



The influence of depth of cut on cryogenic machining performance of hardened steel

Armin Gharibi¹, Yusuf Kaynak*²

Marmara University, Faculty of Technology, Department of Mechanical Engineering, 34722, Istanbul, Turkey

Highlights:

- The effects of cryogenic coolants on machining performance is investigated
- Depth of cut plays critical role to determine the effectiveness of cryogenic coolants
- Utilizing carbon dioxide significantly helps to improve chip breakability

Keywords:

- Cryogenic machining
- Machining Performance
- Hardened steel
- Depth of cut

Article Info:

Research Article
Received: 24.02.2017
Accepted: 13.06.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416423

Acknowledgement:

Financial support from Marmara University Scientific Research Projects Committee under project number FEN-E-080415-0113 is greatly acknowledged.

Correspondence:

Author: Yusuf Kaynak
e-mail:
yusuf.kaynak@marmara.edu.tr
phone: +90 216 336 5770

Graphical/Tabular Abstract

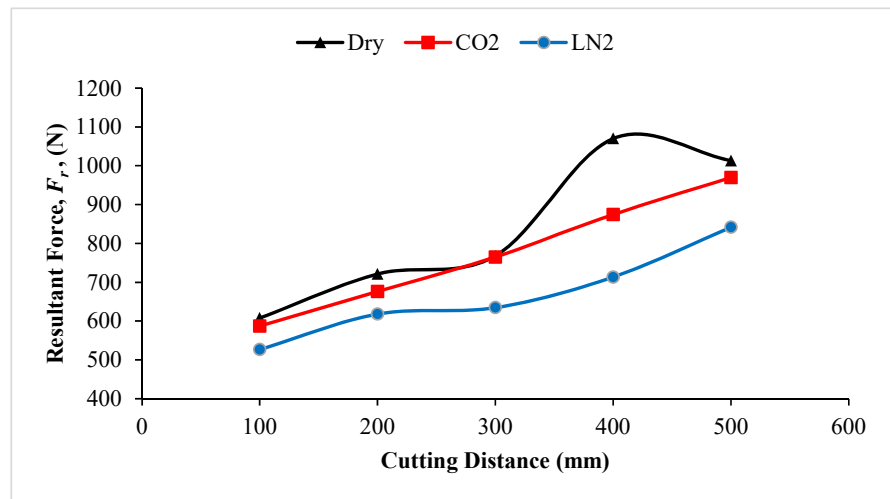


Figure A. Measured resulting forces as a function of cutting length for various machining conditions, $a_p=0,8$ mm

Purpose: The purpose of this study is to investigate the effect of depth of cut on cutting performance including tool wear, cutting forces, frictional conditions, chip morphology and surface topography of the workpiece in cryogenic machining (carbon dioxide and liquid nitrogen-assisted coolant) process of hardened steel.

Theory and Methods:

Liquid nitrogen and carbon dioxide are used in the machining performance experiments of hardened steel as cryogenic coolants. Turning process is carried out to test the role of cryogenic coolants for improving the machining performance of selected work material. During machining tests, the feed rate, f , was kept constant at 0.15 mm/rev. Cutting speed, V , was also kept constant as 90 m/min. Two different depth of cut, a_p , 0.8 and 1.6 mm were used.

Results:

Experimental study shows that depth of cut does not alter the wear mechanism. While cryogenic cooling leads to abrasive wear, adhesion is dominating wear mechanism in dry machining. Surface quality of dry machined samples is negatively induced from the debris stick on the surface of the machined surface. Built-up-edge is only observed in liquid nitrogen-assisted cryogenic machining among all conditions and depth of cut does not play any role in forming built-up-edge phenomena.

Conclusion:

Liquid nitrogen-assisted cryogenic cooling shows much better performance in comparison of carbon dioxide-assisted cryogenic machining considering reduction of progressive tool wear, force components, and friction coefficient. At lower depth of cut, carbon dioxide-assisted machining is much effective to improve machining performance as compared to larger depth of cut. Cryogenic machining processes reduce cutting temperature substantially as compared to dry machining. Besides, cryogenic machining process leads to generating much better surface quality in comparison with dry cutting in machining process of this particular material.



Kesme derinliğinin sertleştirilmiş çelik malzemenin kriyojenik talaşlı imalat performansına etkisi

Armin Gharibi¹, Yusuf Kaynak*²

Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Kriyojenik soğutucuların talaşlı imalat performansına etkisi araştırılmıştır
- Talaş derinliği kriyojenik soğutucuların etkinliğini belirleyici role sahiptir
- Karbondioksit kullanımı talaşın kırılabilirliğini kayda değer şekilde artırmıştır

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 24.02.2017
Kabul: 13.06.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416423

Anahtar Kelimeler:

Kriyojenik talaşlı imalat,
talaşlı imalat performansı,
sertleştirilmiş çelik

ÖZET

Bu çalışmada sertleştirilmiş çelik malzemenin farklı kesme parametreleriyle işlenmesinde kriyojenik soğutucuların etkisi araştırılmıştır. Sertleştirilmiş çelik malzemenin talaşlı imalat performansı testlerinde kriyojenik soğutucu olarak sıvı azot (LN_2) ve karbondioksit (CO_2) kullanılmıştır. Kriyojenik soğutucunun seçilen malzemenin işlenmesinde performansına etkisi tornalama operasyonunda test edilmiştir. Testlerde sabit kesme hızı ve iki farklı talaş derinliği kullanılmıştır. Bileşke kuvvet, sürtünme katsayısı, takım aşınması, kesme sıcaklığı ve talaş kırılabilirliği, işlenmiş parçanın yüzey kalitesi dikkate alınmış ve kriyojenik soğutucular kullanılarak elde edilen bu çıktılar kuru kesmede elde edilenlerle kıyaslanmıştır. Kriyojenik soğutucuların sertleştirilmiş çeliğin talaşlı imalat performansına etkisinde belirleyici unsurun talaş derinliği olduğu görülmektedir. Yüksek talaş derinliklerinde kriyojenik soğutucuların kesici takım ömrünün iyileştirilmesine etkisi sınırlıyken, düşük talaş derinliklerinde çok daha etkili oldukları ve takım ömrünün artışına belirgin katkı sundukları görülmektedir. İlave olarak karbondioksitin talaş kırılabilirliğini önemli ölçüde artırdığı gözlemlenmiştir.

The influence of depth of cut on cryogenic machining performance of hardened steel

H I G H L I G H T S

- The effects of cryogenic coolants on machining performance is investigated
- Depth of cut plays critical role to determine the effectiveness of cryogenic coolants
- Utilizing carbon dioxide significantly helps to improve chip breakability

Article Info

Research Article
Received: 24.02.2017
Accepted: 13.06.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416423

Keywords:

Cryogenic machining,
machining performance,
hardened steels

ABSTRACT

This study provides an experimental study focusing on understanding the effectiveness of cryogenic cooling in cutting process of hardened steel under various cutting parameters. Liquid nitrogen and carbon dioxide are used in the machining performance experiments of hardened steel as cryogenic coolants. Turning process is carried out to test the role of cryogenic coolants for improving the machining performance of selected work material. A constant cutting speed and two different depth of cuts were selected as cutting parameters. To measure machining performance resultant forces and frictional condition, progression of tool wear, cutting temperature, and chip breakability, and surface quality of machined parts were considered and obtained results were also compared with the results obtained from dry machining. This study reveals that the effectiveness of cryogenic coolant to improve machining performance of this material also depends on the cutting parameters, namely depth of cut. While the effect of cryogenic coolants on cutting tool performance is limited at large depth of cut, cryogenic coolants show much better performance by showing obvious contribution for increasing tool life. Besides, it is observed that carbon dioxide substantially increase chip breakability.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: yusuf.kaynak@marmara.edu.tr, armin.gharibi@gmail.com / Tel: +90 216 336 5770

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Mekanik komponentlerin üretim süreçlerinde en yaygın kullanılan yöntemlerden biride talaşlı imalattır [1]. Talaşlı imalat süreci ile şekillendirilen malzemeler genellikle yüksek mukavemet ve deformasyona karşı yüksek direnç gösteren malzemeler oldukları için, bu malzemelerin arzu edilen boyutsal doğrulukta üretilmelerinde bazı güçlüklerle karşılaşmakta olup, talaşlı imalat sürecinin kontrolü için kesme kuvvetleri, takım aşınması, işlenecek parçaların boyutsal doğruluğu ve yüzey kalitesi talaşlı imalat araştırmacılarının odaklandığı parametrelerdendir [2]. Bunları kontrol edebilmek için her ne kadar kesme hızı, ilerleme ve talaş derinliği dikkate alınsa da çoğu zaman arzu edilen sonuçlara ulaşmak işlenecek parçanın özelliklerine bağlıdır. Ancak özellikle işlenmesi zor malzemelerde bu parametrelerde değişikliği kısıtlayan faktörlerde söz konusu olabilmektedir, dolayısıyla bunlar yerine tercih edilebilecek alternatif soğutucu ve yağlayıcılar olabilmektedir [3].

Çelik malzemelerin talaşlı imalatında, su ve yağ esaslı kesme sıvılarının kullanımı 20. Yüzyıl başlarında yaygınlaşmaya başlamıştır [4]. Kesme sıvıları kesme bölgesinde yağlama yaparak abrasiv aşınmayı kontrol altına alabilmekte, böylece kimyasal ve termal aşınmaları azaltıp, iş parçası kalitesinin iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır [4-6]. Diğer taraftan, kesme sıvılarının insan sağlığı açısından zararlı olduğu ve farklı hastalıklara neden olduğu araştırmacılar tarafından ortaya konmuştur [7, 8]. İlaveten yakın zamanda yapılan çalışmalar, kesme sıvılarının imalattaki maliyete etkisinin yaklaşık olarak %7 ile %17 arasında olduğu belirtilmektedir [9]. İmalat maliyetlerini arttırması ve çevresel, insan sağlığı gibi faktörler göz önüne alınarak, geleneksel kesme sıvılarına alternatif yaklaşımlar üzerine çalışmaların yapılması gerekmektedir [10].

Kriyojenik talaşlı imalat ifadesi ilk defa 1968 yılında Uehara ve Kumagai tarafından kullanılmıştır [11]. Talaşlı imalat operasyonlarında, azot, karbondioksit, helyum gibi sıvı gazlar, geleneksel kesme sıvıları yerine kullanılmaktadır [4]. Kriyojenik talaşlı imalat ile kesici takım özelliklerinde farklılıklar oluşturulabildiği gibi aynı zamanda kesme bölgesindeki ısı uzaklaştırılmakta ve sıcaklık düşürülebilmektedir [12, 13]. Literatürdeki birçok çalışmada, kriyojenik soğutmanın kesme sıcaklığını düşürerek, kesici takım performansını iyileştirdiği ifade edilmektedir [14]. Düşük sıcaklıklarda sürtünme şartları da değişim göstermekte ve dolayısı ile kesme kuvvetlerinde de farklılıklar oluşmaktadır [15].

Sıvılaştırılmış azotun sıcaklığı $T = -196$ °C olup, bunlar tanklarda muhafaza edilebilmektedir[16]. Bu sebeple sıvı azot, talaşlı imalatta soğutma için daha uygun olabilmektedir. Ancak bu durum uygulamada da özellikle yalıtım ve sıvı azotun tanktan kesme bölgesine aktarımında uygun boru ve bağlantı seçimi gibi bazı hususları gündeme getirebilmektedir [17]. Karbondioksit ise 57 bar basınca sahip basınçlı tanklarda muhafaza edilebilmektedir [17].

Karbondioksit'in kesme bölgesine ulaşarak kesici takımdan atmosfere çıkması sıcaklık farkından dolayı faz dönüşümüne neden olmakta ve bu durumda hem sıvı hem de gaz fazında kesici takım ile iş parçası temas bölgesine ulaşmakta olduğundan dolayı literatürde bu oluşuma karbondioksit kar ismi de verilmektedir [17]. Karbondioksit ile soğutmada Joule-Thomson etkisi ve faz dönüşümüyle $-78,5^{\circ}\text{C}$ sıcaklığa düşülebilmektedir [16].

Sıvı azot, talaşlı imalat literatüründe farklı malzemelerin işlenmesinde kriyojenik soğutma olarak yaygın olarak kullanılmakla beraber [2, 18], karbondioksit ile ilgili çalışmalar oldukça sınırlıdır [17]. Özellikle sertleştirilmiş çeliklerin işlenmesinde karbondioksit uygulaması konusunda yapılan sistematik çalışma yok denilecek kadar azdır. Gharibi vd. [19] AISI 4140 çelik malzemenin işlenmesinde takım ömrünü araştırmışlardır ve elde ettikleri bulguları ise sıvı azot ile yapılan çalışma ile kıyaslamışlardır. Literatürde ilgili çalışma haricinde bir çalışmaya henüz rastlanmamıştır.

Bu çalışmada ise sertleştirilmiş çeliklerin işlenmesinde karbondioksit ve sıvı azotun bahsi geçen malzemenin işleme performansına etkisini kıyaslamaktadır. Çalışmada sabit kesme hızı ve iki farklı talaş derinliğinde kriyojenik soğutucuların iş parçasının işlenebilir performansına etkisi araştırılmıştır. Ölçülen çıktılar kesme kuvvetleri, takım aşınması ve ömrü, kesme sıcaklığı, sürtünme koşulları ve işlenmiş parçanın yüzey kalitesidir.

2. DENEYSEL METOT (EXPERIMENTAL METHOD)

Deneysel çalışmalar Doosan CNC torna tezgahında gerçekleştirilmiştir. Tüm talaş kaldırma testlerinde CNMG120408 kesici takımlar ve PTJNL2525M16JET takım tutucular kullanılmıştır. Takım tutucuların talaş açısı, α , -6 derecedir. İş parçası olarak AISI 4140 çelik malzeme kullanılmıştır. İş parçaları 50 mm çapında, 80 mm uzunluğunda soğuk haddelenmiş yuvarlak çubuk şeklindedir. Malzemenin ısıl işlem görmemiş sertliği 25 HRC olup, ısıl işlemden sonraki sertliği 42 HRC olarak ölçülmüştür. Çalışmalar sırasında, ilerleme, f , 0,15 mm/dev olarak sabit tutulmuştur. Kesme hızı V_c , 90 m/dak olarak sabit tutulmuştur. İki farklı talaş derinliği, a_p , 0,8 ve 1,6 mm kullanılmıştır. Kesme parametreleri Tablo 1'de sunulmaktadır. Takım aşınması (serbest yüzey aşınması, krater aşınması ve krater alanı) Dino-Lite dijital optik mikroskop ve Dino-Capture yazılımı kullanılarak incelenmiştir. Takım aşınmasındaki artış kesme uzunluğuna bağlı olarak ölçülmüştür. Her 50 mm kesme uzunluğunda, deney durdurularak serbest yüzey aşınması ve burun aşınması ölçülmüştür. Kesme sıcaklığının ölçümleri için Optris PI 400 termal kamera kullanılmış olup, emissivite değeri 0,6 olarak alınmıştır [20]. Kesme sıcaklıklarında kesme bölgesine odaklanılmış olup, kesme esnasında termal kamera yazılımının kaydettiği maksimum sıcaklık dikkate alınmıştır. Şekil 1'de kriyojenik koşullarda sıcaklık ölçümünü gösteren bir örnek paylaşılmıştır. Kesme

kuvvetleri ise KISTLER 2129AA dinamometre ile ölçülmüştür. İşlenen parçaların yüzey topografisi 3 boyutlu temassız profilometre (ZeGage, ZYGO) ile ölçülmüştür.

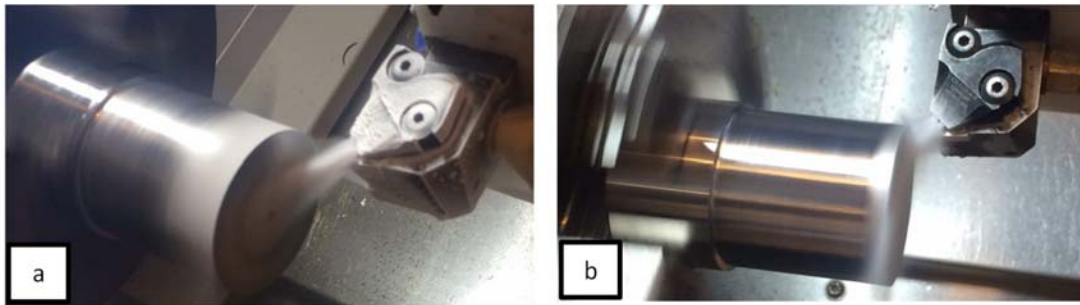
Tablo 1. Kesme parametreleri ve kesme koşulları
(Cutting parameters and cooling conditions)

Kesme koşulu	LN_2 15 Bar CO_2 54 Bar
Kesme hızı, V_c (m/min)	90
Talaş derinliği, a_p (mm)	0,8; 1,6
İlerleme, f (mm/dev)	0,15



Şekil 1. Ölçülmüş maksimum sıcaklık görüntü örneği
(Example of measured maximum temperature image)

CNC torna tezgahına farklı soğutma ve yağlama sistemleri adapte edilmiştir. Deneyler herhangi bir soğutucu ve yağlayıcı olmaksızın kuru kesme koşulu altında ve takım tutucudan sıvı azot ve karbondioksit ileterek kriyojenik kesme koşulları altında gerçekleştirilmiştir. İşleme sırasında sıvı azot ve karbondioksitin uygulanması Şekil 2'de



Şekil 2. Deney düzeneği a) talaş yüzeyi ve serbest yüzeyden sıvı azot uygulaması, b) talaş yüzeyi ve serbest yüzeyden karbon dioksit uygulaması

(Experimental setup a) applying liquid nitrogen from rake and flank face, b) applying carbon dioxide from rake and flank face)

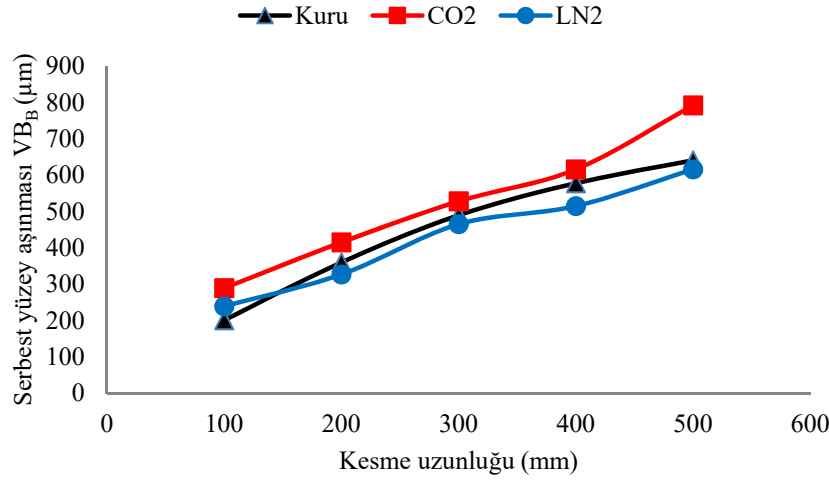
gösterilmektedir. Sıvı azot 15 Bar basınç ile kesme bölgesine gönderilirken, karbon dioksit 54 Bar ile kesme bölgesine gönderilmiştir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

3.1. Takım Aşınması (Tool Wear)

Takım aşınmasının artışı araştırılmak ve soğutmanın kesici takım performansına etkisini anlamak için takım aşınmasındaki ilerleyişin incelenmesi önemlidir. Bu bölümde, iki farklı talaş derinliğinde karbondioksit ve sıvı azot kullanılarak, takım aşınmasının artışının incelenmesi sunulmuş ve elde edilen sonuçlar kuru kesme sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Karbondioksit, sıvı azot ve kuru kesmede yapılan talaş kaldırma testleri ile elde edilen maksimum serbest yüzey aşınması Şekil 3'de sunulmuştur. İlk 100 mm kesme uzunluğunda, kuru işleme için kullanılan kesici takımların serbest yüzünde ölçülen aşınma miktarı yaklaşık 200 μ m ve karbondioksit ile kesme koşulunda serbest yüzey aşınması yaklaşık 290 μ m olarak ölçülmüştür. Sıvı azot kullanılarak yapılan kriyojenik kesmede ölçülen serbest yüzey aşınması ise bunların arasında yer almaktadır. Testlerde (500 mm uzunluğunda kesme) karbondioksit kullanılarak gerçekleştirilen kriyojenik kesmede her üç koşul arasında daima en fazla serbest yüzey aşınması gözlemlenmiştir. 500 mm kesme uzunluğundan sonra, karbondioksit kullanılarak yapılan kesme sırasında kullanılan kesici takımın serbest yüzeyindeki aşınma yaklaşık 790 μ m'ye ulaşmıştır. Şekil 3'de görüldüğü gibi kuru ve sıvı azot kullanılarak yapılan talaş kaldırmada kesici takımlardaki serbest yüzey aşınmaları arasında benzer bir eğilim gözlemlenmektedir.

Şekil 4'de, kesici takımların serbest yüzeyindeki aşınmalarının artışının optik mikroskop görüntüleri sunulmaktadır. Şekilde görüldüğü gibi, sıvı azot yardımıyla kesmede ağız birikintisi oluşmuştur. Ayrıca, 200 mm'lik kesme uzunluğundan sonra kesici takımın ana kesme tarafında talaş vurması ve bunun sonucunda kırılmalar meydana gelmiştir. Bunun nedeni esas olarak, sıvı azot kullanılarak yapılan kriyojenik kesme sırasında üretilen talaşların kırılmamasıdır. Bu talaşlar, kesici takımın ana kesici kenarına çarparak, kesici takımın kenarında



Şekil 3. Kesme uzunluğuna bağlı olarak farklı kesme koşullarında serbest yüzey aşınmasının artışı ($a_p=1,6$ mm)
(Progressive flank wear as a function of cutting length for various machining conditions $a_p=1,6$ mm)

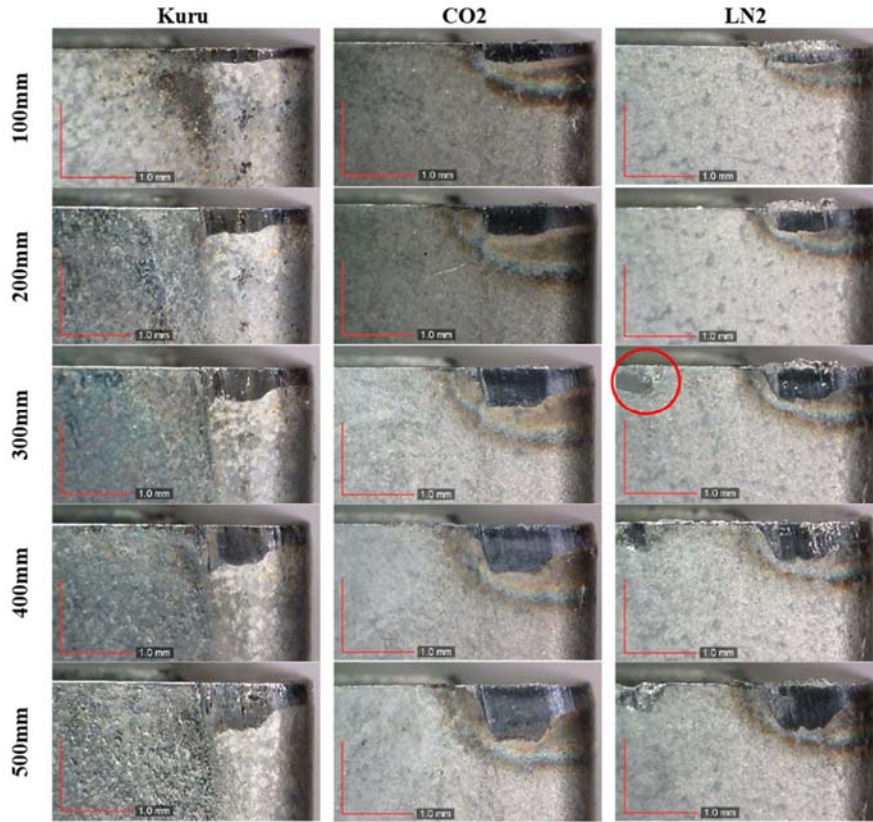
kırılmalara (kırmızı renkli daire içinde gösterilmiştir) neden olmaktadır. Şekil 5'te üç farklı koşulda ve 1,6 mm talaş derinliğinde burun aşınmasının kesme uzunluğuna bağlı artışı gösterilmiştir. Kuru kesme ve sıvı azot kullanılarak yapılan kesmede burun aşınmasının artışı, 500 mm kesme uzunluğunda benzer eğilim göstermektedir, ancak sıvı azot kullanılarak yapılan kesme kuru kesme ile karşılaştırıldığında, kesme uzunluğu boyunca çok daha küçük burun aşınması oluşturduğu açıktır.

Karbon dioksit kullanılarak yapılan talaş kaldırma sürecinde kesici takımın burununda kararlı bir aşınma gözlemlenmemiştir. 300 mm kesme uzunluğuna kadar kuru kesmeden çok daha düşüktür, ancak bundan sonra aniden artış göstermekte ve kesme testleri tamamlandığında, üç koşul arasında en büyük burun aşınması, karbondioksit kullanılarak yapılan kesme sonuçlarında gerçekleşmiştir.

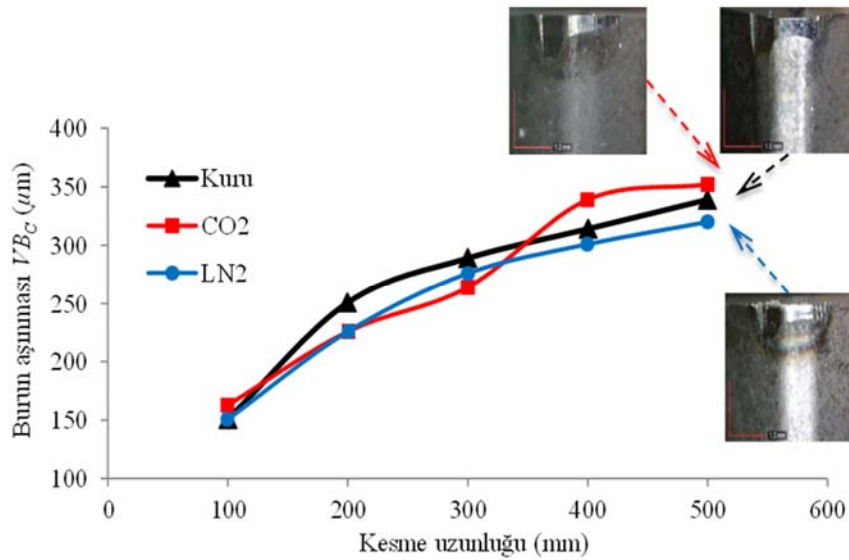
Bu deneysel çalışma, kesici uçların burun yarıçapının iki katı olan büyük talaş derinliğinde (1,6 mm), karbondioksit ve sıvı azot kullanılmasının, sertleştirilmiş çeliklerin işlenmesinde kesici takım ömrünün arttırılmasına önemli katkı sağlamadığını göstermektedir. Elbette bu önemli bir noktadır; çünkü soğutucular kesme sıcaklığını ciddi bir şekilde düşürmesine rağmen kesici takım performansında kayda değer iyileşmeler görülmemiştir. Üstelik, karbondioksit kullanılarak yapılan talaş kaldırma operasyonunda, kesici takımın aşınması kuru kesme operasyonunda kullanılan takımdan daha büyük değerlere ulaşmıştır. Bu tür sonuçlar elde edilmesinin iki nedeni olabilir; birincisi karbondioksit ve kesici takım arasında reaksiyon oluşması, ikinci sebep ise kriyojenik soğutucuların kesici takım ve talaş arasında kararlı şekilde nüfuz etmemesi olabilir. Başka bir deyişle, takım-talaş arayüzünde kesme esnasında herhangi bir yağlama etkisi meydana gelmemesi olabilir. Kriyojenik soğutucuların takım aşınmasını azaltma etkisini anlamaya, aynı kesme koşullarını (kuru, karbondioksit ve sıvı azot) kullanarak talaş derinliğini

düşürmek yardımcı olabilir. Aslında kriyojenik kesme işlenmiş parçaların yüzey bütünlüğü karakteristiklerini iyileştirmek içinde kullanılan bir yöntemdir [2]. Bu noktada, kriyojenik soğutmanın genellikle finiş kesme işlemi sırasında kullanılması önerilir. Bu anlamda talaş derinliğini düşürüp, soğutucuların performansının araştırılması uygulama açısından oldukça faydalı bir nokta olacaktır.

Kriyojenik soğutucuların (sıvı azot ve karbondioksit) etkinliğini incelemek için, takım aşınmasının azaltılması dikkate alınarak, finiş kesme operasyonunda 0,8 mm talaş derinliği seçilmiştir. Şekil 6'da Karbondioksit, sıvı azot kullanılarak ve kuru kesme işleminde çentik aşınması sunulmuştur. Şekil 7'de ise çentik aşınmalarının mikroskopla alınan görüntüleri sunulmuştur. 200 mm kesme uzunluğuna kadar çentik aşınmasının artışı açısından bu üç koşul arasındaki fark net değildir. 200 mm kesme uzunluğunda, karbondioksit ile kesme prosesi sonucunda oluşan çentik aşınması 330 µm'ye yakındır. Kuru kesme ve sıvı azot kullanılarak kesmede 200 mm kesme uzunluğunda kaydedilen çentik aşınması yaklaşık 290 µm'dir. 200 mm kesme uzunluğundan sonra, bu üç koşul arasındaki fark daha belirgindir. Kuru kesme operasyonunda 500 mm kesme uzunluğundan sonra yaklaşık 820 µm olarak en büyük çentik aşınması oluşmuş olup, bunu yaklaşık 690 µm çentik aşınmasıyla karbondioksit kullanılarak yapılan talaş kaldırma takip etmiştir. En düşük çentik aşınması ise sıvı azot kullanılarak yapılan kriyojenik kesme sırasında 500 mm kesme uzunluğundan sonra 490 µm olarak gözlemlenmiştir. Düşük talaş derinliğinde, sıvı azot kullanılarak yapılan kriyojenik kesmenin, kesici takım çentik aşınmasının azaltılmasına önemli katkı sağladığı görülmektedir. Aslında, talaş derinliği kesici takımın burun yarıçapı ile aynı olduğu için, bu durumda çentik aşınması, takım ömrünü belirlemek için önemli kriterlerden biridir. Böylece, sıvı azot kullanılarak yapılan kriyojenik kesme, takım ömrünü arttırmaya yardımcı olduğu sonucuna ulaşılmaktadır. Çalışmanın bu bölümünde, ilgi çeken sonuç karbondioksit



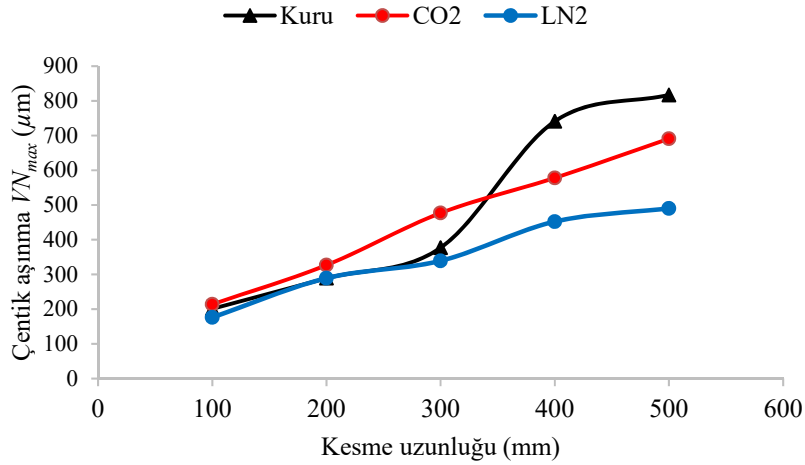
Şekil 4. Kesme uzunluğuna bağlı olarak farklı kesme koşullarında kesici uçların serbest yüzey aşınmalarının mikroskop görüntüsü ($a_p=1,6$ mm)
(Optical microscopy images of progressive flank wear as a function of cutting length for various machining conditions $a_p=1,6$ mm)



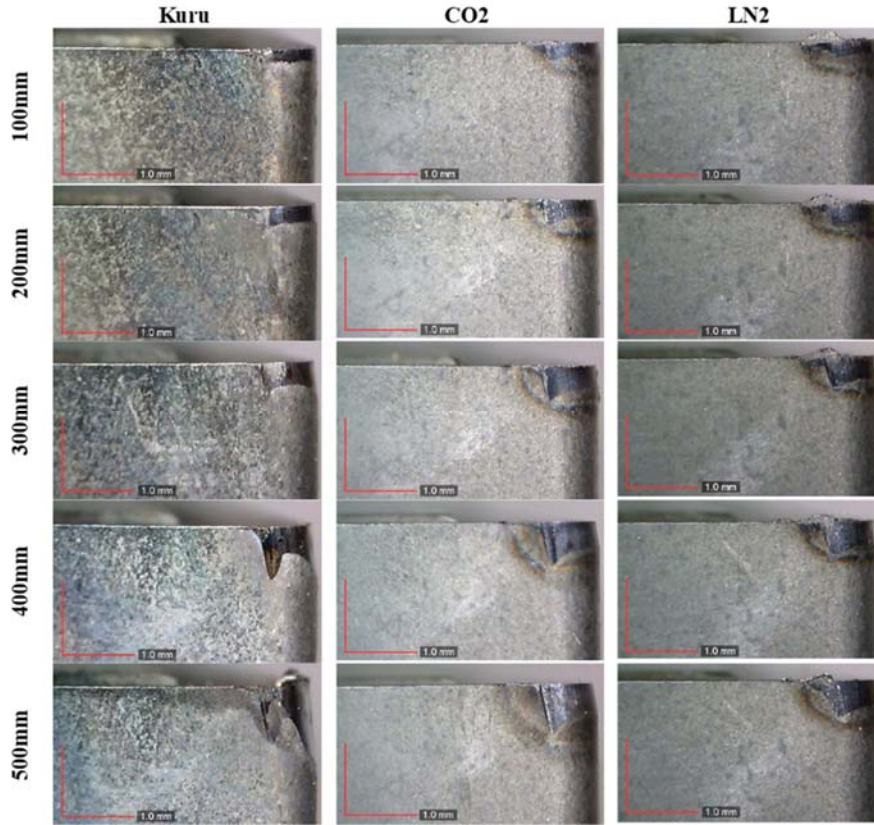
Şekil 5. Kesme uzunluğuna bağlı olarak farklı kesme koşullarında burun aşınmasının artışı ($a_p=1,6$ mm)
(Progressive nose wear as a function of cutting length for various machining conditions $a_p=1,6$ mm)

kullanılarak yapılan kriyojenik kesme ile elde edilmiştir. Önceki şekillerde (Şekil 3) sunulan ve daha önce sunulan çalışmalarda olduğu gibi [19], daha büyük talaş derinliğinde, yani takım uç yarıçapından daha büyük talaş derinliğinde karbondioksit kullanılarak yapılan kriyojenik kesme her

zaman takımın serbest yüzeyinde en fazla aşınmaya sebep olmuştur. Bu çalışma aynı zamanda karbondioksit kullanılarak yapılan kriyojenik kesmenin verimliliğinin seçilen kesme parametrelerine, özellikle de talaş derinliğine bağlı olduğunu göstermektedir. Şekil 7, Şekil 6'deki sunulan



Şekil 6. Kesme uzunluğuna bağlı olarak farklı kesme koşullarında çentik aşınmasının artışı ($a_p=0,8$ mm)
(Progressive notch wear as a function of cutting length for various machining conditions $a_p=0,8$ mm)



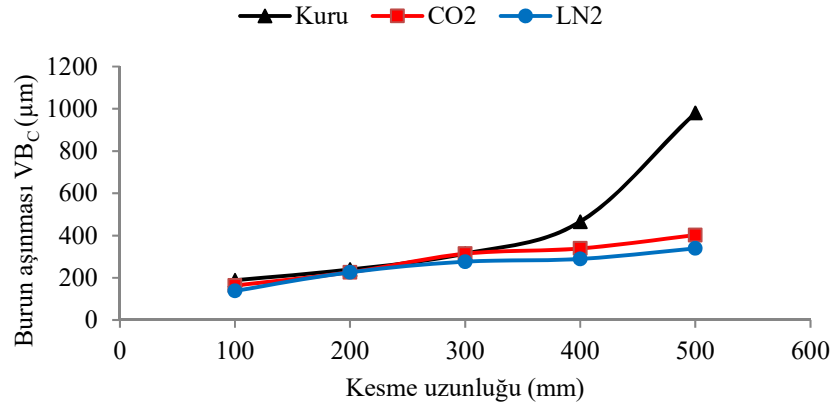
Şekil 7. Kesme uzunluğuna bağlı olarak farklı kesme koşullarında kesici uçların çentik aşınmasının mikroskop görüntüleri
($a_p=0,8$ mm) (Optical microscopy images of progressive notch wear as a function of cutting length for various machining conditions $a_p=0,8$ mm)

sonuçlara karşılık gelen görüntüleri göstermektedir. Kuru kesmede çentik aşınmasının 400 mm kesme uzunluğundaki ani artışı bariz bir şekilde görülmektedir. Ayrıca, kuru kesmede 500 mm kesme uzunluğunda burunda aşırı aşınma meydana gelmesi nedeniyle kesici takım burun geometrisi önemli ölçüde değişmiştir. 1,6 mm talaş derinliğinde, ağız birikintisi, kesme sürecinin başından sonuna kadar sıvı azot

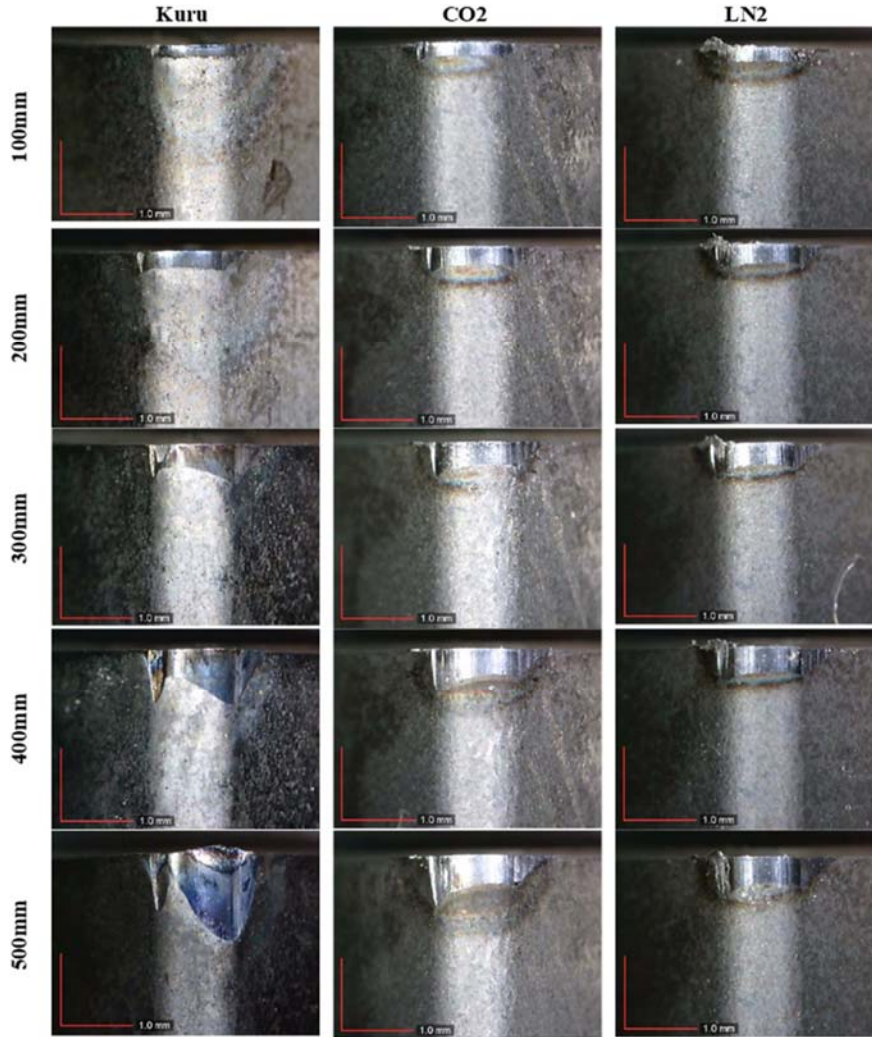
kullanılarak yapılan kriyojenik kesme sırasında oluşmaktadır. 0,8 mm talaş derinliğinde kuru kesme, karbondioksit ve sıvı azot kullanılarak yapılan kesmede ortaya çıkan burun aşınma artışı Şekil 8’de sunulmuştur. İlk 300 mm kesme uzunluğunda farklı koşullarda oluşan burun aşınmaları birbirine yakın gibi gözükmemektedir. Ancak 300 mm kesme uzunluğundan sonra kuru kesmede burun

aşınması, Şekil 9'da gösterildiği gibi ani artış göstermektedir. Burun bölgesindeki bu ani ve hızlı artış, aşınmayı önemli

ölçüde hızlandıran kesme sıcaklığındaki artıştan kaynaklanmaktadır. 500 mm kesme uzunluğundan sonra



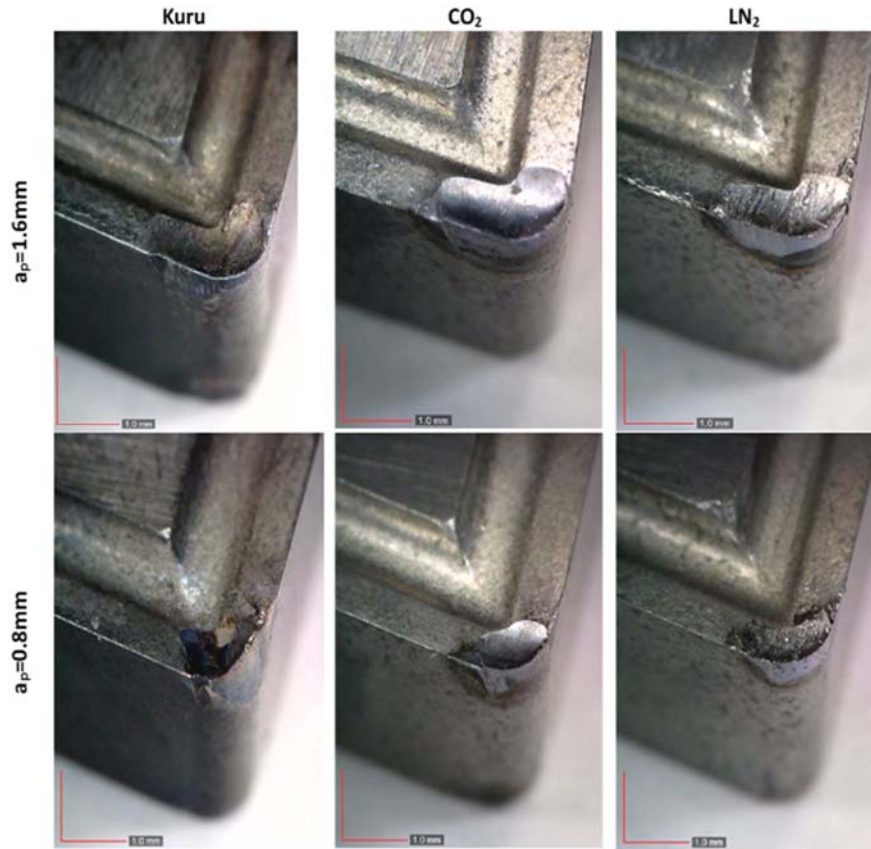
Şekil 8. Kesme uzunluğuna bağlı olarak farklı kesme koşullarında burun aşınmasının artışı ($a_p=0,8$ mm)
(Progressive nose wear as a function of cutting length for various machining conditions $a_p=0,8$ mm)



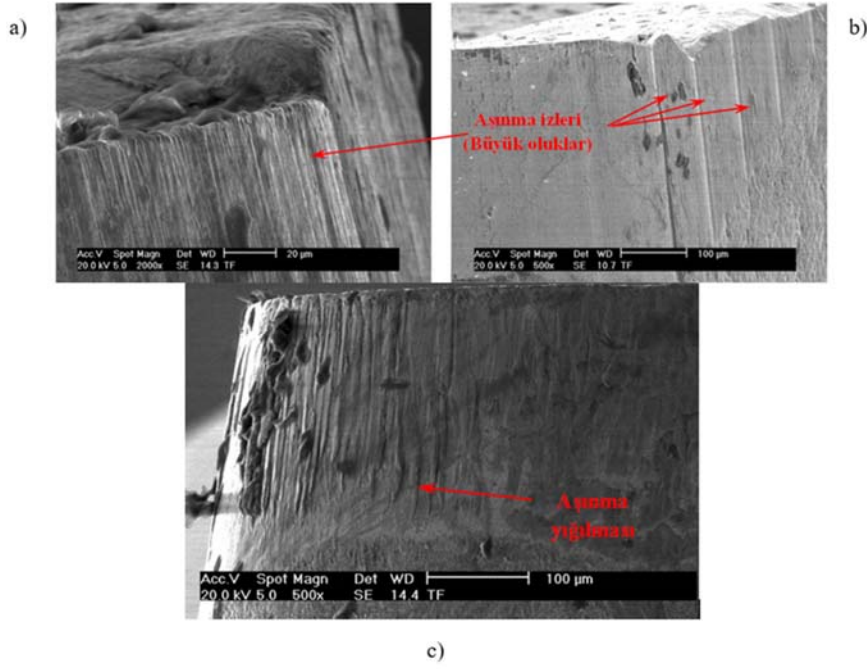
Şekil 9. Kesme uzunluğuna bağlı olarak farklı kesme koşullarında kesici uçların burun aşınmasının mikroskop görüntüleri ($a_p=0,8$ mm) (Optical microscopy images of progressive nose wear as a function of cutting length for various machining conditions $a_p=0,8$ mm)

burun üzerinde ölçülen aşınma miktarı $980 \mu\text{m}$ 'dir. Ölçülen bu değer kesici takımın ömrünü tamamlamış olduğunu göstermektedir. Ayrıca, kuru kesme sırasında kesici takımın ikincil kesme ağzında çentik aşınmasının da şiddetli olduğu Şekil 9'da görülmektedir. Ama bu durum, karbondioksit kullanılarak yapılan kriyojenik kesme veya sıvı azot kullanılarak yapılan kriyojenik kesme sırasında gözlemlenmemektedir. Karbondioksit ve sıvı azot kullanılarak yapılan kriyojenik kesme çok daha iyi performans göstermektedir ve 500 mm kesme uzunluğundan sonra karbondioksit kullanılarak yapılan kriyojenik kesmede aşınma yaklaşık $400 \mu\text{m}$ olurken, sıvı azot kullanılarak yapılan kriyojenik kesmede aşınma $330 \mu\text{m}$ olmuştur. Şekil 8'de gösterildiği gibi her üç koşul arasında en az aşınma sıvı azot kullanılarak yapılan kriyojenik kesmede oluşmaktadır. 0,8 mm talaş derinliğindeki kesme testinde karbondioksit kullanılarak yapılan kriyojenik kesme kuru kesme ile karşılaştırıldığında, karbondioksit kullanımının aşınmayı önemli derecede azalttığı görülmektedir. Daha yüksek talaş derinliğindeki testler ile kıyaslandığında, daha düşük talaş derinliği seçildiğinde, karbondioksit kullanılarak yapılan kriyojenik işlemin daha iyi performans gösterdiği açıktır. Bu koşullarda 0,8 mm veya 1,6 mm talaş derinliğinde yapılan talaş kaldırma operasyonlarında kullanılan kesici takımlarda oluşan krater aşınması incelendiğinde (Şekil 10), farklı kesme koşullarının krater aşınmasına etkisinin sınırlı olduğu gözlemlenmektedir. Gözlemlenen krater alanı, 1,6

mm talaş derinliğinde yaklaşık $1,5 \text{ mm}^2$ ve 0,8 mm talaş derinliğinde yaklaşık 1 mm^2 'dir. Karbondioksit kullanılarak yapılan kesme operasyonlarında kullanılan kesici takımların krater yüzeyleri diğer iki yöntemle elde edilen yüzeylere nazaran daha parlak olduğu görülmektedir. Karbondioksit kullanılarak yapılan kesmede talaşlar çok daha kısa boyutlarda oluşmuştur dolayısı ile talaş kırılmasının artması kesme bölgesinde talaş yoğunluğunu azaltmakta ve soğutucunun kesme bölgesine nüfuz etme kabiliyetini arttırmaktadır. Bu durum ise krater bölgesindeki termal etkinin nispeten azalmasına sebep olabilmekte ve kayma bölgesinde daha parlak yüzeyin oluşmasına sebebiyet verebilmektedir. Şekil 11, kuru, karbondioksit ve sıvı azot kullanılarak yapılan kesme operasyonlarında kesici takımların taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntülerini göstermektedir. Aşınma mekanizması göz önüne alındığında, farklı koşullar arasında belirli bir fark vardır. Karbondioksit ve sıvı azot kullanılarak yapılan talaş kaldırma operasyonlarında kesici takımlardaki aşınmanın artışında abrasiv aşınma mekanizmasının hakim olduğu net bir şekilde gözükmemektedir. Bu iki koşulda kesici takımların serbest yüzeyindeki oluk izleri, abrasiv aşınma mekanizması oluştuğunu destekleyen kanıttır. Diğer taraftan, kuru işlemede adezyon mekanizmasının aşınmanın artışında rol oynadığı görülmektedir, ancak kuru kesme koşullarında abrasiv aşınma mekanizmasının da etkin olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 10. Talaş derinliğine bağlı olarak farklı kesme koşullarında kesici uçların krater aşınmalarının mikroskop görüntüleri (Optical microscopy images of crater wear of cutting tool as a function of depth of cut for various machining conditions)



Şekil 11. 0,8 mm talaş derinliğinde farklı koşullarda kullanılan kesici takımların SEM görüntüleri
(SEM images of cutting tool used in different conditions at 0,8 mm depth of cut)

- a) Karbondioksit kullanılarak yapılan kesmenin kesici takımı (Cutting tool used in carbon dioxide coolant cryogenic machining)
b) Sıvı Azot kullanılarak yapılan kesmenin kesici takımı (Cutting tool used in liquid nitrogen coolant cryogenic machining)
c) Kuru kesme işleminde kullanılan kesici takım (Cutting tool used in dry machining)

3.2. Talaş Kırılması (Chip Breaking)

AISI 4140 çelik malzemesinin talaşlı imalat sürecinde karşılaşılan önemli problemlerden birisi sürekli ve uzun talaşların oluşumudur. Talaşlı imalat sürecinin kontrolü açısından bakıldığında, talaşın belli uzunluktan sonra kırılabilir olması hayli önemlidir. Aksi halde talaş kaldırma süreci kontrol edilemeyebilir ve nihayetinde uzun ve sürekli talaşlar hem iş parçasına hem de kesici takım ve takım tutucuya zarar verebilmektedir. Bu durum talaşlı imalatçılar için farklı malzemelerin işlenmesinde karşılaşılabilen tipik bir problemdir. Özellikle farklı soğutucuların bu anlamda işleme performansına katkısının araştırılması da önem arz eden hususlardandır.

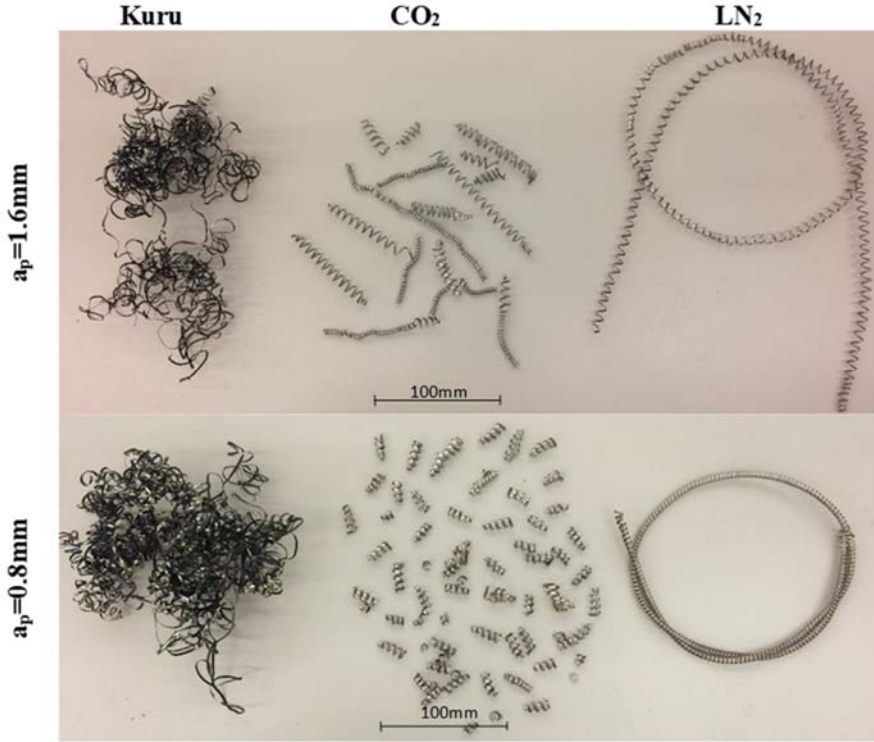
Bu çalışmada farklı talaş derinliklerinde kuru işleme, karbondioksit ve sıvı azot kullanılarak yapılan talaş kaldırma operasyonları sonucu oluşan talaşların fotoğrafları Şekil 12'de sunulmuştur. Her koşuldan üretilen talaşlar arasında büyük fark vardır. Kuru işleme, sürekli, deforme olmuş ve çok uzun talaş oluşumuna yol açarken, sıvı azot kullanılarak yapılan kriyojenik işleme sürekli ve uzun helis talaşların oluşumuna sebep olmuştur. Bununla birlikte karbondioksit kullanılarak yapılan kesme operasyonunda en kısa talaşların elde edildiği de not edilmesi gereken önemli bir bulgudur. Sıvı azot kullanılarak yapılan kriyojenik işlemeden üretilen talaşlara kıyasla çok daha küçük talaşlardır. Bu konuda ilave çalışmaların yapılarak karbondioksit kullanılarak yapılan kesmede talaş boyutundaki bu farklılığın tayin edilmesi gerekmektedir. Talaş derinliğinin talaş kırılabilirliği

üzerindeki etkileri, kuru işleme ve sıvı azot kullanılarak yapılan kriyojenik işlemede açıkça görülmezken, karbondioksit kullanılarak yapılan kriyojenik işleme sırasında daha düşük talaş derinliği talaş boyutlarının daha da küçülmesine neden olmuştur.

Talaş formu açısından bakıldığında, Şekil 13'de görüldüğü üzere, oluşan talaşların testere ağızlı talaşlar olduğu görülmektedir. Talaşların kalınlıkları açısından değerlendirildiğinde ise en kalın talaşın sıvı azotun kullanıldığı kriyojenik işleme sonucu oluştuğu ve en ince talaşın ise karbondioksit kullanılarak yapılan kriyojenik işlemede oluştuğu görülmüştür.

3.3. Kesme Sıcaklıkları (Cutting Temperature)

Talaşlı imalat sürecindeki sıcaklık, talaş kaldırma prosesinde aşınmanın artışı anlamaya yardımcı olan önemli bir çiktir. Kesme sıcaklığı kesici takımın yumuşama veya sertliğini kaybetme sıcaklığına ulaşması ya da yaklaşması açısından çok önemlidir. Bu gibi durumlarda aşınmanın artışının hızlanması ve kesici takımın ömrünü kısa sürede tamamlaması beklenir. Elbette, tornalama sırasında deney düzeneği nedeniyle kesici takım ile talaş arasındaki maksimum sıcaklığın ölçülmesi gerçekten zordur. Bu nedenle kesici takımı ile yeni üretilen talaş arasındaki maksimum sıcaklığı ölçmek yerine, kesme bölgesinde yeni oluşmakta olan talaşta oluşan maksimum sıcaklık ölçülür. Kesme bölgesinden alınan infrared kamera görüntüsü Şekil 1 'de gösterilmiştir. 1,6 mm talaş derinliğinde kaydedilen



Şekil 12. Talaş derinliğine bağlı olarak farklı kesme koşullarında üretilen talaşların fotoğrafları
(Images of generated chips as a function of depth of cut for various machining conditions)



Şekil 13. Farklı kesme koşullarında elde edilen talaşların morfolojisi ($a_p=1,6$ mm)
(Chip morphology obtained under different cutting conditions, $a_p=1,6$ mm)

maksimum sıcaklık kuru kesme, karbondioksit ve sıvı azot kullanılarak yapılan kriyojenik işlemede sırayla yaklaşık olarak 870°C, 400°C ve 300°C ölçülmüştür (Şekil 14).

Bu sıcaklık değerleri, kuru ve kriyojenik kesme prosesleri arasında önemli bir farklılık olduğunu göstermektedir. Bu deneylerde karbür uç kullanılmıştır. Kriyojenik soğutucularla yapılan talaş kaldırmalarda karbür ucun yumuşama sıcaklığına yakın bir sıcaklık oluşmazken, kuru kesmede kesme sıcaklığı çok daha yüksek değerlere çıkmıştır. Örneğin, Karbür kesici takımın 800°C'deki sertliği, oda sıcaklığında karbür takımın sertliğine kıyasla yaklaşık % 50'nin altına düşer [21]. Bu noktayı göz önüne alırsak, kuru kesmede, yüksek sıcaklık, kriyojenik kesme süreçlerine kıyasla takım aşınmasının artışında hakim rol oynamaktadır. Düşük talaş derinliğinde, yani 0,8 mm talaş derinliğinde kaydedilen maksimum sıcaklık değerleri; kuru

kesme için yaklaşık olarak 625°C, karbondioksit kullanılarak yapılan kriyojenik işleme için 315°C ve sıvı azot kullanılarak yapılan işlemede 220°C'dir.

Düşük talaş derinliğinde sıcaklık etkisinin çok lokalize olduğu gerçeğinden dolayı, kuru işleme sırasında en yüksek sıcaklık, daha düşük talaş derinliğinde kesici takımın yumuşamasına ve aşınmanın hızlanmasına neden olur. Sıcaklık göz önüne alındığında, karbondioksit kullanılarak yapılan kriyojenik işleme ve sıvı azot kullanılarak yapılan kriyojenik işleme arasındaki fark makul ancak kesici takımın yumuşama sıcaklığından çok daha düşük olduğu için kuru kesme kadar etkili olmayabilir. Ancak altı çizilmesi gereken husus ise, bu sıcaklık farklılığının kesici takım aşınma mekanizmasına yansımadır. Kuru kesmede adezyon etkin iken kriyojenik kesmede abrasiv aşınma mekanizması belirleyici olmuştur.

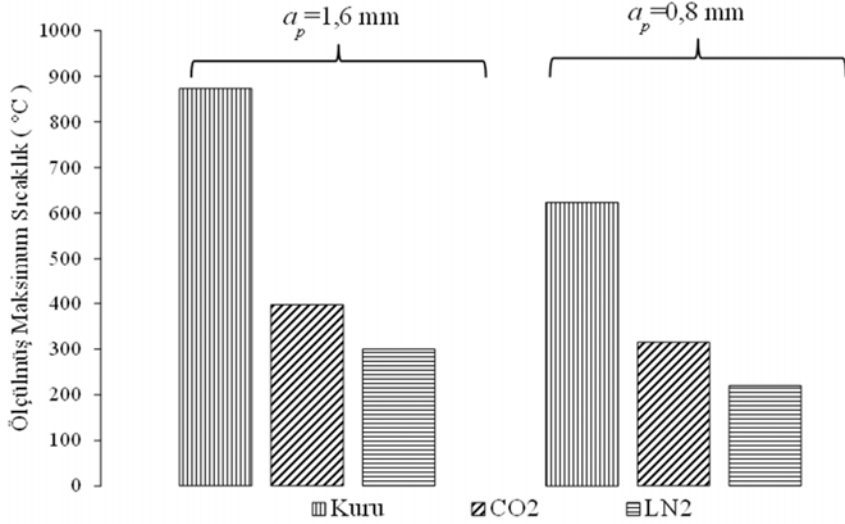
3.4. Kesme Kuvvetleri ve Sürtünme (Cutting Forces and Friction)

Kesme kuvveti, iş malzemesinin işleme performansını belirleyen en önemli unsurlardan biridir. Ayrıca işleme sürecinde enerji tüketimi için iyi bir göstergedir. Kuvvetin üç komponenti olan radyal kuvvet (F_x), ana kesme kuvveti (F_y) ve ilerleme kuvveti (F_z) çalışmada dikkate alınarak; bileşke kuvvet, F_r , aşağıda gösterildiği şekilde (Eş. 1) hesaplanabilmektedir.

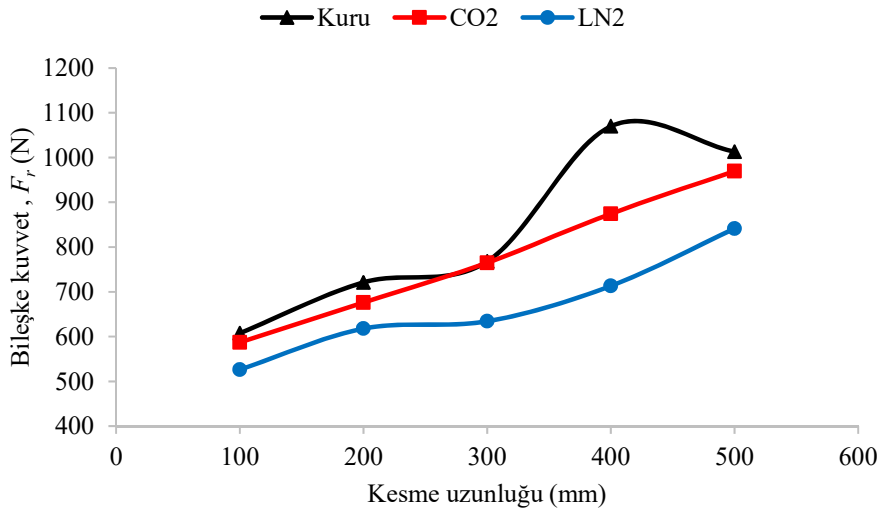
$$F_r = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (1)$$

Şekil 15, farklı kesme koşullarında (kuru, sıvı azot ve karbondioksit) yapılan talaş kaldırma operasyonlarındaki

bileşke kuvvetlerin kesme uzunluğuna bağlı olarak değişimini göstermektedir. Talaş kaldırma boyunca sıvı azot kullanılarak yapılan kriyojenik kesme sırasında ortaya çıkan kuvvetin, karbondioksit kullanılarak yapılan kriyojenik kesme ve kuru kesme ile elde edilen kuvvetin altında olduğu açıktır. Kuru kesme ve karbondioksit kullanılarak yapılan kesmede kuvvetler bir koşul dışında birbirine yakındır. Kuvvet ölçümünden çıkan önemli sonuç, takım aşınması arttıkça kuvvetlerin net şekilde artış göstermesidir. 100 mm kesme uzunluğunda elde edilen kuvvet yaklaşık 600 N iken, kesme uzunluğu 500 mm'ye ulaştığında, sıvı azot kullanılarak yapılan kriyojenik kesme sırasında elde edilen kuvvet en düşük kuvvet olarak yaklaşık 840 N olmuştur. Karbondioksit kullanılarak yapılan kriyojenik kesmede ise kuvvet yaklaşık 970 N'dur. Kuru kesme sonuçları dikkate alındığında, talaş derinliği 0,8 mm'den 1,6 mm'ye



Şekil 14. Talaş derinliğine bağlı olarak farklı kesme koşullarında ölçülmüş maksimum sıcaklık (Measured maximum temperature as a function of depth of cut for various machining conditions)



Şekil 15. Farklı kesme koşullarında kesme uzunluğuna bağlı olarak ölçülen bileşke kuvvet $a_p=0,8$ mm (Measured resulting forces as a function of cutting length for various machining conditions $a_p=0,8$ mm)

yükseldiğinde (Şekil 16) kuvvetler düşük talaş derinliği ile benzer eğilim göstermektedir. 400 mm işlemeden sonra kesme kuvvetinde azalma eğilimi görülmektedir. Bileşke kuvveti 400 mm kesme mesafesinde 1340 N iken 500 mm kesme mesafesinde yaklaşık 1120 N'dir. Bu azalma, sıcaklığın artması ve dolayısıyla iş parçası malzemesinin yumuşaması ve dolayısıyla iş parçasının kesilmesi için daha az kuvvet gerektirmesi ile ilgilidir. Ayrıca, krater aşınması arttıkça kesici uçların talaş açısı değişir, dolayısıyla kesme kuvvetlerinde kayda değer değişimlerin olması kaçınılmazdır. Kriyojenik koşullarda eğilim ise daha farklı olmuştur. Düşük talaş derinliğinde kesme uzunluğunun artışına paralel olarak kesme kuvvetlerinde artış olduğu görülmektedir. Bu eğilim genel olarak kesme mesafesine bağlı olarak kesici takım aşınmasındaki eğilim ile benzerlik göstermektedir. Ancak talaş derinliğinin artırılmasıyla kriyojenik soğutmada elde edilen bileşke kuvvetlerde belirli bir kesme uzunluğundan (300 mm) sonra karbondioksit kullanılarak yapılan talaş kaldırmada bileşke kuvvetin azalarak artmaya devam ettiği, sıvı azot kullanılarak yapılan testte ise azalma eğilimi gösterdiği görülmektedir. Bu durum özellikle kriyojenik soğutucuların işleme performansına etkisinin belirlenmesinde talaş derinliğinin önemli role sahip olduğunun da göstergesidir. Belirli bir talaş derinliğinde kriyojenik soğutucuların kesici takım talaş yüzeyine nüfuz etmeleri zorlaşmakta ve kesici takım talaş yüzeyinde ve kesici takım kesme ağzının hemen önündeki elastik gerilmeye maruz kesilecek iş parçasında lokal yumuşamalar meydana gelebilmekte ki buda malzemenin plastik deformasyonu esnasında daha az mekanik enerji ile deforme olabilmesine neden olmaktadır. Bu durumu açıklayan önemli bulgu ise aynı kesme şartlarında kesme mesafesinin belli uzunluğa ulaşmasından sonra kuvvette değişimin olmasıdır. İlâveten kesme mesafesinin belirli uzunluğa ulaşmasıyla krater aşınmasının artacağı ve bunun sonucunda kriyojenik

soğutucuların kesici takım ile iş parçası arasına nüfuz etmesinin dahada zorlaşacağı gerçeği de bulguların yorumlanmasına katkı sağlamaktadır. Ölçülen ana kesme kuvveti (F_c) ve ilerleme kuvveti (F_f) sırayla F ve N olarak kesici takımın talaş yüzeyi üzerinde sürtünme kuvvetine ve normal kuvvete, talaş açısında, α , dikkate alarak aşağıda gösterildiği şekilde (Eş. 2, Eş. 3) dönüştürülebilir [1].

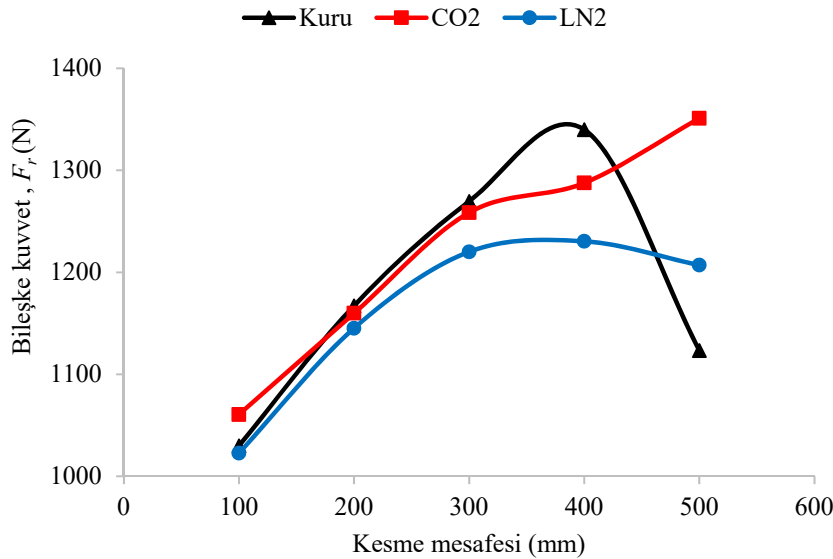
$$F = F_c \sin \alpha + F_f \cos \alpha \quad (2)$$

$$N = F_c \cos \alpha - F_f \sin \alpha \quad (3)$$

Böylelikle, kesici takımın talaş yüzündeki sürtünme katsayısı, μ , aşağıdaki hesaplamaya göre (Eş. 4) elde edilebilir [1];

$$\mu = F / N \quad (4)$$

Kesme mesafesine bağlı olarak 1,6 mm talaş derinliğinde üç farklı kesme koşulundan kaynaklanan sürtünme katsayısı Şekil 17'de sunulmuştur. Kesme mesafesinin artmasıyla sürtünme katsayısının her üç koşulda da arttığı açıktır. 300 mm kesme boyuna kadar sürtünme katsayısı değerleri, her üç koşulda da hızlı bir artış göstermiyor, Ancak bundan sonra kriyojenik soğutucular kullanılarak yapılan kesmeler sırasında sürtünme katsayısında kararlı artışı gözlenirken kuru kesme sırasında hızlı bir artış görülmektedir. İlk 300 mm'lik kesimi göz önüne alındığında, sıvı azot destekli kesmenin daha düşük sürtünme oluşturduğu açıktır; bu, soğutma etkisine ek olarak, sıvı azotun bir dereceye kadar yağlama etkisine sahip olduğunu göstermektedir. 300 mm kesme uzunluğundan sonra kriyojenik soğutucuların kesici takım ile talaş arasına nüfuz etmelerinin oluşan krater aşınmasından dolayı zorlaşması da sürtünmenin artışına katkı sağlamıştır.

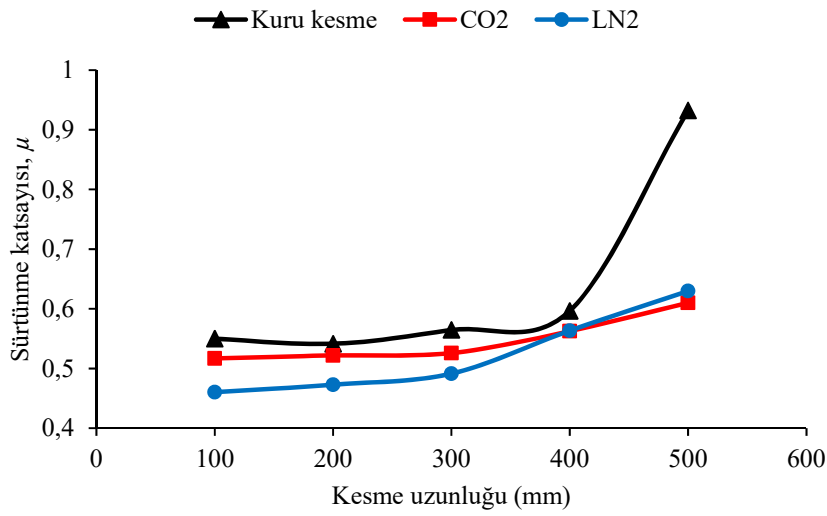


Şekil 16. Farklı kesme koşullarında kesme uzunluğuna bağlı olarak ölçülen bileşke kuvvet, $a_p=1,6$ mm (Measured resulting forces as a function of cutting length for various machining conditions, $a_p=1,6$ mm)

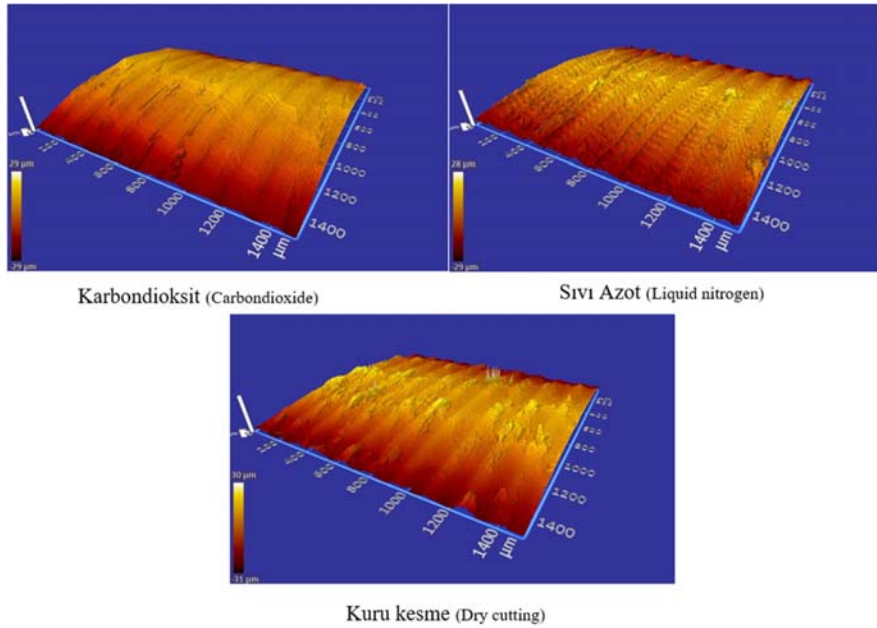
3.5. Yüzey Kalitesi (Surface Quality)

Farklı kesme koşullarında 500 mm işleme sonucunda kesici takımlarda belirgin aşınmalar gözlemlenmiştir. Kesici takımlarda gözlemlenen bu aşınmalar önceki bölümlerde sunulmuştur. Özellikle burun aşınmaları dikkate alındığında karbondioksit kullanılarak yapılan talaş kaldırmada 352 μm , kuru kesmede 339 μm ve sıvı azot kullanılarak yapılan talaş kaldırmada ise 320 μm burun aşınması ölçülmüştür. Bu şartlarda işlenen parçaların yüzey görüntüleri Şekil 18'de sunulmuştur. Şekilde görüldüğü üzere her üç koşulda da yüzey topografisinde kayda değer bozulmaların olduğu görülmektedir. Karbondioksit kullanılarak yapılan talaş

kaldırmada ilerleme boyunca belirgin tümsekler oluşmuştur. Benzer şekilde sıvı azot kullanılarak yapılan işlemede ise tırlamalı bir görüntü oluşmuştur. Aynı zamanda yüzeyde ağır birikintileri parçaları görülmektedir. Kuru kesme ile işlenen parçada ise oldukça belirgin ağız birikintisi kalıntıları görülmektedir. Şüphesiz tüm bu sorunlar işlenen parçaların yüzey kalitesini olumsuz etkilemişlerdir. İki farklı noktadan alınan yüzey pürüzlülüğü değerlerine göre, karbondioksit ile işlenen parçanın yüzey pürüzlülük değeri yaklaşık 0,96 μm olurken, sıvı azot ile işlenen parçanın yüzey pürüzlülüğü 1,46 μm ve kuru kesme sonucu elde edilen parçanın yüzey pürüzlülüğü ise 2,185 μm olmuştur. Bu ölçülen değerler dikkate alındığında iş parçası yüzey pürüzlülüğü açısından



Şekil 17. Farklı kesme koşullarında kesme uzunluğuna bağlı olarak hesaplanan sürtünme katsayısı $a_p=1,6$ mm (Calculated friction coefficient as a function of cutting length for various machining conditions $a_p=1,6$ mm)



Şekil 18. Farklı kesme koşullarında 500 mm işleme sonucunda iş parçalarının yüzey topografisi, $a_p= 1,6$ mm (Surface topography of machined parts under various conditions after 500 mm cutting lengths, $a_p= 1,6$ mm)

karbondioksit ile işleme diğer ikisine nazaran daha iyi sonuç vermiştir. Ancak yüzey topografileri incelendiğinde bu yüzeylerin bitmiş yüzey olarak değerlendirilemeyeceği de açıktır. İlave operasyona ihtiyaç duyulacaktır. Bununla birlikte not edilmesi gereken husus, yukarıda sunulan aşınma değerlerine ulaşıldığında işlenen parçanın yüzey kalitesinin birçok ürün için istenebilecek değerin altında olduğu aşıkardır. Dolayısı ile kesici takım aşınmasındaki artış her ne kadar soğutucular kullanılmış olsa da iş parçası yüzeyinde kayda değer bozulmalara sebep olmaktadır.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, kriyojenik soğutucuların (sıvı azot ve karbondioksit) sertleştirilmiş çelik malzemenin talaşlı imalat sürecinde takım aşınması oluşumuna ve artışına etkileri başta olmak üzere, kesme kuvvetlerine, kesme sıcaklığı, sürtünme koşulu ve iş parçası yüzeyine etkileri, farklı talaş derinliği göz önüne alınarak araştırılmıştır. Ayrıca kriyojenik koşullar kullanılarak elde edilen sonuçlar kuru işleme ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Mevcut literatür dikkate alındığında, burada sunulan çalışma; özellikle kriyojenik soğutmanın (karbondioksit ve sıvı azot kullanılarak) işleme performansına katkısında talaş derinliğinin rolünü ortaya koyan sistematik ve özgün bir çalışma olduğu düşünülmektedir. Bu çalışmadan aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir :

Büyük talaş derinliğine kıyasla, düşük talaş derinliğinde karbondioksit kullanılarak yapılan talaş kaldırmada işleme performansının iyileştiği gözlemlenmiştir.

Talaş derinliğinden bağımsız olarak, karbondioksit kullanılarak yapılan talaş kaldırma operasyonlarında talaşların boyutları kuru kesmede ve sıvı azot kullanılarak yapılan talaş kaldırma operasyonlarında elde edilen talaşların boyutlarına nazaran çok daha kısa olmuştur.

Sıvı azot kullanılarak yapılan talaş kaldırmada işleme performansı çıktıları (takım aşınması, kesme kuvvetleri ve sürtünme katsayıları), karbondioksit kullanılarak yapılan talaş kaldırmada elde edilen çıktılarına nazaran daha düşük çıkmıştır. Dolayısı ile sıvı azotun bu malzemenin işleme performansının artırılmasına katkısı daha fazla olmaktadır.

Kriyojenik soğutucu destekli işleme proseslerinde, abrasiv aşınma dominant etkiye sahiptir. Kriyojenik soğutucu destekli işleme proseslerinde ölçülen kesme sıcaklıkları kuru kesmeye nazaran çok daha düşük ölçülmüştür.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışmaya katkılarından dolayı, Marmara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü (BAPKO) brimine (Destek no. FEN-E-080415-0113) ve SECO Kesici Takım firmasına teşekkür ederiz. Ayrıca numunelerin yüzey görüntülerinin alınmasındaki desteği için sayın Doç. Dr. Uğur Köklü Bey'e teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Shaw M.C., Metal cutting principles, Oxford university press New York, 2005.
2. Kaynak Y., Lu T., Jawahir I.S., Cryogenic machining-induced surface integrity: a review and comparison with dry, MQL, and flood-cooled machining, *Machining Science and Technology*, 18, 149-198, 2014.
3. Kaynak Y., Karaca H.E, Noebe RD, Jawahir I.S., Analysis of tool-wear and cutting force components in dry, preheated, and cryogenic machining of NiTi shape memory alloys. *Procedia CIRP*, 498-503, 2013.
4. Jawahir I.S., Attia H., Biermann D., Duflou J., Klocke F., Meyer D., Newman S.T., Pusavec F., Putz M., Rech J., Schulze V., Cryogenic manufacturing processes, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 65, 713-736, 2016.
5. Cassin, C. and Boothroyd G., Lubricating action of cutting fluids, *Journal of Mechanical Engineering Science*, 7, 67-81, 1965.
6. El Baradie M., Cutting fluids: Part I. characterisation, *Journal of Materials Processing Technology*, 56, 786-797,1996.
7. Adler D.P., Hii W.S., Michalek D.J., Sutherland J.W., Examining the role of cutting fluids in machining and efforts to address associated environmental/health concerns, *Machining Science and Technology*, 10, 23-58, 2006.
8. Shokrani A., Dhokia V., Newman S.T., Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 57, 83-101, 2012.
9. Aramcharoen, A., Influence of Cryogenic Cooling on Tool Wear and Chip Formation in Turning of Titanium Alloy, *Procedia CIRP*, 46, 83-86, 2016.
10. Weinert K., Inasaki I., Sutherland J.W., Wakabayashi T., Dry machining and minimum quantity lubrication, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 53 (2), 511-537, 2004.
11. Uehara K., Kumagai S., Chip formation, surface roughness and cutting force in cryogenic machining, *Ann. CIRP*,17, 409-416, 1968.
12. Dillon O.W., De Angelis R.J., Lu W.Y., Gunasekera J.S., Deno J.A., The effects of temperature on the machining of metals, *Journal of Materials Shaping Technology*, 8, 23-29, 1990.
13. Hong S.Y., Zhao Z., Thermal aspects, material considerations and cooling strategies in cryogenic machining, *Clean Products and Processes*, 1 (2), 107-116, 1999.
14. Hong S.Y., Markus I., Jeong W.C., New cooling approach and tool life improvement in cryogenic machining of titanium alloy Ti-6Al-4V, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41, 2245-2260, 2001.
15. Hong S.Y., Ding Y., Jeong W.C., Friction and cutting forces in cryogenic machining of Ti-6Al-4V, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41, 2271-2285, 2001.

16. Machai C., Biermann D., Machining of β -titanium-alloy Ti-10V-2Fe-3Al under cryogenic conditions: Cooling with carbon dioxide snow, *Journal of Materials Processing Technology*, 211, 1175-1183, 2011.
17. Busch K., Hochmuth C., Pause B., Stoll A. Wertheim R., Investigation of Cooling and Lubrication Strategies for Machining High-temperature Alloys, *Procedia CIRP*, 41, 835-840, 2016.
18. Kaynak Y., Robertson, S.W., Karaca, H.E., Jawahir, I.S., Progressive tool-wear in machining of room-temperature austenitic NiTi alloys: The influence of cooling/lubricating, melting, and heat treatment conditions, *Journal of Materials Processing Technology*, 215, 95-104, 2015.
19. Gharibi A., Duman E., Ozkutuk M., Kaynak Y., Comparison the effects of liquid nitrogen and carbon dioxide cryogenic coolants on progressive tool wear. 17th International Conference on Machine Design and Production, UMTIK 2016, 360-368, 2016.
20. Arrazola, P.J., Arriola, I., Davies, M. A., Cooke, A. L., & Dutterer, B. S., The effect of machinability on thermal fields in orthogonal cutting of AISI 4140 steel, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 57, 65-68, 2008.
21. Ezugwu E., Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45,1353-1367, 2005.