MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLEN PASLANMAZ ÇELİK MALZEMELERİN DİK KESİLMESİNDE PLASTİK DEFORMASYON DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

ÖZHAN KITAY

DOKTORA TEZİ
Makine Mühendisliği
Anabilim Dalı

DANIŞMAN
Prof. Dr. Yusuf KAYNAK

İSTANBUL, 2024

MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLEN PASLANMAZ ÇELİK MALZEMELERİN DİK KESİLMESİNDE PLASTİK DEFORMASYON DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

ÖZHAN KITAY

(723218013)

DOKTORA TEZİ
Makine Mühendisliği
Anabilim Dalı

DANIŞMAN
Prof. Dr. Yusuf KAYNAK

İSTANBUL, 2024

ÖNSÖZ

Çalışma azmini örnek aldığım ve başarılarını ileride kendime hedef koyduğum tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Yusuf KAYNAK'a, lisansüstü eğitim hayatım boyunca bana rehberlik ettiği ve tecrübelerinden faydalanma imkânı verdiği için, nasıl iyi bir akademisyen olunacağını öğrettiği için, her zaman beni daha iyisine teşvik ettiği için, her zaman bana karşı sabırlı olduğu ve güvenini hissettirdiği için saygı ve sevgilerimi sunuyor ve teşekkür ediyorum.

Tez izleme komitesi jüri üyeleri Sayın Prof. Dr. Mihrigül Altan ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Selim Hartomacıoğlu' na tez çalışmalarıma değerli önerileri ve görüşleriyle katkı sundukları için teşekkür ediyorum.

Tezimin deneysel çalışmalarına verdiği destekten dolayı değerli dostum Emre TAŞCIOĞLU' na teşekkür ediyorum.

Lisansüstü eğitim hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen, daha iyisi için her zaman teşvik eden, karamsar ve zor zamanlarda en büyük motivasyon kaynağım ve benim için itici güç olan çok değerli Babam, Annem ve Kardeşlerime sevgilerimi sunuyor ve çok teşekkür ediyorum.

Bu tez çalışması Marmara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (BAPKO) tarafından FDK-2022-10588 Proje Numarası ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı teşekkür ediyorum.

Aralık, 2024 **Özhan KITAY**

İÇİNDEKİLER

ÖZET iv
ABSTRACT v
YENİLİK BEYANI vi
SEMBOLLER vii
KISALTMALAR viii
ŞEKİL LİSTESİ ix
TABLO LİSTESİ xiii
1. GİRİŞ 1
2. DENEYSEL TASARIM 8
2.1 Deneysel Çalışmada Kullanılan İş Malzemesi 8
2.2 Deneylerin Gerçekleştirildiği CNC Torna Tezgâhı, Katerler ve Kesici Takım 8
2.3 Soğutucu Olarak Sıvı Azot Kullanımı 9
2.4 Kesme Parametreleri 10
2.5 Kesme Kuvveti Ölçümü 11
2.6 Sıcaklık Ölçümü 11
2.7 Yüzey Bütünlüğü Analizi 12
2.7.1 Numune hazırlama çalışmaları 12
2.7.2 Sertlik ölçümü 12
2.7.3 Mikroyapı görüntüleme 13
2.7.4 X-ışını kırınımı (XRD) analizi 14
3. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA 15
3.1 Kesme Kuvvetleri 15
3.1.1 Esas kesme kuvveti 15
3.1.2 İtme kuvvetleri 18
3.1.3 Bileşke kesme kuvvetleri 21
3.2 Kesici Takım Aşınması ve Talaş Temas Analizi 22
3.3 Kesme Sıcaklığı 27
3.4 Talaş Morfolojisi 29
3.4.1 Talaş kırılabilirliği 29
3.4.2 Talaş kalınlığı 34
3.5 Mikrosertlik 37
3.5.1 Talaş sertliği 37
3.5.2 İşlenmiş malzeme sertliği 38
3.6 Mikroyapı Analizi 43

3.6.1 Talaş Mikroyapısı 43
3.6.2 İşlenmiş malzeme mikroyapısı 51
3.6.2.1 Tarama yönüne göre mikroyapı 51
3.6.2.2 İnşa yönüne göre mikroyapı 56
3.6.2.3 Etkilenmiş katman kalınlığı ve anizotropi analizi 59
3.6.2.4 Aşırı plastik deformasyon analizi 64
3.7 XRD Analizi 69
3.7.1 Kalıntı gerilme analizi 74
4. ANALİTİK HESAPLAMALAR 76
4.1 Kayma Açısı Analizi 76
4.2 Deformasyon Hızı Analizi 81
5. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ 85
5.1 Sonlu Elemanlar Analizinde Kullanılan Yaklaşım 85
5.2 Talaş Kaldırma Sürecinin Modellenmesi 85
5.3 Geleneksel ve SLE 316L Paslanmaz Çelik Malzemesi için Hassasiyet Analizi 87
6. SONUÇLAR 94

ÖZET

EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLEN PASLANMAZ ÇELİK MALZEMELERİN DİK KESİLMESİNDE PLASTİK DEFORMASYON DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Eklemeli imalat, geleneksel imalat yöntemleriyle imal edilmesi zor veya mümkün olmayan geometrideki parçaların imalatının yanı sıra hızlı prototip üretimini de mümkün kılan bir imalat yöntemidir. Birçok farklı eklemeli imalat yöntemi mevcut olsa da bunlar arasında en yaygın olanı toz yatağında ergitme prensibiyle çalışan seçici lazerle ergitme (SLE) yöntemidir.

Geleneksel 316L malzemenin mikroyapısını eş eksenli belirgin sınırlara sahip taneler oluşturmaktadır. SLE yöntemiyle imal edilen 316L malzemenin mikroyapısını ise inşa düzleminde ergime havuzları ve tarama düzleminde ise tarama izleri oluşmaktadır. Ayrıca bu yapıların iç kısımlarında mikron ve nano boyutlarında alt taneler yanı sıra dentrit yapıların düzensiz varlıkları malzemenin anizotropik bir mikroyapıya sahip olmasına neden olmaktadır. Nitekim bu tez çalışmasında olduğu gibi talaşlı imalat ikincil işlemi uygulanan SLE malzemelerin plastik deformasyon davranışları incelenirken anizotropi nedeniyle geleneksel malzemelerden farklılıklarına dikkat edilmelidir. Dolayısıyla SLE malzemenin talaşlı imalat, yüzey bütünlüğü ve anizotropi ilişkisinin plastik deformasyon davranışının iyi anlaşılması açısından değerlendirilmesi ve sonuçların geleneksel malzeme ile kıyaslanması, ürünün kullanım performansı açısından önemlidir.

Bu tez çalışmasında SLE 316L malzemesinin dik kesilmesinde farklı kesme hızları, farklı kesici takım geometrileri ve sıvı azot ile kriyojenik soğutmanın malzemenin işlenebilirliğine etkileri incelenmiştir. SLE malzemenin işlenmesinde geleneksele kıyasla daha fazla kesme kuvveti gerektiği ve takım aşınmasının daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Kesici takım geometrisinin SLE malzemenin mikroyapısında etkilenmiş katman kalınlığı ve anizotropiyi doğrudan etkilediği görülmüştür. Aynı kesme parametre ve koşullarında geleneksel malzemenin deformasyon hızı SLE malzemeye göre daha yüksek hesaplanarak malzeme farklığının etkisi ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli imalat, Talaşlı imalat, Yüzey bütünlüğü, Plastik deformasyon

ABSTRACT

INVESTIGATION OF PLASTIC DEFORMATION BEHAVIOR IN ORTHOGONAL CUTTING OF STAINLESS STEEL MATERIALS MANUFACTURED BY ADDITIVE MANUFACTURING

Additive manufacturing is a manufacturing method that enables rapid prototyping as well as the production of parts with geometries that are difficult or impossible to manufacture with traditional manufacturing methods. Although there are many different additive manufacturing methods, the most common of these is the selective laser melting (SLM) method, which works on the principle of melting in a powder bed.

The microstructure of the wrought 316L material consists of equiaxed grains with distinct boundaries. The microstructure of the SLM 316L material consists of melting pools in the built plane and scanning traces in the scan plane. In addition, the irregular presence of micron and nano-sized subgrains as well as dendritic structures in the inner parts of these structures cause the material to have an anisotropic microstructure. In fact, when examining the effect of machining as a post process on the plastic deformation behavior of SLM materials, attention should be paid to their differences from wrought materials due to anisotropy. Therefore, evaluating the relationship between machining, surface integrity and anisotropy of SLM material in terms of understanding the plastic deformation behavior and comparing the results with wrought materials is important in terms of the product's usage performance.

In this thesis, the effects of different cutting speeds, different cutting tool geometries and cryogenic cooling with liquid nitrogen on the machinability were investigated in the orthogonal cutting of SLM 316L material. It was determined that more cutting force was required and tool wear was higher in the machining of SLM material compared to wrought. It was observed that the cutting tool geometry directly affected the layer thickness and anisotropy in the microstructure of SLM material. The strain rate of the wrought material was calculated higher than the SLM material under the same cutting parameters and conditions, and the effect of the material difference was revealed.

Anahtar Kelimeler: Additive manufacturing, Machiningt, Surface integrity, Plastic deformation

YENİLİK BEYANI

Eklemeli imalat(Eİ) yöntemleri ile imal edilen parçaların kötü yüzey kalitelerini iyileştirmek için ikincil işlemlere ihtiyaç olduğu bir gerçektir. Bu amaç doğrultusunda gerek hibrit tezgâhlarda gerekse de ikincil işlem olarak talaşlı imalat en çok tercih edilen yöntemlerden biridir. Eklemeli imalat yöntemiyle imal edilen malzemelerin mikroyapılarının tarama ve inşa düzlemlerinde farklı karakteristiklere sahip olması anizotropiye sebep olmaktadır. Konvansiyonel malzemelerin talaşlı imalatında öngörülebilir sonuçlar elde edilebilirken, Eİ ile imal edilen malzemelerin anizotropik mikroyapısı öngörülebilirliği karmaşık hâle getirmektedir. Çünkü aynı kimyasal kompozisyona sahip olsalar bile konvansiyonel ve Eİ malzemelerin farklı mikroyapı ve mekanik özelliklere sahip oldukları literatürde de bilinen bir durumdur. Dolayısıyla ikincil işlem olarak talaşlı imalat uygulanmasının Eİ malzemenin plastik deformasyon davranışına etkisinin iyi anlaşılması ve aynı zamanda imal edilen ürünün kullanım performansına etkisinin işleme performansı, yüzey bütünlüğü ve anizotropi üçgeninde incelenmesi önem arz etmektedir. Literatürde Eİ 316L malzemeye talaşlı imalat uygulanan ve genel işlenebilirlik performansı ve yüzey bütünlüğü karakteristiklerine yoğunlaşılan çok sayıda çalışma mevcuttur. Ancak Eİ 316L malzemenin yüksek deformasyon hızlarında plastik deformasyon davranışının detaylı incelendiği çalışmalara ihtiyaç vardır. Bu nedenle hem Eİ hem de konvansiyonel 316L malzemesine dik kesme deneyleri uygulanmış ve sonuçlar kıyaslanmıştır. Literatürde plastik deformasyonun iyi anlaşılması için yüksek basınçlı burulma ve eşit kanal açısal presleme gibi aşırı plastik deformasyon yöntemleri kullanılmaktadır. Aynı etkiyi oluşturmak için çok düşük kesme hızında dik kesme deneyleri gerçekleştirildi. Eİ 316L malzemenin farklı kesici takım geometrilerine tepkisini anlamak ve literatürde bu konudaki boşluğu doldurmak için beş adet farklı talaş açısına sahip özel takım tutucular imal edildi. Sıvı azot ile kriyojenik koşulda dik kesme yapılarak Eİ malzemenin düşük sıcaklıklardaki deformasyon davranışı ortaya konmuştur. Analitik yöntemle Eİ ve konvansiyonel malzemenin plastik deformasyon hızı analizi yapılarak deneysel sonuçlardaki farklılıklar ispatlandı. Ayrıca sonlu elemanlar yöntemiyle deneysel olarak ölçülen kesme kuvvetlerinin ve etkilenmiş katman kalınlığının modal analizi gerçekleştirildi.

SEMBOLLER

t_0 :Kesilmemiş talaş kalınlığı (mm)

t_c :Kesilmiş talaş kalınlığı(mm)

V_c :Kesme hızı (m/dak)

F_c :Kesme kuvveti (N)

F_t :İtme kuvveti (N)

F_r :Bileşke kuvvet (N)

T :Sıcaklık (ºC)

r_c :Takım burun yarıçapı

P :Lazer gücü (W)

v :Lazer tarama hızı(mm/s)

S :Lazer tarama aralığı(mm)

t :Katman kalınlığı(mm)

γ :Kesici takım talaş açısı(º)

Å :X-ışını dalga boyu

W :Malzemenin hacimsel aşınması

K :Archard aşınma katsayısı

F :Temas kuvveti

L :Kesme uzunluğu

H :En yumuşak malzemenin sertliği

μ :Sürtünme katsayısı

σ_y :Akma gerilmesi

σ_0 :Sürtünme gerilmesi

k :Hall-Petch sabiti

D :Tane boyutu

M :Schmid faktörü

τ_c :Kritik kayma gerilmesi

Ø :Kayma açısı

θ :Birinci ve ikinci deformasyon bölgesi arasındaki açı

B :Sürtünme açısı

L :Talaş segmentleri arası mesafe

H :Talaş kalınlığı

h :Talaş segment yüksekliği

$\dot{\varepsilon}$:Deformasyon hızı

KISALTMALAR

Eİ :Eklemeli imalat

SLE :Seçici lazerle ergitme

CAD :Bilgisayar destekli tasarım

YMK :Yüzey merkezli kübik

MQL :Minimum miktarda yağlama

LN_2 :Sıvı azot

APD :Aşırı plastik deformasyona

HNO_3 :Nitrik asit

HCl :Hidroklorik asit

SEM :Taramalı elektron mikroskobu

OM :Optik mikroskop

XRD : X-ışını difraksiyonu

FWHM:XRD piklerinin orta noktalarındaki genişlik

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1. SLE çalışma prensibi [10] 1
Şekil 1.2. Paslanmaz çeliklerin gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi [15] 3
Şekil 1.3. a)SLE 316L malzemenin inşa yönünden mikroyapı görüntüsü, b)geleneksel 316L mikroyapı görüntüsü 4
Şekil 2.1. a)SLE parça imalatında eksenler, b)Dik kesme için disk yapılmış SLE malzeme 8
Şekil 2.2. Dik kesme deneylerinin yapıldığı CNC torna tezgâhı 9
Şekil 2.3. Deneysel tasarım 9
Şekil 2.4. Kriyojenik soğutucunun kesme bölgesine uygulanışı 10
Şekil 2.5. Kuvvet dönüştürücü ve Dynoware yazılımına ait ekran görüntüsü 11
Şekil 2.6. (a) Termal kamera, (b) Sıcaklık ölçüm ekranı 11
Şekil 2.7. a)Hassas kesme cihazı b)Zımparalama ve parlatma cihazı 12
Şekil 2.8. Vickers sertlik ölçme cihazı 13
Şekil 2.9. Dijital optik mikroskop 13
Şekil 2.10. Yüzey bütünlüğü analizleri için numune hazırlama ve inşa edilmiş SLE mikroyapısı 14
Şekil 2.11. XRD ölçüm cihazı 14
Şekil 2.12. İşlem görmemiş SLE ve geleneksel 316L malzemenin XRD modelleri 14
Şekil 3.1. SLE parçaların kuru ve kriyojenik koşullarda dik tornalanmasında ölçülen esas kesme kuvvetleri (γ= -3°) 15
Şekil 3.2. SLE ve geleneksel parçaların kuru ve kriyojenik koşullarda dik tornalanmasında ölçülen esas kesme kuvvetlerinin kıyaslaması (γ= -3°) 16
Şekil 3.3. SLE parçaların farklı talaş açısına sahip kesici takımlarla dik tornalanmasında ölçülen esas kesme kuvvetleri 17
Şekil 3.4. SLE ve geleneksel parçaların farklı talaş açısına sahip kesici takımlarla dik tornalanmasında ölçülen esas kesme kuvvetlerinin kıyaslaması 18
Şekil 3.5. SLE parçaların tornalanmasında ölçülen itme kuvvetleri (α= -3°) 19
Şekil 3.6. SLE ve geleneksel parçaların dik tornalanmasında ölçülen itme kuvvetleri (γ= -3°) 19
Şekil 3.7. SLE parçaların farklı talaş açısına sahip kesici takımlarla dik tornalanmasında ölçülen itme kuvvetleri 20
Şekil 3.8. SLE ve geleneksel parçaların farklı talaş açısına sahip kesici takımlarla dik tornalanmasında ölçülen itme kuvvetlerinin kıyaslaması 20
Şekil 3.9. SLE ve geleneksel parçaların dik tornalanmasında hesaplanan bileşke kuvvetlerinin kıyaslaması (γ= -3°) 21
Şekil 3.10. SLE parçaların farklı talaş açısına sahip kesici takımlarla dik tornalanmasında hesaplanan bileşke kuvvetleri 21
Şekil 3.11. SLE ve geleneksel parçaların farklı talaş açısına sahip kesici takımlarla dik tornalanmasında hesaplanan bileşke kuvvetlerinin kıyaslaması 22
Şekil 3.12. SLE parçaların dik tornalanmasında kesme hızı ve koşuluna bağlı oluşan takım-talaş temas bölgesi resimleri(Takım talaş yüzeyi) (γ= -3°) 23
Şekil 3.13. SLE ve geleneksel parçaların dik tornalanmasında oluşan takım-talaş bölgesi resimleri (Takım talaş yüzeyi) (γ= -3°) 24
Şekil 3.14. SLE parçaların farklı talaş açısına sahip kesici takımlarla dik tornalanmasında oluşan takım-talaş temas bölgesi resimleri (Takım talaş yüzeyi) 24

Şekil 3.15. SLE ve geleneksel parçaların farklı talaş açısına sahip kesici takımlarla dik tornalanmasında oluşan takım-talaş temas bölgesi resimleri(Takım talaş yüzeyi) 26
Şekil 3.16. Geleneksel ve SLE malzemelerin talaş kaldırma işlemi boyunca sürtünme katsayısı (V_c= 30 m/dak) 27
Şekil 3.17. SLE ve geleneksel parçaların tornalanmasında ölçülen ortalama kesme sıcaklıklarına kriyojenik soğutucunun etkisi (γ= -3°) 28
Şekil 3.18. SLE ve geleneksel parçaların farklı talaş açısına sahip kesici takımlarla dik tornalanmasında ölçülen ortalama kesme sıcaklıkları 28
Şekil 3.19. SLE parçaların dik tornalanmasında elde edilen talaşların resimleri (γ= -3°) 29
Şekil 3.20. SLE ve geleneksel parçaların dik tornalanmasında elde edilen talaşların resimleri (γ= -3°) 30
Şekil 3.21. SLE parçaların farklı talaş açısına sahip kesici takımlarla dik tornalanmasında elde edilen talaşların resimleri 32
Şekil 3.22. SLE ve geleneksel parçaların farklı talaş açısına sahip kesici takımlarla dik tornalanmasında elde edilen talaşların resimleri 33
Şekil 3.23. SLE ve geleneksel parçaların tornalanmasında elde edilen talaşların OM resimleri (γ= -3°) 34
Şekil 3.24. SLE ve geleneksel parçaların dik tornalanmasında elde edilen talaşların OM resimlerinden ölçülen talaş kalınlıkları (γ= -3°) 35
Şekil 3.25. SLE ve geleneksel parçaların farklı talaş açısına sahip kesici takımlarla dik tornalanmasında elde edilen talaşların OM resimleri 36
Şekil 3.26. SLE ve geleneksel parçaların farklı talaş açısına sahip kesici takımlarla dik tornalanmasında elde edilen talaşların OM resimlerinden talaş kalınlıkları 36
Şekil 3.27. SLE ve geleneksel parçaların dik tornalanmasında elde edilen talaşların ölçülen mikrosertlik değerleri (γ= -3°) 37
Şekil 3.28. SLE ve geleneksel parçaların farklı talaş açısına sahip kesici takımlarla dik tornalanmasında elde edilen talaşların ölçülen mikrosertlik değerleri 38
Şekil 3.29. Kuru ve kriyojenik koşullarda işlenmiş SLE ve geleneksel numunelerin sertlik değerleri a)Vc=7.5 m/dak b)Vc=120 m/dak (γ= -3°) 39
Şekil 3.30. Kuru ve kriyojenik koşulda işlenmiş SLE numunelerin sertlikleri (Vc= 7.5 m/dak) a)İnşa yönü ve b)Tarama yönü 41
Şekil 3.31. Kesici takım talaş açısı farklılığının işlenmiş SLE malzeme sertliğine etkisi 42
Şekil 3.32. Kesici takım talaş açısı farklılığının SLE ve geleneksel işlenmiş numune sertliğine etkisinin kıyaslaması a)Vc= 7.5 m/dak b)Vc= 120 m/dak 43
Şekil 3.33. SLE parçaların dik tornalanmasında elde edilen talaşların mikroyapı görüntüleri (γ= -3°) 44
Şekil 3.34. SLE ve geleneksel parçaların dik tornalanmasında elde edilen talaşların mikroyapı görüntülerinin kıyaslaması (γ= -3°) 45
Şekil 3.35. SLE parçaların farklı talaş açısına sahip kesici takımlarla dik tornalanmasında elde edilen talaşların mikroyapı görüntüleri 47
Şekil 3.36. SLE ve geleneksel parçaların farklı talaş açısına sahip kesici takımlarla dik tornalanmasında elde edilen talaşların mikroyapı görüntüleri 48
Şekil 3.37. SLE ve geleneksel talaşların birim zamandaki segment oluşum sayılarının kıyaslaması 49
Şekil 3.38. SLE ve geleneksel talaşların kayma bant oluşum mekanizmalarının kıyaslaması 50
Şekil 3.39. Tornalanan SLE parçaların tarama yönünde mikroyapı görüntüleri (γ= -3°) 52

Şekil 3.40. SLE ve geleneksel parçaların kuru ve kriyojenik koşulda tornalanmasında tarama yönünde elde edilen mikroyapı görüntüleri (γ= -3°) 53
Şekil 3.41. Farklı talaş açısına sahip kesici takımlarla tornalanan SLE parçaların tarama yönünde elde edilen mikroyapı görüntüleri 54
Şekil 3.42. Farklı talaş açısına sahip kesici takımlarla tornalanan SLE ve geleneksel parçaların tarama yönünde mikroyapı görüntüleri 55
Şekil 3.43. Tornalanmış SLE parçaların inşa yönünde mikroyapı görüntüleri (γ= -3°) 57
Şekil 3.44. Farklı talaş açısına sahip kesici takımlarla tornalanan SLE parçaların inşa yönünde elde edilen mikroyapı görüntüleri 58
Şekil 3.45. Farklı talaş açısına sahip kesici takımlarla tornalanan SLE ve geleneksel parçaların inşa yönünde mikroyapı görüntüleri 59
Şekil 3.46. Kesme hızının bir fonksiyonu olarak işlenmiş SLE numunelerin etkilenmiş katman görüntüleri a) γ= -6°, b) γ= -3°, c) γ= 0°, d) γ= 3° ve e) γ= 6° 62
Şekil 3.47. Farklı talaş açısı değerlerinde işlenmiş SLE numunelerin etkilenmiş katman kalınlıkları a) V_c=7.5 m/dak, b) V_c=30 m/dak c) V_c=120 m/dak 63
Şekil 3.48. SLE malzeme tarama ve inşa yönüne göre etkilenmiş katman kalınlıkların kontur plot grafiği 63
Şekil 3.49. Geleneksel malzemenin etkilenmiş katman mikroyapı incelemesi 64
Şekil 3.50. İşlenmiş SLE ve geleneksel malzeme mikroyapısı (V_c=7.5 m/min) 65
Şekil 3.51. SLE işlem görmemiş numune mikroyapısı: a) ve b) inşa yönü, c) tarama yönü, d) geleneksel işlem görmemiş 66
Şekil 3.52. SLE malzeme talaş kaldırma işlemi süresince kesme sıcaklığı değişimi (V_c= 7.5 m/dak) 67
Şekil 3.53. 7.5 m/dak kesme hızında işlenmiş SLE numunelerin SEM görüntüleri a) ve b) kuru işlenmiş numune inşa yönü, c) kuru işlenmiş numune tarama yönü ve d) kriyojenik işlenmiş numune tarama yönü 68
Şekil 3.54. SLE 316L malzemelerin 7.5 m/dak kesme hızında kuru ve kriyojenik koşulda XRD modeli (γ= -3°) 70
Şekil 3.55. SLE 316L malzemelerin 30 m/dak kesme hızında kuru ve kriyojenik koşulda XRD modeli (γ= -3°) 70
Şekil 3.56. SLE 316L malzemelerin 120 m/dak kesme hızında kuru ve kriyojenik koşulda XRD modeli (γ= -3°) 71
Şekil 3.57. SLE 316L malzemelerin talaş açısına göre kuru kesme koşulunda XRD modeli (Vc=7.5 m/dak) 71
Şekil 3.58. SLE ve geleneksel 316L malzemelerin 7.5 m/dak kesme hızındaki kuru ve kriyojenik XRD modeli (γ= -3°) 72
Şekil 3.59. SLE ve geleneksel 316L malzemelerin 120 m/dak kesme hızındaki kuru ve kriyojenik XRD modeli (γ= -3°) 73
Şekil 3.60. SLE ve geleneksel 316L malzemelerin 7.5 m/dak kesme hızındaki talaş açısına göre xrd modeli 74
Şekil 3.61. Bragg kanunu şematik gösterimi ve düzlemler arası mesafe ile difraksiyon pik pozisyonu ilişkisi 75
Şekil 4.1. SLE malzeme talaşına ait kayma açısı tayini görüntüsü 76
Şekil 4.2. SLE parçaların ölçülen kayma açıları (γ= -3°) 77
Şekil 4.3. SLE ve geleneksel parçaların ölçülen kayma açılarının kıyaslaması (γ= -3°) 78
Şekil 4.4. SLE parçaların farklı talaş açısına sahip kesici takımlarla tornalanmasının ölçülen kayma açsına etkisi 79

Şekil 4.5. SLE ve geleneksel parçaların farklı talaş açısına sahip kesici takımlarla tornalanmasının ölçülen kayma açılarına etkisi 80
Şekil 4.6. Deformasyon hızı analizlerinde kullanılan talaş ölçülerinin alınma yöntemlerinin şematik gösterimi 81
Şekil 4.7. Li modeline göre hesaplanan deformasyon hızları 82
Şekil 4.8. Merchant teorisine göre deformasyon hızları 83
Şekil 4.9. Talaş açısının ve kesme hızının malzemelerin deformasyon hızlarına etkisi 85
Şekil 5.1. Farklı talaş açısı değerleri için simülasyon tasarımı gösterimi 86
Şekil 5.2. Simülasyon deneylerinde iş parçası ve kesici takım için tanımlanmış ağ yapısı ve sınır koşulları 86
Şekil 5.3. Geleneksel 316L için farklı kayma faktörlerinde oluşan kesme kuvvetleri (Vc=7.5 m/dak, γ=6°) 87
Şekil 5.4. SLE 316L içim farklı kayma faktörü değerlerinde tahmin edilen kesme kuvvetleri 88
Şekil 5.5. SLE 316L malzeme tanımlaması yapıldıktan sonra tahmin edilen kesme kuvvetleri 89
Şekil 5.6. Geleneksel malzemenin deneylerde ölçülen ve simülasyonla tahmin edilen kesme kuvveti değerlerinin kıyaslaması a)γ= -6°, b) γ= -3°, c) γ= 6° 89
Şekil 5.7. SLE malzemenin deneylerde ölçülen ve simülasyonla tahmin edilen kesme kuvveti değerlerinin kıyaslaması a)γ= -6°, b) γ= -3°, c) γ= 6° 90
Şekil 5.8. SLE ve geleneksel malzemelerin dik kesme deneylerinde ölçülen ve simülasyonla tahmin edilen kesme kuvvetlerinin farklı talaş açısı değerlerinde kıyaslaması a) Vc=7.5 m/dak, b)Vc=120 m/dak 91
Şekil 5.9. Farklı talaş açısı değerlerinde SLE ve geleneksel simülasyon gerinim analizi (Vc=7.5m/dak) 92
Şekil 5.10. Kesme hızına bağlı olarak SLE ve geleneksel simülasyon gerinim analizi (γ= -6°) 93

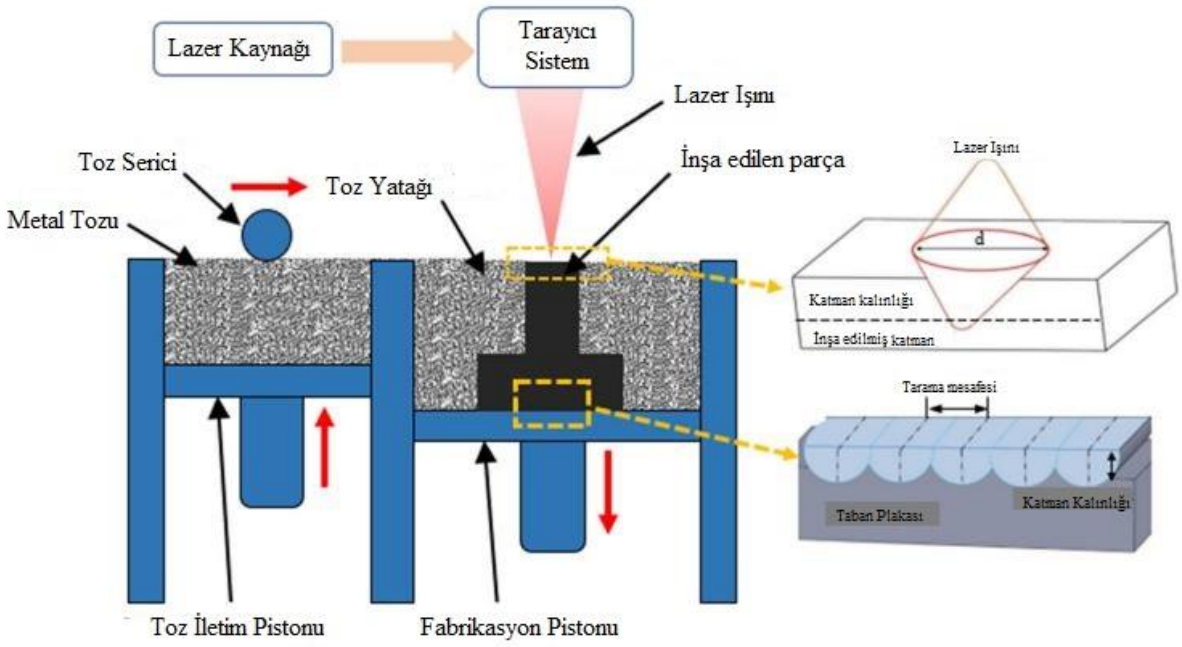
TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1. SLE ile parça imalatında seçilen proses parametreleri 8
Tablo 2.2. Kesme koşulları ve parametreleri 10
Tablo 3.1.. Farklı talaş açısı değerlerinde işlenmiş SLE ve geleneksel numunelerin XRD pik alan analizi 74
Tablo 3.2. SLE ve geleneksel numunelerin XRD analiziyle elde edilen pik değerleri ve gerilim analizi (γ= -3°) 76
Tablo 4.1. Ölçülen ve hesaplanan kayma açıları arasındaki yüzdesel farklar 78
Tablo 4.2. Ölçülen ve hesaplanan kayma açıları arasındaki yüzdesel farklar 78
Tablo 4.3. Ölçülen ve hesaplanan kayma açıları arasındaki yüzdesel farklar 79
Tablo 4.4. Ölçülen ve hesaplanan kayma açıları arasındaki yüzdesel farklar 80
Tablo 5.1. SLE ve geleneksel 316L malzemenin mekanik özellikleri [23] 85
Tablo 5.2. SLE 316L paslanmaz çelik malzemesi için J-C bünye denklem parametreleri [62] 88
Tablo 5.3. Geleneksel ve SLE 316L paslanmaz çelik malzemesinin deneylerde ölçülen ve simülasyonla tahmin edilen kesme kuvvetlerinin sayısal değerleri, $F_{C,}$ (N) 91

1. GİRİŞ

Metal eklemeli imalat, tasarım mühendislerine geleneksel imalat yöntemleriyle imal edilmesi zor ya da imkânsız olan karmaşık şekilli ürünleri tasarlayıp imal edebilme imkânı ve kolaylığı sağlayan bir teknoloji ve imalat yöntemidir [1]. Eklemeli imalat (Eİ) ayrıca tasarlanan bir nesnenin prototipinin hızlı bir şekilde üretilmesini mümkün kılmaktadır [2]. Bu avantajlarından dolayı özellikle havacılık, tıp ve otomotiv uygulamalarında kullanımı yaygınlaşmıştır [3]. Literatürde farklı çalışma prensiplerine sahip birçok eklemeli imalat yöntemi bulunmaktadır [4] ve bu yöntemler ISO/ASTM 52900:15 standardı altında toplanmıştır [5].

Seçici lazerle ergitme (SLE), en yaygın Eİ yöntemlerinden biridir [6]. SLE yöntemi bir yatağa serilen metal tozlarının çok yüksek sıcaklıktaki lazer ışınıyla tasarlanan CAD modeline uygun şekilde ergitilmesiyle birbirine bağlanması ve bu işlemin yeniden yatağa toz serilmesiyle CAD modeli oluşana kadar katman katman tekrar edilmesi prensibiyle çalışmaktadır. Şekil 1.1' de SLE yönteminin çalışma prensibi şematik olarak gösterilmiştir. SLE yöntemiyle imal edilen metal malzemeler, geleneksel yöntemlerle imal edilen malzemelere göre farklı mikroyapı özelliklerine sahiptir [7]. Metal tozlarının çok hızlı ısıtma-soğuma geçişlerine maruz kalması sonucunda SLE yöntemiyle imal edilen parçaların iç yapısında artık gerilmeler bulunmaktadır [8]. Ayrıca tarama ve inşa yönlerinde farklı mikroyapı özelliklerine sahiptirler [9]. Bu durum malzemenin anizotropik bir dokuya sahip olmasına neden olur.



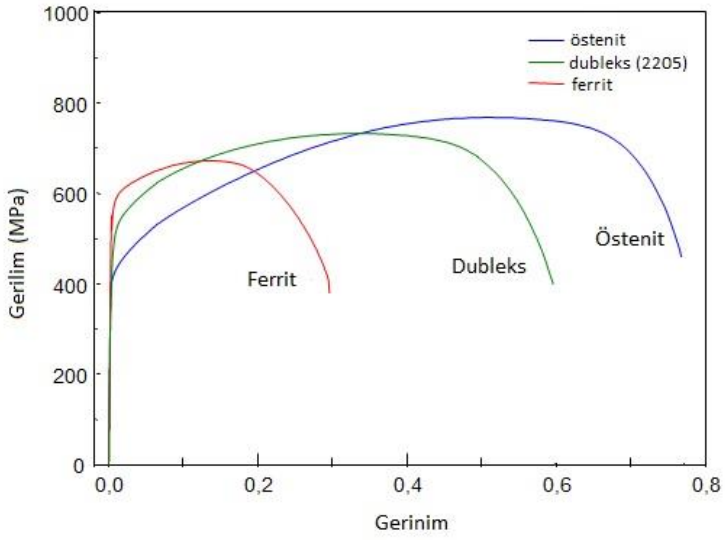
Şekil 1.1. SLE çalışma prensibi [10]

Eklemeli imalatla üretilen parçalar, özellikle "merdiven basamağı" etkisinden kaynaklanan zayıf yüzey kalitesi nedeniyle, son kullanımdan önce fonksiyonel yüzeyler için son işlem gerektirir [11,12]. Talaşlı imalat, ikincil işlem olarak uygulanabilmekte veya hibrit makinelerde eklemeli imalat (Eİ) ve talaşlı imalat aynı anda uygulanabilmektedir. Talaşlı imalat, Eİ parçalarının yüzey kalitesini ve geometrik toleranslarını iyileştirmektedir [13], ancak aynı zamanda yüzey altı bölgesindeki yüzey bütünlüğü karakteristiklerini ve dolayısıyla ürün performansını da olumlu veya olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu nedenle talaşlı imalat sonrası etkinin iyi anlaşılması gerekmektedir.

Literatürdeki yaygın kanı, geleneksel ve Eİ yöntemleriyle imal edilen aynı tip malzemelerin farklı mekanik özelliklere sahip olduğu yönündedir. Bu durum aslında Eİ yönteminin kendi içindeki dinamiklerle ilgilidir. SLE yönteminde lazer gücü (P), tarama hızı (v), tarama aralığı (S) ve katman kalınlığının (t) sonucu olan enerji yoğunluğu, malzemenin fiziko-mekanik ve mikroyapısal özelliklerini doğrudan etkilemektedir (Denklem 1) [14].

$$Enerji\ yoğunluğu = \frac{Güç}{Tarama\ hızı \times Tarama\ aralığı \times katman\ kalınlığı} \quad (1)$$

316L östenitik paslanmaz çelik yüzey merkezli kübik (YMK) yapıya sahiptir. Geleneksel östenitik paslanmaz çeliklerin net bir akma noktası yoktur. Şekil 1.2' de paslanmaz çeliklerin gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri gösterilmektedir [15]. Akma dayanımının %40'ı kadar düşük bir seviyede deformasyon oluşmaya başlayabilir. Akma dayanımının yarısından azı tamamen elastik kabul edilirken, akma dayanımının üçte ikisinin altındaki gerilimler ihmal edilebilir plastik deformasyona neden olur. Bu yarı elastik davranış, YMK yapısındaki birçok aktif kayma sisteminin sonucudur [16]. Günümüzde otomotiv, biyomedikal sektörleri başta olmak üzere yaygın kullanım alanı olan 316L östenitik paslanmaz çelik malzemenin sergilemiş olduğu yüksek mekanik özellikleri, diğer paslanmaz çeliklere oranla daha düşük termal iletkenlik ve deformasyon karşısında mikroyapısal özellikleri dolayısıyla kesilmesi zor malzeme grubunda yer almaktadır. Bahsedilen özellikleri nedeniyle mevcut paslanmaz çelik malzemelere kıyasla işlenebilirlik özellikleri daha düşük olan bu malzemelerin talaşlı imalatı sırasında pekleşme eğilimi göstermesi ve buna bağlı olarak vibrasyon ve düzensiz talaş oluşumu diğer olumsuz özellikleri olarak ön plana çıkmaktadır [17]. Eİ uygulamalarında proses parametrelerine bağlı olarak farklı mikroyapısal ve mekanik özellikler elde edilmesi bu durumu daha da karmaşık hale getirmekte ve işlenebilirliğe etkisinin incelenmesi önemli hale gelmektedir.

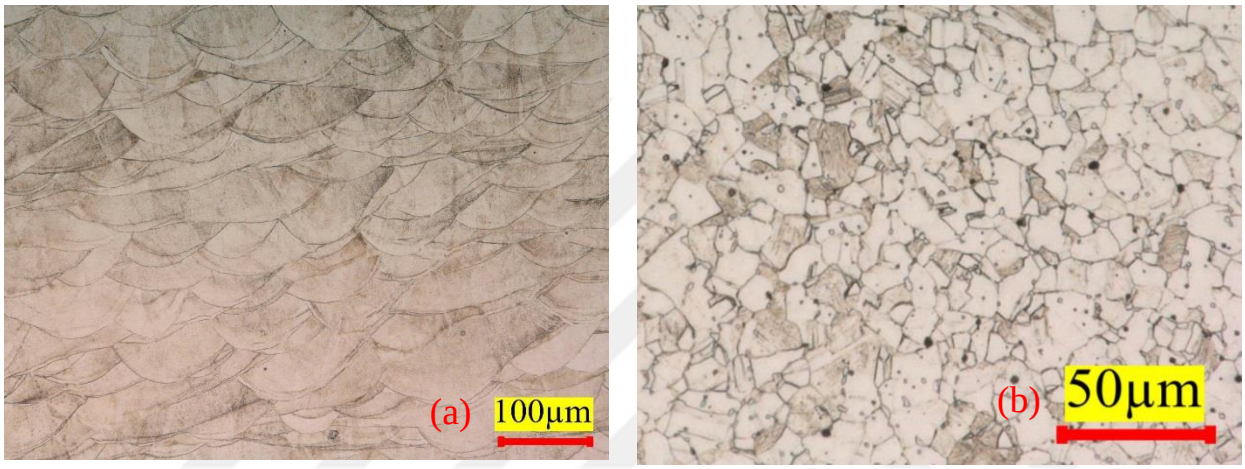


Şekil 1.2. Paslanmaz çeliklerin gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi [15]

Eİ parçalarının üretim sürecinde inşa ve tarama düzlem yönleri malzemede anizotropi yaratmaktadır [18]. Ergime havuzu, alt tanecikler ve sütunlu dendritler gibi mikroyapı özelliklerinin miktarı ve boyutu, lazer gücü, tarama hızı, tarama mesafesi vb. gibi seçilen SLE yöntemi üretim parametrelerinin etkisine bağlı olarak değişmektedir [19]. Bu üretim parametrelerinin bir veya daha fazlasında yapılan değişiklikler aynı zamanda ürünün mekanik, anizotropik ve yorulma özellikleri üzerinde de etkiye sahip olmaktadır. Operatör kontrolünün yanı sıra online [20] ve offline [21] kalite kontrol süreçleri sayesinde optimum SLE işlem parametrelerini belirleyerek her ürünü aynı kalitede oluşturmak mümkündür. Böylece öngörülebilir özelliklere sahip ürünler üretilebilmektedir. Bununla birlikte, toz malzeme katmanının düzensiz dağıtımı, lazer ışınındaki değişikliklerden kaynaklanan optimum proses parametrelerindeki sapmalar, optik bileşenlerin ve tarama sisteminin etkisi, metalürjik gözenekler ve yüksek iç gerilimler gibi hatalar nedeniyle öngörülemeyen arıza durumları yine de yüksek sıcaklık değişimleri nedeniyle parçalarda ortaya çıkabilir.

Talaşlı imalat çalışma prensibi basit olmasına rağmen çoğu zaman iş parçasının özelliklerini doğrudan etkileyecek öngörülemeyen dinamiklerden oluşur. İşleme sırasında talaş sarma, takım-iş parçası sürtünmesi, takım aşınması, makine rijitliği ve termo-mekanik etkiler gibi kontrol edilemeyen dinamikler, işlenen parçanın yüzey bütünlüğü özelliklerini ve nihai performansını etkiler [22]. Tüm bu faktörler bir arada ele alındığında, SLE parçalarının talaşlı imalat sonrası yüzey bütünlüğü özelliklerinde meydana gelen değişikliklerin son ürün performansı açısından son derece karmaşık ve hayati önemde olacağı açıktır. Bunun nedeni, eş eksenli tane yapısına sahip geleneksel 316L için talaşlı imalat sonuçlarının öngörülebilir

olmasıdır. Ancak geleneksel malzeme için optimum işleme parametrelerinin anizotropik karakteristiğe sahip SLE 316L için de uygun olup olmadığı belirsizdir. Aynı kimyasal bileşime sahip olmalarına rağmen SLE malzemelerinin geleneksel malzemelere göre daha yüksek sertliğe ve daha az sünekliğe sahip olması bu durumu desteklemektedir [23]. Bu nedenle SLE 316L malzemesinin işlenmesinde, proses parametrelerinin yüzey bütünlüğü özelliklerindeki değişikliklere etkisinin ve bunların deformasyon davranışı ile ilişkisinin belirlenmesi gerekmektedir. Anizotropideki değişiklikleri anlamak için geleneksel 316L ile karşılaştırmak önemlidir. Şekil 1.3' te SLE ve geleneksel 316L malzemelere ait işlem görmemiş mikroyapı resimleri gösterilmiştir.



Şekil 1.3. a)SLE 316L malzemenin inşa yönünden mikroyapı görüntüsü, b)geleneksel 316L mikroyapı görüntüsü

Çeşitli çalışmalar Eİ 316L paslanmaz çeliğin işlenmesinin yalnızca parça yüzey kalitesini değiştirmekle kalmayıp aynı zamanda işleme parametrelerinin ve soğutma stratejilerinin bir fonksiyonu olarak artık gerilimlere ve mikroyapıda, tane boyutunda ve sertlikte değişikliğe neden olduğunu göstermektedir. [24,25]. İşleme kaynaklı artık gerilimler yorulma ömrünü doğrudan etkilemektedir [26]. Gerilmenin basma yönünde olması yüzey bütünlüğünü olumlu yönde etkiler. Basma gerilmeleri yorulmaya bağlı çatlak oluşumunun önlenmesine katkıda bulunurken, çekme gerilmeleri yorulma ömrünü azaltan çatlak oluşumuna zemin hazırlamaktadır [27].

Literatürde talaşlı imalat işleminin SLE 316L malzemesine uygulanabilirliği konusunda bazı çalışmalar bulunmaktadır. Kaynak ve Kıtay, kesme hızı ve ilerlemenin Eİ 316L'nin mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. İşlenen yüzeyde oluşan nanometre boyutunda alt tanecikler, malzemede tane küçülme etkisi yaratarak sertliği %17'ye kadar arttırmıştır [25].

Diğer çalışmalarında ise soğuk hava uygulamasının malzemenin sertliğine ve mikroyapısına etkisini araştırmışlardır. Soğuk hava, işlenmiş yüzeyde homojen bir mikroyapı ve daha sert bir yüzey oluşturmuştur [24]. Benzer çalışmalarda talaşlı imalat, SLE malzemelerin sertliğini arttırmış ve bu sertliklerin işlenmiş geleneksel malzemelere göre daha yüksek olduğu görülmüştür [28-30]. Görüldüğü gibi Eİ 316L işlenmesi ile ilgili çalışmalarda malzemenin mekanik özelliklerinin yanı sıra genel talaşlı imalat tepkisi ve yüzey bütünlüğü karakteristiklerine odaklanılmıştır. Ancak Eİ 316L işlemede soğutma stratejilerini inceleyen çalışmalar oldukça sınırlıdır. Eİ 316L malzemesi ile ilgili literatürde farklı soğutma ve yağlama koşullarında, özellikle kriyojenik koşullarda yapılan işlenebilirlik çalışmaları henüz mevcut değildir. Aslında kriyojenik soğutma, minimum miktarda yağlama (MQL), kesme sıvısı kullanılarak çeşitli Eİ malzemelerle gerçekleştirilen talaşlı imalat çalışmaları mevcuttur. Ancak çoğunlukla Ni ve Ti bazlı alaşım malzemeleri kriyojenik olarak incelenmiştir. [31-33].

Eİ parçalarının karmaşık anizotropik yapıları nedeniyle, bunların talaşlı imalata tepkileri son zamanlarda yapılan çalışmaların konusu olmuştur [34]. Ancak Eİ malzemelerinin işlenmesinde deformasyon ve sıcaklık arasındaki bağlantı henüz tam olarak anlaşılamamıştır. Birincil deformasyon bölgesinde yüksek sıcaklığın oluşması takım aşınmasını, yüzey bütünlüğünü ve talaş oluşum mekanizmasını doğrudan etkiler [35]. Deformasyon hızı ile talaş formu arasındaki ilişki ise mutlaktır. Çünkü sıcaklık ve deformasyon hızının sonucu olarak testere tip talaşların oluşum mekanizması tetiklenir. Açıkçası, yüksek sıcaklık ve düşük deformasyon hızı, metalde plastik deformasyon oluşması için gerekli gerilimin azaltılmasının temelini oluşturur [36]. Özellikle, soğutma koşullarının sıcaklığı düşürmesinin deformasyon hızı ve plastik deformasyon üzerindeki etkisi Eİ malzemeler özelinde araştırılmalıdır.

Literatürde 316L ve farklı malzemelerden Eİ yöntemleriyle üretilen parçaların talaşlı imalat performansını ve yüzey bütünlüğünü inceleyen çalışmaların varlığı açıktır. Ancak bu çalışmaların kapsamı incelendiğinde talaş kaldırmanın etkisinin yüzey pürüzlülüğü ve topoğrafya, artık gerilme, mikroyapı vb. gibi sınırlı sayıda yüzey bütünlüğü özellikleri açısından incelendiği anlaşılmaktadır [37,32,8]. Malzemenin plastik deformasyon davranışını ve plastik deformasyona neden olan mekanizmaları anlamak için detaylı bir çalışmaya ihtiyaç olduğu açıktır. Bunu anlamanın en iyi yollarından biri aşırı plastik deformasyona (APD) sebep olacak işleme parametrelerinde malzemede plastik deformasyon oluşma davranışını incelemektir. Ayrıca SLE 316L malzemesi için farklı soğutma ve yağlama koşullarında özellikle kriyojenik koşullarda yürütülen çalışmalarda henüz mevcut değildir. Kriyojenik işleme olarak çoğunlukla Ni ve Ti bazlı alaşımlı malzemeler üzerinde çalışılmaktadır [31-33].

APD aslında dökme malzemelerin ultra ince taneli bir mikro yapıya sahip olması için kullanılan bir yöntemdir. Malzemede APD oluşturmak için yüksek basınçlı burulma ve eşit kanal açısal presleme gibi farklı yöntemler mevcuttur [38,39]. Ancak bu yöntemlerde sıcaklık, gerinim ve deformasyon hızının birleşik etkilerini incelemek mümkün değildir. Talaşlı imalatta bu faktörler dikkate alınarak kontrollü bir APD operasyonu gerçekleştirmek mümkündür [40]. Talaşlı imalat şu anda Eİ parçaları için bir son işleme tekniği olarak yüzey bütünlüğü özelliklerini geliştirmek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir [41-43]. Eİ parçalarda talaşlı imalat ile APD oluşturulması, fonksiyonel yüzeylerde ultra ince taneli mikroyapı oluşumunu sağlayarak anizotropik mikroyapının homojenleşmesine katkı sağlayacak ve iyi mekanik özellikler elde edilecektir.

Talaşlı imalat, malzemenin mekanik ve mikroyapısal özelliklerini doğrudan değiştirir. Bu durum malzemeye etki eden termal, mekanik ve kimyasal etkilerden kaynaklanmaktadır. Malzemede plastik deformasyonun meydana gelmesi bu etkilerin kritik seviyelerde gerçekleşmesine bağlıdır. Açıkçası, yüksek sıcaklık ve düşük deformasyon hızı, metalde plastik deformasyon oluşması için gerekli gerilimin azaltılmasının temelini oluşturur [36]. Bu tezde bahsedilen gerilme koşullarının SLE malzemesi üzerindeki etkilerini göstermek için uygun talaşlı imalat parametreleri seçilmiştir. Kuru ve kriyojenik koşullardaki farklı sıcaklıkların, düşük kesme hızına bağlı olarak malzemenin plastik deformasyonuna etkisi tüm yönleriyle araştırılmıştır.

Eİ yöntemiyle imal edilmiş malzemelerin talaşlı imalatında kesme parametreleri ve koşulları dışında plastik deformasyona etki edecek bir diğer parametre kesici takımın geometrisi olarak ön plana çıkmaktadır. Farklı talaşlı imalat stratejilerinin farklı eklemeli imalat teknolojileri ile imal edilen ürünlere son işlem olarak uygulanabilirliğini inceleyen birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalardan birinde [31] Eİ Ti6Al4V alaşımının işlenmesinde kesme parametrelerinin kesici takım aşınması üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Geleneksel malzemeyle kıyaslandığında daha fazla abrasif aşınma ve oksit tabakalarının oluştuğu gözlemlenmiştir. Bir başka çalışmada [44] Eİ Ti6Al4V alaşımının işlenmesi sırasında takım serbest yüzeyi ve krater aşınması araştırılmıştır. Geleneksel malzemeyi işlerken kesici takımda daha az serbest yüzey aşınmasının meydana geldiği gözlemlenmiştir. Diğer bir çalışmada [45] Eİ Ti alaşımının delme performansı geleneksel alaşımla karşılaştırılmıştır. Geleneksel malzeme için daha az kesme kuvveti ölçülmüştür. Ayrıca geleneksel malzemeyi delmede takım üzerinde az miktarda mikrotalaşlanma olurken, Eİ malzemeyi delmede takımda kaplama soyulması meydana gelmiştir. Başka bir çalışmada [46] farklı kesme parametrelerinin Eİ Inconel 718 alaşımının

mikroyapısı ve takım aşınması üzerindeki etkisine odaklanılmıştır. Öte yandan Eİ 316L paslanmaz çeliğin işlenmesi ile ilgili çalışmaların çoğunlukla yüzey bütünlüğü özellikleri ve işlenebilirlik kapasitesi üzerine odaklanıldığı görülmektedir. Diğer çalışmada [34] Eİ 316L' nin tipik kesme tepkisi ve mikroyapısı incelenmiştir. Aynı kesme parametrelerinde yapılan geleneksel malzeme işlemeye kıyasla Eİ malzemede daha derin bir beyaz katman oluşumu gözlemlenmiştir. Bir başka çalışmada [24] işleme parametrelerinin etkisi incelenmiş ve Eİ 316L'nin işlenmiş yüzeyinde plastik deformasyon nedeniyle nano boyutlu homojen eş eksenli tanelerin oluşumu gösterilmiştir. Diğer bir çalışmada işleme parametrelerinin Eİ 316L malzemesinin mikrosertliği üzerindeki etkisi incelenmiştir [25]. Yapılan çalışmalarda anlaşılacağı üzere genellikle Eİ ile üretilen kesilmesi zor malzemelere uygulanan işleme çalışmalarında işleme parametre ve koşullarının yüzey bütünlüğü özellikleri ve işleme tepkileri üzerindeki etkileri incelenmiştir [33,47,48]. Kesici takım aşınması açısından sadece Ti bazlı Eİ malzemelerin detaylı olarak incelendiği görülmektedir. Ancak kesici takım geometrisinin Eİ malzemelerin yüzey bütünlüğü karakteristikleri ve talaşlı imalat tepkisinin, anizotropik davranış ile ilişkisini ve etkilerini inceleyen bir çalışma bulunmamaktadır.

Bu tezin amacı, Eİ 316L paslanmaz çelik malzemenin farklı kesici takım talaş açılarında talaşlı imalat işlemini gerçekleştirmek ve ayrıca anizotropi ve deformasyon davranışlarını dikkate alarak geleneksel malzeme ile karşılaştırarak optimum kesme parametrelerini talaşlı imalat performansı ve yüzey bütünlüğü açısından belirlemektir. Literatürdeki sınırlı sayıdaki çalışmalara dayanarak, SLE 316L paslanmaz çelik malzeme çeşitli kesme hızlarında ve kriyojenik soğutma koşullarında ortogonal yöntemle tornalanmıştır. Özellikle kriyojenik soğutmanın işleme performansı, talaş kırılabilirliği ve morfoloji üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Ayrıca farklı kesme parametrelerinin ve koşullarının malzemenin plastik deformasyon davranışı üzerindeki etkisini incelemek için deformasyon hızı hesaplanmıştır. Kriyojenik soğutma tercih edilmesinin bir diğer sebebi ise plastik deformasyon davranışını anlamak amacıyla soğutma stratejisinin artık gerilim ve işleme kaynaklı katman oluşumu üzerindeki etkisini belirlemektir. Bu tez çalışmasındaki tüm bulgular geleneksel malzeme ile karşılaştırılmıştır.

2. DENEYSEL TASARIM

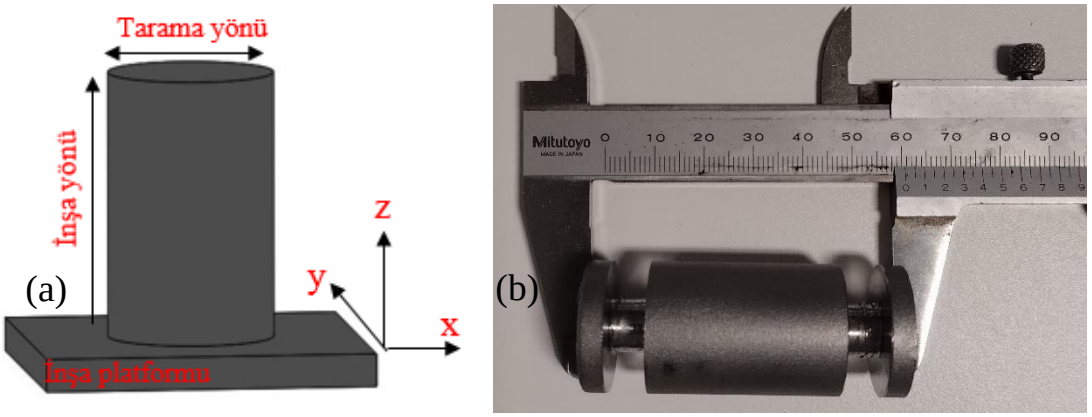
2.1 Deneysel Çalışmada Kullanılan İş Malzemesi

Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda, Seçici Lazerle Ergitme (SLE) ve geleneksel yöntemle imal edilmiş 25 mm çapında ve 60 mm uzunluğunda silindirik 316L paslanmaz çelik malzemeleri temin edilmiştir. SLE imalat parametreleri Tablo 2.1' de gösterilmiştir.

Tablo 2.1. SLE ile parça imalatında seçilen proses parametreleri

SLE parametreleri	Değer
Lazer Gücü (W)	195
Lazer Tarama Hızı (mm/s)	1083
Tarama Mesafesi (µm)	90
Katman Kalınlığı (µm)	20
Tarama Stratejisi	X-Y-Dönme
Hacimsel Enerji Yoğunluğu (J/mm3)	100

SLE işleminde inşa ve tarama yönleri Şekil 2.1a' da gösterildiği üzeredir. Hem SLE hem de geleneksel parçalar Şekil 2.1b' de gösterildiği üzere dik kesme deneyleri için her iki tarafında 4 mm kalınlığında disk şekline getirilmiştir.



Şekil 2.1. a)SLE parça imalatında eksenler, b)Dik kesme için disk yapılmış SLE malzeme

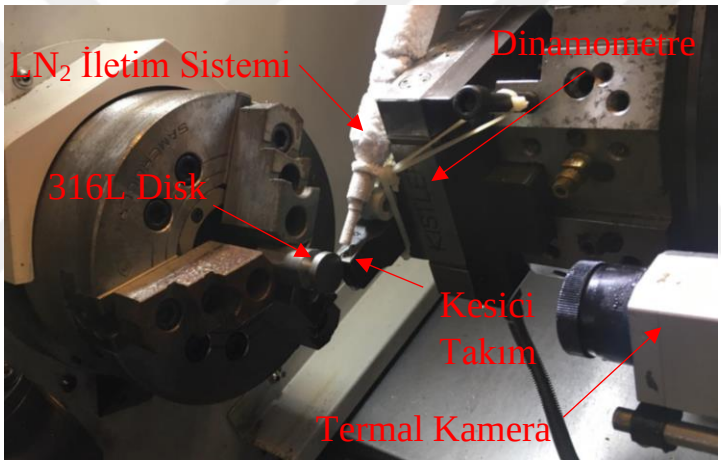
2.2 Deneylerin Gerçekleştirildiği CNC Torna Tezgâhı, Katerler ve Kesici Takım

Deneyler Şekil 2.2' de gösterilen maksimum 4500 rpm devir kapasiteli Puma GT2100 Doosan CNC torna tezgahında gerçekleştirilmiştir. Kesici uç olarak Sandvik TCMW 16 T3 08 H13A kullanılmıştır. Takım tutucu olarak Takımsaş firmasına özel olarak yaptırılan -6, -3, 0, 3 ve 6° talaş açısına sahip katerler kullanılmıştır.



Şekil 2.2. Dik kesme deneylerinin yapıldığı CNC torna tezgâhı

Dik kesme operasyonlarında deney ve ölçüm düzenekleri Şekil 2.3' te gösterildiği üzere tasarlanmıştır.



Şekil 2.3. Deneysel tasarım

2.3 Soğutucu Olarak Sıvı Azot Kullanımı

Malzemenin plastik deformasyon davranışına sıcaklığın etkisini ölçmek için soğutucu olarak sıvı azot kriyojenik olarak dik kesme deneylerinde kullanılmış ve elde edilen tüm sonuçlar kuru kesme koşulu ile kıyaslanmıştır. Sıvı azot kesme bölgesine 15 bar basınç ile takım talaş yüzeyinden uygulanmış olup kriyojenik talaş kaldırmaya ait görüntü Şekil 2.4' te paylaşılmıştır.



Şekil 2.4. Kriyojenik soğutucunun kesme bölgesine uygulanışı

2.4 Kesme Parametreleri

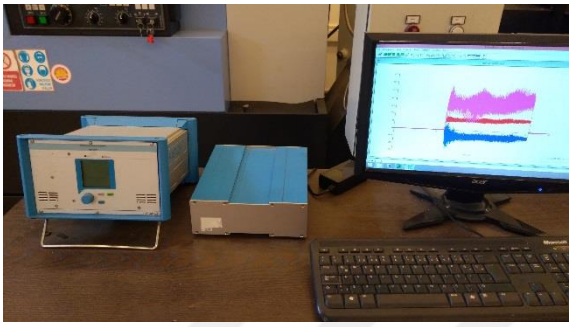
Yapılan deneylerde kesilmemiş talaş derinliği(t_0) 0.05 mm olarak sabit tutulmuş, kesme hızı(V_c) ise 7.5, 15, 30, 60 ve 120 m/dak olarak alınmıştır. Literatürde geleneksel farklı malzemelerde aşırı plastik deformasyon davranışının incelendiği çalışmalar dikkate alınarak kesme hızı düşük seçilmiş, ayrıca yüksek kesme hızlarında oluşan yüksek kesme sıcaklığının dislokasyon yok edici etkisininde gözlenebilmesi adına malzeme ölçülerininde izin verdiği en yüksek kesme hızı seçilmiştir. Endüstriyel uygulamalarda 316L için tercih edilen kesme hızı 100-200 m/dak kesme hızları aralığındadır. Deneylerde kullanılan kesme hızlarına malzeme çap ölçüsü ve bu aralıktaki değerler ile tez konusunun amacı dikkate alınarak karar verilmiştir. Aynı şekilde özellikle SLE malzemenin plastik deformasyon davranışının iyi anlaşılması hususunda farklı talaş açıları kullanılarak talaş kaldırma deneyleri yapılmış olup, talaş açılarıda geniş bir skalada sistematik olarak seçilmiştir. Soğutucu/yağlayıcı sistemle entegre edilen CNC torna tezgâhında yapılan talaş kaldırma işlemleri, herhangi bir yağlayıcı ya da soğutucunun kullanılmadığı kuru kesme ve sıvı azotun (LN_2, 15 Bar) kullanıldığı kriyojenik koşullarda gerçekleştirilmiştir. Kesme parametreleri özet olarak Tablo 2.2' de sunulmuştur.

Tablo 2.2. Kesme koşulları ve parametreleri

Kesme koşulları	Kuru kesme, LN_2
Kesme hızları, V_c (m/dak)	7.5, 15, 30, 60, 120
Talaş açıları, γ (°)	-6, -3, 0, 3, 6
Kesilmemiş talaş kalınlığı, t_0 (mm)	0.05

2.5 Kesme Kuvveti Ölçümü

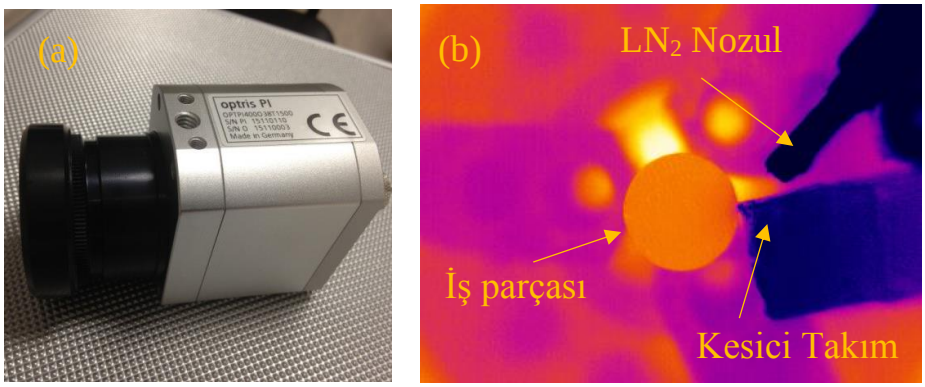
Dik kesme deneyleri esnasında oluşan kesme kuvvetlerini ölçmek için Kistler 2129AA dinamometre kullanılmıştır. Dik kesmede kuvvet bileşenleri olan esas kesme kuvveti *Fc* ve itme kuvveti *Ft* ayrı ayrı ölçülerek Dynoware yazılımı aracılığıyla sayısal verilere dönüştürülmüş olup ölçüm düzeneği Şekil 2.5' te gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Kuvvet dönüştürücü ve Dynoware yazılımına ait ekran görüntüsü

2.6 Sıcaklık Ölçümü

Talaş kaldırma deneylerinde oluşan sıcaklığın ölçümü ±2°C hassasiyetinde ve 382x288 piksel çözünürlükte Optris PI400 infrared kamera ile yapılmıştır. Ölçümler esnasında emissivite katalog değer olan 0.6 alınmıştır. Termal kameranın resmi ve sıcaklık ölçümü esnasında kamera yazılımından elde edilen görüntü Şekil 2.6'da gösterilmiştir.

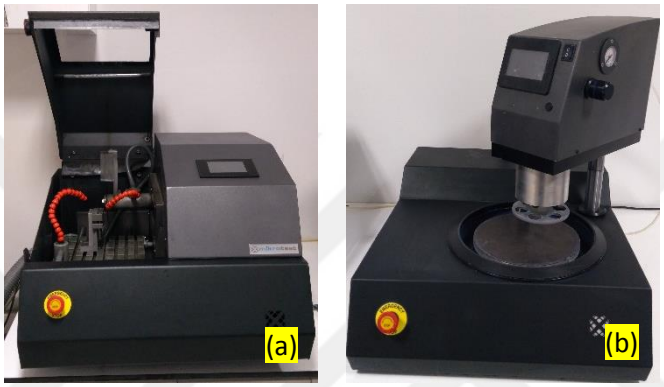


Şekil 2.6. (a) Termal kamera, (b) Sıcaklık ölçüm ekranı

2.7 Yüzey Bütünlüğü Analizi

2.7.1 Numune hazırlama çalışmaları

Tornalanmış numunelerin işlenmiş yüzeylerinin incelenmesi için yapılacak analize uygun boyutta numune kesim işlemi Şekil 2.7a' da gösterilen hassas kesme cihazında yapılmıştır. Kesilen numuneler soğuk kalıplama yöntemi kullanılarak bakalite alınmıştır. Alınan bakalite örnekleri Şekil 2.7b' de gösterilen parlatma cihazında mikroyapı ve sertlik incelemesi için hazır hale getirilmiştir.



Şekil 2.7. a)Hassas kesme cihazı b)Zımparalama ve parlatma cihazı

2.7.2 Sertlik ölçümü

Dik kesme deneylerinde oluşan talaşların ve talaş kaldırılan numunelerin işlenmiş yüzeyinde meydana gelen sertlik değişimini ölçmek için Şekil 2.8' de gösterilen Future-Tech FM310e model mikrosertlik ölçme cihazı kullanılmıştır. Her bir numuneye ASTM E384 standardı gözetilerek 50gf yük uygulanarak malzemenin 10 farklı yerinden ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümlerin ortalama değerleri alınarak Vickers(HV) sertlik değerleri tayin edilmiştir.

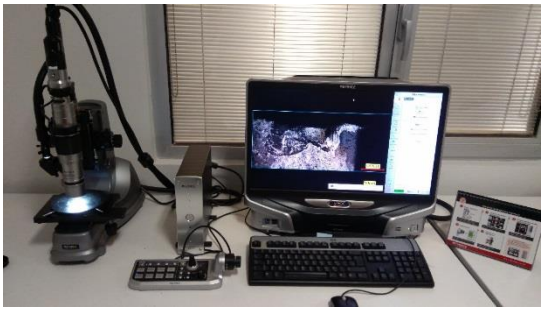


Şekil 2.8. Vickers sertlik ölçme cihazı

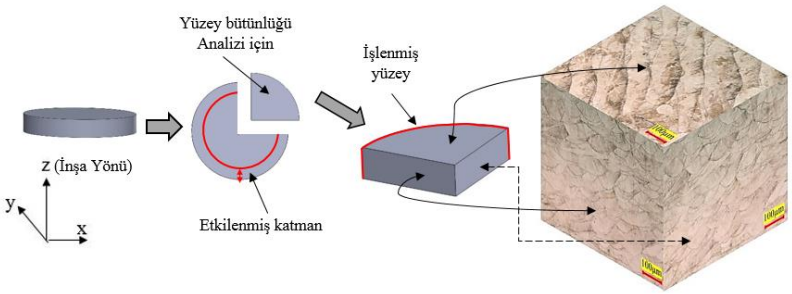
2.7.3 Mikroyapı görüntüleme

Ortogonal yöntemle talaş kaldırılan numunelerin işlenmiş yüzeylerinde mikroyapıda meydana gelen değişimleri incelemek üzere bakalit alınmış numuneler %16.7 HNO_3 + %33.3 Gliserin + %50 HCl oranında hazırlanan çözeltide dağlanmıştır. Dağlama işlemi sonrası mikroyapı görüntülemesi Şekil 2.9' da gösterilen Keyence VHX6000 Dijital Mikroskop ile yapılmıştır. SLE numunelerin anizotropik karakteristiği nedeniyle mikroyapı analizleri hem inşa hem de tarama yönünden Şekil 2.10' da gösterildiği yapılmıştır.

İleri mikroyapı incelemesi yapılması hususunda aşırı plastik deformasyon davranışının daha iyi anlaşılması için Philips XL30 taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır.



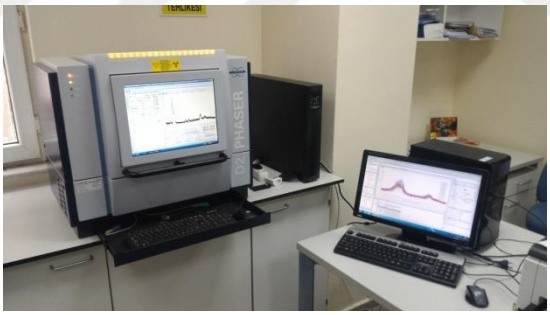
Şekil 2.9. Dijital optik mikroskop



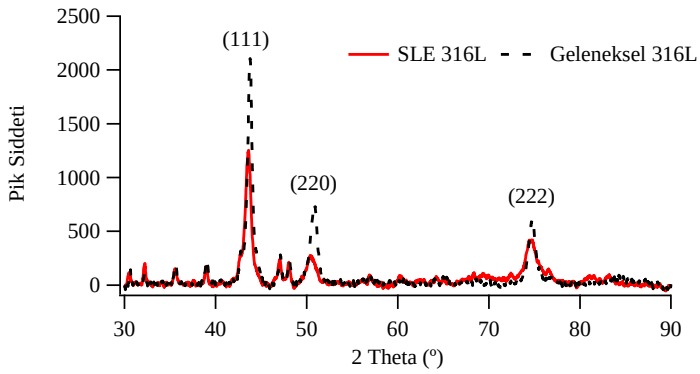
Şekil 2.10. Yüzey bütünlüğü analizleri için numune hazırlama ve inşa edilmiş SLE mikroyapısı

2.7.4 X-ışını kırınımı (XRD) analizi

X-ışını difraksiyonu (XRD) analizlerinde Şekil 2.11' de gösterilen Malvern Panalytical cihazı kullanılmıştır. Analizler ve hesaplamalarda 1.54060 Å dalga boyuna sahip CuKα katot kullanılmış olup tarama hızı 15°/dak seçilmiştir. Ölçümler 2θ aralığı 30-90° olarak yapılmıştır. Analizlerde ana östenit piki olan 42-45° 2θ açı değerindeki (111) piki dikkate alınmıştır. Ölçümler numunelerin işlenmiş yüzeylerinden yapılmıştır. SLE 316L malzemenin inşa edilmiş haldeki ve geleneksel 316L malzemenin imal edildiği haldeki XRD modelleri Şekil 2.12' de gösterilmiştir.



Şekil 2.11. XRD ölçüm cihazı



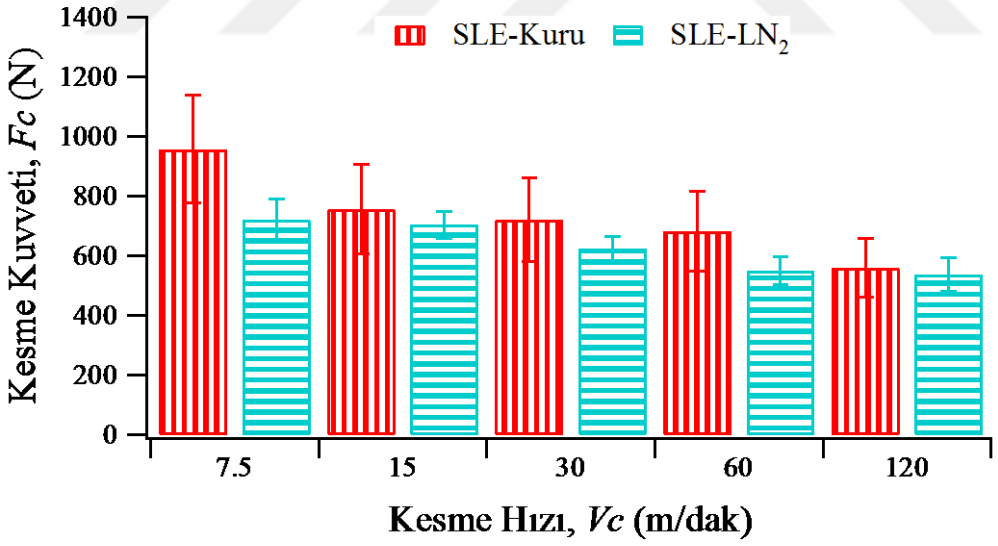
Şekil 2.12. İşlem görmemiş SLE ve geleneksel 316L malzemenin XRD modelleri

3. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1 Kesme Kuvvetleri

3.1.1 Esas kesme kuvveti

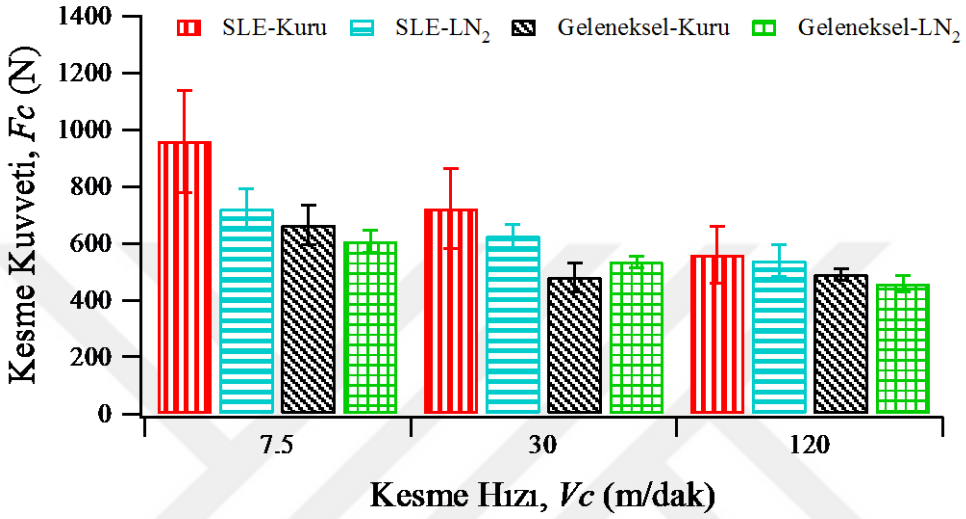
Bu bölümde kesme deneyleri esnasında ölçülen esas kesme kuvvetleri sunulmuştur. Kesme kuvvetleri, işlenen malzemenin yüzey bütünlüğünü doğrudan etkileyen ana parametrelerden biridir. Ayrıca kesme kuvvetleri takım-talaş sürtünmesi, takım geometrisi, takım ve iş parçası malzemesi gibi faktörlerden etkilenebilir [49]. SLE disklerin kuru ve kriyojenik koşullarda dik kesilmesinde ölçülen kesme kuvvetleri kesme hızının bir fonksiyonu olarak Şekil 3.1' de gösterilmiştir. 7.5 m/dak kesme hızından 120 m/dak kesme hızına doğru kuvvetlerde düzenli olarak azalma eğilimi söz konusudur. Bir diğer eğilim ise kriyojenik soğutma uygulanan durumlarda kuru kesmeye kıyasla daha düşük kesme kuvvetleri oluşmasıdır. Özellikle kuru kesme koşulunda ölçülen kuvvetlerde hata çubuklarının büyüklüğü fazladır. Bu durum kuru kesmede daha fazla takım-iş parçası sürtünmesi ve yüksek sıcaklık nedeniyle kesici takımda daha fazla aşınma meydana gelmesi sonucu kesme esnasında kararlı olmayan kuvvet oluşumuna bağlanabilir. Sonraki bölümlerde daha detaylı incelemeler yapılacaktır.



Şekil 3.1. SLE parçaların kuru ve kriyojenik koşullarda dik tornalanmasında ölçülen esas kesme kuvvetleri (γ= -3°)

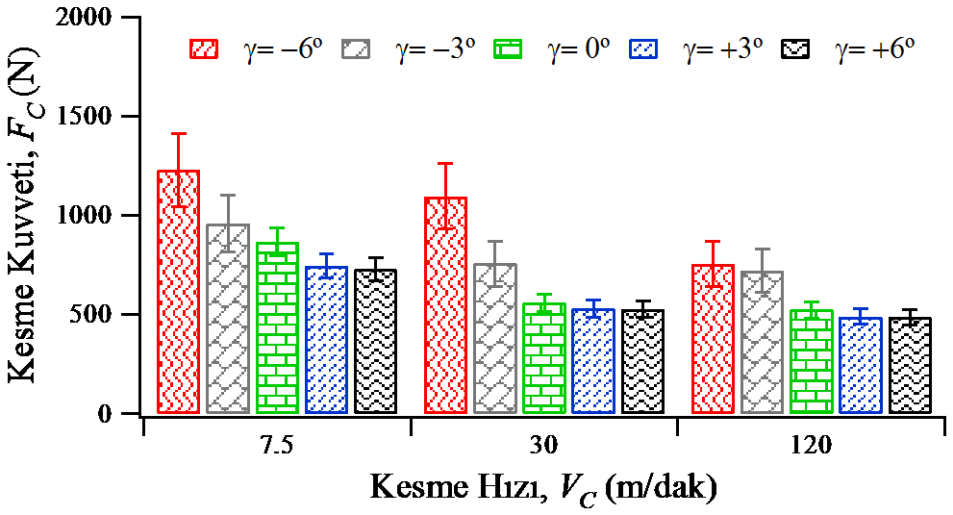
SLE ve geleneksel disklerin kuru ve kriyojenik koşullarda dik kesilmesi deneylerinde ölçülen kesme kuvvetlerinin kıyaslaması Şekil 3.2' de gösterilmiştir. Genel eğilim kesme hızının artmasıyla kuvvetlerin azalması şeklindedir. Tüm kesme hızlarında ölçülen en yüksek kesme

kuvvetleri kuru koşulda SLE işlenmesinde elde edilmiştir. Burada malzeme farkı ön plana çıkmıştır. Çünkü tüm kesme koşulları ve hızlarında SLE kuvvetler geleneksel kuvvetlerden yüksektir. Dolayısıyla SLE malzemenin işlenmesi için geleneksel malzemeye kıyasla daha fazla mekanik enerjiye ihtiyaç olduğu anlaşılmaktadır. Sırasıyla 7.5, 30 ve 120 m/dak kesme hızlarında kuru koşulda SLE ve geleneksel kuvvetler arasındaki farklar %30, %33 ve %13 oranında iken kriyojenik koşulda ise farklar sırasıyla %16, %14 ve %15 oranındadır.



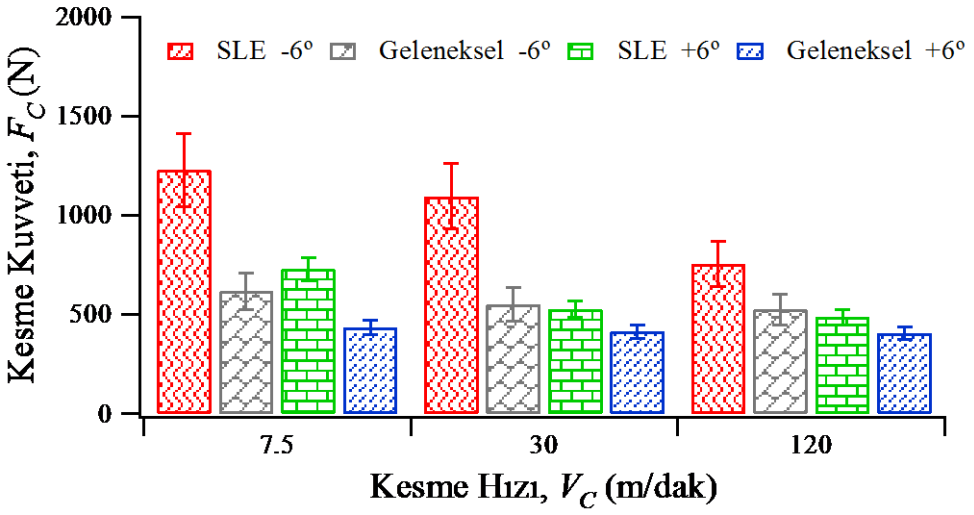
Şekil 3.2. SLE ve geleneksel parçaların kuru ve kriyojenik koşullarda dik tornalanmasında ölçülen esas kesme kuvvetlerinin kıyaslaması (γ= -3°)

SLE disklerin farklı takım talaş açılarında kesilmesi deneylerinde ölçülen kesme kuvvetleri Şekil 3.3'te gösterilmektedir. Düşük kesme hızlarında kuvvetler yüksek iken kesme hızının artmasına bağlı olarak kesme kuvvetlerinde azalma meydana gelmiştir. Artan kesme hızı nedeniyle sıcaklığın artması kesme bölgesinde termal etki yaratır. Bu durum plastik deformasyon için gereken enerjiyi azaltır. Bir diğer eğilim ise talaş açısıyla ilgilidir. Kesme kuvvetleri her kesme hızı değerinde negatif talaş açısından pozitif talaş açısına doğru azalmaktadır. Ayrıca negatif talaş açısı değerlerinde hata çubukları genellikle daha büyüktür. Takım talaş açısı, kesme düzleminde oluşan kayma açısını doğrudan etkileyen bir faktördür. Düşük talaş açısı küçük bir kayma açısı sağlar. Böylece daha büyük bir kayma düzlemi alanı ve kesme kuvveti oluşturur. Kesme kuvvetinin -6°'den 6° talaş açısına değişimi 7.5, 30 ve 120 m/dak kesme hızlarında sırasıyla %40, %51 ve %36'dır.



Şekil 3.3. SLE parçaların farklı talaş açısına sahip kesici takımlarla dik tornalanmasında ölçülen esas kesme kuvvetleri

SLE ve geleneksel disklerin aynı parametrelerde kesilmesi deneylerinde ölçülen kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması Şekil 3.4'te gösterilmiştir. SLE disklerin kesilmesi, geleneksel disklere kıyasla daha yüksek kesme kuvvetleriyle sonuçlanmıştır. SLE malzemesinin geleneksele göre daha fazla abrasif davranış sergilediği anlaşılmakta ve malzeme farklılığının kesme kuvveti üzerindeki etkisi ortaya çıkmaktadır. Her iki malzemede de kesme hızı arttıkça kesme kuvveti azalma eğilimi göstermiştir. Ancak kuvvetlerdeki azalma orantılı olarak aynı değildir. SLE malzemesinde 7.5 ile 120 m/dak kesme hızlarında ölçülen kuvvetler arasındaki fark, -6° ve 6° talaş açısında sırasıyla %38 ve %33'tür. Benzer şekilde, 7.5 ve 120 m/dak kesme hızlarında geleneksel malzemedeki fark, -6° ve 6° talaş açısında sırasıyla %15 ve %7 dir. Bu durum kesici takım geometrisinin kuvvet açısından SLE malzemesi üzerindeki etkisinin gelenekselden daha fazla olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca itme kuvvetlerinde de benzer bir durum görülmektedir. Kesme hızı arttıkça, geleneksel malzemede kararlı durumda kesmenin meydana geldiği, SLE kuvvetlerinde ise volatilitenin yüksek olduğu açıktır.

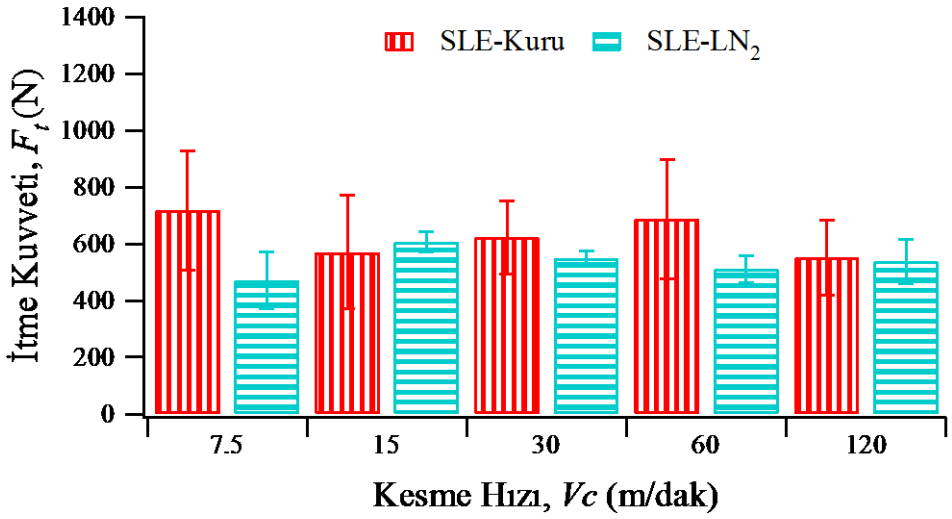


Şekil 3.4. SLE ve geleneksel parçaların farklı talaş açısına sahip kesici takımlarla dik tornalanmasında ölçülen esas kesme kuvvetlerinin kıyaslaması

3.1.2 İtme kuvvetleri

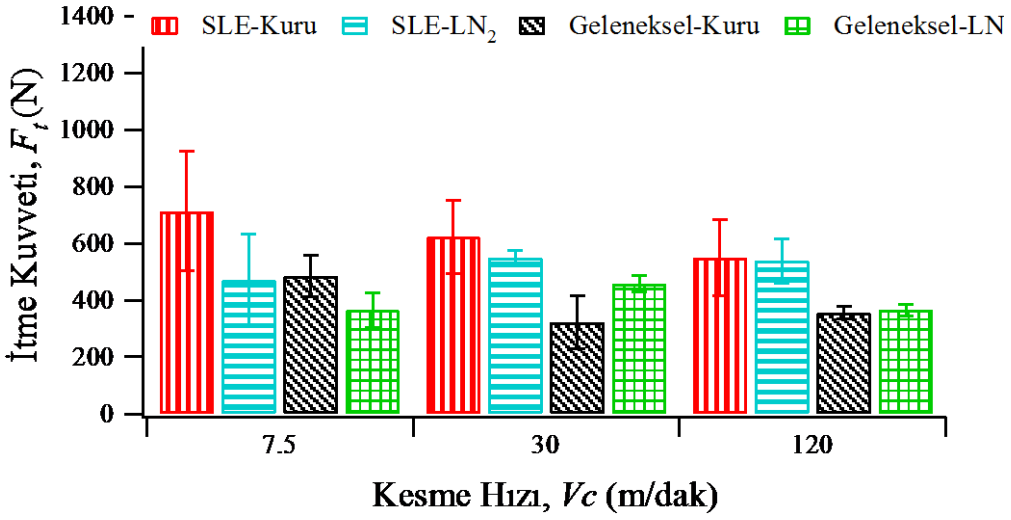
Bu bölümde kesme deneyleri esnasında ölçülen itme kuvvetleri ölçülmüştür. İtme kuvveti kesici takım üzerindeki yükü temsil eden bir göstergedir. Kesici takımdaki aşınmalar, plastik deformasyonlar ve kırılmalar ölçülen kuvveti doğrudan etkileyebilir. Bu nedenle dik kesme operasyonlarında kesici takım performansı itme kuvveti ile analiz edilebilir. Genel olarak en yüksek itme kuvveti değerleri tüm kesme hızlarında negatif talaş açılarında ölçülmüştür. Bu durumda negatif talaş açısına sahip kesici takımlarda aşınma, kırılma gibi durumlar ortaya çıkması olasıdır. Çünkü esas kesme kuvveti takım talaş yüzeyine etki ederken, itme kuvveti ise takım ön yüzeyinde etkilidir. Bir sonraki bölümde detaylı analiz yapılmıştır.

Şekil 3.5' te SLE disklerin kuru ve kriyojenik koşullarda dik kesilmesinde ölçülen itme kuvvetleri gösterilmiştir. Genel bir eğilimden söz etmek mümkün değildir. Ancak kuru kesme koşulunda ölçülen itme kuvvetlerinde kriyojenik koşula kıyasla hata çubukları önemli derecede belirgindir. Kriyojenik koşulda ise sadece 7.5 m/dak kesme hızında hata çubuğu yüksektir.



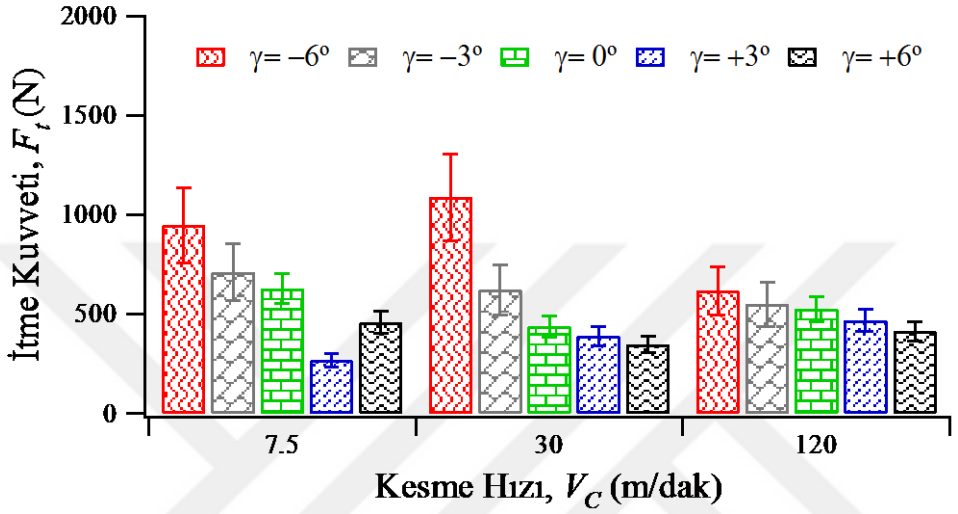
Şekil 3.5. SLE parçaların tornalanmasında ölçülen itme kuvvetleri (γ= -3°)

SLE ve geleneksel disklerin kuru ve kriyojenik koşullarda ölçülen itme kuvvetlerinin kıyaslaması Şekil 3.6' da gösterilmiştir. Tüm kesme hızları ve koşullarında esas kesme kuvvetlerine benzer eğilim söz konusudur. SLE disklerin işlenmesinde ölçülen itme kuvvetleri geleneksel kuvvetlere kıyasla hem kuru hem de kriyojenik koşulda daha yüksektir. Bu durumda SLE malzemenin işlenmesinde daha abrasif aşınmaların meydana geldiği söylenebilir. Ayrıca kriyojenik soğutma genelde her iki malzemenin işlenmesinde de itme kuvvetlerini azaltıcı etki yapmıştır. SLE ve geleneksel itme kuvvetleri arasındaki farklar kuru kesme koşulunda sırasıyla 7.5, 30 ve 120 m/dak kesme hızları için %32, %48 ve %36 dır. Kriyojenik koşulda ise sırasıyla %23, %16 ve %32 dir. Kriyojenik koşulda malzemeler arasındaki itme kuvveti farklılığının nispeten daha az olduğu anlaşılmaktadır.



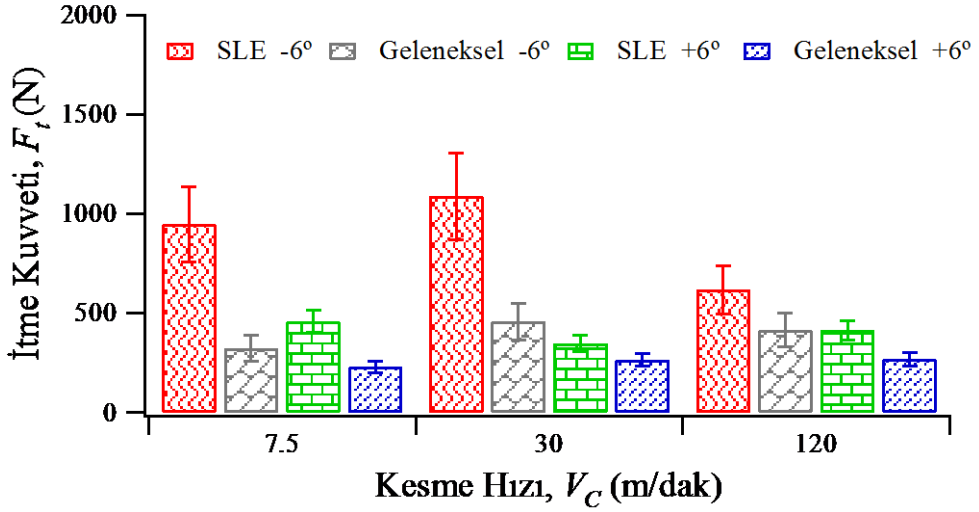
Şekil 3.6. SLE ve geleneksel parçaların dik tornalanmasında ölçülen itme kuvvetleri (γ= -3°)

Şekil 3.7' de farklı talaş açısı değerlerinde SLE ve geleneksel disklerin kuru kesme koşulunda dik kesme deneylerinde elde edilen itme kuvvetleri gösterilmiştir. Özellikle 7.5 m/dak kesme hızında talaş açısının bir fonksiyonu olarak kuvvetlerde belirgin bir eğilim mevcut değildir. Ancak kesme hızının artmasıyla hem kuvvetlerde azalma eğilimi hem de talaş açısının negatif değerden pozitif değerlere doğru kuvvetlerde azalma eğilimi mevcuttur. Tüm kesme hızlarında en yüksek itme kuvvetleri -6° talaş açısı değerinde ölçülmüştür.



Şekil 3.7. SLE parçaların farklı talaş açısına sahip kesici takımlarla dik tornalanmasında ölçülen itme kuvvetleri

SLE ve geleneksel disklerin aynı parametrelerde dik kesilmesinde ölçülen itme kuvvetleri Şekil 3.8' de gösterilmiştir. Tüm kesme hızlarında negatif talaş açısında SLE disklerin işlenmesinde ölçülen itme kuvvetleri en yüksektir.



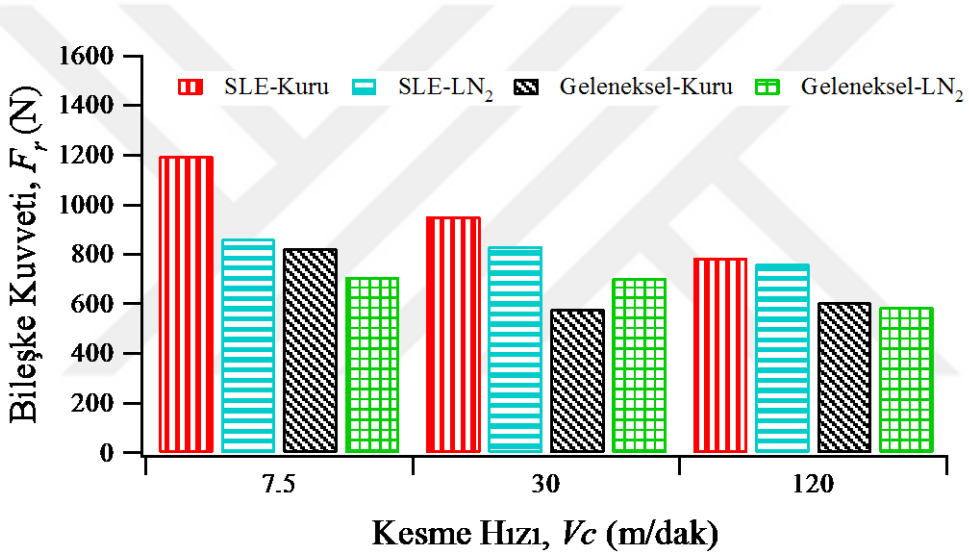
Şekil 3.8. SLE ve geleneksel parçaların farklı talaş açısına sahip kesici takımlarla dik tornalanmasında ölçülen itme kuvvetlerinin kıyaslaması

3.1.3 Bileşke kesme kuvvetleri

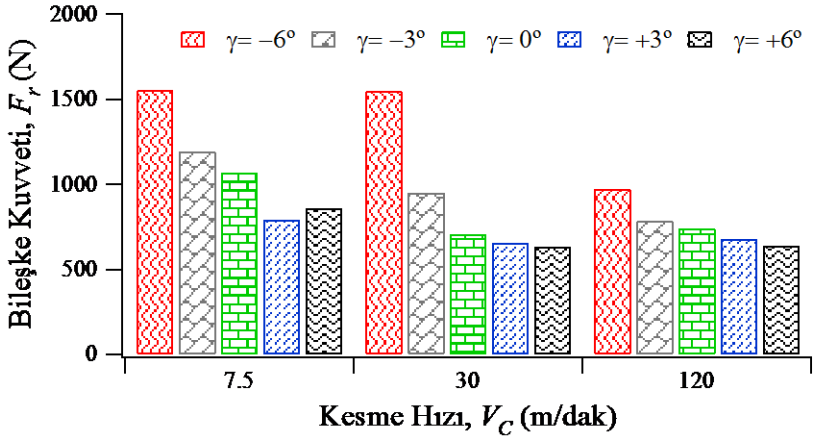
Bu bölümde esas kesme ve itme kuvvetleriyle Denklem 2' ye göre hesaplanan bileşke kuvvetler sunulmuştur. Esas kesme kuvveti ve itme kuvvetleri, talaşlı imalatta takım aşınması, talaş oluşumu, soğutucu/yağlayıcıların kesme bölgesine gönderimi gibi dinamikler gereği her zaman aynı eğilim veya doğrultuda olmayabilmektedir. Ancak bileşke kuvvet talaşlı imalatta gerekli mekanik kuvvetlerin daha iyi anlaşılması hususunda iyi bir gösterge ve alternatiftir.

$$Fr = \sqrt{Fc^2 + Ft^2} \qquad (2)$$

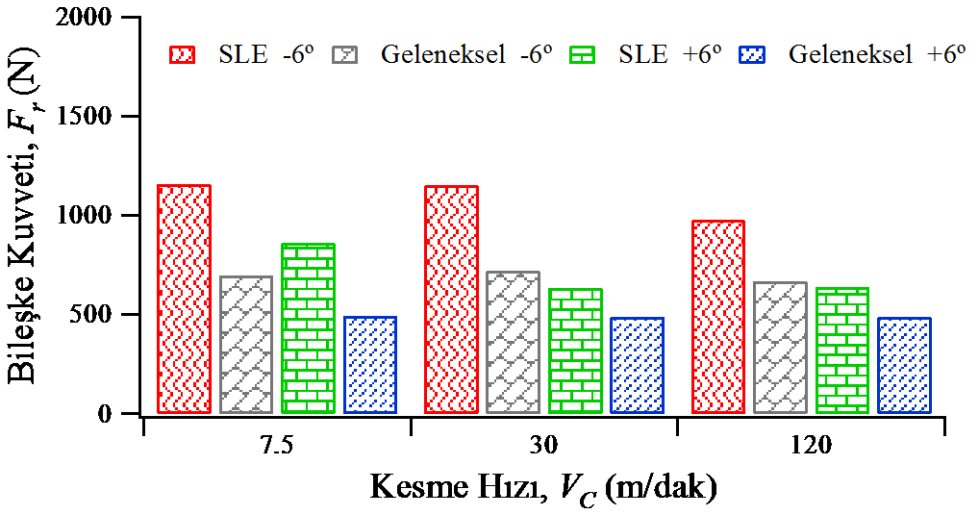
Şekil 3.9, Şekil 3.10 ve Şekil 3.11' de hesaplanan bileşke kuvvetler sunulmuştur. Görüleceği üzere kuvvetlerdeki kesme hızına bağlı eğilimler, talaş açısına bağlı eğilimler ve malzeme farklılığına bağlı eğilimler daha belirgin şekilde anlaşılmaktadır.



Şekil 3.9. SLE ve geleneksel parçaların dik tornalanmasında hesaplanan bileşke kuvvetlerinin kıyaslaması (γ= -3°)



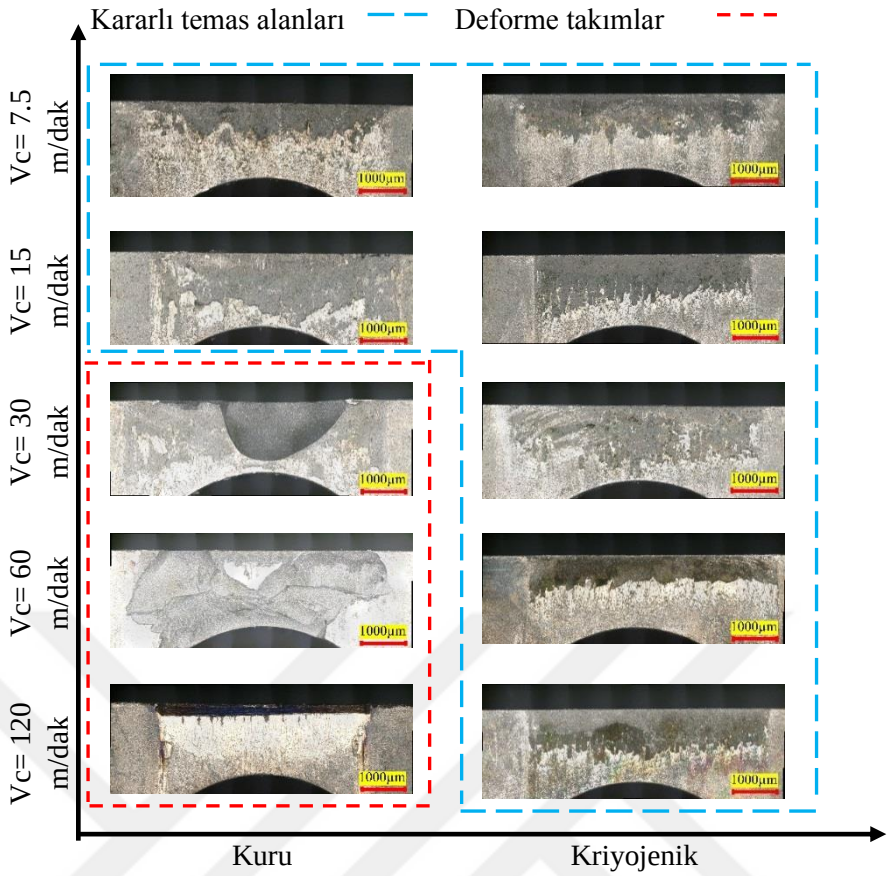
Şekil 3.10. SLE parçaların farklı talaş açısına sahip kesici takımlarla dik tornalanmasında hesaplanan bileşke kuvvetleri



Şekil 3.11. SLE ve geleneksel parçaların farklı talaş açısına sahip kesici takımlarla dik tornalanmasında hesaplanan bileşke kuvvetlerinin kıyaslaması

3.2 Kesici Takım Aşınması ve Talaş Temas Analizi

Bu bölümde kesici takım-talaş temasının olduğu bölgenin optik mikroskop ile alınmış görüntüleri sunulmuştur. Şekil 3.12' de SLE parçaların değişken kesme hızlarında kuru ve kriyojenik koşullarda gerçekleştirilen talaş kaldırma operasyonlarında kesici takımlarda meydana gelen takım-talaş temas bölgeleri gösterilmiştir. Görüleceği üzere özellikle kuru kesme koşulunda 30 m/dak kesme hızından itibaren takımda aşınmanın ötesinde kırılmalar meydana gelmiştir. Kriyojenik koşulda ise temas alanları belirgin ve 60 m/dak kesme hızından itibaren aşırı olsa da takımda kırılmalar yaşanmamıştır.

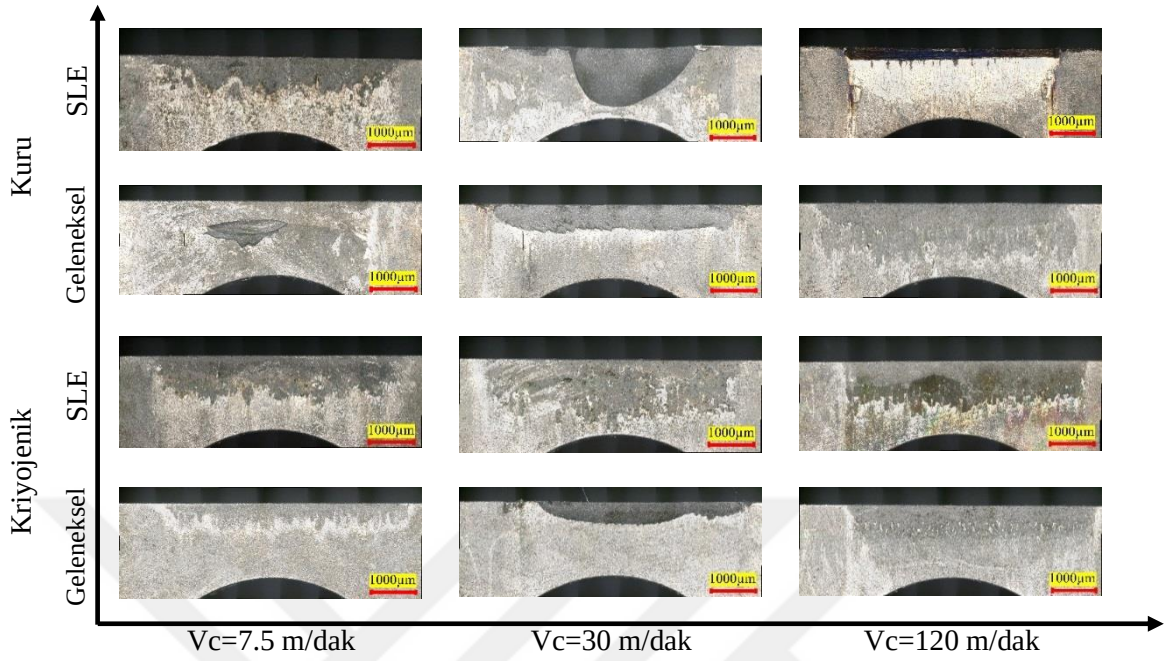


Şekil 3.12. SLE parçaların dik tornalanmasında kesme hızı ve koşuluna bağlı oluşan takım-talaş temas bölgesi resimleri(Takım talaş yüzeyi) (γ= -3°)

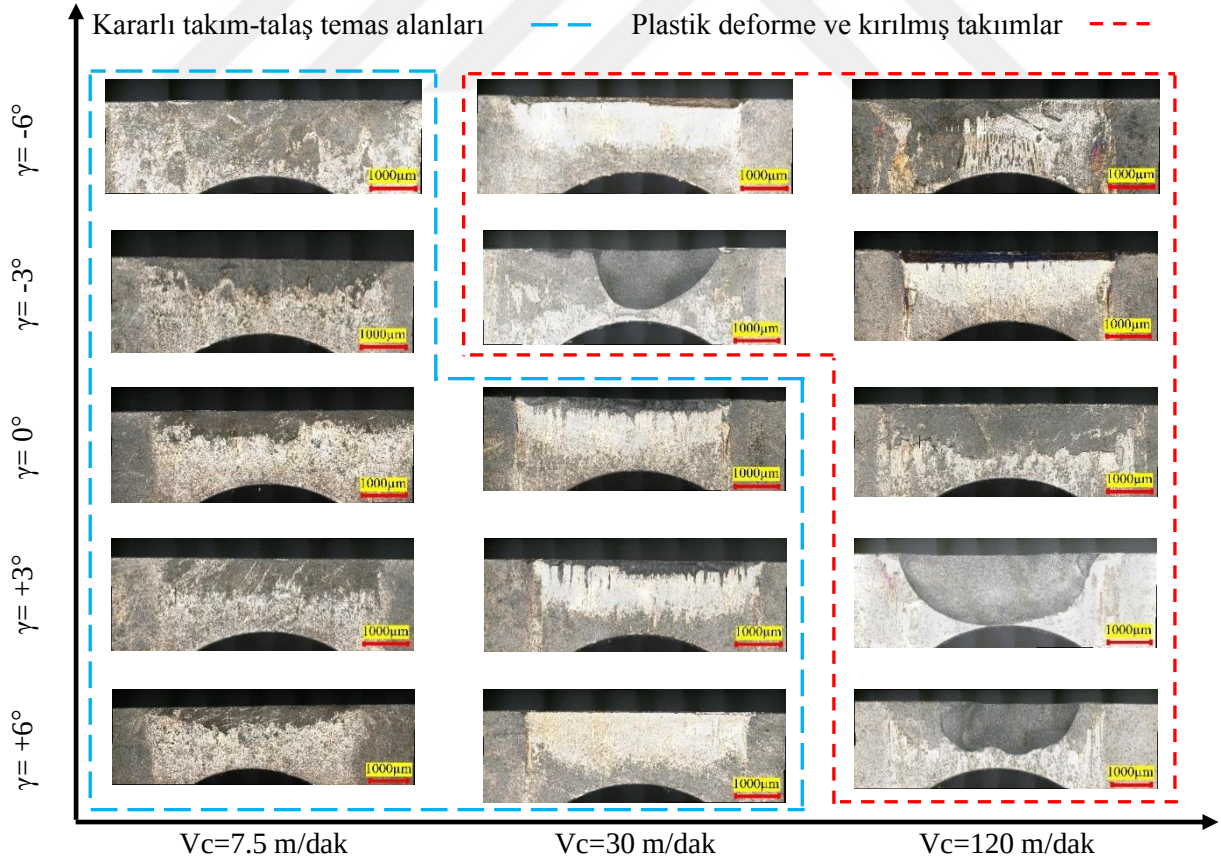
Şekil 3.13' te ise değişken kesme hızı ile kuru ve kriyojenik koşullarda SLE parçaların dik kesilmesinde oluşan takım-talaş temas yüzeyleri geleneksel parçaların aynı koşullarda dik kesilmesinde oluşan takım-talaş temas yüzeyleriyle kıyaslanmıştır. Takım görüntülerine SLE ve geleneksel parçalar özelinde bakıldığında genel olarak SLE parçaların daha agresif bir talaş kaldırma operasyonuna sebep olduğu açık şekilde görülmektedir. Geleneksel parçaların işlenmesinde takımdaki temas alan ve yüzeyleri daha kararlı şekilde gelişmekle beraber kuru koşulda kriyojenik koşula göre daha abrasif davranış söz konusudur.

Kesici takım-talaş temas yüzeyinin incelendiği bir diğer durum kesici takım talaş açısının değişkenlik göstermesidir. Şekil 3.14' te SLE parçaların kuru kesme koşulunda dik kesilmesinde değişken kesme hızları ve talaş açılarına bağlı olarak gerçekleşen takım-talaş temas alanlarının incelendiği görüntüler sunulmuştur. 7.5 m/dak kesme hızında tüm talaş açısı değerlerinde takımlarda kararlı şekilde temas yüzeyleri meydana gelmiştir. Ancak kesme hızının 30 m/dak değerine çıkmasıyla özellikle negatif talaş açısı değerlerinde temas alanlarının takımda plastik deformasyonla birleştiği görülmektedir. Pozitif talaş açısı değerlerinde de aşırı aşınmalar temas bölgelerinde söz konusudur. Kesme hızı 120 m/dak değerine çıktığında ise tüm

talaş açısı değerlerinde takımlarda plastik deformasyonlar ve kırılmalar bariz şekilde meydana gelmiştir.



Şekil 3.13. SLE ve geleneksel parçaların dik tornalanmasında oluşan takım-talaş bölgesi resimleri (Takım talaş yüzeyi) (γ= -3°)



Şekil 3.14. SLE parçaların farklı talaş açısına sahip kesici takımlarla dik tornalanmasında oluşan takım-talaş temas bölgesi resimleri (Takım talaş yüzeyi)

Şekil 3.15’ te ise kuru kesme koşulunda değişken kesme hızı ile talaş açılarında SLE parçaların dik kesilmesinde oluşan takım-talaş temas yüzeyleri geleneksel parçaların aynı koşullarda dik kesilmesinde oluşan takım-talaş temas yüzeyleriyle kıyaslanmıştır. Kesme hızı 7.5 m/dak değerinde hem SLE hem de geleneksel malzemelere ait takımlarda tüm talaş açısı değerlerinde kararlı bir takım-talaş temas alanı oluşmuştur. SLE takımlara göre geleneksel takımlarda daha makul talaş temas izleri meydana gelmiştir. Kesme hızı 30 ve 120 m/dak değerlerine çıkıldığında ise SLE takımlarda ki aşırı temas alanları, kırılmalar ve plastik deformasyonlar bariz iken geleneksel takımlar kırılmanın meydana gelmediği kararlı talaş temas alanlarına sahiptir.

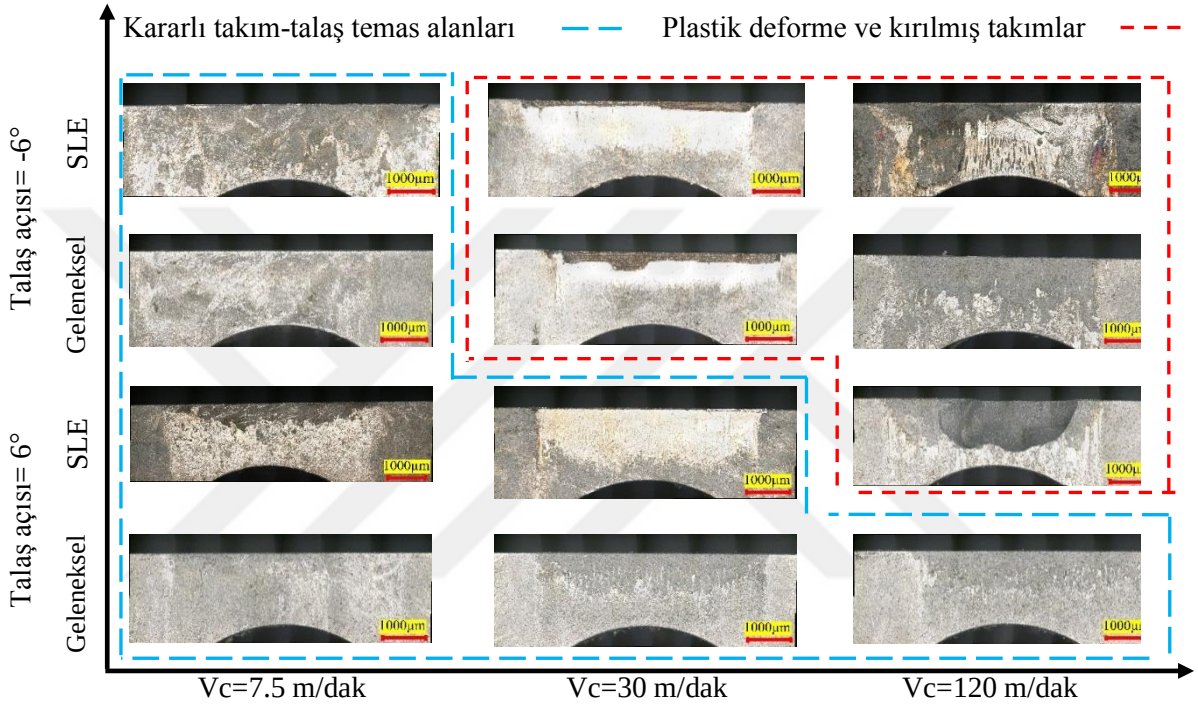
Aslında kesme parametrelerinin dışında takımlarda kesme kuvveti ve aşınma farklılıklarına neden olan bir diğer durum da malzeme farklılıklarından kaynaklanan anizotropidir. Geleneksel malzeme uzunlamasına ve enine yönlerde eş eksenli tanelerden oluşmasına rağmen yapısındaki inklüzyonların oranı aşındırıcı davranışı etkilemektedir. SLE malzemesi tarama düzleminde tarama izleri ve inşa düzleminde ergime havuzlarından oluşur. SLE üretim parametreleri sonucu oluşan hacimsel enerji yoğunluğu, yapıdaki tane ve dendritlerin şekli ve boyutunun yanı sıra dislokasyon yoğunluğunu da doğrudan etkiler. Ayrıca işlemde kullanılan lazer ve koruyucu gaz sonucu nano boyutlu oksit inklüzyonları da mevcuttur [50]. SLE malzemesinin karmaşık mikro yapısına ek olarak, dislokasyon yoğunluğu geleneksel malzemeden farklı çekme özelliklerine sahip olmasına neden olur. Dolayısıyla bu durum aşındırıcı davranışı etkilemektedir.

Takım tribolojisinin daha iyi anlaşılması için sıcaklık ve sürtünmenin etkilerinin incelenmesi yararlıdır. Bu bağlamda Şekil 3.15’ teki kritik 30 m/dak kesme hızındaki aşınma esas alınabilir. SLE malzeme kesme deneylerinde ortalama kesme sıcaklıkları sırasıyla -6° ve 6° talaş açısı değerlerinde 561 ve 434°C, geleneksel malzeme kesme deneylerinde ise 486 ve 408°C olarak ölçülmüştür (Sıcaklık ölçüm değerleri sonraki bölümde mevcuttur). Sıcaklıkların pozitif talaş açısında daha düşük olduğu görülmektedir. Ortogonal kesme yönteminde pozitif talaş açısında kayma gerinimi azalır. Bu durum büyük bir kayma açısının oluşmasına neden olduğundan kayma düzlemi alanı negatif talaş açısına göre daha küçük olur. Büyük kayma düzlemi alanı birincil deformasyon bölgesinde daha fazla ısı oluşmasına neden olur. İkincil deformasyon bölgesi takım talaş yüzeyi-talaş temas noktasıdır ve bu bölgedeki sıcaklık kısmen daha düşüktür. Bu çalışmada yapılan sıcaklık ölçümünde termal kamera çerçevesi tarafından tespit edilen sıcaklıklar ölçülmüştür ve bu sıcaklıklar muhtemelen takım-talaş ara yüzünde daha yüksektir. Karbür kesici takımların sertliğinin 800°C’de oda sıcaklığındaki sertliğinin yarısına

düştüğü bilinen bir gerçektir [51]. Herhangi bir malzemenin aşınma direnci üzerinde artan sıcaklığın etkisi, Denklem 3'te gösterilen aşınma modeli ile açıklanabilir

$$W = \frac{K}{3}\frac{FL}{H} \quad (3)$$

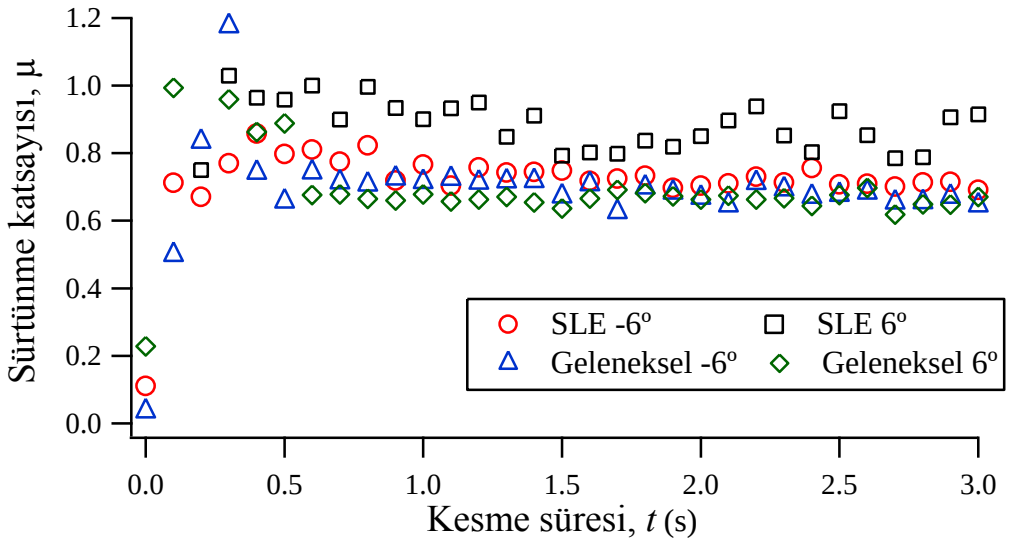
burada W malzemenin hacimsel aşınması, K Archard aşınma katsayısı, F temas kuvveti, L kesme uzunluğu ve H en yumuşak malzemenin sertliğidir [52].



Şekil 3.15. SLE ve geleneksel parçaların farklı talaş açısına sahip kesici takımlarla dik tornalanmasında oluşan takım-talaş temas bölgesi resimleri(Takım talaş yüzeyi)

Şekil 3.16, SLE ve geleneksel numunelerin işlenmesi sırasında sürtünmenin gelişimini göstermektedir. Sürtünme katsayısı Denklem 4' e göre hesaplanmıştır. SLE numunelerinin sürtünme katsayısı değerleri geleneksel numunelerden daha yüksektir. SLE numunelerinin sürtünme katsayısı değerlerinin geleneksel numunelerden daha yüksek olması, kesici takım aşınma görüntüleri ile uyumludur. Ortalama sürtünme katsayıları -6° ve 6° talaş açısı değerlerinde sırasıyla SLE numunesinde 0.75 ve 0.91, geleneksel numunede ise 0.67 ve 0.71'dir.

$$\mu = \frac{F_c \tan\gamma + F_t}{F_c - F_t \tan\gamma} \quad (4)$$



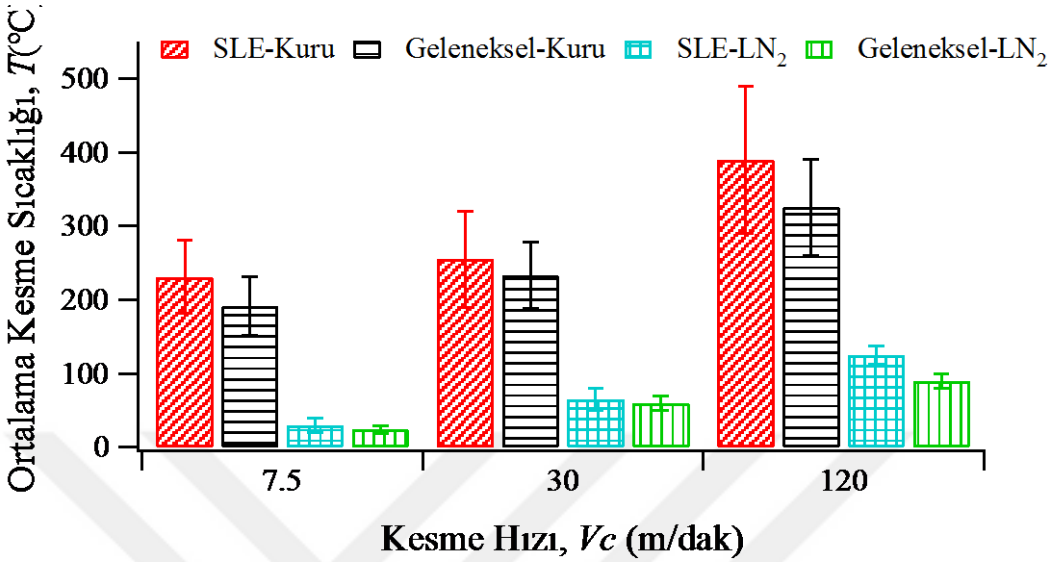
Şekil 3.16. Geleneksel ve SLE malzemelerin talaş kaldırma işlemi boyunca sürtünme katsayısı (V_c= 30 m/dak)

Bu bölüm genel olarak değerlendirildiğinde kesme hızı, talaş açısı ve kesme koşulu gibi değişik parametrelerin takım-talaş temas yüzeyine etkisi her ne kadar bariz olsa da SLE ve geleneksel malzeme arasındaki ham parça imalatındaki farklılıkta doğrudan dik kesme deneylerinde takımda meydana gelen gelişmeleri doğrudan etkilemiştir. SLE parçalar dik kesme deneylerinde abrasif bir tutum sergilerken geleneksel parçalar daha kararlı dik kesme deneylerinin gerçekleşmesini sağlamıştır. Bu duruma sebep olan başta mikroyapı karakteristikleri ve anizotropi davranışın detayları sonraki bölümlerde detaylı incelenmiştir. Ayrıca takım-talaş temas uzunluğu ve takım-talaş temas alanı gibi ölçümler yapılarak elde edilecek sayısal veriler, takımlardaki aşırı aşınma ve plastik deformasyonlar nedeniyle doğru sonuçlar vermeyeceğinden sayısal verilerle kıyaslamalar yapılamamıştır.

3.3 Kesme Sıcaklığı

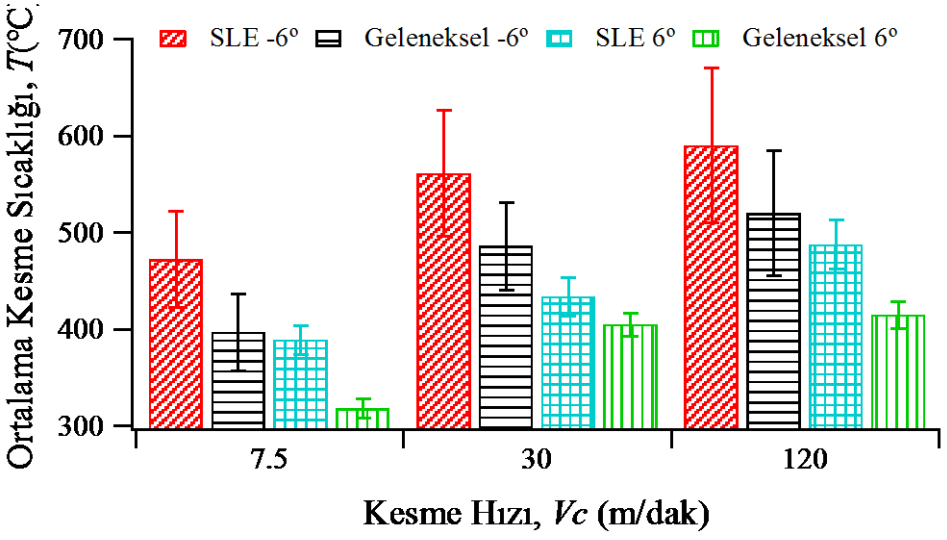
Talaş kaldırma deneyleri esnasında ölçülen ortalama kesme sıcaklıkları bu bölümde sunulmuştur. Şekil 3.17' de kesme hızı, kesme koşulu ve malzeme farklılığının bir sonucu olarak dik kesme deneylerinde ölçülen ortalama kesme sıcaklıkları gösterilmiştir. Kesme hızı arttıkça sıcaklıkta artış göstermiştir. Kriyojenik soğutucunun efektif bir soğutma gerçekleştirdiği görülmektedir. Ayrıca SLE malzemenin işlenmesi sırasında ölçülen sıcaklık değerlerinin geleneksel malzeme işlenirken ölçülen sıcaklık değerlerinden daha yüksek olduğu barizdir. Bu durum malzeme farklılığını vurgulamaktadır. 7.5 m/dak kesme hızında SLE kuru koşuldan kriyojenik koşula sıcaklıktaki azalma %87 ve geleneksel kuru koşuldan kriyojenik

koşula sıcaklıktaki azalma %86 oranında gerçekleşmiştir. 120 m/dak kesme hızında ise SLE malzemede koşullar arasındaki sıcaklık farkı %67 ve geleneksel de ise %72' dir.



Şekil 3.17. SLE ve geleneksel parçaların tornalanmasında ölçülen ortalama kesme sıcaklıklarına kriyojenik soğutucunun etkisi (γ= -3°)

Şekil 3.18' de kesici takım talaş açısının ve malzeme farklılığının ölçülen ortalama sıcaklık değerlerine etkisi kesme hızına bağlı olarak gösterilmiştir. Kesme hızı arttıkça sıcakğın artığı barizdir. Her iki malzeme için de negatif talaş açısında ölçülen sıcaklıklar pozitif talaş açısına göre daha yüksektir. Aynı talaş açısı değerinde SLE malzemenin işlenmesinde ölçülen sıcaklılar ise geleneksel malzemenin işlenmesinde ölçülen sıcaklıktan her zaman daha yüksek ölçülmüştür.

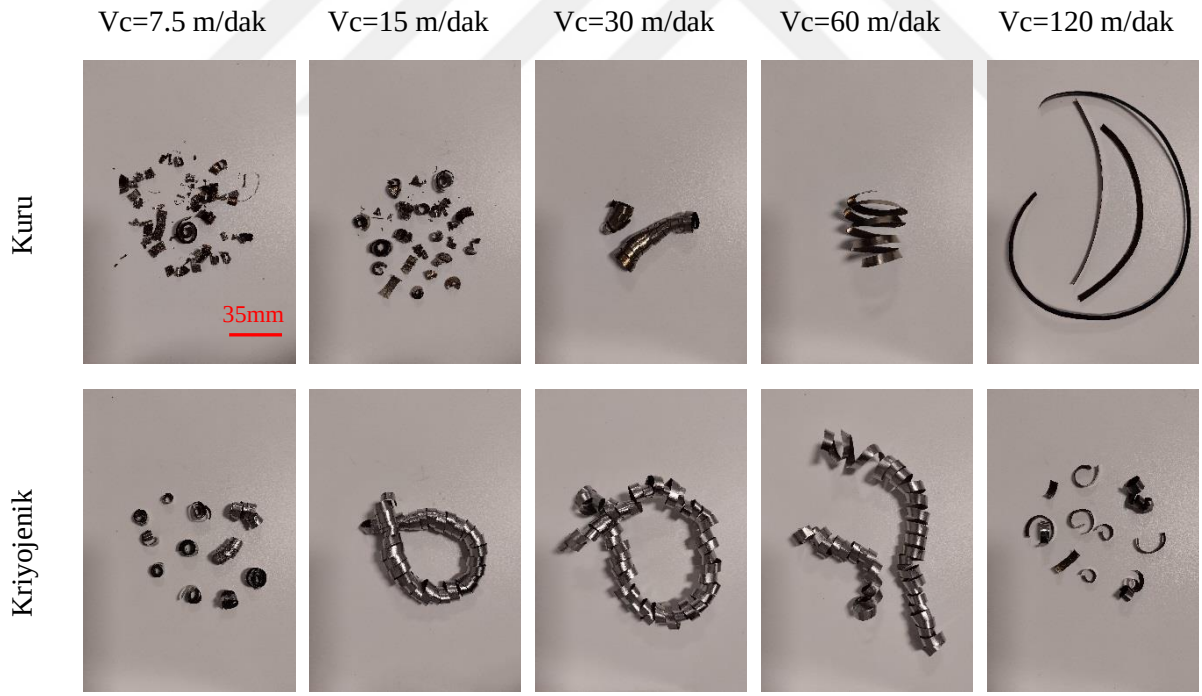


Şekil 3.18. SLE ve geleneksel parçaların farklı talaş açısına sahip kesici takımlarla dik tornalanmasında ölçülen ortalama kesme sıcaklıkları

3.4 Talaş Morfolojisi

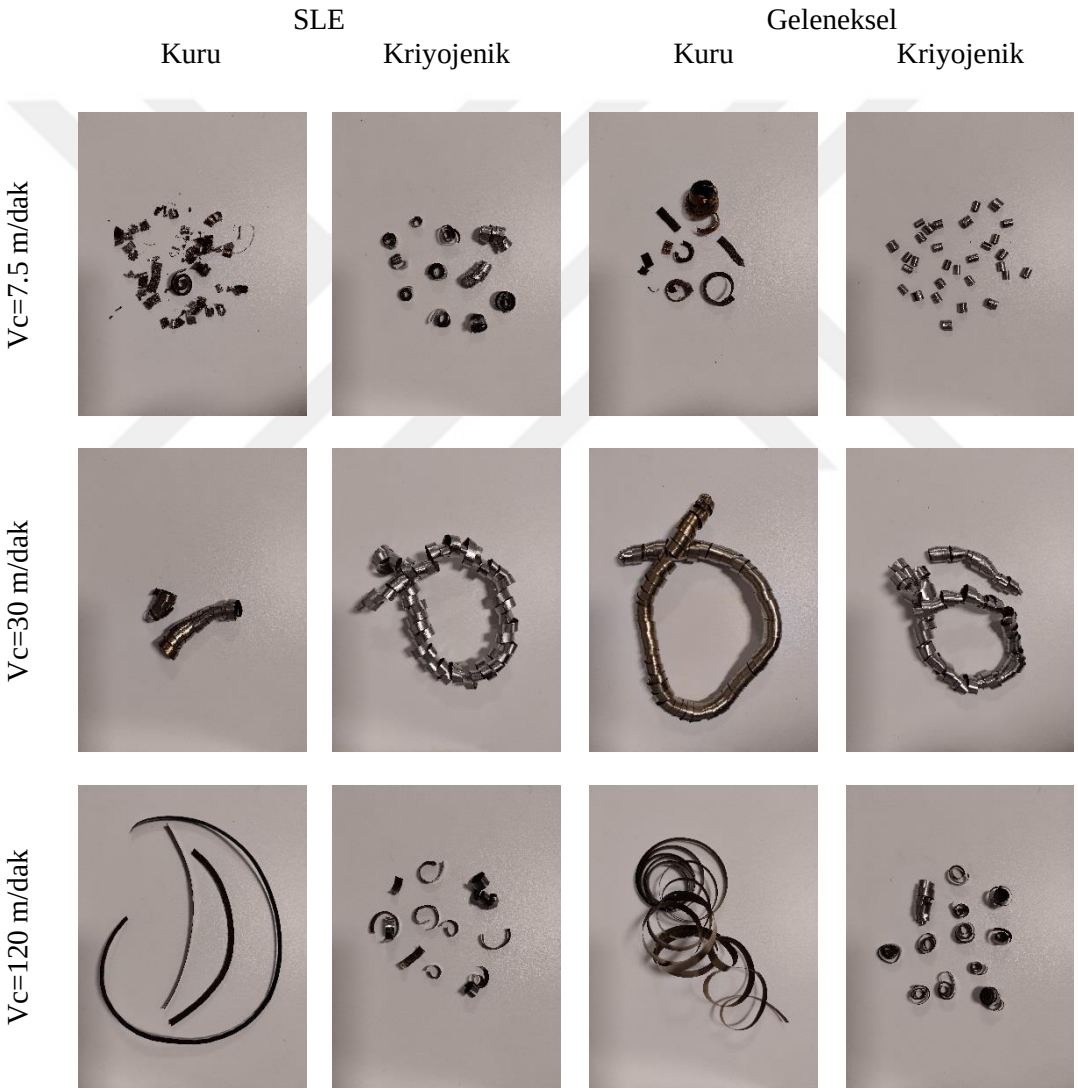
3.4.1 Talaş kırılabilirliği

Gerçekleştirilen deneylerde elde edilen talaşların görüntüleri bu bölümde sunulmuştur. Farklı deney parametrelerinin talaş oluşumuna etkisi incelenmiştir. Şekil 3.19' da SLE parçaların kuru ve kriyojenik koşullarda değişken kesme hızlarında dik kesilmesinde oluşan talaşların görüntüleri sunulmuştur. Genel olarak bakıldığında hem kuru hem de kriyojenik koşulda kesme sıcaklığının etkisi anlaşılmaktadır. Kuru kesmede 30 m/dak ve kriyojenik koşulda ise 15 m/dak kesme hızından itibaren sürekli talaş oluşumu meydana gelmiştir. Kesme koşulunun etkisi özellikle en düşük kesme hızı olan 7.5 m/dak değerinde barizdir. Kuru kesmede toz ve kırıklı yapıdaki talaşlara nazaran kriyojenik koşulda düzenli kırılan talaşlar oluşmuştur. Dikkat çeken bir diğer nokta ise kriyojenik koşulda 120 m/dak kesme hızında sürekli talaşların kırılmasıdır. Burada kesme hızının artmasıyla talaş kalınlığının azalması eğilimi, artan sıcaklık ve deformasyon hızının etkisiyle talaşlarda kırılmaya sebebiyet vermiştir.



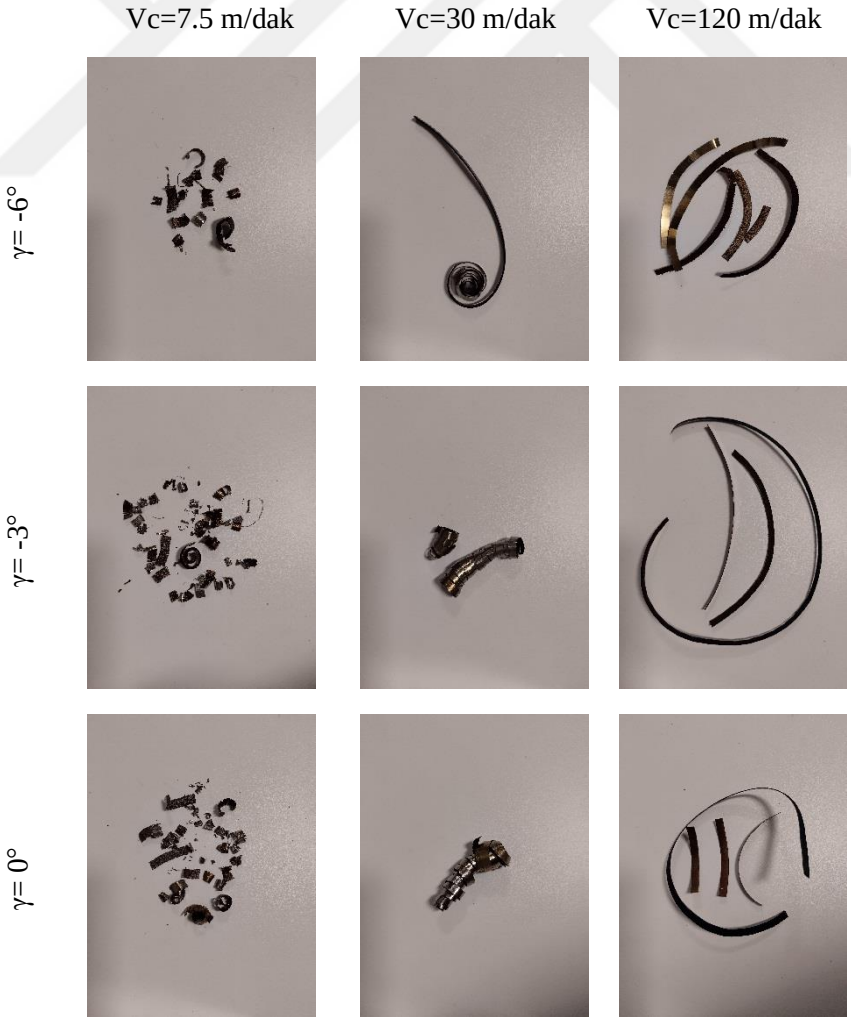
Şekil 3.19. SLE parçaların dik tornalanmasında elde edilen talaşların resimleri (γ= -3°)

Şekil 3.20’ de ise değişken kesme hızı ile kuru ve kriyojenik koşullarda SLE parçaların dik kesilmesinde oluşan talaşların görüntüleri geleneksel parçaların aynı koşullarda dik kesilmesinde oluşan talaşların görüntüleriyle kıyaslanmıştır. Kesme parametrelerinin talaşlar üzerindeki etkisi, farklı mikroyapı karakteristiğine sahip olsalar da hem SLE hem de geleneksel malzeme için benzerdir. Kesme hızının 7.5 m/dak değerinde tüm talaşlarda kırılabilirlik iyi olmakla beraber, kriyojenik koşulda kuru koşula göre talaşlar daha kararlı kırılmıştır. 30 m/dak kesme hızında sıcaklığın etkisiyle sürekli talaş oluşumu tüm koşullarda geçerliyken, 120 m/dak kesme hızında ise sadece kuru kesme koşulunda sürekli talaş oluşumu mevcut olup kriyojenik koşulda sürekli talaşlar kırılma eğilimine girmiştir.



Şekil 3.20. SLE ve geleneksel parçaların dik tornalanmasında elde edilen talaşların resimleri (γ= -3°)

Şekil 3.21’ de SLE parçaların değişken talaş açısı değerlerinde kuru koşulda dik kesilmesi deneylerinde oluşan talaşların görüntüleri kesme hızına bağlı olarak sunulmuştur. Genel olarak bakıldığında kesme sıcaklığının etkisi tüm talaş açısı değerlerinde benzer şekilde gelişmiştir. Kesme hızının artmasıyla sürekli talaş oluşumu gözlemlenmiştir. Kesme hızı 7.5 m/dak değerinde düzensiz kırıklı talaş oluşumu meydana gelmiştir. Kesme hızının etkisi 30 m/dak değerinde kendini göstermiştir. Özellikle negatif talaş açısı değerlerinde oluşan talaşlar sürekli fakat birbirine kaynamış vaziyettedir. Pozitif talaş açısı değerindeki talaşlar ise daha kararlı yapıdadır. Bu durum negatif talaş açısı değerlerindeki dik kesme deneylerinin abrasif gerçekleştiğine işaret etmekle beraber, daha önceki bölümde sunulan takım aşınma görüntülerinde görülen kırılma ve plastik deformasyonlarda bu durumu desteklemektedir. Kesme hızı 120 m/dak değerinde ise oluşan tüm talaşlar birbiriyle benzer ve sürekli formdadır. Negatif talaş açısı değerlerinde ki talaşların pozitif talaş açısındaki talaşlara kıyasla daha gevrek ve kırılgan olduğu görüntülerden anlaşılmaktadır.





Şekil 3.21. SLE parçaların farklı talaş açısına sahip kesici takımlarla dik tornalanmasında elde edilen talaşların resimleri

SLE ve geleneksel parçaların kuru kesme koşulunda değişken talaş açısı ve kesme hızına bağlı olarak oluşan talaşların görüntüleri Şekil 3.22' de sunulmuştur. Kesme hızı 7.5 m/dak değerinde malzeme farklılığı ön plandadır. SLE talaşlar düzensiz ve kırıklı yapıda iken geleneksel talaşlar sürekli yapıdadır. 30 m/dak kesme hızında ise talaş açısının etkisi ön plandadır. Negatif talaş açısı değerinde talaşlar birbirine kaynamış vaziyette iken pozitif talaş açısı değerinde ise talaşlar birbirine benzer yapıda süreklidir. Kesme hızı 120 m/dak değerinde malzeme etkisi görülmektedir. SLE talaşlar daha düz ve gevrek yapıda iken geleneksel talaşlar nispeten daha kıvrımlıdır.

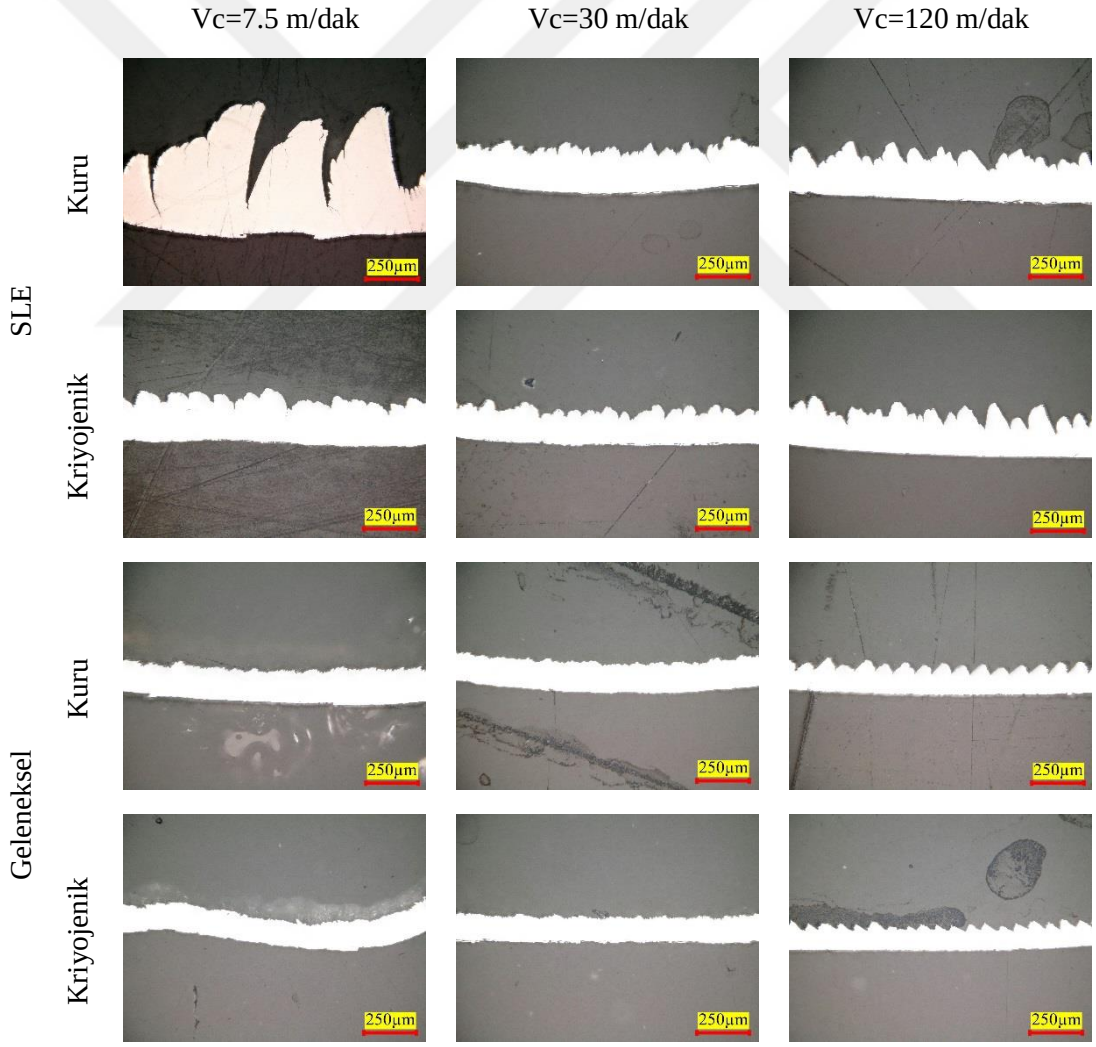


Şekil 3.22. SLE ve geleneksel parçaların farklı talaş açısına sahip kesici takımlarla dik tornalanmasında elde edilen talaşların resimleri

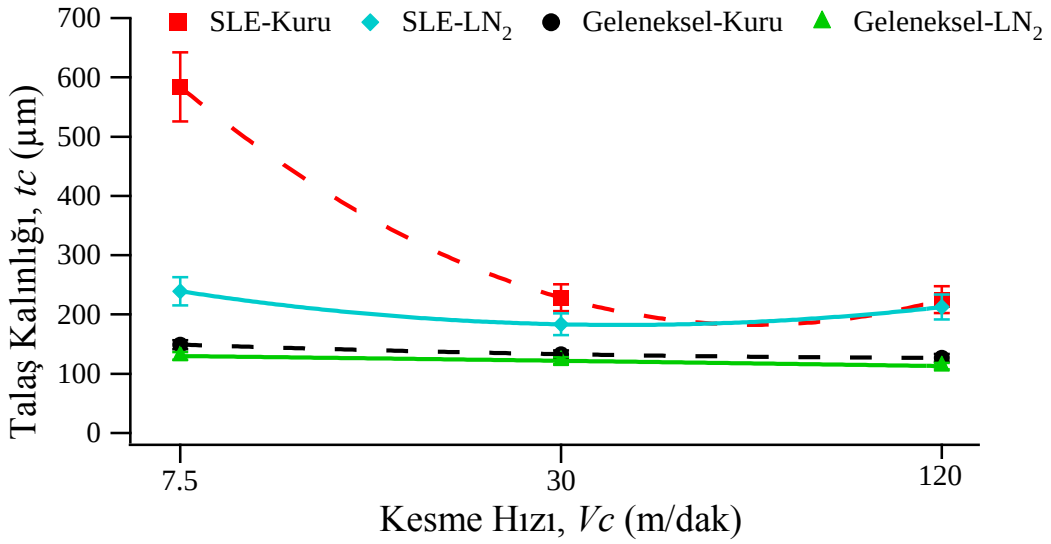
Bu bölümde SLE ve geleneksel malzemenin benzer kimyasal içeriğe sahip olsalar bile farklı mikroyapı karakteristikleri ve SLE malzemenin anizoropik davranışının dik kesme deney parametreleriyle birleşince talaş oluşumuna olan etkileri ortaya konulmuştur.

3.4.2 Talaş kalınlığı

Soğuk bakalite alınan talaşların parlatıldıktan sonra dijital mikroskop altında alınan resimleri ve bu resimlerden ölçülen talaş kalınlık değerleri bu bölümde incelenmiştir. Talaş kalınlık değerleri her bir talaş üzerinden 5 farklı ölçüm yapıldıktan sonra ortalama değerler alınarak tayin edilmiştir. SLE parçaların kuru ve kriyojenik koşullarda işlenmesinde oluşan talaşların kalınlık değerleri ve aynı koşullardaki geleneksel talaşların kalınlık değerleri, Şekil 3.23' te gösterilen görüntüler vasıtasıyla ölçülerek Şekil 3.24' te sunulmuştur. Talaş kalınlık değerlerinde kesme hızının etkisi belirgin şekilde görülmektedir. Kesme hızı artınca talaş kalınlıkları azalmıştır. Ayrıca SLE talaş kalınlıkları her zaman geleneksel talaş kalınlıklarından fazla ölçülmüştür. Bir diğer eğilim ise hem SLE hem de geleneksel talaşlarda kuru kesme koşulundaki talaş kalınlıkları kriyojenik talaş kalınlıklarından fazladır.

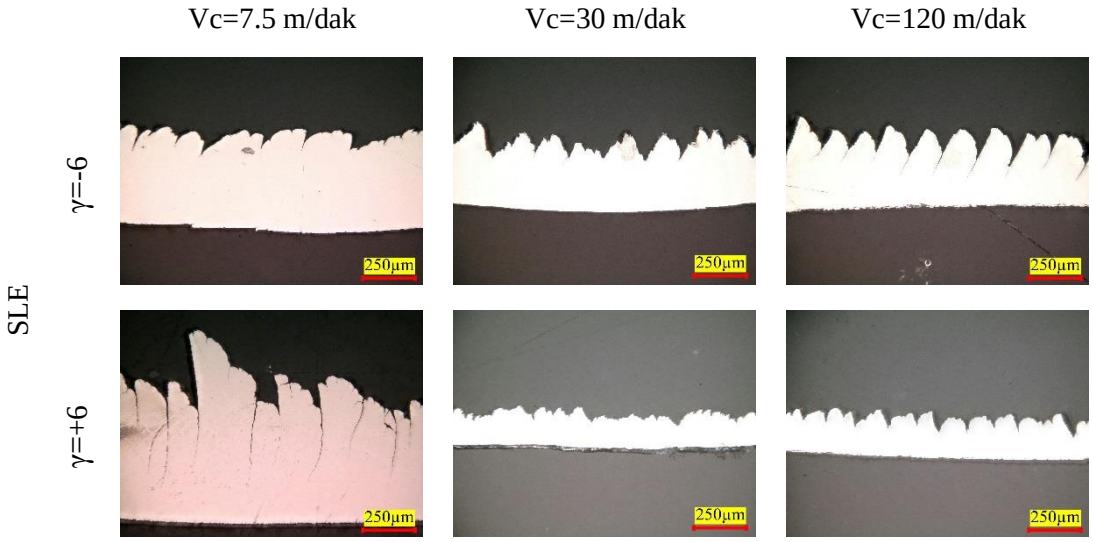


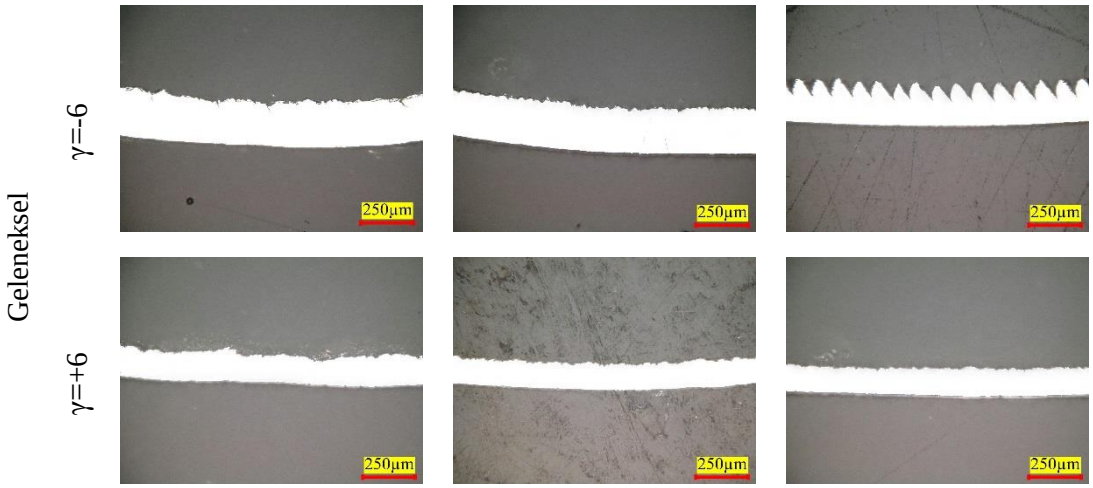
Şekil 3.23. SLE ve geleneksel parçaların tornalanmasında elde edilen talaşların OM resimleri (γ= -3°)



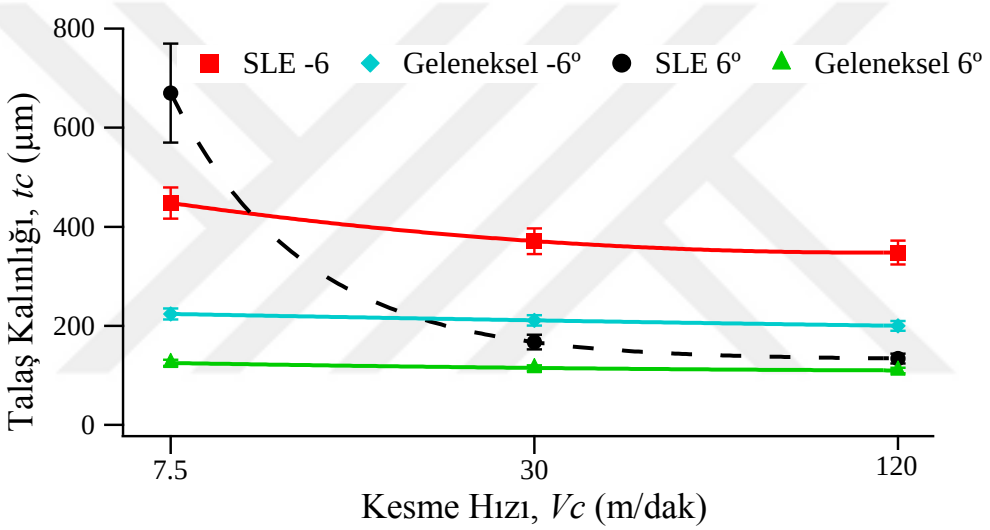
Şekil 3.24. SLE ve geleneksel parçaların dik tornalanmasında elde edilen talaşların OM resimlerinden ölçülen talaş kalınlıkları (γ= -3°)

SLE ve geleneksel parçaların kuru koşulda değişken talaş açısı ve kesme hızı değerlerinde dik kesilmesinde oluşan talaşların kalınlıkları Şekil 3.25' te sunulan talaş görüntülerinden ölçülerek Şekil 3.26' da gösterilmiştir. Genel eğilim kesme hızının artmasıyla talaş kalınlıklarında meydana gelen azalmadır. SLE ve geleneksel talaşların kararlı talaş yapılarının ortak olduğu 30 ve 120 m/dak kesme hızı değerindeki talaş kalınlıkları aynı talaş açısı değerleri baz alınarak incelendiğinde SLE talaş kalınlıklarının geleneksel talaşlara kıyasla daha fazla olduğu görülmektedir. Ayrıca bir diğer eğilim ise negatif talaş açısı değerinde ölçülen talaş kalınlıklarının pozitif talaş açısı değerinden ölçülen talaş kalınlığı değerlerinden fazla olduğudur.





Şekil 3.25. SLE ve geleneksel parçaların farklı talaş açısına sahip kesici takımlarla dik tornalanmasında elde edilen talaşların OM resimleri



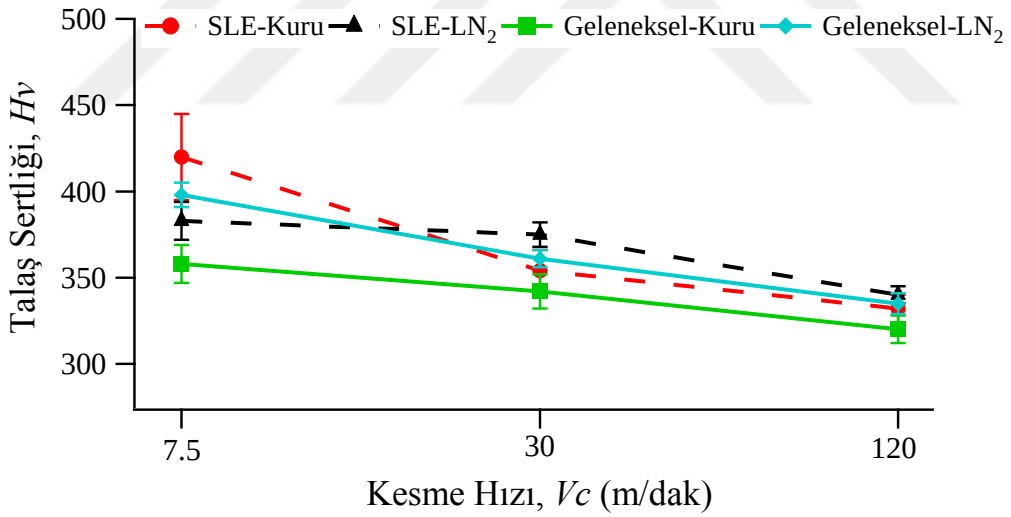
Şekil 3.26. SLE ve geleneksel parçaların farklı talaş açısına sahip kesici takımlarla dik tornalanmasında elde edilen talaşların OM resimlerinden talaş kalınlıkları

Bu bölümde talaş kalınlıklarının farklı parametrelerde kıyaslaması yapılmıştır. Paylaşılan talaş görüntüleri talaş kalınlığı ölçümlerine kaynak niteliği taşımaktadır. Talaş oluşumuna etki eden birçok parametre vardır ve talaş yapılarının detaylı incelemesi sonraki bölümlerde ele alınacaktır.

3.5 Mikrosertlik

3.5.1 Talaş sertliği

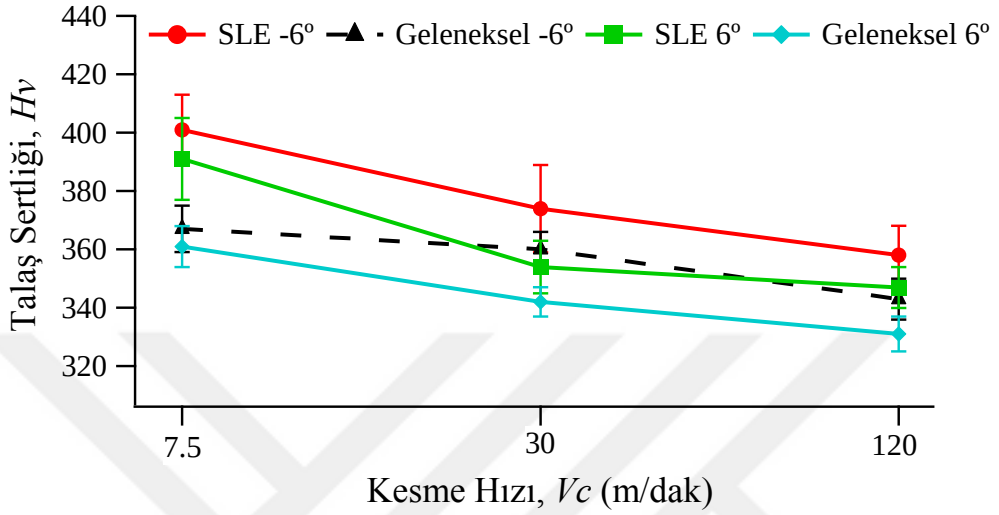
Bu bölümde bakalit alınıp parlatılan talaşların ölçülen Vickers mikrosertlik değerleri paylaşılmıştır. Şekil 3.27' de kuru ve kriyojenik koşullarda oluşan SLE ve geleneksel talaşların sertlik değerleri gösterilmiştir. Kesme koşulundan bağımsız olarak SLE talaş sertlikleri geleneksel talaş sertliklerine göre daha yüksektir. Kesme hızı arttıkça talaş sertliklerinde azalma eğilimi mevcuttur. Kriyojenik talaş sertlikleri kuru koşuldaki talaşlara kıyasla daha yüksektir. Kriyojenik soğutmanın etkisiyle mekanik deformasyonun daha baskın olması kuru kesmeye kıyasla her iki malzeme talaşlarının sertliklerinde daha çok artışa yol açmıştır. 7.5 m/dak kesme hızında SLE kuru koşuldaki talaş için ise çok düşük deformasyon hızı ve sıcaklığında etkisiyle malzemenin anizotropik karmaşık yapısının bir araya gelmesiyle aşırı plastik deformasyon oluşumu burada sertliğin kriyojenik koşula kıyasla daha fazla artışına yol açmıştır. Bu mekanizma sonraki bölümlerde açıklanmıştır.



Şekil 3.27. SLE ve geleneksel parçaların dik tornalanmasında elde edilen talaşların ölçülen mikrosertlik değerleri (γ= -3°)

SLE ve geleneksel malzemelerin negatif ve pozitif talaş açısı değerlerinde işlenmesinde oluşan talaşların sertlik değerlerinin kıyaslaması Şekil 3.28' de gösterilmiştir. Genel eğilim kesme hızı arttıkça sertliklerin azalması yönündedir. Aynı kesme parametrelerinde işlenseler de SLE talaş sertliklerinin geleneksel talaş sertliklerine kıyasla yüksek olduğu görülmektedir.7.5 m/dak kesme hızında negatif talaş açısında SLE talaş sertliği geleneksele kıyasla %9 daha fazla iken pozitif talaş açısında ise bu oran %7 dir. 120 m/dak kesme hızında negatif talaş açısında SLE

ve geleneksel talaş sertlikleri arasındaki fark %4 iken pozitif talaş açısında bu oran %5 tir. 7.5 m/dak kesme hızında SLE ve geleneksel talaşlar arasındaki fark daha yüksek iken 120 m/dak kesme hızında ise geleneksel talaş sertlikleriyle aradaki fark nispeten azalmıştır.



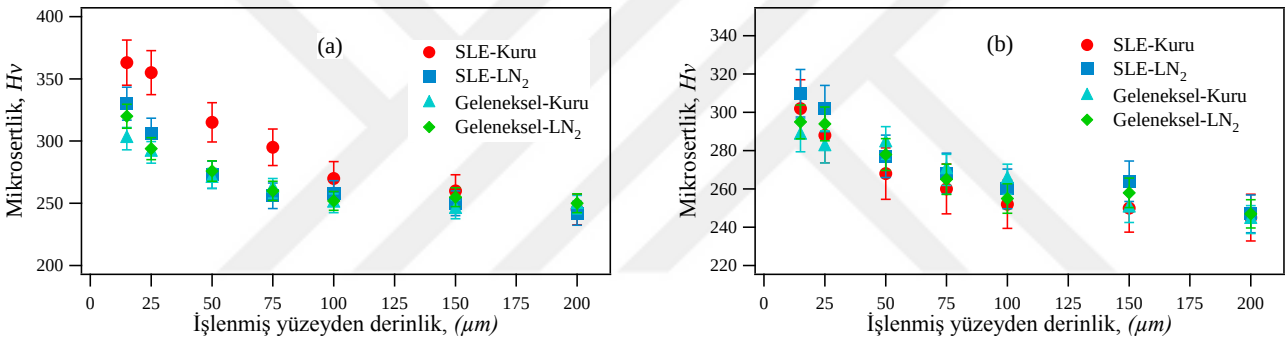
Şekil 3.28. SLE ve geleneksel parçaların farklı talaş açısına sahip kesici takımlarla dik tornalanmasında elde edilen talaşların ölçülen mikrosertlik değerleri

Açıkçası bölüm 3.4.1' de sunulan talaş resimleri incelendiğinde özellikle 7.5 m/dak kesme hızında oluşan talaşların yapısı neredeyse toz denilebilecek boyuttadır. Dolayısıyla bu tür talaşlardan alınan numunelerin sertlik ölçümünde, kararlı ve uzun yapıdaki talaşlara kıyasla daha hassas olunmasını gerektirmektedir. Bu bölümde sunulan talaş sertliği grafiklerinin hepsinde benzer ve genel eğilimler mevcut olduğundan yapılan ölçümlerin doğruluğu sağlanmaktadır.

3.5.2 İşlenmiş malzeme sertliği

Mikrosertlik malzemenin mekanik özelliklerini doğrudan etkileyen bir göstergedir. Özellikle, birbirleriyle temas halinde çalışan parçaların yorulma direncini etkiler [53]. İşlenmiş SLE ve geleneksel numunelerin kuru ve kriyojenik koşullar altındaki mikrosertlik değerleri, Şekil 3.29a' da 7,5 m/dakika kesme hızı ve Şekil 3.29b' de 120 m/dakika kesme hızı için karşılaştırılmıştır. SLE numunelerinin sertlik değerleri geleneksel numunelerin sertliğinden

daha yüksektir. Ayrıca düşük kesme hızındaki sertlik değerleri, yüksek kesme hızındaki sertlik değerlerinden daha büyüktür. SLE malzemesinin sertliği, özellikle düşük kesme hızında ve kuru koşullarda en yüksektir. Numunenin APD davranışı sertlik değerlerine yansımıştır. Aslında kriyojenik koşulda mekanik etkiler baskındır ve sertliğin daha da artması beklenir. Bu durum, geleneksel numunelerde beklendiği gibi gerçekleşmiştir. Ancak SLE malzemesinin anizotropik yapısı, malzeme kuru koşullarda mekanik ve termal etkiler nedeniyle APD davranışına maruz bırakıldığında daha da karmaşık hale gelmiş ve sertlikte artışa neden olmuştur. Yüksek kesme hızında kesme sıcaklığındaki artış malzemelerin daha kolay işlenmesine izin vermiş olup dislokasyon yok etme etkisi malzeme sertliğinin düşük kesme hızına göre daha az artmasına neden olmuştur. En yüksek sertlik değeri, her iki malzeme için de kriyojenik koşullar altında ölçülmüştür.



Şekil 3.29. Kuru ve kriyojenik koşullarda işlenmiş SLE ve geleneksel numunelerin sertlik değerleri a)Vc=7.5 m/dak b)Vc=120 m/dak (γ= -3°)

Malzeme farklılıkları ve kesme parametrelerinin yanı sıra, SLE malzemesinin anizotropik yapısının sertlik üzerindeki etkisi de incelenmiştir. İşlenmiş numunelerin inşa yönünden mikrosertlik değerleri Şekil 3.30a' da gösterilmiştir. En yüksek sertlik değeri kuru kesmede 363 HV olarak ölçülmüştür. Kriyojenik işlemede en yüksek sertlik değeri 330 HV'dir. Kuru ve kriyojenikte, işlem görmemiş haldeki sertliğe kıyasla sırasıyla %51 ve %37'lik bir artış vardır. İşlem görmemiş sertlik değerine kuru kesmede işlenmiş yüzeyden 200 µm derinlikte ulaşılırken, kriyojenik olarak işlenmiş numunede 75 µm'de ulaşılmıştır. Tarama düzleminden işlenmiş numunelerin mikrosertlik değerleri Şekil 3.30b' de gösterilmiştir. Tarama düzleminde ölçülen sertlik değerleri, inşa düzlemine göre nispeten daha yüksektir. Ancak hata çubukları dikkate alındığında, anlamlı bir fark olmadığı görülmektedir. İşlenmiş numunede ölçülen en yüksek ve en düşük sertlik değerleri arasındaki fark yaklaşık %10'dur. Ayrıca işlenmiş

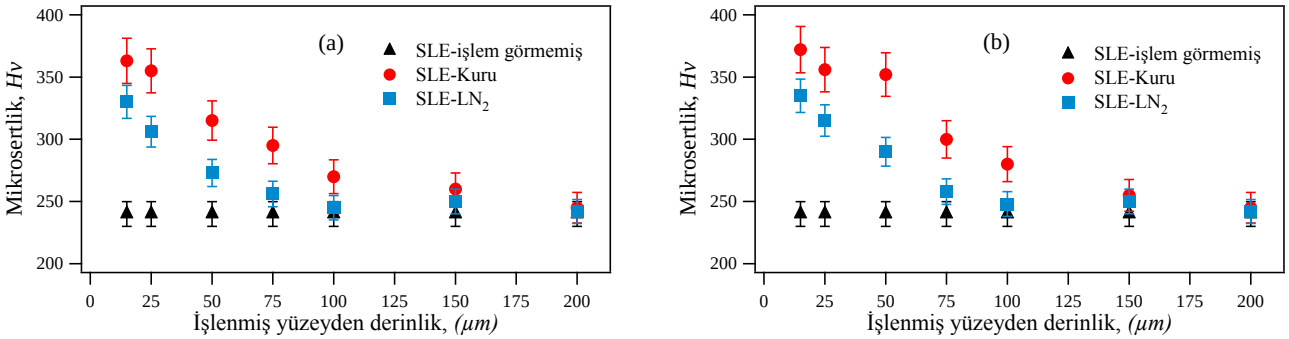
yüzeyden 15 µm derinlikte en yüksek ve en düşük sertlik değerlerindeki artış, işlem görmemiş malzeme sertliğine kıyasla sırasıyla %55 ve %39'dur. İşlem görmemiş malzeme sertliğine kuru kesmede işlenmiş yüzeyden 150 µm derinlikte ulaşılırken, kriyojenik kesmede 100 µm derinlikte ulaşılmıştır.

İnşa ve tarama düzleminden yapılan sertlik değeri ölçümlerinde yaklaşık %3'lük bir fark vardır. Bu fark SLE yöntemi ile imal edilen malzemenin anizotropik mikroyapısından kaynaklanmaktadır [54]. Lazer ergitme hızı çok yüksek ve katılaşma süresi kısa olduğundan, atomik yeniden yapılandırma hızı difüzyon hızından daha hızlı olmaktadır. Bu durum kristal boyutundaki büyümeyi etkilese de anizotropi, östenit faz kristal düzlem alanının artması sonucu ortaya çıkmaktadır [55]. Şekil 3.30a ve 3.30b' deki işlenmiş malzeme sertlikleri dikkate alındığında bu fark ihmal edilebilir düzeydedir. Ayrıca, işlenmiş numunelerin sertlik değerlerinin tarama ve inşa düzlemlerinde aynı oranda farklılık gösterdiği belirlenmiştir. Açıkçası, düzlemler arasındaki bu sertlik farkı ihmal edilebilir düzeydedir ve işlendikten sonra önemli bir değişim yine olmamıştır. Anizotropi açısından bir diğer ifade ise sertlik değişiminin işlenmiş yüzeyden uzaklığıdır. İşlenmiş numune sertliği inşa düzleminde 100-150 µm'de, tarama düzleminde ise 100-125 µm derinlikte işlem görmemiş malzeme sertliği ulaşmıştır. Aslında hata çubukları hem bu durumu vurgulamakta hem de ölçüm hatası toleransını ifade etmektedir.

Açıkçası yüksek sıcaklığın kuru kesmede dislokasyonu yok edici etki yaratması ve sertliğin kriyojenik kesmeye göre nispeten daha az olması beklenir. Ancak APD etkisi mikroyapıda yüzeyde ve yüzey altında nanometre boyutunda taneler oluşturmuş ve kuru koşullarda sertliği artırmıştır [11]. Numunenin tane boyutu ile akma dayanımı arasındaki ilişkiyi tanımlayan Denklem 5 'teki Hall-Petch ilişkisi, çok daha küçük taneler içerdiği için kuru işlenmiş numune için bu durumu desteklemektedir. Kriyojenik işlemenin daha düşük deformasyon sıcaklığı APD mekanizmasını daha az verimli hale getirmiştir. Bunun yerine, mikrosertlik gerinim sertleşmesi etkisiyle artmıştır. Ancak, mikroyapıda çok fazla değişiklik olmamasına rağmen kriyojenik koşullar altında sertlikteki artış yalnızca dislokasyon kaynaklı gerinim sertleşmesi ile açıklanamaz. İşlenmiş numunedeki kalıntı gerilmeler, esas olarak takım-iş parçası temasından kaynaklanan elasto-plastik deformasyondan kaynaklanır [13]. İşleme kaynaklı kalıntı gerilmelerin sertlik üzerindeki etkisi de önemlidir. X-ışını kırınımı analizi, sertlik artışının mikroyapıda oluşan işleme kaynaklı etkilenen katman kalınlığının sınırlı olması nedeniyle hem gerinim sertleşmesiyle hem de çekme kalıntı gerilmesiyle meydana geldiğini göstermektedir. Bu durum sonraki bölümde detaylı olarak ele alınmıştır.

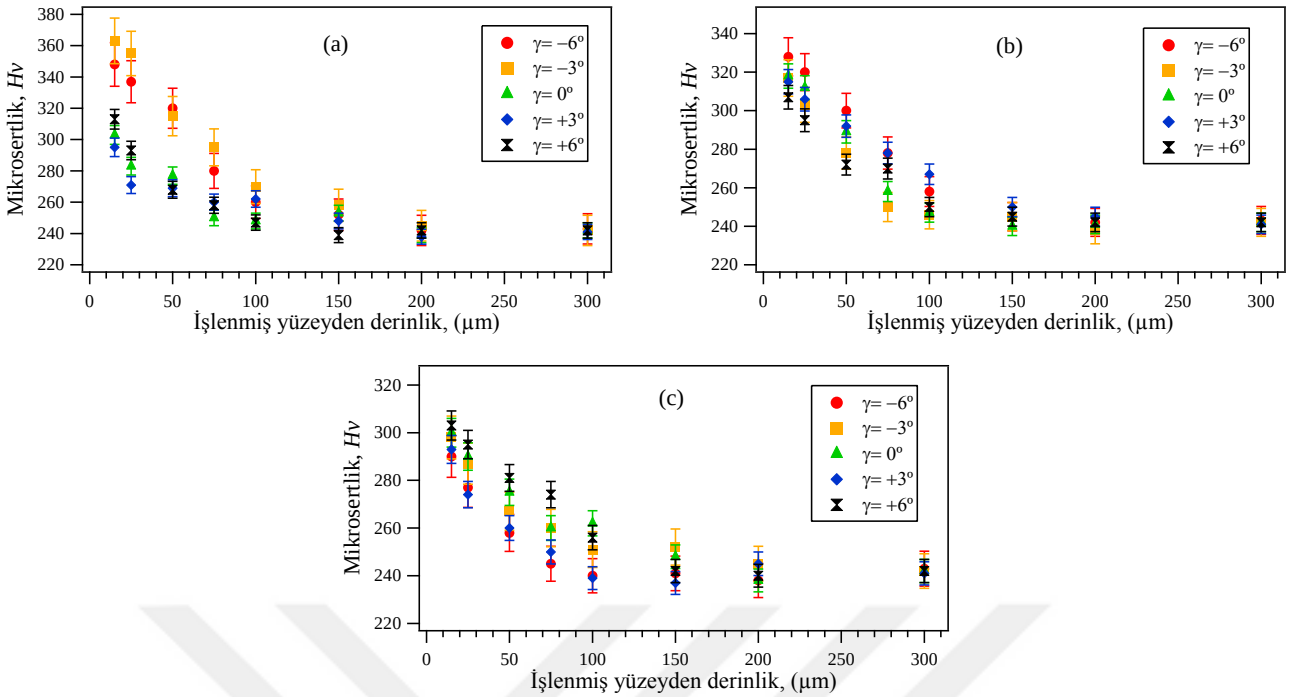
$$\sigma_y = \sigma_0 + k/\sqrt{D} \quad (5)$$

burada σ_y akma gerilmesi, σ_0 sürtünme gerilmesi, k sabit ve D ise tane boyutudur [56].



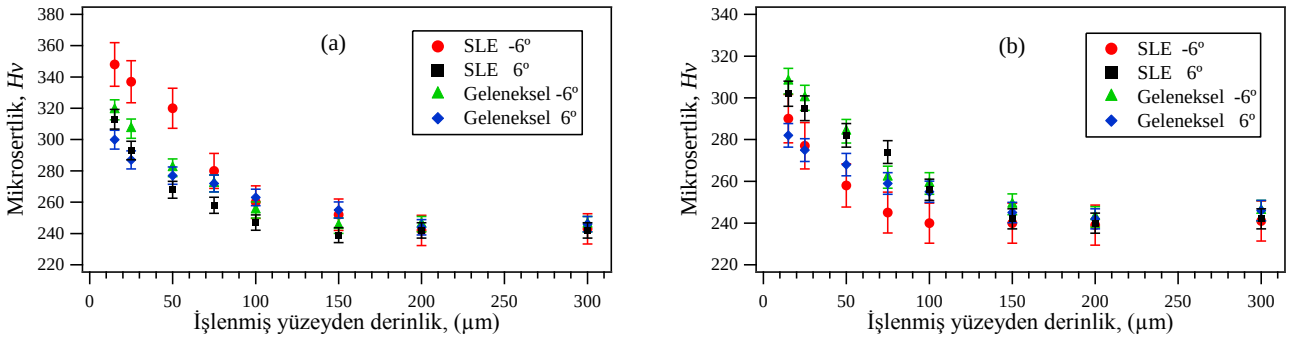
Şekil 3.30. Kuru ve kriyojenik koşulda işlenmiş SLE numunelerin sertlikleri (Vc= 7.5 m/dak) a)İnşa yönü ve b)Tarama yönü

Farklı talaş açısı değerlerinde işlenmiş SLE numunelerin işlenmiş yüzeyden 300 µm derinliğe kadar ölçülen mikrosertlik değerleri Şekil 3.31' de gösterilmiştir. Tüm kesme hızlarında 200 µm derinlikten sonra işlem görmemiş malzeme sertliğine ulaşılmıştır. Kesme hızı arttıkça sertlik değerleri tüm talaş açılarında azalmıştır. Negatif talaş açısı değerlerinde sertlik değerleri 7.5 ve 30 m/dak kesme hızlarında daha yüksek iken, pozitif talaş açısı değerlerinin 120 m/dak kesme hızında daha yüksek olduğu görülmektedir. Düşük kesme hızlarında nispeten daha düşük bir kesme sıcaklığı oluşur. Bu durum plastik deformasyon için gerekli mekanik enerjinin oluşmasına katkıda bulunur. Düşük talaş açısı nedeniyle büyük bir kesme düzlemi alanı oluşur ve yüksek kesme kuvvetleri negatif talaş açısı değerlerinde mikrosertlikte daha fazla artışa neden olur. Kesme hızı arttıkça artan sıcaklık nedeniyle mekanik etki azalır. Bu nedenle daha yüksek kesme hızında negatif talaş açısıyla işlemede sıcaklığın daha da artması muhtemeldir. Pozitif talaş açısında daha küçük kayma düzlemi nedeniyle nispeten daha düşük bir kesme sıcaklığının oluşumu 120 m/dak kesme hızında sertlikte kendini göstermiştir. İşlem görmemiş malzeme sertliğine kıyasla en yüksek ve en düşük sertlik artışları sırasıyla 7.5 m/dak kesme hızında %51 ve %23, 30 m/dak kesme hızında %36 ve %28 ve 120 m/dak kesme hızında %26 ve %21 olmuştur.



Şekil 3.31. Kesici takım talaş açısı farklılığının işlenmiş SLE malzeme sertliğine etkisi a)Vc= 7.5 m/dak b)Vc= 30 m/dak c)Vc= 120 m/dak

İşlenmiş geleneksel ve SLE numunelerin mikrosertlik değerlerinin karşılaştırılması Şekil 3.32' de gösterilmiştir. Her iki malzemenin sertliği artan kesme hızıyla azalmıştır. SLE sertliği düşük kesme hızında daha yüksekken, geleneksel sertliği yüksek kesme hızında daha fazladır. SLE malzemesi düşük kesme hızında plastik deformasyona daha yatkındır. Yüksek kesme hızında artan termal etkinin geleneksel malzemenin plastik deformasyon davranışı üzerinde daha büyük bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. SLE malzemesinin anizotropik mikroyapısı düşük kesme hızında mekanik etkiye bağlı olarak değişirken, yüksek kesme hızında oluşan sıcaklık malzemenin yeniden kristalleşmesi için yeterli olmamıştır. Ancak eş eksenli tane yapısına sahip geleneksel malzemenin yüksek kesme hızında plastik deformasyon kapasitesi SLE malzemesinden farklıdır. Sonuç olarak en yüksek sertlik değerleri 7.5 m/dak kesme hızında 348 HV olarak SLE numunesinde, 120 m/dak kesme hızında ise 308 HV olarak geleneksel numunede -6° talaş açısında ölçülmüştür.

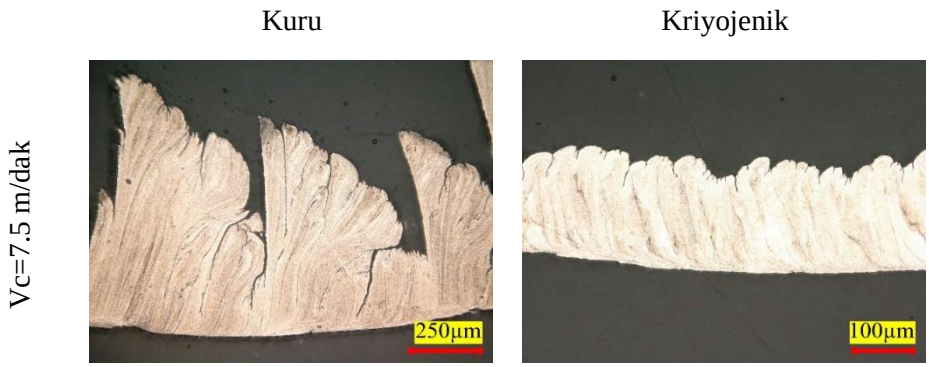


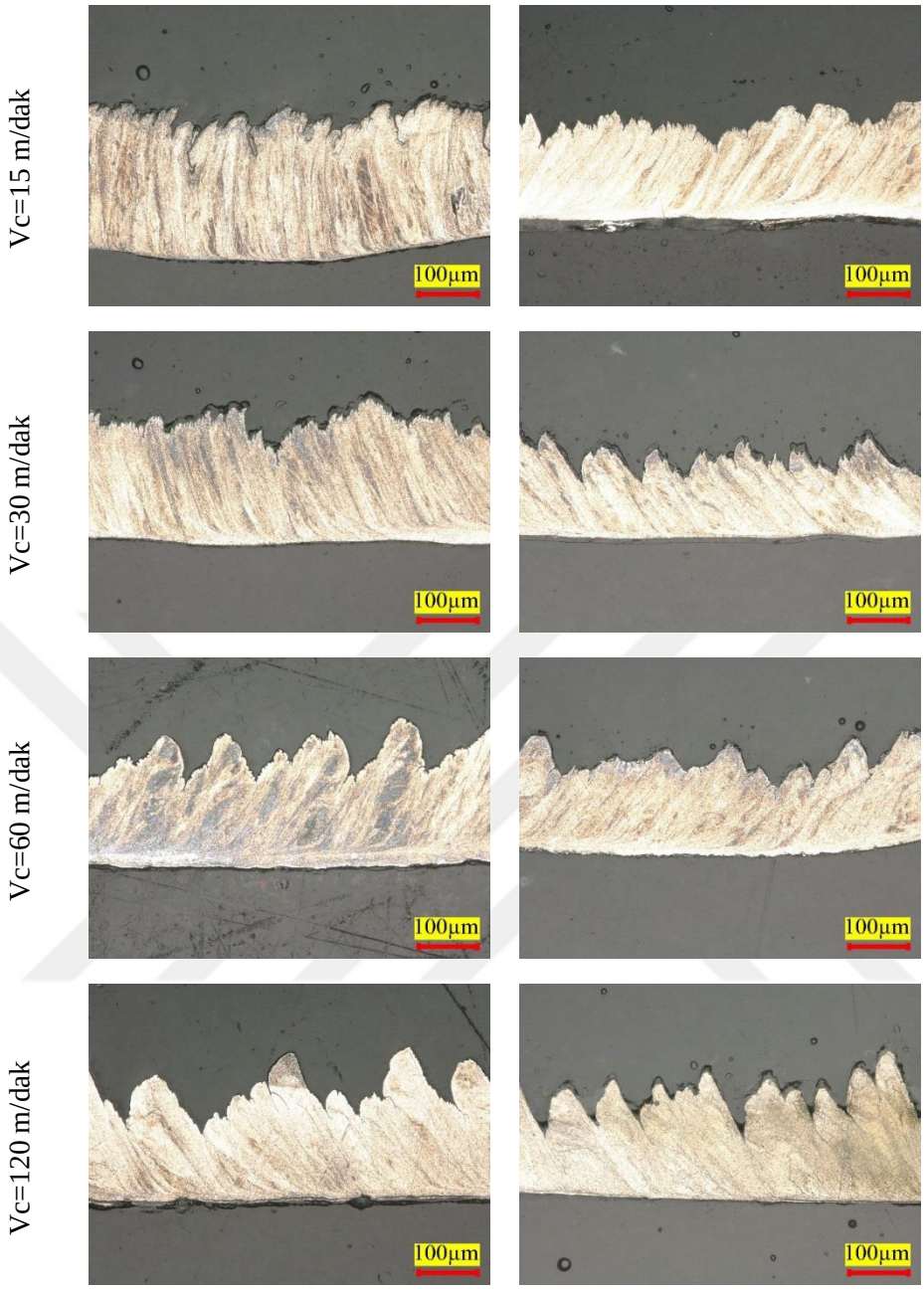
Şekil 3.32. Kesici takım talaş açısı farklılığının SLE ve geleneksel işlenmiş numune sertliğine etkisinin kıyaslaması a)Vc= 7.5 m/dak b)Vc= 120 m/dak

3.6 Mikroyapı Analizi

3.6.1 Talaş mikroyapısı

Bu bölümde bakalit alınıp dağlanan talaşların optik mikroskop ile alınan mikroyapı resimleri paylaşılmıştır. Şekil 3.33' te kuru ve kriyojenik koşullarda işlenen SLE malzemelerin talaşlarının mikroyapı resimleri gösterilmiştir. Her iki koşulda da düzensiz aralıklarda testere diş yapılarının mevcut olduğu talaş formu oluşmuştur. Düşük kesme hızlarına kıyasla özellikle 60 ve 120 m/dak kesme hızlarında daha düzenli testere diş talaş oluşumu mevcuttur. Talaşlarda belirgin bir tane formasyonu mevcut olmamakla beraber kayma bant çizgileri açıkça gözlemlenebilmektedir. Özellikle kuru koşulda kriyojenik koşula kıyasla kayma bantlarının daha dik açılara sahip olduğu görülmektedir. Kayma bandı analizleri sonraki bölümlerde detaylı incelenecektir.

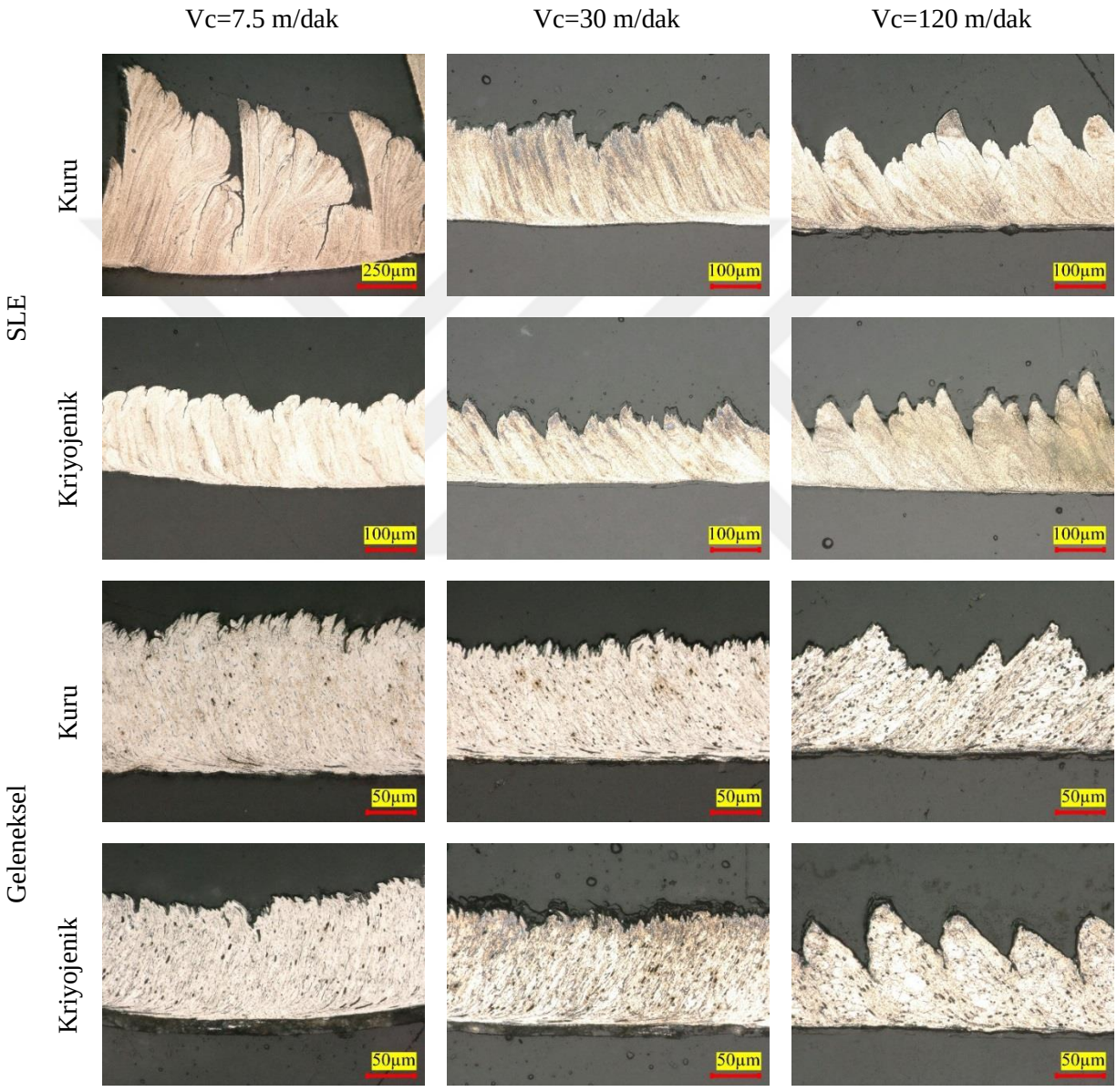




Şekil 3.33. SLE parçaların dik tornalanmasında elde edilen talaşların mikroyapı görüntüleri (γ= -3°)

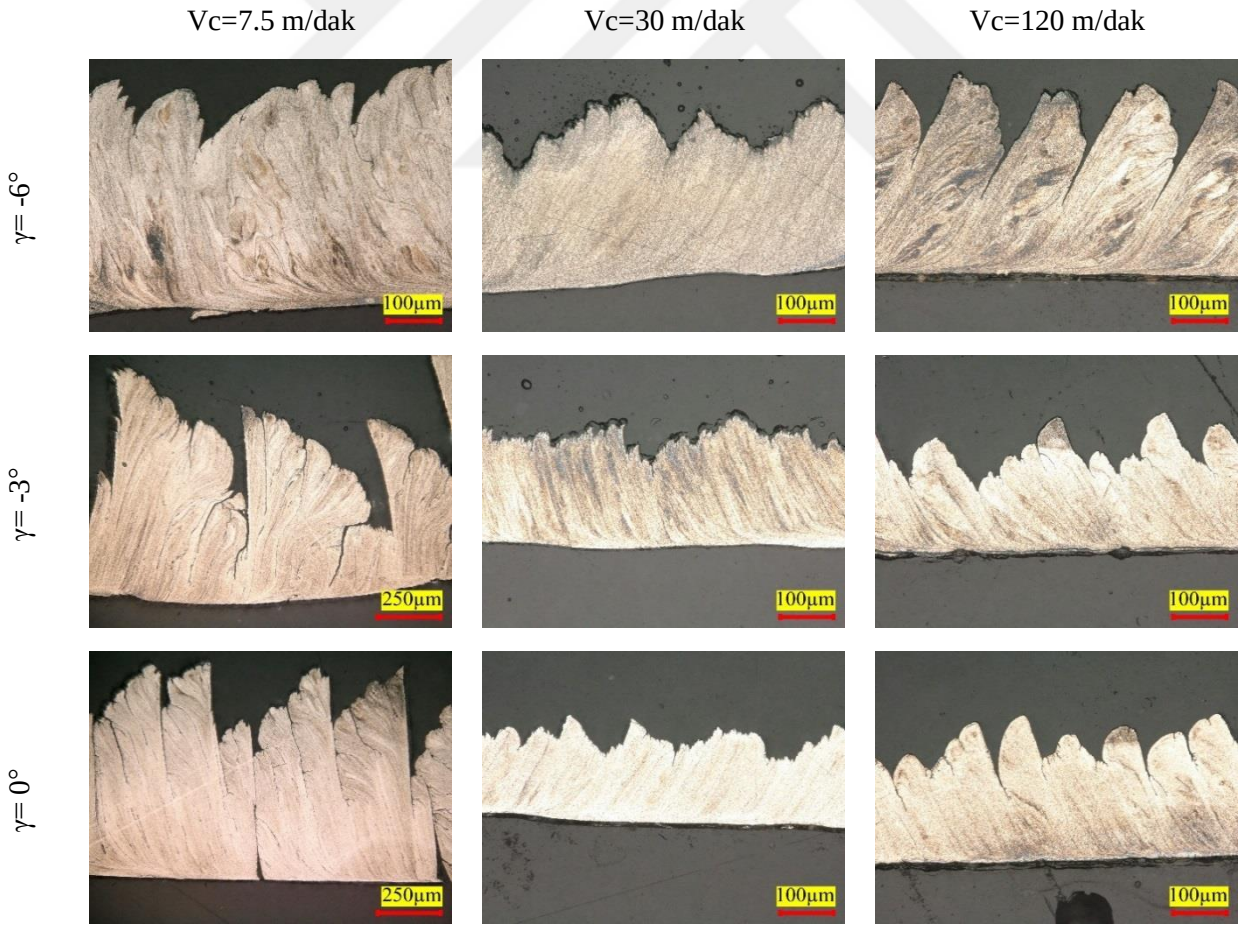
SLE ve geleneksel malzemelerin kuru ve kriyojenik koşullarda işlenmesinde oluşan talaşların kıyaslaması Şekil 3.34' te gösterilmiştir. Malzeme farklılığından kaynaklı mikroyapı karakteristikleri açıkça görülmektedir. Aynı koşullarda SLE ve geleneksel malzeme talaş kalınlıkları farklı olduğu için optik mikroskop altında aynı büyütme oranında incelemek mümkün olamamaktadır. Çünkü geleneksel talaşların incelenmesi için 1000X büyütme kullanıldığında aynı büyütme SLE talaşların kesitinin tamamının incelenmesine olanak vermediği için 500X büyütme kullanılması gerekmektedir. Bu durum alınan mikroyapı

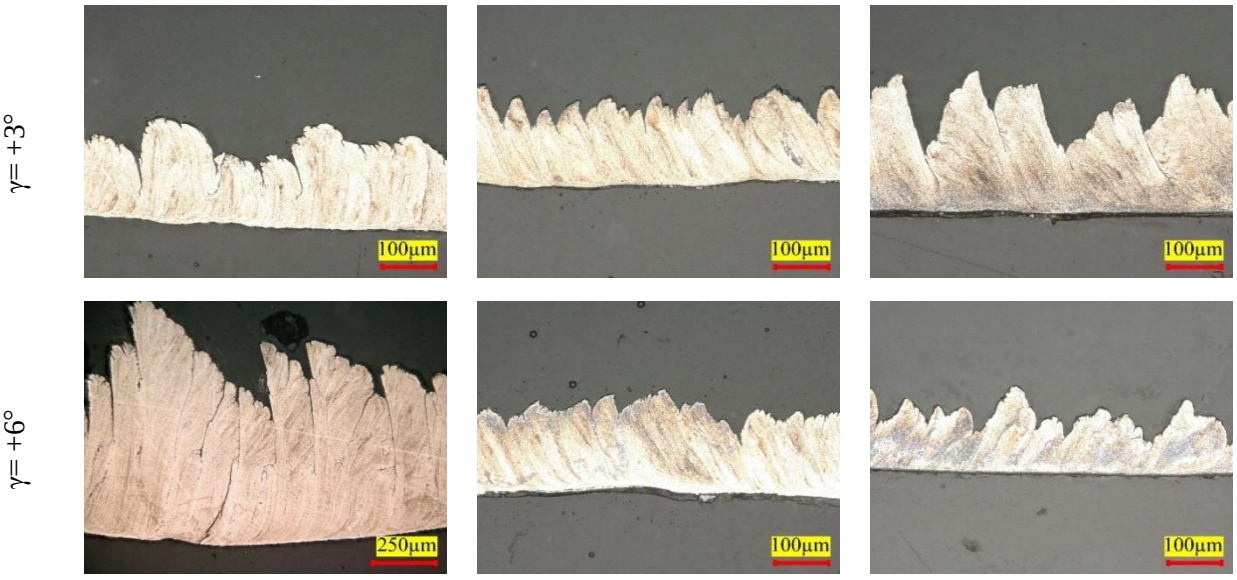
görüntülerinde skalaların farklı olmasına yol açmıştır. Talaşlar genel olarak incelendiğinde ise SLE talaşlarda kayma bant çizgileri belirgin iken geleneksel talaşlarda ise kaymayı gösteren tane deformasyonları mevcuttur. Ayrıca SLE talaşlarda testere diş formasyonu tüm kesme hızlarında mevcut olmakla beraber geleneksel talaşlarda testere diş formasyonu oluşumu ancak 120 m/dak kesme hızında mümkün olmuştur.



Şekil 3.34. SLE ve geleneksel parçaların dik tornalanmasında elde edilen talaşların mikroyapı görüntülerinin kıyaslaması (γ= -3°)

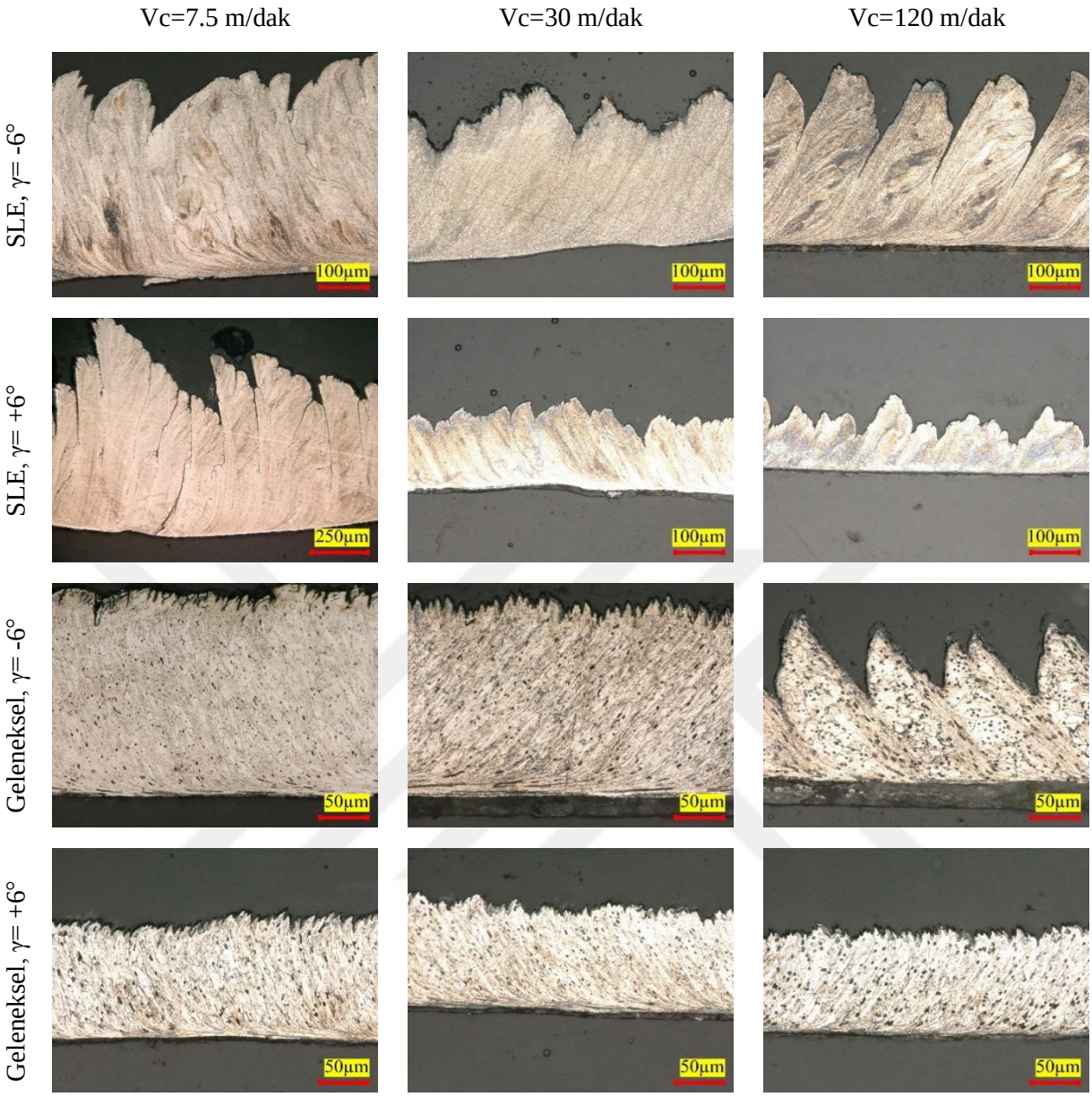
SLE disklerin farklı talaş açısı değerlerinde kesilmesi deneylerinde elde edilen talaşların mikroyapı görüntüleri Şekil 3.35' te gösterilmiştir. Tüm talaş açısı ve kesme hızı değerlerinde testere diş oluşumu mevcuttur. Ancak özellikle önceki bölümlerde sunulan talaş resimleri göz önüne alındığında özellikle 7.5 m/dak kesme hızında oluşan talaşların kırıklı ve toz şeklindeki yapısı mikroyapı görüntülerinde de benzer düzensiz yapıda görüntüler alınmasına neden olmuştur. 30 ve 120 m/dak kesme hızlarında ise tüm talaş açısı değerlerinde genelde kararlı olmasa da düzenli testere diş formasyonlu talaş görüntüleri mevcuttur. Talaş açısı -6° değerinde oluşan talaşlarda malzemenin aşırı plastik deformasyonu diğer talaşlara kıyasla daha bariz görülmektedir. Diğer talaş açısı değerlerinde kayma bant çizgileri gözlemlenirken -6° talaş açısı değerinde özellikle 7.5 m/dak kesme hızında kayma bant çizgilerine ek olarak SLE tarama izleri ve ergitme havuzu yapılarından bozma tanelerin varlığı görülmektedir. Özellikle 120 m/dak kesme hızında kayma band çizgisi yerine kayma bandı genişliğinden bahsetmek mümkündür. Bu durumda kayma düzleminde aşırı plastik deformasyonun varlığı açıktır.





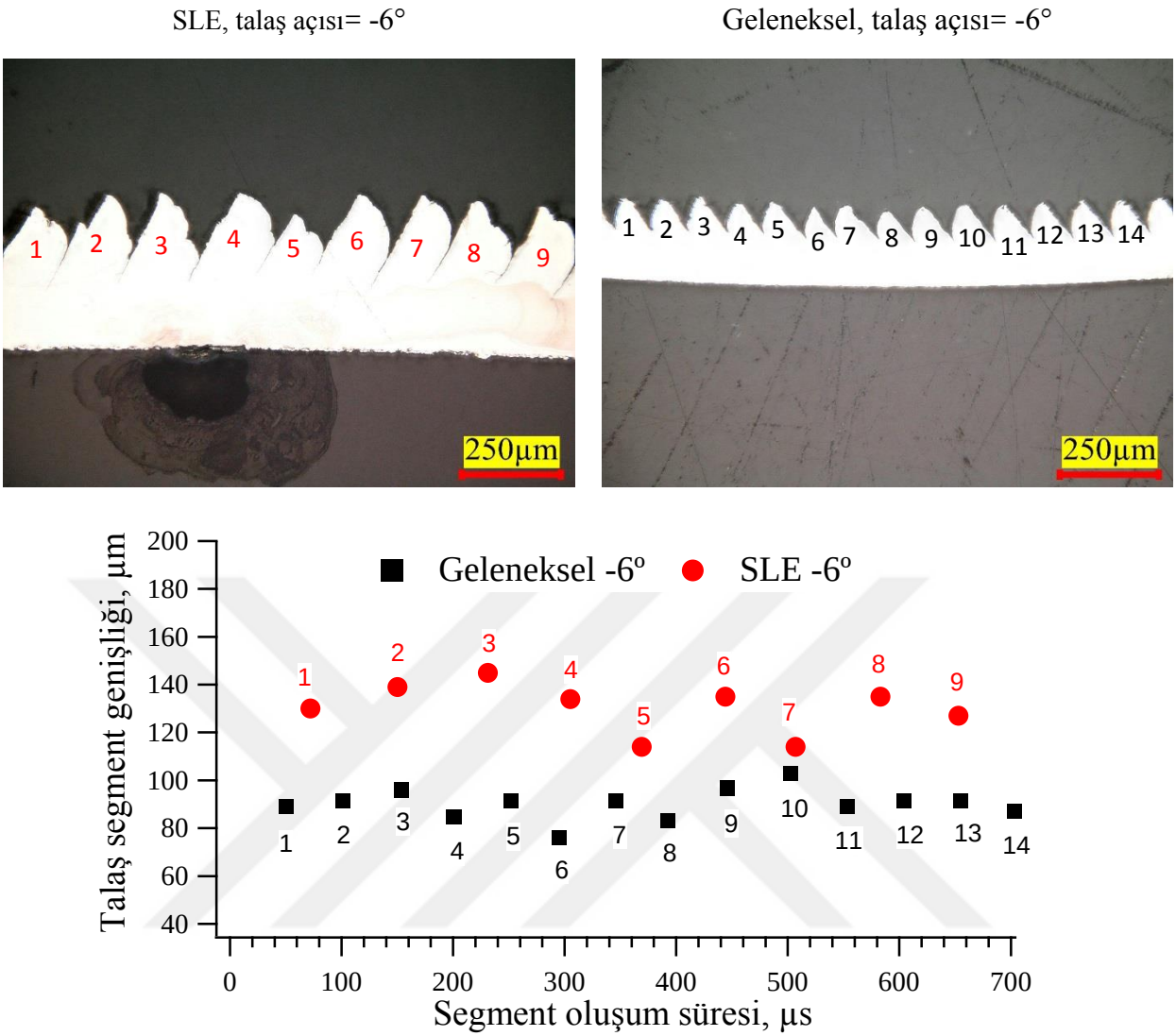
Şekil 3.35. SLE parçaların farklı talaş açısına sahip kesici takımlarla dik tornalanmasında elde edilen talaşların mikroyapı görüntüleri

Şekil 3.36' da SLE ve geleneksel disklerin kuru kesme koşulunda negatif ve pozitif talaş açısı değerlerinde oluşan talaşlarının mikroyapı görüntüleri gösterilmiştir. Yine malzeme farklılığından kaynaklı skala farklılığı mevcuttur. Her iki malzeme içinde -6° talaş açısı ve 120 m/dak kesme hızında oluşan talaş formları benzer şekilde düzenli, kararlı ve testere diş formasyonundadır. Geleneksel malzeme için bu formdaki talaş oluşumu diğer kesme parametrelerinde mümkün olmamıştır. Ancak SLE talaşlar için hem pozitif hem de negatif talaş açısı değerinde testere diş yapısı mevcuttur. Bu durum aynı kesme parametreleri kullanılsa bile malzeme mikroyapılarının farklılığından dolayı aynı sonuçların elde edilemeyeceğini açıkça ortaya koymaktadır. Nitekim önceki bölümlerde sunulan işleme performansıyla ilgili sonuçlarda bu durumu zaten desteklemektedir. Dolayısıyla geleneksel malzeme için optimize edilmiş kesme parametrelerinin SLE malzeme için de geçerli olmayacağı barizdir.



Şekil 3.36. SLE ve geleneksel parçaların farklı talaş açısına sahip kesici takımlarla dik tornalanmasında elde edilen talaşların mikroyapı görüntüleri

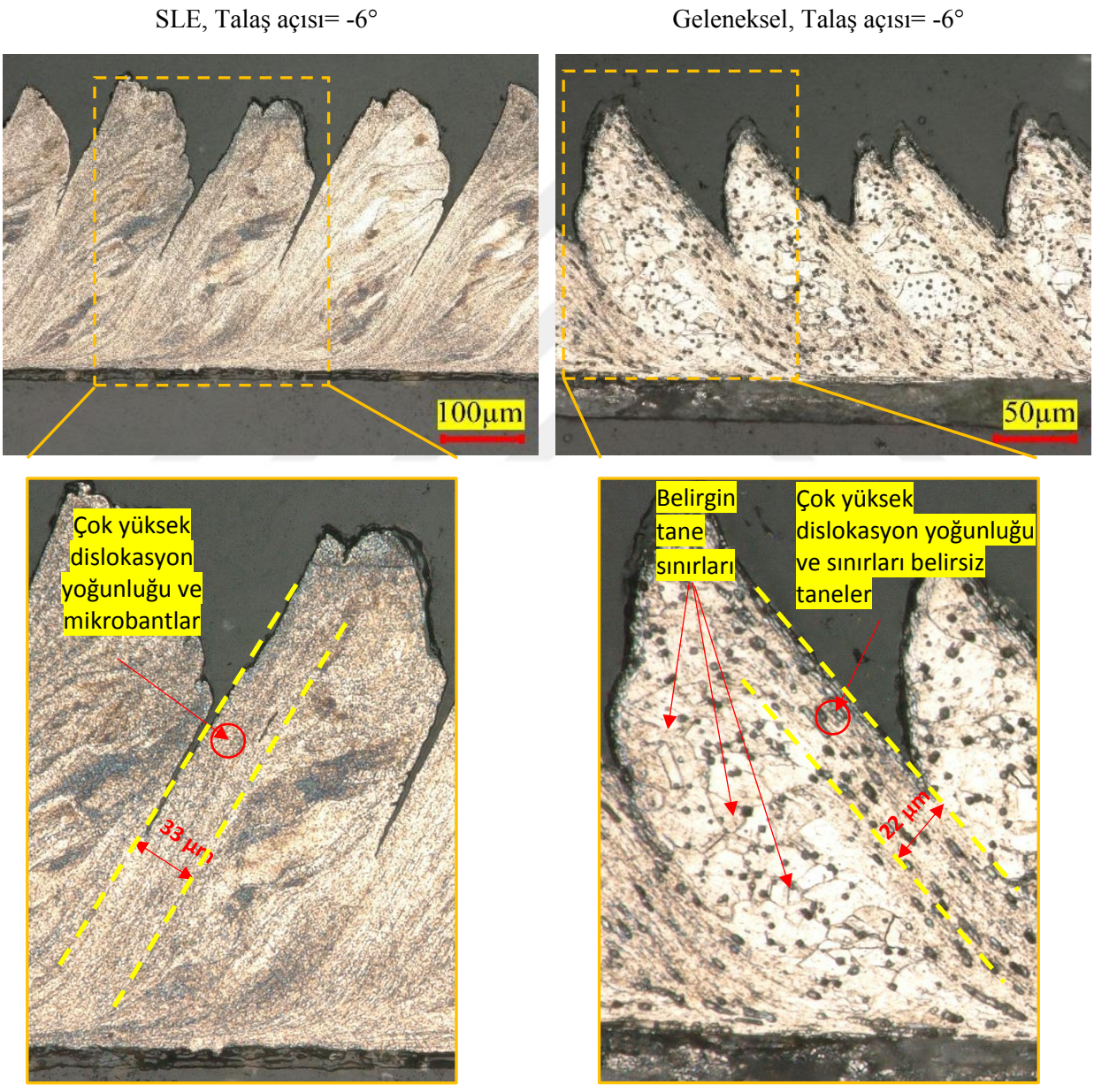
Şekil 3.37'de SLE ve geleneksel talaş segmenti oluşum oranları karşılaştırılmıştır. Aynı zaman periyodunda SLE talaşı 9 segmentten oluşurken, geleneksel talaşta bu sayı 14'tür. 300 µs zaman periyodunda geleneksel talaş segmenti sayısı SLE talaştan yaklaşık %50 daha fazladır ve bu oran her 300 µs'de bir değişmemektedir. İncelenen talaş kesitlerinde en geniş talaş segmenti ile en dar talaş segmenti arasındaki farklar SLE için %27, geleneksel için %35'tir. Ayrıca ortalama segment genişliği SLE için 130.3 µm, geleneksel için 90.1 µm'dir. Bu durumda malzemelerin aynı kesme parametrelerinde farklı deformasyon hızlarına sahip olduğu düşünülmektedir.



Şekil 3.37. SLE ve geleneksel talaşların birim zamandaki segment oluşum sayılarının kıyaslaması

SLE ve geleneksel talaşların mikroyapı karşılaştırmaları Şekil 3.38' de gösterilmiştir. Malzeme türü ve talaş kalınlığındaki farklılık nedeniyle, optik mikroskop kullanılarak aynı büyütme değerinde mikro yapı görüntüleri almak mümkün olmamıştır. SLE malzemeleri ergime havuzu, alt taneler, dendritler, tarama izleri gibi mikroyapısal özelliklere sahipken, geleneksel malzemeler eş eksenli tanelerden oluşmaktadır. Her iki malzemede de belirgin kayma bantları oluşmuştur. Talaşlar aynı kesme parametreleriyle oluşmasına rağmen, SLE için kayma bandı genişliği 33 µm, geleneksel için bant genişliği ise 22 µm olarak ölçülmüştür. Kayma bandı yapılarını oluşturan mekanizmalarda farklılıklar olduğu açıktır. Her iki malzemedeki kayma bantlarında çok yüksek dislokasyon yoğunluğu belirgin olmasına rağmen, mikrobantlar SLE talaşındaki kaymayı oluşturmaktadır. Ortogonal kesmede, talaş kalınlığı tarama düzlemine ve talaş genişliği inşa düzlemine karşılık gelir. Bu durumda, talaş mikro yapı görüntüleri en

azından tarama izlerinin yanı sıra alt tane ve dendrit yapıları da içermelidir. Bunun yerine, anizotropik özelliklerden uzak, homojen bir talaş mikro yapısı vardır. Bozulmuş erime havuzu ve tarama izleri, çok yüksek dislokasyon yoğunluğunun bir sonucu olarak yoğun mikrobantları oluşturmuştur. Geleneksel talaşta ise bu durum deforme olmuş ve belirgin sınırları olmayan mikro tanelerden kaynaklanmaktadır. SLE talaşın ana yapısında karakteristik mikro yapısal özellikleri kısmen kaybolmuştur. Bozulmuş ergime havuzundan ve tarama izlerinden kayma bantlarına paralel uzanan uzun tane yapıları oluşmuştur. Eş eksenli tane yapıları ise geleneksel talaşın ana yapısını oluşturmaya devam etmiştir.

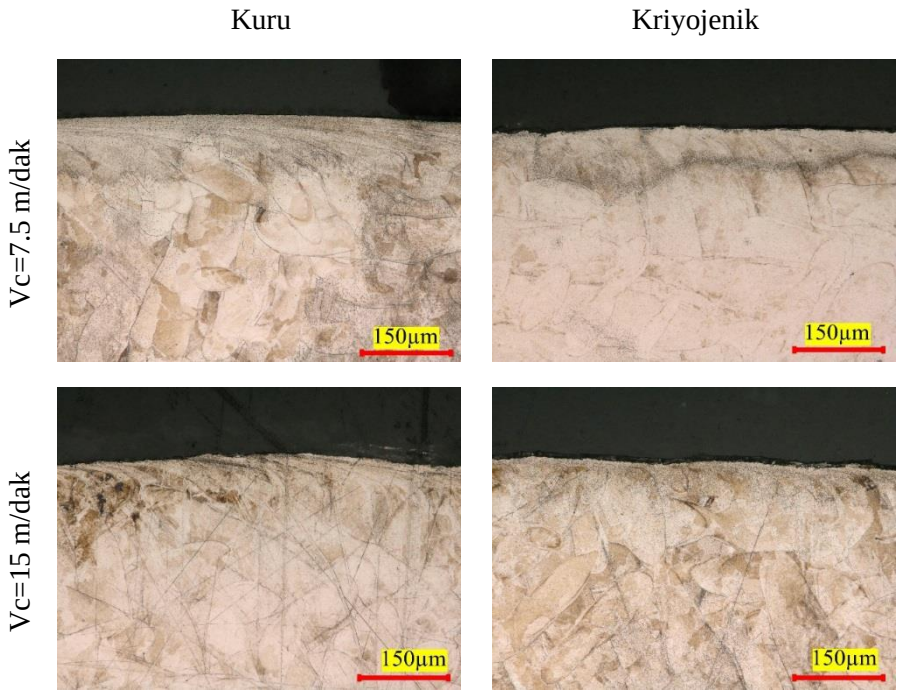


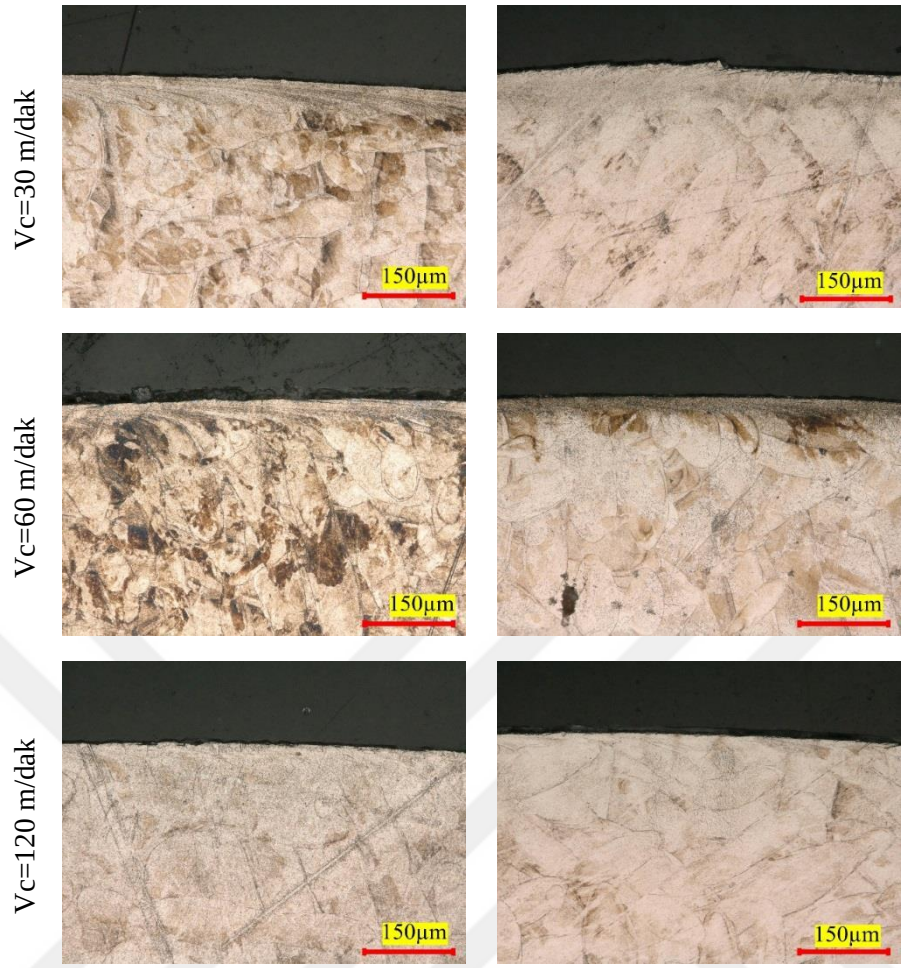
Şekil 3.38. SLE ve geleneksel talaşların kayma bant oluşum mekanizmalarının kıyaslaması

3.6.2 İşlenmiş malzeme mikroyapısı

3.6.2.1 Tarama yönüne göre mikroyapı

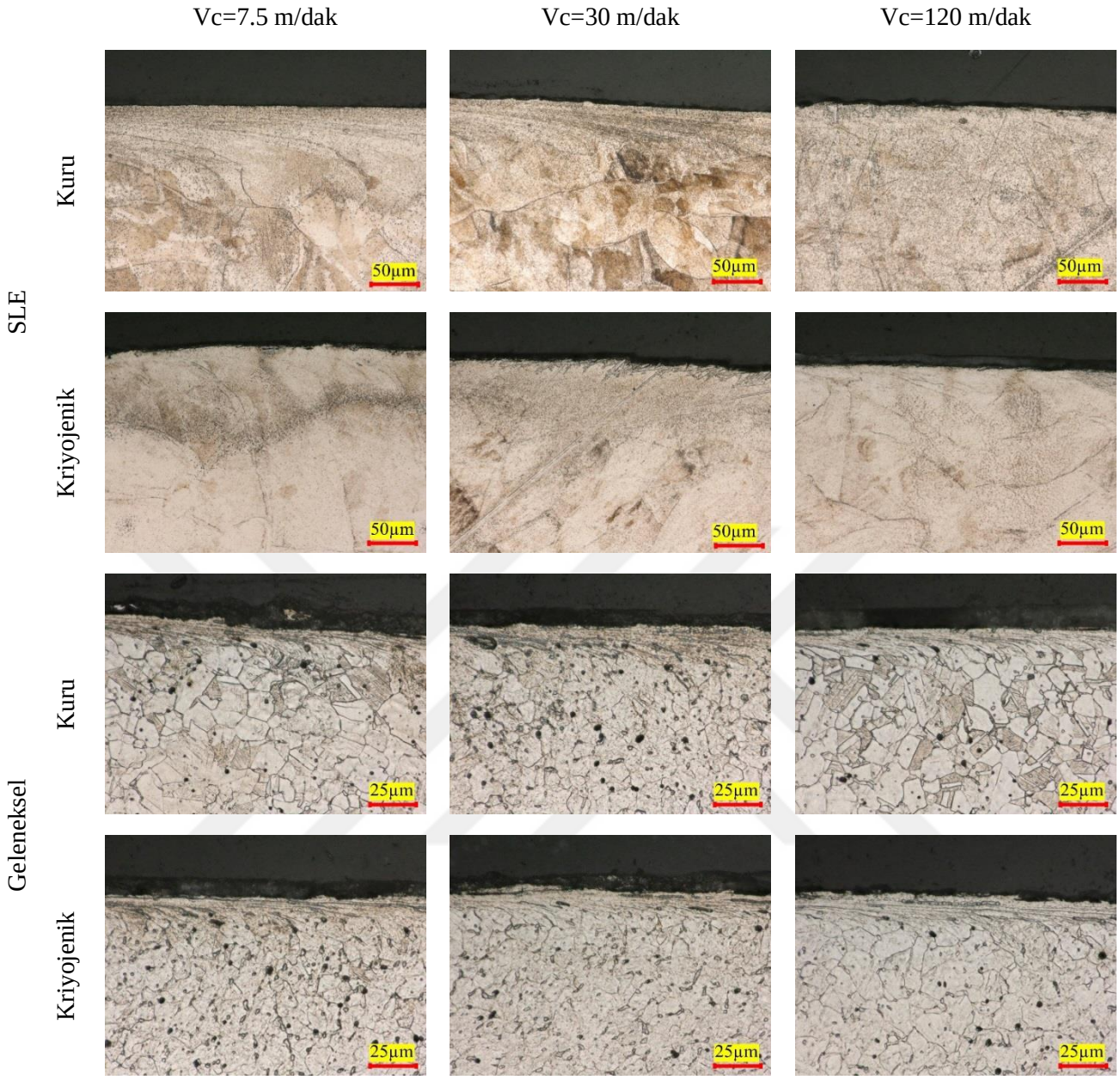
Bu bölümde işlenmiş SLE malzemelerin tarama yönü baz alınarak ve geleneksel malzemelerin de bakalite alınıp dağlandıktan sonra optik mikroskop ile alınmış mikroyapı görüntüleri sunulmuştur. Şekil 3.39' da kuru ve kriyojenik koşullarda işlenmiş SLE malzemelerin mikroyapı görüntüleri gösterilmiştir. Kuru kesme koşulunda kriyojenik koşula kıyasla daha fazla etkilenmiş katman kalınlığı söz konusudur. Özellikle düşük kesme hızlarında dik kesmenin etkisi daha fazla olmakla beraber kesme hızı arttıkça etkilenmiş katman kalınlığında azalma vardır. Kuru kesme işleminde sıcaklık daha fazladır. Kesme işleminin mekanik etkisi ayrıca bu termal etki ile birleştiğinde SLE malzemenin tarama izlerinin yeniden düzenlenmesine ve mikro boyuttaki alt-taneler ile dentrit yapıların yönlenmesini kolaylaştırarak deformasyona zemin hazırlamaktadır. Kesme hızının artmasıyla mekanik enerjinin rolünün termal enerjiye kıyasla azalması aynı zamanda etkilenmiş katman kalınlığına da yansımıştır. Nitekim kriyojenik koşulda ise etkili soğutma nedeniyle termal etkinin zayıf kalması, işlenmiş yüzeyde SLE malzemenin karakteristik yapılarının çok değişmemesine sebep olmuştur. Bu durum etkilenmiş katman kalınlığının kuru kesmeye kıyasla sınırlı olmasını sağlamıştır.





Şekil 3.39. Tornalanan SLE parçaların tarama yönünde mikroyapı görüntüleri (γ= -3°)

Şekil 3.40' ta kuru ve kriyojenik koşullarda işlenmiş SLE ve geleneksel malzemelerin mikroyapı resimleri kıyaslanmıştır. SLE malzeme tarama yönünde özellikle kuru kesme koşulunda düşük kesme hızlarında belirgin etkilenmiş katmanlar mevcuttur. Ancak geleneksel malzeme de ise farklı bir durum söz konusudur. Hem kuru hem de kriyojenik koşulda tüm kesme hızlarında belirgin etkilenmiş katmanlar oluşmuştur. Kriyojenik koşulda tane yönlenmeleri açık şekilde görülmektedir. Kuru kesmede ise yönlenmeden daha çok tane küçülmesi mekanizmasının etkin olduğu barizdir. Bu durum kriyojenik koşulda termal etkinin kuru koşuldaki kadar aktif olmamasıyla ilgilidir. Nitekim benzer kimyasal kompozisyona sahip bu iki malzemenin imalat yönteminden kaynaklı farklı mikroyapısal karakteristiklere sahip olmalarından dolayı, aynı parametrelerde işlem görseler bile farklı sonuçlar elde edileceği görülmektedir.



Şekil 3.40. SLE ve geleneksel parçaların kuru ve kriyojenik koşulda tornalanmasında tarama yönünde elde edilen mikroyapı görüntüleri (γ= -3°)

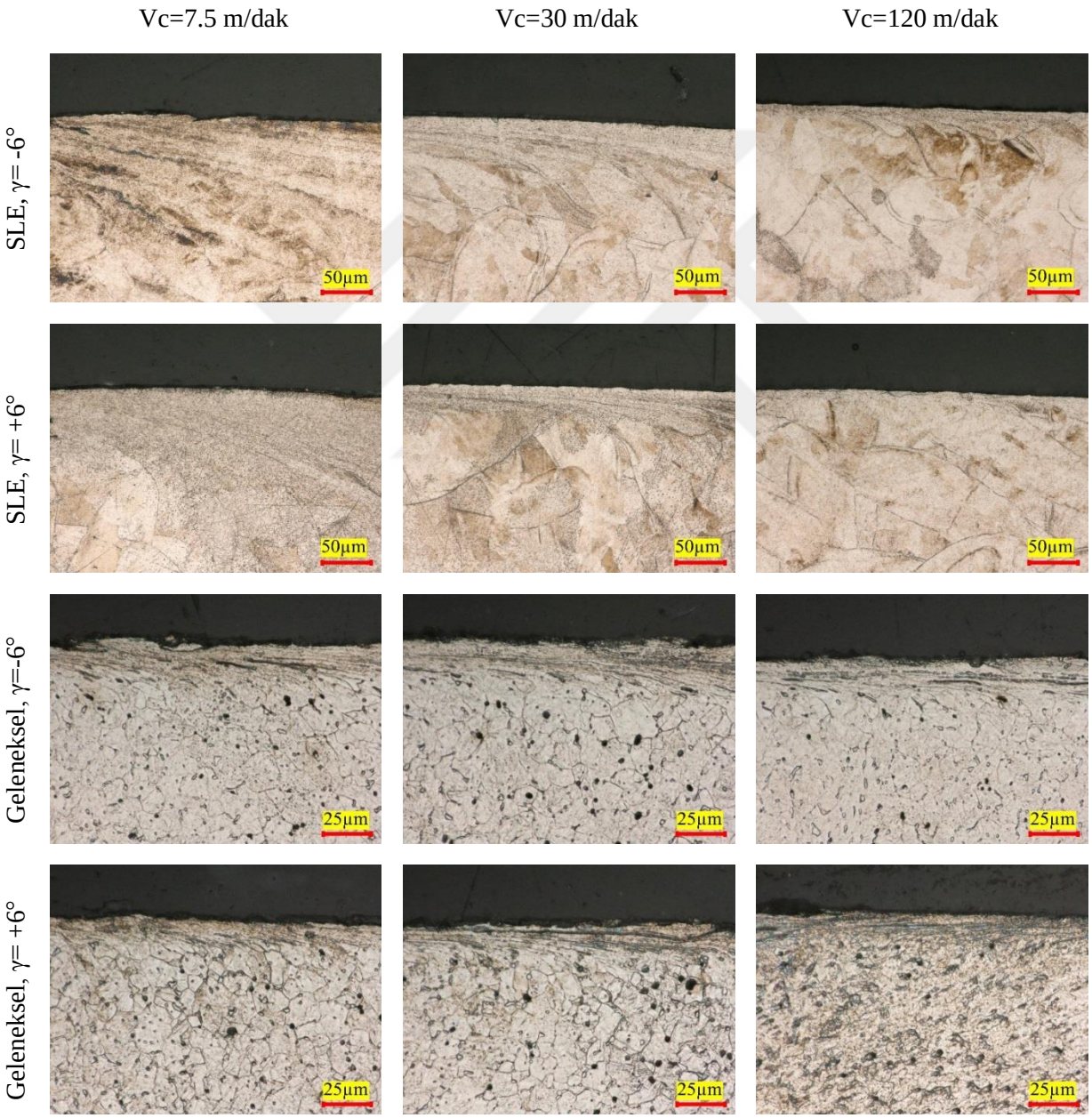
Farklı talaş açılarında kuru kesme koşulunda tornalanan SLE malzemelerin mikroyapıları Şekil 3.41' de gösterilmiştir. Kesme hızının artmasıyla her bir talaş açısı değerinde etkilenmiş katman kalınlığında azalma söz konusudur. Özellikle negatif talaş açısı değerlerindeki etkilenmiş katman kalınlığı pozitif talaş açısı değerlerine kıyasla daha fazladır. Bu durum negatif talaş açısı değerinde kayma düzlem açısının daha küçük olmasıyla ilgilidir. Küçük kayma açısı kayma düzleme alanının büyümesine sebep olmaktadır. Sonuçta kesme esnasında daha fazla enerji harcanması gerekirken malzemede aşırı deformasyon oluşumu meydana gelmektedir.



Şekil 3.41. Farklı talaş açısına sahip kesici takımlarla tornalanan SLE parçaların tarama yönünde elde edilen mikroyapı görüntüleri

Talaş açısının işlenmiş SLE ve geleneksel malzemenin etkilenmiş katman kalınlığına etkisini kıyaslayan mikroyapı görüntüleri Şekil 3.42' de gösterilmiştir. SLE malzemede hem negatif hem de pozitif talaş açısı değerinde 120 m/dak kesme hızında etkilenmiş katman kalınlığı bariz şekilde azalmıştır. Ancak geleneksel malzemede farklı bir durum söz konusudur. Tüm kesme

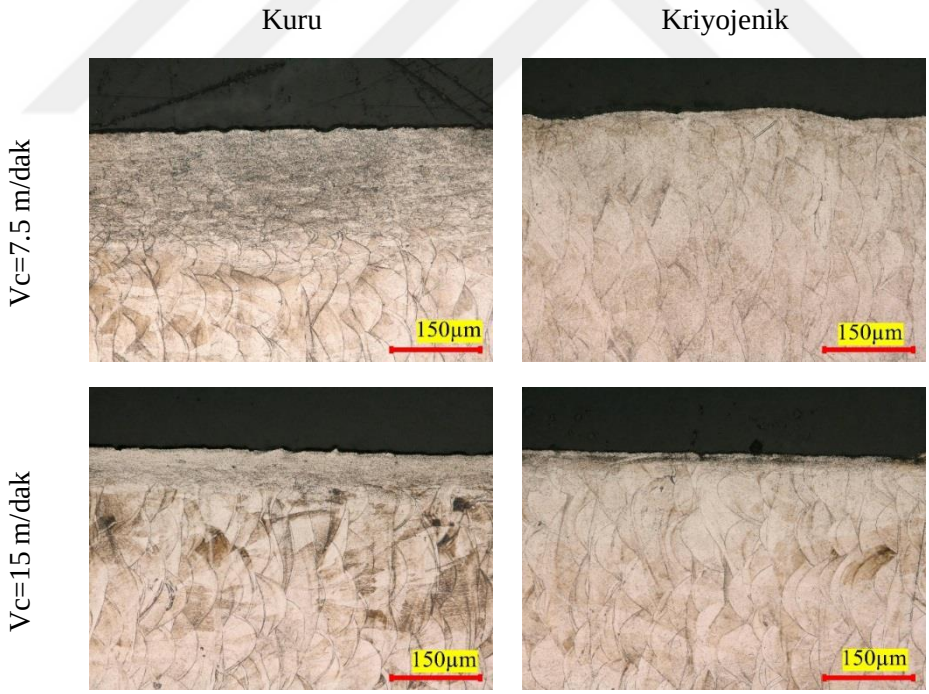
hızlarındaki etkilenmiş katman kalınlıkları benzer şekilde olup büyük farklılıklar söz konusu olmamıştır. SLE malzemeyle benzer şekilde negatif talaş açısı değerinde daha şiddetli tane küçülmesi ve yönlenmesi mevcuttur. Alınan görüntülerin skalası farklı olsa bile 7.5 ve 120 m/dak kesme hızlarındaki etkilenmiş katman kalınlıkları kıyaslandığında mikroyapı farklılığından kaynaklı olarak aynı kesme parametrelerinde malzemelerin farklı davranışlar sergilediği açık şekilde görülmektedir.

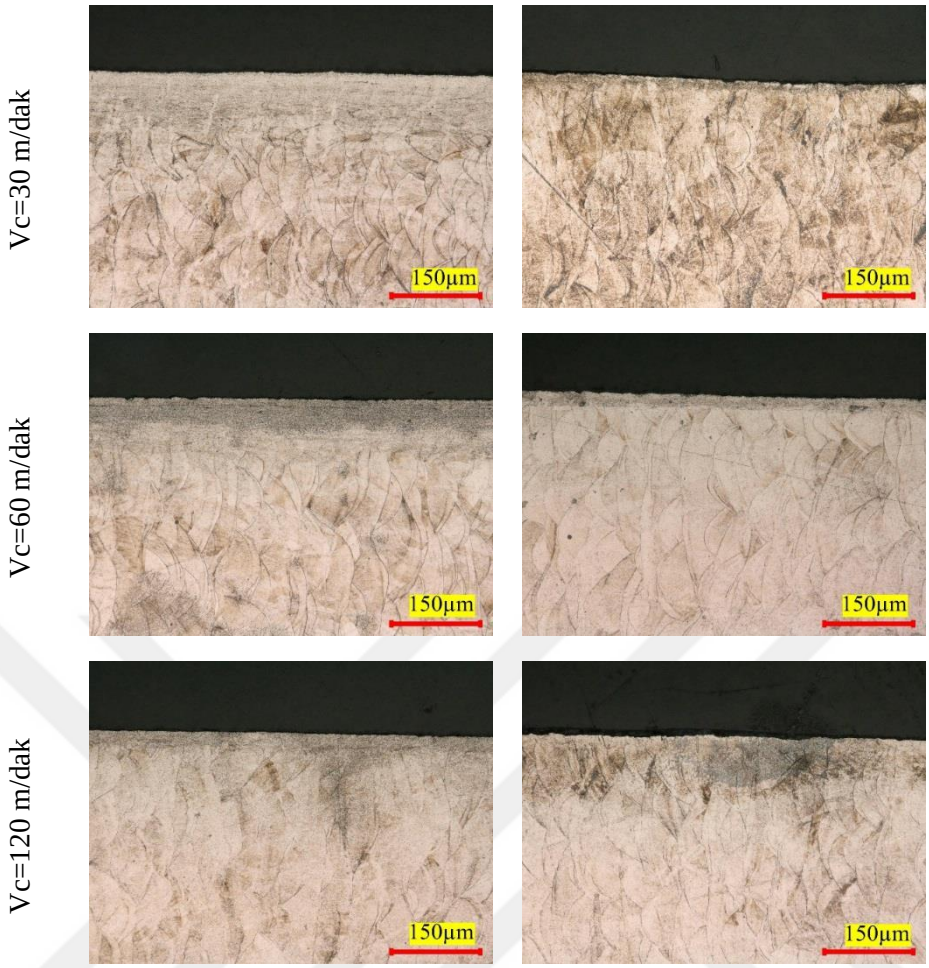


Şekil 3.42. Farklı talaş açısına sahip kesici takımlarla tornalanan SLE ve geleneksel parçaların tarama yönünde mikroyapı görüntüleri

3.6.2.2 İnşa yönüne göre mikroyapı

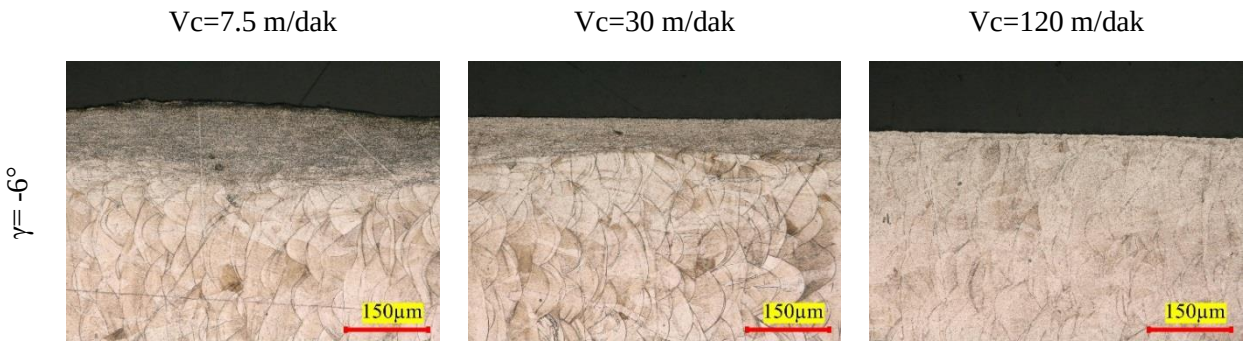
Bu bölümde işlenmiş SLE malzemelerin inşa yönü baz alınarak ve geleneksel malzemelerin de bakalite alınıp dağlandıktan sonra optik mikroskop ile alınmış görüntüleri sunulmuştur. Şekil 3.43' te kuru ve kriyojenik koşullarda işlenmiş SLE malzemelerin mikroyapıları inşa yönü perspektifinden gösterilmiştir. Etkilenmiş katman kalınlıkları incelendiğinde durumun tarama yönüne benzer olduğu görülmektedir. Kuru kesmede kriyojenik koşula kıyasla daha fazla etkilenmiş katman kalınlığı mevcuttur. Ergitme havuzları tamamen kaybolmuş ve işlenmiş yüzeyde yönlenmiş ve deforme olmuş homojen bir katman meydana gelmiştir. Özellikle negatif talaş açısı değerlerinde bu katmanlar daha barizdir. Benzer durum kriyojenik koşul içinde geçerlidir ancak kuru kesmeye kıyasla katman kalınlığı daha azdır. Kriyojenik koşul için tarama yönündeki görüntülerle kıyaslanırsa inşa yönünde katmanların daha belirgin olduğu söylenebilir. Bu durum SLE malzemenin anizotropik mikroyapısı nedeniyle gerçekleşmiştir.

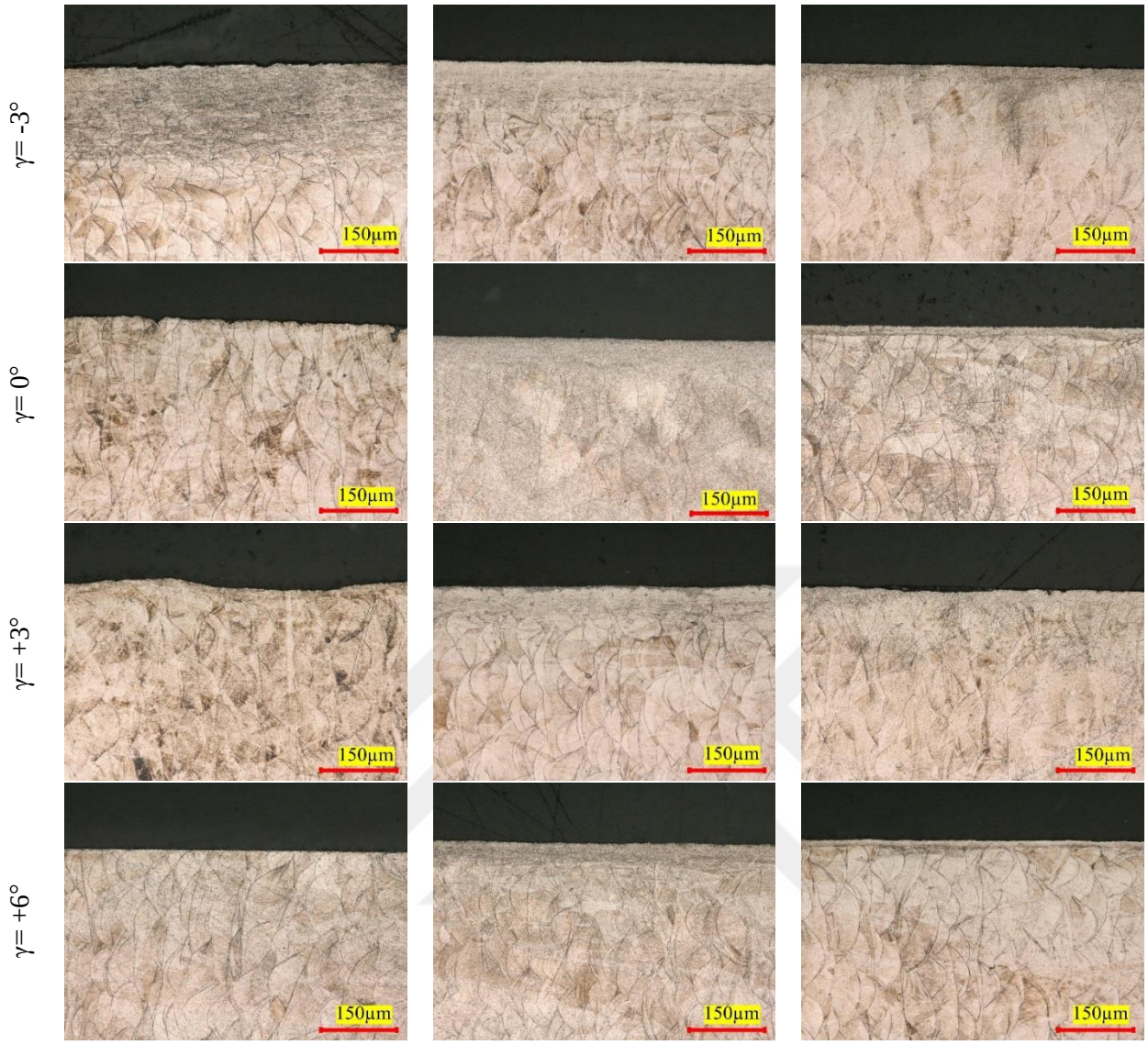




Şekil 3.43. Tornalanmış SLE parçaların inşa yönünde mikroyapı görüntüleri (γ= -3°)

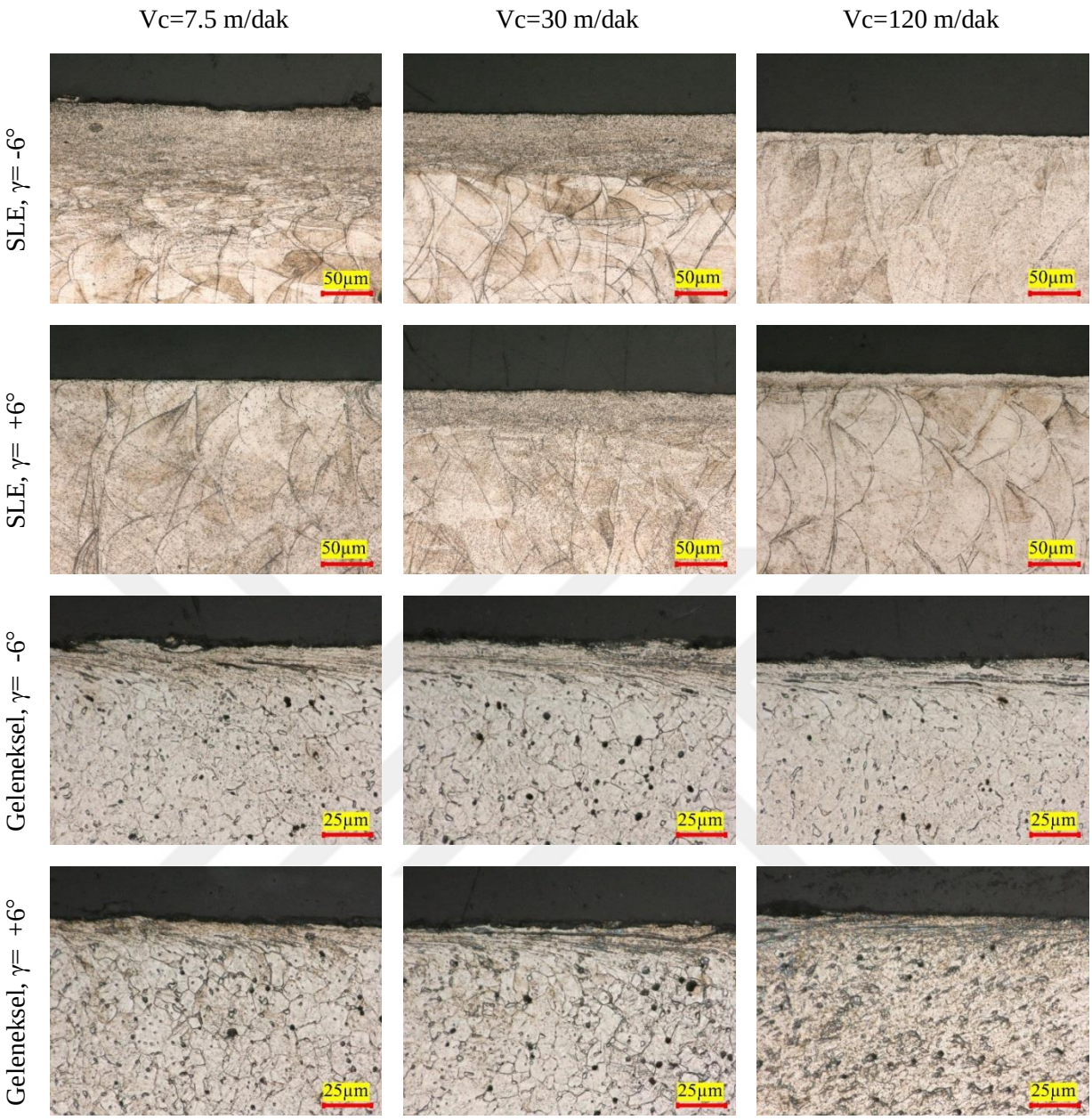
Şekil 3.44' te farklı talaş açılarında kuru koşulda işlenen SLE malzemelerin mikroyapı görüntüleri inşa yönünden incelenmiştir. Tarama yönüne kıyasla benzer eğilimler söz konusu olmakla beraber etkilenmiş katman kalınlıklarının bire bir aynı olmadığı görülmektedir. Geleneksel malzemelerden bekleneceği gibi SLE malzemede negatif talaş açısı değerlerinde pozitif talaş açısı değerlerine kıyasla daha fazla deforme olmuştur. Malzemenin ergitme havuzu, alt-taneleri ve dendritler gibi mikroyapı karakteristikleri tamamen kaybolmuş ve işlenmiş yüzeyde tamamen homojen bir etkilenmiş katman meydana gelmiştir.





Şekil 3.44. Farklı talaş açısına sahip kesici takımlarla tornalanan SLE parçaların inşa yönünde elde edilen mikroyapı görüntüleri

Şekil 3.45' te SLE ve geleneksel malzemelerin işlenmesinde talaş açısının etkisinin kıyaslaması gösterilmiştir. Malzemelerin mikroyapı farklılığından dolayı alınan görüntülerde gösterge skalası farklı seçilmiştir. Dolayısıyla SLE görüntülerdeki etkilenmiş katman kalınlığının yarısı geleneksel malzememe görüntülerindeki katman kalınlıklarına denk gelmektedir. Bu açıdan değerlendirildiğinde bile SLE malzemelerdeki deformasyon oranının geleneksel malzemelere kıyasla çok fazla olduğu anlaşılmaktadır. Görüntüler genel olarak incelendiğinde ise tarama yönünde olduğu gibi benzer eğilimlerin inşa yönünde de geçerli olduğu görülmektedir.



Şekil 3.45. Farklı talaş açısına sahip kesici takımlarla tornalanan SLE ve geleneksel parçaların inşa yönünde mikroyapı görüntüleri

3.6.2.3 Etkilenmiş katman kalınlığı ve anizotropi analizi

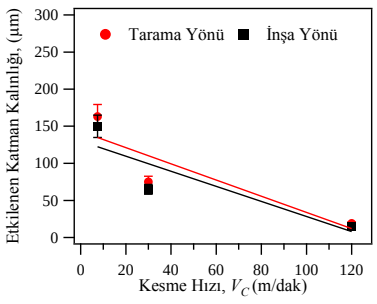
Hem inşa hem de tarama düzlemlerinden çeşitli talaş açılarında SLE numunelerinin mikroyapı görüntüleri ve etkilenen katman değerleri, Şekil 3.46' da kesme hızına bağlı olarak gösterilmiştir. Mikroyapı görüntüleri, etkilenen katman kalınlığının negatif talaş açısında ve daha düşük kesme hızlarında daha fazla olduğunu göstermektedir. Kesme hızı arttıkça, etkilenen katman kalınlığı hem inşa hem de tarama düzlemlerinde önemli ölçüde azalmaktadır. Yüksek kesme hızında, artan termal etki mekanik etkiye baskın gelir. Bu durum, malzeme yüzeyinde plastik deformasyona neden olan kuvvetin azalmasına neden olur. Bu nedenle daha

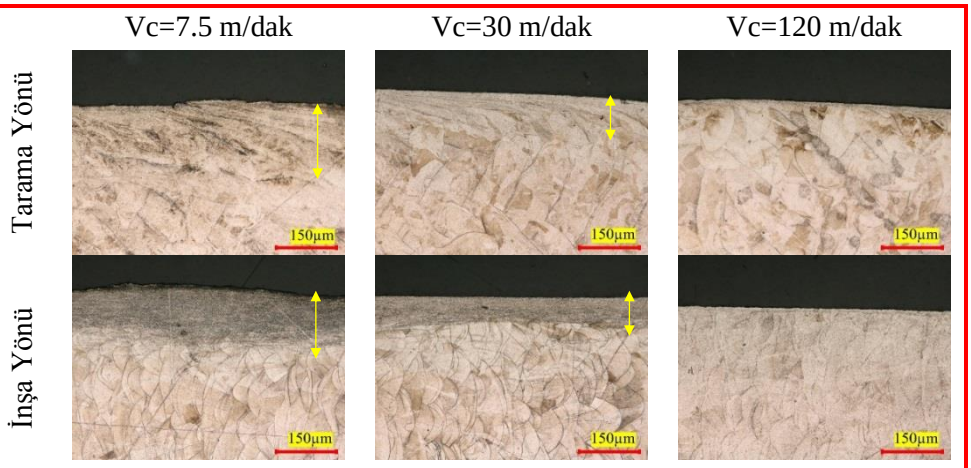
az etkilenen bir tabaka oluşur. En az etkilenen tabakalar, tüm talaş açısı değerlerinde 120 m/dk kesme hızında oluşmuştur. Tarama ve inşa düzlemindeki etkilenen katman kalınlıkları arasında belirgin bir fark yoktur. 30 m/dk kesme hızında, etkilenen katmanlar tüm talaş açısı değerlerinde belirgindir. Ayrıca, tarama ve inşa düzlemlerindeki kalınlıklar her talaş açısında benzerdir. En fazla etkilenen tabaka oluşumu 7.5 m/dak kesme hızında oluşmuştur. Düşük kesme hızında nispeten daha düşük termal etkinin varlığı, plastik deformasyon için gerekli olan mekanik etkinin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Ancak, tarama ve inşa düzlemlerindeki etkilenen tabaka kalınlıklarının benzer olmadığı ve tüm talaş açısı değerlerinde değiştiği anlaşılmaktadır. SLE malzemesinin düşük kesme hızında tarama ve inşa düzlemlerinde anizotropik davranış sergilediği açıktır.

SLE malzemelerinin işlem görmemiş mikroyapıları, inşa düzleminde ergime havuzlarından ve tarama düzleminde lazer tarama izlerinden oluşur. Ayrıca, ergime havuzunun ve tarama izlerinin detaylarında farklı açılarda yönlendirilmiş alt taneler ve dendritler bulunur [25]. Tüm bu yapılar, SLE malzemelerinin tarama ve inşa düzlemlerinde anizotropik mikroyapıya sahip olmasının temelini oluşturur. Anizotropi, SLE ürününün mekanik ve yorulma açısından kullanım performansını doğrudan etkiler. Özellikle bazı kesme hızlarında ve talaş açısı değerlerinde, etkilenen katman kalınlığı hem tarama hem de inşa düzlemlerinde benzerdir. Bu durumda, her iki düzlemde homojen mikroyapıya sahip benzer ve eşit miktarda etkilenen katmanların varlığının SLE ürününün performansı üzerinde olumlu bir etkiye sahip olacağı açıktır.

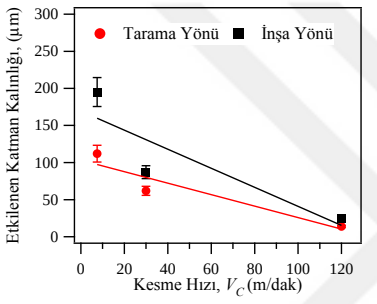
İnşa ve tarama düzlemlerinde farklı miktarlarda etkilenen katmanların oluşması, mikroyapısal anizotropinin tek işlevi değildir. Anizotropinin etkisini artıran teşviklerden biri de talaş kaldırma sürecinin kendisidir. SLE üretim stratejisi ve kesme kuvvetleri birlikte değerlendirilmelidir. Kesme kuvveti takım talaş yüzeyine doğru, itme kuvveti ise takım burun bölgesine doğru etki etmektedir. Kesme kuvvetinin ergime havuzu yapıları tarafından oluşturulan inşa düzlemine, itme kuvvetinin ise tarama izleri tarafından oluşturulan tarama düzlemine paralel olduğu anlaşılmaktadır. Kesme kuvvetlerinin itme kuvvetlerinden büyük olmasıyla, inşa düzleminde daha fazla mekanik kuvvetin varlığından söz etmek mümkündür. Bazı istisnai durumlar hariç, inşa düzlemi etkilenen katman kalınlıklarının tarama düzlemi etkilenen katman kalınlıklarından büyük olması bu durumu desteklemektedir.

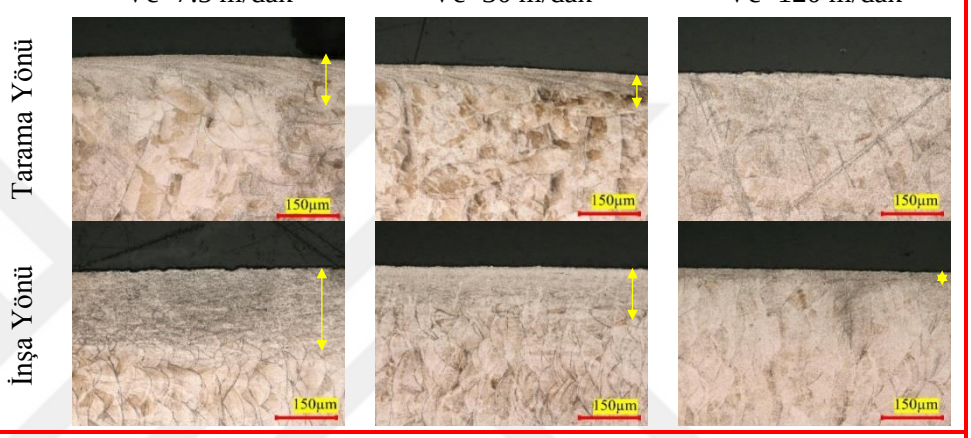
a) Talaş açısı = -6°



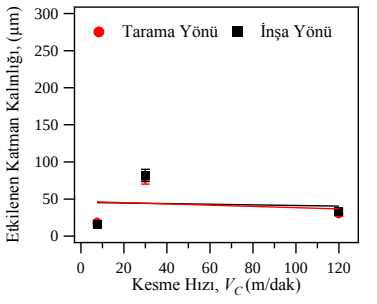


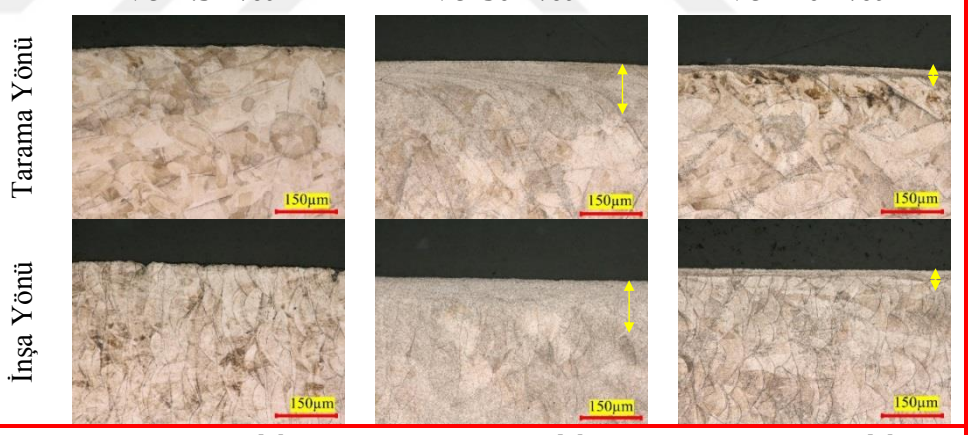
b) Talaş açısı = -3°



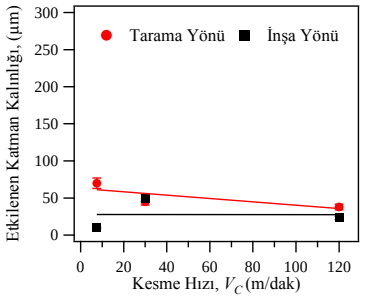


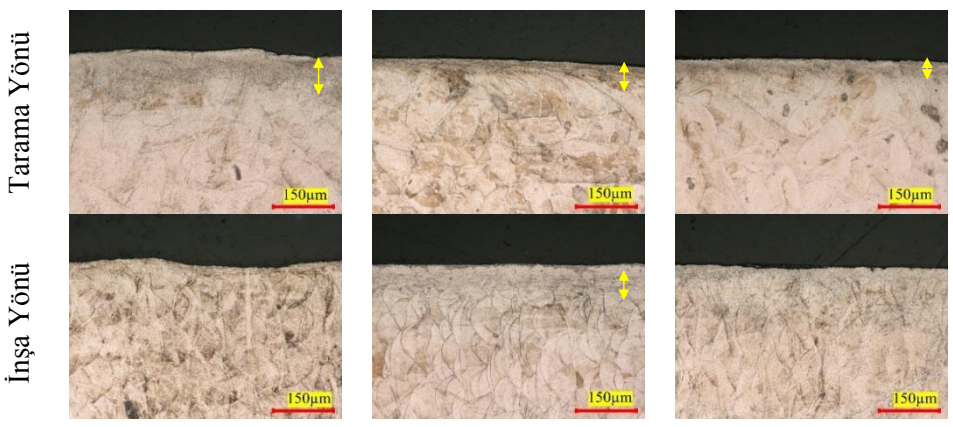
c) Talaş açısı = 0°

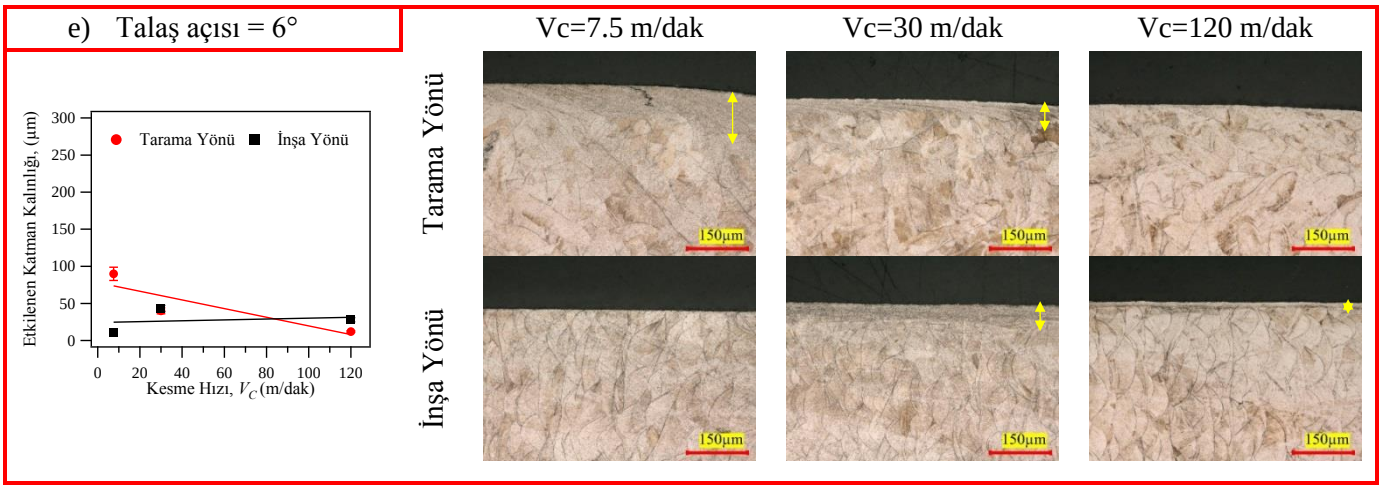




d) Talaş açısı = 3°

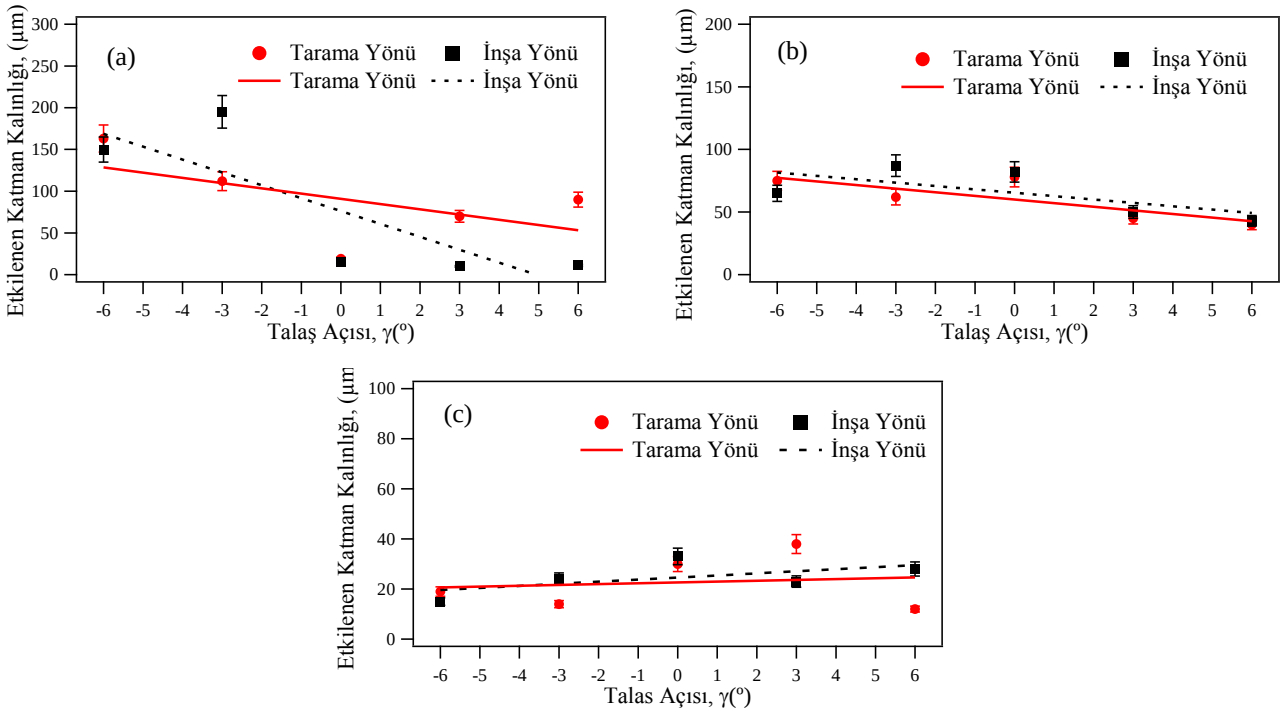






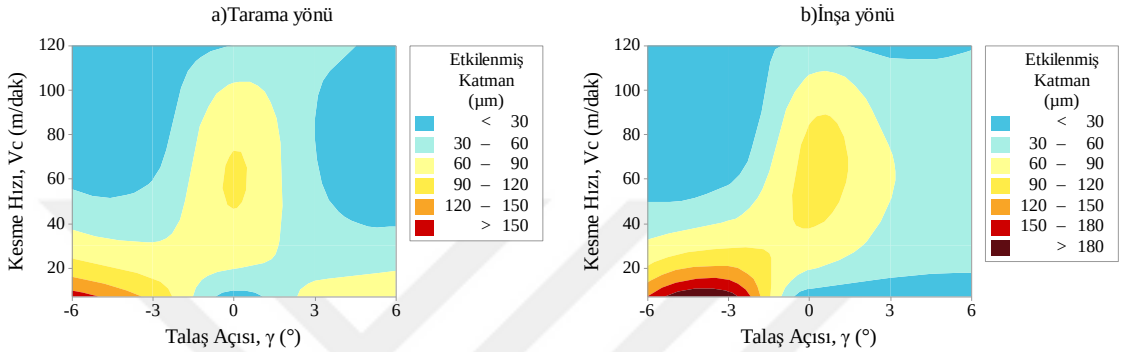
Şekil 3.46. Kesme hızının bir fonksiyonu olarak işlenmiş SLE numunelerin etkilenmiş katman görüntüleri a) γ= -6°, b) γ= -3°, c) γ= 0°, d) γ= 3° ve e) γ= 6°

Şekil 3.47' de SLE malzemesinin etkilenen katman kalınlıkları, talaş açısının bir fonksiyonu olarak gösterilmiştir. Tarama ve inşa düzleminde trend çizgileri Şekil 3.47a' da tutarsızdır, ancak trend çizgileri Şekil 3.47b ve 3.47c' de benzerdir. Bu durum 7.5 m/dak kesme hızında daha derin bir etkilenen katman oluşmasına rağmen anizotropinin daha belirgin olduğunu göstermektedir. 120 m/dak kesme hızında pozitif talaş açısı değerleri için benzer bir durum mevcuttur, ancak etkilenen katman nispeten küçüktür. Başka bir sorun da, 7.5 ve 30 m/dakikalık kesme hızlarında, etkilenen katman kalınlığının negatif talaş açısından pozitif talaş açısına doğru azalma eğiliminde olması, 120 m/dak kesme hızında ise dengesiz bir durumun sergilenmesidir.



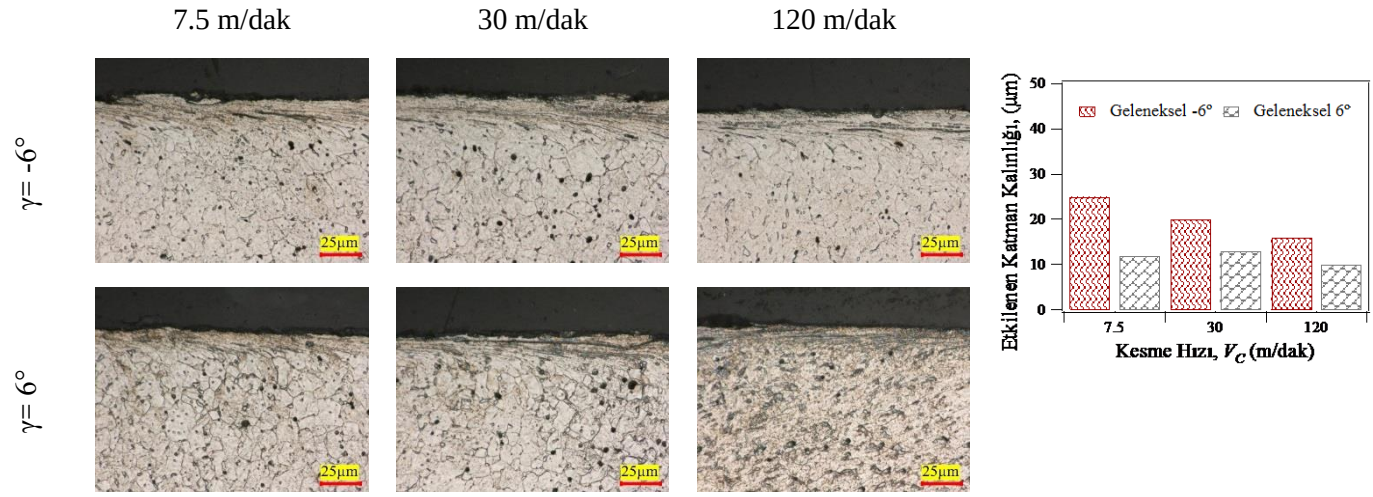
Şekil 3.47. Farklı talaş açısı değerlerinde işlenmiş SLE numunelerin etkilenmiş katman kalınlıkları a) V_c=7.5 m/dak, b) V_c=30 m/dak c) V_c=120 m/dak

SLE malzemenin tarama ve inşa yönünde etkilenmiş katman açısından meydana gelen bu farklılığın ve malzemenin anizotropisinin daha iyi anlaşılması hususunda bir kontur plot grafiği oluşturulmuştur. Şekil 3.48' de kesme hızı ve talaş açısına bağlı olarak malzemenin farklı düzlemelerinde talaşlı imalata cevap olarak meydana gelen etkilenmiş katmanları kıyaslanmıştır.



Şekil 3.48. SLE malzeme tarama ve inşa yönüne göre etkilenmiş katman kalınlıkların kontur plot grafiği

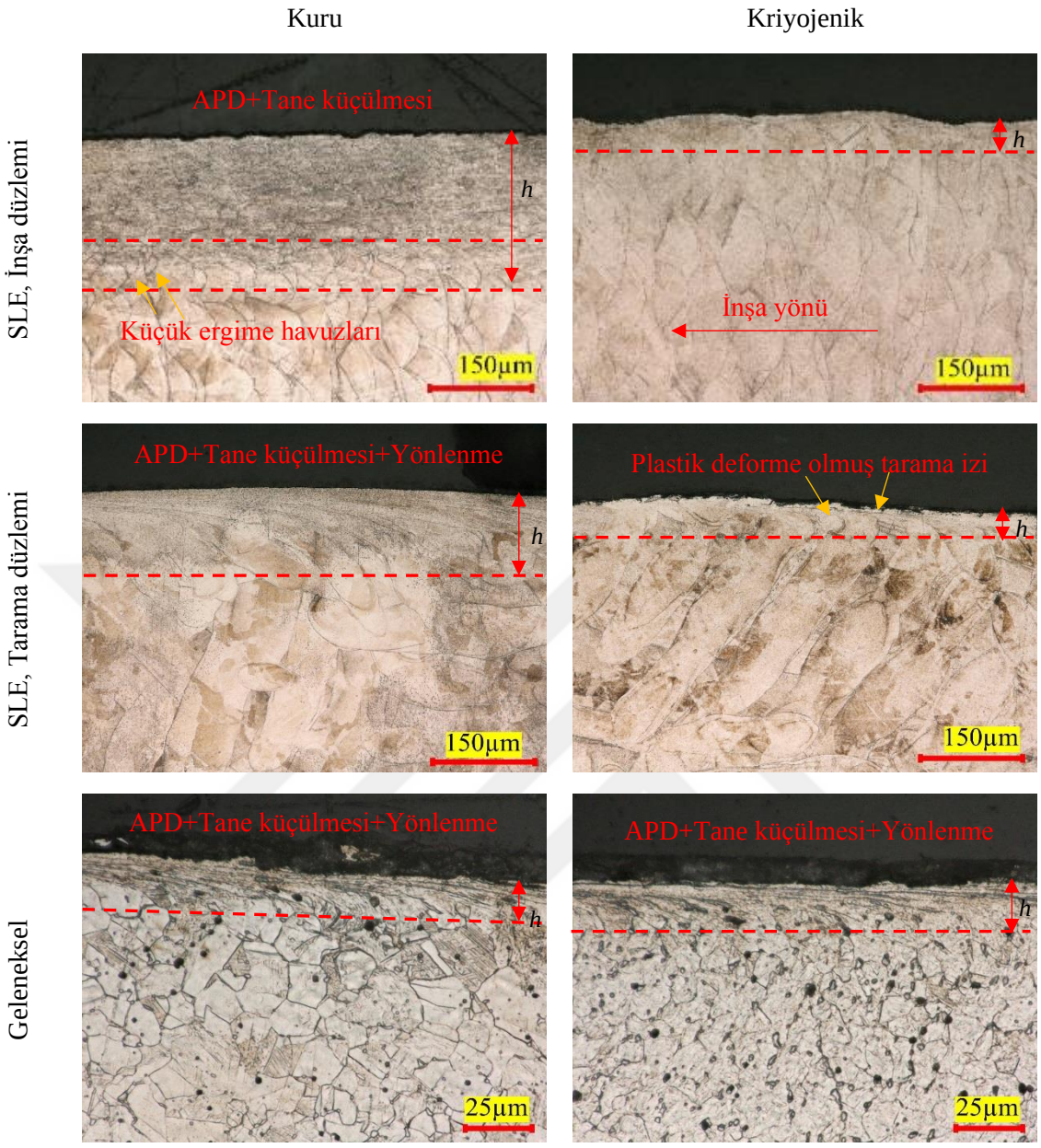
Şekil 3.49' da işlenmiş geleneksel malzemenin mikroyapı görüntülerini ve ölçülen etkilenen katman kalınlığını gösterilmiştir. Geleneksel ve SLE malzemelerin mikroyapı görüntülerini birlikte incelemek mümkün değildir. SLE mikroyapı incelemesi geleneksel malzeme mikroyapı incelemesi için gereken 2000X mikroskop büyütmesiyle gerçekleştirilemez. Bunun nedeni, 500X büyütmenin SLE mikroyapısının etkilenen tüm katmanının mikroskop çerçevesine sığması için ideal olmasıdır. Aslında, en yüksek geleneksel malzeme etkilenen katman değeri SLE malzemenin en düşük değerindedir. Aslında, bu durum malzemenin abrasif tepkisi nedeniyle geleneksel malzemeye göre SLE disklerini kesme deneyinde daha fazla kuvvet gerektiği konusunda iyi bir mutabakat olduğunu göstermektedir. Bunun nedeni, çok etkilenen bir katman için yüksek bir kuvvetin gerekli olmasıdır. En yüksek geleneksel etkilenen katman kalınlığı, 7.5 m/dak kesme hızı ve -6° talaş açısında 25 µm dir. Aynı parametrelerde, SLE etkilenen katman kalınlığı ile tarama düzleminde %85 ve inşa düzleminde %83 fark vardır. İşlenmiş geleneksel malzemenin etkilenen katman kalınlığı seçilen kesme koşulları ve parametrelerinde standart olabilirken, aynı durum SLE için geçerli değildir. Çünkü SLE üretim parametrelerinin farklı seçilmesi farklı miktarda anizotropi ve mekanik özellikler anlamına gelir. Bu durum SLE malzemesinin talaşlı imalat tepkisini doğrudan etkileyebilir.



Şekil 3.49. Geleneksel malzemenin etkilenmiş katman mikroyapı incelemesi

3.6.2.4 Aşırı plastik deformasyon analizi

7.5 m/dak kesme hızında işlenmiş SLE ve geleneksel numunelerin kuru ve kriyojenik koşullar altında tarama ve inşa yönlerinden kesitleri Şekil 3.50' de gösterilmiştir. SLE ile imal edilen malzemelerin ergime havuzu ve tarama izleri gibi karakteristik mikroyapı özellikleri değişmiş ve geleneksel malzemelere benzeyen etkilenen bir tabaka oluşmuştur. Hem inşa düzleminde hem de tarama düzleminde, kriyojenik kesme koşuluna kıyasla kuru kesme koşulunda belirgin bir talaş kaldırma kaynaklı etkilenen tabaka oluşmuştur. Kuru ve kriyojenik işleme için etkilenmiş katman derinlikleri arasında %280 gibi önemli bir fark bulunmuştur. Etkilenen katman kalınlığı kuru işlemede h=210±40 µm olarak ölçülmüştür ve kriyojenik olarak işlenmiş numunenin inşa düzleminde etkilenen katman kalınlığı h=55±10 µm'dir. Kuru kesme koşulu ile kriyojenik kesme koşulu arasındaki etkilenen katman farkı tarama düzleminden %140'tır. İşlenmiş malzemenin eş eksenli tane mikroyapısında hem kuru hem de kriyonik koşullarda belirgin bir işleme kaynaklı etkilenen katman oluşmuştur. Etkilenen katman kalınlığı kuruda kriyojenikle karşılaştırıldığında nispeten daha fazladır. Her iki koşulda da işleme kaynaklı katmanlar tane yönelimine ek olarak tane küçülmesinden kaynaklanmıştır.

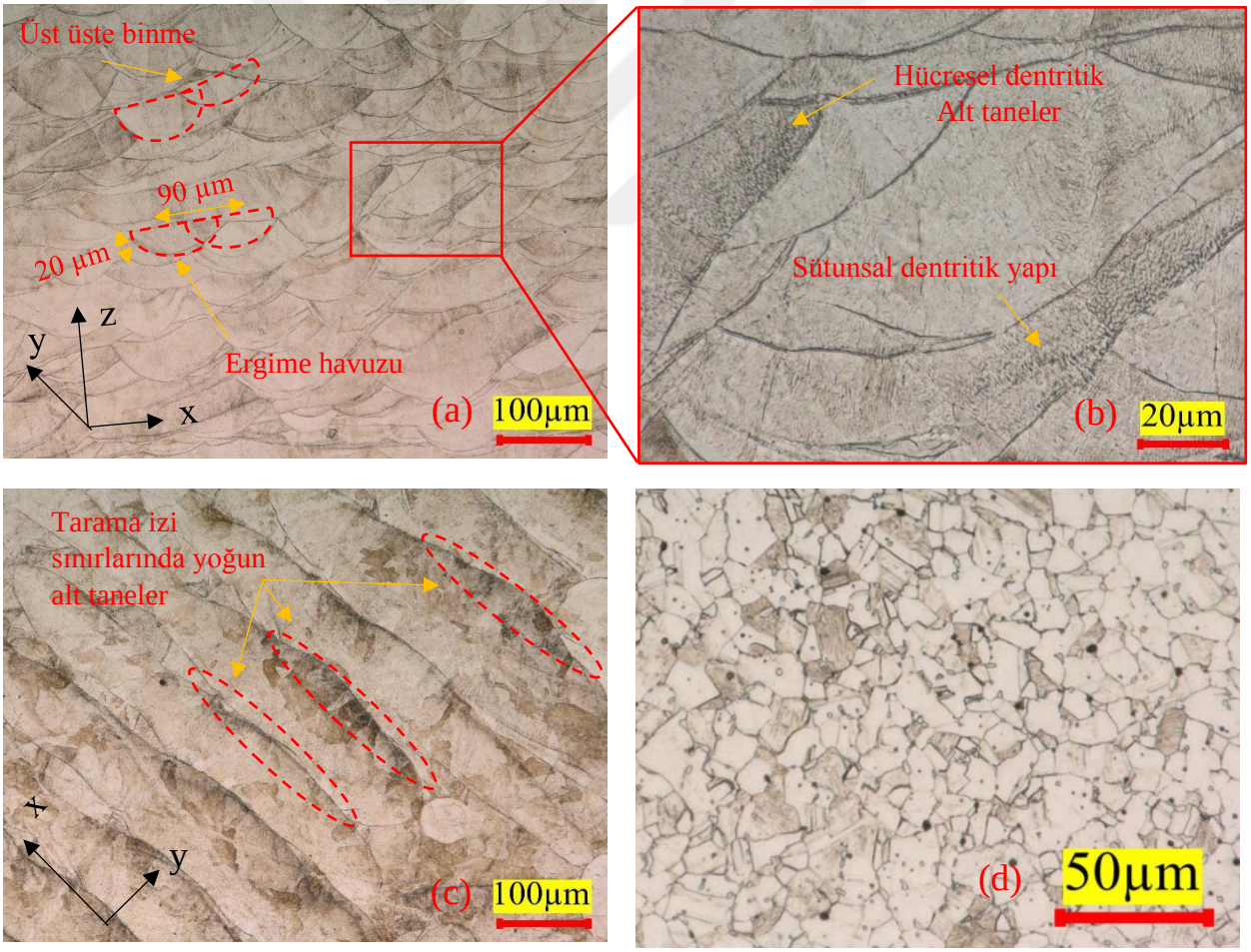


Şekil 3.50. İşlenmiş SLE ve geleneksel malzeme mikroyapısı (V_c=7.5 m/min)

Eİ parçaları tarama ve inşa yönlerinde anizotropik mikroyapıya sahiptir. Talaş kaldırma işleminin termal ve mekanik etkileri, yüzey ve yüzey altı bölgesinde işleme kaynaklı katmanların oluşumuna ve bu anizotropinin yeniden düzenlenmesine neden olur. Şekil 3.51' de görülebileceği gibi, ergime havuzu ve tarama iz yapıları kuru koşulda aşırı plastik deformasyon (APD) nedeniyle değişmiştir. Yüzey ve yüzey altı bölgesinde homojen bir mikroyapı karakteristiği oluşmuştur. İnşa düzlemindeki APD katman kalınlığı tarama düzleminden daha fazladır. Bu anizotropinin sonucudur. Çünkü, Şekil 3.51a' da görülebileceği gibi, ergime havuzları birbirleriyle simetrik veya özdeş değildir. 20 µm katman kalınlığına sahip SLE işlem parametresine rağmen, mikroyapıda eşit olmayan katman kalınlıklarının oluşumu üst üste binme yoğunluğunu artırmıştır. Ayrıca tek bir ergime havuzunda farklı yönlerde sütunlu ve

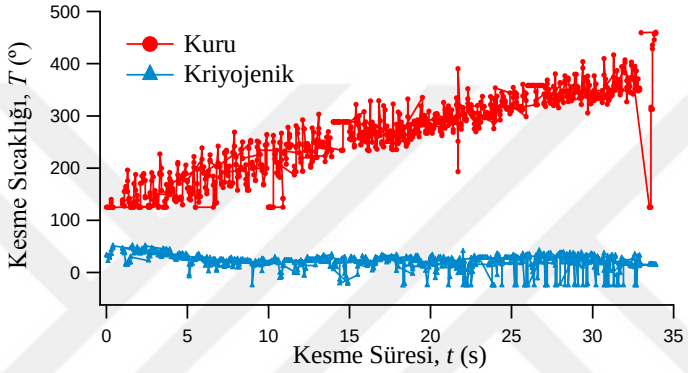
dendritik taneler oluşabilir (Şekil 3.51b). Hücresel dendritlerin ve sütunlu tanelerin büyüme yönleri, numunelerin üretim yönlerine tam olarak paralel değildir. Bunun yerine, üretim yönünden birkaç derece uzağa eğilim göstermektedir.

Şekil 3.51c'de, tarama izleri ergiyik havuzlarından daha geometrik olmasına rağmen, tarama izi sınırlarında oluşan yoğun alt taneler de anizotropik bir durum yaratmaktadır. Bu durum tarama izlerinin deformasyonu ve dislokasyonların oluşumu üzerinde engelleyici bir etkiye sahiptir. Aksine, inşa edilmiş düzlemdeki ergiyik havuzu ve onun karmaşık yapısı, işleme etkisinin daha fazla görülmesine yol açmaktadır. Şekil 3.50'de görülebileceği gibi, APD tabakası ile inşa edilmiş bölge arasındaki geçiş bölgesinde, talaş kaldırma işlemi ergiyik havuzlarının yapılarını değiştirmiş ve kararsız küçük ergiyik havuzu yapıları oluşmuştur. İnşa düzleminde, APD mekanizması işleme kaynaklı kalın bir tane küçülmesi tabakası oluştururken, tarama düzleminde ise tarama izlerinin sınırlarında yoğun alt tanelerin dislokasyon önleyici etkisi, tane yöneliminin yanı sıra daha az tane küçülmesi tabakası oluşmasına neden olmuştur.



Şekil 3.51. SLE işlem görmemiş numune mikroyapısı: a) ve b) inşa yönü, c) tarama yönü, d) geleneksel işlem görmemiş

APD mekanizmasının kriyojenik işlenmiş numunenin mikroyapısında sınırlı etkisi vardır. Kuru ve kriyojenik numune arasındaki bu farkın, işleme sırasında oluşan ısının yarattığı termo-mekanik etkinin yüzey ve yüzey altı bölgesine yansımasından kaynaklandığı düşünülebilir. Kuru ve kriyojenik koşullar altında yapılan talaş kaldırma deneyleri sırasında ölçülen kesme sıcaklıkları, işleme süresinin bir fonksiyonu olarak Şekil 3.52'de sunulmaktadır. Kuru işlemede ölçülen ortalama kesme sıcaklığı 270 °C iken, kriyojenik işlemede 29±10°C' dir. Ancak kuru koşuldaki ortalama sıcaklık makul olmasına rağmen, işleme sonunda 400°C' lik bir sıcaklığa ulaşıldığı açıktır. Yani, kuru işlemede termo-mekanik etkiler baskınken, kriyojenik işleme oda sıcaklığının hemen hemen üzerine çıkmamıştır.



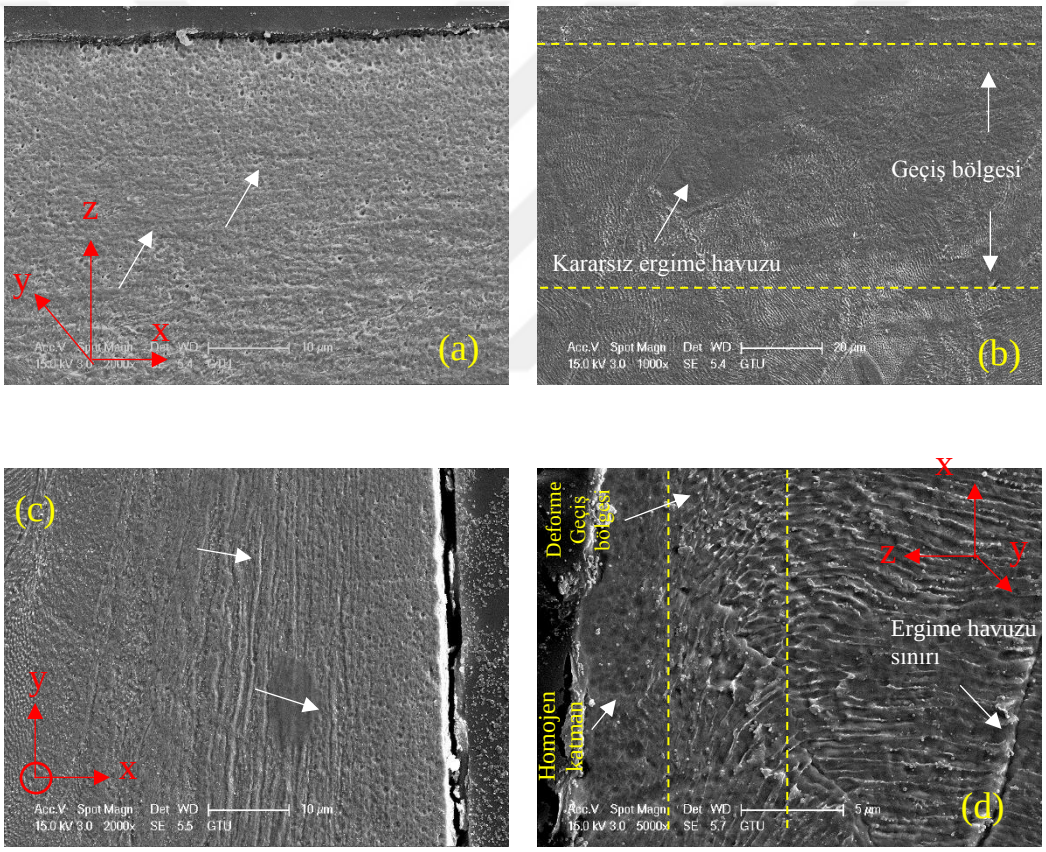
Şekil 3.52. SLE malzeme talaş kaldırma işlemi süresince kesme sıcaklığı değişimi (V_c= 7.5 m/dak)

SLE malzemenin aşırı plastik deformasyon (APD) davranışının daha iyi anlaşılması için kuru ve kriyojenik koşulda 7.5 m/dak kesme hızında ve -3° talaş açısı değerinde işlenmiş numunelerin SEM görüntüleri Şekil 3.53' te paylaşılmış ve irdelenmiştir. Kuru kesme durumunda inşa düzlemdeki APD katmanı Şekil 3.53a' da gösterilmektedir. Tarama düzleminde oluşturulan APD katmanı Şekil 3.53c' de gösterilmektedir. Her ikisinde de APD etkisinin neden olduğu dislokasyon yoğunluğu açıktır. Ancak tarama düzleminde daha belirgindir. Metallerin plastik deformasyonunu sağlayan mekanizmalardan biri de kaymadır. Bu, dislokasyonların hareketi sonucu atom düzlemlerinin birbirleri üzerinde kayması veya ötelenmesiyle ilgilidir. 316L östenitik paslanmaz çelik, yüzey merkezli kübik (YMK) kristal yapısından dolayı birçok aktif kayma sistemine sahiptir [16]. Schmid yasasında (Denklem 6) belirtildiği gibi, kaymanın meydana gelmesi için belirli bir değerin üzerindeki kayma geriliminin kristal malzemelerin atomik düzlemlerine etki etmesi gerekir [57].

$$\sigma_y = m\tau_c \tag{6}$$

Burada σ_y akma gerilmesi, m Schmid faktörü(ayrıca $cos\varphi.cos\lambda$ olarakta bilinir) ve τ_c kritik kayma gerilmesidir.

Sonuç olarak karakteristik SLE mikroyapı özellikleri tamamen ortadan kalkmış ve yoğun kayma bantları gözlemlenebilir hale gelmiştir. Şekil 3.53b' de inşa edilmiş düzlemin geçiş bölgesi kuru kesme durumunda gösterilmektedir. Bu bölgedeki ergime havuzu yapıları plastik deformasyonun etkisiyle yok olmak ile var olmak arasında kararsız bir tutum sergilemektedir. Kuru kesme koşulunda malzemenin mikro yapısında bu tür dramatik değişiklikler meydana gelirken, Şekil 3.53d ise kriyojenik koşul altında işlenen malzemenin mikro yapısında plastik deformasyon etkisinin sınırlı olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.53. 7.5 m/dak kesme hızında işlenmiş SLE numunelerin SEM görüntüleri a) ve b) kuru işlenmiş numune inşa yönü, c) kuru işlenmiş numune tarama yönü ve d) kriyojenik işlenmiş numune tarama yönü

Mikroyapısal analizden anlaşıldığı üzere kriyojenik işleme, geleneksel malzemenin işlenmiş yüzeyinde önemli deformasyona neden olurken, SLE malzemenin mikroyapısında önemli bir değişikliği önlemektedir. Geleneksel malzemenin mikroyapısı eş eksenli tanelerden oluşur. SLE malzemesi ise tamamen farklıdır. Isıl işlem uygulandığında, yapıdaki ergime havuzları ve

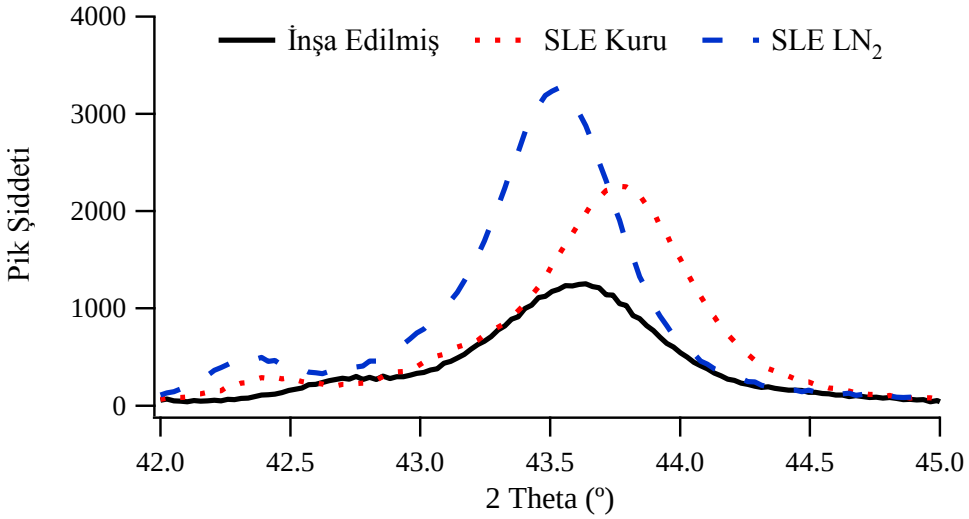
tarama izleri gibi karakteristik yapıların kaybolduğu ve bunun yerine geleneksel malzemeye benzer eş eksenli tanelerin oluştuğu bilinen bir gerçektir [58]. Bu nedenle, SLE malzemenin kuru işleme sürecinde termal etki altında yeni tane formlarının oluşumu ve mekanik etki altında plastik deformasyonu tetikleyerek APD oluşumu meydana gelmiştir. Ancak kriyojenik soğutma, termal etkiyi ortadan kaldırarak SLE malzemesi için bu olgunun meydana gelmesini önlemiştir. Bunun yerine mekanik etkinin baskın olması, işleme kaynaklı etkilenen katmanların daha az olmasına neden olmuştur.

3.7 X Işını Kırınımı(XRD) Analizi

Şekil 3.54, kuru ve kriyojenik koşullar altında 7.5 m/dak kesme hızında işlenmiş ve inşa edilmiş SLE numunelerden elde edilen XRD modellerini göstermektedir. (111) düzlemindeki ana östenit piklerinden işlem görmemiş(inşa edilmiş) SLE ana östenit pik şiddeti, kuru ve kriyojenik koşulda işlenmiş SLE pik şiddetlerinden daha düşüktür. İşlenmiş numunenin tepe konumlarında, işlem görmemiş 2θ konumuna göre kaymaların olduğu açıktır. İnşa edilmiş numunenin 2θ pik açısı 43,624° dir. İşlenmiş numune piklerin 2θ açıları kuru ve kriyojenik koşullarda sırasıyla 43.767 ve 43.527°' dedir. SLE yönteminde parçaların metal tozlarından lazerle çok hızlı ısıtma-soğutma prensibiyle üretildiği ve anizotropik mikroyapı özelliğinden dolayı iç yapıda kalıntı gerilmelerin olduğu bilinen bir gerçektir. Kuru koşuldaki pik sağa kayarken, kriyojenik koşulda ise inşa edilmiş pikin 2θ pozisyonuna kıyasla sola kaymıştır. Pik 2θ açısındaki artış veya azalma da kalıntı gerilmelerden kaynaklanabilmektedir. Ayrıca her pikin genişliği birbirinden farklıdır. Bragg yasasına göre Denklem 7' de gösterildiği gibi, pik noktasının genişlemesi tane boyutundaki azalmayı göstermektedir. Piklerdeki bu değişiklikler, talaşlı imalatın termo-mekanik etkilerinin bir sonucudur.

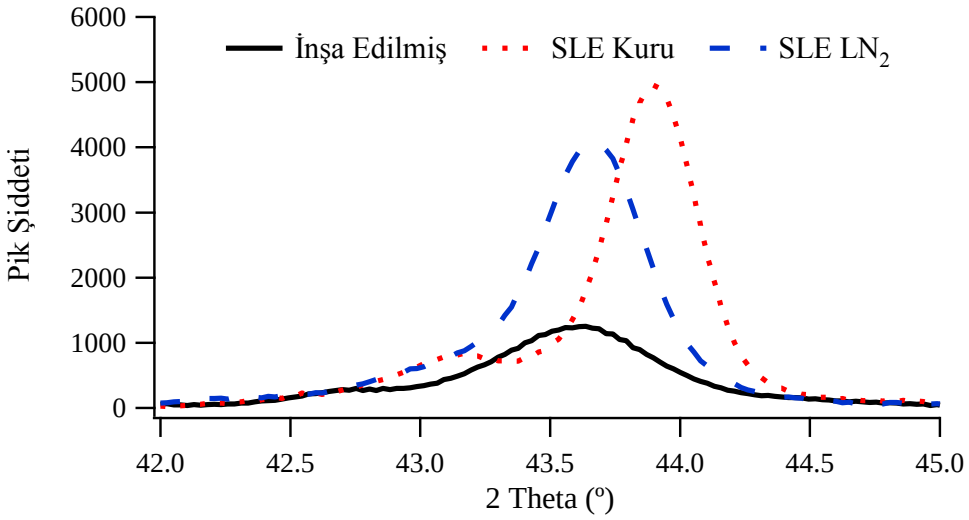
$$n\lambda = 2d\,sin\,\theta \qquad (7)$$

XRD modeli ile kalıntı gerilme arasındaki ilişkiyi açıklayan detaylı analiz bir sonraki bölümde yapılmıştır.

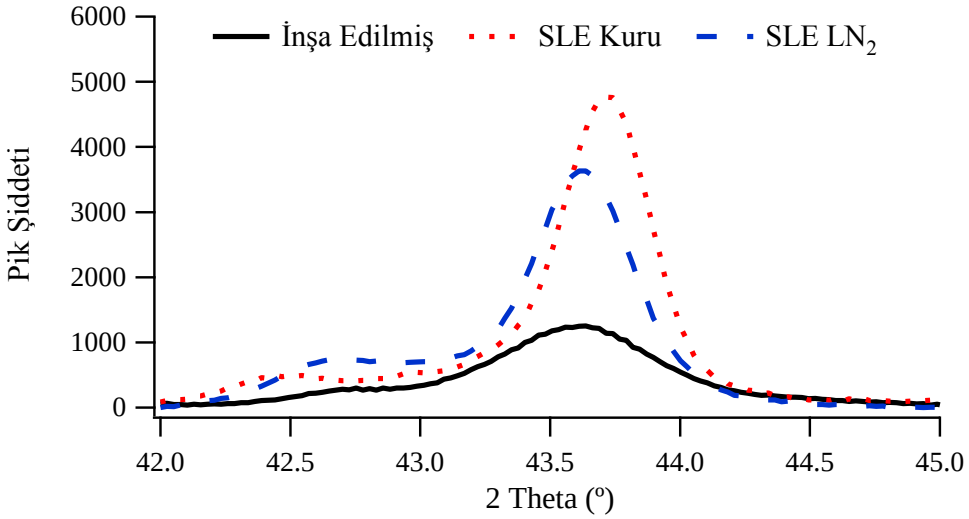


Şekil 3.54. SLE 316L malzemelerin 7.5 m/dak kesme hızında kuru ve kriyojenik koşulda XRD modeli (γ= -3°)

Kuru ve kriyojenik koşullar altında işlenmiş ve inşa edilmiş SLE numunelerden elde edilen XRD modelleri 30 m/dak kesme hızı için Şekil 3.55' te ve 120 m/dak kesme hızı için Şekil 3.56' da gösterilmiştir. Her iki grafiktede açık şekilde işlenmiş numune pik tepe noktaları inşa edilmiş pik tepe noktasına göre sağa doğru kaymıştır. Bir başka ifadeyle pik tepe 2θ açıları değişmiştir. Ayrıca işlenmiş numune piklerinin orta noktalarındaki pik genişliği olarak ifade edilen FWHM değerleri, inşa edilmiş numune piki FWHM değeri ile kıyaslandığında genişledikleri görülmektedir. Bu durum tane küçülmesini işaret etmektedir. Önceki bölümlerde yapılan mikroyapı görüntü analizlerindeki deforme olmuş katman görüntüleri bu durumu desteklemektedir.

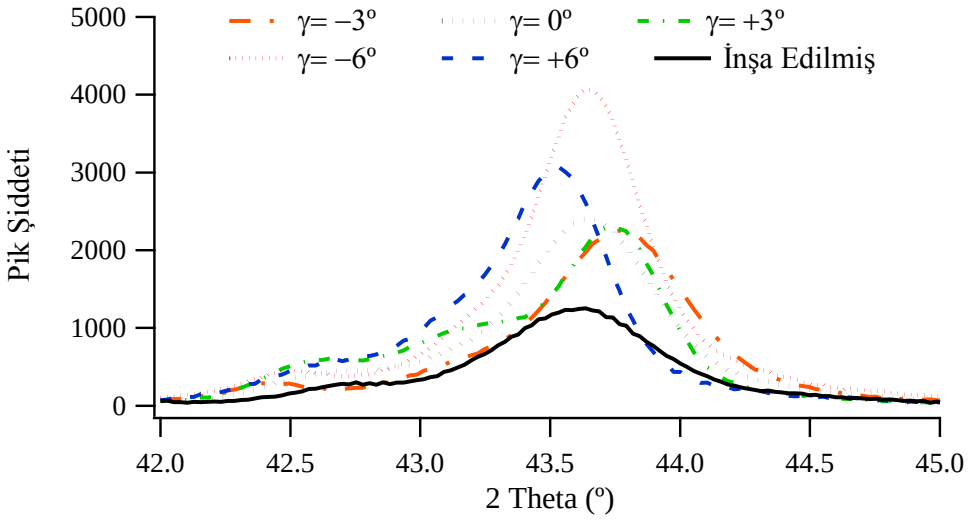


Şekil 3.55. SLE 316L malzemelerin 30 m/dak kesme hızında kuru ve kriyojenik koşulda XRD modeli (γ= -3°)



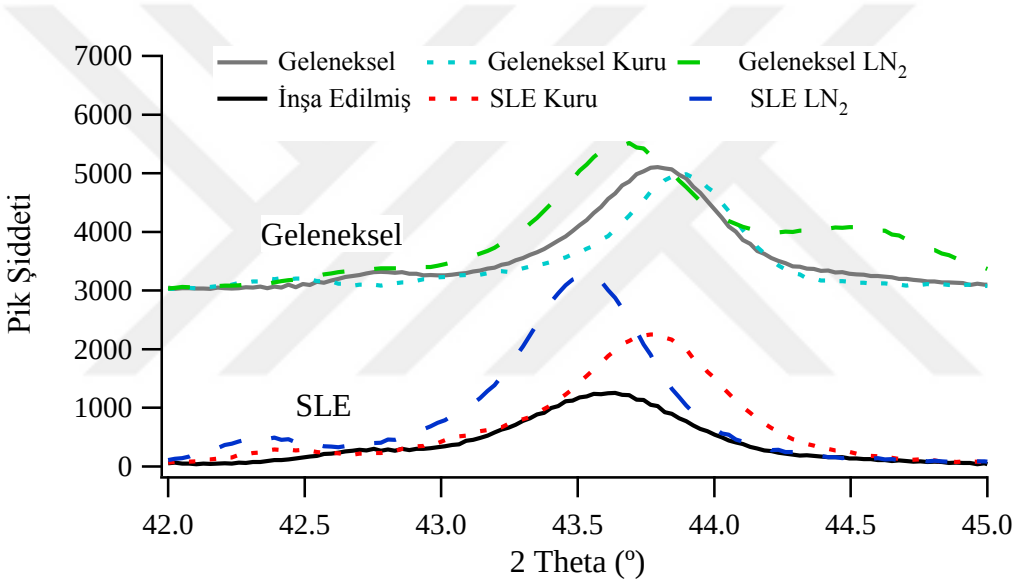
Şekil 3.56. SLE 316L malzemelerin 120 m/dak kesme hızında kuru ve kriyojenik koşulda XRD modeli (γ= -3°)

Farklı talaş açılarında işlenmiş SLE malzemelere ait XRD modelleri Şekil 3.57' de gösterilmiştir. Tüm işlenmiş piklerde inşa edilmiş pike kıyasla kaymalar mevcuttur. Genelde pik açıları sağa kayarken yalnızca +6° talaş açısı değerinde sola kayma vardır. Ayrıca en büyük pik olarak -6° talaş açısındaki pik görülmektedir. XRD ana östenit pik alanı talaşlı imalatın etkisini değerlendirme açısından da bir gösterge olarak kullanılabilmektedir. Nitekim pik şiddeti ile pik FWHM değerinin çarpımı pik alanını vermektedir. Bu açıdan değerlendirildiğinde -6° talaş açısındaki pik en büyük alanı verecektir. Nitekim daha önceki analizlerde de belirtildiği üzere en yüksek plastik deformasyonlar bu talaş açısı değerinde gerçekleşmiştir. Bahsedilen bu analizle ilgili sayısal veriler sonraki bölümde tartışılmıştır.

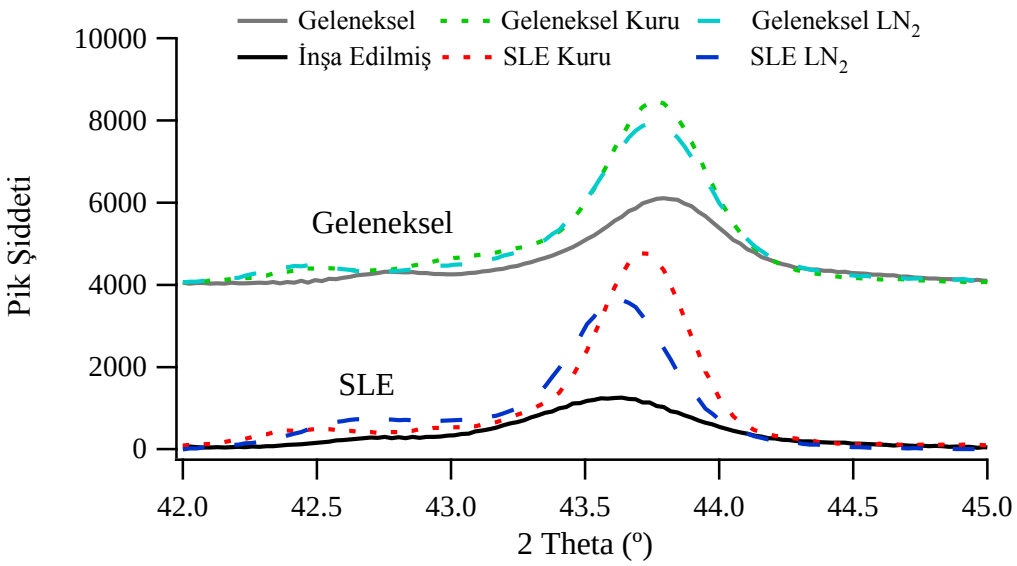


Şekil 3.57. SLE 316L malzemelerin talaş açısına göre kuru kesme koşulunda XRD modeli (Vc=7.5 m/dak)

Kuru ve kriyojenik koşullarda 7.5 m/dak kesme hızında kesilmiş SLE ve geleneksel malzemenin XRD modeli Şekil 3.58' de, aynı koşullarda 120 m/dak kesme hızında oluşan XRD modeli ise Şekil 3.59' da gösterilmiştir. SLE inşa edilmiş ve geleneksel işlem görmemiş pik şiddetleri kıyaslandığında farklılık olduğu açıktır. Bu durum her iki malzemenin XRD analizi yapılırken birlikte değerlendirilemeyeceğini göstermektedir. Geleneksel işlem görmemiş pik şiddeti SLE inşa edilmiş pik şiddetine kıyasla daha fazladır. Ancak talaşlı imalat sonrası her iki kesme hızında da XRD pik şiddetlerinin SLE malzemelerde geleneksel malzemeye kıyasla daha fazla arttığı görülmektedir. Bu durum talaşlı imalatın SLE malzemenin kristalografik yapısında daha fazla değişime yol açtığı sonucunu doğurmaktadır. Nitekim incelenen XRD pikleri ana östenit pikini ifade etmektedir. Bu durumda SLE malzemenin östenit yapısı geleneksel malzemeye kıyasla daha fazla artış göstermiştir.

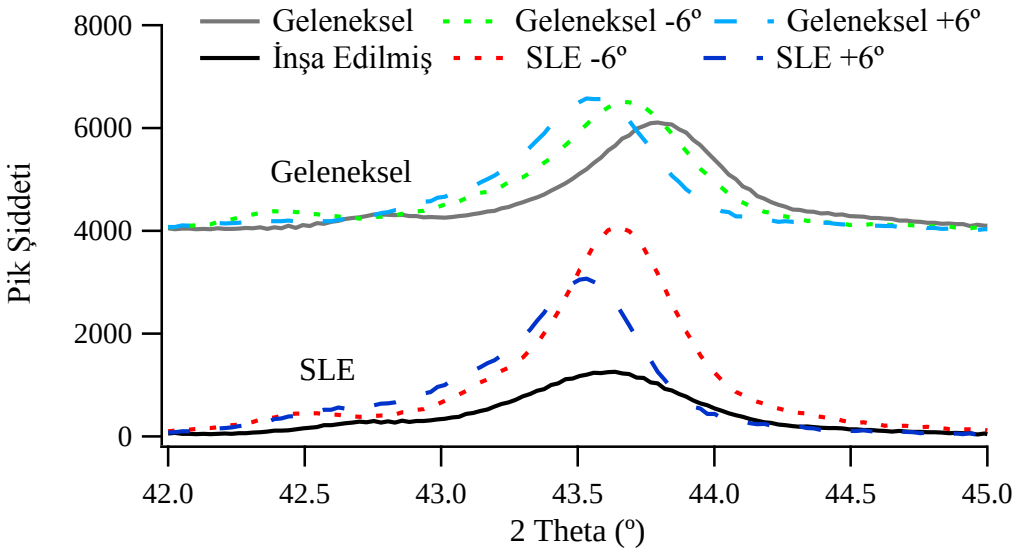


Şekil 3.58. SLE ve geleneksel 316L malzemelerin 7.5 m/dak kesme hızındaki kuru ve kriyojenik XRD modeli (γ= -3°)



Şekil 3.59. SLE ve geleneksel 316L malzemelerin 120 m/dak kesme hızındaki kuru ve kriyojenik XRD modeli (γ= -3°)

Farklı talaş açısı değerlerinde kuru koşulda 7.5 m/dak kesme hızında işlenen SLE ve geleneksel malzemelerin XRD modellerinin kıyaslaması Şekil 3.60' ta gösterilmiştir. Geleneksel piklerde en yüksek pik şiddeti 6° talaş açısı değerinde ve geleneksel işlem görmemiş pik şiddetinden %22 daha yüksektir. SLE pik genişlikleri, -6° ve 6° talaş açılarında, inşa edilmiş pik genişliğinden sırasıyla %16 ve %10 daha fazladır. Geleneksel pik genişlikleri, -6° ve 6° talaş açılarında sırasıyla geleneksel işlem görmemiş pik genişliğinden %8 ve %7 daha fazladır. Sayısal oranlar SLE numunesinde tane küçülmesi miktarının daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu, önceki bölümlerde açıklanan abrasif davranışla iyi bir uyum olduğunu göstermektedir. Ayrıca talaşlı imalatın numuneler üzerindeki etkisi XRD modelleri ile yorumlanabilmektedir. XRD piklerinin alanlarının kıyaslaması Tablo 3.1' de gösterilmiştir. -6 ve 6° talaş açısı değerlerinde SLE pik alanları, inşa edilmiş durumdan %292 ve %183 daha büyükken; işlenmiş pik alanları geleneksel işlem görmemiş durumdan sırasıyla %32 ve %11 daha büyüktür. SLE numunesinde işleme kaynaklı etkinin daha derine indiği, geleneksel numunede ise daha az olduğu anlaşılmaktadır. SLE numunelerinde talaşlı imalat kaynaklı etkinin daha yüksek olduğu yüzdelerden anlaşılmaktadır. Mikroyapı görüntülerinde talaşlı imalat kaynaklı katman kalınlıkları da bu durumu desteklemektedir.



Şekil 3.60. SLE ve geleneksel 316L malzemelerin 7.5 m/dak kesme hızındaki talaş açısına göre xrd modeli

Tablo 3.1.. Farklı talaş açısı değerlerinde işlenmiş SLE ve geleneksel numunelerin XRD pik alan analizi

	Şiddet(CPS)	**FWHM**	**2 Theta (°)**	**Pik Alanı (CPS*2θ°)**
SLE inşa edilmiş	1185	0.307	43.624	359
SLE -6°	3992	0.358	43.648	1410
SLE 6°	3013	0.338	43.525	1018
Geleneksel işlemsiz	2058	0.383	43.795	779
Geleneksel -6°	2476	0.415	43.678	1027
Geleneksel 6°	2512	0.409	43.557	868

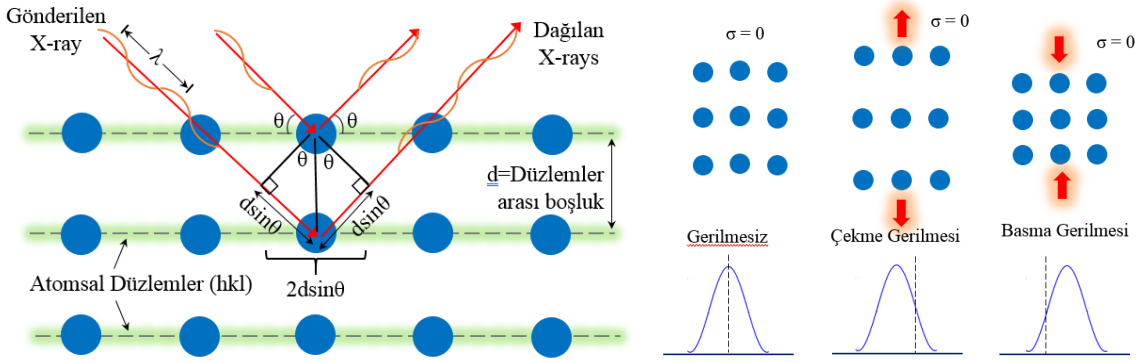
3.7.1 Kalıntı gerilme analizi

Şekil 3.61, Bragg yasasının XRD model oluşumunda uygulanmasını şematik olarak açıklamaktadır. Denklem 7' de verildiği gibi bu yasa, X-ışınının bir kristal yüzeye θ açısıyla düştüğünde, θ açısıyla geri yansıdığını belirtir [25].

Burada n dalga boyunun tam katı, λ X-ışınının dalga boyu, d kristaldeki düzlemler arasındaki mesafe ve θ yapıcı girişimin oluştuğu açıdır. Dolayısıyla eğer d-aralığı arttırılırsa denklemi korumak için X-ışınının daha küçük θ açısıyla kırınımı gerekir. Şekil 3.61, gerilimi ve bunun d-aralığı ve kırınım tepe konumu üzerindeki etkisini şematik olarak açıklamaktadır. Malzemede artan çekme gerilmesi, d-aralığının artması ve θ açısı değerinin azalmasıyla XRD pik konumunun 2θ açısındaki kayma ile açıklanmaktadır. Basma gerilimi durumunda, d-aralığı

azalacağından daha büyük bir θ açısı beklenir. Bu açıklamalar ışığında önceki bölümde sunulan XRD grafiklerinden yola çıkılarak SLE ve Geleneksel malzemeler kendi aralarında değerlendirilmek koşuluyla kalıntı gerilme analizi sonuçları Tablo 3.2' de gösterilmiştir.

Bahsedilen analiz yönteminin daha iyi anlaşılması hususunda -3° talaş açısı ve 7.5 m/dak kesme hızında kuru ve kriyojenik koşulda SLE malzemeyle yapılan talaş kaldırma deneyinde elde edilen XRD modelleriyle(1 ve 8 numaralı deneyler) gerilim analizi detaylandırılmıştır. SLE inşa edilmiş numunenin d-aralığı değeri 2.07484 Å'dur. İşlenen numunelerin d-aralığı değerleri kuru ve kriyojenik koşullarda sırasıyla 2.06831 ve 2.07924 Å'dur. Bragg yasasında belirtildiği gibi, inşa edilmiş numunelerin işlenmesinden sonra kesme koşullarına bağlı olarak yapısındaki artık gerilmelerde değişiklikler meydana gelmiştir. Kuru kesmede basma artık gerilimi artarken, kriyojenik kesmede çekme artık gerilimi artmıştır. Burada dikkat edilmesi gereken husus, SLE inşa edilmiş numunenin yapısında basma mı yoksa çekme gerilmesinin mi aktif olduğu bilinememektedir. Talaşlı imalat sonrası sadece yapısında ilk durumuna kıyasla(inşa edilmiş haline kıyasla) çekme yönünde mi yoksa basma yönünde mi kalıntı gerilmelerin ne oranda değiştiği hakkında analiz yapılmaktadır.



Şekil 3.61. Bragg kanunu şematik gösterimi ve düzlemler arası mesafe ile difraksiyon pik pozisyonu ilişkisi

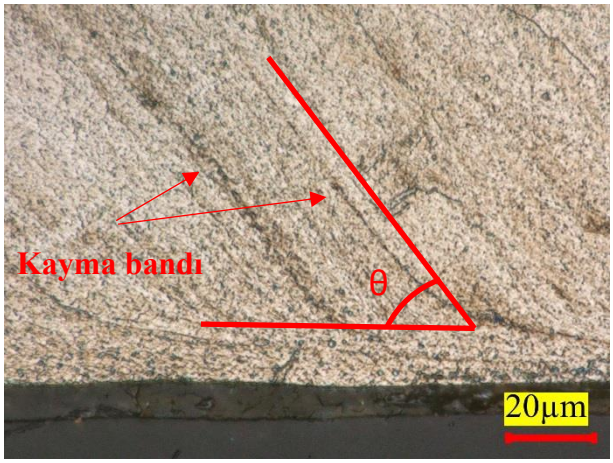
Tablo 3.2. SLE ve geleneksel numunelerin XRD analiziyle elde edilen pik değerleri ve gerilim analizi (γ= -3°)

Vc=7.5 m/min	2 Theta (°)	FWHM	Şiddet(CPS)	d-aralığı(Å)	Gerilme tipi	%
SLE-Kuru	43.7691	0.5425	2118	2.06831	Basma	-0.31
SLE-LN_2	43.5273	0.4349	3198	2.07924	Çekme	+0.21
Geleneksel-Kuru	43.8855	0.4746	1976	2.06309	Basma	-0.19
Geleneksel-LN_2	43.6791	0.4093	2400	2.07236	Çekme	+0.25
Vc=120 m/min						
SLE-Kuru	43.7187	0.3326	4698	2.07058	Basma	-0.2
SLE-LN_2	43.6462	0.3505	2984	2.07385	Basma	-0.05
Geleneksel-Kuru	43.8427	0.3549	4435	2.06508	Basma	-0.1
Geleneksel-LN_2	43.8338	0.3633	3890	2.06549	Basma	-0.08
SLE inşa edilmiş	43.6242	0.307	1185	2.07484	-	-
Geleneksel işlemsiz	43.795	0.3384	2058	2.06715	-	-

4. ANALİTİK HESAPLAMALAR

4.1 Kayma Açısı Analizi

Talaş mikroyapı görüntülerinden ölçülerek elde edilen kayma açısı değerleri bu bölümde sunulmuştur. Şekil 4.1' de SLE malzemenin talaşına ait, dijital mikroskobun kendi yazılımıyla yapılan ölçüm örneği gösterilmiştir. Kayma bandının talaşın ikincil deformasyon yüzeyiyle yaptığı açının dik açı değerinden çıkarılmasıyla kayma açısı hesaplanmıştır. Bahsedilen hesaplama metodu Denklem 8 ile ifade edilmiştir.



Şekil 4.1. SLE malzeme talaşına ait kayma açısı tayini görüntüsü

Kayma açısı ($\varnothing$)= 90° – θ (8)

θ = Birinci ve ikinci deformasyon bölgesi arasındaki açı

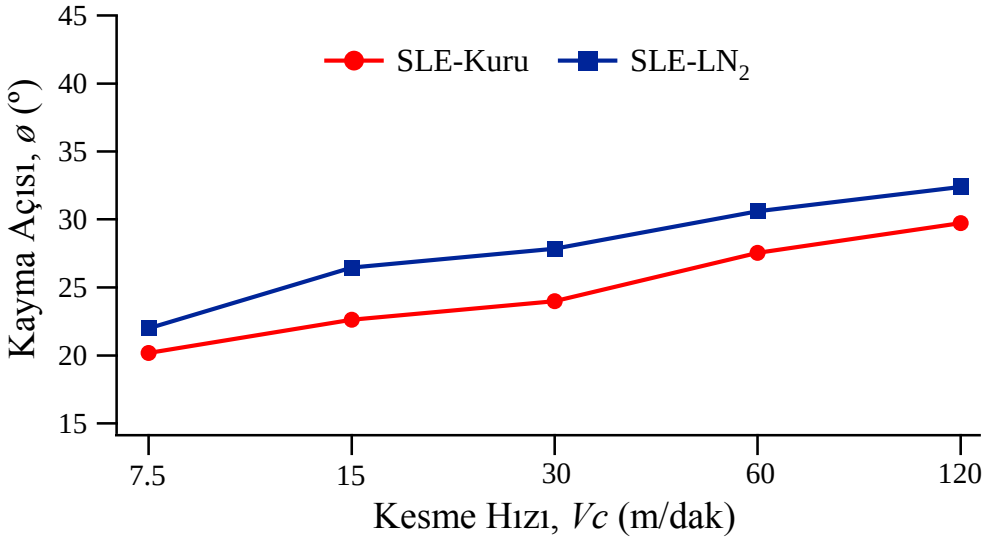
Mikroskop ile talaşların beş farklı noktasından yapılan ölçümlerin ortalaması alınarak kayma açısı değerleri tespit edilmiş olsa da, yapılan ölçümlerin doğruluğunu kontrol etmek adına Merchant dik kesme teorisiyle hesaplanan kayma açısı değerleriyle bir kıyaslama yapılması uygun bulunmuştur. Böylece ölçülen ve hesaplanan kayma açısı değerleri arasındaki farklılık yüzdesel olarak ortaya konulacaktır. Merchant teorisine göre kayma açısı değerleri Denklem 9, 10 ve11' e göre hesaplanmaktadır. Burada γ takım talaş açısı ve β sürtünme açısıdır.

$$\phi = \frac{\pi}{4} + \frac{\gamma}{2} - \frac{\beta}{2} \quad (9)$$

$$\beta = \tan^{-1}\mu \quad (10)$$

$$\mu = \frac{F_c \tan\gamma + F_t}{F_c - F_t \tan\gamma} \quad (11)$$

Kuru ve kriyojenik koşullarda işlenen SLE 316L malzemenin talaşlarından ölçülen kayma açısı değerleri kesme hızına bağlı olarak Şekil 4.2' de ve Merchant yöntemine kıyasla yüzdesel farklılıklar ise Tablo 3' te gösterilmiştir. Genel olarak kesme hızının artmasıyla kayma açısı değerleri de artış eğilimi göstermiştir. Kriyojenik koşulda ki kayma açıları her zaman kuru koşula kıyasla yüksek ölçülmüştür. Nitekim önceki bölümlerde sunulan talaş mikroyapı resimlerinde bu durum açıkça görülmektedir.



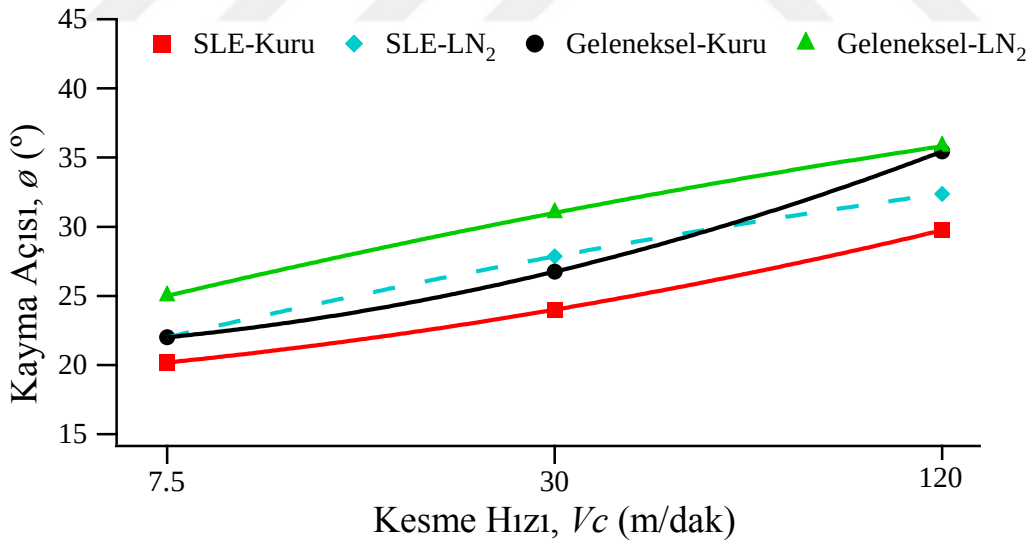
Şekil 4.2. SLE parçaların ölçülen kayma açıları (γ= -3°)

Merchant'ın yaklaşımında, kuru kesme koşulunda, kesici takımın mükemmel keskin olması, talaşın herhangi bir tarafa kaymaması ve kesme düzleminin bir düzlem olması gibi varsayımların pratikte uygulanmasının zor olduğu açıktır. Gerçek bir uygulamada kesme parametrelerinin ve koşullarının etkisi göz önüne alındığında, Tablo 4.1' te sunulan yüzdesel sapma miktarlarının kabul edilebilir düzeyde olduğu kabul edilebilir.

Tablo 4.1. Ölçülen ve hesaplanan kayma açıları arasındaki yüzdesel farklar

	Vc=7.5 m/dak	**Vc=15 m/dak**	**Vc=30 m/dak**	**Vc=60 m/dak**	**Vc=120 m/dak**
SLE Kuru	-%32.2	-%17	-%2.6	%18.5	%23.5
SLE Kriyojenik	-%29	%6.7	%12.4	%22.9	%30.6

Şekil 4.3' te SLE ve geleneksel malzemelerin kuru ve kriyojenik koşullarda işlenmesinde elde edilen talaşlardan ölçülen kayma açısı değerleri gösterilmiş olup Merchant yöntemine göre hesaplanan değerlerden farkları Tablo 4.2' de sunulmuştur. Her iki malzeme içinde kesme hızının etkisi benzerdir. Ayrıca her iki malzemenin kesme koşullarına kayma açısı bakımından tepkilerinin aynı olduğu görülmektedir. Genel olarak aynı koşullarda geleneksel malzeme kayma açısı değerleri SLE malzemeye kıyasla daha fazladır.

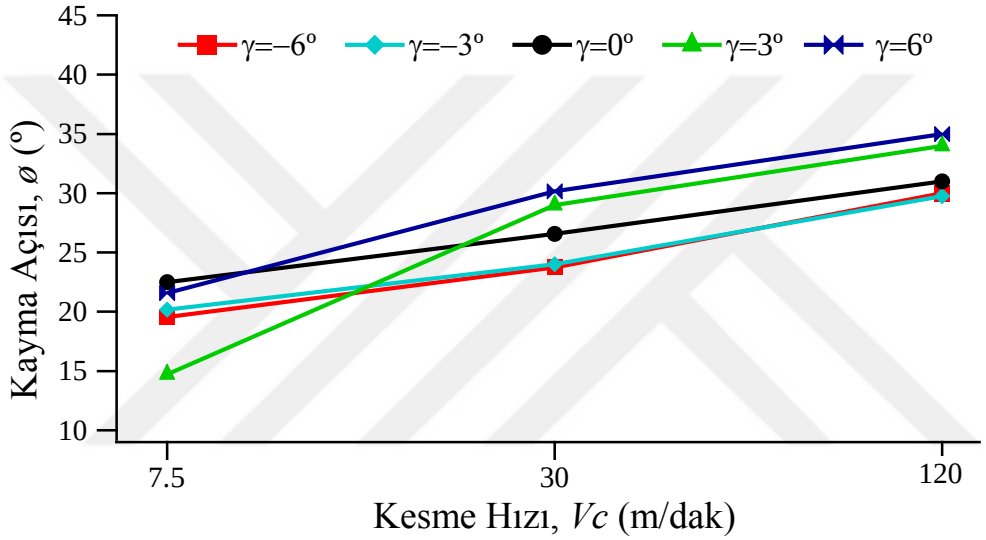


Şekil 4.3. SLE ve geleneksel parçaların ölçülen kayma açılarının kıyaslaması (γ= -3°)

Tablo 4.2. Ölçülen ve hesaplanan kayma açıları arasındaki yüzdesel farklar

	Vc=7.5 m/dak	**Vc=30 m/dak**	**Vc=120 m/dak**
SLE Kuru	-32%	-2.6%	23.5%
SLE Kriyojenik	-29.1%	12.5%	30.6%
Geleneksel Kuru	-15%	-1.8%	27.6%
Geleneksel Kriyojenik	-18.1%	16.6%	27.3%

Şekil 4.4’ te farklı talaş açısı değerlerinde işlenen SLE malzemelerin talaşlarından ölçülen kayma açısı değerleri gösterilmiştir. Ayrıca Tablo 4.3’ te Merchant yöntemine göre hesaplanan kayma açısı değerlerinden yüzdesel farklılıkları sunulmuştur. Genel olarak kesme hızı arttıkça kayma açıları da artmıştır. En yüksek kayma açısı değerleri pozitif talaş açısı değerlerinde ölçülmüştür. Bu durum geleneksel mühendislik malzemelerinde olduğu gibi benzer eğilimin SLE için de geçerli olduğunu ortaya koymaktadır. Büyük talaş açısı küçük kayma düzlemi ve dolayısıyla daha az enerjinin harcandığı talaşlı imalat işlemi anlamı taşımaktadır. Dolayısıyla en çok deformasyonların ve kesme kuvvetlerinin negatif talaş açısı değerlerinde gerçekleştiği düşünüldüğünde yapılan ölçümlerin tutarlı olduğu anlaşılmaktadır.

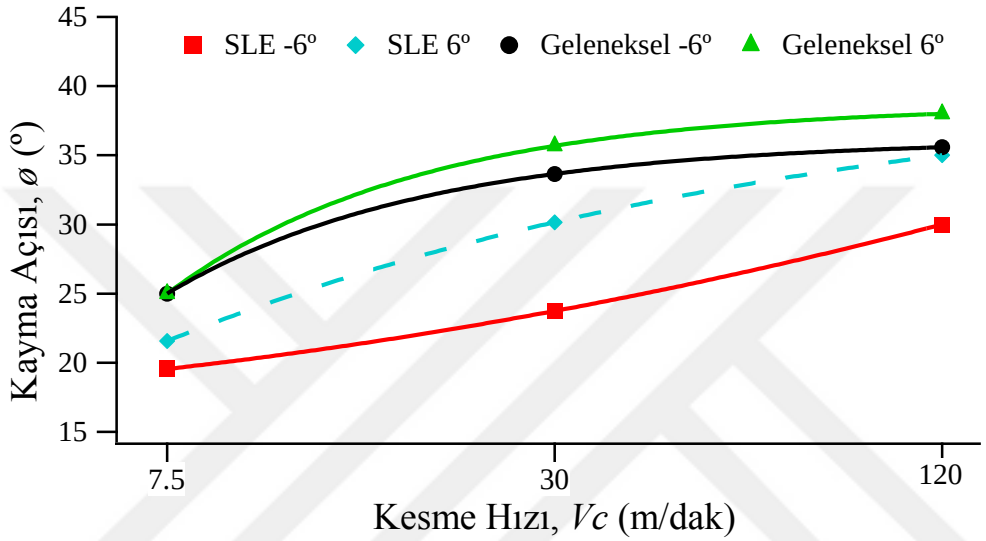


Şekil 4.4. SLE parçaların farklı talaş açısına sahip kesici takımlarla tornalanmasının ölçülen kayma açsına etkisi

Tablo 4.3. Ölçülen ve hesaplanan kayma açıları arasındaki yüzdesel farklar

	Vc=7.5 m/dak	**Vc=30 m/dak**	**Vc=120 m/dak**
γ=-6°	-%34.1	%5.4	%15.3
γ =-3°	-32%	-2.6%	23.5%
γ =0°	-%20	%2.2	%27.5
γ =3°	-	%7	%32.1
γ =6°	-%33	%6.6	%29

Şekil 4.5' te farklı talaş açısı değerlerinde işlenen SLE ve geleneksel malzemelerin talaşlarından ölçülen kayma açısı değerleri sunulmuştur. Tablo 4.4' te ise Merchant yöntemine göre hesaplanan kayma açısı değerlerinden yüzdesel farklılıklar ortaya konmuştur. Üç farklı eğilimden bahsetmek mümkündür. Kesme hızı arttıkça her iki malzemede de kayma açısıs artmıştır. Her iki malzemede içinde pozitif talaş açısı değerinde daha büyük kayma açısı ölçülmüştür. Aynı talaş açısı değerinde geleneksel kayma açıları SLE kayma açılarından büyüktür.



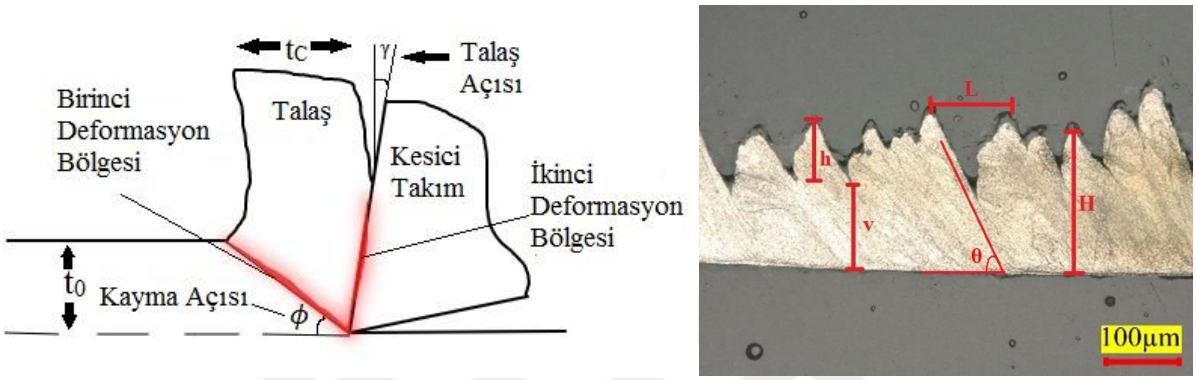
Şekil 4.5. SLE ve geleneksel parçaların farklı talaş açısına sahip kesici takımlarla tornalanmasının ölçülen kayma açılarına etkisi

Tablo 4.4. Ölçülen ve hesaplanan kayma açıları arasındaki yüzdesel farklar

	Vc=7.5 m/dak	**Vc=30 m/dak**	**Vc=120 m/dak**
SLE Kuru, γ= -6°	-%34.1	%5.4	%15.3
SLE Kuru, γ= 6°	-%33	%6.6	%29
Geleneksel Kuru, γ= -6°	-%24.8	%25.2	%27.4
Geleneksel Kuru, γ= 6°	-%24.3	%19.4	%30.8

4.2 Deformasyon Hızı Analizi

Şekil 4.6' da deformasyon hızı analizinde kullanılan talaş parametrelerinin tespitinin yapılışını gösteren şematik resim ve talaş görüntüsü gösterilmiştir. Bu bölümde literatürde kullanılan iki farklı deformasyon hızı hesaplama yöntemi kullanılmıştır. Hesaplama yöntemlerinin farklılığından kaynaklı olarak her yöntemde bire bir aynı değerlerin bulunması mümkün olmamakla beraber burada farklı yöntemlerin kullanılmış olmasının sebebi eğilimlerin farklılık gösterip göstermediğinin tespit edilmesidir.



Şekil 4.6. Deformasyon hızı analizlerinde kullanılan talaş ölçülerinin alınma yöntemlerinin şematik gösterimi

Deformasyon hızı hesaplamada ilk yöntem Li ve ark. tarafından Denklem 12' nin kullanıldığı yöntemdir. Bu yöntemde Şekil 59'da gösterilen segmentli talaş üzerinden alınan ölçüler önemli yer tutmaktadır. Ancak özellikle segmentsiz sayılabilecek düz formdaki geleneksel talaşların varlığının deformasyon hızı hesaplamasında SLE talaşlardan farklı sonuçlar oluşturacağı barizdir.

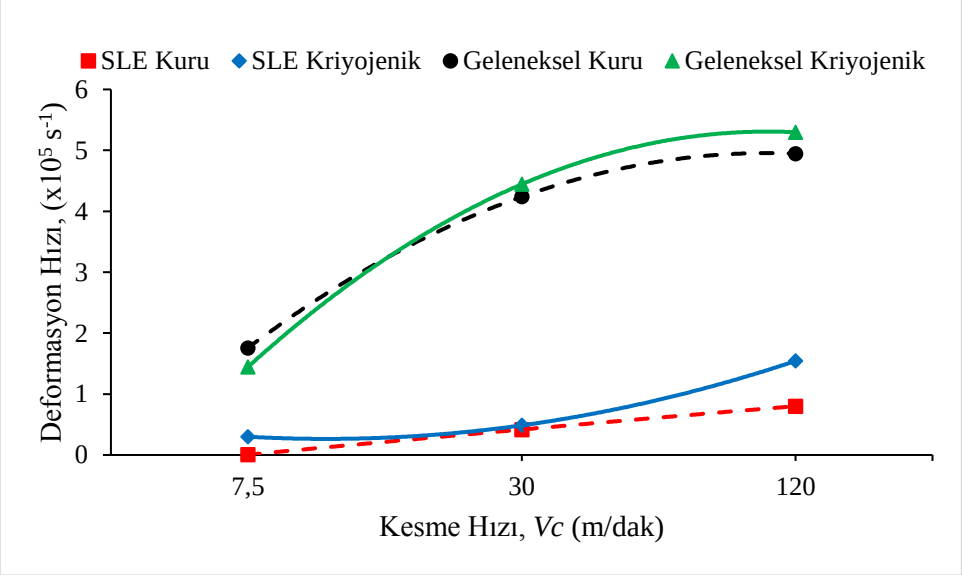
$$\dot{\varepsilon} = \left[\frac{\cos\gamma}{\cos(\theta-\gamma)} + \frac{\cos\delta}{\sin(\delta+\theta-\pi/2)}\right]\frac{t_0 V_c}{(\sin\theta)L(H-h/2)} \qquad (12)$$

burada $\delta = \tan^{-1}\frac{L}{h}$

ve Şekil 4.6'da görüleceği üzere t_0 kesilmemiş talaş kalınlığı, Vc kesme hızı, θ birinci ve ikinci deformasyon bölgesi arasında kalan açı, L segmentler arası mesafe, H talaş kalınlığı, ve h segment yüksekliğidir.

Şekil 4.7'de kesme hızının bir fonksiyonu olarak farklı kesme koşulları ve malzeme farklılığının hesaplanan deformasyon hızına etkileri gösterilmiştir. Grafiğe göre deformasyon hızı değerleri esas olarak kesme hızı ve malzeme özelliklerinden etkilenmektedir. Kesme hızı arttıkça deformasyon hızıları da artmaktadır. Ayrıca malzeme tipinin farklılığının da etkisiyle

geleneksel malzemede deformasyon hızları SLE'ye göre daha yüksektir. Soğutma koşullarındaki değişim deformasyon hızı üzerinde daha az etkiye sahiptir. Kesme hızı arttıkça deformasyon hızı SLE-Kriyojenik'te 7.5 m/dak kesme hızında $0.3x10^5$ s^{-1}'den 120 m/dak kesme hızında $1.54x10^5$ s^{-1}'e, Geleneksel-Kriyojenik' te ise 7.5 m/dak kesme hızında $1.44x10^5$ s^{-1}'den 120 m/dak kesme hızında $5.3x10^5$ s^{-1}'e yükselmektedir. Başka bir deyişle deformasyon hızındaki artış talaşlarda testere dişi formunun oluşmasının bir sonucudur. Aslında, 10^3 s^{-1}'den büyük deformasyon hızları, deformasyon hızının yüksek bölgede olduğunu gösterir ve bu aynı zamanda deformasyon hızının akış gerilimi üzerindeki etkisinin de büyük olduğunu gösterir. Aslında, sıcaklık ve deformasyon hızı birbirini tetikleyen iki faktördür. Yüksek deformasyon hızı önemli ısı üretimine neden olur. Bu nedenle, ortaya çıkan yüksek sıcaklık, adyabatik kayma bantlarının oluşumunun önünü açar [59]. Yüksek deformasyon hızlarında oluşan deformasyon mekanizmasının, düşük deformasyon hızlarına göre daha karmaşık olması da bir diğer konudur. Düşük deformasyon hızlarındaki deformasyon mekanizması kayma ve bükülmeden oluşurken, mikroyapı, kusurlar ve mekanik özellikler gibi malzeme özellikleri yüksek deformasyon hızlarında etkilidir [60]. Geleneksel ve SLE malzemeler benzer kimyasal bileşime sahip olsa da, belirtilen farklı malzeme özellikleri deformasyon hızları üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir.



Şekil 4.7. Li modeline göre hesaplanan deformasyon hızları

Deformasyon hızı hesaplamada kullanılan ikinci yöntem ise Mercant dik kesme teorisine dayalıdır. Burada talaş ölçülerinden daha çok kesme parametreleri ve kesici takım geometrik özellikleri temeli oluşturmaktadır. Buna göre aşağıdaki Denklem 13-15 kullanılarak hesaplama yapılmaktadır.

$$r_C = \frac{t_0}{t_C} \tag{13}$$

burada r_c talaş oranı, t_0 kesilmemiş talaş kalınlığı ve t_c ise ölçülen talaş kalınlığıdır.

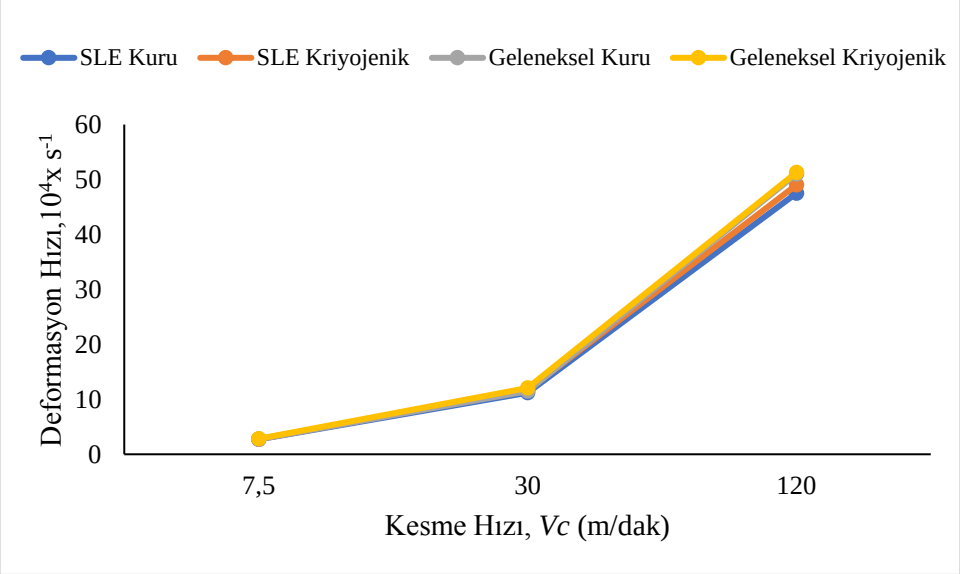
$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{\cos\gamma}{r_C - \sin\gamma}\right) \tag{14}$$

burada ϕ kayma açısı ve γ ise kesici takım talaş açısı değeridir.

$$\dot{\varepsilon} = \frac{10 v_C \times \cos\gamma}{t_0 \cos(\phi - \gamma)} \tag{15}$$

$\dot{\varepsilon}$ deformasyon hızını ifade etmektedir.

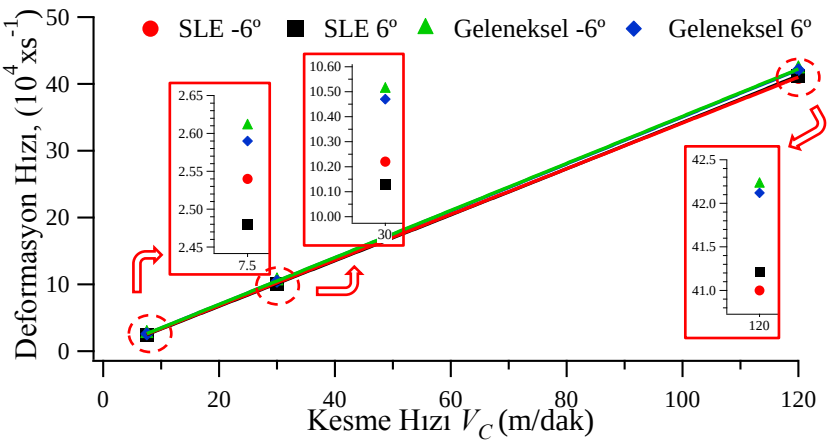
Kuru ve kriyojenik koşullarda işlenen SLE ve geleneksel malzemelerin hesaplanan deformasyon hızı değerleri Merchant' a göre Şekil 4.8' de gösterilmiştir. Görüleceği üzere her iki yöntemde de deformasyon hızları kesme hızına göre eğilim, malzeme farklılığına göre eğilim ve kesme koşuluna göre eğilim olarak benzer olmakla beraber sadece elde edilen sayısal sonuçlar farklıdır. O halde geleneksel malzemelerde aynı koşul ve parametrelerde SLE malzemeye kıyasla daha yüksek deformasyon hızı elde edildiği anlaşılmaktadır.



Şekil 4.8. Merchant teorisine göre deformasyon hızları

Malzemeler arasındaki farklılığın deformasyon hızına etkisinin daha iyi anlaşılması hususunda farklı talaş açısı değerlerinin etkisi Merchant teorisine göre incelenmiş ve sonuçlar Şekil 4.9' da sunulmuştur. Kesme hızı arttıkça, deformasyon hızları da artmıştır. Her kesme hızındaki geleneksel deformasyon hızı değerleri SLE deformasyon hızı değerlerinden daha yüksektir. 7.5

ve 30 m/dak kesme hızlarında, negatif talaş açısındaki deformasyon hızları her malzeme için daha yüksektir. Ancak, 120 m/dak kesme hızında SLE için bunun tersi geçerlidir. Yüksek kesme sıcaklığı ve deformasyon hızı birlikte malzemelerde termal yumuşamaya neden olabilir. Başka bir deyişle, malzemelerin yumuşama oranlarındaki fark, termal iletkenlikteki farklılıklardan kaynaklanıyor olabilir. Bunun nedeni, geleneksel 316L'nin termal iletkenliğinin 13.31 W/m.°C [61] ve inşa düzleminden SLE' nin termal iletkenliğinin oda sıcaklığında 14.3 W/m.°C [62] olmasıdır. SLE malzemesinin termal iletkenliği için anizotropiden bahsetmek mümkündür. Sıfır gözenekli yapıya sahip SLE malzemesinde, inşa ve tarama düzlemlerinden ölçülen termal iletkenlik değerleri arasında ihmal edilebilir düzeyde farklar vardır. Yapıdaki gözeneklilik miktarı arttıkça, termal iletkenlik her iki düzlemde de azalır, ancak inşa düzleminde daha yüksek olmaya devam eder [62]. SLE malzemelerin imalat yönteminden kaynaklanan gaz ve füzyon eksikliği gibi gözeneklilik kusurları nedeniyle %100 hacimsel yoğunluk oranlarına ulaşmak çok zordur. Bu durum, tarama ve inşa düzlemlerinde anizotropik termal iletkenlik gösteren malzemenin davranışını daha da karmaşık hale getirir. Bir diğer konu, ikincil işlem olarak talaşlı imalat işleminin SLE malzemelerin gözenekliliğini azaltma etkisidir [25]. İşleme sırasında yapıdaki gözeneklilik kusurları azaldıkça termal iletkenlik artabilir. Ayrıca, işleme sırasında oluşan sıcaklık iletkenliği etkilemektedir. Bunun nedeni, 316L malzemenin iletkenliğinin yüksek sıcaklıklarda arttığının bilinen bir gerçek olmasıdır [61]. Talaşlı imalatta sıcaklık arttıkça serbest elektron sayısı ve kafes titreşimleri artar. Bunun sonucunda atomların kinetik enerjisi artarak ısıl iletkenliğin artmasına olanak tanır. SLE malzemesinin ısıl iletkenliğini etkileyen faktörlerin geleneksel malzemeye göre daha karmaşık ve çok sayıda olduğu anlaşılmaktadır. Bunun nedeni özetleyecek olursak SLE malzemesinin talaşlı imalat sürecinde ısıl iletkenlik artışını etkileyen üç temel faktörün olmasıdır: kesme sıcaklığı, gözeneklilik kusurları ve anizotropik özellik. Büyük ısıl iletkenlik katsayılarına sahip malzemeler ısıyı hızlı iletir, küçük ısıl iletkenlik katsayılarına sahip malzemeler ise ısıyı daha geç iletir. Yüksek ısıl iletkenliğe sahip SLE malzemesinin talaş kaldırma sırasında geleneksel malzemeye göre kesici takıma daha fazla ısı aktardığı ve daha fazla takım aşınmasına neden olduğu sonucuna varılabilir.



Şekil 4.9. Talaş açısının ve kesme hızının malzemelerin deformasyon hızlarına etkisi

5. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

5.1 Sonlu Elemanlar Analizinde Kullanılan Yaklaşım

Literatürde Eİ 316L paslanmaz çelik malzemesinin sonlu elemanlar modelleme yöntemiyle deformasyon davranışının J-C bünye denklemi kullanılarak incelendiği çalışmalarda malzeme sabitleri, geleneksel 316L malzemeye ait malzeme sabitleri alınarak yapılmıştır. Ancak Eİ 316L ile geleneksel 316L malzemelerin çekme testi sonuçları kıyaslandığında farklı akma ve çekme dayanımlarına sahip oldukları aşağıdaki Tablo 5.1' de anlaşılmaktadır.

Tablo 5.1. SLE ve geleneksel 316L malzemenin mekanik özellikleri [23]

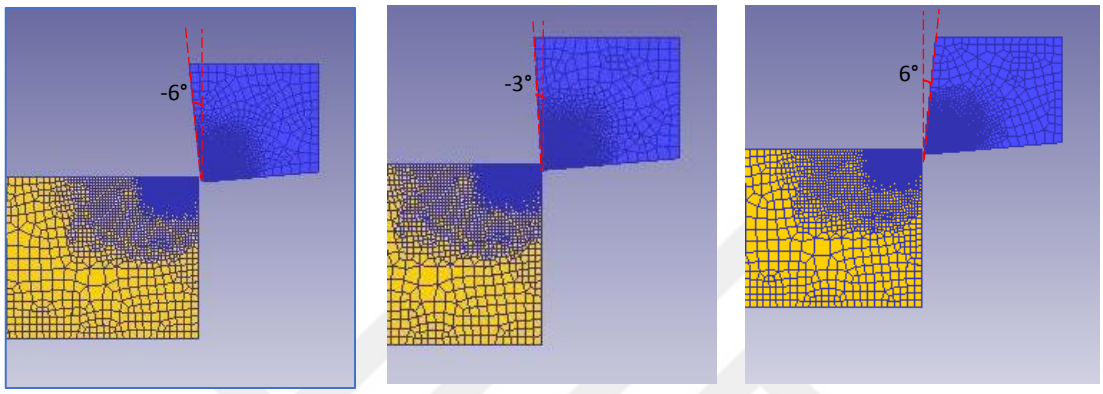
Malzeme	YS(MPa)	UTS(MPa)	Uzama %
SLE	637.9 ± 11.3	751.6 ± 15.9	41.2 ± 2.7
Geleneksel	300	620	50

O halde FEM ile yapılacak deformasyon analizlerinde Eİ 316L malzemenin bu farklılığının dikkate alınması daha doğru sonuçların elde edilmesini sağlayacaktır.

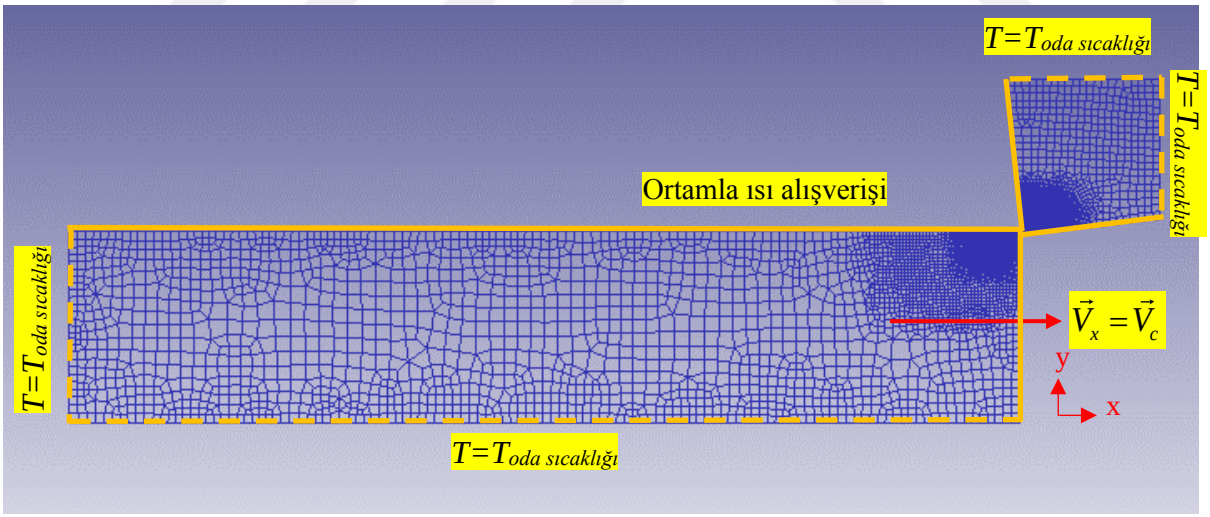
5.2 Talaş Kaldırma Sürecinin Modellenmesi

Simülasyon çalışmalarında DEFORM-2D/3D (V11.0) yazılımı kullanılmıştır. Yazılımın kütüphanesinde geleneksel 316L paslanmaz çeliğin malzeme özellikleri ve J-C bünye denklemi parametreleri kendiliğinden tanımlıdır. Simülasyon çalışmalarında malzeme seçimi doğrudan yazılımın kütüphanesinden yapılmıştır. Kesici takım geometrisi bilgileri, deneysel çalışmalarda karşılığı olan -6°, -3° ve 6° talaş açısı değerleri, takım kenar yarıçapı 0.025 mm ve ön boşluk

açısı 7° olarak tanımlanmıştır(Şekil 5.1). Deneysel çalışmalarda kullanılan kesme parametreleri simülasyon deneylerinde aynen uygulanmıştır. Kesici takım rijit ve iş parçası plastik olmak üzere her ikisinin de başlangıçta oda sıcaklığında olduğu kabul edilmiştir. İş parçasının mesh yapısı 6174 elemandan meydana gelmektedir. Her bir simülasyon çalışması 500 adım sürmüştür. Şekil 5.2' de simülasyon tasarımı gösterilmiştir. Kesikli sarı çizgi olan yüzeylerin ortamla herhangi bir ısı alışverişi olmadığı, düz sarı çizgili yüzeylerin ise ortamla ısı transferinde bulunacağı tanımlanmıştır.



Şekil 5.1. Farklı talaş açısı değerleri için simülasyon tasarımı gösterimi



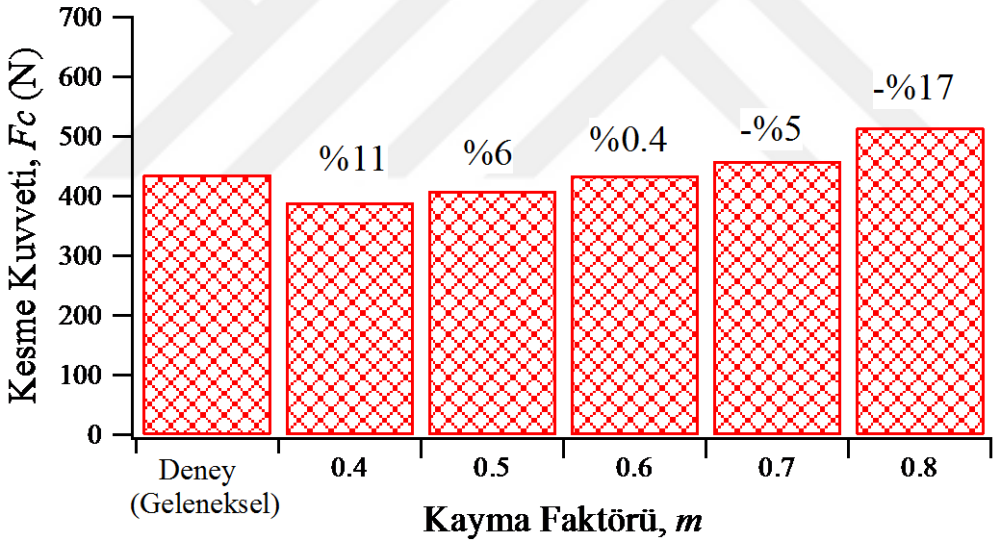
Şekil 5.2. Simülasyon deneylerinde iş parçası ve kesici takım için tanımlanmış ağ yapısı ve sınır koşulları

5.3 Geleneksel ve SLE 316L Paslanmaz Çelik Malzemesi için Hassasiyet Analizi

Talaş kaldırma simülasyonu için öncelikle kesici takım ile iş parçası arasındaki sürtünmeyi tanımlamak gerekir. Bu hususta Denklem 17 kullanılmıştır.

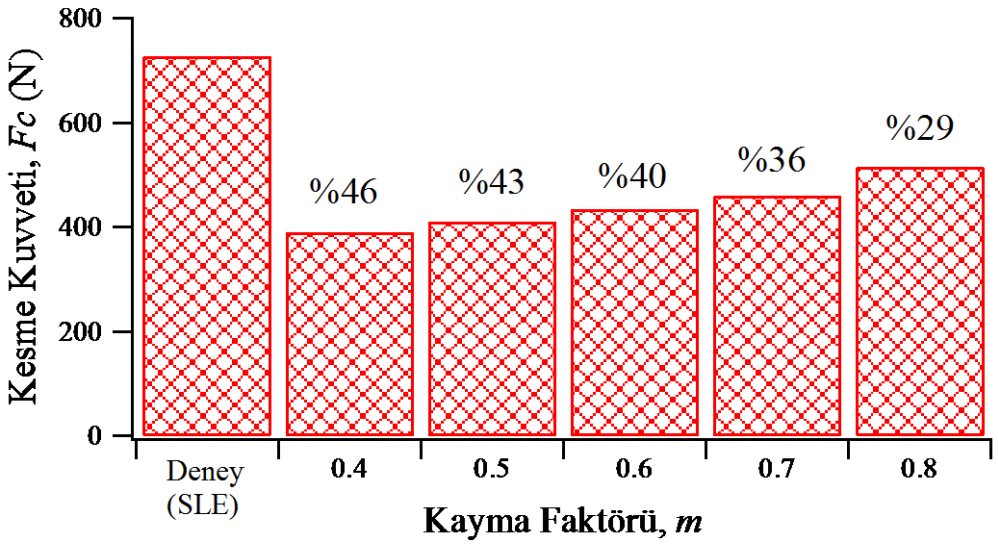
$$\tau = m.K_{talaş} \tag{17}$$

Burada τ kesici takımın talaş yüzeyi ile iş parçası arasındaki gerilmeyi, m kayma faktörünü ve $K_{talaş}$ ise talaşın kayma gerilmesini ifade etmektedir. Şekil 5.3' te kesme hızının 7.5 m/dak, talaş açısının 6° olduğu koşulda kayma faktörü(m) değerinin 0.4-0.8 arasında değişen değerlerinde tahmin edilen kesme kuvvetlerinin, aynı koşullarda yapılan talaş kaldırma deneylerinde ölçülen kesme kuvveti değerinden yüzde sapması gösterilmiştir. Kayma faktörünün 0.6 seçildiği durumda ölçülen kesme kuvveti ile tahmin edilen kesme kuvveti arasındaki farkın sadece %0.4 olduğu tespit edilmiş olup, geleneksel 316L malzemenin simülasyon çalışmaları bu değer dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.3. Geleneksel 316L için farklı kayma faktörlerinde oluşan kesme kuvvetleri (Vc=7.5 m/dak, γ=6°)

Şekil 5.4' te SLE 316L malzemesinin 7.5 m/dak kesme hızı 6° talaş açısı değerinde yapılan talaş kaldırma deneyinde ölçülen kesme kuvvetinin kayma faktörü 0.4-0.8 arasında seçildiğinde tahmin edilen kesme kuvvetleri arasındaki yüzdesel farklar gösterilmiştir. Bu farklılıklar %29 ile %46 arasında değişmektedir. Anlaşıldığı üzere geleneksel ve 316L malzeme farklılığının simülasyon çalışmalarında dikkate alınması gerekmektedir. Bu hususta Denklem 18' de gösterildiği üzere J-C bünye denklemi kullanılarak yazılıma malzeme tanımlaması yapılmıştır.



Şekil 5.4. SLE 316L içim farklı kayma faktörü değerlerinde tahmin edilen kesme kuvvetleri

$$\bar{\sigma} = [A + B(\bar{\varepsilon})^n]\left[1 + C\, ln\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}}{\dot{\bar{\varepsilon}}_0}\right]\left[1 - \left(\frac{T-T_0}{T_m-T_0}\right)^m\right] \quad (18)$$

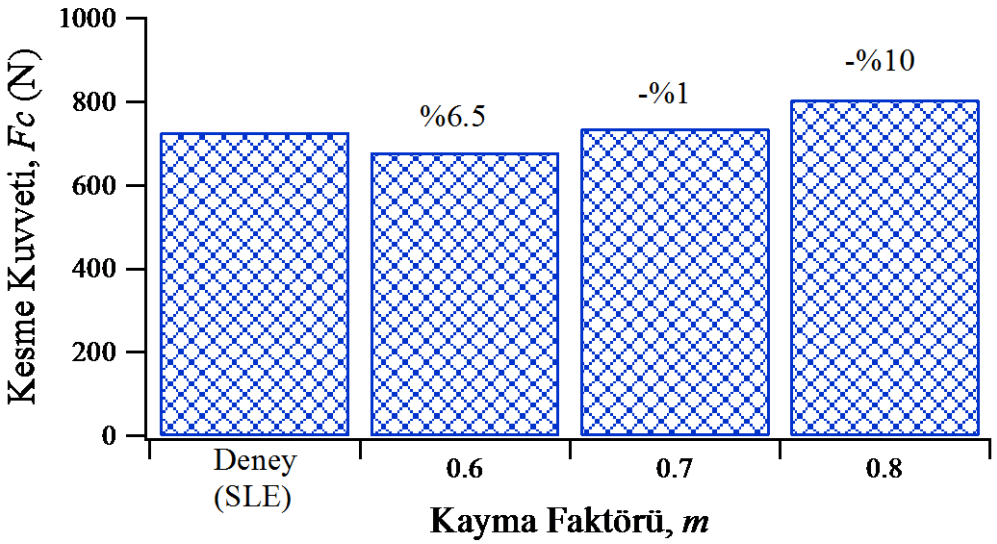
Johnson-Cook bünye denkleminde $\bar{\sigma}$ plastik akmayı ifade etmektedir. Bu denklemde $\bar{\varepsilon}$, $\dot{\bar{\varepsilon}}$ ve $\dot{\bar{\varepsilon}}_0 0$ sırasıyla şekil değiştirme, şekil değiştirme hızı ve referans şekil değiştirme hızıdır. T burada talaş kaldırma sıcaklığını, T_m iş parçasının ergime sıcaklığını ve T_0 oda sıcaklığını ifade etmektedir. Sertleşme katsayısı n, termal yumuşama katsayısı m ile gösterilmiştir. J-C bünye denklemi malzeme sabitlerinden A akma gerilmesini, B sertleşme modülünü, C ise şekil değiştirme hızı hassasiyet katsayısını ifade etmektedir.

Tablo 5.2' de J-C denkleminde kullanılmak üzere literatürden SLE 316L malzeme için tanımlanmış malzeme sabitleri yer almaktadır. SLE 316L malzemesini yazılıma tanıtmak için Fortran dilinde J-C denklemi subroutine olarak yazılmış ve Deform yazılımına bu kod okutularak simülasyonlar yapılmıştır.

Tablo 5.2. SLE 316L paslanmaz çelik malzemesi için J-C bünye denklem parametreleri [63]

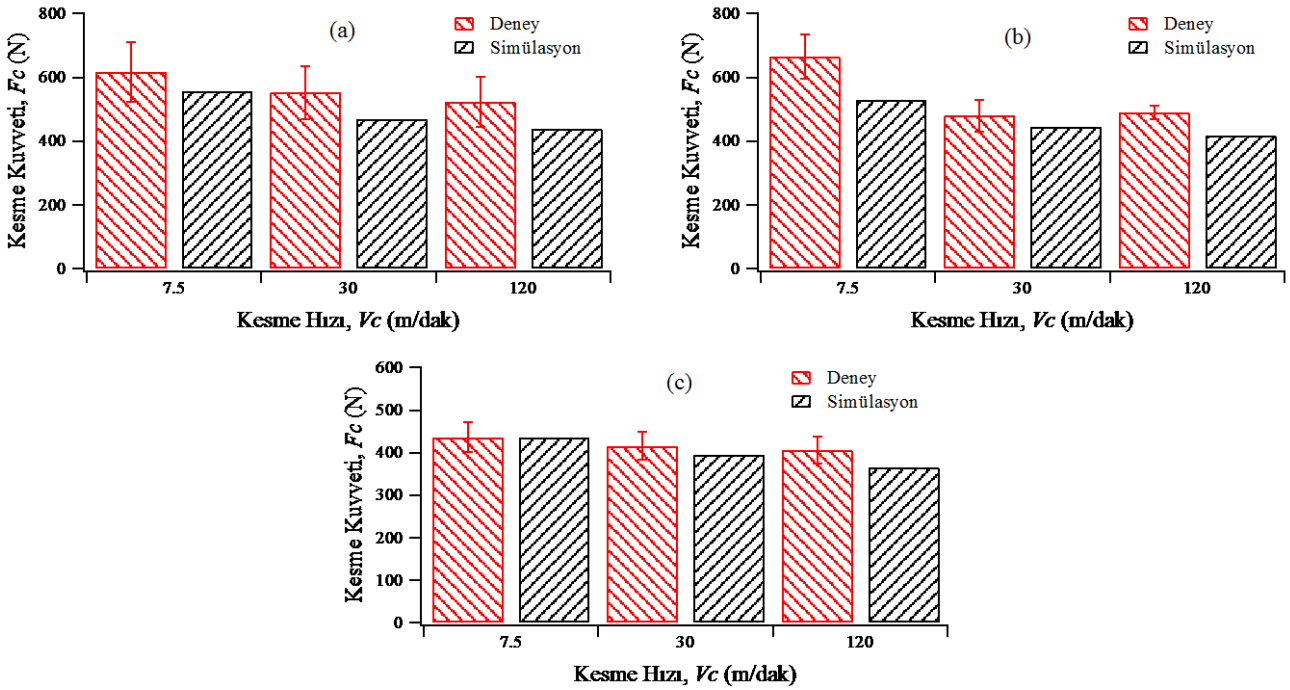
A(MPa)	B (MPa)	C	n	m
510.51	929.56	0.023	0.76	0.6

Şekil 5.5' te yazılıma SLE 316L malzemesi tanıtıldıktan sonra farklı kayma faktörü değerlerinde yapılan talaş kaldırma simülasyonlarında tahmin edilen kesme kuvvetlerinin, talaş kaldırma deneyinde ölçülen kesme kuvvetiyle kıyaslaması gösterilmiştir. Kayma faktörünün 0.7 seçilmesi durumunda %1 kadar sapmayla kuvvetin tahmin edilebildiği görülmektedir.



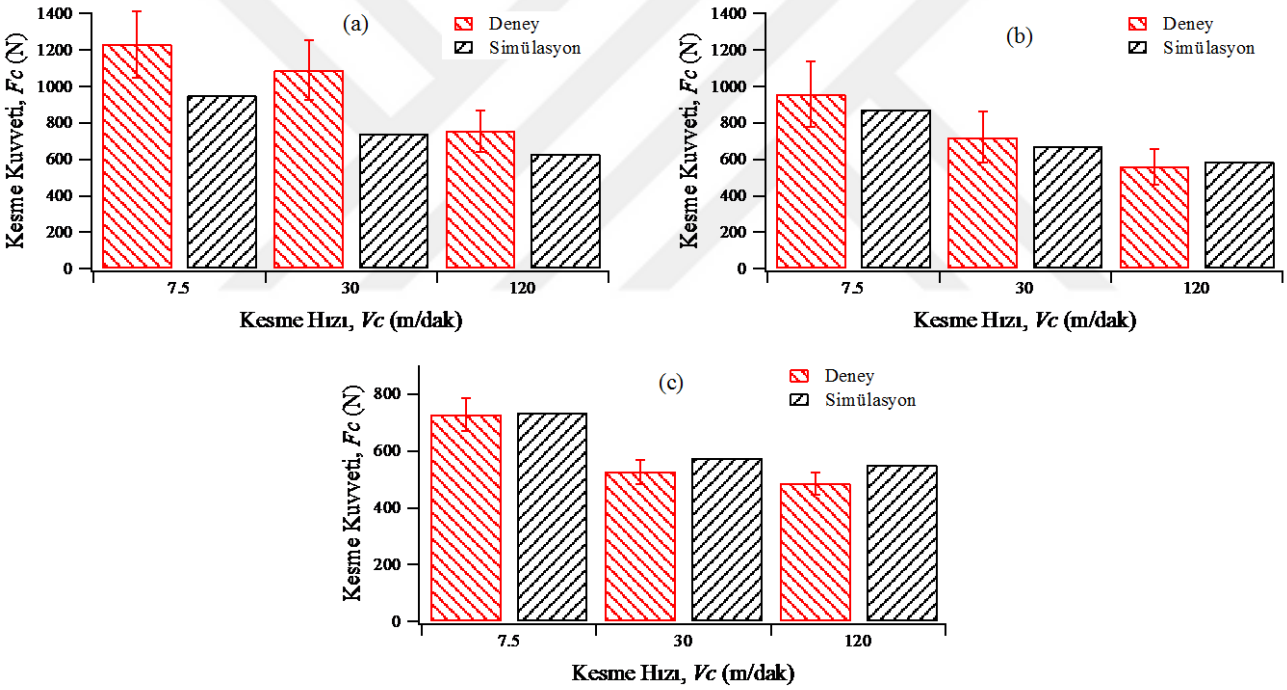
Şekil 5.5. SLE 316L malzeme tanımlaması yapıldıktan sonra tahmin edilen kesme kuvvetleri

Geleneksel 316L malzemenin talaş kaldırma deneylerinde ölçülen kesme kuvvetlerinin simülasyonla tahmin edilen kesme kuvvetleriyle kıyaslaması Şekil 5.6' da gösterilmiştir. Deneysel verilerde kesme hızının artmasıyla kuvvetlerde meydana gelen azalma eğilimi simülasyon tahminlerinde de benzerdir. Aynı durum talaş açısı değişimlerinde de görülmektedir. Deneysel verilerdeki hata barları da düşünüldüğünde tahmin edilen kuvvet değerlerinin deney verileriyle iyi bir uyum içinde olduğu barizdir.



Şekil 5.6. Geleneksel malzemenin deneylerde ölçülen ve simülasyonla tahmin edilen kesme kuvveti değerlerinin kıyaslaması a)γ= -6°, b) γ= -3°, c) γ= 6°

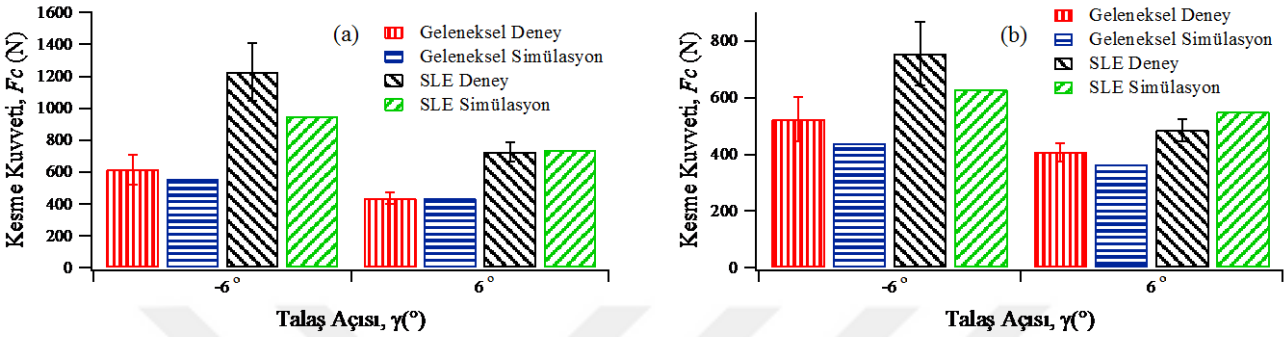
Şekil 5.7' de SLE 316L malzemesinin talaş kaldırma deneylerinde ölçülen kesme kuvvetlerinin aynı parametrelerde yapılan simülasyonlarda tahmin edilen kesme kuvvetleriyle kıyaslaması gösterilmiştir. Malzeme modelinin tanıtılmasının ve kayma faktörünün geleneksel 316L' den farklı olarak 0.7 seçilmesinin yapılan tahminleri iyileştirdiği barizdir. Kesme hızının artmasıyla veya talaş açısının negatif değerden pozitif değere dönüşmesiyle ölçülen kesme kuvvetlerindeki azalma eğilimi simülasyonla tahmin edilen kesme kuvvetlerinde de benzer şekilde gerçekleşmiştir. Tahmin edilen kuvvet değerleri genelde hata barları içerisinde kalmıştır. Ancak -6° talaş açısı değerinde düşük kesme hızında deney ve tahmin arasında kaçıklık söz konusudur. Daha önceki bölümlerde sunulan takım-talaş temas görüntüleri düşünüldüğünde takımda meydana gelen aşırı aşınmalar nedeniyle kesme kuvvetlerinin yüksek çıkması bu durumu ortaya çıkarmıştır. Ancak tahmin edilen değerlerin hata barlarının minimum noktalarıyla kıyaslaması yapılırsa aradaki farklılığın makul seviyede olduğu değerlendirilmiştir.



Şekil 5.7. SLE malzemenin deneylerde ölçülen ve simülasyonla tahmin edilen kesme kuvveti değerlerinin kıyaslaması a)γ= -6°, b) γ= -3°, c) γ= 6°

Şekil 5.8' de ise minimum ve maksimum kesme parametreleri olan 7.5 ve 120 m/dak kesme hızları ile 6 ve -6° talaş açısı değerlerinde geleneksel ve SLE 316L malzemelerin talaş kaldırma deneylerinde ölçülen kesme kuvvetleri ile simülasyonla tahmin edilen kesme kuvvetlerinin kıyaslaması yapılmıştır. Malzeme farklılığının simülasyon çalışmalarına başarılı şekilde uyarlandığı, malzeme farklılığından kaynaklı deneysel olarak ölçülen kesme kuvvetlerindeki farklılıkların simülasyon ile tahmin edilen kesme kuvvetlerinde de geçerli olduğu görülmektedir. Yapılan simülasyon tahminlerinin deneysel verilerden yüzdesel sapma

miktarları Tablo 5.3' te gösterilmiştir. Negatif talaş açısındaki bazı istisnalar dışında yapılan tahminlerdeki sapmaların genelde %15 altında seyrettiği ve bununda kabul edilebilir seviyede olduğu değerlendirilmiştir. Özellikle negatif talaş açısı değerlerinde ki bazı yüksek sapmalar kesici takımlardaki aşırı aşınma, plastik deformasyon ve hatta kırılmalar nedeniyle yüksek kesme kuvvetlerinin meydana gelmesinden kaynaklanmıştır.

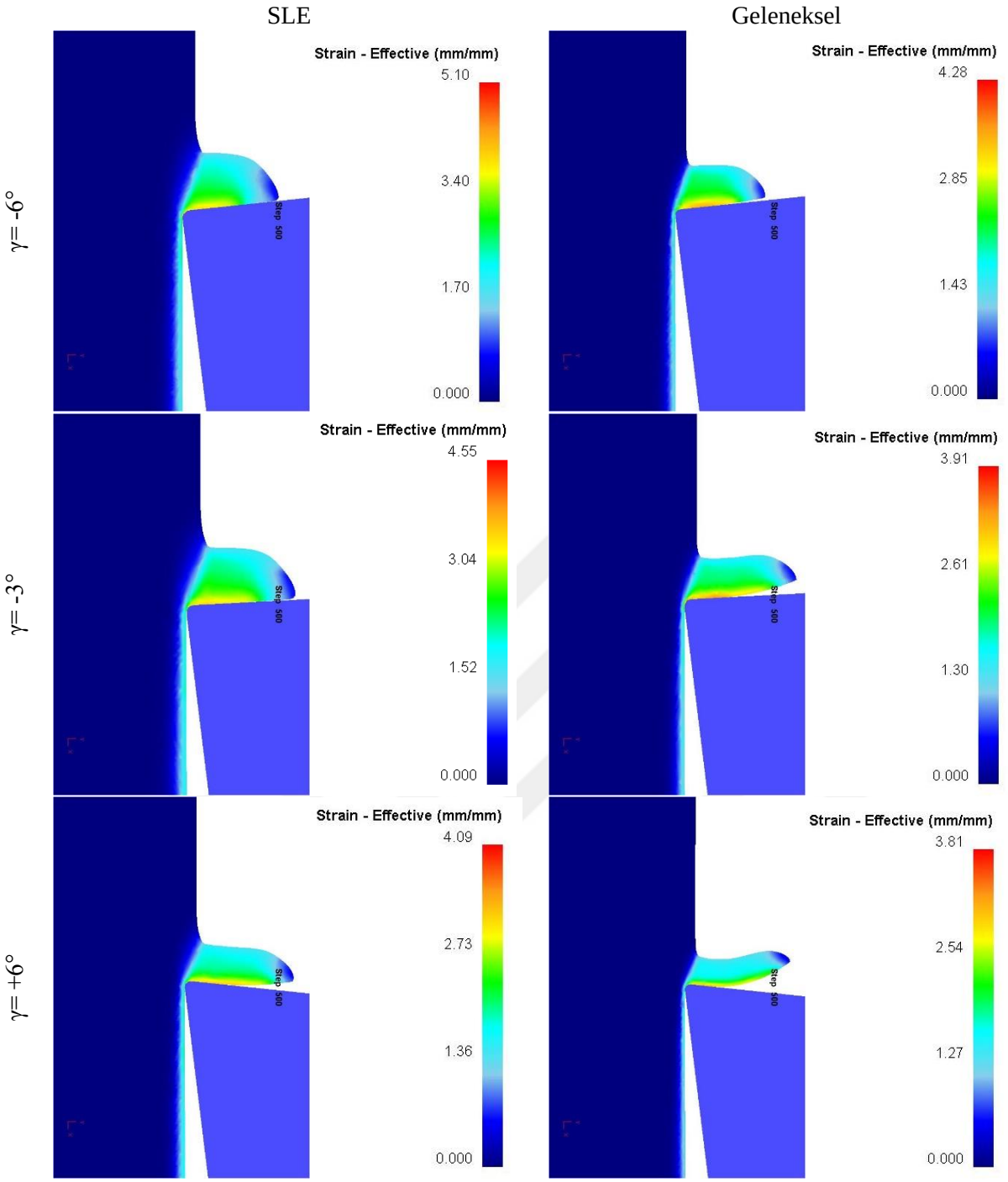


Şekil 5.8. SLE ve geleneksel malzemelerin dik kesme deneylerinde ölçülen ve simülasyonla tahmin edilen kesme kuvvetlerinin farklı talaş açısı değerlerinde kıyaslaması a) Vc=7.5 m/dak, b)Vc=120 m/dak

Tablo 5.3. Geleneksel ve SLE 316L paslanmaz çelik malzemesinin deneylerde ölçülen ve simülasyonla tahmin edilen kesme kuvvetlerinin sayısal değerleri, F_C, (N)

Talaş açısı	Vc (m/dak)	Geleneksel Deney	Geleneksel Simülasyon	Yüzde sapma (%)	SLE Deney	SLE Simülasyon	Yüzde sapma (%)
γ= 6°	7.5	436.8	435	0.4	728	736	-1.09
	30	416.5	395	5.1	526	575	-9.3
	120	406.7	365	10.2	485	550	-13.4
γ= -6°	7.5	617.4	555	10.1	1230	950	22.7
	30	553	468	15.3	1095	741	32.3
	120	523.6	437	16.5	756	630	16.6
γ= -3°	7.5	665	530	20.3	959	875	8.7
	30	479.5	445	7.1	722	673	6.7
	120	490.7	418	14.8	560	587	-4.8

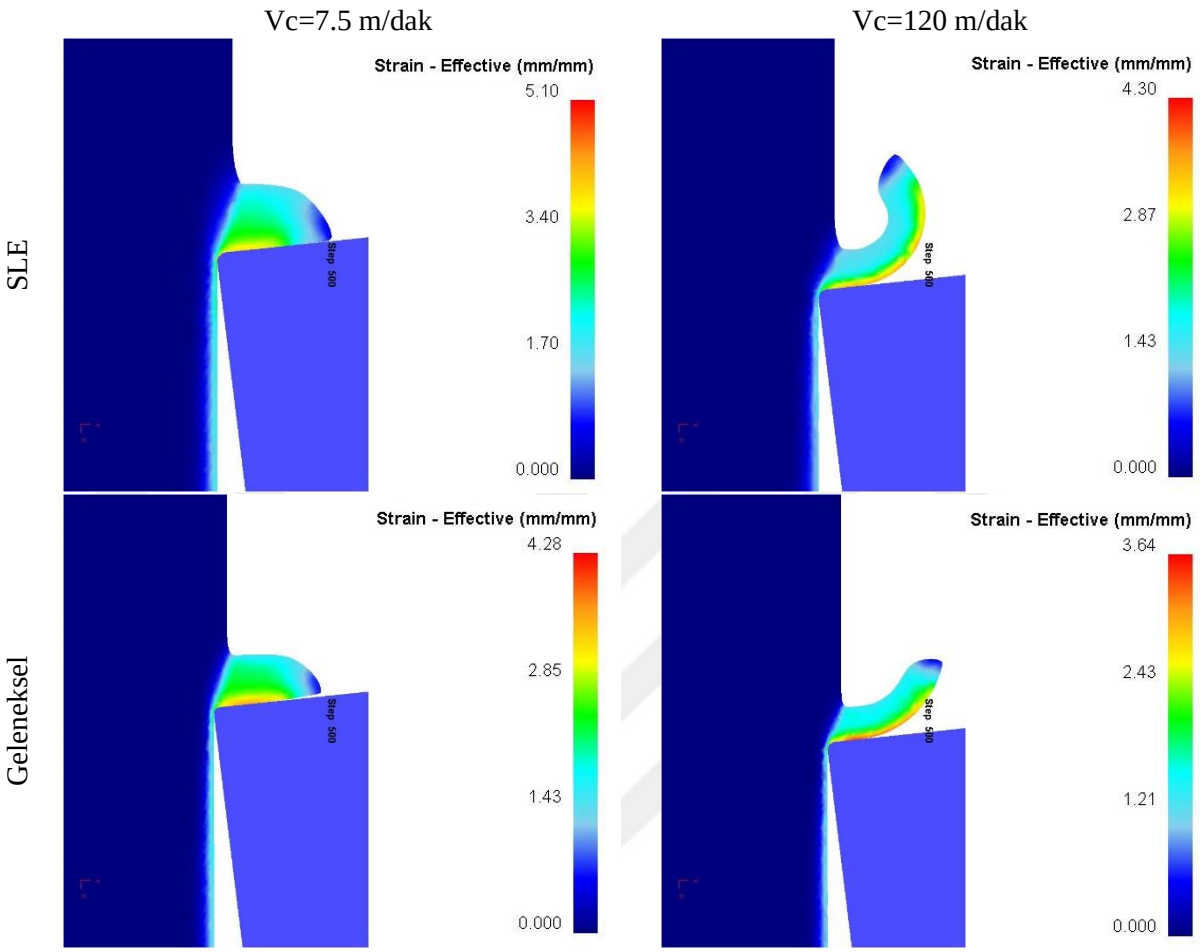
İşlenmiş malzemelerin birim şekil değiştirme(Gerinim) simülasyonu sonuçlarının deneysel elde edilen mikroyapı ve sertlik sonuçlarıyla tutarlı olup olmadığının kontrolü yapılmıştır. Bu hususta SLE ve geleneksel malzemelere ait farklı talaş açısı değerlerinde dik kesme simülasyonlarından elde edilen efektif gerinim sonuçları Şekil 5.9' da gösterilmiştir. Görüleceği üzere hem SLE hem de geleneksel maksimum gerinim değerleri negatif talaş açısı değerinden pozitif talaş açısı değerine doğru azalma eğilimi göstermektedir. Bu durum birim şekil değiştirmenin Bölüm 3.5.2(Şekil 3.32a)' de sunulan sertlik değerleriyle benzer eğilimde olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 5.9. Farklı talaş açısı değerlerinde SLE ve geleneksel simülasyon gerinim analizi (Vc=7.5m/dak)

Birim şekil değiştirme(Gerinim) simülasyon sonuçlarının kesme hızına bağlı olarak incelenmesi Şekil 5.10' da gösterilmiştir. Görüleceği üzere kesme hızının artmasıyla her iki malzemenin simülasyonunda maksimum birim şekil değiştirme değerleri azalmıştır. Bu durumu Bölüm 3.6.2.3(Şekil 3.45)' de sunulan mikroyapı görüntüleri ile ilişkilendirmek kolaydır. Çünkü aynı eğilimler mikroyapıda işlenmiş yüzeyden itibaren gerçekleşen etkilenmiş katman kalınlığı için de geçerlidir. Dolayısıyla bu bölümde yapılan simülasyon çalışmalarının

tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen deneysel verileri doğruladığı açıkça ortaya konmuştur.



Şekil 5.10. Kesme hızına bağlı olarak SLE ve geleneksel simülasyon gerinim analizi (γ= -6°)

6. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında eklemeli imalat yöntemi kategorilerinden toz yatağında ergitme prensibiyle çalışan seçici lazerle ergitme (SLE) yöntemi kullanılarak imal edilen 316L paslanmaz çeliğin dik kesilmesinde talaşlı imalat performansı ve yüzey bütünlüğü karakteristiklerinin yanı sıra plastik deformasyon davranışı incelenmiştir.

Deneyler değişken kesme hızları, kesici takım talaş açıları ve kesme koşullarında gerçekleştirilmiştir. Kuru kesme koşulunun yanı sıra sıvı azot ile kriyojenik soğutma koşulu tercih edilmiştir. Deneysel sonuçlar, dik kesme performansı kriteri olarak kesme kuvveti, kesme sıcaklığı, takım-talaş temas analizi, talaş kırılabilirlik açısından değerlendirilmiştir. Yüzey bütünlüğü karakteristikleri ise malzeme ve talaş mikroyapısı, malzeme ve talaş mikrosertliği, XRD analizi ve kalıntı gerilme analizi açısından değerlendirilmiş olup ayrıca malzemenin plastik deformasyon davranışının iyi anlaşılması hususunda analitik hesaplamalar da yapılmıştır. Tez kapsamında SLE 316L malzemeye uygulanan deneyler geleneksel 316L malzeme kullanılarak tekrar edilmiş olup, elde edilen bulgular SLE ve geleneksel 316L kıyaslaması olarak değerlendirilmiştir. Böylece SLE 316L malzemesinin dik kesilmesinde plastik deformasyon davranışının geleneksel malzemeden farklılığı geniş bir perspektiften değerlendirilmiştir. Yapılan çalışmalardan elde edilen önemli sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur:

- ✓ Kesici takım talaş açısının ölçülen kesme kuvvetlerine etkisi hem SLE hem de geleneksel malzemenin işlenmesinde benzer etki ve eğilim göstermiştir. Her iki malzemenin dik kesilmesinde kesme kuvvetleri kriyojenik soğutucunun uygulandığı koşulda kuru kesmeye kıyasla daha azdır. Ayrıca aynı kesme parametreleri ve koşullarında yapılan deneylerde her zaman SLE malzemenin dik kesilmesinde ölçülen kuvvetler geleneksel malzemeden daha fazladır.
- ✓ Kesme kuvvetlerine paralel olarak SLE malzemelerin dik kesilmesinde kesici takım talaş yüzeyinde meydana gelen aşınma, kırılma ve takım-talaş temas bölge büyüklükleri geleneksel malzemenin dik kesilmesinde kullanılan kesici takımlardan daha fazla gerçekleşmiştir. Bu durumun başlıca sebebi SLE malzemenin anizotropik mikroyapı ve mekanik özellik karakteristiğidir.
- ✓ Testere dişli talaş yapısı geleneksel malzemede en yüksek kesme hızı olan 120 m/dak' da meydana gelirken SLE malzemenin işlenmesinde bu talaş yapısı tüm kesme hızlarında oluşmuştur.

- ✓ İşlenmiş malzemelerin mikroyapılarındaki etkilenmiş katman kalınlıkları aynı parametrelerde SLE malzemelerde geleneksel malzemelere kıyasla daha fazladır. Ayrıca SLE malzemenin anizotropik mikroyapı karakteristiği nedeniyle inşa düzleminden bakılan mikroyapısındaki etkilenmiş katman kalınlığı tarama düzleminden genellikle daha fazladır.
- ✓ SLE numunesi düşük kesme hızlarında geleneksel numunelere göre daha fazla sertleşmeye maruz kalırken, geleneksel numunelerin sertleşme kabiliyeti yüksek kesme hızlarında daha fazladır.
- ✓ İşlenmiş SLE malzemesinin inşa ve tarama düzlemlerindeki sertlik değerleri arasındaki fark ihmal edilebilir düzeydedir. Ancak sertlik artışına sebep olan mekanizmalar farklı olabilir. 7.5 m/dak kesme hızında SLE malzeme için kriyojenik olarak işlenmiş numunenin sertliğini artmasında dislokasyon kaynaklı gerinim sertleşmesi ve çekme kalıntı gerilmeler daha etkiliyken, aşırı plastik deformasyon mekanizması kuru işlenmiş numunenin sertliğini artırmada daha etkilidir.
- ✓ Mikroyapı görüntülerinin de desteklediği gibi XRD sonuçları, anizotropik mikroyapıya sahip SLE numunelerinde, eş eksenli tane mikroyapısına sahip geleneksel numunelere göre tane küçülmesi oluşumunun daha fazla olduğunu göstermektedir.
- ✓ Geleneksel malzeme talaşlarında ölçülen kayma açısı değerleri, SLE talaşlarından ölçülenlerden daha yüksektir. Hesaplanan deformasyon hızının 10^5 s^{-1} olduğu bulunmuştur. Malzeme türündeki fark deformasyon hızını etkilemiştir. Geleneksel malzeme daha yüksek bir deformasyon hızına sahipken, kriyojenik soğutmanın etkisi sınırlı kalmıştır.
- ✓ Endüstriyel uygulamalarda geleneksel 316L malzemesinin işlenmesinde 100 m/dak ile 200 m/dak kesme hızı aralığı ve pozitif talaş açısı değerleri işlenebilirlik açısından ideal parametreler olarak ön plana çıkmaktadır. Ancak bu tez çalışmasında elde edilen bulgularda gösterildiği şekilde 7.5 m/dak ve negatif talaş açısı gibi parametrelerde SLE 316L malzemesinin işlenmesi, malzemenin yüzeyinde derin etkilenmiş katmanlar oluşmasına yol açarak homojen mikroyapı ve daha iyi mekanik özelliklerin oluşmasını sağlamıştır.

Bu tez çalışmasından elde edilen bulgular, SLE yöntemi ile imal edilen 316L paslanmaz çelik malzemelerin geleneksel malzemelere göre dik kesme tepkisi, yüzey bütünlüğü özellikleri ve plastik deformasyon davranışındaki farklılığı göstermesi bakımından önemlidir. Bu çalışma, aynı parametrelerde işlenen SLE ve dövme malzemelerin farklı mikroyapısal özellikleri

nedeniyle aynı sonuçların elde edilemeyeceğini vurgulamaktadır. SLE yöntemi ile oluşturulan anizotropik mikroyapı özelliği nedeniyle malzemenin inşa ve tarama düzlemleri buna izin vermemektedir. Dolayısıyla her malzeme için optimum işleme parametrelerinin belirlenmesinin önemini vurgulamaktadır. Ayrıca talaşlı imalat sürecinin dinamik yapısı nedeniyle SLE malzemesinin dik kesilme kaynaklı etkilenmiş katman kalınlığı, inşa ve tarama düzlemlerinde aynı ölçüde etkilenmemekte ve anizotropiyi daha belirgin hale getirmektedir. Tez çalışmasının sonuçları, eklemeli imalatla üretilen metal parçaların fonksiyonel yüzeylerinde ikincil işlemle aşırı plastik deformasyonlu katmanlar oluşturmada önemli olacaktır. Çünkü Eİ parçalarında ultra ince taneli mikroyapılar oluşturmak için talaşlı imalat yoluyla kontrollü bir APD oluşumunun elde edilebileceği gösterilmiştir. Böylece Eİ yöntemleriyle üretilen metalik parçalar, işlenmiş yüzeyde anizotropik bir yapı yerine homojen bir yapı oluşturarak daha iyi mikroyapısal, mekanik ve yorulma özelliklerine sahip olabilir. Ayrıca, sıcaklık, gerinim ve deformasyon hızı kontrolünün mümkün olduğu talaşlı imalat son işleminin, Eİ yöntemleriyle üretilen farklı mühendislik malzemeleri için yeni bir çalışma konusu olabileceğinin altı çizilmektedir.

REFERANSLAR

1. Kranz J, Herzog D, Emmelmann C (2015) Design guidelines for laser additive manufacturing of lightweight structures in TiAl6V4. Journal of Laser Applications 27 (S1).
2. Kruth J-P, Leu M-C, Nakagawa T (1998) Progress in additive manufacturing and rapid prototyping. Cirp Annals 47 (2):525-540.
3. Gibson I, Rosen DW, Stucker B, Khorasani M, Rosen D, Stucker B, Khorasani M (2021) Additive manufacturing technologies, vol 17. Springer.
4. Kumbhar N, Mulay A (2018) Post processing methods used to improve surface finish of products which are manufactured by additive manufacturing technologies: a review. Journal of The Institution of Engineers (India): Series C 99 (4):481-487.
5. ISO/ASTM52900-15 (2015) Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology. ASTM International. West Conshohocken.
6. Jandaghi MR, Pouraliakbar H, Shim SH, Fallah V, Hong SI, Pavese M (2022) In-situ alloying of stainless steel 316L by co-inoculation of Ti and Mn using LPBF additive manufacturing: Microstructural evolution and mechanical properties. Materials Science and Engineering: A 857:144114.
7. Kaynak Y, Tascioglu E (2019) Post-processing effects on the surface characteristics of Inconel 718 alloy fabricated by selective laser melting additive manufacturing. Progress in Additive Manufacturing:1-14.
8. Sartori S, Bordin A, Ghiotti A, Bruschi S (2016) Analysis of the surface integrity in cryogenic turning of Ti6Al4 v produced by direct melting laser sintering. Procedia Cirp 45:123-126.

9. Karabulut Y, Tascioglu E, Kaynak Y (2019) Heat treatment temperature-induced microstructure, microhardness and wear resistance of Inconel 718 produced by selective laser melting additive manufacturing. Optik:163907.
10. Karabulut Y, Ünal R (2022) Additive manufacturing of ceramic particle-reinforced aluminum-based metal matrix composites: a review. Journal of Materials Science 57 (41):19212-19242.
11. Matos MA, Rocha AMA, Pereira AI (2020) Improving additive manufacturing performance by build orientation optimization. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 107:1993-2005.
12. Ding D, Pan Z, Cuiuri D, Li H (2015) Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 81:465-481.
13. Jiménez A, Bidare P, Hassanin H, Tarlochan F, Dimov S, Essa K (2021) Powder-based laser hybrid additive manufacturing of metals: a review. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 114:63-96.
14. Taşcıoğlu E, Kaynak Y, Safian S, Pıtır F, Mohd S (2021) Machining-induced surface integrity of Inconel 718 alloy fabricated by powder bed fusion additive manufacturing under various laser processing parameters. Machining Science and Technology In Press.
15. Pettersson C-O, Fager S-Å, Steel AS (1994) Welding practice for the Sandvik duplex stainless steels SAF 2304, SAF 2205 and SAF 2507. Sandvik Steel, S-811 81:1-14.
16. McGuire MF (2008) Stainless steels for design engineers. Asm International.
17. Nasr MN, Ng E-G, Elbestawi M (2007) Modelling the effects of tool-edge radius on residual stresses when orthogonal cutting AISI 316L. International Journal of Machine Tools and Manufacture 47 (2):401-411.
18. Franco-Correa J, Martínez-Franco E, Alvarado-Orozco J, Cáceres-Díaz L, Espinosa-Arbelaez D, Villada J (2021) Effect of Conventional Heat Treatments on the Microstructure and Microhardness of IN718 Obtained by Wrought and Additive Manufacturing. Journal of Materials Engineering and Performance 30 (9):7035-7045.
19. Fayazfar H, Salarian M, Rogalsky A, Sarker D, Russo P, Paserin V, Toyserkani E (2018) A critical review of powder-based additive manufacturing of ferrous alloys: Process parameters, microstructure and mechanical properties. Materials & Design 144:98-128.
20. Li Z, Liu X, Wen S, He P, Zhong K, Wei Q, Shi Y, Liu S (2018) In situ 3D monitoring of geometric signatures in the powder-bed-fusion additive manufacturing process via vision sensing methods. Sensors 18 (4):1180.
21. Kleszczynski S, Zur Jacobsmühlen J, Sehrt J, Witt G Error detection in laser beam melting systems by high resolution imaging. In: Proceedings of the twenty third annual international solid freeform fabrication symposium, 2012.
22. 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.
23. Kong D, Dong C, Ni X, Zhang L, Yao J, Man C, Cheng X, Xiao K, Li X (2019) Mechanical properties and corrosion behavior of selective laser melted 316L stainless steel after different heat treatment processes. Journal of Materials Science & Technology 35 (7):1499-1507.
24. Kaynak Y, Kitay O (2019) The effect of post-processing operations on surface characteristics of 316L stainless steel produced by selective laser melting. Additive Manufacturing 26:84-93.
25. Kaynak Y, Kitay O (2018) Porosity, surface quality, microhardness and microstructure of selective laser melted 316L stainless steel resulting from finish machining. Journal of Manufacturing and Materials Processing 2 (2):36.

26. Bertolini R, Lizzul L, Bruschi S, Ghiotti A (2019) On the surface integrity of Electron Beam Melted Ti6Al4V after machining. Procedia CIRP 82:326-331.
27. Khaliq W, Zhang C, Jamil M, Khan AM (2020) Tool wear, surface quality, and residual stresses analysis of micro-machined additive manufactured Ti–6Al–4V under dry and MQL conditions. Tribology International 151:106408.
28. Silva TE, Amaral A, Couto A, Coelho J, Reis A, Rosa PA, Jesus AMd (2021) Comparison of the machinability of the 316L and 18Ni300 additively manufactured steels based on turning tests. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications 235 (10):2207-2226.
29. Lee YJ, Wang H (2020) Current understanding of surface effects in microcutting. Materials & Design 192:108688.
30. Guo P, Zou B, Huang C, Gao H (2017) Study on microstructure, mechanical properties and machinability of efficiently additive manufactured AISI 316L stainless steel by high-power direct laser deposition. Journal of Materials Processing Technology 240:12-22.
31. Bruschi S, Bertolini R, Bordin A, Medea F, Ghiotti A (2016) Influence of the machining parameters and cooling strategies on the wear behavior of wrought and additive manufactured Ti6Al4V for biomedical applications. Tribology International 102:133-142.
32. Umbrello D, Bordin A, Imbrogno S, Bruschi S (2017) 3D finite element modelling of surface modification in dry and cryogenic machining of EBM Ti6Al4V alloy. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 18:92-100.
33. Souflas T, Bikas H, Ghassempouri M, Salmi A, Atzeni E, Saboori A, Brugnetti I, Valente A, Mazzucato F, Stavropoulos P (2022) A comparative study of dry and cryogenic milling for Directed Energy Deposited IN718 components: effect on process and part quality. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 119 (1):745-758.
34. Li G, Xu W, Jin X, Liu L, Ding S, Li C (2023) The machinability of stainless steel 316L fabricated by selective laser melting: typical cutting responses, white layer and evolution of chip morphology. Journal of Materials Processing Technology:117926.
35. Abukhshim N, Mativenga P, Sheikh MA (2006) Heat generation and temperature prediction in metal cutting: A review and implications for high speed machining. International Journal of Machine Tools and Manufacture 46 (7-8):782-800.
36. Gilat A, Wu X (1997) Plastic deformation of 1020 steel over a wide range of strain rates and temperatures. International journal of plasticity 13 (6-7):611-632.
37. Bordin A, Sartori S, Bruschi S, Ghiotti A (2017) Experimental investigation on the feasibility of dry and cryogenic machining as sustainable strategies when turning Ti6Al4V produced by Additive Manufacturing. Journal of cleaner production 142:4142-4151.
38. Bednarczyk W, Kawałko J, Rutkowski B, Wątroba M, Gao N, Starink MJ, Bała P, Langdon TG (2021) Abnormal grain growth in a Zn-0.8 Ag alloy after processing by high-pressure torsion. Acta Materialia 207:116667.
39. Frint P, Wagner MF-X (2019) Strain partitioning by recurrent shear localization during equal-channel angular pressing of an AA6060 aluminum alloy. Acta Materialia 176:306-317.
40. Brown TL, Saldana C, Murthy TG, Mann JB, Guo Y, Allard LF, King AH, Compton WD, Trumble KP, Chandrasekar S (2009) A study of the interactive effects of strain, strain rate and temperature in severe plastic deformation of copper. Acta Materialia 57 (18):5491-5500.
41. Sunny S, Mathews R, Gleason G, Malik A, Halley J (2021) Effect of metal additive manufacturing residual stress on post-process machining-induced stress and distortion. International Journal of Mechanical Sciences 202:106534.
42. Lopes J, Machado CM, Duarte VR, Rodrigues TA, Santos TG, Oliveira J (2020) Effect of milling parameters on HSLA steel parts produced by Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM). Journal of Manufacturing Processes 59:739-749.

43. Nagamatsu H, Sasahara H, Mitsutake Y, Hamamoto T (2020) Development of a cooperative system for wire and arc additive manufacturing and machining. Additive Manufacturing 31:100896.
44. Sartori S, Moro L, Ghiotti A, Bruschi S (2017) On the tool wear mechanisms in dry and cryogenic turning additive manufactured titanium alloys. Tribology International 105:264-273.
45. Dang J, Cai X, Yu D, An Q, Ming W, Chen M (2020) Effect of material microstructure on tool wear behavior during machining additively manufactured Ti6Al4V. Archives of Civil and Mechanical Engineering 20 (1):1-15.
46. Careri F, Umbrello D, Essa K, Attallah MM, Imbrogno S (2021) The effect of the heat treatments on the tool wear of hybrid Additive Manufacturing of IN718. Wear 470:203617.
47. Rotella G, Imbrogno S, Candamano S, Umbrello D (2018) Surface integrity of machined additively manufactured Ti alloys. Journal of Materials Processing Technology 259:180-185.
48. Cococcetta N, Jahan MP, Schoop J, Ma J, Pearl D, Hassan M (2021) Post-processing of 3D printed thermoplastic CFRP composites using cryogenic machining. Journal of Manufacturing Processes 68:332-346.
49. Sun S, Brandt M, Dargusch MS (2009) Characteristics of cutting forces and chip formation in machining of titanium alloys. International Journal of Machine Tools and Manufacture 49 (7-8):561-568.
50. Malakizadi A, Mallipeddi D, Dadbakhsh S, M'Saoubi R, Krajnik P (2022) Post-processing of additively manufactured metallic alloys–A review. International Journal of Machine Tools and Manufacture 179:103908.
51. Ezugwu E (2005) Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys. International Journal of Machine Tools and Manufacture 45 (12-13):1353-1367.
52. Manivannan R, Pradeep Kumar M (2018) Improving the machining performance characteristics of the μEDM drilling process by the online cryogenic cooling approach. Materials and Manufacturing Processes 33 (4):390-396.
53. Srinivasan V, Palani P (2020) Surface integrity, fatigue performance and dry sliding wear behaviour of Si3N4–TiN after wire-electro discharge machining. Ceramics International 46 (8):10734-10739.
54. Mohd Yusuf S, Chen Y, Boardman R, Yang S, Gao N (2017) Investigation on porosity and microhardness of 316L stainless steel fabricated by selective laser melting. Metals 7 (2):64.
55. Li S, Wei Q, Shi Y, Zhu Z, Zhang D (2015) Microstructure characteristics of Inconel 625 superalloy manufactured by selective laser melting. Journal of Materials Science & Technology 31 (9):946-952.
56. Meyers MA, Chawla KK (2008) Mechanical behavior of materials. Cambridge university press.
57. Xia D, Chen X, Huang G, Jiang B, Tang A, Yang H, Gavras S, Huang Y, Hort N, Pan F (2019) Calculation of Schmid factor in Mg alloys: Influence of stress state. Scripta Materialia 171:31-35.
58. Tascioglu E, Karabulut Y, Kaynak Y (2020) Influence of heat treatment temperature on the microstructural, mechanical, and wear behavior of 316L stainless steel fabricated by laser powder bed additive manufacturing. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology:1-10.
59. Lee W-S, Yeh G-W (1997) The plastic deformation behaviour of AISI 4340 alloy steel subjected to high temperature and high strain rate loading conditions. Journal of materials processing technology 71 (2):224-234.
60. Davim J, Maranhão C (2009) A study of plastic strain and plastic strain rate in machining of steel AISI 1045 using FEM analysis. Materials & Design 30 (1):160-165.
61. Zhang X, Chen L, Zhou J, Ren N (2020) Simulation and experimental studies on process parameters, microstructure and mechanical properties of selective laser melting of stainless

steel 316L. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering 42 (8):1-14.
62. Simmons JC, Chen X, Azizi A, Daeumer MA, Zavalij PY, Zhou G, Schiffres SN (2020) Influence of processing and microstructure on the local and bulk thermal conductivity of selective laser melted 316L stainless steel. Additive Manufacturing 32:100996.
63. Liu J, Dong L, Li C, Fang J, Chen Y, Cui J (2024) Quasi-static and dynamic tensile behaviour of 316L stainless steels: Rolled versus laser-powder bed fusion (LPBF) fabricated samples. International Journal of Impact Engineering 190:104972.

AKADEMİK ÖZGEÇMİŞ

PROJELER

"Eklemeli İmalat Yöntemiyle İmal Edilen Ürünler İçin İkincil İşlem Süreçleri Geliştirme", Destekleyen Kuruluş: TÜBİTAK (TÜBİTAK-SAYEM Projesi), Görev: Proje Bursiyeri, Proje NO: 3219504

"Eklemeli İmalat İle Üretilen Paslanmaz Çelik Malzemelerin Dik Kesilmesinde Plastik Deformasyon Davranışının İncelenmesi", Destekleyen Kuruluş: Marmara Üniversitesi BAP Projesi, Görev: Proje Araştırmacısı, Proje NO: FDK-2022-10588

"Şekil Hafızalı NitiHf Malzemelerin Talaşlı İmalatı-Yüzey Bütünlüğü-Ürün Performansı Arasındaki İlişkisinin Araştırılması", Destekleyen Kuruluş: TÜBİTAK ARDEB (TÜBİTAK-1001 Projesi), NASA Glenn Research Center, ABD, Görev: Proje Bursiyeri, Proje NO: 116M346

"Şekil Hafızalı Alaşımların Talaşlı İmalatı Sonrası Yüzey Bütünlüğü Karakteristiklerinin İncelenmesi", Destekleyen Kuruluş: Marmara Üniversitesi BAP Projesi, Görev: Proje Araştırmacısı, Proje NO: FEN-C-YLYP 150218-0061

"Broşlama Yöntemiyle Çentik Açma Makinası Tasarımı Ve İmalatı" Destekleyen Kuruluş: TÜBİTAK 2209/A (2015), Görev: Proje Yürütücüsü, Proje NO: 1919B011403139

SCI YAYINLAR

Analysis of cutting tool geometry induced machining response, surface integrity and anisotropy relation of additively manufactured 316L stainless steel, KITAY Ö., KAYNAK Y., Journal of Manufacturing Processes, cilt.120, ss.719-732, 2024 (SCI-Expanded)

Effect of printing parameters and post-process on surface roughness and dimensional deviation of PLA parts fabricated by extrusion-based 3D printing, Taşcıoğlu E., KITAY Ö., Keskin A. Ö., KAYNAK Y., Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, cilt.44, sa.4, 2022 (SCI-Expanded)

The Effect of Flood, High-Pressure Cooling, and CO2-Assisted Cryogenic Machining on Microhardness, Microstructure, and X-ray Diffraction Patterns of NiTi Shape Memory Alloy, KITAY Ö., KAYNAK Y., Journal of Materials Engineering and Performance, cilt.30, sa.8, ss.5799-5810, 2021 (SCI-Expanded)

Influence of the post-processing operations on surface integrity of metal components produced by laser powder bed fusion additive manufacturing: a review, Khan H. M., KARABULUT Y., KITAY Ö., KAYNAK Y., Jawahir I., Machining Science and Technology, cilt.25, sa.1, ss.118-176, 2020 (SCI-Expanded)

The effect of post-processing operations on surface characteristics of 316L stainless steel produced by selective laser melting, KAYNAK Y., Kitay Ö., Additive Manufacturing, cilt.26, ss.84-93, 2019 (SCI-Expanded)

DİĞER DERGİLERDE YAYINLAR

A Review of Mechanical Mass Finishing Methods in Post-processing Applications of Additively Manufactured Parts, KITAY Ö., KAYNAK Y., Inderscience Publishers, cilt.1, 2022 (Hakemli Dergi)

Porosity, Surface Quality, Microhardness and Microstructure of Selective Laser Melted 316L Stainless Steel Resulting from Finish Machining, KAYNAK Y., KITAY Ö., Journal of Manufacturing and Materials Processing, cilt.2, sa.2, ss.36, 2018 (Scopus)

KİTAP BÖLÜMÜ

İkincil İşlemler ve Kalite Kontrol, KAYNAK Y., KITAY Ö., ERTUĞRUL O., Tasarım Felsefesini Değiştiren Yeni Bir İmalat Anlayışı - EKLEMELİ İMALAT, , Editör, Nobel Akademik Yayıncılık, ss.381-439, 2024

HAKEMLİ KONGRE/SEMPOZYUM BİLDİRİLERİ

Kesici Takım Geometrisinin CW511L Kurşunsuz Pirinç Malzemenin İşlenebilirliğine Etkisinin İncelenmesi, Tascioglu E, Kaynak Y., KITAY, Ö., 12th International Congress on Machining, UTIS 2024, Antalya, TÜRKİYE

Experimental and Finite Element Simulation Studies of Chip Formation in Orthogonal Cutting Lead-Free Brass, Tascioglu E, Kaynak Y., Karabulut Y., KITAY, Ö., 12th International Congress on Machining, UTIS 2024, Antalya, TÜRKİYE

Effect of Sustainable Hybrid Coolant Strategy on Machinability and Energy Consumption of NiTiHf High Temperature Shape Memory Alloy, KITAY O., TASCIOGLU E., KAYNAK Y., 20th Global Conference on Sustainable Manufacturing, Vietnam, 9-11 Ekim

Innovative cryogenic processing for enhanced surface integrity characteristics of stainless steels, KITAY Ö., KAYNAK Y., Material Forming - ESAFORM 2024, Toulouse, Fransa, 24 - 26 Nisan 2024

Optimization of Process Parameters and Mechanical Property Analysis of PLA Parts Manufactured by FDM Using A Grey Relational Analysis, KITAY Ö., ALACA Ö., 7th International Congress on 3D Printing (Additive Manufacturing) Technologies and Digital Industry 2023, İstanbul, Türkiye, 25 - 27 Ekim 2023

Effect of Heat Treatments on the Microstructure and Mechanical Properties of Inconel 718 Alloy Fabricated by Laser Powder Bed Fusion Method, KITAY Ö., KAYA M., KAYNAK Y., 3rd AMCTURKEY Additive Manufacturing Conference, Aydın, Türkiye, 6 - 08 Ekim 2022, ss.63-64

Konik Kilit Sistemleri Çalışma Mantığı ve Başarım Değerlerine Etki Eden Faktörlerin İncelenmesi, KITAY Ö., YALÇINKAYA S., Gharibi A., 5. Uluslararası Mühendislik Mimarlık Tasarım Kongresi, İstanbul, Türkiye, 21 - 22 Aralık 2019, cilt.5, ss.617-625

Analytical and Experimental Analysis of the Effect of Processing Time on Surface Quality Improvement of Machined Manufacturing Steel Parts in Circular Vibration Machine, Gharibi A., YALÇINKAYA S., KITAY Ö., 5. Uluslararası Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Kongresi, İstanbul, Türkiye, 21 - 22 Aralık 2019, cilt.5, ss.608-616

Farklı Soğutucuların Inconel 718 Alaşımının İşlenebilme Performansına Etkisinin Araştırılması, KITAY Ö., Bozkurt C. A., KAYNAK Y., 9. Uluslararası Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS), Antalya, Türkiye, 8 - 10 Kasım 2018

Şekil Hafızalı NiTi Alaşımın Kuru, MQL ve Kriyojenik Koşullarda İşlenmesinde Kesici Takım Aşınmasıyla İş Parçası Yüzey Kalitesi Arasındaki İlişkinin Araştırılması, KITAY Ö., KAYNAK Y., 18. Uluslararası Makina Tasarım ve İmalat Kongresi, Eskişehir, Türkiye, 3 - 06 Temmuz 2018

Seçici Lazerle Ergitme Yöntemi İle Üretilen Inconel 625 Alaşımlı Parçada Yüzey Bütünlüğünün İncelenmesi, KITAY Ö., Taççıoğlu E., KAŞ M., Nesli Ş., KAYNAK Y.,

YILMAZ O., 18. Uluslararası Makina Tasarım ve İmalat Kongresi, Eskişehir, Türkiye, 3 - 06 Temmuz 2018

316LVM Paslanmaz Çelik Malzemesinin Talaşlı İmalat Ve Yüzey Bütünlüğü Analizi, Dengiz M., Sarıçan Ö., KITAY Ö., Taşcıoğlu E., KAYNAK Y., 8th International Advanced Technologies Symposium, Elazığ, Türkiye, 19 - 22 Ekim 2017

P20 Takım Çeliğinin Karbondioksit Yardımlı Talaşlı İmalat Performansının Değerlendirilmesi, KITAY Ö., Kırmacıoğlu K. E., KAYNAK Y., 8. Uluslararası Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS), Antalya, Türkiye, 2 - 04 Kasım 2017