olarak dört farklı kesme hızı ve 0° ve +2° olmak üzere üç farklı talaş açısındaki kuvvet değişimi gösterilmiştir. İtme kuvvetlerinde tıpkı kesme kuvvetlerinde olduğu gibi kesme hızının artması ile azalma meydana gelmiştir. 120 m/dk kesme hızına kadar kuvvetlerdeki azalma kesme hızının etkisi ile olmuştur. 210 m/dk kesme hızında ise itme kuvvetlerinde bariz bir artış gözlemlenmiştir. Bu artışın sebebi kesici takımda oluşan aşınma ile açıklanabilir.



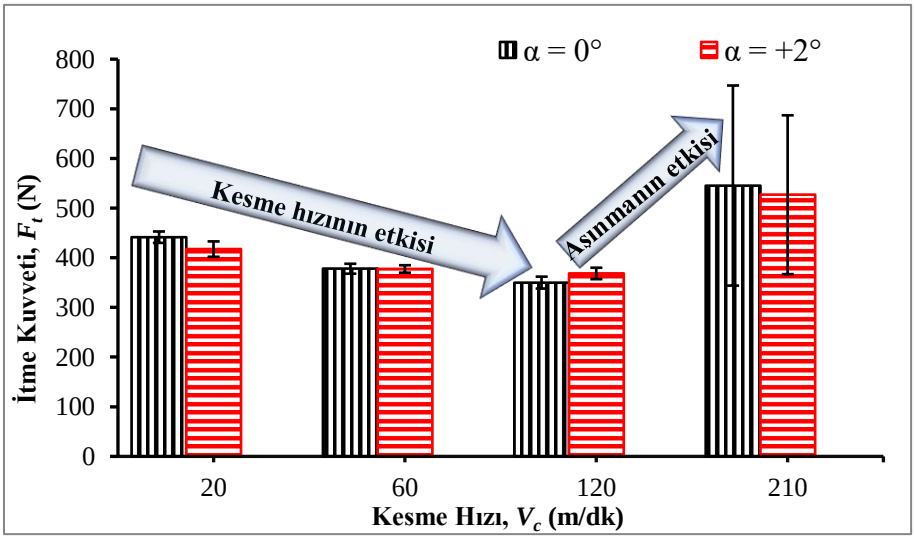
Şekil 3.5. Kuru kesme koşulunda ve farklı talaş açılarında oluşan itme kuvvetleri.

Sıvı azot yardımlı soğutma ile yapılan testler sonucunda ölçülen itme kuvvetleri talaş açısına ve kesme hızına bağlı olarak Şekil 3.6'daki grafikte sunulmuştur. Sıvı azot yardımlı soğutma koşulunda kuru kesmede olduğu gibi kesme hızı arttıkça itme kuvvetlerinde düşüş gözlemlenmiştir. 210 m/dk kesme hızındaki kuvvetlerde gözlemlenen artış takım aşınmasından kaynaklanmaktadır. En yüksek kesme hızındaki hata barlarının büyük olmasının sebebi ise takımdaki aşınmanın kesme boyunca artarak ilerlemesinden dolayı maksimum ve minimum kuvvetler arasındaki farktan oluşmaktadır.



Şekil 3.6. Sıvı azot yardımlı kesme koşulunda ve farklı talaş açılarında oluşan itme kuvvetleri.

Minimum miktarda yağlama koşulunda oluşan itme kuvvetleri Şekil 3.7'de kesme hızına ve talaş açısına bağlı olarak sunulmuştur. Minimum miktarda yağlama koşulunda diğer kesme koşullarında(kuru kesme koşulu ve sıvı azot yardımlı kesme koşulu) olduğu gibi kesme hızının artması ile itme kuvvetlerinde gözle görülür bir azalma meydana gelmiştir. En yüksek kesme hızı olan 210 m/dk kesme hızında takımdaki aşınmanın artmasından dolayı kuvvetlerde artış gözlemlenmiştir.



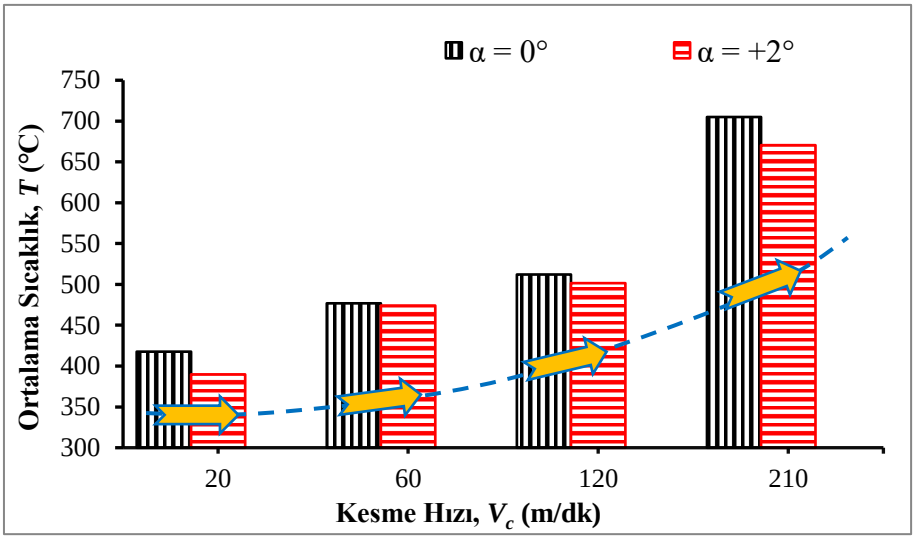
Şekil 3.7. Minimum miktarda yağlama koşulunda ve farklı talaş açılarında oluşan itme kuvvetleri.

3.2 Kesme Sıcaklığı

Şekil 3.8'de kuru kesme koşulunda yapılan testler esnasında alınan ortalama sıcaklık değerleri sunulmuştur. Grafikteki değerler kesme hızına ve talaş açısına bağlı olarak gösterilmiştir. Grafikte de görüldüğü gibi kesme hızının artması ile ortalama kesme sıcaklıklarında tüm talaş açılarında net bir artış gözlemlenmiştir. Bu artış 0° talaş açısına sahip kesici takımda kesme hızının artmasıyla düşük kesme hızına oranla yaklaşık %14, %23 ve %69 olarak gözlemlenmiştir. En yüksek sıcaklık artışı en yüksek kesme hızı olan 210 m/dk kesme hızında oluşmuştur. +2° talaş açısında kesme hızına bağlı olarak artan ortalama sıcaklıkların oranı sırayla %22, %29 ve %72 olmuştur.

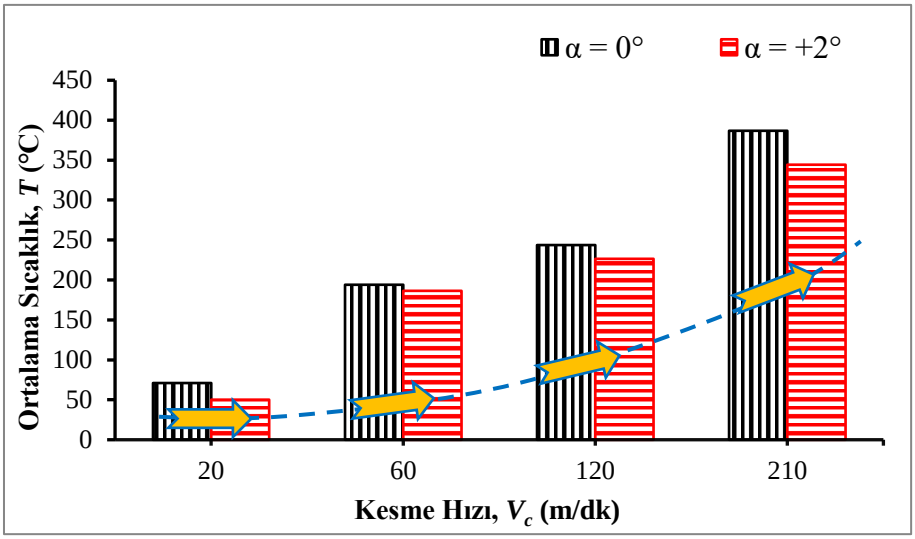
20 m/dk kesme hızında en yüksek ortalama sıcaklık değeri 0° talaş açısına sahip kesici takımda 418 °C olarak ölçülmüştür. Talaş açısının +2° olduğu durumda ortalama sıcaklık değeri yaklaşık olarak 390°C dir. Talaş açısının pozitif yönde değişmesi ile ortalama sıcaklıklarda bir azalma meydana gelmiştir. 20 m/dk kesme sıcaklığında 0° talaş açısı referans alınacak olursa bu azalma yaklaşık olarak %7 oranında olmuştur.

En yüksek kesme hızı olan 210 m/dk kesme hızını ele aldığımızda farklı talaş açılarında en yüksek ortalama sıcaklık 0° talaş açısında oluşmuştur. 0° talaş açısında ortalama sıcaklık değeri 705°C iken +2° talaş açısında 671°C olarak ölçülmüştür. 210 m/dk kesme hızında da diğer kesme hızlarında olduğu gibi açının pozitif yönde değişmesi ile ortalama sıcaklık değerlerinde azalma gözlemlenmiştir. Bu ortalama sıcaklık düşüşü 0° talaş açısı referans alınırsa +2° talaş açısında yaklaşık %5 oranında olmuştur.



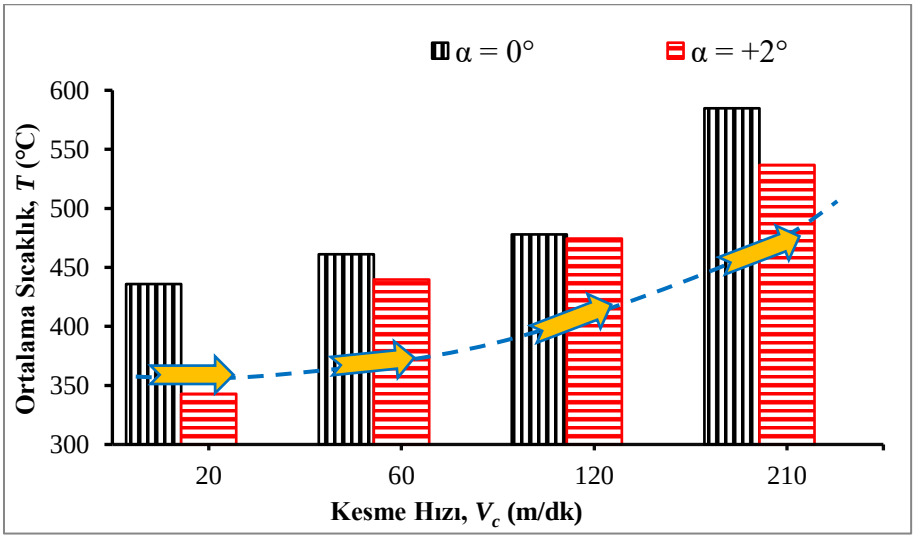
Şekil 3.8. Kuru kesme koşulunda farklı kesme hızlarında ve farklı talaş açılarındaki ortalama sıcaklık değerleri.

Sıvı azot yardımlı kesme koşulunda oluşan ortalama sıcaklık değerleri Şekil 3.9'da kesme hızına ve talaş açısına bağlı olarak sunulmuştur. Sıvı azot yardımlı kesme koşulunda kuru kesme koşulunda da olduğu gibi kesme hızının artması ile ortalama sıcaklık değerlerinde bariz bir artış meydana gelmiştir. Kesme hızının artması ile artan ortalama sıcaklık değişiminin yanı sıra talaş açılarının değişimi ile de ortalama sıcaklık değerlerinde değişim gözlemlenmiştir. Talaş açısının değişmesi ile ortalama sıcaklık değerlerinin değişmesi takım-talaş temas uzunluğunun değişmesi ve sürtünmenin değişmesi ile açıklanabilir. Tüm kesme hızlarında en yüksek ortalama sıcaklık değerleri 0° talaş açısında oluşmuştur. En düşük sıcaklıklar ise tüm kesme hızlarında +2° talaş açısında oluşmuştur. 20 m/dk kesme hızında en yüksek sıcaklık 0° talaş açısında 71°C, +2° talaş açısında 50°C ölçülmüştür. 210 m/dk kesme hızında en yüksek sıcaklık 0° talaş açısında 387°C iken +2 talaş açısında 344 °C ölçülmüştür.



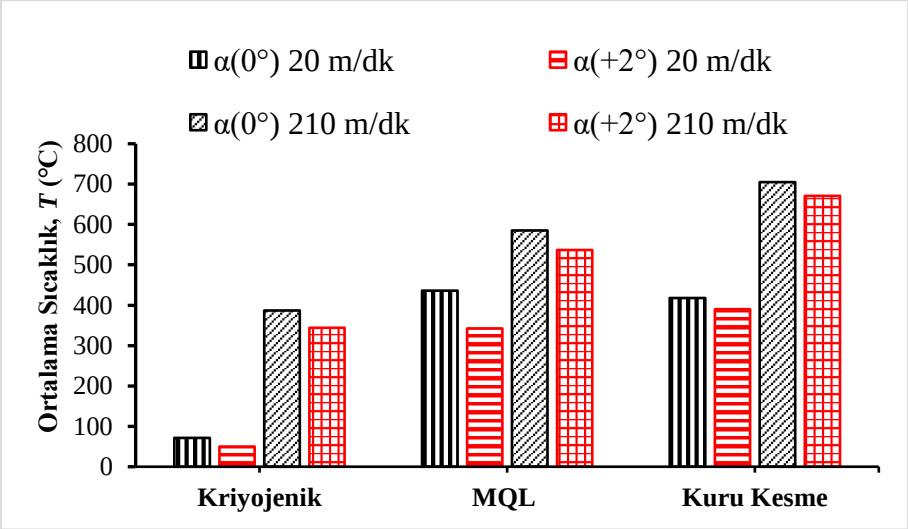
Şekil 3.9. Sıvı azot yardımlı kesme koşulunda farklı kesme hızlarında ve farklı talaş açılarındaki ortalama sıcaklık değerleri.

Şekil 3.10'da sunulan grafikte minimum miktarda yağlama koşulunda oluşan ortalama sıcaklık değerleri kesme hızına ve talaş açısına bağlı olarak sunulmuştur. Minimum miktarda yağlama koşulunda da diğer kesme koşullarında(kuru kesme koşulu ve sıvı azot yardımlı soğutma koşulu) olduğu gibi kesme hızının yükselmesi ile ortalama sıcaklık değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Bunun yarı sıra talaş açısının değişmesi ile değişen takım-talaş temas uzunluğunun etkisi ile de farklı talaş açılarında ortalama sıcaklık değerleri değişmiştir. Tüm kesme hızlarında en yüksek ortalama sıcaklık değerleri 0° talaş açısında oluşurken en düşük ortalama sıcaklık değerleri +2° talaş açısında oluşmuştur.



Şekil 3.10. Minimum miktarda yağlama koşulunda farklı kesme hızlarında ve farklı talaş açılarındaki ortalama sıcaklık değerleri.

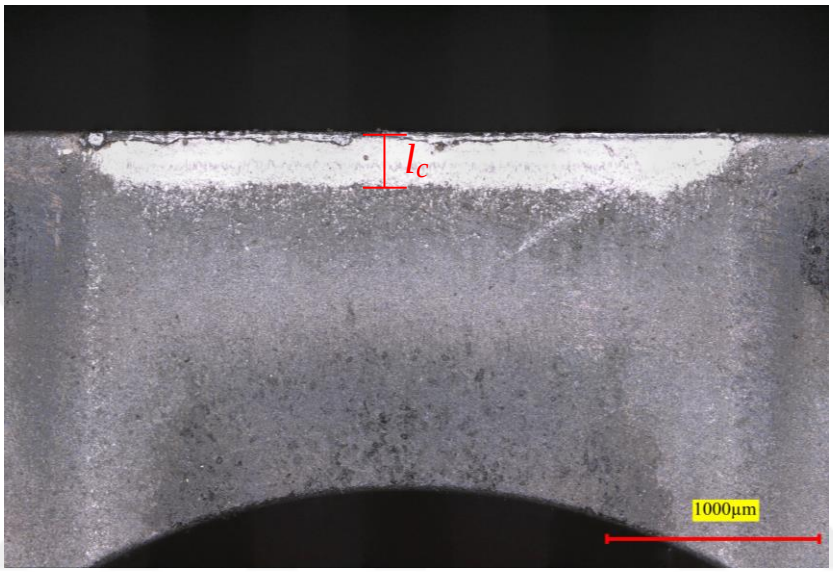
Yukarıda sunulan grafiklerde talaş açısının ortalama sıcaklıklara etkisini her koşulda kendi içerisinde tartıştık. Şekil 3.11'de ise düşük ve yüksek kesme hızlarında (20 ve 210 m/dk) farklı kesme koşullarının ortalama sıcaklık değerine etkisi sunulmuştur. Beklendiği üzere en etkili soğutma metodu olan sıvı azot ile kesmede en düşük kesme sıcaklıkları elde edilmiştir. Yağlayıcı özelliğinden yararlandığımız MQL koşulu da kuru kesmeye kıyasla kesme sıcaklıklarını ciddi anlamda düşürmüştür.



Şekil 3.11. 20 ve 210 m/dk kesme hızında farklı koşullarda ve farklı talaş açılarındaki ortalama sıcaklık değerleri.

3.3 Kesici Takım-Talaş Temas Uzunluğu

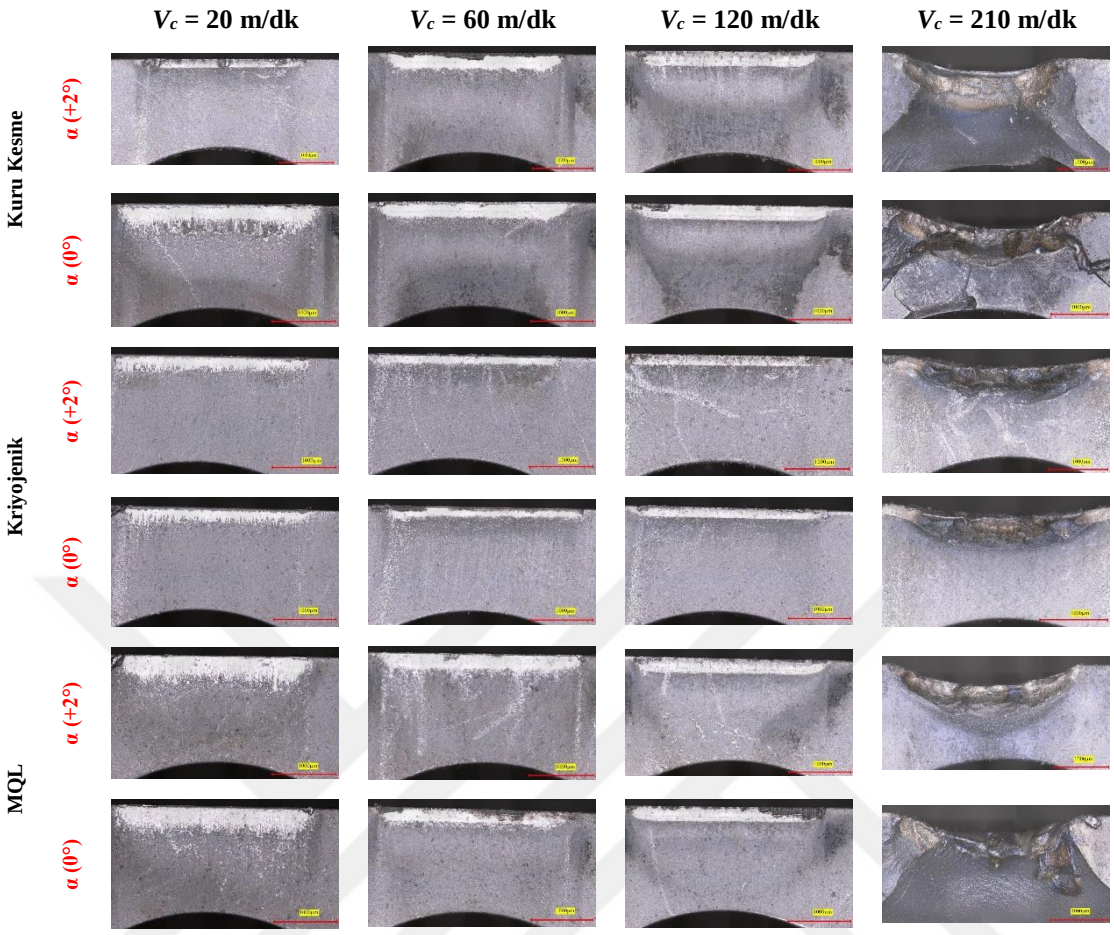
Farklı kesme koşullarında ve parametrelerinde yapılan kesme testlerinde her bir deneyde yeni takım kullanılmıştır. Bu kesici takımlar üzerinde herhangi bir talaş kırıcısı olmayan takımlardır. Talaş temas alanının ve temas uzunluğunun ölçümünü gösteren dijital mikroskop görüntüsü aşağıda Şekil 3.12'de görülmektedir. Temas uzunluğu ölçümü temas alanında üç ayrı noktadan yapılarak ortalama değer bulunmuştur.



Şekil 3.12. Kesici takımların talaş yüzeyinde takım-talaş temas uzunluğu.

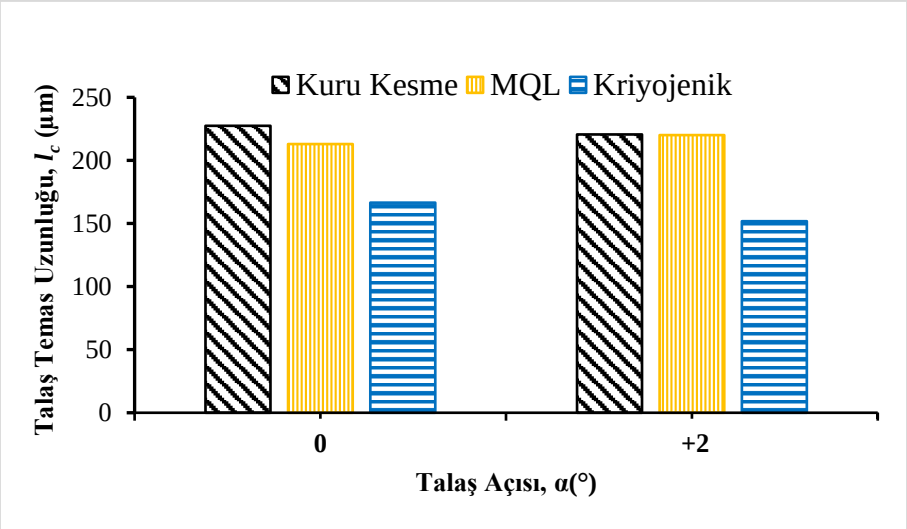
Not edilmesi gereken husus temas uzunlukları belli bir kesme hızından sonra aşınmayı da içermektedir. Bu durum özellikle kesme simülasyonunda tahmin edilen temas uzunluğunun farklılığını daha net açıklayabilmektedir.

Farklı koşullarda ve kesme parametrelerinde elde edilen talaş temas bölgeleri Şekil 3.13'te sunulmuştur. Şekilde görüldüğü üzere her kesme koşulu ve talaş açısı için artan kesme hızı ile talaş temas uzunluklarında önemli düşüşler meydana gelmiştir. 210 m/dk kesme hızında takımlarda kırılma meydana geldiği için ölçüm yapılamamıştır.



Şekil 3.13. Farklı kesme koşulları ve talaş açılarında meydana gelen talaş yüzeyi görüntüleri.

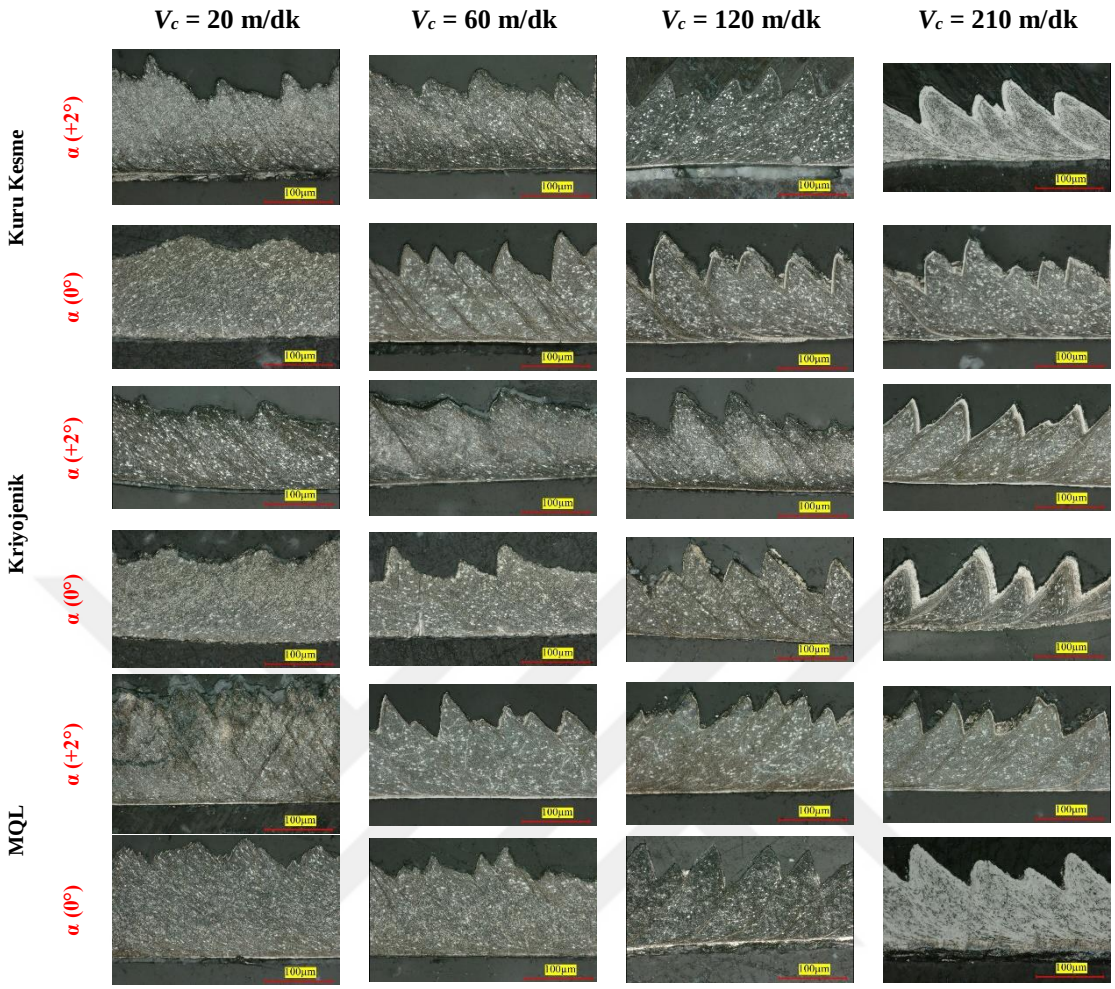
Farklı kesme koşullarında ve talaş açılarında gerçekleştirilen talaş kaldırmada 120 m/dk kesme hızında elde edilen talaş temas uzunlukları örnek olarak Şekil 3.14'te sunulmuştur. Kesme koşullarının temas uzunluğuna etkisi incelendiğinde farklı talaş açıları için temas uzunluğu en fazla olan kesme koşulu kuru kesmedir. α (0°) için kuru kesme koşulunda temas uzunluğu yaklaşık 228 µm iken MQL'de 213 µm, kriyojenik soğutmada 167 µm olarak ölçülmüştür. Kriyojenik soğutmada takım aşınması az olduğu için tüm talaş açılarında en az takım-talaş temas uzunluğunun elde edildiği koşul olmuştur. α (0°)'de kriyojenik soğutma kuru kesmeden yaklaşık % 27, α (+2°)'da ise yaklaşık %32 daha az çıkmıştır. α (0°)'den α (+2°)'ye talaş açısının değişimi ile kesici takım-talaş arasındaki sürtünme alanı azaldığı için ölçülen temas uzunluklarında azalma meydana gelmiştir.



Şekil 3.14. 120 m/dk kesme hızında farklı kesme koşullarında ve talaş açılarında elde edilen talaş temas uzunluğu değerlerinin karşılaştırılması.

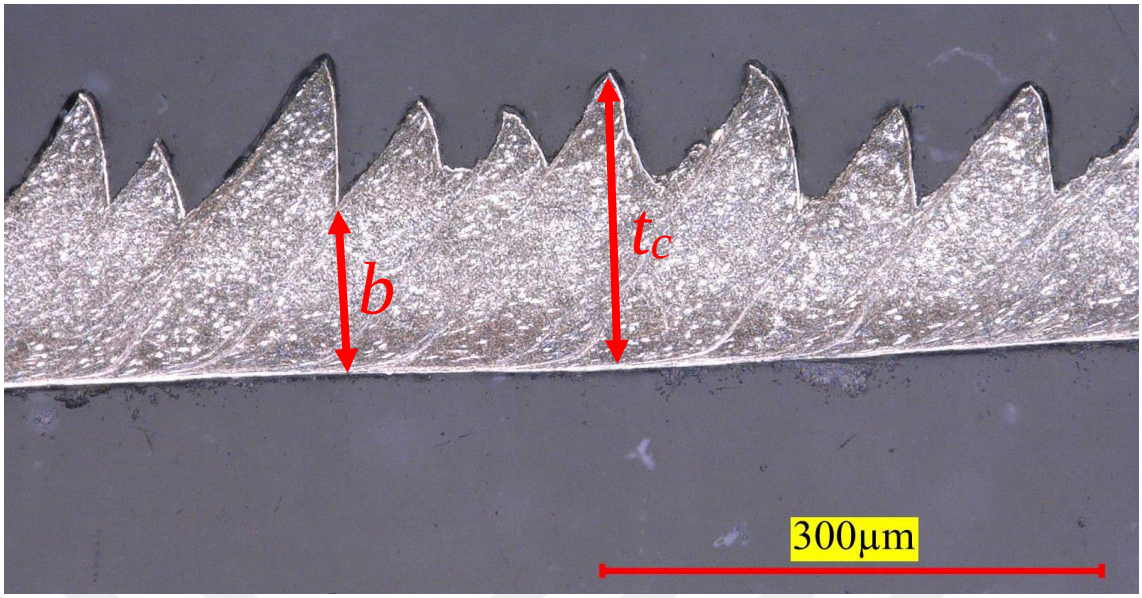
3.4 Talaş Formu ve Morfolojisi

Farklı kesme koşulları ve talaş açılarında elde edilen talaş formlarının dijital mikroskop görüntüleri Şekil 3.15'te sunulmuştur. Her talaş açısı için ve her koşulda elde edilen talaşların hemen hemen hepsi testere geometrili talaşlardır. Ti-5553 alaşımın işlenmesinde oluşan talaşlar testere geometrili (segmented chip) talaşlar olduğu zaten literatürde ifade edilmiştir (Wagner ve ark., 2009,Braham-Bouchnak ve ark., 2015). Bu tez kapsamında farklı talaş açılarında, farklı soğutucu ve yağlayıcının talaş oluşumuna etkisi incelenmiştir. Elde edilen talaş formları incelendiğinde, özellikle düşük kesme hızında (20 m/dk) oluşan talaşta testere ağızları (segmentler) net olarak görülmemekte veya diğer bir ifade ile testere formu tam anlamıyla oluşmamaktadır. Bu durum neredeyse tüm kesme koşullarında ve talaş açılarında aynıdır. Yüksek kesme hızlarında ise düşük kesme hızına göre testere ağız oluşumu tüm kesme koşulları ve talaş açıları için oldukça net şekilde görülmektedir.

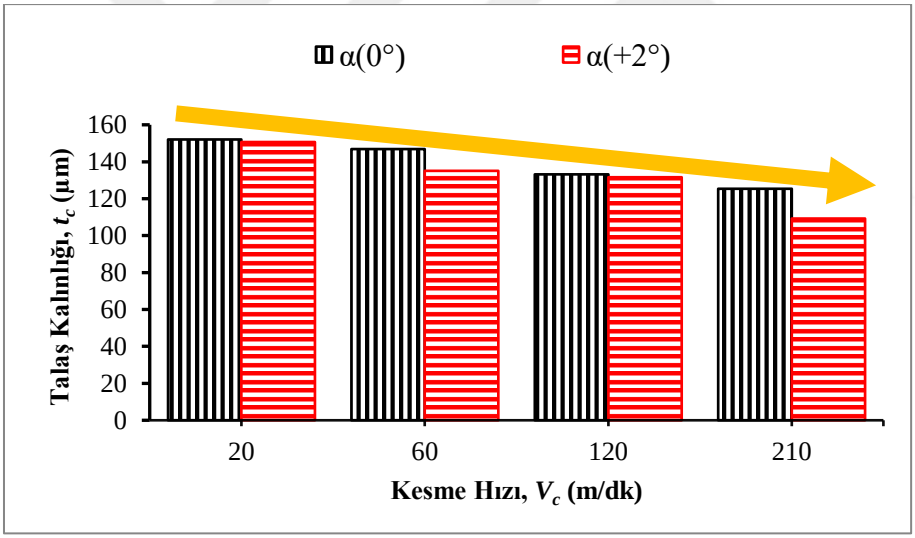


Şekil 3.15. Farklı kesme koşulları ve talaş açılarında elde edilen talaş formları.

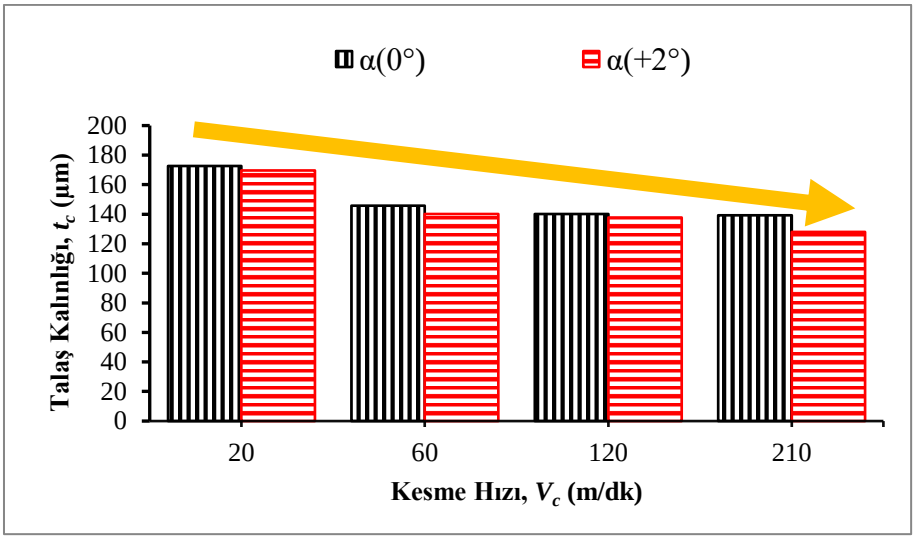
Her bir kesme koşulu ve talaş açısı için talaş formları (t_c,b) Şekil 3.16'da gösterildiği gibi ölçülmüştür. Her bir talaş için en az üç ölçüm alınarak ortalama değerler elde edilmiştir. Şekil 3.17(kuru), 3.18(MQL) ve 3.19(sıvı azot)'da farklı kesme hızlarında ve farklı talaş açılarında elde edilen talaş kalınlıkları sunulmuştur. Kesme hızındaki artış kayma düzlem açısında değişime sebep olmakta ve bunun sonucunda talaş kalınlıkları değişim göstermektedir. Şekillerden görüldüğü üzere, kesme hızının artmasıyla beraber tüm koşullardaki talaş kalınlıklarında (t_c) azalma meydana gelmiştir. Talaş açılarının değişimi dikkate alındığında açının pozitif yönde artmasıyla talaş kalınlıklarında azalma olduğunu söyleyebiliriz.



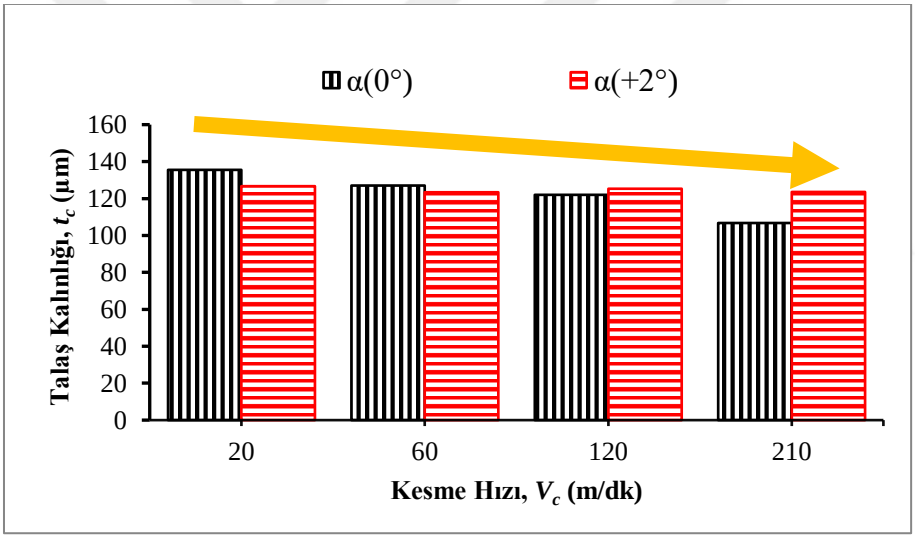
Şekil 3.16. Talaş formu ölçümünün gösterimi.



Şekil 3.17. Kuru kesme koşulunda farklı kesme hızlarında ve farklı talaş açılarındaki talaş kalınlığı değerleri.



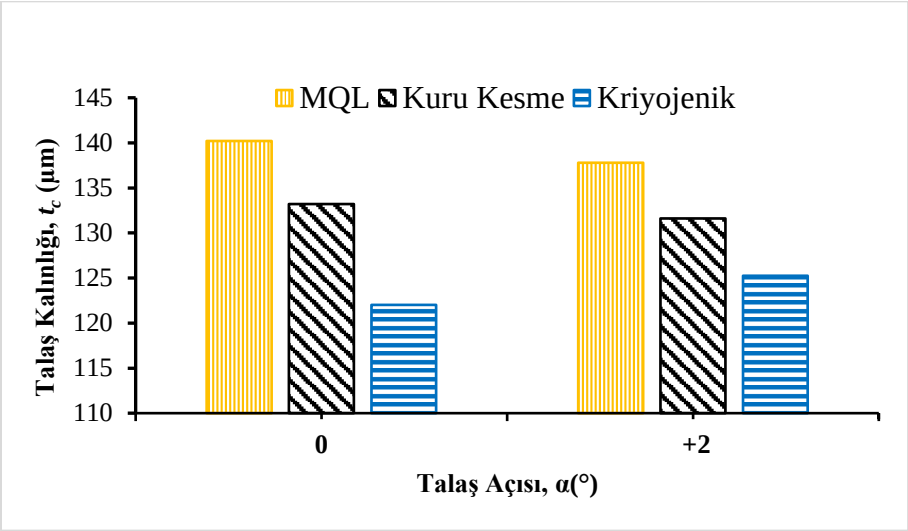
Şekil 3.18. Minimum miktarda yağlama koşulunda farklı kesme hızlarında ve farklı talaş açılarındaki ortalama sıcaklık değerleri.



Şekil 3.19. Sıvı azot ile kesme koşulunda farklı kesme hızlarında ve farklı talaş açılarındaki ortalama sıcaklık değerleri.

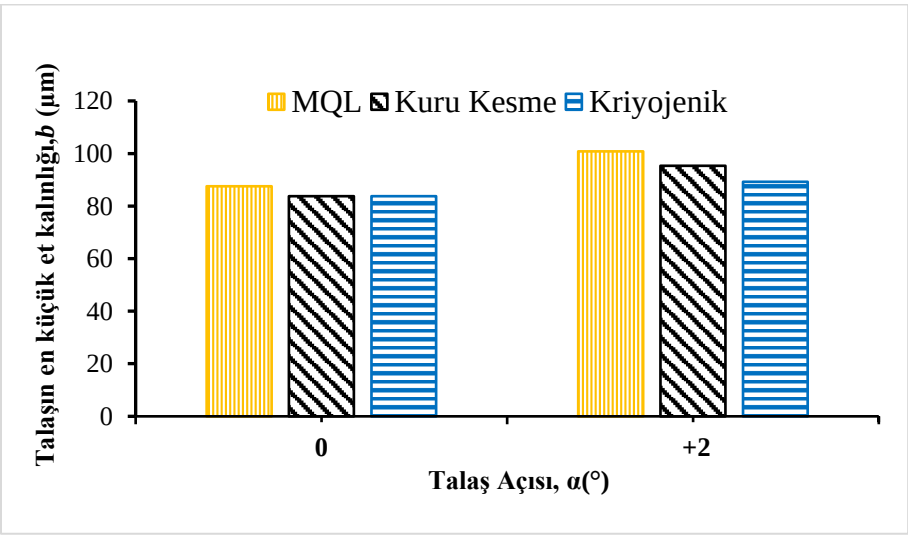
Şekil 3.20'de ise 120 m/dk kesme hızında farklı talaş açılarında ve kesme koşullarında elde edilen talaş kalınlıklarının karşılaştırılması örnek olarak verilmiştir. İki talaş açısı için de MQL kesme işleminde elde edilen talaş kalınlıkları en büyük iken sıvı azot (kriyojenik) ile kesme işleminde en ince talaş oluşumunun gerçekleştiği görülmektedir. Kriyojenik koşulda talaş oluşumu soğuk şekillendirme olarak değerlendirilebilir. Dolayısı ile plastik deformasyona maruz kalan ve talaşa dönüşen parçada, diğer koşullarda olduğu kadar

süneklik oluşmayacaktır ve bu durum da malzemenin kesit alanını etkileyecektir. Bunun neticesinde kriyojenik soğutmada daha ince talaşların oluşması muhtemeldir.



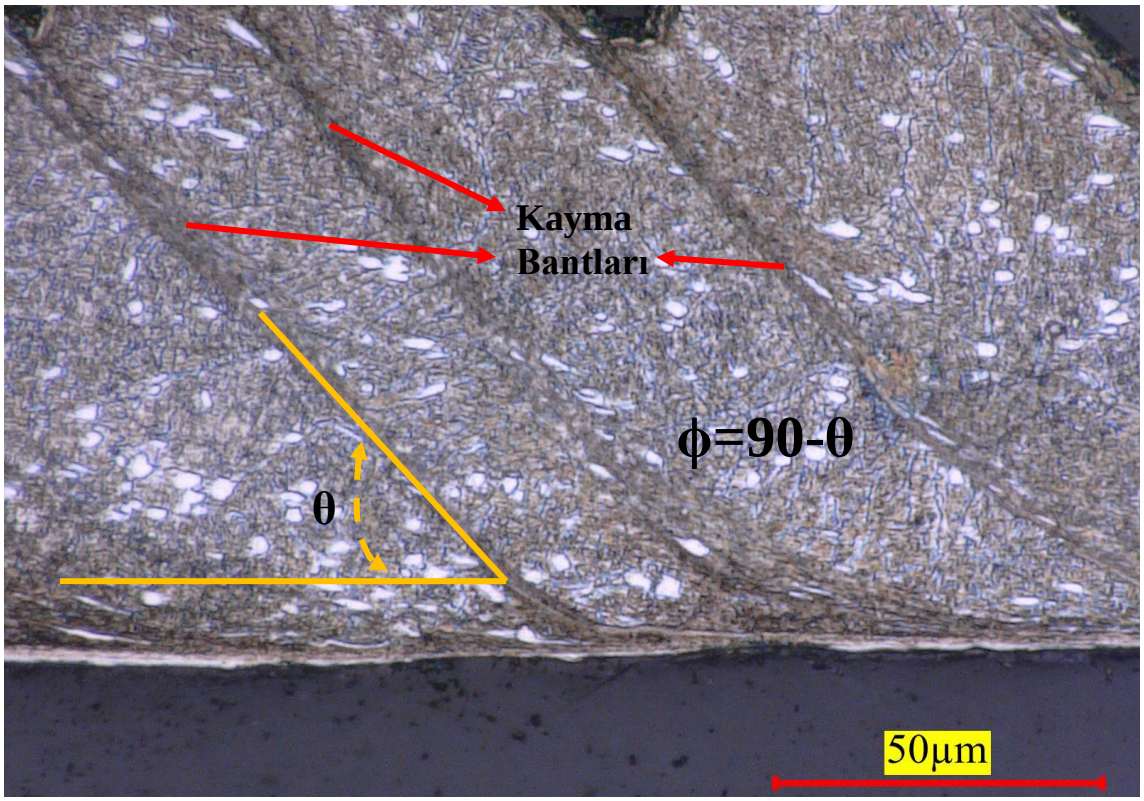
Şekil 3.20. 120 m/dk kesme hızında farklı talaş açılarında ve kesme koşullarında elde edilen talaş kalınıklarının karşılaştırılması.

Şekil 3.21'de 120 m/dk kesme hızında farklı kesme koşullarında ve talaş açılarında elde edilen talaş en küçük et kalnlığı (*b*) değerleri örnek olarak sunulmuştur. Talaş kalınlıklarına benzer olarak genelde farklı talaş açılarında MQL kesme işleminde en büyük talaş kalınlıkları elde edilirken kriyojenik talaş kaldırma işleminde en ince talaşlar görülmüştür.



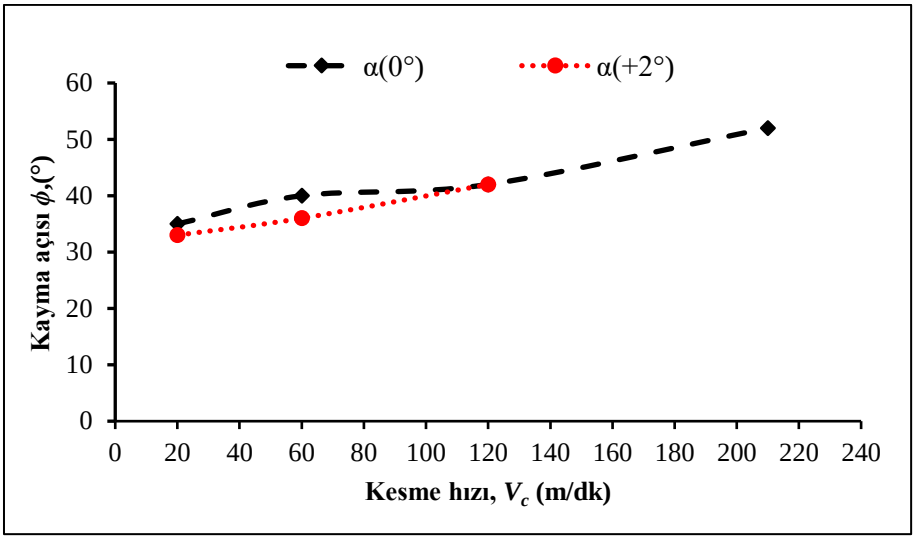
Şekil 3.21. 120 m/dk kesme hızında farklı talaş açılarında ve kesme koşullarında elde edilen *b* değerlernin karşılaştırılması.

Talaş morfolojisinin elde ettiğimiz bir diğer çıktı da kayma bantlarıdır. Kayma bantları sayesinde kayma açısını hesaplayabiliriz. Şekil 3.22'de 2000x büyütme yapılarak elde edilmiş talaşın kayma bantları görülmektedir. Kayma bantlarının paralel düzlemle yaptığı açıyı (talaş açısı) 90° derecenden çıkardığımız da kayma açısına ulaşırız. (Şekil 3.22)

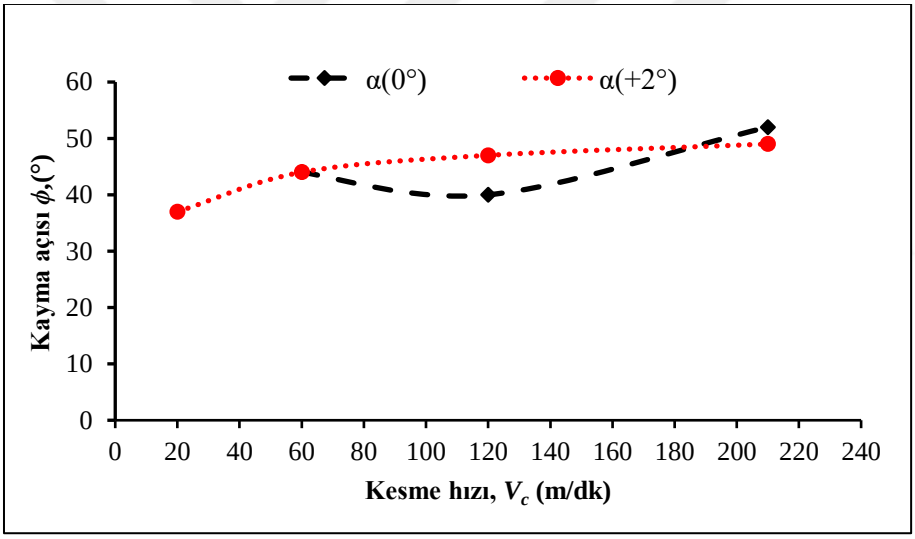


Şekil 3.22. Kayma bantlarının ve kayma açısının ölçümünün gösterimi(2000x).

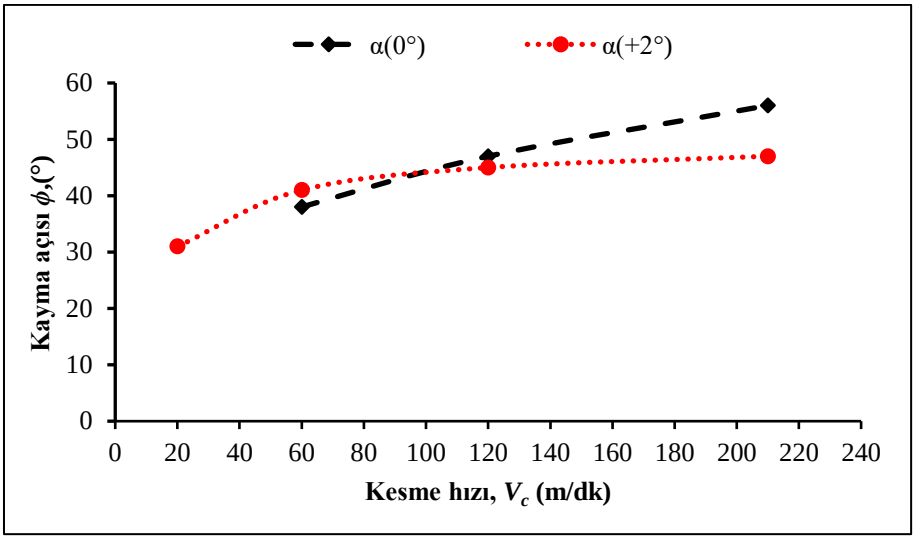
Şekil 3.23, 3.24 ve 3.25'te sırasıyla kuru kesme, sıvı azot ve MQL işlemleri için farklı talaş açıları ve kesme hızlarında elde edilen kayma açılarının karşılaştırılması gösterilmektedir. Bazı kesme hızlarında kayma bantları belli olmadığı için kayma açıları ölçülememiştir. Tüm kesme koşulları ve talaş açıları göz önüne alındığında kesme hızlarının artmasıyla kayma açılarında bir artış gözlenmiştir. Özellikle kuru kesme ve MQL işlemi için bariz olarak gözükmektedir.



Şekil 3.23. Kuru kesme işlemi için farklı talaş açıları ve kesme hızlarında ölçülen kayma açıları.

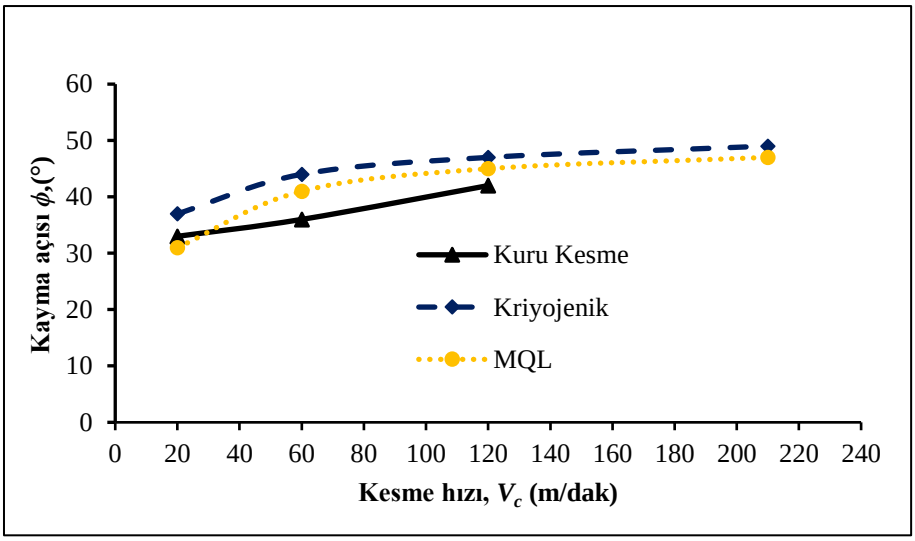


Şekil 3.24. Sıvı azot ile kesme işleminde farklı talaş açıları ve kesme hızlarında ölçülen kayma açıları.



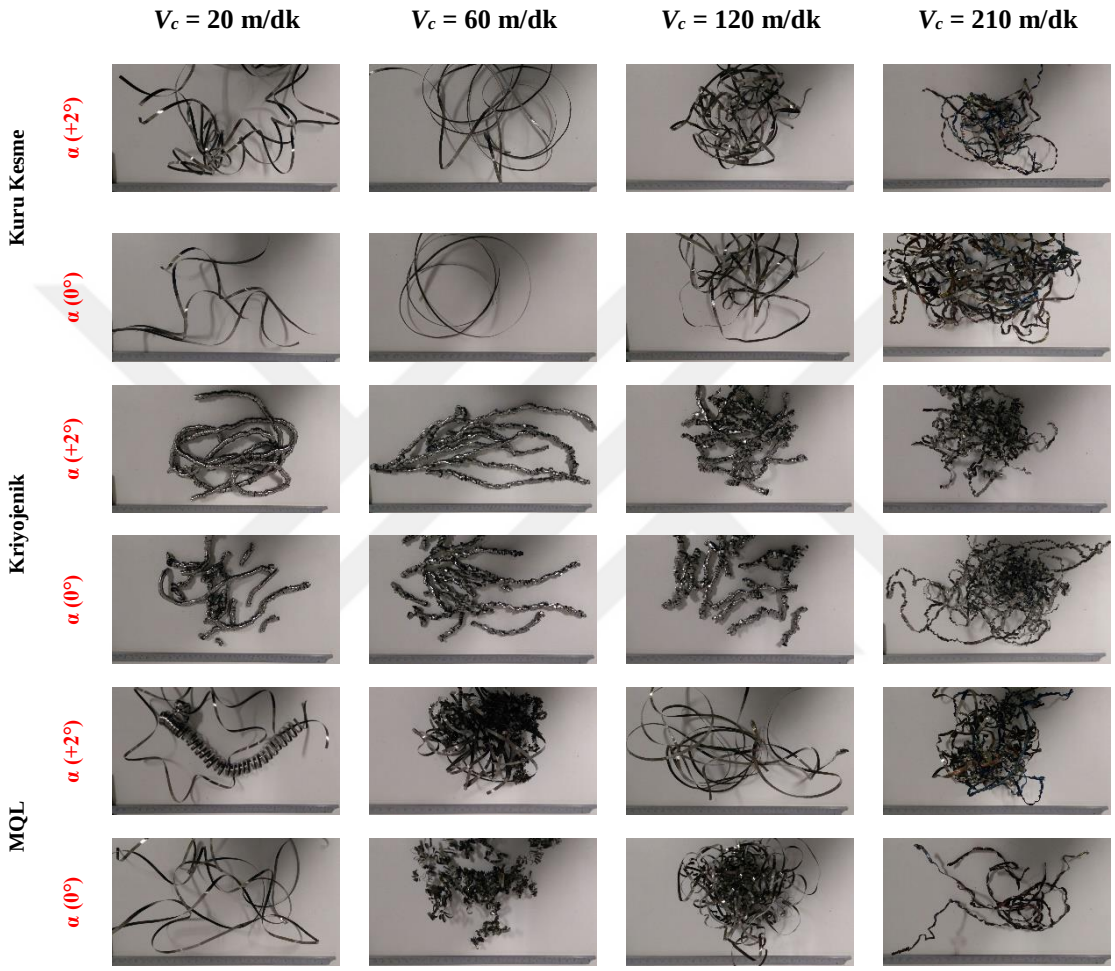
Şekil 3.25. MQL işlemi için farklı talaş açılarında ve kesme hızlarında ölçülen kayma açıları.

Kayma açısının farklı koşullara göre değişimini incelemek için α(+2°) talaş açısında farklı kesme hızları ve koşullarında elde edilen kayma açıları örnek olarak Şekil 3.26'da sunulmuştur. Tüm hızlarda kriyojenik koşul en yüksek değeri verirken, en düşük değerler kuru kesme koşulu için elde edilmiştir. En düşük kesme hızı(20 m/dk) için ise tam tersi bir durum söz konusudur. MQL koşulunda en düşük kayma açısı değeri elde edilmiştir.



Şekil 3.26. α(+2°) talaş açısında farklı kesme hızları ve koşullarında elde edilen kayma açıları.

Testler sonucunda elde edilen talaş görüntüleri Şekil 3.27'de sunulmuştur. Bilindiği üzere dik kesmede genellikle sürekli ve uzun talaşlar oluşan talaş türleridir. Diğer kesme koşullarından farklı olarak kriyojenik soğutmada elde edilen talaşlar tüp geometrili (tubular chip) sürekli talaşlar şeklinde oluşmuştur. Diğer kesme koşullarında oluşan talaşlar ise genelde karmaşık (snarled) sürekli talaş diye tanımlanan talaş türlerindendir.



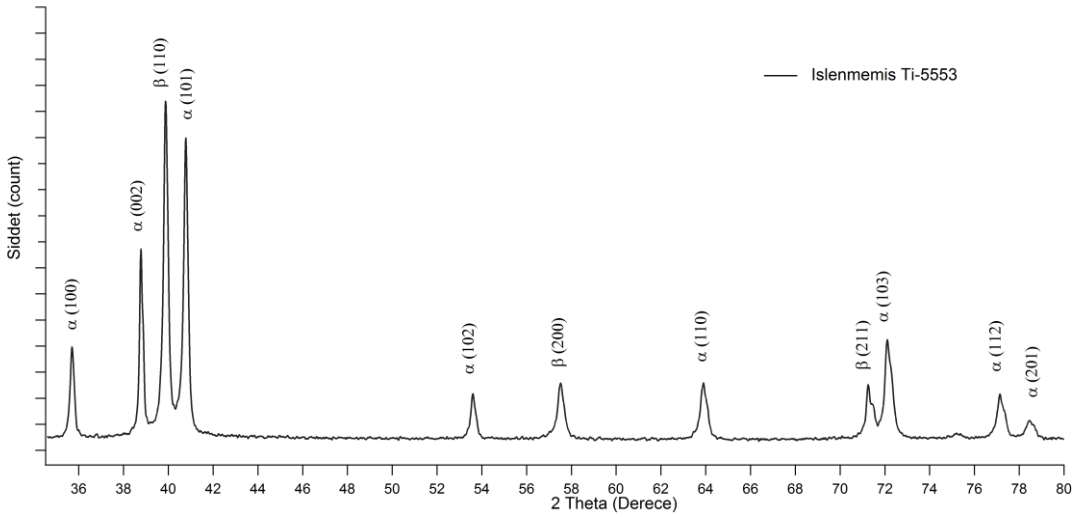
Şekil 3.27. Farklı kesme koşulları ve parametrelerinde oluşan talaşların fotoğrafları.

3.5 XRD Faz Analizi

Deformasyon, mekanik ve termal etkilerin neden olduğu faz dönüşümü titanyum alaşımlarında çekme dayanımı, süneklik, tokluk gibi özellikleri etkileyebilmektedir (Donachie, 2000). Literatürde Ti-5553 alaşım malzemesinin talaşlı imalat sürecinden kaynaklı faz dönüşümü üzerine kapsamlı bir çalışma yer almamaktadır. Yan ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmalarda Ti-5553 alaşım malzemesini kuru ve kesme sıvısı koşullarında delik delme işlemi uygulayarak kesme kuvvetleri, sıcaklık ve sertlik değerlerindeki değişimi incelemişlerdir (Yan ve ark., 2011). Kuru kesme koşullarında iş parçasında ölçülen sertlik artışını **ω** faz dönüşümünün yol açmış olabileceğini belirtmişlerdir (Yan ve ark., 2011). Burada belirtilmesi gereken husus bahsi geçen çalışmada faz dönüşümü ile ilgili herhangi bir ölçüm yapılmamış olup, sertlik değerinde meydana gelen değişimin **ω** faz dönüşümünden kaynaklanmış olabileceğinin belirtilmiş olmasıdır. **α** ve α arasında geçiş fazı olarak belirtilen isotermal **ω** fazı 350-400 °C sıcaklıkları arasında oluşup mikroyapı içerisinde küçük (10nm) boyutlarda bulunup oldukça gevrek (500Hv) ve işlenmesi zordur (Yan ve ark., 2013). Wagner ve arkadaşları Ti-5553 alaşım malzemesinin Ti-64'e göre sahip olduğu daha yüksek mekanik ve termal özellikler sebebiyle bu malzemenin talaşlı imalatı sırasında β dönüşüm sıcaklığı üzerinde daha yüksek ısı oluşumu gözlemlenmekte olduğu ve bu durumun talaşlı imalat sırasında malzemenin faz dönüşümüne sebep olabileceğini belirtmişlerdir (Wagner ve ark., 2009).

Görüldüğü gibi literatürde talaşlı imalat prosesi sonucunda bu malzemenin faz değişimi ve davranışı ile ilgili kapsamlı bir çalışma bulunmamaktadır. Herbert ve arkadaşlarına göre şiddette(intensity) meydana gelen farklılık tane boyutlarında değişim meydana geldiğini işaret etmektedir (Herbert ve ark., 2012). Dolayısıyla talaşlı imalat sürecinin yol açtığı faz dönüşümü üretilen komponentlerin yüzey ve yüzey altında mekanik ve termal özellikleri etkileyebilmektedir.

Tez kapsamında kullanmış olduğumuz bimodal(BM) mikroyapıya sahip ve mikroyapı özellikleri Bölüm 2.1'de anlatılan metastabil β Ti-5553 alaşım malzemesinin işlem görmemiş hali (as-receive) için X-Ray kırınım (XRD) tekniği kullanılarak elde edilmiş faz pikleri, bölgeleri ve düzlemleri (miller indisleri) Şekil 3.28'de gösterilmektedir.



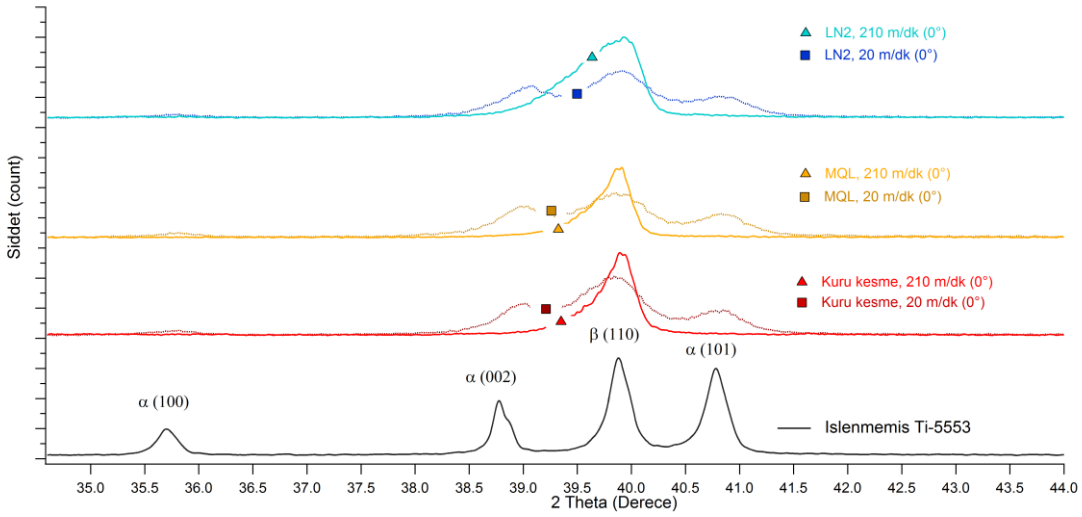
Şekil 3.28. İşlenmemiş Ti-5553 alaşım malzemesinin faz pikleri.

α ve β faz pikleri sırasıyla 35,4° ve 38,5° kırınım açılarında hekzagonal sıkı paket (HCP) α(100) ve α (002) pikler görülmektedir. 39,45° 'de (110)β hacim merkezli kübik(HMK), 40,45° 'de α(101) ve 53,30° de α(102) indislerinde piklerin oluştuğu görülmektedir. Devamındaki pikler ve fazları Şekil 3.28'de sunulmuştur. Bahsi geçen bu pikler mikro yapının bimodal mikroyapı (BM) olduğunu göstermektedir (Huang ve ark., 2017). Bimodal mikroyapılı alaşımın deformasyon davranışı yapıda yer alan küresel formlu birincil α_p (primary alfa) fazların dışsal etkiler (termal-mekanik prosesler) ile kaymaları tarafından etkilenmektedir (Huang ve ark., 2017). Bu pikler haricinde, Şekil 3.28'de sunulan ve 53,30° ile 80° derece arasında gösterilen diğer pikler ise Campo ve arkadaşlarının (Campo ve ark., 2016) çalışmaları referans alınarak belirlenmiştir.

Alaşımın bileşimi ve soğutma oranına bağlı olarak kübik beta / hekzagonal alfa faz dönüşümü martenzitik şekilde veya difüzyon yoluyla meydana gelir (Clément, 2010). Ti-5553 alaşım malzemesi için martenzit dönüşüm kristal yapıdaki atomların düzenli kayma hareketini neticesinde oluşmaktadır ve bu dönüşüm [111]β (11-2)β ve [111]β (-101)β kayma sistemlerinin aktivasyonu neticesinde elde edilmektedir. Bu şekilde oluşan hekzagonal martenzit α^{l} iğnemsi (mikroyapıda) morfolojisi ile fazla doymuş dengede olmayan-düzensi (non-equilibrium) hcp α yapı olarak görülür (Clément, 2010).

Titanyum malzemelerde alaşım elementlerinin sayısı arttıkça hekzagonal simetri kaybolur ve yeni yapı bununla uyumlu olan martenzit α'' ortorombik sistem olarak tanımlanır (Clément, 2010). Saf titanyumun M_s sıcaklığı 850 °C iken β stabillerin artması ile bu sıcaklık düşer. β faz, sıcaklığa bağlı(athernal) **w** faz olarak tanımlanan yapıda çözünebilir (ayrışır-yok olur) (Clément, 2010).

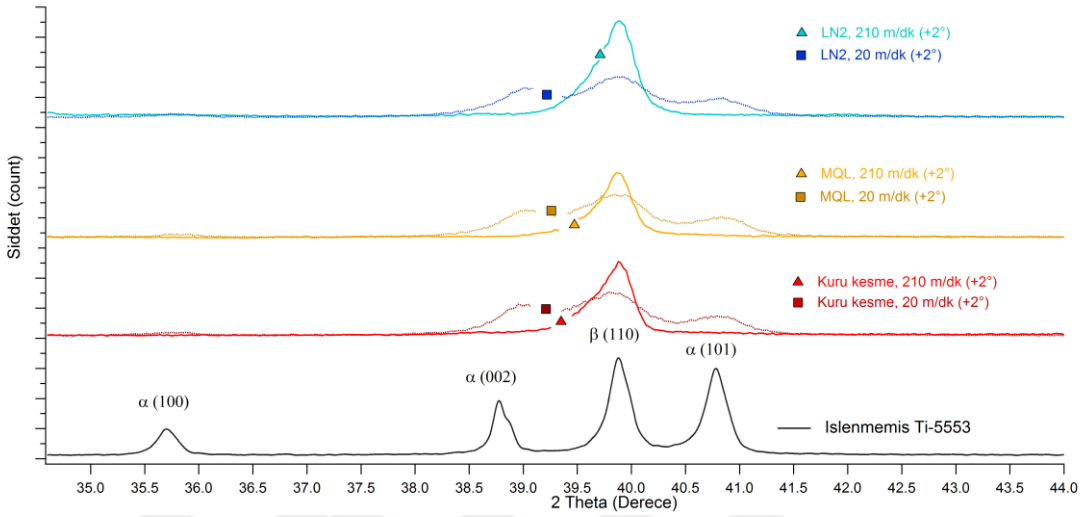
Bu genel değerlendirmeler kapsamında Ti-5553 alaşımının farklı kesme koşulları ve parametreleri altında işlenmesiyle elde edilen XRD analizi sonuçları aşağıda sunulmuştur. Şekil 3.29'da α(0°) talaş açısında, 20 ve 210 m/dk kesme hızlarında farklı koşullarda elde edilen faz piklerindeki değişim görülmektedir. İşlem görmemiş numuneye kıyasla tüm piklerde genişleme söz konusudur. Tüm kesme koşullarında düşük ve yüksek kesme hızlarının piklere etkisi neredeyse aynı olmuştur. Kriyojenik koşul için faz piklerindeki genişlemenin en yüksek derecede olduğunu söyleyebiliriz. Yüksek kesme hızı için tüm koşullarda alfa piklerinin neredeyse yok olmuş ve beta pikleri ise oldukça belirgindir. Bu durumda yola çıkarak yüksek kesme hızının deney esnasında malzemede oluşturduğu sıcaklığı da düşünürsek faz dönüşümü gerçekleştiğini söyleyebiliriz.



Şekil 3.29. α(0°) talaş açısında farklı kesme koşulları ve hızlarında işlenen parçaların yüzeylerinin XRD analizi.

Şekil 3.30'da α(+2°) talaş açısında, 20 ve 210 m/dk kesme hızlarında farklı koşullarda elde edilen XRD analizi souçları paylaşılmıştır. İşlem görmemiş numune dikkate alındığında tüm piklerde genişleme söz konusudur. Düşük ve yüksek kesme hızları için tüm koşullarda faz piklerinin değişimleri benzer olmuştur. 210 m/dk kesme hızı için tüm koşullarda beta pikleri oldukça belirgindir. MQL ile işlemede diğer koşullara kıyasla yüksek kesme

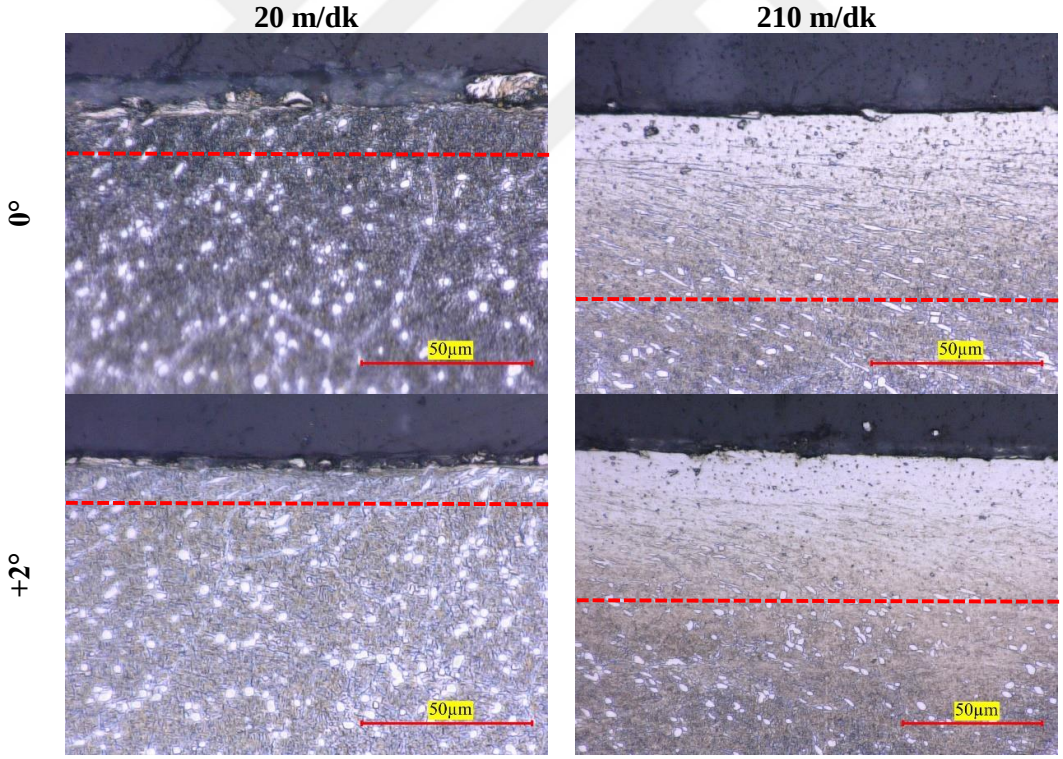
hızında beta pikinin şiddeti düşük kalmıştır. Fakat diğer koşullar gibi alfa piklerinde zayıflık vardır. 210 m/dk kesme hızı için tüm koşullarda faz dönüşümü gerçekleştiğini söyleyebiliriz.



Şekil 3.30. α(+2°) talaş açısında farklı kesme koşulları ve hızlarında işlenen parçaların yüzeylerinin XRD analizi.

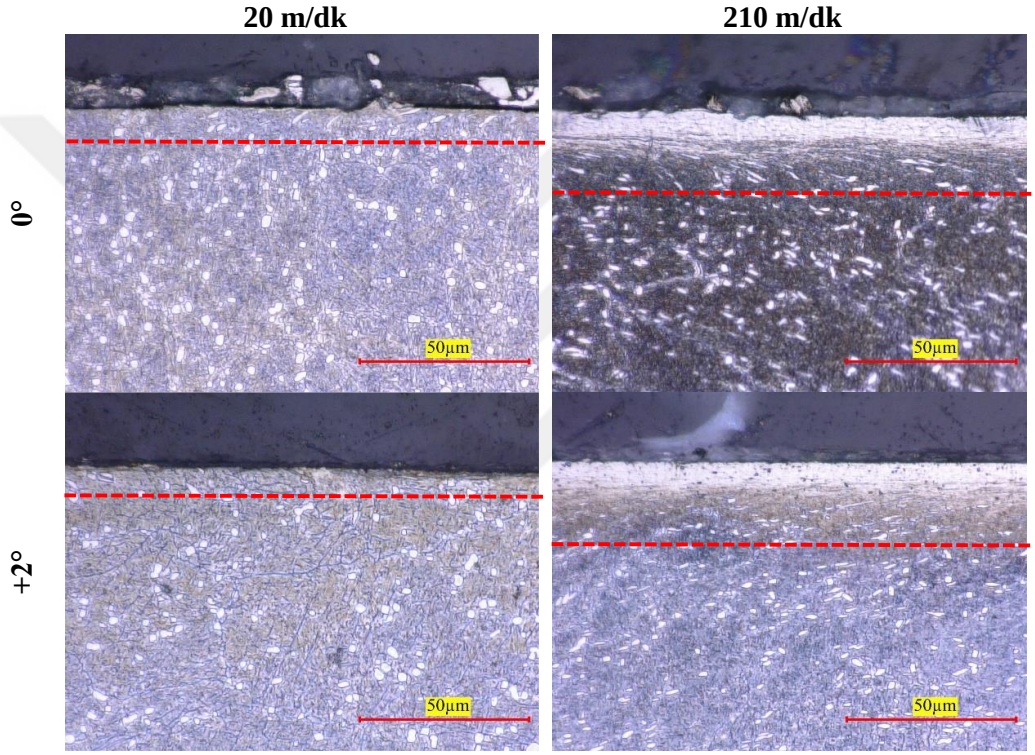
3.6 Mikroyapı Analizi

Kuru kesme operasyonu sonrasında işlenen parçaların yüzey altı mikroyapı görüntüleri Şekil 3.31'de sunulmuştur. Şekilde 20 m/dk ve 210 m/dk kesme hızlarında farklı talaş açılarındaki mikroyapı görüntüleri kıyaslanmıştır. Görüldüğü gibi yüksek miktardaki deformasyon oranına ve Ti-5553 alaşımın homojen olmayan yapısına bağlı olarak α tanelerin yüzeye yakın bölgelerde farklı yönlere doğru yönelim(inclination) içinde oldukları ve deforme olan α tanelerde uzama(coarsening) görülmektedir. Talaş açısının değişimi ile deformasyon derinliğindeki değişim her iki kesme hızı için de benzer olmuştur. Deformasyon derinliğinin en fazla olduğu durum kesme hızı 210 m/dk iken oluşmuştur. Yüksek kesme hızında 0° talaş açısında deformasyon derinliği 53 µm iken +2° talaş açısında 52 µm derinliğinde deformasyon oluşmuştur. 210 m/dk kesme hızında deformasyon derinliklerinin benzerlik göstermesi kesici takımların kesme esnasında aşınması veya kırılması ve bu kesme hızında gerçekleşen faz dönüşümü ile açıklanabilir.



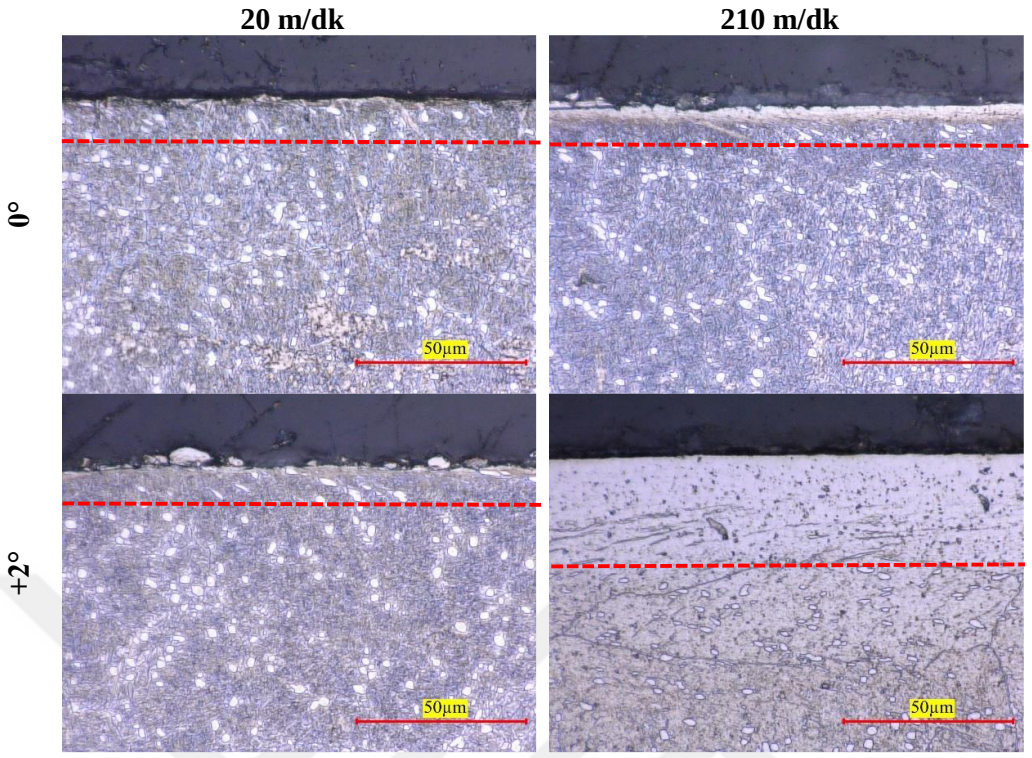
Şekil 3.31. Kuru kesme koşulunda işlenmiş yüzey altındaki mikroyapı görüntüleri.

Şekil 3.32'de sıvı azot yardımlı kesme koşulunda yapılan dik kesme operasyonu sonrasında elde edilen mikroyapı görüntüleri sunulmuştur. Farklı talaş açılarına göre kıyaslanan mikroyapı görüntülerinde 20 m/dk kesme hızı ile 210 m/dk kesme hızı dikkate alınmıştır. Şekil 3.32'de görüldüğü gibi deformasyon derinlikleri kesme hızına bağlı olarak değişkenlik gösterirken talaş açısı değişimiyle büyük bir fark gözlemlenmemiştir. En yüksek deformasyon derinlikleri 210 m/dk kesme hızında oluşmuştur. 210 m/dk kesme hızında 0° talaş açısında 23 µm ve +2° talaş açısında 25 µm derinliğinde deformasyon oluşmuştur.



Şekil 3.32. Sıvı azot yardımlı kesme koşulunda işlenmiş yüzey altındaki mikroyapı görüntüleri.

Minimum miktarda yağlama koşulu ile yapılan kesme operasyonu sonrasında işlenmiş yüzeyin altında oluşan mikroyapısal değişimleri görebilmek için görüntüler alınmış ve Şekil 3.33'te sunulmuştur. Şekil 3.33'te de görüldüğü üzere farklı talaş açılarında yapılan kesme işlemleri deformasyon derinliğine etki etmiştir. En yüksek deformasyon derinliği 210 m/dk kesme hızında ve +2° talaş açısında 33 µm derinliğinde oluşmuştur. +2° talaş açısında 20 m/dk kesme hızında deformasyon derinliği 210 m/dk kesme hızından 3 kat daha az olup 11 µm derinliğinde oluşmuştur.



Şekil 3.33. Minimum miktarda yağlama koşulunda işlenmiş yüzey altındaki mikroyapı görüntüleri.

4. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ VE DENEYSEL VERİLERLE KARŞILAŞTIRMA

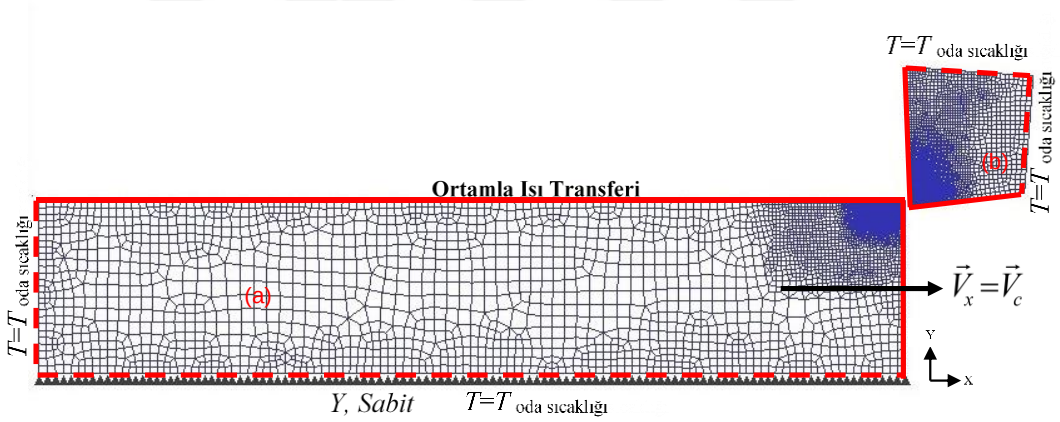
4.1 Ti 5553 Alaşım Malzemesinden Talaş Kaldırma Sürecinin Modellenmesi

Sonlu elemanlar simülasyonu için DEFORM-2D (V11.0) yazılımı kullanılmıştır. Herhangi bir malzemenin talaş kaldırma sürecinin modellenmesi ve simülasyonu için sınır koşullarının belirlenmesi gerekmektedir. Simülasyon çalışmaları için oluşturulan kesici takım geometrisi ve boyutsal özellikleri deneysel çalışmada kullanılan kesici takım dikkate alınarak belirlenmiştir. Kesici takımın rijit malzeme olduğu kabul edilmiştir. Kesici takım için kullanılan eleman sayısı 2960'dir. Dik kesme çalışmalarında kullanılan kesici takım kaplamasız ve talaş yüzeyinde herhangi bir kırıcı olmadığı dikkate alınarak bu şekilde modellenmiştir. Kesici takım yuvarlanma yarıçapı 25 µm ve boşluk açısı 7° olarak tasarlanmıştır. Deney düzeneği ile aynı olacak şekilde talaş açıları 0° ve +2° alınarak modele uyarlanmıştır. Tablo 4.1'de kullanılan kesici takımın termo-mekanik özellikleri yer almaktadır (Özel ve Zeren, 2007). İş parçası rijit plastik olarak modellenmiş ve iş parçası için 6122 eleman kullanılmıştır. Ağ, boyut ve sınır koşulları Şekil 4.1'de paylaşılmıştır. Ağ yapısı hem iş parçasında hem de kesici takımda homojen değildir. Bölgeler göre farklı şekilde belirlenmiştir. Simülasyon esnasında en önemli bölge olan kesme bölgesinde daha küçük elemanlar kullanılmış ve eleman sayısı arttırılmıştır. Bu sayede kesme bölgesinde oluşan şekil değişimi,sıcaklık ve kuvvet gibi değişkenlerden hassas bir sonuç elde edilmesi sağlanmıştır.

Tablo 4.1. Kesici takım malzemesinin özellikleri (Özel ve Zeren, 2007).

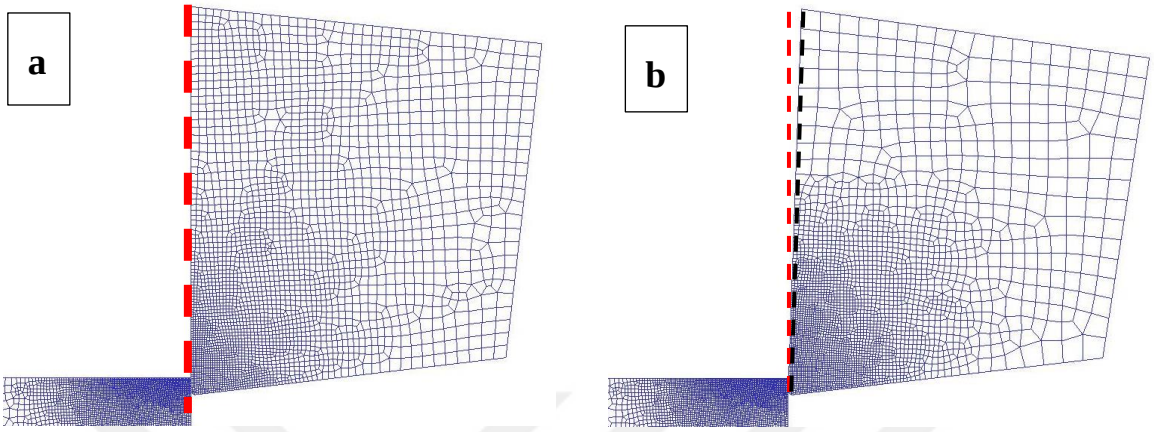
Özellikler	Karbür Kesici Takım
Isıl Genleşme (µm /mK)	4.7
Yoğunluk (g/cm^3)	15.0
Poison Oranı	0.20
Özgül Isı (J/kgK)	203
Isı İletim Katsayısı (W/mK)	46.0
Elastiklik Modülü (GPa)	800

Talaş kaldırma süreci göz önüne alındığında, iş parçasının üstü ve sağ tarafı için ortamla ısı transferi sağlanmasına izin verilmiştir. Aynı şekilde kesici takımının talaş açısı tarafı ve boşluk açısı tarafının ortamla ısı transferi gerçekleştirilmesine olanak sağlanmıştır. Bu durum Şekil 4.1'de sürekli kırmızı çizgilerle belirtilmiştir. Isı taşınım katsayısı DEFORM 2D'de serbest ısı taşınımının varsayılan değeri olan 20 W/m^2K olarak kullanılmıştır (Manual, 2015). Kesici takım ile talaş arayüzeyindeki ısı transfer katsayısı ise 1000 kW/m^2K olarak alınmıştır (Sima ve Özel, 2010). Isı transfer katsayısının kesme hızı ile değişmediği ve tüm kuru kesme simülasyonları için sabit olduğu varsayılmıştır. Şekil 4.1'de kesikli kırmızı çizgilerle gösterilen kısımlarda ise ısı transferi gerçeklemeyecek şekilde ayarlanmış ve oda sıcaklığına sahip olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 4.1. Ti 5553 alaşımın malzemesinden talaş kaldırma süreci için hazırlanmış sınır koşulları ve ağ yapısı, a) iş parçası, b) kesici takım.

Deneylerde kullanılan katerlerin açılarının simülasyona uyarlanışı Şekil 4.2'de sunulmuştur.



Şekil 4.2. Kesici takım açılarının simülasyonda gösterimi a)0°, b)+2°.

Ti-5553 alaşımının ısıl iletim katsayısı ve ısı kapasitesi değerleri ve Ti-5553 alaşımının elastiklik modülü değerleri sırasıyla Tablo 4.2'de ve Tablo 4.3'te verilmiştir. Bu değerlerin tümü sıcaklığa bağlı değişkenler olarak tanımlanmıştır.

Tablo 4.2. Ti-5553 alaşımının ısı iletim katsayısı ve ısı kapasitesi değerleri(Wagner ve ark., 2015).

T (°C)	20	100	200	300	400	500	600	700
Isı İletim Katsayısı (W/mK)	8.6	9.33	10.6	11.85	13.5	14.6	16	17.3
Isı Kapasitesi (J/m^3K)	–	2.39	2.581	2.75	2.969	3.257	364	–

Tablo 4.3. Ti-5553 alaşımının elastiklik modülü değerleri (Manual, 2015).

T (°C)	21	204	426	648
Elastiklik Modülü (GPa)	117.2	106.8	95.1	82.7

4.1.1 Malzeme Modeli

Malzeme modeli oluşturabilmek için Denklem 4.1'de gösterilen Johnson-Cook (J-C) bünye denklemi kullanılmıştır (Johnson ve Cook, 1983). Johnson-Cook bünye denklemi FORTRAN ABSOFT programında subroutine olarak yazılmış ve DEFORM tarafından bu yazılan kod okutularak simülasyonlar yapılmıştır.

$$\bar{\sigma} = \left[A + B(\bar{\varepsilon})^n \right] \left[1 + C \ln \frac{\dot{\bar{\varepsilon}}}{\dot{\bar{\varepsilon}}_0} \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right] \tag{4.1}$$

Johnson-Cook bünye denkleminde $\bar{\sigma}$ plastik akmayı ifade etmektedir. Bu denklemde $\bar{\varepsilon}$ $\dot{\bar{\varepsilon}}$ ve $\dot{\bar{\varepsilon}}_0$ sırasıyla şekil değiştirme, şekil değiştirme hızı ve referans şekil değiştirme hızıdır ($\dot{\bar{\varepsilon}}_0 = 1$) (Nemat-Nasser ve ark., 2001,Khan ve ark., 2004). Talaş kaldırma sıcaklığı T , iş parçasının ergime sıcaklığı T_m (1630ºC) (Sun ve ark., 2015) ve oda sıcaklığı T_o (20ºC) şeklinde gösterilmiştir. *n* sertleşme katsayısını, *m* termal yumuşama katsayısını ifade etmektedir. J-C bünye denklemi malzeme sabitlerinden *A* akma gerilmesini, *B* sertleşme modülünü, *C* ise şekil değiştirme hızı hassasiyet katsayısını ifade etmektedir(Johnson ve Cook, 1983).

Ti-5553 alaşımın dik kesme simülasyonunda J-C bünye denklemi sabitleri Germain ve arkadaşlarının (Germain ve ark., 2013) yaptıkları çalışmadan alınarak modelde kullanılmıştır. Bu sabitler Tablo 4.4'te görülmektedir.

Tablo 4.4. Ti-5553 J-C bünye denklemi sabitleri (Germain ve ark., 2013).

A(MPa)	*B*(MPa)	*n*	*m*	*C*
1175	728	0.26	0.72	0.047

4.1.2 Kırılma Kriteri ve Kesici Takım-Talaş Arayüzey Sürtünmesi

Talaş kaldırma simülasyonu için iş parçası ile talaş arasındaki sürtünme aşağıdaki gibi tanımlanmıştır (Yen ve ark., 2004).

$$\tau = m_f . K_{talaş} \tag{4.2}$$

Burada τ kesici takımın talaş yüzeyi ile talaş arasındaki gerilmeyi, m_f kayma faktörünü ve

$K_{talaş}$ ise talaşın kayma gerilmesini ifade etmektedir. m_f değeri bir sonraki bölümde sunulan hassasiyet çalışması ile bu simülasyon çalışması için belirlenmiştir.

Talaş oluşumu için kırılma kriteri olarak Cockcroft ve Latham tarafından önerilen model kullanılmıştır (Cockcroft ve Latham, 1968).

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}} \sigma_1 d\bar{\varepsilon} = D_{kritik} \tag{4.3}$$

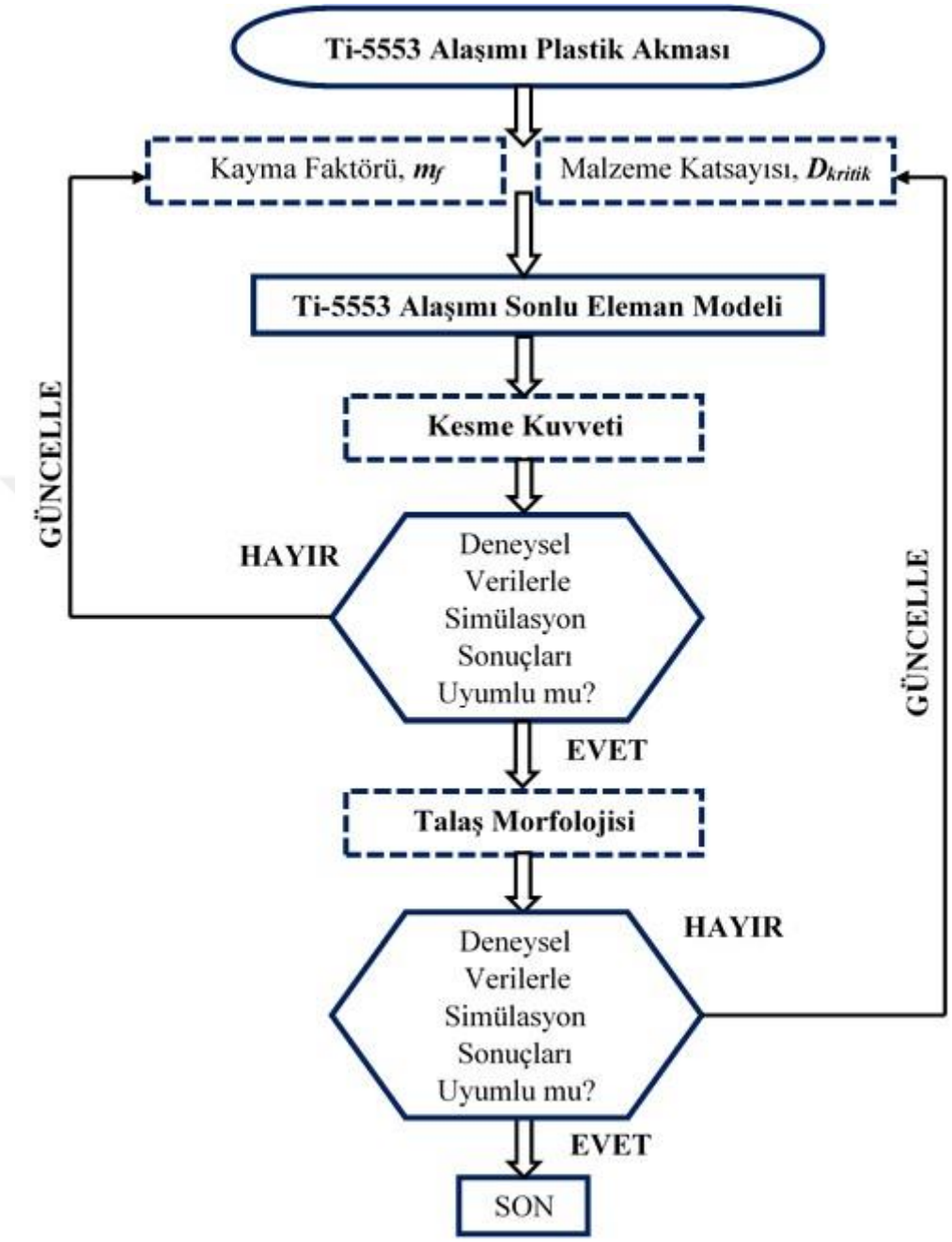
Burada σ_1 maksimum asal gerilmeyi, D ise malzeme katsayısını ifade etmektedir. Bu sabit bir sonraki bölümde sunulan hassasiyet çalışması ile bu simülasyon çalışması için belirlenmiştir.

Cockcroft ve Latham'ın kırılma modeli denklemi, malzeme katsayısı kritik değerine ulaştığında talaş segmentasyonun başladığını göstermektedir.

4.1.3 Ti-5553 Alaşımı için Hassasiyet Analizi

Hassasiyet analizi (kalibrasyon) yapılmasındaki amaç, malzeme modelinin simülasyonda deneysel verilere ulaşabileceği en yakın parametreleri bulmaktır. Dolayısı ile hassasiyet analizinden sonra tüm kesme koşulları ve parametreleri için simülasyon yaparak oluşabilecek durumları tahmin etmek mümkün olacaktır (Sartkulvanich ve ark., 2005). Bu amaç doğrultusunda hassasiyet analizi için Kaynak ve ark. (Kaynak ve ark., 2018) tarafından yapılan çalışma referans alınmış ve çalışmanın detaylı sonuçları aşağıda paylaşılmıştır. Yapılan dik kesme deneylerinde 30 m/dk ve 90 m/dk kullanılmıştır. Kesme derinliği (t_0) 0.1 mm olarak alınmıştır. Dik kesmede ilerleme kesme derinliğine eşit olduğu için ayrıca bir ilerleme verilmemiştir. Hassasiyet analizi yapılırken yani malzeme modelinin kalibrasyonu gerçekleştirilirken izlenen akış diyagramı Şekil 4.3'te gösterilmiştir.

Şekil 4.3'te görüldüğü üzere Ti-5553 alaşımının kuru kesme işlemi için kalibrasyonu kayma faktörü m_f ve D malzeme katsayısına göre gerçekleştirilmiştir. Kayma faktörü etkisinden kaynaklanan kesme kuvvetleri karşılaştırılarak deneysel verilerle uyumlu m_f değeri seçilmiştir. Talaş morfolojisinde en önemli etkiye sahip parametrelerden biri ise D malzeme katsayısıdır (Umbrello, 2008). Farklı D değerleri ile yapılan simülasyonlar sonucunda deneysel talaş morfolojisine en yakın D malzeme sabiti seçilerek kalibrasyon tamamlanmıştır.



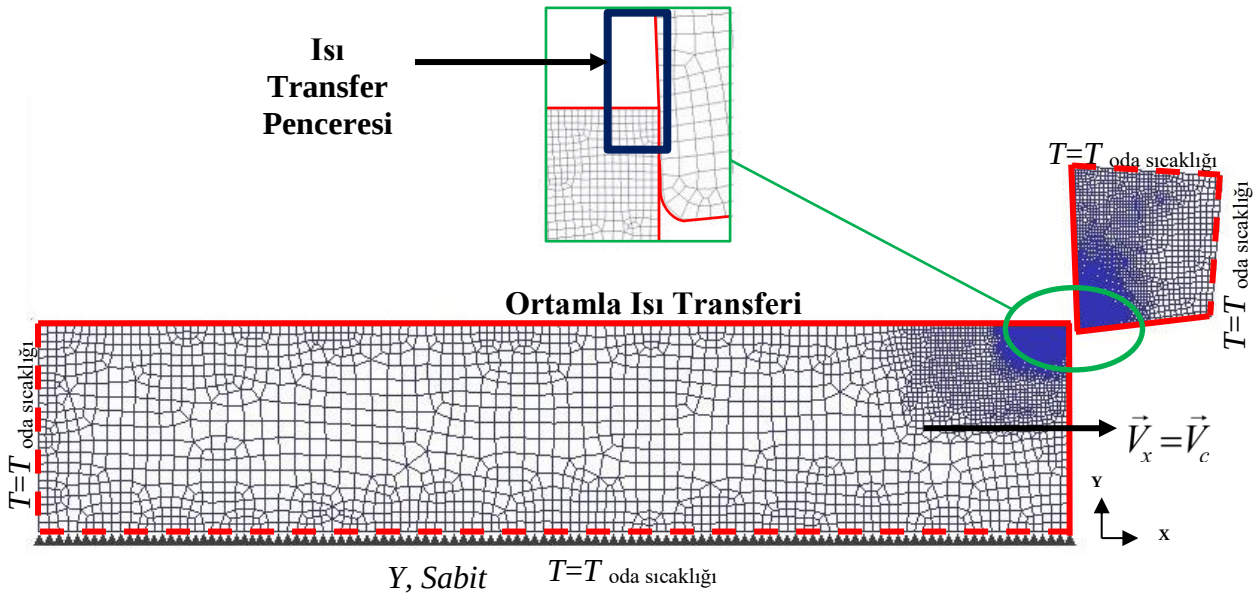
Şekil 4.3. Ti-5553 alaşımı sonlu elemanlar kalibrasyonu için akış diyagramı.

Yukarıda sunulan hassasiyet analizi sadece kuru kesme koşulu için yapılmıştır. Diğer talaş kaldırma koşulları için ayrıca bir hassasiyet analizi yapılmamıştır. Tüm koşullarda aynı m_f ve D değerleri kullanılmıştır. Bunun sebebi ise literatürde genellikle kuru kesme referans alınarak, hassasiyet analizi yapılıp, diğer koşullarda ise kuru kesmedeki hassasiyet analizi

kullanılmaktadır (Pu ve ark., 2014) Diğer koşulların simülasyonu için ısı transfer penceresi oluşturulmuş ya da ısı transfer katsayısı değiştirilmiştir.

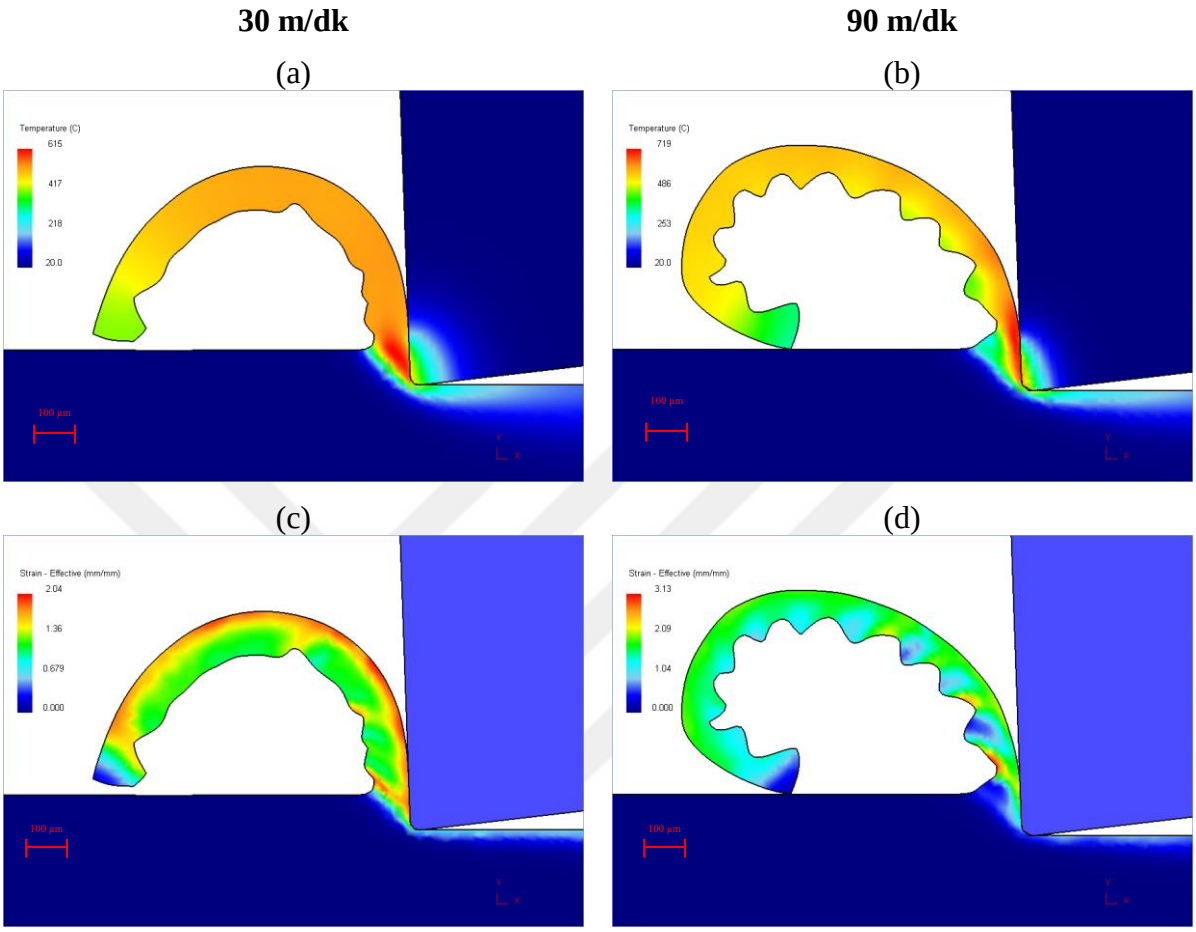
Minimum miktarda yağlama koşulu için kesme simülasyonu, kesme sıvısı koşulu prensibi ele alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu durum ısı transfer katsayısı değiştirilerek elde edilmiştir. Isı transfer katsayısı 250 W/m^{2}K olarak kabul edilmiştir (Banerjee ve Sharma, 2014,Banerjee ve Sharma, 2016).

Kriyojenik işlemin simüle edilebilmesi için Pu ve arkadaşlarının uyguladığı sınır koşullarını değiştirme ve ısı transfer penceresi oluşturma işlemi örnek alınmıştır (Pu ve ark., 2014). Isı transferi penceresi sayesinde nozuldan gelen sıvı azotun etkisi tam olarak simülasyona yansıtılmıştır. Isı transfer penceresinde ortam sıcaklığı -184 °C dereceye tanımlanmış ve pencere içinde ısı transfer katsayısı 10000 kW/m^{2}K olarak alınmıştır (Sun ve ark., 2015). Isı transfer penceresi Şekil 4.4'te gösterilen pozisyona sabitlenmiş ve iş parçası ile beraber hareket etmemiştir. Kuru kesme işleminde olduğu gibi kesikli çizgilerle gösterilen kısımlar oda sıcaklığına tanımlı ve sürekli kırmızı çizgiler ise kesme esnasında ortamla ısı geçişi sağlanacak şekilde tanımlanmıştır.



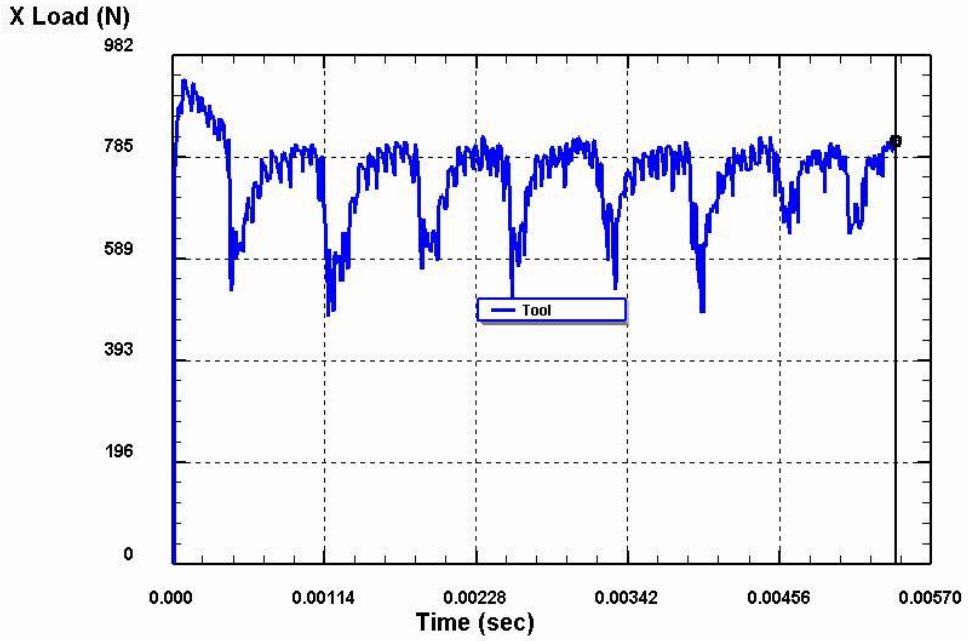
Şekil 4.4. Kriyojenik talaş kaldırma işlemi için sınır koşulları gösterimi.

Hassasiyet analizi çalışması kapsamında yapılan simülasyonlardan farklı kesme hızları için elde edilen sıcaklık ve birim şekil değiştirme örnekleri Şekil 4.5'te sunulmuştur.



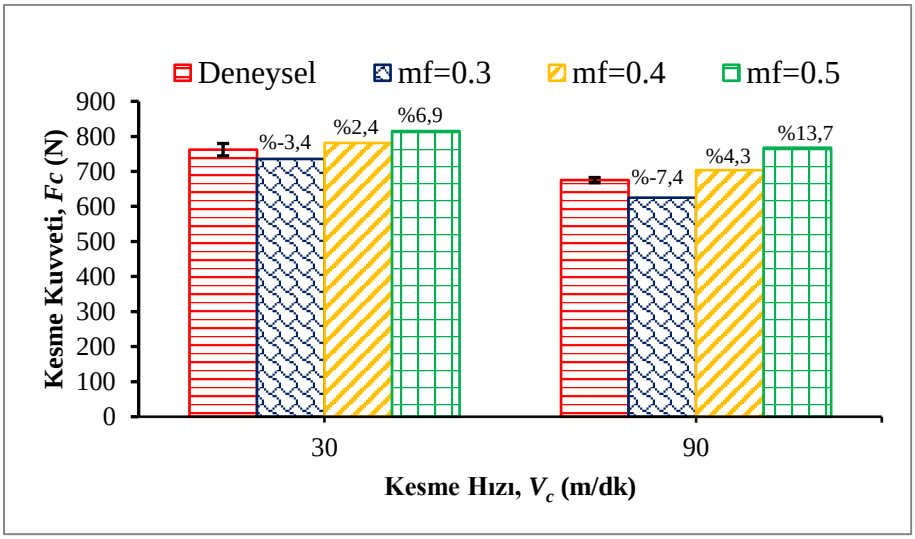
Şekil 4.5. Ti-5553 alaşımdan talaş kaldırma simülasyonu sonuçları, m_f = 0.4, D=250 a) 30 m/dk sıcaklık dağılımı b) 90 m/dk sıcaklık dağılımı c) 30 m/dk birim şekil değiştirme dağılımı d) 90 m/dk birim şekil değiştirme dağılımı.

Şekil 4.6'da sonlu elemanlar programında koşmuş bir simülasyon sonucu elde edilen kesme kuvveti değerlerinin kaba hali görülmektedir. Sunulan sonuçlarda kesme süresi boyunca elde edilen bu değerlerin ortalaması alınmış ve o şekilde sunulmuştur.

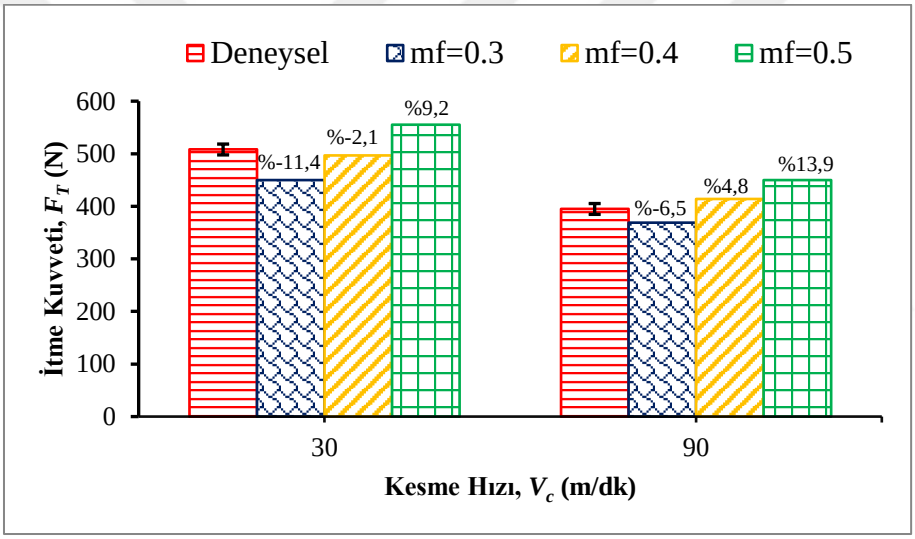


Şekil 4.6. Simülasyon sonucunda elde edilen kesme kuvveti verisinin grafik örneği.

İlk olarak kayma faktörü, m_f için çalışma aralığı 0.1-0.8 olarak seçildi ve malzeme sabiti D=250'ye sabitlenerek 30 ve 90 m/dk hızlarında simülasyonlar gerçekleştirildi. Bu aralıktan seçilen üç farklı m_f değerinin sonuçları aşağıda paylaşılmıştır.Kalibrasyon için kullanılan farklı kayma faktörlerinin, 30 m/dk ve 90 m/dk kesme hızları kullanılarak yapılan karşılaştırma simülasyonlarında tahmin edilen esas kesme kuvvetleri (F_c) ve itme kuvvetleri (F_t) değerleri Şekil 4.7 ve 4.8'de verilmiştir. En iyi yüzdesel farkın, m_f =0.4 iken (30 m/dk için % 2.4 ve 90 m/dk fark için % 4.3) kesme kuvvetlerinde yakalandığı görüldü. 30 m/dk için tahmin edilen itme kuvveti yüzdesel farkı %2.1 ve 90 m/dk için ise %4.8 olmuştur. Bu yüzdelerin deneysel hata payı dahilinde olduğu tespit edilmiştir. Aynı zamanda bu grafiklerden kayma faktörünün kuvvete olan etkisini gözlemleyebiliriz. Kayma faktörü arttıkça kuvvet değerlerinde sürekli bir artış görülmüştür. Malzeme modelinin doğru sonuçları verecek şekilde çalışabilmesi için m_f=0.4 değerinin kullanılmasına karar verilmiş ve bir sonraki adımına geçilmiştir.

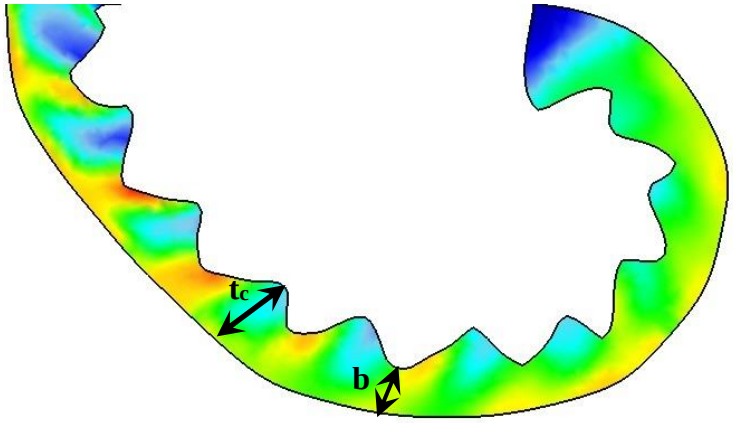


Şekil 4.7. Farklı kayma faktörüne bağlı olarak tahmin edilen kesme kuvvetleri,(D=250).



Şekil 4.8. Farklı kayma faktörüne bağlı olarak tahmin edilen itme kuvvetleri,(D=250).

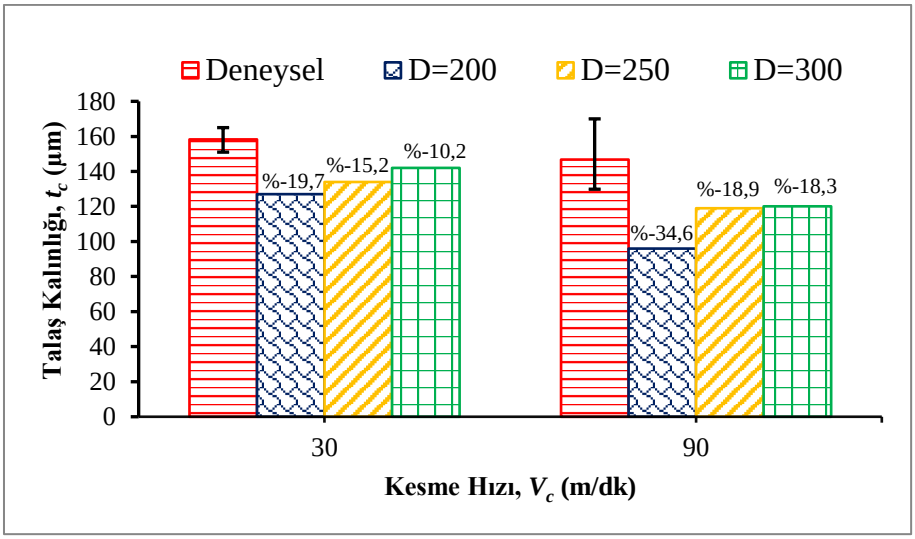
Malzeme sabiti D'nin talaş morfolojisine etkisini incelemek için Şekil 4.9'da gösterildiği şekilde t_c ve b ölçümleri talaş üzerinden alınmıştır. t_c ölçüsü talaşın kesici takım ile temas eden yüzeyinden segment'in en dış kısmı arasındaki mesafeyi (talaş kalınlığını) ifade ederken, b ölçüsü ise talaşın kesici takımla temas eden yüzey ile talaşın en küçük et kalınlığı şeklinde tanımlanabilir. Literatürde hassasiyet analizi için benzeri yaklaşımlar kullanılmaktadır (Umbrello, 2008) Bu ölçümler sayesinde talaş morfolojisine en yakın değeri veren D malzeme sabiti bulmak mümkün olmuştur.



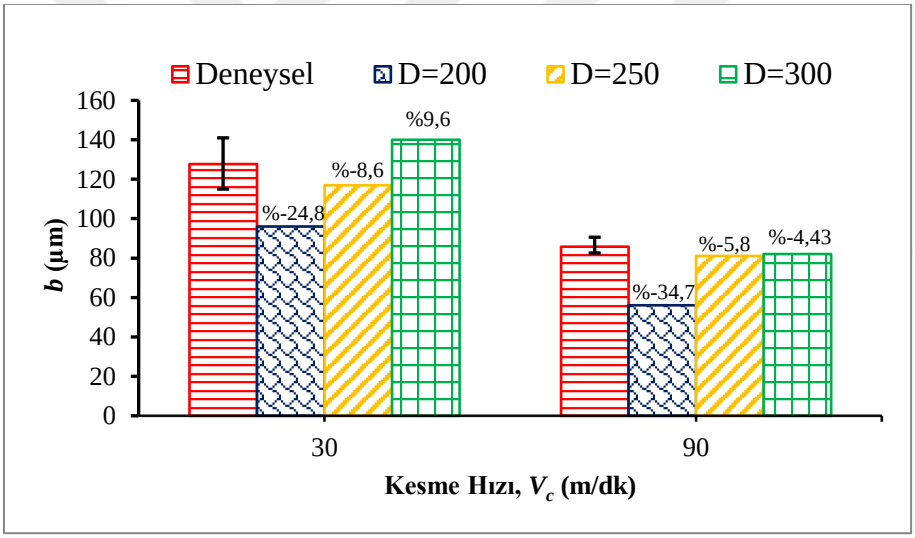
Şekil 4.9. Simülasyon sonucu tahmin edilen talaş üzerinden alınan ölçüler.

Malzeme modeli kalibrasyonunda kullandığımız diğer parametre de *D* malzeme katsayısıdır. *D* malzeme katsayısı için 100 ile 500 arasında bir çok değerle farklı simülasyonlar yapılmıştır. Kullanılan bu çalışma aralığı sayesinde talaş kalınlıklarına ve talaş et kalınlığına karşı D malzeme sabitinin etkisini görmek mümkün olmuştur. Şekil 4.10 ve 4.11'de ortalama talaş kalınlığı t_c ve ortalama *b* değerlerinin deneysel sonuçlarla kıyaslandığı grafikler sırasıyla verilmiştir. Şekil 4.10'da *D*=250 iken, 90 m/dk için yaklaşık olarak %81 ve 30 m/dk için %84 yakınsama ile talaş kalınlıkları tahmin edilmiştir. Şekil 4.11'de talaş et kalınlığı için ise tahmin edilen değerlerde(*D*=250) 30 m/dk'da yaklaşık olarak %9 90 m/dk'da %6 yüzdesel farklar elde edilmiştir.

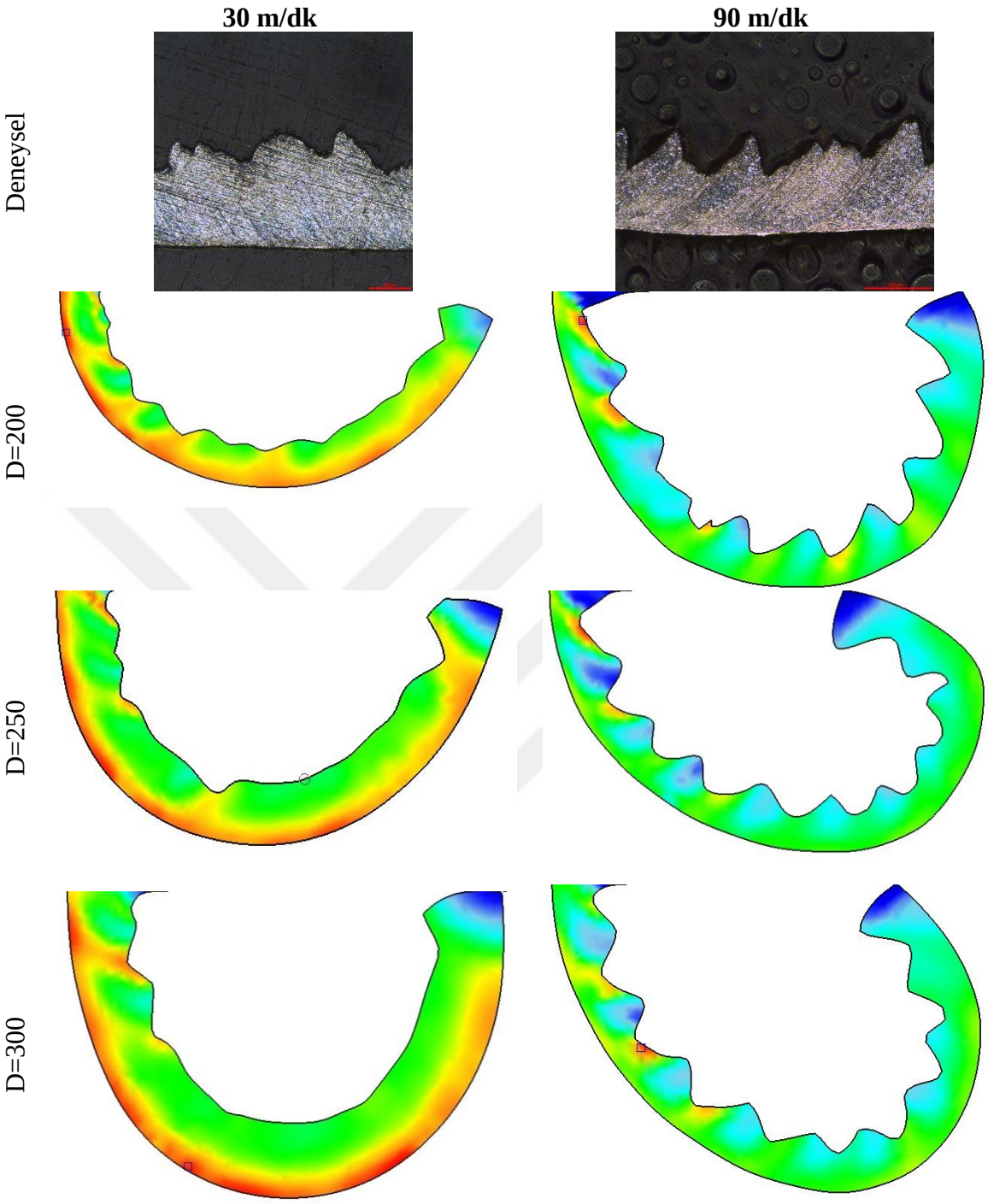
Şekil 4.12'de ise 30 ve 90 m/dk kesme hızlarında farklı *D* malzeme sabitlerine bağlı olarak elde edilen talaş morfolojisi görüntüleri yer almaktadır. Deneysel olarak elde edilen talaş morfolojisi ve simülasyonla tahmin edilen talaş morfolojisi görüntüleri de göstermiştir ki *D*=250 malzeme katsayısı model için en doğru sonuçları veren değerdir. Bu grafiklerden çıkarılabilecek yorumlar arasında *D* malzeme sabitinin artması talaş kalınlığının önemli ölçüde artmasına yol açtığı yer almaktadır.



Şekil 4.10. Farklı *D* malzeme sabitine bağlı olarak tahmin edilen talaş kalınlıkları, (m_f =0.4).



Şekil 4.11. Farklı *D* malzeme sabitine bağlı olarak tahmin edilen *b* değerleri, (m_f =0.4).



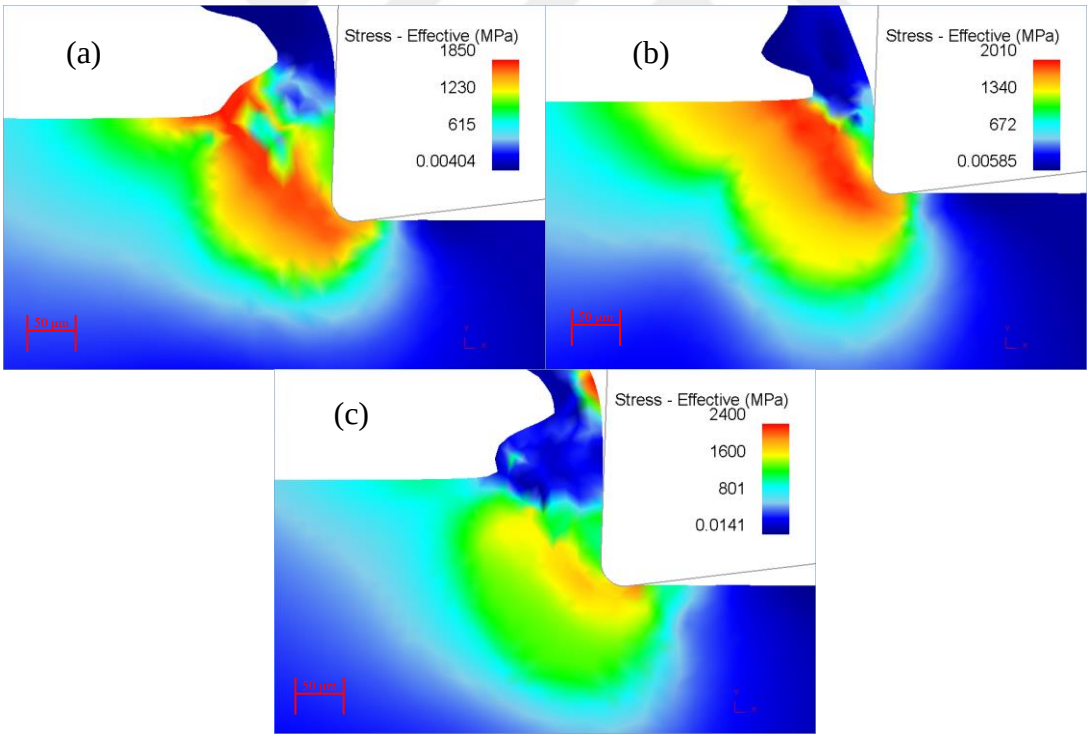
Şekil 4.12. Farklı D malzeme sabitlerine bağlı olarak tahmin edilen talaş morfolojisi, (m_f =0.4).

Sonuç olarak Ti-5553 alaşım modeli için yapılan kalibrasyon sonucunda deneysel verilerele en yakın sonuçları veren kayma faktörü m_f =0.4 D malzeme sabiti ise 250 (Kaynak ve ark., 2018) olarak belirlenmiş ve tüm koşullardaki deney verilerinin kıyaslanacağı simülasyonlar bu sabitlerle gerçekleştirilmiştir.

Üç farklı dik kesme koşulu (kuru kesme, sıvı azot, MQL) için dört farklı kesme hızında (20,60,120 ve 210 m/dk) ve iki farklı talaş açısında (0°,+2°) olmak üzere 0.1 kesme derinliğinde simülasyonlar gerçekleştirilmiş olup deneysel verilerle karşılaştırılmış ve sonuçlar tartışılmıştır.

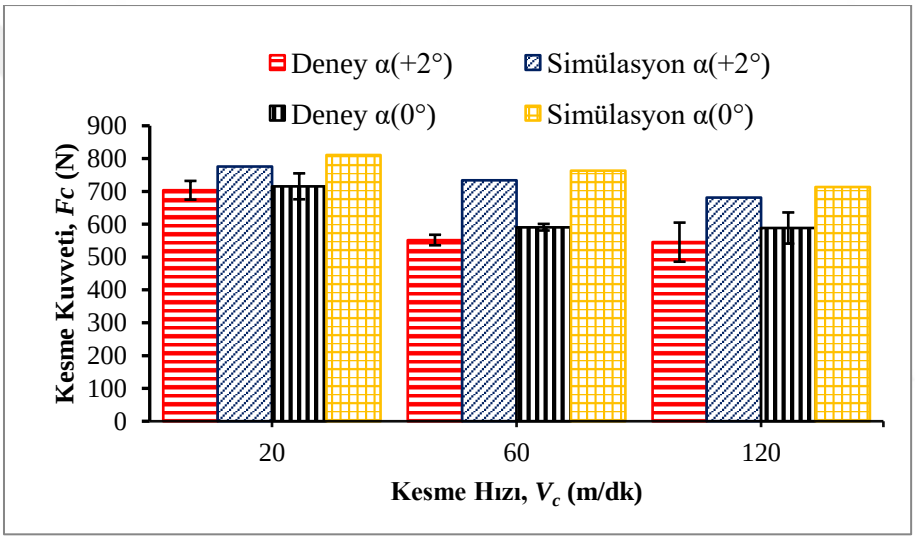
4.1.4 Farklı Kesme Koşullarında ve Parametrelerinde Kesme Kuvvetlerinin Deneysel Verilerle Kıyaslanması

Bir malzemenin talaş kaldırma sürecinde kuvvet bileşenleri önemli bir çıktı olarak görülmektedir ve kesme simülasyonunda kullanılan modelin simüle etme kabiliyetini değerlendirmek için öngörülen kuvvet bileşenleri en önemli kriterlerden biridir. Şekil 4.13'te α(+2°) için 120 m/dk kesme hızında kuru kesme, MQL ve kriyojenik koşullarında kesici takımın önündeki tahmini asal gerilme dağılımları görülmektedir. En düşük asal gerilme tahminleri kuru kesmede en yüksek asal gerilme tahminleri ise kriyojenik koşul için tahmin edilmiştir.

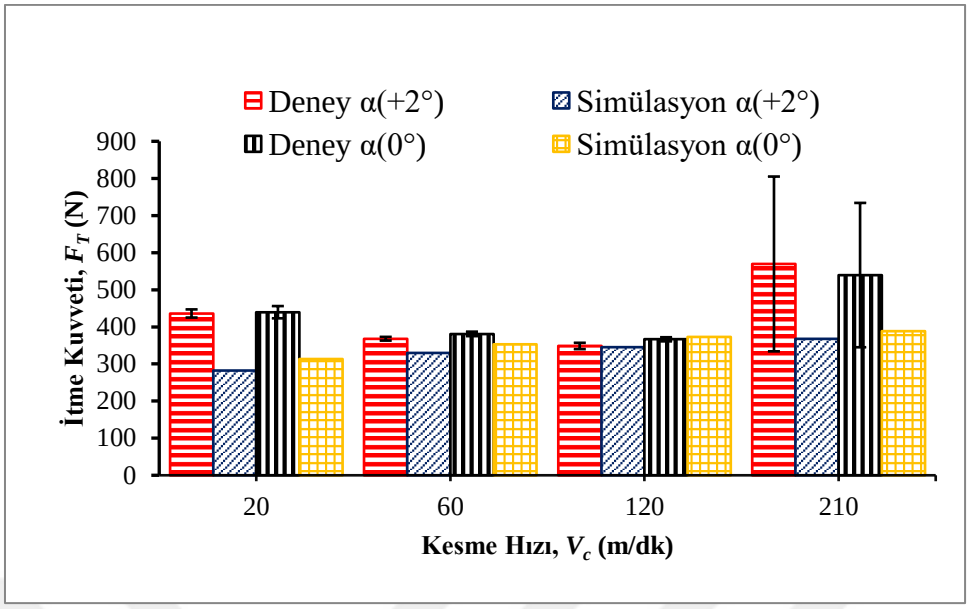


Şekil 4.13. 120 m/dk kesme hızında tahmin edilen asal gerilme dağılımları a)Kuru kesme b)MQL c)Kriyojenik (α(+2°)).

Kuru kesme işleminde deneysel olarak elde edilen sonuçlar ile simülasyonla tahmin edilen kuvvetlerin kıyaslanması Şekil 4.14 (kesme kuvveti) ve Şekil 4.15'te (itme kuvveti) sunulmuştur. Şekil 4.14'te görüldüğü gibi her iki talaş açısı için de kesme kuvvetleri, kesme hızı arttıkça deneysel olarak azalmaktadır ve simülasyonla tahmin edilen kuvvetlerde bu yönde eğilim göstermiştir. Kesme hızı değişiminin yanısıra bir başka parametre olan talaş açısının değişiminin kesme kuvvetleri üzerine etkisine bakacak olursak, artı yönde talaş açısının değişmesiyle azalan deneysel kesme kuvvetleri simülasyon sonucunda da aynı eğilimle tahmin edilmiştir. Şekil 4.15'te ise kesme kuvvetlerinde bahsettiğimiz eğilimin aynı şekilde itme kuvvetlerinde de elde edildiği gözlemlenmiştir.

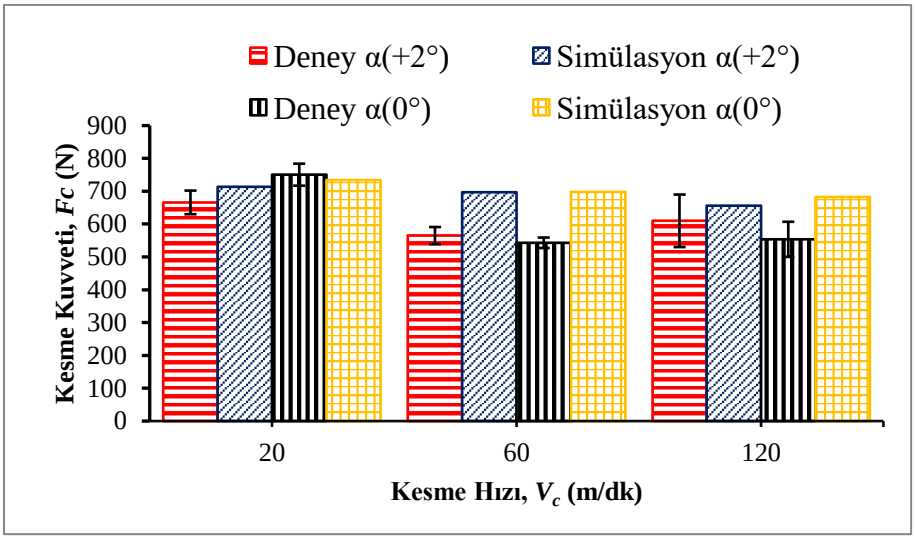


Şekil 4.14. Kuru kesme için farklı kesme parametlerinde kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması.

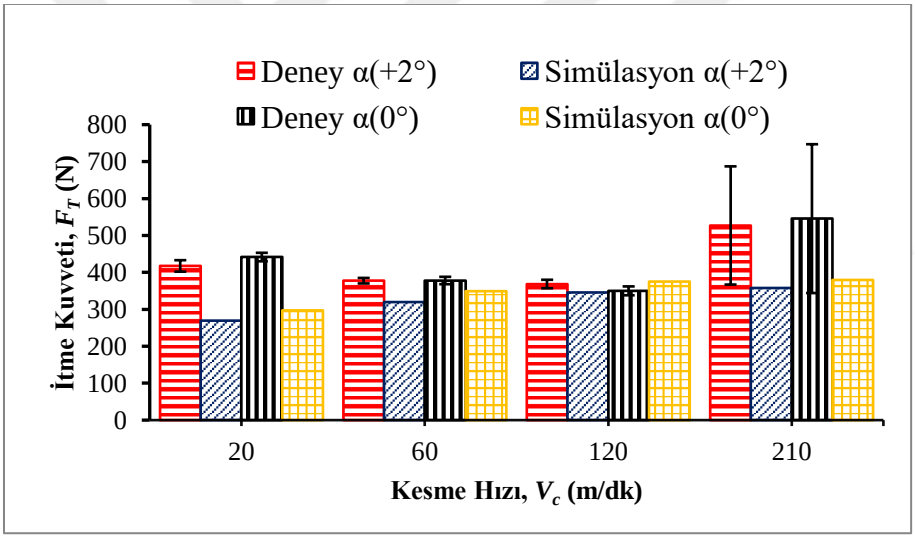


Şekil 4.15. Kuru kesme için farklı kesme parametlerinde itme kuvvetlerinin karşılaştırılması.

MQL işlemi için farklı kesme parametrelerinde elde edilen kesme ve itme kuvvetlerinin simülasyon sonucu yapılan tahminlerle kıyaslanması sırasıyla Şekil 4.16 ve 4.17'de gösterilmektedir. Kesme kuvvetlerinin tahmini deneysel verilere oldukça yakın bir şekilde yapılabilmiştir. Simülasyon sonuçları da kesme hızlarının ve talaş açısının pozitif yönde artmasıyla kesme kuvvetlerinin düştüğü sonucuna varmıştır. Şekil 4.17'de itme kuvvetlerinin karşılaştırılmasında ise düşük ve yüksek kesme hızlarında tahmin edilen değerlerin deneysel verilerden uzak olduğu görülmüştür. 210 m/dk kesme hızında elde edilen deneysel veriler çok yüksek olmasına rağmen simülasyon sonuçları hata payı içinde kalmayı başarabilmiştir.

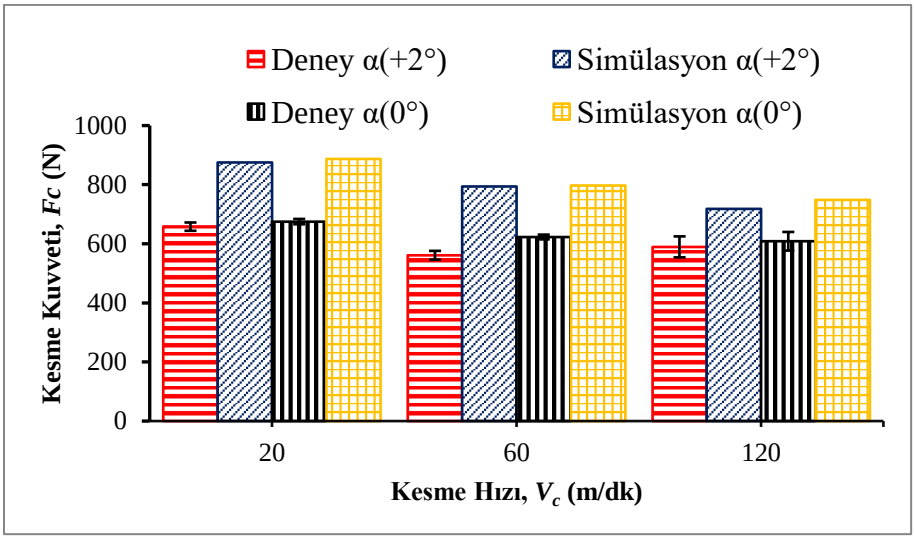


Şekil 4.16. Minimum miktarda yağlama işlemi için farklı kesme parametrelerinde kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması.

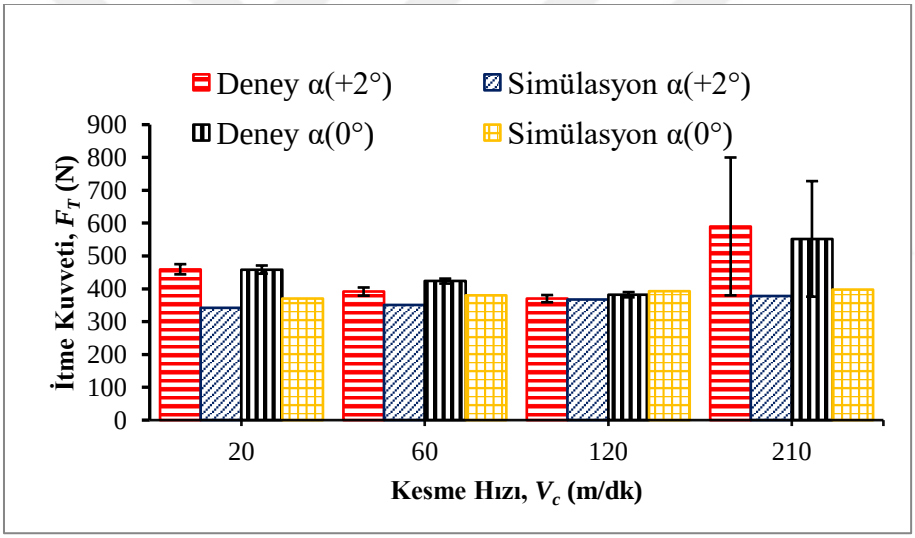


Şekil 4.17. Minimum miktarda yağlama işlemi için farklı kesme parametrelerinde itme kuvvetlerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.18 ve 4.19'da kriyojenik talaş kaldırma sonucunda elde edilen deneysel verilerle tahmin edilen kesme ve itme kuvvetlerinin kıyaslanması sırasıyla sunulmuştur. Isı transfer penceresi sayesinde gerçekleştirilen kriyojenik soğutma etkisinin deneysel verilerle uyum sağladığı görülmektedir. Tahmin edilen kesme kuvvetleri değişen kesme hızları ve talaş açılarına göre deneysel verilerle aynı eğilimi göstermiştir (Şekil 4.18). Şekil 4.19'da gösterilen itme kuvvetlerinin tahmininde ise düşük kesme hızı hariç(20 m/dk) diğer tüm koşullarda simülasyon sonuçları hata paylarına çok yakın çıkmıştır.

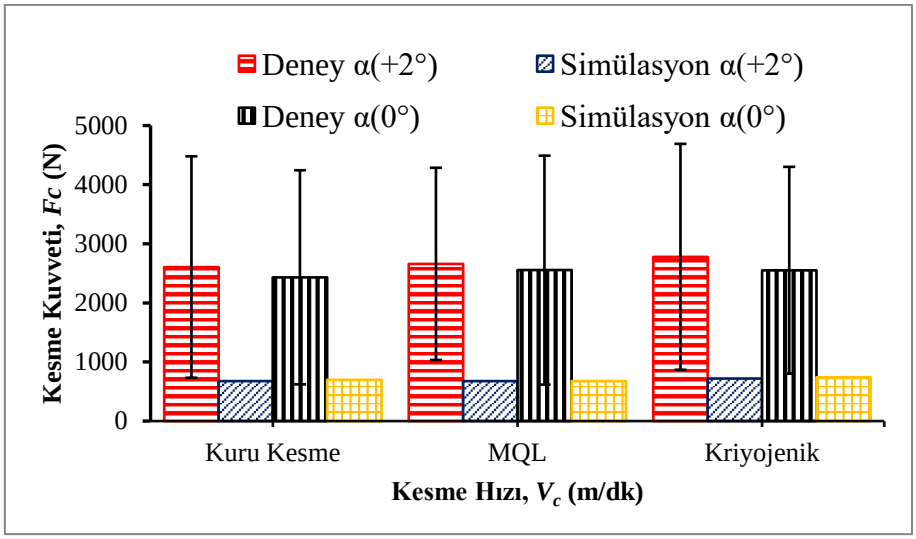


Şekil 4.18. Sıvı azot ile kesme işlemi için farklı kesme parametlerinde kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması.

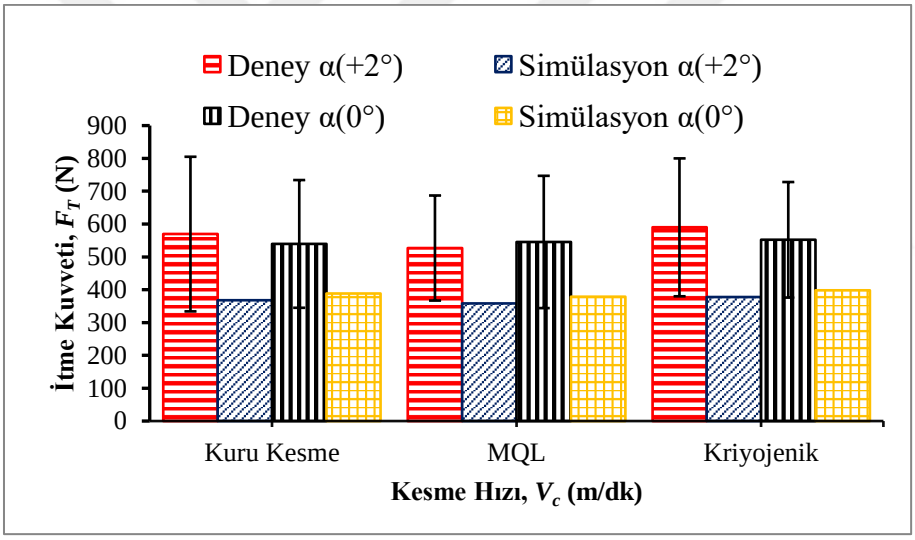


Şekil 4.19. Sıvı azot ile kesme işlemi için farklı kesme parametlerinde itme kuvvetlerinin karşılaştırılması.

Bölüm 3.1'de anlatılan ve kesme kuvvetlerinde aşınmasın etkisinin bariz bir şekilde görüldüğü yüksek kesme hızında (210 m/dk) tahmin edilen sonuçların deneysel verilerle kıyaslanması Şekil 4.20 (kesme kuvveti) ve Şekil 4.21'de (itme kuvveti) paylaşılmıştır. Her iki şekil içinde aşınma etkisiyle oluşan geniş hata payları net bir şekilde görülmektedir. Simülasyon tahminleri, deneysel kuvvet verileriyle farklı çıkmasına rağmen genelde en düşük hata payını yakalamıştır.



Şekil 4.20. 210 m/dk hızında farklı kesme koşullarında ve parametrelerinde kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması.



Şekil 4.21. 210 m/dk hızında farklı kesme koşullarında ve parametrelerinde itme kuvvetlerinin karşılaştırılması.

Tablo 4.5'te farklı kesme parametrelerinde ve koşullarında elde edilen deneysel ve tahmin edilen kesme kuvvetlerinin yüzdesel farkları sunulmuştur. Tüm koşullar için 210 m/dk kesme hızında aşınmadan kaynaklı tahminlerde yüzedesel olarak büyük farklar gözükmesine rağmen simülasyon değerleri hata payları içinde kalabilmiştir. Tüm kesme koşulları ve parametreleri içinde kesme kuvveti 20 m/dk kesme hızı MQL koşulu (0°) talaş açısında, %2.2 ile en iyi yüzdesel farkla tahmin edilmiştir. Simülasyonda aşınma dikkate

alınmadığı için deneysel olarak aşınmanın gözlemlenmediği durumlarda modelin kuvvetleri gayet iyi tahmin ettiğini söyleyebiliriz.

Tablo 4.5. Farklı kesme parametreleri ve koşullarında deneysel ve tahmin edilen kesme kuvvetlerinin sayısal olarak karşılaştırılması, F_c(N).

	Kesme Hızı	**Deney α(+2°)**	**Simülasyon α(+2°)**	**Deney α(0°)**	**Simülasyon α(0°)**
Kuru Kesme	**20 m/dk**	703	776(%10.3)	715	811(%13.3)
	60 m/dk	552	734(%32.9)	591	763(%29.1)
	120 m/dk	545	681(%24.8)	588	713(%21.1)
	210 m/dk	2606	678(%-73.9)	2432	700(%-71.2)
Kriyojenik	**20 m/dk**	658	875(%32.9)	675	887(%31.4)
	60 m/dk	561	794(%41.5)	623	797(%27.9)
	120 m/dk	589	718(%21.8)	608	748(%22.9)
	210 m/dk	2779	719(%-74.1)	2552	740(%-71.0)
MQL	**20 m/dk**	666	714(%7.2)	750	734(%-2.2)
	60 m/dk	565	697(%23.3)	543	698(%28.5)
	120 m/dk	610	656(%7.5)	553	682(%23.2)
	210 m/dk	2659	676(%-74.5)	2554	678(%-73.4)

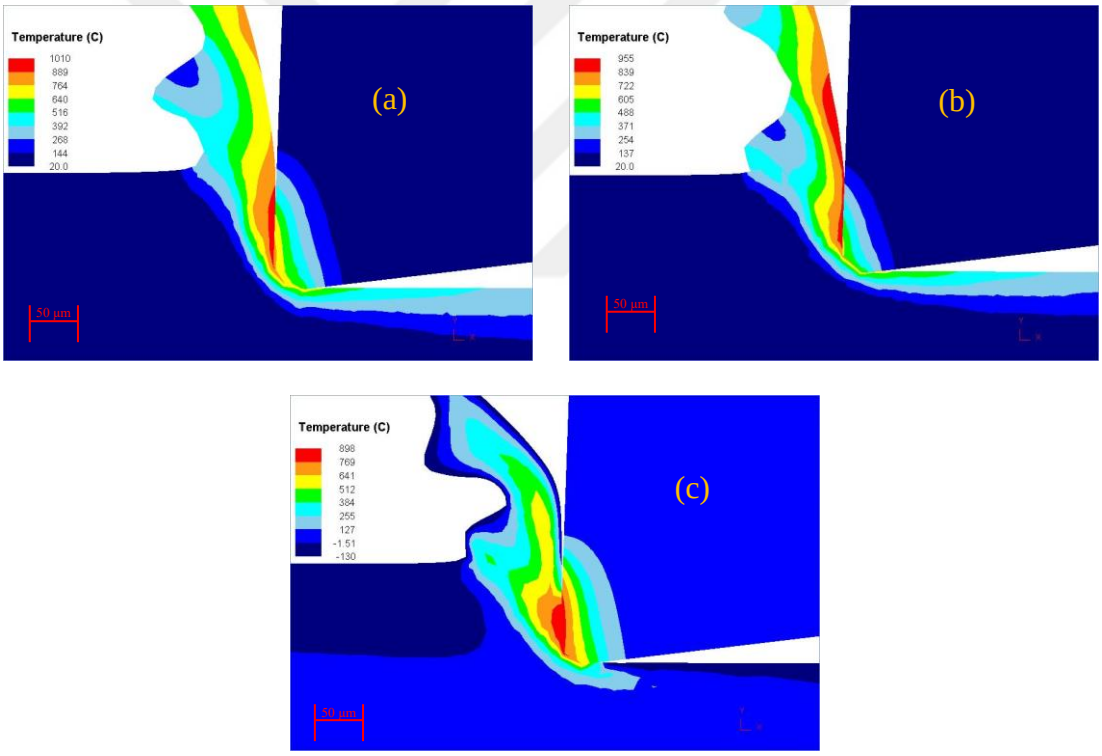
Tablo 4.6'da farklı kesme parametreleri ve koşullarında elde edilen deneysel ve tahmin edilen itme kuvvetlerinin yüzdesel farkları paylaşılmıştır. Elde edilen yüzdesel farklar düşük kesme hızı hariç tüm koşullar için hata payı içindedir. En büyük fark yaklaşık %36 ile 20 m/dk kesme hızında α(+2°) talaş açısında kuru kesme ve MQL koşullarında gerçekleşmiştir. α(+2°) talaş açısında kriyojenik kesme koşulunda ise 210 m/dk kesme hızında aynı oranda fark görülmektedir.

Tablo 4.6. Farklı kesme parametreleri ve koşullarında deneysel ve tahmin edilen itme kuvvetlerinin sayısal olarak karşılaştırılması, F_t(N).

	Kesme Hızı	Deney α(+2°)	Simülasyon α(+2°)	Deney α(0°)	Simülasyon α(0°)
Kuru Kesme	**20 m/dk**	436	282(%-35.3)	439,5	313(%28.7)
	60 m/dk	368	330(%10.3)	381	353(%7.3)
	120 m/dk	348,5	345(%1)	366,5	373(%1.7)
	210 m/dk	569,5	368(%35.3)	539,5	388(%28.1)
Kriyojenik	**20 m/dk**	459,5	342(%-25.5)	458	370(%-19.3)
	60 m/dk	391,5	351(%-10.3)	423	380(%-10.3)
	120 m/dk	370	367(%-0.8)	382	393(%2.8)
	210 m/dk	590	378(%-35.9)	552	398(%-27.9)
MQL	**20 m/dk**	417	269(%-35.5)	441	297(%-32.7)
	60 m/dk	377	320(%-15.2)	378	349(%-7.6)
	120 m/dk	368	346(%-6.1)	350	375(%7.1)
	210 m/dk	527	358(%-32.1)	545	379(%-30.5)

4.1.5 Farklı Kesme Koşullarında ve Parametrelerinde Kesme Sıcaklıklarının Deneysel Verilerle Kıyaslanması

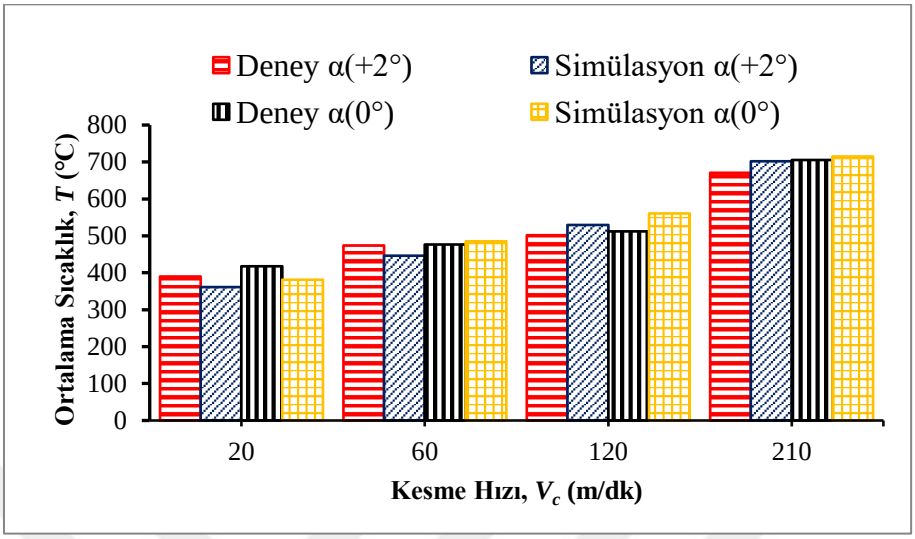
Modelin simüle edebilme kabiliyetini görebilmek için kesme sıcaklıkları diğer bir önemli parametredir. Testlerde kullanılan yağlayıcı ve soğutucunun kesme sıcaklılarını düşürdüğünü Bölüm 3.2'de incelemiştik. Bu bölümde ise yağlayıcı ve soğutucu etkilerinin simüle edilme prensibiyle gerçekleştirdiğimiz simülasyon sonuçları ve deneysel verilerle kıyaslanması yer almaktadır. Şekil 4.22'de yüksek kesme hızında (210 m/dk) farklı koşullarda gerçekleştirilen simülasyonlarda sıcaklık dağılımları sunulmuştur. Şekilden anlaşılacağı üzere deneysel verilerde olduğu gibi MQL ve kriyojenik talaş kaldırma işlemlerinde kesme sıcaklıklarında düşüş elde edilmiştir. Bu görüntülerden ısı transfer penceresinin ve ısı transfer katsayısının sıcaklığı nasıl düşürdüğü iyice anlaşılmaktadır.



Şekil 4.22. 210 m/dk kesme hızında farklı koşullarda tahmin edilen sıcaklık dağılımları a) Kuru kesme b)MQL c)Kriyojenik (α(+2°)).

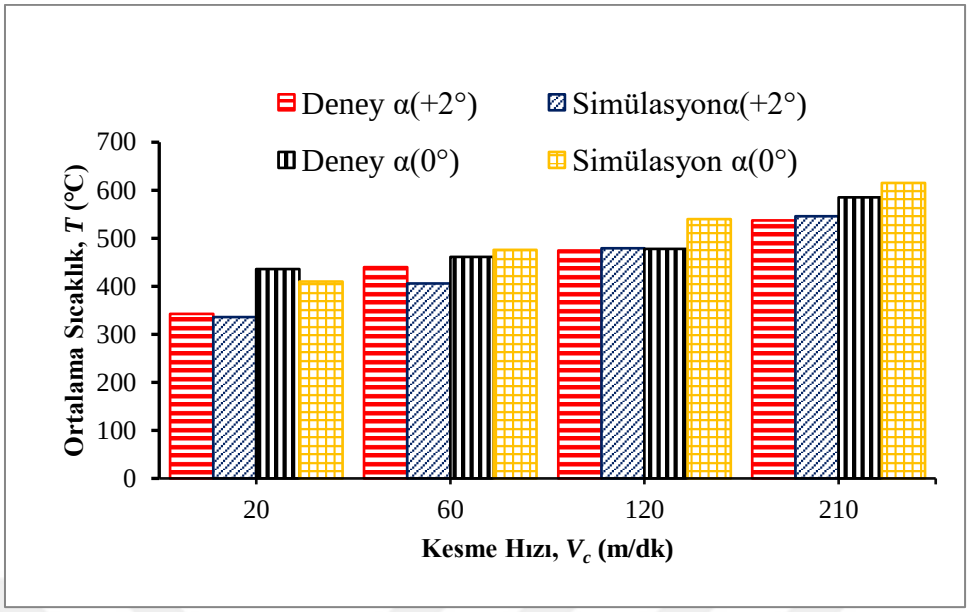
Şekil 4.23'te kuru kesme işleminde elde edilen deneysel verilerin tahmin edilen simülasyon sonuçlarıyla kıyaslaması yer almaktadır. Deneysel verilerde kesme hızının ve talaş açısının negatif yönde artmasıyla ortalama sıcaklık değerlerinde gözlemlenen artış

simülasyon sonuçlarında da aynı şekilde gerçekleşmiştir. Ortalama sıcaklık değerlerindeki bu eğilim deneysel ve simülasyon sonuçlarıyla birebir örtüşmektedir.



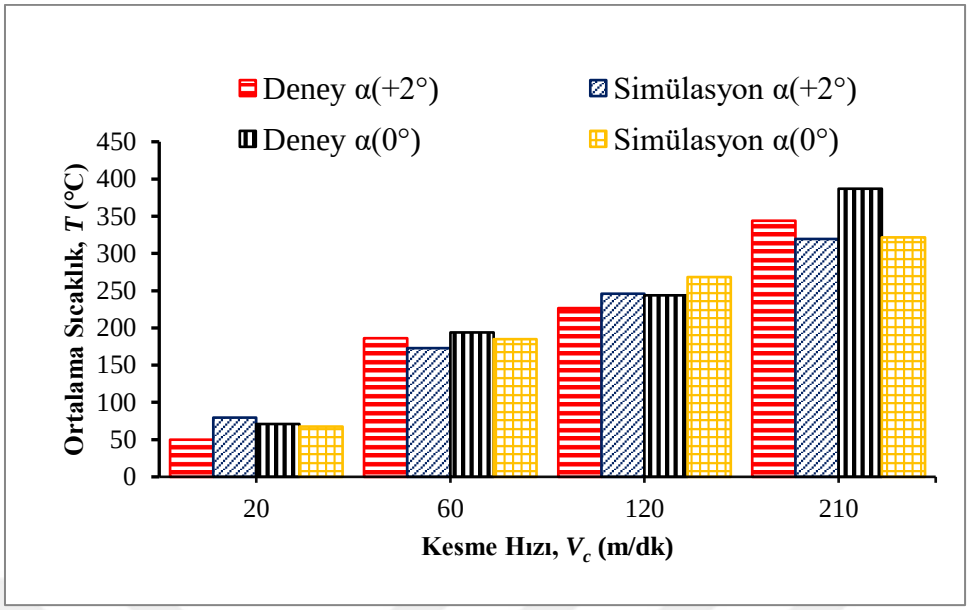
Şekil 4.23. Kuru kesme işlemi için farklı kesme parametrelerinde ortalama sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması.

MQL kesme işlemi için elde edilen deneysel verilerle tahmin edilen simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 4.24'te sunulmuştur. Kuru kesme işleminde olduğu gibi ortalama sıcaklılardaki deneysel eğilim simülasyon sonuçlarıyla da yakalanmıştır. Talaş açısının pozitif yönde değişimiye ortalama sıcaklıklarda yakalanan düşüş her kesme hızı için simülasyon sonuçlarına da yansımıştır.



Şekil 4.24. MQL işlemi için farklı kesme parametrelerinde ortalama sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.25'te ise sıvı azot yardımı ile kesme işleminde (kriyojenik) farklı kesme parametrelerinde elde edilen deneysel verilerin ve simüalsyon sonuçlarının grafiksel olarak kıyaslanması yer almaktadır. Sıvı azot ile kesme işleminde deneysel olarak elde edilen düşük sıcaklıklar simülasyon sonuçlarında da dikkat çekmektedir. Bunun yanı sıra kesme hızlarına ve talaş açısına bağlı olarak yakalan eğilim simülasyonda da aynen sağlanmıştır.



Şekil 4.25. Sıvı azot ile kesme işlemi için farklı kesme parametrelerinde ortalama sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması.

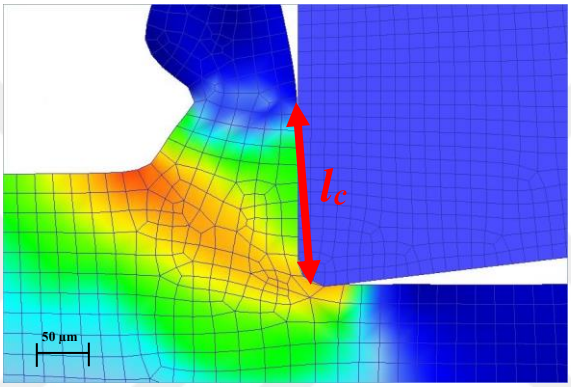
Tablo 4.7'de tüm kesme koşulları ve kesme parametreleri için ortalama sıcaklık değerlerinin deneysel ve simülasyon sonuçları sayısal olarak paylaşılmıştır. Tablodaki sayısal değerlerden anlaşılacağı üzere en yüksek sıcaklıkların beklendiği gibi kuru kesme işleminde en düşük sıcaklıkların ise sıvı azot ile kesme işleminde elde edildiği görülmektedir. Bu durumdan sıvı azot ile kesme prensibinin soğutma özelliğinin simülasyona uyarlanışında kullanılan ısı transfer penceresinin etkisini anlayabiliriz. MQL işlemi için değiştirilen ısı transfer katsayısı kuru kesme işlemine göre deneysel işlemdeki gibi makul düzeyde sıcaklıkları düşürmüştür. Gösterilen sayısal sonuçların çoğu maksimum %90 yakınsama içinde yer almaktadır. Sadece α(+2°)'de 20 m/dk kesme hızında kriyojenik talaş kaldırma işlemi için deneysel ortalama sıcaklık 50°C iken simülasyon tahmini yaklaşık 80°C bulunmuştur. Ortalama sıcaklık değerlerinin çok küçük olmasından dolayı yüzdesel farkı büyük gözükmektedir.

Tablo 4.7. Farklı kesme parametreleri ve koşullarında deneysel ve tahmin edilen ortalama sıcaklık değerlerinin sayısal olarak karşılaştırılması, *T*(°C).

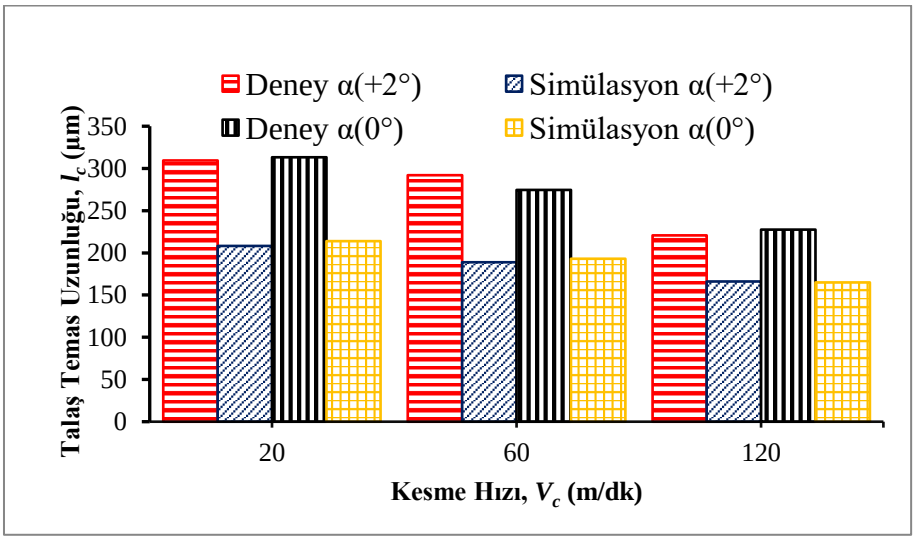
	Kesme Hızı	Deney α(+2°)	Simülasyon α(+2°)	Deney α(0°)	Simülasyonα(0°)
Kuru Kesme	**20 m/dk**	389.9	361 (%-7.4)	417.7	381(%-8.7)
	60 m/dk	474.2	446(%-5.9)	476.9	485(%1.7)
	120 m/dk	501.5	529(%5.4)	512	561(%9.5)
	210 m/dk	670.6	702(%4.68)	705	715(%1.4)
MQL	**20 m/dk**	342.9	336(%-2)	436	410(%-5.9)
	60 m/dk	439.7	406(%-7.6)	461	476(%3.2)
	120 m/dk	474.5	479(%0.9)	478	540(%12.9)
	210 m/dk	536.9	546(%1.7)	584.9	615(%5.1)
Kriyojenik	**20 m/dk**	50	79,4(%58.8)	71	67(%-4.9)
	60 m/dk	186.4	173(%-7.2)	194	185(%-4.6)
	120 m/dk	226.5	246(%8.6)	243.7	286.5(%10.2)
	210 m/dk	344.1	319.5(%-7.1)	386.9	321.5(%-16.9)

4.1.6 Farklı Kesme Koşullarında ve Parametrelerinde Kesici Takım-Talaş Temas Uzunluğunun Deneysel Verilerle Kıyaslanması

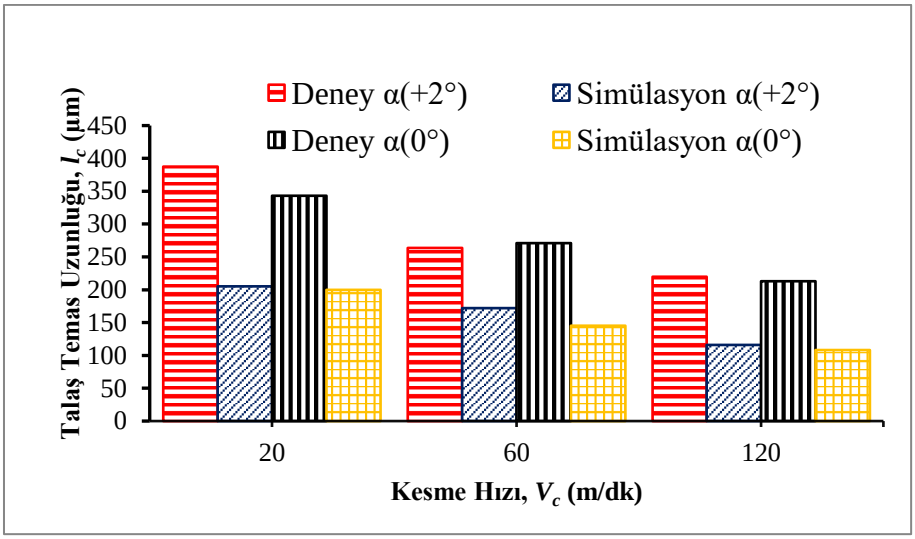
Kesici takım ve talaş arasındaki temas uzunluğunun nasıl ölçüldüğü Şekil 4.26'da gösterilmiştir. Şekil 4.27, 4.28 ve 4.29'da sırasıyla kuru kesme, MQL ve sıvı azot ile kesme işlemleri için deneysel ve tahmin edilen talaş temas uzunlukları karşılaştırılması grafiksel olarak sunulmuştur. Tüm koşullar için deneysel verilere bakıldığında kesme hızına bağlı olarak azalan temas uzunluğu eğiliminin simülasyon sonuçlarında da yakalandığı görülmüştür. 210 m/dk kesme hızında kullanılan takımlar kırıldığı için kıyaslama yapılamamıştır.



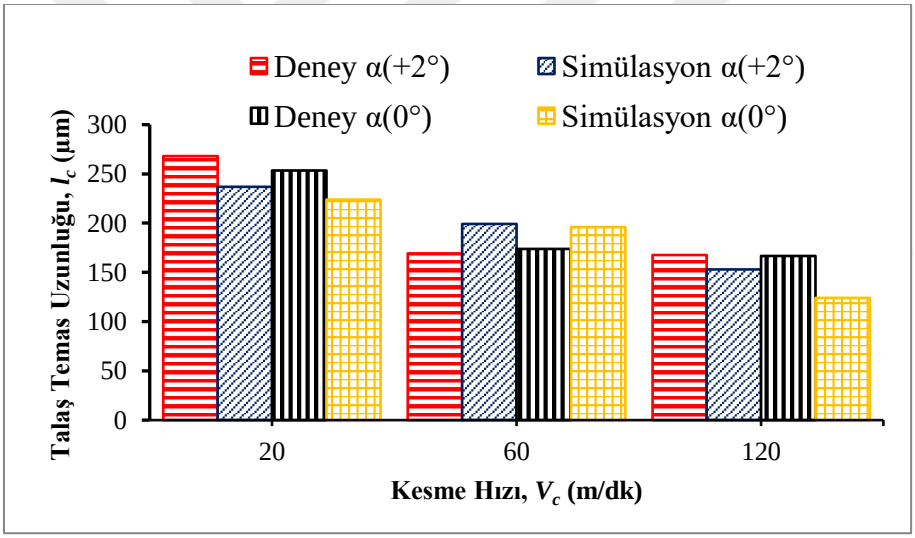
Şekil 4.26. Simülasyonda temas uzunluğu ölçümünün gösterimi.



Şekil 4.27. Kuru kesme işleminde farklı kesme parametlerinde talaş temas uzunluğu değerlerinin karşılaştırılması.



Şekil 4.28. MQL işlemi için farklı kesme parametrelerinde talaş temas uzunluğu değerlerinin karşılaştırılması.



Şekil 4.29. Sıvı azot ile kesme işlemi için farklı kesme parametrelerinde talaş temas uzunluğu değerlerinin karşılaştırılması.

Tablo 4.8'de farklı kesme parametreleri ve koşullarında elde edilen temas uzunluklarının yüzdesel farkları verilmiştir. Yüzdesel farklarda %50'ye varan farklar görülmektedir. Bu farklar gösteriyor ki simülasyon sonuçlarının sayısal değerleri deneysel verilere göre daha az çıkmıştır. Bu durumun nedenlerinden biri olarak simülasyon esnasında oluşan aşınmanın dikkate alınmaması gösterilebilir. Çünkü deneysel durumda aşınma oldukça temas uzunluğunu arttırmaktadır ve bu da sonuçlara yansımıştır. En iyi yakınsama değerleri sıvı azot ile kesme işleminde yakalanmıştır. Bunun nedeni olarak sıvı azot ile

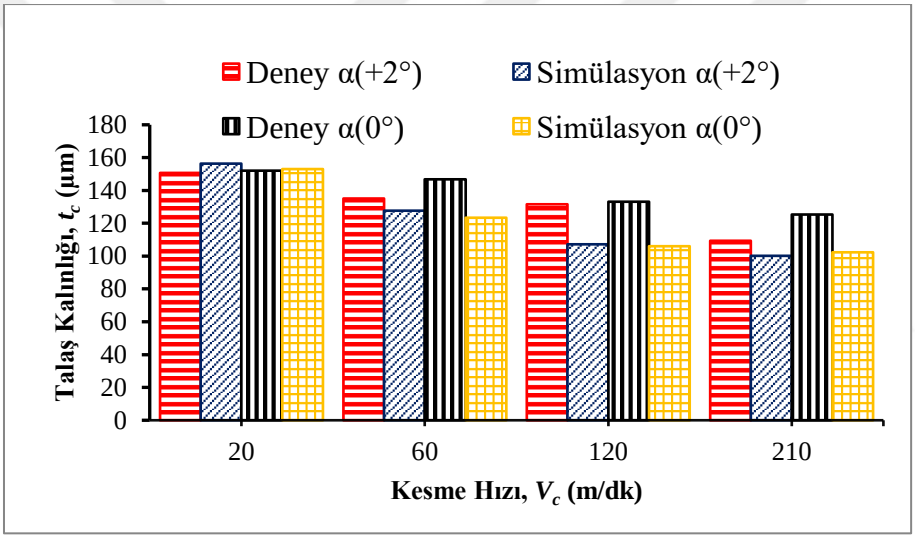
kesme işleminde aşınmanın az olduğu bu yüzden deneysel temas uzunluğunu arttırmadığı söylenebilir. Buna paralel olarak deneysel ve tahminsel olarak en düşük temas uzunlukları sıvı azot ile kesme işleminde çıkmıştır. En iyi yakınsama ise yaklaşık %91 ile 120 m/dk hızında sıvı azot ile kesme işleminde α(+2°) yakalanmıştır.

Tablo 4.8. Farklı kesme parametreleri ve koşularında deneysel ve tahmin edilen talaş temas uzunlukların sayısal olarak karşılaştırılması, l_c(µm).

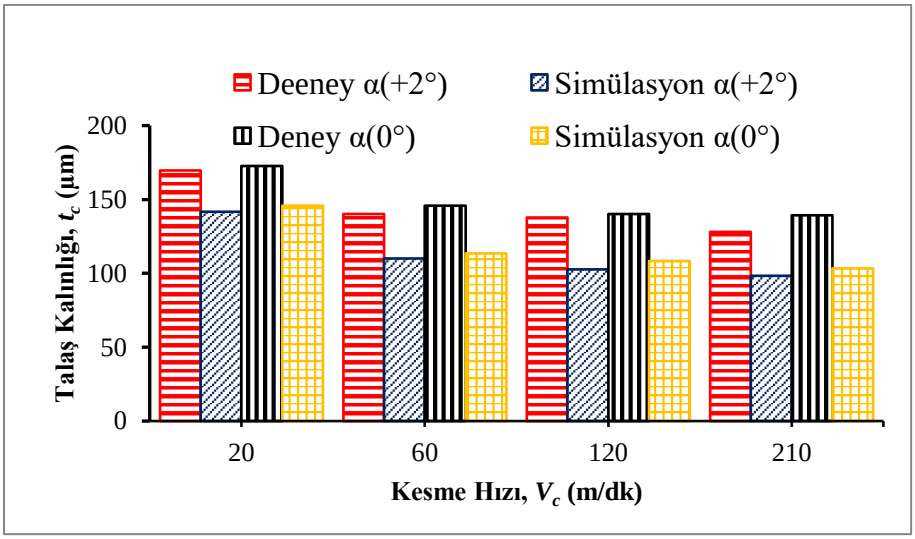
	Kesme Hızı	**Deney α(+2°)**	**Simülasyon α(+2°)**	**Deney α(0°)**	**Simülasyon α(0°)**
Kuru Kesme	**20 m/dk**	309.5	208(%-32.7)	313.1	214(%-31.6)
	60 m/dk	291.8	189(%-35.2)	274.7	193(%-29.7)
	120 m/dk	220.6	166(%-24.7)	227.4	165(%-27.4)
MQL	**20 m/dk**	387.6	205(%-47.1)	343.1	200(%-41.7)
	60 m/dk	263.6	172(%-34.7)	271.2	145(%-46.5)
	120 m/dk	220	116(%-47.2)	213	108(%-49.3)
Kriyojenik	**20 m/dk**	268	237(%-11.5)	253.4	224(%-11.6)
	60 m/dk	169.4	199(%-17.5)	173.8	196(%12.7)
	120 m/dk	167.6	153(%-8.7)	166.6	124(%-25.5)

4.1.7 Farklı Kesme Koşullarında ve Parametrelerinde Talaş Morfolojisinin Deneysel Verilerle Kıyaslanması

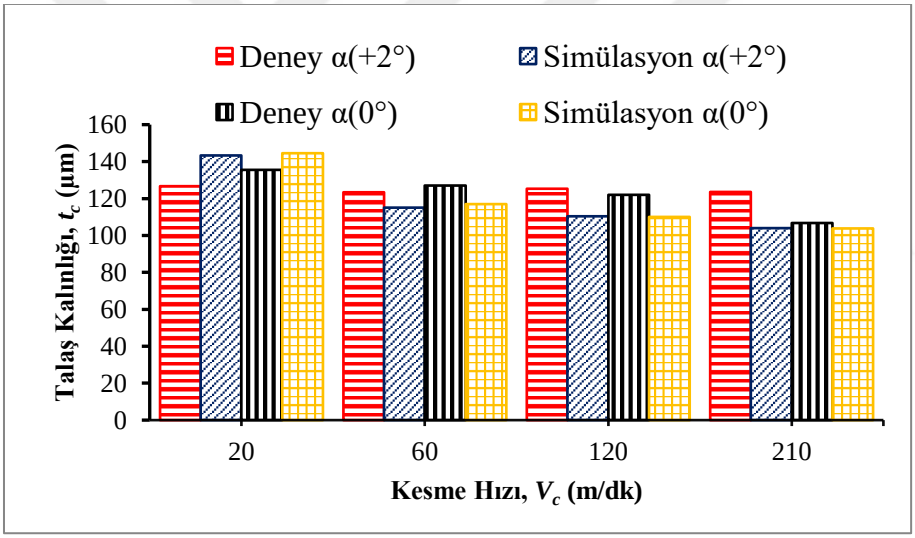
Talaş morfolojisinin iki önemli çıktısı olan t_c ve b değerlerinin deneysel verilerle kıyaslanması bu bölümde sunulmuştur. Şekil 4.30 (kuru), 4.31(MQL) ve 4.32(sıvı azot)'de deneysel ve tahmin edilen talaş kalınlıklarının grafiksel olarak karşılaştırılması paylaşılmıştır. Kesme hızının artması ile azalan talaş kalınlıkları eğilimi tüm koşullarda deneysel verilerde olduğu gibi simülasyon sonuçlarına da yansımıştır. Simülasyon sonuçlarında talaş açısının pozitif yönde değişimiyle talaş kalınlıklarında elde edilen azalma deneysel olarak elde edilen sonuçlarla benzerlik göstermektedir.



Şekil 4.30. Kuru kesme işlemi için farklı kesme parametrelerinde talaş kalınlıklarının karşılaştırılması.

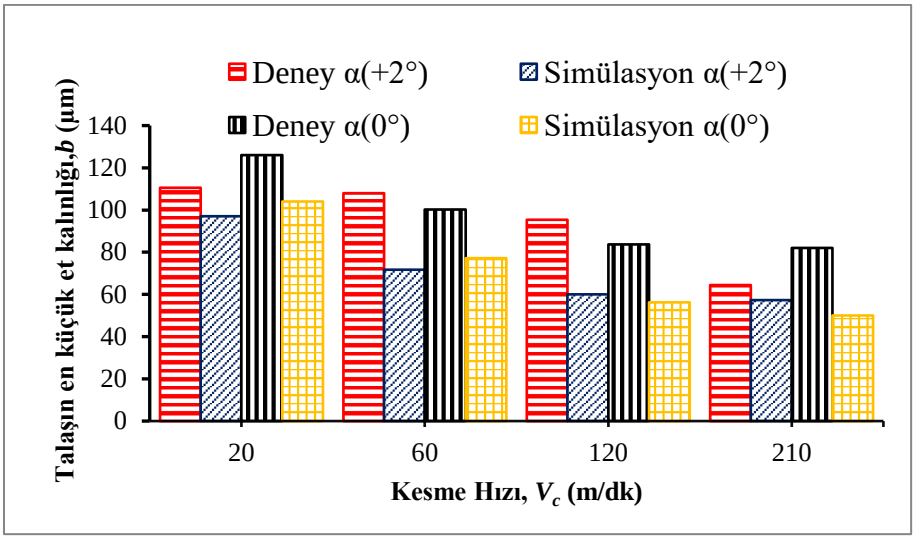


Şekil 4.31. MQL işlemi için farklı kesme parametrelerinde talaş kalınlıklarının karşılaştırılması.

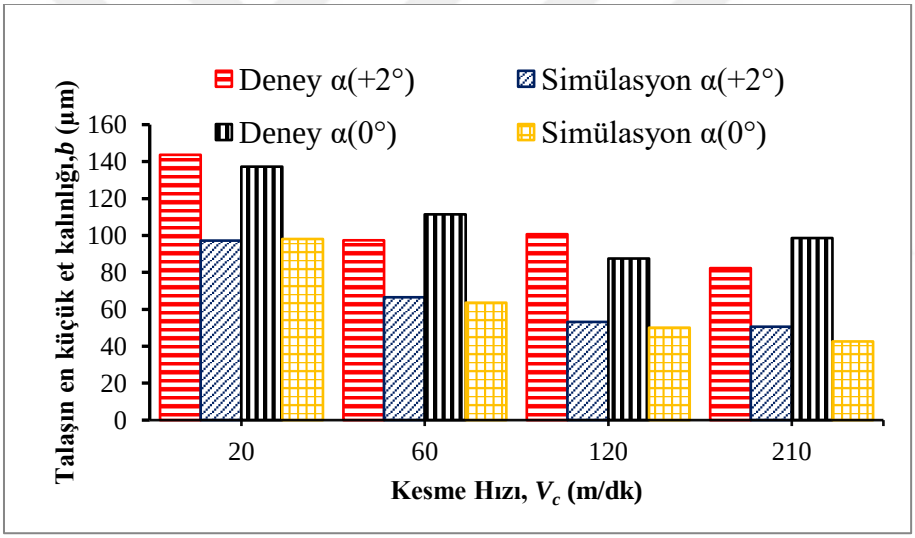


Şekil 4.32. Sıvı azot ile kesme işlemi için farklı kesme parametrelerinde talaş kalınlıklarının karşılaştırılması.

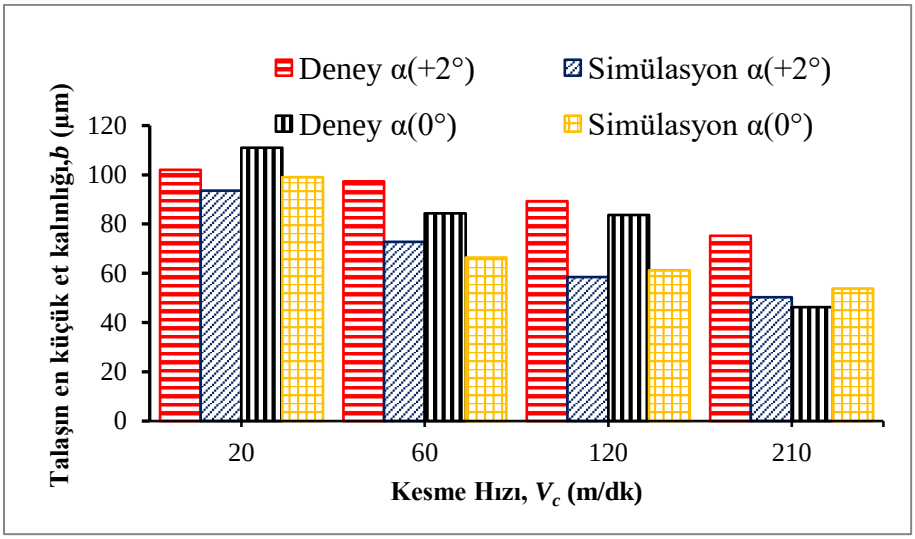
Talaş kalınlıklarının yanı sıra diğer bir parametre olan talaşın en küçük et kalınlığı (*b*) değerlerinin simülasyon sonuçları da aşağıda paylaşılmıştır. Şekil 4.33(kuru), 4.34(MQL) ve 4.35(sıvı azot)'te deneysel ve tahmin edilen *b* değerlerinin karşılaştırılması görülmektedir. Talaş kalınlıklarında olduğu gibi *b* değerlerinde de artan kesme hızına bağlı olarak azalma görülürken talaş açısı değişimiyle tüm kesme hızları için belirgin bir eğilimin oluşmadığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.33. Kuru kesme koşulu için farklı kesme parametrelerinde *b* değerlerinin karşılaştırılması.



Şekil 4.34. MQL işlemi için farklı kesme parametrelerinde *b* değerlerinin karşılaştırılması.



Şekil 4.35. Sıvı azot ile kesme işlemi için farklı kesme parametrelerinde *b* değerlerinin karşılaştırılması.

Tablo 4.9'da farklı kesme parametreleri ve koşullarında tahmin edilen talaş kalınlıklarının deneysel verilerle yüzdesel farkları bulunmaktadır. Sayısal değerler koşullara göre kıyaslandığında en küçük talaş kalınlıklarının kriyojenik işlemde olduğu görülmektedir. Tablodan yapabileceğimiz çıkarımlardan biri de düşük kesme hızlarında yüzdesel farklar daha iyiyken kesme hızının artmasıyla yüzdesel farklar da artmıştır. Yüzdesel olarak en uzak değer MQL α(0°) işleminde gerçekleştirilen 210 m/dk hızında elde edilmiştir. Yaklaşık olarak %26 deneysel veriyle fark oluşmuştur. En iyi yakınsama ise kuru kesme α(0°) 20m/dk hızında yaklaşık %99 ile tahmin edilmiştir. Ortalama olarak yaklaşık %85 yakınsamayla kabul edilebilir bir aralıkta talaş kalınlıkları tahmin edilmiştir.

Tablo 4.9. Farklı kesme parametreleri ve koşullarında deneysel ve tahmin edilen talaş kalınlıklarının yüzdesel olarak kıyaslanması, t_c(μm).

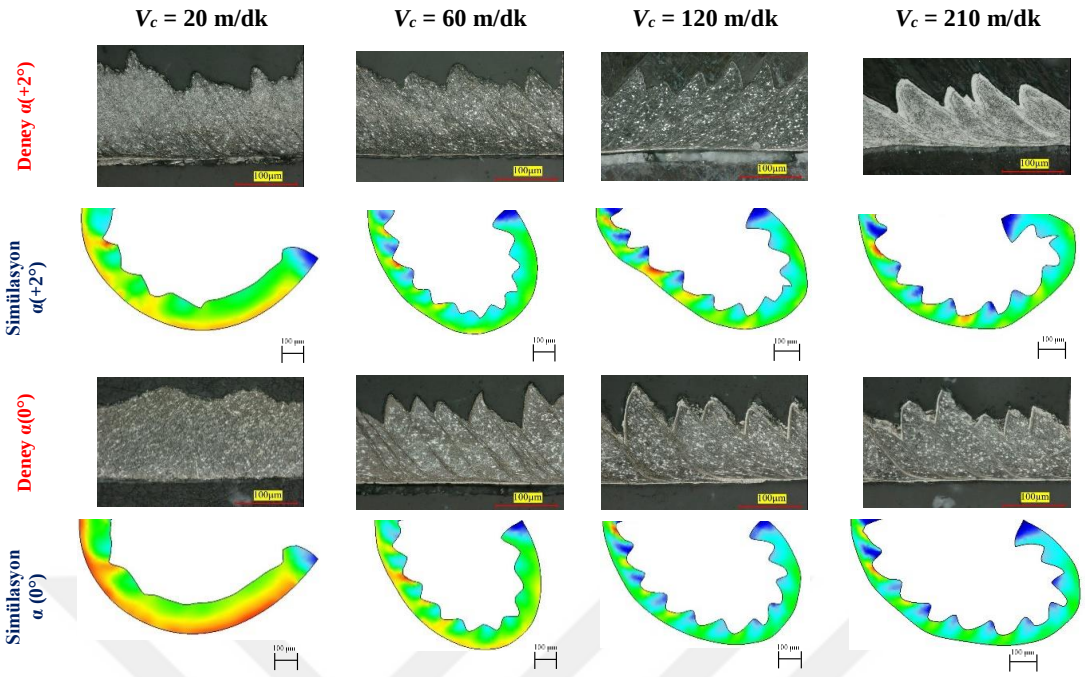
	Kesme Hızı	Deney α(+2°)	Simülasyon α(+2°)	Deney α(0°)	Simülasyon α(0°)
Kuru Kesme	**20 m/dk**	150.8	156.3(%3.7)	152	153(%0.6)
	60 m/dk	135	127.6(%-5.5)	146.8	123.4(%-15.9)
	120 m/dk	131.6	107.2(%-18.5)	133.2	106(%-20.4)
	210 m/dk	109.3	100.1(%-8.4)	125.4	102.4(%-18.3)
MQL	**20 m/dk**	169.6	141.6(%-16.5)	172.8	145.8(%-15.6)
	60 m/dk	140.2	110.1(%-21.4)	145.8	113.6(%-22.1)
	120 m/dk	137.8	102.6(%-25.5)	140.2	108.3(%-22.8)
	210 m/dk	128	98.3(%-23.2)	139.3	103.3(%-25.8)
Kriyojenik	**20 m/dk**	126.6	143.3(%13.9)	135.5	144.5(%6.6)
	60 m/dk	123.3	115(%-6.7)	127	117(%-7.8)
	120 m/dk	125.3	110.4(%-11.9)	122	110(%-9.8)
	210 m/dk	123.6	104(%-15.8)	106.8	103.8(%-2.8)

Tablo 4.10'da ise deneysel olarak elde edilen *b* değerlerinin tahmin edilen değerlerle yüzdesel farkları paylaşılmıştır. Talaş kalınlıklarında olduğu gibi en küçük et kalınlıklarında da en küçük değerler deneysel verilere paralel olarak kriyojenik işlemde elde edilmiştir. En iyi tahmin edilen koşul kriyojenik talaş kaldırma işlemi olmuştur.

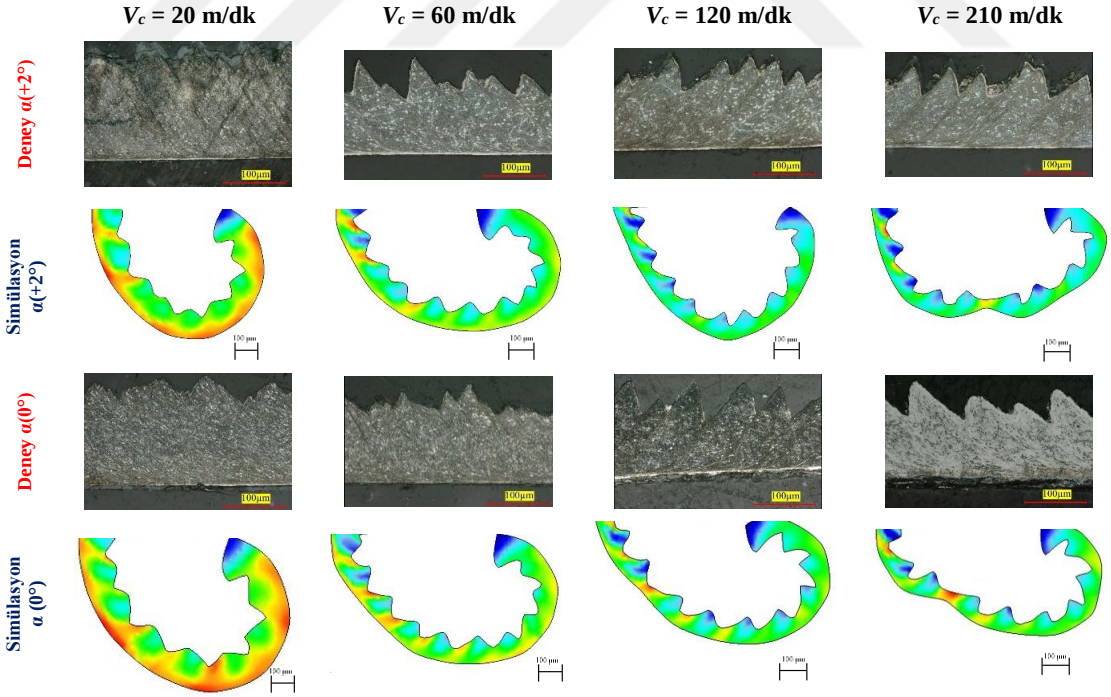
Tablo 4.10. Farklı kesme parametreleri ve koşullarında deneysel ve tahmin edilen talaşın en küçük et kalınlıklarının yüzdesel olarak kıyaslanması, *b* (μm).

	Kesme Hızı	Deney α(+2°)	Simülasyon α(+2°)	Deney α(0°)	Simülasyon α(0°)
Kuru Kesme	**20 m/dk**	110.5	97(%-12.2)	126	104(%-17.5)
	60 m/dk	108	71.75(%-33.5)	100.3	77,2(%-22.9)
	120 m/dk	95.3	60.1(%-36.9)	83.8	56.3(%-32.8)
	210 m/dk	64.5	57.3(%-11.2)	82	50(%-39)
MQL	**20 m/dk**	143.6	97.2(%-32.3)	137,3	98(%-28.6)
	60 m/dk	97.3	66.6(%-31.6)	111.3	63.6(%-42.8)
	120 m/dk	100.8	53.1(%-47.3)	87.5	50(%-42.8)
	210 m/dk	82.3	50.6(%-38.5)	98.7	42.6(%-56.8)
Kriyojenik	**20 m/dk**	102	93.6(%-8.2)	111	99(%-10.8)
	60 m/dk	97.3	72.8(%-25.2)	84.3	66.4(%-21.3)
	120 m/dk	89.3	58.5(%-34.5)	83.8	61.2(%-26.9)
	210 m/dk	75.3	50.3(%-33.2)	46.3	53.8(%16.3)

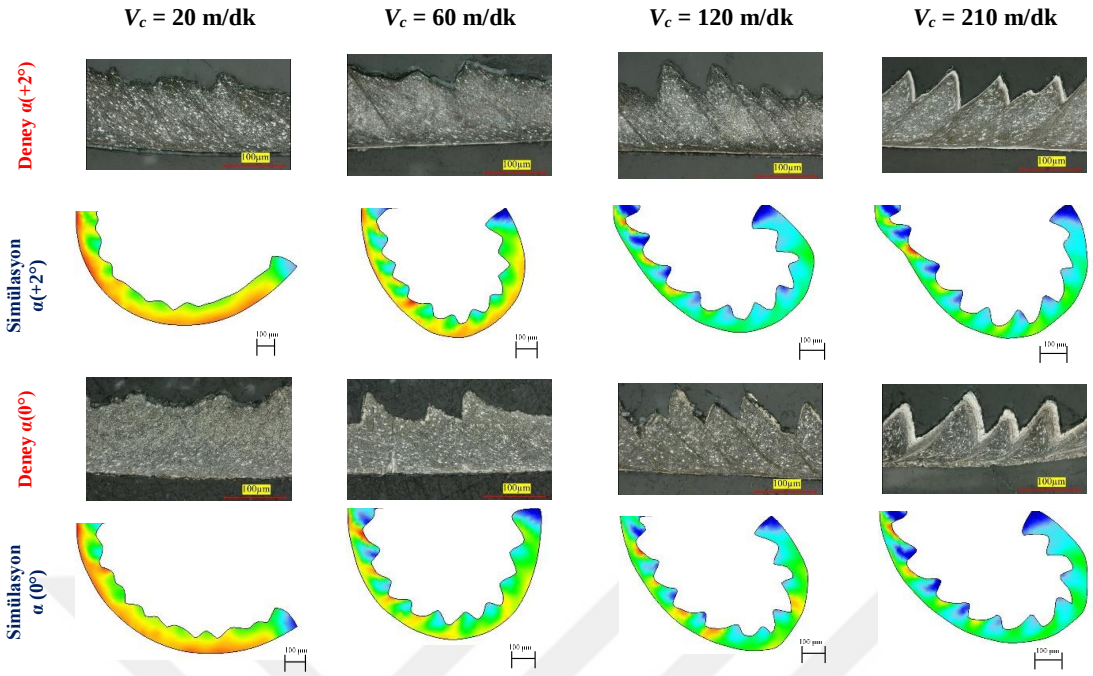
Modelin simüle edebilme prensiplerinden biride talaş segmentasyonunu sağlayabilmesidir. Bu bağlamda Şekil 4.36(kuru kesme), 4.37(MQL) ve 4.38(sıvı azot)'de farklı koşullarda, farklı parametrelerde deneysel olarak elde edilen ve tahminsel talaş morfolojlerinin karşılaştırılması sunulmştur. Tüm koşullarda görüldüğü gibi Ti-5553 alaşımının dik kesme işlemi sırasında elde edilen talaşlar segmentli (testere ağızlı) talaşlardır. Bununla birlikte düşük kesme hızında (20 m/dk) neredeyse her koşul için sürekli talaşlar elde edilmiştir. Simülasyon bu sonuçları doğru tahmin edebilmiştir. MQL koşulu için düşük kesme hızında az da olsa gerçekleşen segment oluşumu simülasyon sonucuna da aynen yansımıştır.(Şekil 4.37) Deneysel olarak kesme hızının artmasıyla oluşan segmentleri simülasyon sonuçlarında da görmekteyiz. Deneysel verilerle uyumlu sonuçların elde edildiği bu bulgularda artan kesme hızı ile birlikte talaşın segment kayma bandında birim şekil değişiminin arttığı da görülmektedir.



Şekil 4.36. Kuru kesme işlemi için farklı kesme parametrelerinde tahmin edilen talaş morfojilerinin karşılaştırılması.

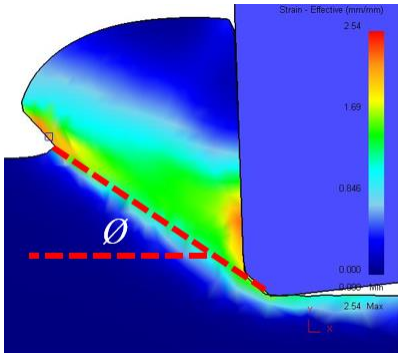


Şekil 4.37. MQL işlemi için farklı kesme parametrelerinde tahmin edilen talaş morfolojilerinin karşılaştırılması.

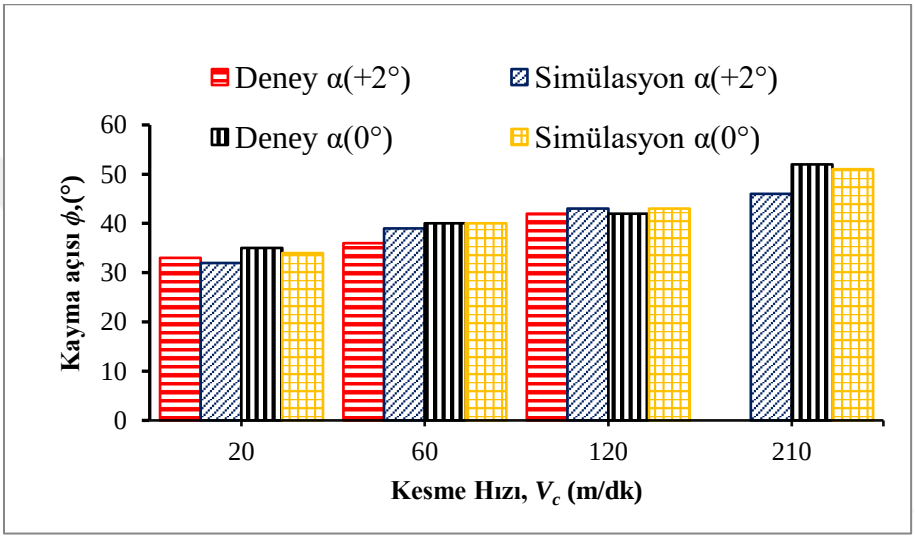


Şekil 4.38. Sıvı azot ile kesme işlemi için farklı kesme parametrelerinde tahmin edilen talaş morfolojisinin karşılaştırılması.

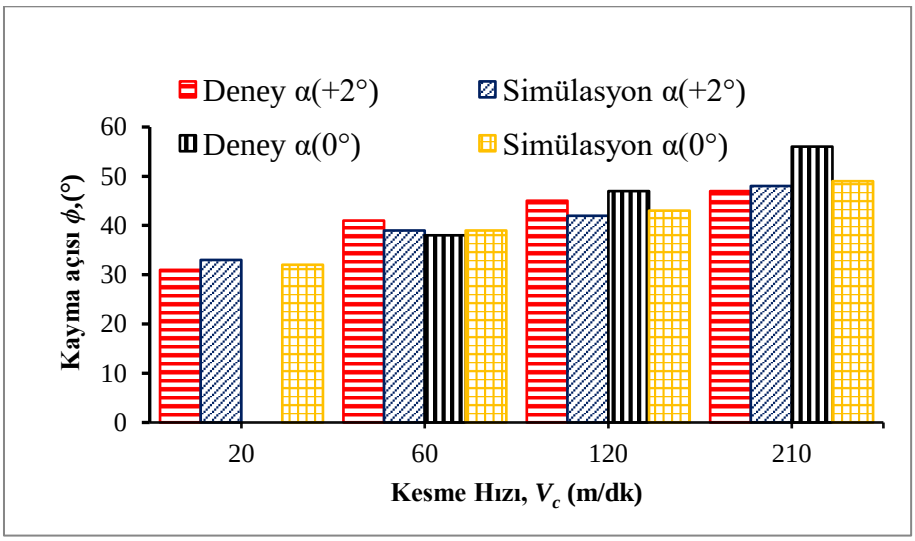
Şekil 4.39'da tahmin edilen kayma açısının nasıl ölçüldüğü açıkça gösterilmiştir. Kuru kesme işlemi için deneysel ve tahmin edilen kayma açılarının karşılaştırması Şekil 4.40'ta verilmiştir. Deneysel olarak kesme hızının artmasıyla artan kayma açısı değerleri simülasyon sonucunda da aynı eğilimle tahmin edilmiştir. Şekil 4.41'de MQL koşulunda yapılan simülasyonlarda kayma açısının tahmin edilen değerleri ile deneysel kayma açısı sonuçlarının kıyaslaması sunulmuştur. Şekil 4.41'de görüldüğü üzere farklı kesme hızları için tahmin edilen kayma açıları ile deneysel sonuçlar benzerlik göstermektedir ve birbirine yakın değerler çıkmıştır. Şekil 4.42'de ise sıvı azot ile kesme işlemi için farklı kesme hızlarında ve talaş açılarında deneysel ve tahmin edilen kayma açılarının kıyaslanması yer almaktadır. Sıvı azot ile kesme koşulunda da diğer koşullarda olduğu gibi aynı eğilim elde edilmiştir.



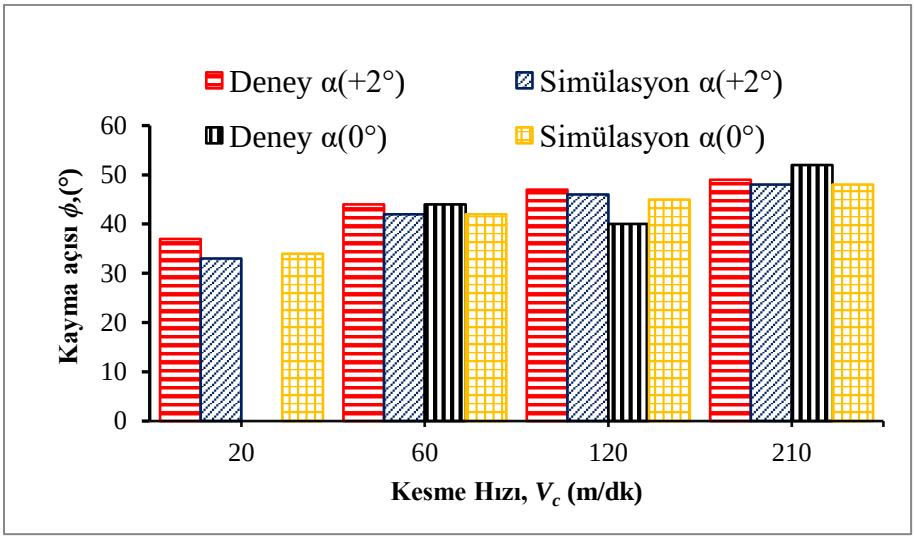
Şekil 4.39. Simülasyonda kayma açısı ölçümünün gösterimi (Kaynak ve ark., 2018).



Şekil 4.40. Kuru kesme işlemi için farklı kesme parametrelerinde tahmin edilen kayma açısı değerlerinin karşılaştırılması.



Şekil 4.41. MQL işlemi için farklı kesme parametrelerinde tahmin edilen kayma açısı değerlerinin karşılaştırılması.



Şekil 4.42. Sıvı azot ile kesme işlemi için farklı kesme parametrelerinde kayma açısı değerlerinin karşılaştırılması.

Sayısal sonuçların karşılaştırıldığı yüzdesel fark değerleri Tablo 4.11'de paylaşılmıştır. Bazı kesme hızlarında deneysel olarak kayma bantları belirgin olmadığı için ölçüm yapılamamış ve simülasyonla kıyaslanamamıştır. En yüksek yüzdesel fark değeri α(0°) talaş açısında, sıvı azot ile kesme 120 m/dk ve MQL 210 m/dk kesme hızlarında yaklaşık %12.5 farkla kayma açısı tahmin edilmiştir. Kabul edilebilir olan bu değerler haricinde, diğer kesme parametreleri ve koşullarında tahmin edilen ile ölçülenler arasındaki yüzdesel farkların ortalama %5 bandında olduğu görülmüştür. Dolayısıyla talaş kaldırma simülasyonunda kayma açısı tahmininin fiziksel koşullara yakın sonuçlar verdiği görülmektedir.

Tablo 4.11. Farklı kesme parametreleri ve kesme koşullarda deneysel ve tahmin edilen kayma açılarının yüzdesel olarak karşılaştırılması, $\phi(^\circ)$.

	Kesme Hızı	**Deney α(+2°)**	**Simülasyon α(+2°)**	**Deney α(0°)**	**Simülasyon α(0°)**
Kuru Kesme	**20 m/dk**	33	32(%-3)	35	34(%-2.8)
	60 m/dk	36	39(%8.3)	40	40 (%0)
	120 m/dk	42	43(%2.4)	42	43(%2.3)
	210 m/dk		46	52	51(%-1.9)
MQL	**20 m/dk**	31	33(%6.4)		32
	60 m/dk	41	39(%-4.8)	38	39(%2.6)
	120 m/dk	45	42(%-6.6)	47	43(%-8.5)
	210 m/dk	47	48(%2.1)	56	49(%-12.5)
Kriyojenik	**20 m/dk**	37	33(%-10.8)		34
	60 m/dk	44	42(%-4.5)	44	42(%-4.5)
	120 m/dk	47	46(%-2.1)	40	45(%12.5)
	210 m/dk	49	48(%-2.04)	52	48(%-7.7)

4.2 Ti-5553 Alaşım Malzemesinin İşlenmiş Yüzey ve Yüzeyaltı Tane Boyutundaki Değişimin Modellenmesi ve Simülasyonu

4.2.1 Mikroyapı Modeli

Mikroyapı modelini oluşturabilmek için aşağıdaki denklemler kullanılmıştır. Bu denklemler FORTRAN ABSOFT programında subroutine olarak yazılmış ve simülasyon esnasında yazılan bu kod DEFORM'a okutularak kesme simülasyonunda mikroyapı tahmini yapılmıştır. Zener-Hollomon denklemi Denklem 4.4'te gösterildiği şekilde tanımlanmıştır (Zener ve Hollomon, 1944).

$$Z = \dot{\varepsilon} \times \exp(\frac{Q}{RT}) \tag{4.4}$$

Bu denklemde; $\dot{\varepsilon}$ birim şekil değiştirme hızı, R=8.314 J/Kmol evrensel gaz sabiti, T mutlak sıcaklık (°K) ve Q (J/mol)aktivasyon enerjisidir. Aktivasyon enerjisi Ti-5553 alaşım için 240000 J/mol olarak literatürde sunulmuştur (Nair, 2016), dolayısı ile simülasyonda bu değer baz alınmıştır.

Tane boyutu tahmininde dikkate alınması gereken bir diğer önemli parametre, kritik birim şekil değiştirmedir ve Denklem 4.5'te tanımlanmıştır (Wang ve ark., 2016).

$$\varepsilon_{kritik} = a_2 \dot{\varepsilon}^{m_2} \exp\left(\frac{m_2 Q}{RT}\right) \tag{4.5}$$

Kritik birim şekil değiştirme denkleminde kullanılan sabitler için Hajari ve arkadaşlarının (Hajari ve ark., 2017) çalışması referans alınmıştır ve bu sabitler Tablo 4.12'de verilmiştir.

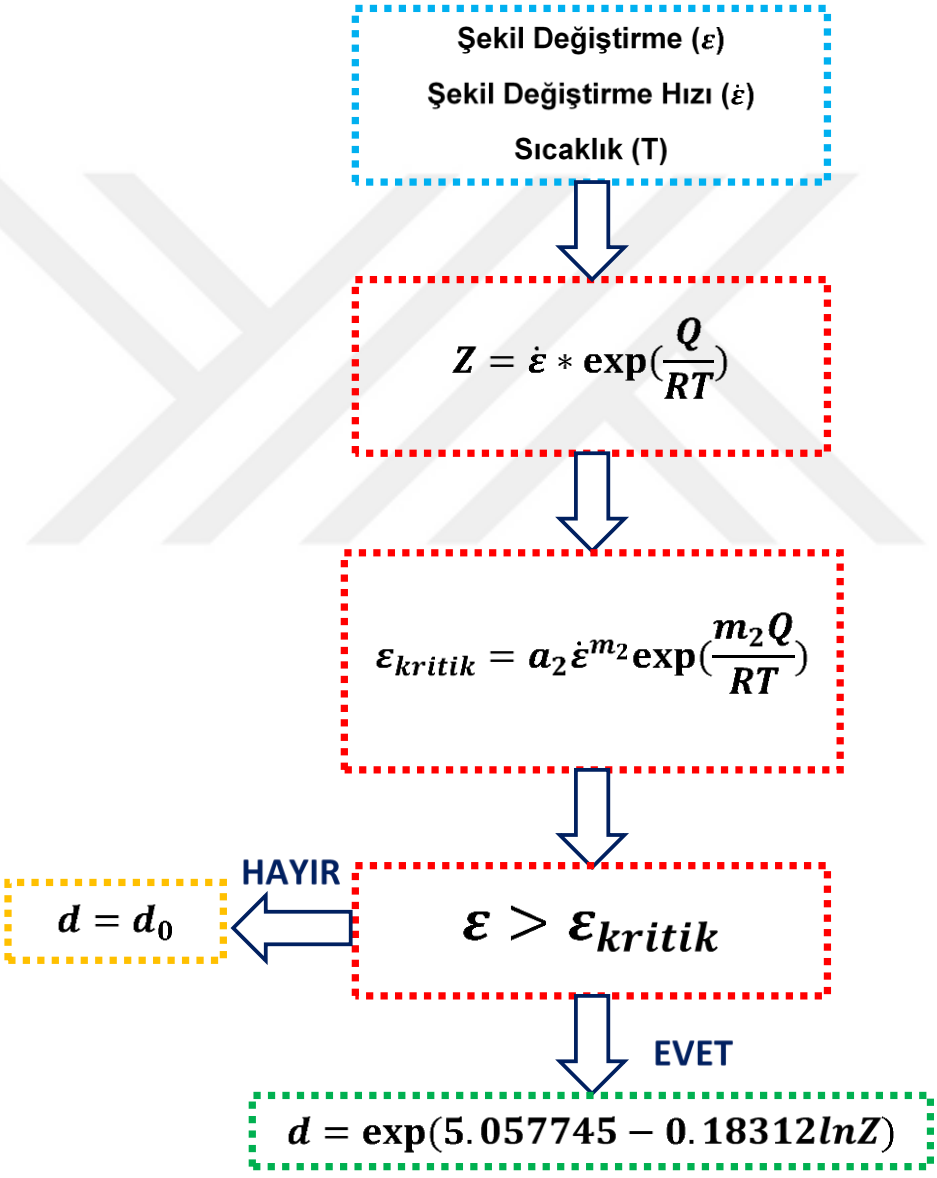
Tablo 4.12. Kritik birim şekil değiştirme için denklem parametreleri (Hajari ve ark., 2017).

a_2	m_2
0.000011	0.14202

Yeniden kristallenmiş tane boyutu Zener-Hollomon parametresiyle ilişkilidir. Fan ve arkadaşları Ti-5553 alaşım malzemesi için aşağıda sunulan denklemi önermişlerdir (Fan ve ark., 2017).

$$d = \exp\left(5.057745 - 0.18312 \ln Z\right) \tag{4.6}$$

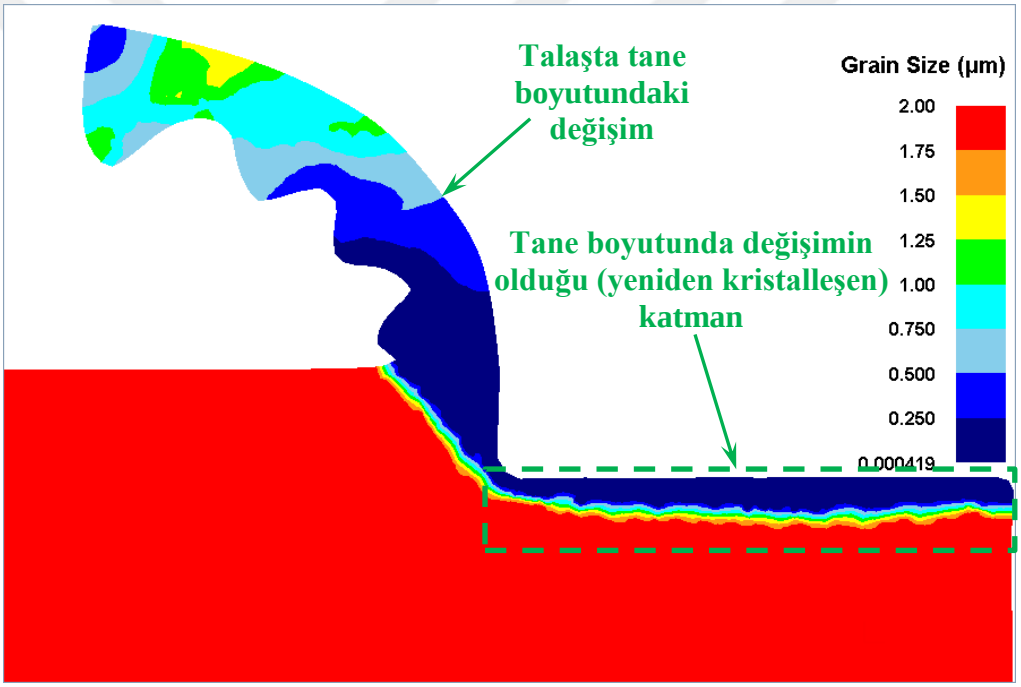
Tane boyutu değişiminin tahmin edilmesinde en önemli parametre ε, birim şekil değiştirmedir. Simülasyon esnasında eğer birim şekil değiştirme değeri kritik birim şekil değiştirme değerinin üzerine çıkarsa, malzemede yeni kristalleşmiş tane boyutu elde edilmiş olur. Bu sayede tane küçülmesi gözlemlenir. Birim şekil değiştirmenin kritik şekil değiştirme değerinin altında kaldığı bölgelerde ise tane boyutu değişmemiş yani ilk değerine eşit olur. Şekil 4.43'te tane küçülmesinin gerçekleşme prensipleri sırasıyla gösterilmiştir.



Şekil 4.43. Mikroyapı modeli çalışma prensibi.

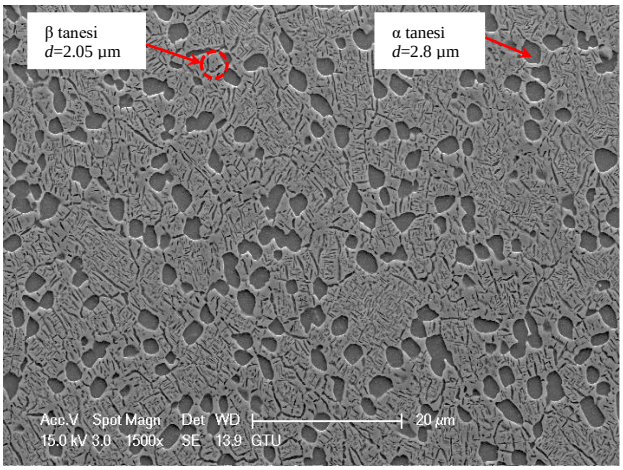
4.2.2 Kesme Koşulları ve Kesme Parametrelerinin Tane Boyutu Değişimine Etkisi

Bölüm 4.2.1'de sunulan mikroyapı modelinin kullanıldığı talaş kaldırma simülasyonlarında farklı kesme koşulları ve kesme parametreleri için tane boyutlarındaki değişim, diğer bir ifade ile dinamik yeniden kristalleşme (DRX) tahmin edilmiştir. Şekil 4.44'te mikroyapı modeli kullanılarak yapılan simülasyonlar sonucunda elde edilen tane boyutu değişimine bir örnek gösterilmektedir. Örnekte kuru kesme 60 m/dk kesme hızında ve α(+2°) talaş açısında elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Şekilde görüldüğü üzere, tane boyutunda önemli değişimler hem talaşta hem de işlenen yüzeyde meydana gelmiştir. Ancak analiz ve değerlendirmelerde talaştaki tane yapısının değişimi dikkate alınmayacaktır.



Şekil 4.44. Mikroyapı modeli ile tane boyutu değişiminin gösterilmesi (Kuru kesme, α(+2°), 60 m/dk).

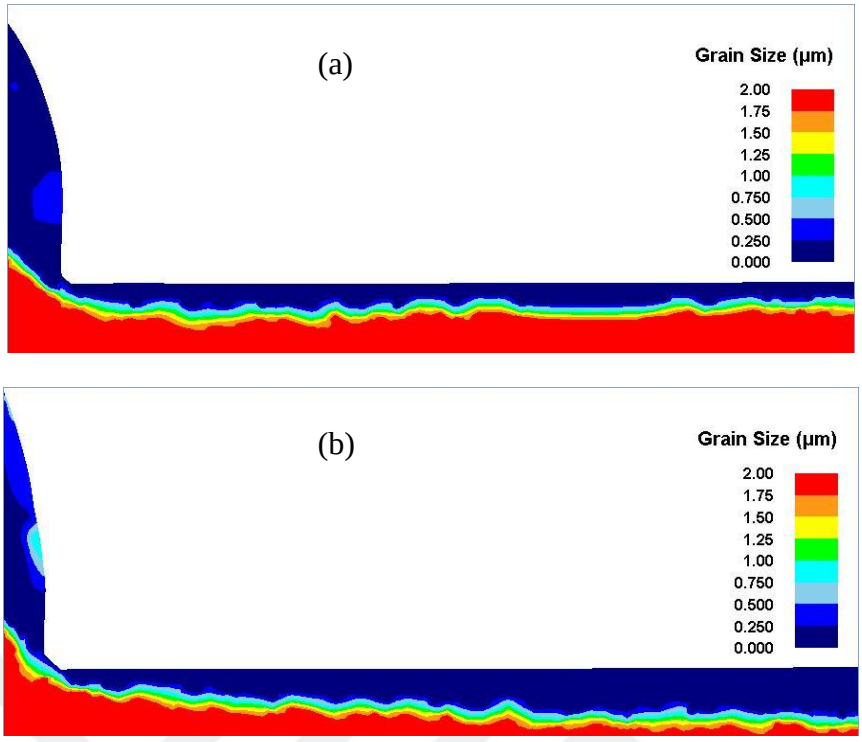
Deneysel çalışmalarda Ti-5553 alaşımının tane yapısı incelendiğinde alfa (α) fazlarının tane boyutları çok net gözlemlenebilirken beta (β) fazlarının tane sınırlarının çok net olmamasından dolayı tane boyutu daha zor ölçülmektedir. Alfa fazlarının ortalama tane boyutu 2.9 ±0.2 µm olarak ölçülmüştür. Beta fazlarının ortalama tane boyutu ise 2 µm ±0.2 olarak ölçülmüştür. (Şekil 4.45)



Şekil 4.45. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile elde edilen mikroyapı görüntüsünde α ve β fazı tane boyutlarının gösterimi.

Tek fazlı malzemelere nazaran Ti-5553 alaşımın deformasyon sonucu tane boyutundaki değişim sürecinin modellenmesi daha karmaşık olduğu söylenebilir. Nihayetinde iki farklı tane boyutu ve her bir fazın özellikleri de diğerinden farklıdır. Dolayısı ile burada yapılacak çalışmanın her ikisini de kapsaması beklenilebilir ancak Ti-5553 alaşımlar genelde β'ya yakın malzeme olarak değerlendirilmekte ve dolayısı ile β fazı daha önem kazanmaktadır. Bu sebeple tane boyutunun modellenmesi sürecinde β fazı dikkate alınmıştır. Bu noktada talaş kaldırmada tane boyutunun simüle edileceği modelleme çalışmasında malzemenin başlangıç tane boyutu Şekil 4.46'da görüldüğü gibi 2 µm olarak alınmıştır.

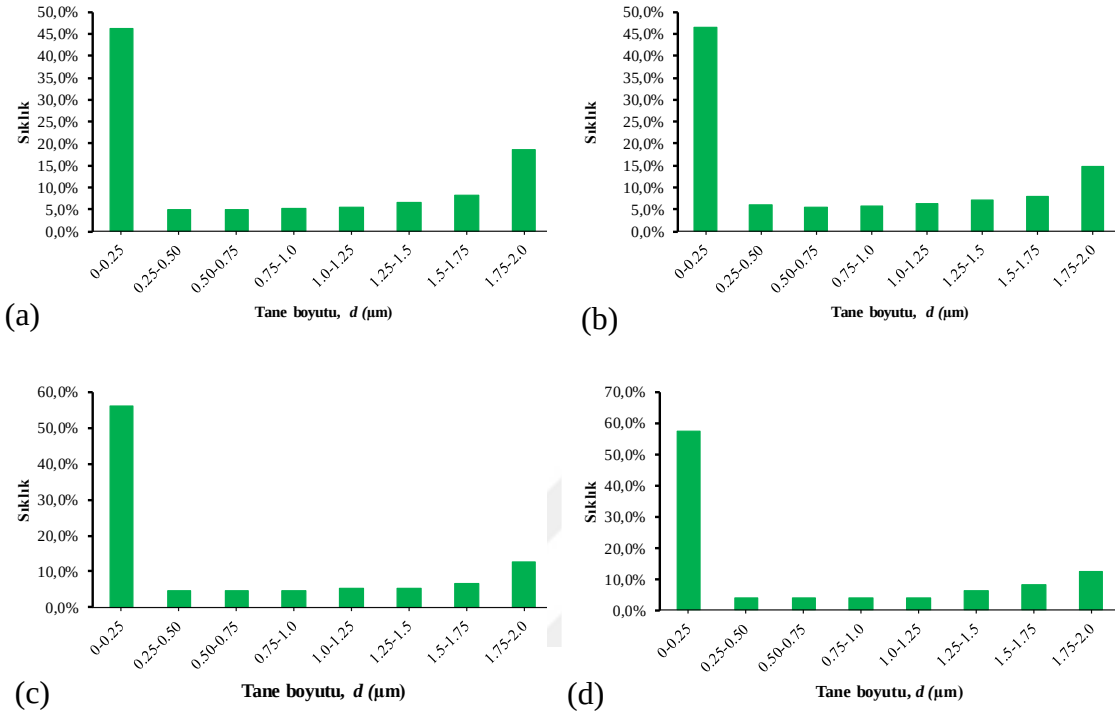
Şekil 4.46'da MQL işleminde α(+2°) talaş açısında farklı hızlarda tahmin edilen tane boyutu değişiminin işlenen yüzeyde dağılımını gösteren görseller yer almaktadır. Kesme hızı arttıkça işlenen yüzeyden etkilenen derinliğin arttığı görülmektedir. Deformasyon hızının artması daha fazla taneyi kritik birim şekil değiştirme eşiğinin üstüne çıkarmakta ve tane küçülmesi olmaktadır. Şekil 4.46'da sunulan işlenen yüzeyden itibaren etkilenmiş derinlik Bölüm 3.5'te anlatılan mikroyapı analizlerini destekler niteliktedir.



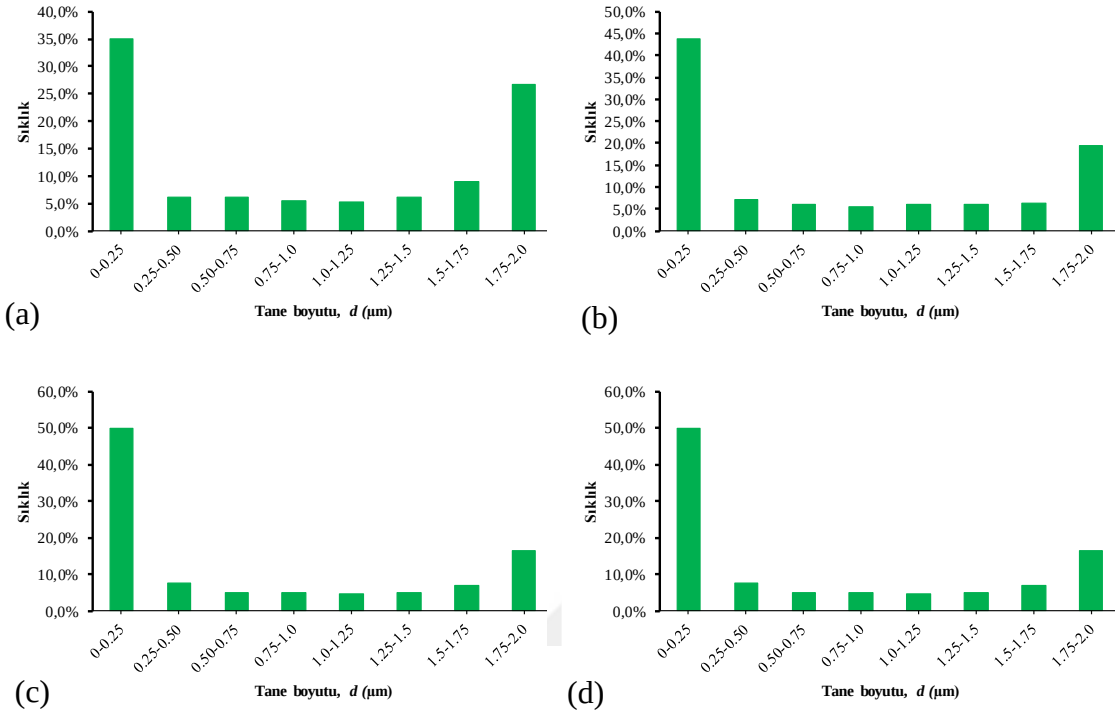
Şekil 4.46. MQL işleminde farklı kesme hızlarında tahmin edilen tane boyutu değişiminin gösterimi a)20 m/dk b)210 m/dk, α(+2°).

Kuru kesme işleminde farklı talaş açılarında tahmin edilen tane boyutunun yüzdesel değişimi sırası ile Şekil 4.47 (α(0°)) ve Şekil 4.48'de (α(+2°)) sunulmuştur. Bu şekillerdeki sıklık yüzdeleri elde edilirken işlenmiş yüzeyden üç farklı derinlik seçilerek bu derinliklerdeki tane boyutlarının ortalaması alınmıştır. Talaş kaldırma sonucu oluşan tane küçülmelerinde yeni oluşan tanelerin boyutları incelendiğinde tüm koşullar için en yoğun oluşan boyutun 0.25 µm'dan küçük taneler olduğu görülmektedir. En küçük tane boyutu sıklığını takip eden ise işlenmemiş malzemedeki tane boyutuna en yakın olan 1.75-2 µm arasındaki tanelerdir. Bu anlamda bundan sonraki grafiklerde ve değerlendirmelerde yeniden kristalleşmiş taneler içinde sıklık oranı en çok olan (0.25 µm'dan küçük taneler) kıyaslanacak ve değerlendirmeye alınacaktır. İki farklı talaş açısında sunulan grafikler değerlendirildiğinde simülasyon ile tahmin edilen sonuçlarda kesme hızının artmasıyla 0.25 µm'dan küçük tanelerin sıklığının arttığı yani tane boyutlarının daha da küçüldüğü görülmektedir. Örneğin Şekil 4.48'de 0. 25 µm'den küçük boyutlardaki tanelerin sıklığı 20 m/dk kesme hızında yaklaşık %35 iken, 210 m/dk kesme hızında bu sıklığın yaklaşık %50 olduğu görülmektedir. Benzer şekilde tane boyutu 1.75-2 µm arasında olanların sıklığı ise kesme hızının 20 m/dk'dan 210 m/dk'ya çıkmasıyla yaklaşık %27'den yaklaşık

olarak %15'e gerilemiştir. Bu eğilimin diğer talaş açısı içinde yapılan tüm tahminlerde benzer olduğu sadece yüzdesel farklılıkların olduğu görülmüştür.



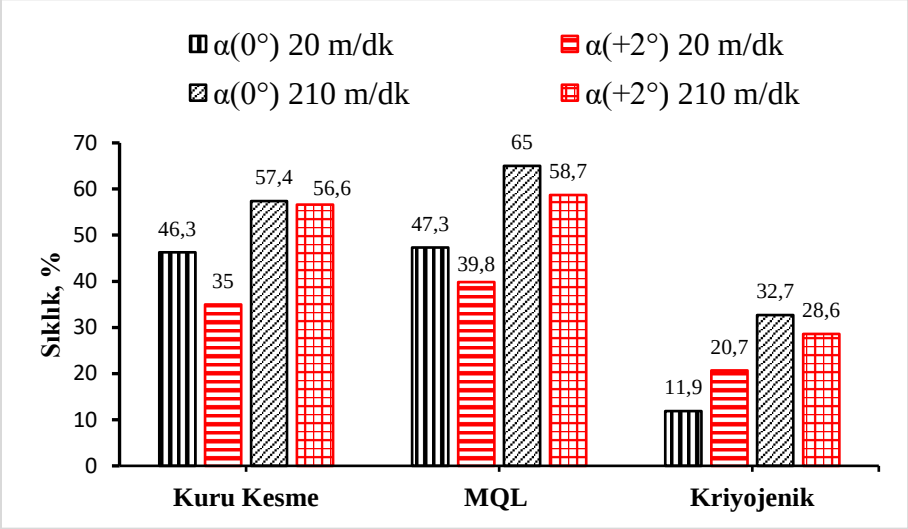
Şekil 4.47. α(0°) Talaş açısında farklı kesme hızlarında kuru kesme işleminde tahmin edilen tane boyutu değişiminin yüzdesel gösterimi a)20 m/dk b)60 m/dk c)120 m/dk d)210 m/dk.



Şekil 4.48. α(+2°) Talaş açısında farklı kesme hızlarında kuru kesme işleminde tahmin edilen tane boyutu değişiminin yüzdesel gösterimi a)20 m/dk b)60 m/dk c)120 m/dk d)210 m/dk.

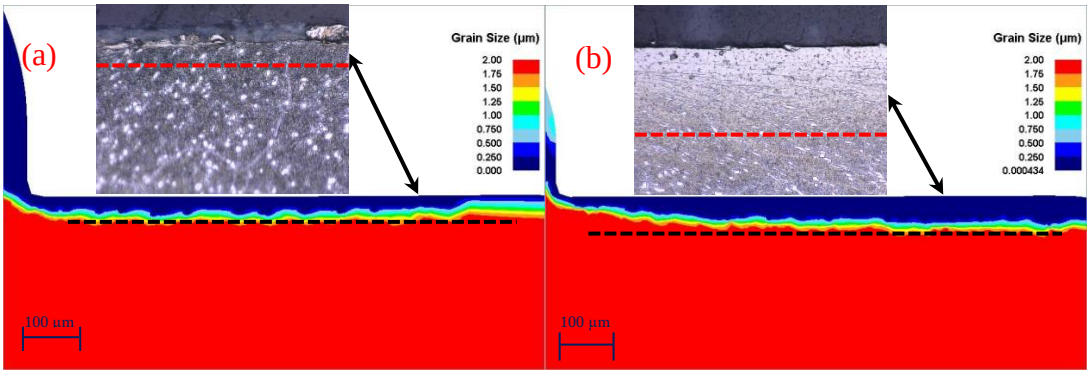
Şekil 4.49'da farklı kesme koşulları, talaş açıları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma simülasyonunda işlenmiş yüzey ve yüzey altında 0.25 µm ve daha küçük boyutlarda tahmin edilen tanelerin sıklığı (yeniden kristallenmiş taneler içindeki dağılımı) sunulmuştur. Her kesme koşulu için talaş açıları kendi içinde değerlendirildiğinde kesme hızının artmasıyla birlikte 0.25 µm ve daha küçük tanelerin sıklığının yeniden kristalleşen taneler içinde oranlarının arttığı görülmektedir. Dolayısı ile mikroyapı modeli ile ulaşılan sonuç artan kesme hızında eğer yeniden kristalleşme oluyorsa tane boyutlarının daha fazla küçüleceği anlamına gelmektedir. Talaş açısının pozitif yönde değişimiyle elde edilen yeniden kristalleşmiş tane boyutlarının oranın azaldığı görülmektedir. İstisnai durum olarak kriyojenik soğutma koşulunda yapılan α(+2°) 20 m/dk kesme hızı simülasyon sonucu görülmektedir. Kriyojenik kesme işleminde bu koşulda artan talaş açısıyla 0.25 µm ve daha küçük tanelerin sıklığında bir artış söz konusu olmuştur. Bunun nedeni kriyojenik koşulda yapılan simülasyonda tane küçülmesi, modeldeki aktivasyon enerjisinin nispeten düşük olmasından dolayı, talaş kaldırılan yüzeyde kararlı ve sürekli şekilde olmamıştır.

MQL ve kuru kesme koşulu kıyaslanacak olursa iki talaş açısı için de MQL koşulunda daha fazla 0.25 µm ve daha küçük tanelerin oluştuğu gözlenmektedir.



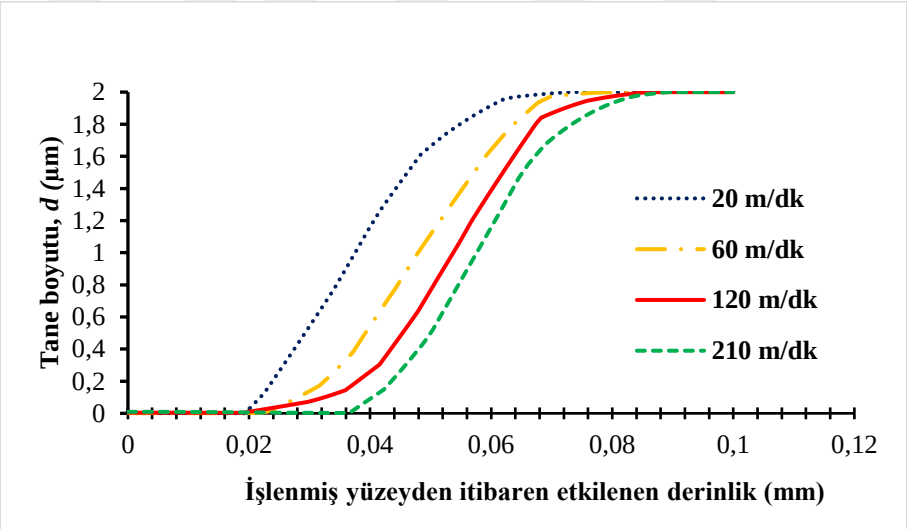
Şekil 4.49. Farklı kesme koşulları ve talaş açılarında, 20 m/dk ve 210 m/dk kesme hızlarında mikroyapı modeliyle tahmin edilen tane boyutu değişiminin yüzdesel olarak karşılaştırılması (d<0.25 µm).

Talaş kaldırma sürecinde işlenen yüzeyde yeniden kristalleşme olması ve tane küçülmesinin meydana gelmesi kadar, bu fiziksel değişimin yüzeyden itibaren ne kadar derinde meydana geldiği de önemlidir. Şekil 4.50'de kuru kesme yönteminde yapılan talaş kaldırma simülasyonunda Zener Hollomon modeli kullanılarak tahmin edilen işlenmiş yüzeyden itibaren yeniden kristallenmiş katman derinliği ve deneysel çalışmada elde edilen mikroyapı görüntüleri sunulmuştur.



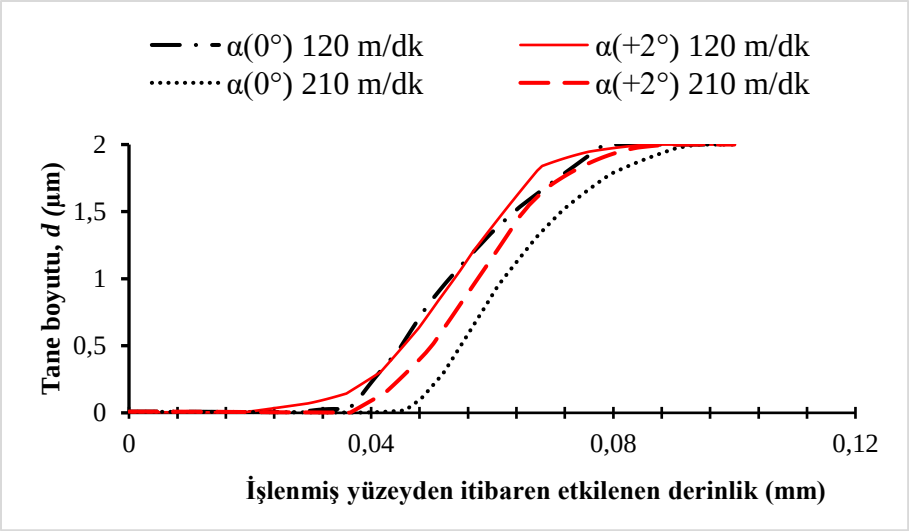
Şekil 4.50. Kuru kesme işlemi için farklı kesme hızlarında etkilenmiş derinliğin gösterimi a)20 m/dk b)210 m/dk, α(0°).

Şekil 4.51'de +2° talaş açısında kuru kesme işlemi için, farklı kesme hızlarında işlenen parçanın yüzeyinden itibaren yeniden kristalleşmiş katman derinliğinin mikroyapı modeli sonucunda tahmin edilen değerleri yer almaktadır. Şekilde görüldüğü üzere, yeniden kristalleşmenin meydana geldiği katman derinliğinin kesme hızının artması ile değişim gösterdiği görülmektedir. Örneğin 20 m/dk kesme hızında bu derinlik 68 µm olarak tahmin edilirken, diğer hızlarda bu değer yaklaşık olarak 84 µm olarak tahmin edilmektedir. Aynı zamanda bu grafik farklı derinliklerde kesme hızının değişimiyle tane boyutunun farklılık gösterdiği sonucunuda vermektedir. Örneğin 20 m/dk kesme hızında yüzeyden itibaren yaklaşık 36 µm derinlikteki tanelerin boyutları 1 µm iken, 60 m/dk kesme hızında 48 µm derinlikte, 120 m/dk kesme hızında 54 µm derinlikte 210 m/dk kesme hızında ise 64 µm derinlikte halen tane boyutları yaklaşık 1 µm'dur.



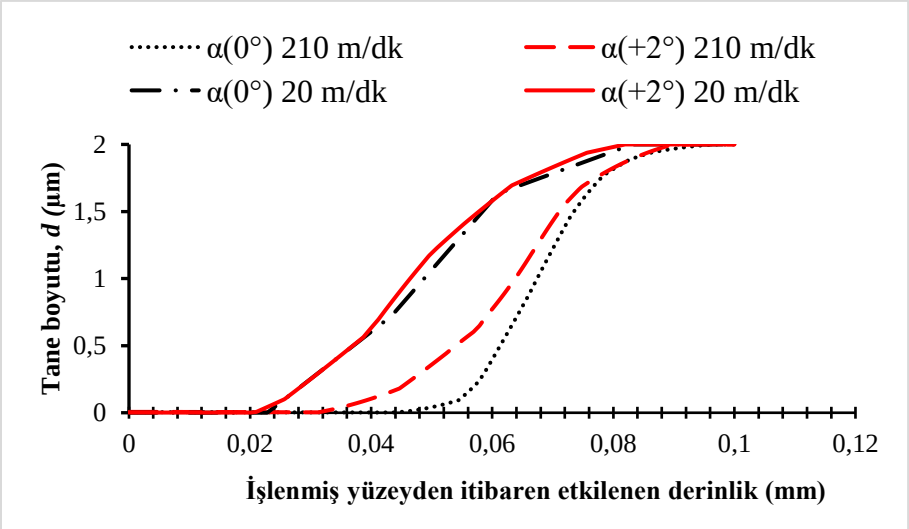
Şekil 4.51. Kuru kesme işlemi için farklı kesme hızlarında işlenmiş yüzeyden itibaren etkilenen derinliğin simülasyonla tahmin edilen değerlerinin karşılaştırılması, α(+2°).

Şekil 4.52'de kuru kesme işlemi için, farklı talaş açılarında ve yüksek kesme hızlarında tane boyutunun yüzeyden itibaren değişiminin tahmin edildiği değerler sunulmuştur. Talaş açıları bakımından bir eğilime sahip olmayan verilerde, tüm talaş açılarında kesme hızının artmasıyla etkilenmiş katman derinliğinde artış gözlemlenmiştir.



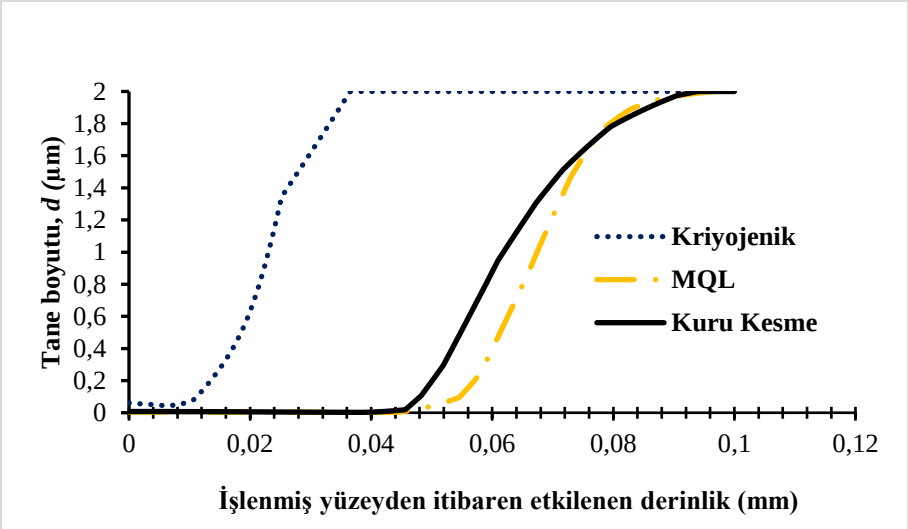
Şekil 4.52. Kuru kesme işlemi için farklı talaş açılarında ve yüksek kesme hızlarında işlenmiş yüzeyden itibaren etkilenen derinliğin simülasyonla tahmin edilen değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.53'te ise kesme hızının ve talaş açısının değişiminin MQL ile kesme simülasyonunda tane boyutunun etkilenmiş katman derinliğindeki tahmin edilen dağılımı görülmektedir. Kuru kesmede olduğu gibi burada da kesme hızının etkilenmiş katman derinliğinde ve farklı boyutlardaki tanelerin derinliğe bağlı dağılımında etkin olduğu görülmektedir. Kesme hızının artmasıyla etkilenmiş katman derinliği artmıştır. Hem düşük hem de yüksek kesme hızında, etkilenmiş katman derinliği açısından en etkili talaş açısı α(°0) derece olarak gözükmektedir.



Şekil 4.53. MQL ile kesme işlemi için farklı talaş açılarında, düşük ve yüksek kesme hızlarında işlenmiş yüzeyden itibaren etkilenen derinliğin simülasyonla tahmin edilen değerlerinin karşılaştırılması.

Tüm kesme koşullarının sabit kesme hızı (210 m/dk) ve sabit talaş açısında α(0°) talaş kaldırma simülasyonunda yüzey altı etkilenmiş derinliğin ve bu derinlikte farklı boyutlardaki tane dağılımının tahmininin kıyaslaması Şekil 4.54'te sunulmuştur. Seçilen kesme parametrelerinde elde edilen sonuçlar incelendiğinde MQL ve kuru kesme koşulunda etkilenmiş katman derinliğinin birbirlerine yakın olduğu görülmektedir. İlaveten kriyojenik koşulda ise tane küçülmesinin olduğu katman derinliği daha az çıkmıştır. Kriyojenik koşulda çıkan sonuç daha önce bahsedildiği gibi aktivasyon enerjisi ile ilgili olup, modelin deneysel verilere yakınsamasının iyileştirilmesi için kriyojenik koşul aktivasyon enerjisinin ayrıca belirlenmesi veya literatürde Ti-5553 alaşım için sunulan aktivasyon enerji değerlerinden daha büyük değerlerin kullanılması gerekmektedir.



Şekil 4.54. Farklı kesme koşullarında işlenmiş yüzeyden itibaren etkilenen derinliğin simülasyonla tahmin edilen değerlerinin karşılaştırılması, (V_C=210 m/dk, α(0°)).

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında havacılık sektöründe yakın zamanda kullanılmaya başlanan yeni nesil β esaslı Ti-5553 alaşım malzemesinin talaşlı imalat sürecinin ve yüzey bütünlüğünün deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile analizi yapılmıştır. Geniş yelpazede seçilen kesme hızları ve farklı talaş açısına sahip takım tutucular ile deneyler dik kesme prensibinde gerçekleştirilmiştir. Farklı kesme koşullarının uygulanması için soğutucu olarak sıvı azot ve yağlayıcı için ise MQL ile kesme işlemleri uygulanarak elde edilen sonuçlar kuru kesme sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda işleme performansı için çıktılar kesme kuvvetleri, ortalama kesme sıcaklıkları, kesici takım-talaş temas uzunlğu, talaş morfolojisi ve kayma düzlem açılarından oluşmaktadır. Yüzey bütünlüğü karakterizasyonunda ise işlenen parçaların yüzey ve yüzeyaltı mikroyapısal değişimleri ve faz dönüşümleri incelenmiştir.

Ti-5553 alaşımının dik kesilmesi süreci Deform-2D sonlu elemanlar programı kullanılarak modellenmiş ve kesme simülasyoları gerçekleştirilmiştir. Yapılan simülasyonlarda kesme kuvvetleri, kesme sıcaklıkları, talaş morfolojisi, kayma düzlem açıları gibi çıktılar tahmin edilmiş ve bu tahmini sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır.

Ti-5553 alaşımının mikroyapı tahmini için yazılan modelin Deform-2D programına adapte edilmesi ile farklı kesme hızları, talaş açıları ve koşullarında gerçekleştirilen talaş kaldırma simülasyonları esnasında tane boyutu küçülmesi ve etkilenmiş katman derinliği tahminleri gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı analizleri sonucunda elde edilen deneysel verilerle kıyaslama yapılmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında ulaşılan sonuçlar ve öneriler aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- ✓ Sıvı azot ile kesme işlemi kuru kesme ve MQL'e göre kesme sıcaklıklarını % 50'den daha fazla düşürmektedir.
- ✓ Kesme kuvvetleri değerlendirildiğinde, artan kesme hızlarında tüm koşullarda kesme kuvvetleri ısıl yumuşamanın da etkisiyle azalmıştır, ancak 210 m/dk'da ani artış görülmektedir ki bunun sebebi kesici takım aşınmasının aniden artması ve bu kesme hızında gerçekleşen faz dönüşümüdür.

- ✓ Dik kesme sonucu elde edilen numunelerin yüzey altı mikroyapıları incelendiğinde deforme olmuş katman gözlemlenmiştir. Talaş açısının pozitif yönde artmasıyla özellikle 210 m/dk kesme hızında tüm koşullarda önemli deformasyon ve kaybolmuş tane sınırı olan katmanlar görülebilmektedir.
- ✓ Tüm koşullarda ve talaş açılarında 210 m/dk kesme hızında alfa fazından beta fazına dönüşüm olduğu XRD dataları ile kanıtlanmıştır.
- ✓ Kesme simülasyonu için malzemenin plastik davranışı sıcaklık, birim şekil değiştirme ve gerilmenin dikkate alındığı Johnson-Cook bünye denklemi vasıtasıyla modellenmiş ve simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.
- ✓ Kesici takım-talaş arasındaki ısıl ve sürtünme koşulları literatürden faydanılarak ve deneysel dataların dikkate alındığı hassasiyet analizi çalışmasıyla bulunmuş ve tüm koşullarda kullanılmıştır.
- ✓ Farklı kesme koşullarının simüle edilebilmesi için literatürden yararlanılmıştır. Kriyojenik talaş kaldırma işleminin simülasyonunda ısı transfer penceresinden yararlanılarak kesme bölgesinde nozul etkisi oluşturulmaya çalışılmıştır. MQL işlemi için ise ısı transfer katsayısının değiştirilmesinden faydalanılmıştır. Bu yaklaşımlar sayesinde deneysel olarak soğutucu ve yağlayıcı amaçla kullanılan iki koşulun özellikle ortalama kesme sıcaklıklarının düşürmesi konusunda simülasyon tahminlerinde deneysel verilere oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir.
- ✓ Sonlu elemanlar yöntemi ile farklı kesme hızları, farklı talaş açıları ve kesme koşulları için tahmin edilen sıcaklık, kesme kuvvetleri, talaş morfolojisi, kayma düzlem açısı gibi çıktılar deneysel datalarla kıyaslanmıştır ve yüzdesel farkların kabul edilebilir olduğu değerlendirilmiştir.
- ✓ İşlenen parçaların işleme koşullarına ve parametrelerine göre mikroyapısında meydana gelebilecek dinamik yeniden kristallenme ve bunun sonucunda tane boyutlarındaki değişim için Johnson-Cook malzeme modeli temelli talaş kaldırma simülasyonlarına Fortran dilinde Ti-5553 sabitleri dikkate alınarak yazılan Zener-Hollomon temelli model adapte edilerek kullanılmıştır. Kullanılan mikroyapı modeli sayesinde deneysel verilerle uyumlu işlenmiş yüzeyden etkilenmiş katmanlar elde edilmiştir. Kesme hızının artmasıyla, yeniden kristalleşerek küçülen tane boyutlarında artış gözlemlenmiştir.

KAYNAKLAR

Aeby-Gautier, E., Appolaire, B. Ecole de Mines de Nancy, France.

Arrazola, P.-J., Garay, A., Iriarte, L.-M., Armendia, M., Marya, S., Le Maitre, F. (2009) Machinability of titanium alloys (Ti6Al4V and Ti555. 3). Journal of materials processing technology, 209(5), 2223-2230.

Baili, M., Wagner, V., Dessein, G., Sallaberry, J., Lallement, D. (2011) An experimental investigation of hot machining with induction to improve Ti-5553 machinability. Applied mechanics and Materials, Trans Tech Publ.

Banerjee, N., Sharma, A. (2014) Identification of a friction model for minimum quantity lubrication machining. Journal of cleaner production, 83, 437-443.

Banerjee, N., Sharma, A. (2016) Development of a friction model and its application in finite element analysis of minimum quantity lubrication machining of Ti-6Al-4V. Journal of Materials Processing Technology, 238, 181-194.

Boyer, R. (1996) An overview on the use of titanium in the aerospace industry. Materials Science and Engineering: A, 213(1), 103-114.

Boyer, R. (2010) Attributes, characteristics, and applications of titanium and its alloys. JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society, 62(5), 21-24.

Braham-Bouchnak, T., Germain, G., Morel, A., Furet, B. (2015) Influence of high-pressure coolant assistance on the machinability of the titanium alloy Ti555–3. Machining Science and Technology, 19(1), 134-151.

Braham-Bouchnak, T., Germain, G., Morel, A., Lebrun, J.-L. (2013) The influence of laser assistance on the machinability of the titanium alloy Ti555-3. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 68(9-12), 2471-2481.

Braham-Bouchnak, T., Germain, G., Morel, A., Lebrun, J. L. (2013) The influence of laser assistance on the machinability of the titanium alloy Ti555-3. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 68(9-12), 2471-2481.

Bruhis, Y., Sebring, W., Noland, D. (2008) High performance milling in aerospace materials. Meeting the Continuous Challenges of Machining New Innovative Material. Amherst.

Campo, K., Andrade, D., Opini, V., Mello, M., Lopes, E., Caram, R. (2016) On the hardenability of Nb-modified metastable beta Ti-5553 alloy. Journal of Alloys and Compounds, 667, 211-218.

Caruso, S., Di Renzo, S., Umbrello, D., Jayal, A. D., Dillon, O., Jawahir, I. (2011) Finite element modeling of microstructural changes in hard turning. Advanced Materials Research, Trans Tech Publ.

Ceretti, E., Lucchi, M., Altan, T. (1999) FEM simulation of orthogonal cutting: serrated chip formation. Journal of Materials Processing Technology, 95(1-3), 17-26.

Clément, N. (2010) Phase transformations and mechanical properties of the Ti-5553 beta-metastable titanium alloy. Institut de Mécanique, Matériaux et génie civil, vol. PhD: Ecole polytechnique de Louvain, 324.

Cockcroft, M., Latham, D. (1968) Ductility and the workability of metals. J Inst Metals, 96(1), 33-39.

Ding, H., Shin, Y. C. (2014) Dislocation density-based grain refinement modeling of orthogonal cutting of titanium. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 136(4), 041003.

Donachie, M. J. (2000) Titanium: a technical guide, ASM international.

Ezugwu, E. (2005) Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 45(12), 1353-1367.

Ezugwu, E., Bonney, J., Yamane, Y. (2003) An overview of the machinability of aeroengine alloys. Journal of materials processing technology, 134(2), 233-253.

Ezugwu, E., Wang, Z. (1997) Titanium alloys and their machinability—a review. Journal of materials processing technology, 68(3), 262-274.

Fan, X., Zhang, Y., Gao, P., Lei, Z., Zhan, M. (2017) Deformation behavior and microstructure evolution during hot working of a coarse-grained Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr-1Zr titanium alloy in beta phase field. Materials Science and Engineering: A, 694, 24-32.

Field, M., Kahles, J. F., Cammett, J. (1972) Review of measuring methods for surface integrity. CIRP, 21(2), 219-238.

Gerday, A.-F. (2009) Mechanical behavior of Ti-5553 alloy. Modeling of representative cells.

Germain, G., Morel, A., Braham-Bouchnak, T. (2013) Identification of material constitutive laws representative of machining conditions for two titanium alloys: Ti6Al4V and Ti555-3. Journal of Engineering Materials and Technology, 135(3), 031002.

Ginting, A., Nouari, M. (2009) Surface integrity of dry machined titanium alloys. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 49(3), 325-332.

Greenfield, M. A., Margolin, H. (1971) The interrelationship of fracture toughness and microstructure in a Ti-5.25 Al-5.5 V-0.9 Fe-0.5 Cu alloy. Metallurgical Transactions, 2(3), 841-847.

Grosdidier, T., Roubaud, C., Philippe, M.-J., Combres, Y. (1997) The deformation mechanisms in the β-metastable β-Cez titanium alloy. Scripta materialia, 36(1), 21-28.

Hajari, A., Morakabati, M., Abbasi, S. M., Badri, H. (2017) Constitutive modeling for high-temperature flow behavior of Ti-6242S alloy. Materials Science and Engineering: A, 681, 103-113.

Herbert, C., Axinte, D., Hardy, M., Brown, P. D. (2012) Investigation into the Characteristics of White Layers Produced in a Nickel-Based Superalloy From Drilling Operations. Machining Science and Technology, 16(1), 40-52.

Huang, C., Zhao, Y., Xin, S., Zhou, W., Li, Q., Zeng, W. (2017) Effect of microstructure on tensile properties of Ti–5Al–5Mo–5V–3Cr–1Zr alloy. Journal of Alloys and Compounds, 693, 582-591.

Huang, J., Wang, Z., Xue, K. (2011) Cyclic deformation response and micromechanisms of Ti alloy Ti–5Al–5V–5Mo–3Cr–0.5 Fe. Materials Science and Engineering: A, 528(29), 8723-8732.

Jafarian, F., Ciaran, M. I., Umbrello, D., Arrazola, P., Filice, L., Amirabadi, H. (2014) Finite element simulation of machining Inconel 718 alloy including microstructure changes. International Journal of Mechanical Sciences, 88, 110-121.

Jawahir, I., Brinksmeier, E., M'saoubi, R., Aspinwall, D., Outeiro, J., Meyer, D., Umbrello, D., Jayal, A. (2011) Surface integrity in material removal processes: Recent advances. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 60(2), 603-626.

Johnson, G. R., Cook, W. H. (1983) A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics, The Hague, The Netherlands.

Johnson, G. R., Cook, W. H. (1983) A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics, The Netherlands.

Jones, N., Dashwood, R., Jackson, M., Dye, D. (2009) Development of chevron-shaped α precipitates in Ti–5Al–5Mo–5V–3Cr. Scripta Materialia, 60(7), 571-573.

Kaynak, Y., Gharibi, A., Ozkutuk, M. (2018) Experimental and numerical study of chip formation in orthogonal cutting of Ti-5553 alloy: the influence of cryogenic, MQL, and high pressure coolant supply. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 94(1-4), 1411-1428.

Kaynak, Y., Lu, T., Jawahir, I. (2014) Cryogenic machining-induced surface integrity: a review and comparison with dry, MQL, and flood-cooled machining. Machining science and technology, 18(2), 149-198.

Kaynak, Y., Tobe, H., Noebe, R., Karaca, H., Jawahir, I. (2014) The effects of machining on the microstructure and transformation behavior of NiTi Alloy. Scripta Materialia, 74, 60-63.

Khan, A. S., Suh, Y. S., Kazmi, R. (2004) Quasi-static and dynamic loading responses and constitutive modeling of titanium alloys. International Journal of Plasticity, 20(12), 2233-2248.

Khanna, N., Sangwan, K. S. (2013) Interrupted machining analysis for Ti6Al4V and Ti5553 titanium alloys using physical vapor deposition (PVD)-coated carbide inserts. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture, 227(B3), 465-470.

Lenain, A. (2007) Relationships between thermomechanical processing, microstructure and mechanical properties of the beta metastable Ti-LCB alloy, UCL.

Li, C., Chen, J., Li, W., He, J., Qiu, W., Ren, Y., Chen, J., Chen, J. (2015) Study on the relationship between microstructure and mechanical property in a metastable β titanium alloy. Journal of Alloys and Compounds, 627, 222-230.

Lo, S.-P. (2000) An analysis of cutting under different rake angles using the finite element method. Journal of Materials Processing Technology, 105(1), 143-151.

Lütjering, G., Williams, J. C. (2003) Titanium, Springer.

M'Saoubi, R., Outeiro, J., Chandrasekaran, H., Dillon Jr, O., Jawahir, I. (2008) A review of surface integrity in machining and its impact on functional performance and life of machined products. International Journal of Sustainable Manufacturing, 1(1-2), 203-236.

Manual, D. (2015) User Manual SFTC- Deform V11. Scientific Forming Technologies Corporation Ed, Columbus, OH, USA.

Nag, S. (2008) Influence of beta instabilities on the early stages of nucleation and growth of alpha in beta titanium alloys, The Ohio State University.

Nag, S., Banerjee, R., Srinivasan, R., Hwang, J., Harper, M., Fraser, H. (2009) ω-Assisted nucleation and growth of α precipitates in the Ti–5Al–5Mo–5V–3Cr–0.5 Fe β titanium alloy. Acta Materialia, 57(7), 2136-2147.

Nair, S. B. (2016) Effect of Thermomechanical Processing on Microstructure and Microtexture Evolution in Titanium Alloys, Indian Institute of Science Bangalore.

Nemat-Nasser, S., Guo, W.-G., Nesterenko, V. F., Indrakanti, S., Gu, Y.-B. (2001) Dynamic response of conventional and hot isostatically pressed Ti–6Al–4V alloys: experiments and modeling. Mechanics of Materials, 33(8), 425-439.

Nicolaou, P., Miller, J., Semiatin, S. (2005) Cavitation during hot-torsion testing of Ti-6Al-4V. Metallurgical and Materials Transactions A, 36(12), 3461.

Nouari, M., Makich, H. (2013) Experimental investigation on the effect of the material microstructure on tool wear when machining hard titanium alloys: Ti–6Al–4V and Ti-555. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 41, 259-269.

Osovski, S., Srivastava, A., Williams, J., Needleman, A. (2015) Grain boundary crack growth in metastable titanium β alloys. Acta Materialia, 82, 167-178.

Ozkutuk, M., Kaynak, Y. (2017) The effect of material parameters on chip formation in orthogonal cutting simulation of Ti-5553 Alloy. Procedia CIRP, 58, 305-310.

Özel, T., Zeren, E. (2006) A methodology to determine work material flow stress and tool-chip interfacial friction properties by using analysis of machining. Journal of manufacturing science and Engineering, 128(1), 119-129.

Özel, T., Zeren, E. (2007) Finite element modeling the influence of edge roundness on the stress and temperature fields induced by high-speed machining. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 35(3-4), 255-267.

Peters, M., Kumpfert, J., Ward, C. H., Leyens, C. (2003) Titanium alloys for aerospace applications. Advanced Engineering Materials, 5(6), 419-427.

Pu, Z., Umbrello, D., Dillon, O., Lu, T., Puleo, D., Jawahir, I. (2014) Finite element modeling of microstructural changes in dry and cryogenic machining of AZ31B magnesium alloy. Journal of Manufacturing Processes, 16(2), 335-343.

Rana, K., Rinaldi, S., Imbrogno, S., Rotella, G., Umbrello, D., Saoubi, R. M., Ayvar-Soberanis, S. (2016) 2D FE prediction of surface alteration of Inconel 718 under machining condition. Procedia CIRP, 45, 227-230.

Rotella, G., Umbrello, D. (2014) Finite element modeling of microstructural changes in dry and cryogenic cutting of Ti6Al4V alloy. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 63(1), 69-72.

Sartkulvanich, P., Altan, T., Göcmen, A. (2005) Effects of flow stress and friction models in finite element simulation of orthogonal cutting—a sensitivity analysis. Machine Science and Technology, 9(1), 1-26.

Shih, A. J. (1995) Finite element analysis of the rake angle effects in orthogonal metal cutting. International Journal of Mechanical Sciences, 38(1), 1-17.

Sima, M., Özel, T. (2010) Modified material constitutive models for serrated chip formation simulations and experimental validation in machining of titanium alloy Ti–6Al–4V. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 50(11), 943-960.

Srinivasu, G., Natraj, Y., Bhattacharjee, A., Nandy, T., Rao, G. N. (2013) Tensile and fracture toughness of high strength β titanium alloy, Ti–10V–2Fe–3Al, as a function of rolling and solution treatment temperatures. Materials & Design, 47, 323-330.

Strenkowski, J. S., Moon, K.-J. (1990) Finite element prediction of chip geometry and tool/workpiece temperature distributions in orthogonal metal cutting. Journal of Engineering for Industry, 112(4), 313-318.

Sun, Y., Huang, B., Puleo, D., Jawahir, I. (2015) Enhanced Machinability of Ti-5553 Alloy from Cryogenic Machining: Comparison with MQL and Flood-cooled Machining and Modeling. Procedia CIRP, 31, 477-482.

Tomchik, G., Dunder, T. G. (2006) Overview of Titanium Applications on Advanced Commercial Transports. AeroMat Conference, unpublished research.

Trent, E. M., Wright, P. K. (2000) Metal cutting, Butterworth-Heinemann.

Ugarte, A., M'Saoubi, R., Garay, A., Arrazola, P. (2012) Machining Behaviour of Ti-6Al-4V and Ti-5553 All0oys in Interrupted Cutting with PVD Coated Cemented carbide. Procedia CIRP, 1, 202-207.

Ulutan, D., Ozel, T. (2011) Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: a review. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 51(3), 250-280.

Umbrello, D. (2008) Finite element simulation of conventional and high speed machining of Ti6Al4V alloy. Journal of materials processing technology, 196(1), 79-87.

Umbrello, D., Caruso, S., Imbrogno, S. (2016) Finite element modelling of microstructural changes in dry and cryogenic machining AISI 52100 steel. Materials Science and Technology, 32(11), 1062-1070.

Wagner, V., Baili, M., Dessein, G. (2015) The relationship between the cutting speed, tool wear, and chip formation during Ti-5553 dry cutting. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 76(5-8), 893-912.

Wagner, V., Baili, M., Dessein, G. (2015) The relationship between the cutting speed, tool wear, and chip formation during Ti-5553 dry cutting. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 76(5-8), 893-912.

Wagner, V., Baili, M., Dessein, G., Lallement, D. (2009) Behaviour laws comparison for titanium alloys machining: Application to Ti5553. International conference on structural analysis of advanced materials.

Wagner, V., Baili, M., Dessein, G., Lallement, D. (2010) Experimental characterization of behavior laws for titanium alloys: application to Ti5553. Key Engineering Materials, Trans Tech Publ.

Wang, Q., Liu, Z., Wang, B., Song, Q., Wan, Y. (2016) Evolutions of grain size and micro-hardness during chip formation and machined surface generation for Ti-6Al-4V in high-speed machining. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 82(9-12), 1725-1736.

Wu, G., Shi, C., Sha, W., Sha, A., Jiang, H. (2013) Microstructure and high cycle fatigue fracture surface of a Ti–5Al–5Mo–5V–1Cr–1Fe titanium alloy. Materials Science and Engineering: A, 575, 111-118.

Xin, S.-W., Zhao, Y.-Q. (2006) Discussion about the heat treatment and precipitated phases of titanium alloy. Heat Treatment of Metals(China), 31(9), 39-42.

Yan, D., Hilditch, T., Kishawy, H., Littlefair, G. (2013) On quantifying the strain rate during chip formation when machining aerospace alloy Ti-5553. Procedia CIRP, 8, 123-128.

Yan, D. P., Littlefair, G., Pasang, T. (2011) Study of phase transformation and work hardening phenomenon during drilling of Ti-5553 and Ti-64. International journal of machining and machinability of materials, 10(4), 264-279.

Yen, Y.-C., Jain, A., Chigurupati, P., Wu, W.-T., Altan, T. (2004) Computer simulation of orthogonal cutting using a tool with multiple coatings. Machining science and technology, 8(2), 305-326.

Zener, C., Hollomon, J. H. (1944) Effect of strain rate upon plastic flow of steel. Journal of Applied physics, 15(1), 22-32.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

- Adı Soyadı : Melih Özkütük
- Doğum Tarihi ve Yeri : 07.06.1991, Odunpazarı/ESKİŞEHİR
- E-Posta Adresi : melihozkutuk@gmail.com

EĞİTİM BİLGİLERİ

- Lise : Eskişehir Anadolu Lisesi (2005-2009)
- Lisans : Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü (2010-2015)
- Yüksek Lisans : Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı (2015-)

GÖREV ALINAN PROJELER

- Ti-5553 Alaşımının Yüksek Kesme Hızlarında Kriyojenik,MQL ve Yüksek Basınçlı Soğutma ile Talaşlı İşlenmesi:İşleme Performansı ve Yüzey Bütünlüğü Karakterizasyonu TÜBİTAK 214M068 MAG Projesi 01/10/2015-01/07/2017 Görev: Bursiyer
- 7. Uluslararası Talaşlı İmalat Sempozyumu Marmara Üniversitesi Bap L-Tipi Proje Fen-L-100616-0276 Görev: Bilimsel Sekreterya
- Ti-5553 Alaşımın Talaşlı İmalat Sürecinin ve Yüzey Bütünlüğünün Deneysel ve Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi Marmara Üniversitesi BAP C-Tipi Proje FEN-C-YLP-090217-0062 26/01/2017- Görev: Proje Araştırmacısı

YAYINLAR

- KAYNAK, Yusuf; GHARIBI, Armin; **OZKUTUK, Melih**. Experimental and Numerical Study of Chip Formation in Orthogonal Cutting of Ti-5553 Alloy: The Influence of Cryogenic, Mql, and High Pressure Coolant Supply. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 1-18.
- **OZKUTUK, Melih**; KAYNAK, Yusuf. The Effect of Material Parameters on Chip Formation in Orthogonal Cutting Simulation of Ti-5553 Alloy. Procedia CIRP, 2017, 58: 305-310.
- GHARIBI, A; DUMAN, E; **OZKUTUK, M**; KAYNAK, Y, Comparison the effects of liquid nitrogen and carbon dioxide cryogenic coolants on progressive tool wear. 17th International Conference on Machine Design and Production, UMTIK 2016, 2016: p. 360-368.