

Yüksek Mukavemetli S960 Çeliğinin Frezelenmesinde Sürdürülebilir Soğutma/ Yağlama Koşullarının Karşılaştırılması

Serhat Şap¹

Özet

Talaşlı imalat işlemlerinde takım ömrü ve iş parçasının yüzey bütünlüğü oldukça önem arz etmektedir. Bu nedenle bahsedilen işlenebilirlik parametrelerinin iyileştirilmesinin üretime kayda değer bir etkisi olduğu sonucuna varılmaktadır. Hızlı takım aşınmasının en önemli nedenlerinden biri takım-talaş arayüzünde meydana gelen sıcaklıklardır. Kesme bölgesinde oluşan yüksek sıcaklıkların azaltmak amacıyla takım-talaş ve takım-iş parçası arayüzlerinde soğutma/yağlama etkisi sağlayan geleneksel kesme sıvısı kullanılmaktadır. Geleneksel kesme sıvıları yüksek maliyet, çevre ve insan sağlığına zararlı etkilerinden dolayı bazı sorunlara neden olabilmektedir. Bu olumsuz koşulların bertaraf edilmesi amacıyla çevre dostu ve ekonomik alternatif soğutma/yağlama stratejileri gün geçtikçe daha popüler olmaktadır. Bu çalışmada yüksek mukavemete sahip S960 çeliğinin sürdürülebilir soğutma/yağlama koşulları ve farklı işlenebilirlik parametreleri altında frezelenmesi araştırılmıştır. Bu bağlamda kriyojenik-LN₂ ve minimum miktarda yağlama (MMY) ortamları karşılaştırılmıştır. Kesme hızları 125-250 m/dak ve ilerleme hızları 0,15-0,25 mm/dev olarak seçilmiştir. Frezeleme sırasında bir termal kamera yardımıyla kesme sıcaklıkları ölçülerek sonuçlar kayıt altına alınmıştır. Daha sonra takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgulara göre yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığında en iyi ortamın kriyo-LN₂, takım yan aşınmasında ise en iyi ortamın MMY kesme ortamı olduğu belirlenmiştir.

1. Giriş

Yüksek mukavemete sahip S960 çeliği, diğer normal mukavemetli çeliklere kıyasla yaklaşık üç kata yakın mekanik mukavemet sergileyebilen verimli bir

1 Öğr. Gör. Dr.), Bingöl Üniversitesi ORCID: 0000-0001-5177-4952, ssap@bingol.edu.tr

üründür. Üstün özelliklere sahip bu çelikler birçok makine parçası yapımında ve kaldırma ekipmanlarında başarılı bir şekilde kullanılmaktadır [1]. Yüksek dayanımlı bu çelikler spesifik martensitik-ferritik mikro yapıya sahip olduğu için üretim sırasında bazı ısıl işlemler uygulanabilmektedir [2]. Bu çelikler mükemmel mukavemet, süneklik ve tokluk gibi üstün özellikleri bir arada sunabilmektedir.

S960 çeliğinin işlenebilirliği ile ilgili yapılan çalışmalar sınırlı kalmaktadır. Özellikle yüksek mukavemete sahip bu çeliklerin sürdürülebilir koşullar altında işlenebilirliğinin araştırılması önem arz etmektedir. Yüksek mukavemete sahip çeliklerin işlenmesi sırasında kesme bölgesindeki sıcaklıklar oldukça yüksek seviyelere çıkabilmektedir [3, 4]. Bu yüksek sıcaklıklar hem malzeme yüzeyine hem de kesici takıma zarar vermektedir. Bu yüzden işleme sırasında kesme bölgesinin soğutulması gerekmektedir. Talaşlı imalat sırasında halen daha kullanılmakta olan geleneksel kesme sıvıları karbon bazlı yağlar ya da emülsiyonlardan oluşmaktadır [5]. Bu geleneksel kesme sıvıları üretim süreçlerinde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Soğutma sıvısı işleme sırasında talaşa yapışır ve bu yüzden geri dönüşüm işlemi yapılması gerekir [6]. Geleneksel soğutma sıvıları taşkın soğutma şeklinde yapıldığı için maliyetleri oldukça yüksektir ve atelyede tehlikeli madde olarak sınıflandırılmaktadır [7]. Karbon bazlı soğutma yağlarında yüksek sıcaklıklarda meydana gelen duman kansere sebep olabilmektedir. Tüm dünyada kesme sıvıları kullanılması sebebiyle birçok insanda deri hastalıklarıyla ilgili sorunlar ortaya çıkmaktadır [8]. Geleneksel kesme sıvıları ile ilgili tüm bu olumsuz nedenlerden dolayı talaşlı imalat süreçlerinde sürdürülebilir alternatif soğutma teknikleri geliştirmek için birçok araştırmacı farklı çalışmalar yapmaktadır.

Sürdürülebilir soğutma/yağlama tekniklerinden biri olan minimum miktarda yağlama (MMY) teknolojisi son yıllarda oldukça ilgi görmektedir. MMY sisteminde kesme bölgesine gönderilen soğutma sıvısı basınçlı ve pülverize bir şekilde aktarılmaktadır [9]. Böylece sis bulutu şeklindeki kesme sıvısı kesme bölgesinin her noktasına nüfuz ederek hem soğutma hem de yağlama işlemi gerçekleştirmektedir. MMY sisteminde aktarılan soğutma sıvısı çok az miktarda olduğu için maliyet açısından da oldukça verimlidir. Bu yöntem birçok araştırmacının dikkatini çekmiştir. Öndin ve ark. [10] PH 13-8 Mo paslanmaz çeliğinin işlenmesi sırasında farklı soğutma/yağlama koşullarını araştırmışlardır. MMY ortamının kuru ortamda işlemeye nazaran daha iyi sonuçlar elde ettiklerini bildirmişlerdir. Hegab ve ark. [11] Inconel 718 süperalaşımının işlenmesinde sürdürülebilir nano sıvılarla desteklenen MMY stratejisini kullanmışlardır. Abbas ve ark. [12] AISI 1045 çeliğinin işlenmesinde MMY tekniğini kullanarak çevresel etki, güç tüketimi ve yüzey pürüzlülüğü parametrelerine odaklanmışlardır. Gurraj ve ark. [13]

evrimsel algoritmalar kullanarak saf titanyum alaşımlarının MMY destekli tornalanmasında işleme özelliklerini araştırmışlardır.

Talaşlı imalat sektöründe kriyojenik soğutma tekniği son yıllarda oldukça ilgi görmektedir. Bu teknikte sıvı halde bulunan azot basınçlı bir tankta muhafaza edilmektedir. Basınçlı kaptan bir hortum yardımıyla kesme bölgesine gönderilen buhar formundaki azot yaklaşık -196° sıcaklığı sayesinde ortamı hızlı bir şekilde soğutabilmektedir [14]. Mükemmel soğutma kabiliyeti ile kriyojenik tekniği kesici takım ve malzemenin mukavemetini düşük ısılarda tutmak suretiyle uygulanan yeni bir yöntemdir [15]. Bu soğutma tekniği ile işlemeden sonra kesme bölgesinde ve talaşlar üzerinde herhangi bir kalıntı bulunmamaktadır. Bu yönüyle çevre ve insan sağlığı üzerinde etkili olan birçok olumsuz durumu bertaraf edebilmektedir. Kriyojenik soğutma yöntemini kullanarak yapılan birçok çalışma bulunmaktadır. Danish ve ark. [16] Inconel 718 süperalaşımının kriyojenik destekli sert işleme oprasyonunun çevresel, teknolojik ve ekonomik yönlerini araştırmışlardır. Dhar ve Kamruzzaman [17] AISI-4037 çeliğinin kriyojenik koşullar altında tornalanmasında kesme sıcaklığı, takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal sapma yönlerini ele almışlardır. Hong ve ark. [18] Ti-6Al-4V ve AISI 1018 yumuşak çeliğinin işlenmesinde kriyojenik soğutma tekniği kullanarak sürtünme katsayısını deneysel olarak değerlendirmişlerdir.

Bu çalışmada yüksek mukavemetli S960 çeliği farklı kesme parametreleri ve sürdürülebilir soğutma/yağlama koşulları altında frezelenmiştir. Bu doğrultuda yüzey pürüzlülüğü, takım yan aşınması ve kesme sıcaklığı analizleri yapılmıştır. Bu analizlerin temel amacı, yalnızca işleme performansı göstergelerini değil, aynı zamanda sürdürülebilir imalat hususlarını da dikkate alarak her bir soğutma yaklaşımının etkinliği hakkında net bir fikre sahip olmaktır.

2. Deneysel bölüm

Ticari olarak temin edilebilen S960 çeliği 50x50x5 mm boyutlarında kesilerek deneylerde kullanılmak üzere numaralandırılmıştır. S960 çeliğinin kimyasal bileşimi Tablo 1.'de görülmektedir.

Tablo 1. S960 çeliğinin kimyasal bileşimi

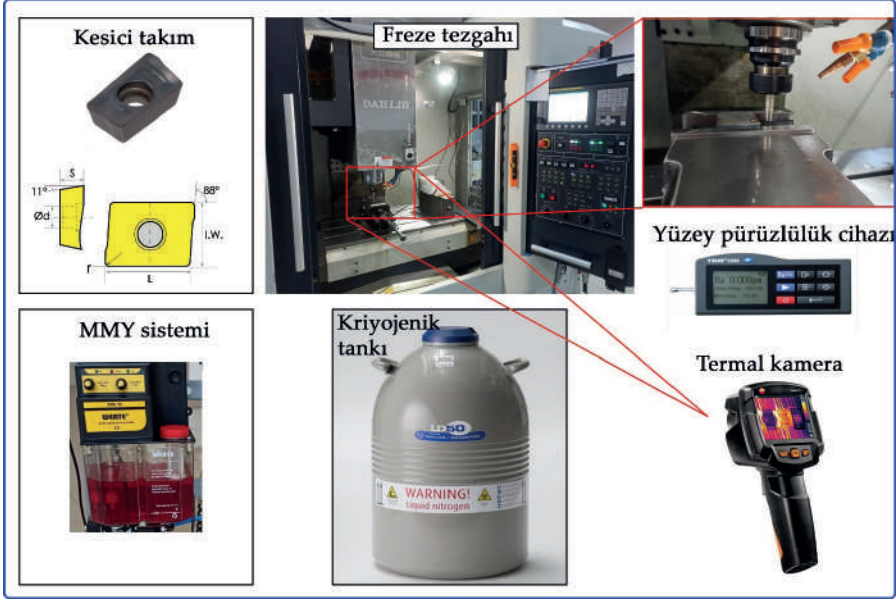
C (mak. %)	Si (mak. %)	Mn (mak. %)	Cr (mak. %)	Mo (mak. %)	P (mak. %)	S (mak. %)	Ni (mak. %)	Cu (mak. %)
0,20	0,50	1,60	0,80	0,70	0,020	0,010	2,0	0,30

Frezeleme deneyleri DAHLIH MCV-860 model üç eksenli bilgisayar kontrollü bir takım tezgahında yapılmıştır. AlTiN kaplı ISO 13399 kodlu karbür kesici uçlar kesici takım olarak kullanılmıştır. Frezeleme parametreleri olarak iki kesme hızı (125-250 m/dak), iki ilerleme hızı (0,15-0,25 mm/dev) ve tek kesme derinliği (0,50 mm) seçilmiştir. Seçilen parametreler üretici firma tavsiyeleri ve ön deneyler göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Tablo 2’de deney tasarımı görülmektedir.

Tablo 2. Ful deney tasarımı

Deney numarası	Kesme hızı (m/dak)	İlerleme hızı (mm/dev)	Kesme ortamı
1	125	0,15	Kriyo-LN ₂
2	125	0,25	Kriyo-LN ₂
3	250	0,15	Kriyo-LN ₂
4	250	0,25	Kriyo-LN ₂
5	125	0,15	MMY
6	125	0,25	MMY
7	250	0,15	MMY
8	250	0,25	MMY

Frezeleme sırasında iş parçası ile kesici takım arasında oluşan sıcaklıkların azaltılması amacıyla kriyo-LN₂ ve minimum miktarda yağlama (MMY) stratejileri uygulanmıştır. Çevre dostu soğutma/yağlama tekniklerinin işlenebilirlik üzerindeki etkileri araştırılmıştır. MMY ortamında potansiyometre kontrollü Werte Micro Stn-15 model bir cihaz kullanılmıştır. Bu cihazda kesme sıvısı olarak Cuttex Syn 5 tercih edilmiştir. Pülverize hale getirilen kesme sıvısı bir kompresör yardımıyla basınçlı olarak takım-talaş ara yüzeyine aktarılmaktadır. MMY cihazı üretici firma tavsiyeleri doğrultusunda kesme bölgesinden yaklaşık 50 mm uzaklıkta konumlandırılmıştır. Şekil 1’de deneysel kurulum verilmiştir.



Şekil 1. Deneysel kurulum

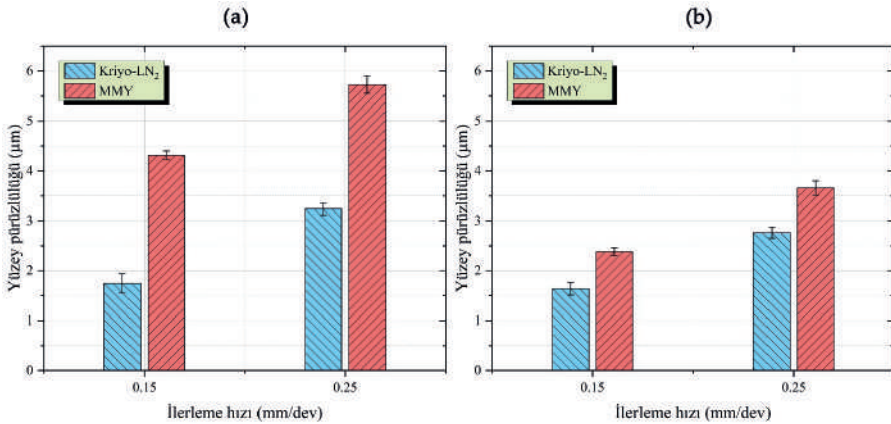
Kriyojenik soğutma/yağlama ortamında kullanılan sıvı azot yaklaşık -196 °C sıcaklığa sahiptir. 50 litre dolum kapasitesine sahip Taylor Wharton LD-50 tankında sıvı azot depolanmıştır. Sıvı azot tankından kesme bölgesine aktarım 2 metre uzunluğunda çelik bir hortum vasıtasıyla sağlanmıştır. Çelik hortum ucuna 5 mm çapında bir nozul eklenerek sistem, kesme bölgesine yaklaşık 20 cm uzaklıkta konumlandırılmıştır. Frezeleme işleminden sonra deney numunelerinin yüzey bütünlüğünü ölçmek amacıyla TIME3200 model bir yüzey pürüzlülük cihazı kullanılmıştır. Kesme bölgesinde oluşan sıcaklıkları tespit etmek amacıyla Testo871 model bir termal kamera yardımıyla ölçümler alınmıştır. Takım yan aşınma ölçümleri bir optik mikroskop cihazı yardımıyla yapılmıştır.

3. Sonuçlar ve tartışma

S960 çeliğinin iki kesme hızında (125-250 m/dak), iki ilerleme hızında (0,15-0,25 mm/dev) ve iki sürdürülebilir soğutma/yağlama koşulu (kriyo-LN₂, MMY) altında frezelenmesiyle elde edilen yüzey pürüzlülüğü, takım yan aşınma ve kesme sıcaklıkları analiz edilmiş olup sonuçlar kayıt altına alınmıştır.

3.1. Yüzey pürüzlülüğü

Yüzey pürüzlülüğü malzeme yüzeyinin tribolojik davranışlarını etkileyen önemli parametredir [19]. Yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması, takım kırılması, takım arızaları vb. işleme sırasında iş parçasının yüzey pürüzlülük profiline yansımaktadır. Optimum parça kalitesini elde etmek amacıyla imalat sonrasında yüzey, istenen pürüzlülük limitleri arasında kalmalıdır [20]. Pürüzlülük oranı yüksek olan yüzeyler daha hızlı aşınabilmektedir. Pürüzsüz yüzeylerde sürtünme daha az meydana gelmektedir. İşlenmiş bir yüzeyde oluşan düzensiz pürüzlülükler çekirdeklenme bölgeleri oluşturma eğiliminde olabilmektedir. Çekirdeklenme bölgesinde meydana gelen kırılma ve korozyon gibi olumsuz koşullar malzemenin daha fazla aşınmasına neden olabilmektedir. Şekil 2'de farklı kesme hızlarında soğutma/yağlama koşullarının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini gösteren iki boyutlu grafikler görülmektedir.



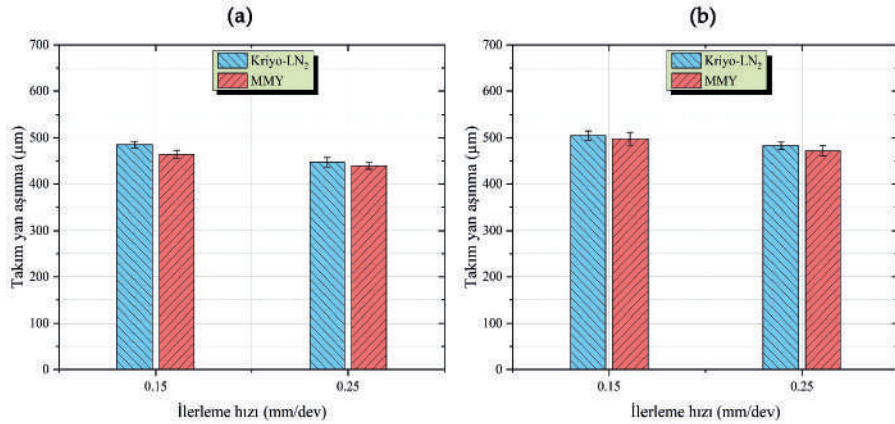
Şekil 2. Farklı kesme hızlarında soğutma/yağlama koşullarının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri; a) 125 m/dak, b) 250 m/dak.

Yüzey grafikleri incelendiğinde kriyo-LN₂ soğutma ortamında yüzey pürüzlülüğünün MMY ortamına kıyasla daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Kesme bölgesinde sürtünmeden kaynaklı yüksek ısı meydana gelmektedir. Yüksek ısı kesici takımda daha fazla aşınmaya yol açabilmektedir. Dolaylı olarak aşınan kesici takım, yüzey pürüzlülüğünü olumsuz yönde etkilemektedir. Kriyo-LN₂ soğutma tekniği ile kesme bölgesi daha fazla soğutulduğu için kesici takım aşınması azalmakta ve dolayısıyla yüzey pürüzlülüğü de azalabilmektedir. İlerleme hızının yüzey pürüzlülüğüne etkisine değinilecek olursa; tüm kesme hızlarında, ilerleme hızı arttıkça

yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmektedir. Kesme hızının 125 m/dak'dan 250 m/dak'ya çıkmasıyla yüzey pürüzlülüğünün azaldığı tespit edilmiştir.

3.2. Takım yan aşınması

Birçok makine elemanının üretiminde son şekil verme işlemi talaşlı imalat yöntemleri ile yapılmaktadır. Uygun bir yöntem seçimi parçanın geometrisine, boyutsal hassasiyetine ve yüzey özelliklerine bağlı olabilmektedir [21]. Bilgisayar sayısal kontrollü (CNC) takım tezgahları, bilgisayar destekli tasarım ve bilgisayar destekli imalat (CAD/CAM) teknolojilerinin yanı sıra yüksek işleme tekniklerinin gelişmesiyle frezeleme, vazgeçilemez bir işleme operasyonu olarak öne çıkmaktadır. Talaşlı imalat sürecinde kesici takımların geometrisinde ve iş parçası üzerinde birtakım değişiklikler meydana gelebilmektedir [22]. Takım aşınmasına yol açan tribolojik süreçler genel olarak kesici takımın üst ve yan yüzeylerinde oluşmaktadır. Takım yan aşınması kesici takımın yan yüzeyi ile iş parçası yüzeyi arasındaki sürtünmeden kaynaklanmaktadır [23]. Bu durum yan aşınmanın yanında kesme kenarının kopmasına da neden olabilmektedir. Geleneksel işleme aşamalarında takım aşınmasının üç temel aşaması bulunmaktadır. Bu aşamalar; ilk hızlı aşınma, kademeli ara aşınma ve çok hızlı aşınma (katastrofik aşınma) olarak sıralanabilmektedir. Takım aşınması kritik değere ulaştığında kesici takım, yüksek gerilimler ve artan sürtünme kuvvetlerinin neden olduğu termal ısı değişimleri nedeniyle olumsuz etkilenebilmektedir [24]. Bu olumsuz durumu bertaraf etmek amacıyla kesici takım, kritik sınıra ulaşmadan değiştirilmelidir. Şekil 3'te farklı kesme hızlarında soğutma/yağlama koşullarının takım yan aşınma üzerindeki etkilerini gösteren iki boyutlu grafikler görülmektedir. Şekillerden görüldüğü gibi MMY kesme ortamında kriyo-LN₂ kesme ortamına kıyasla takım yan aşınmasının azaldığı tespit edilmiştir. MMY ortamında soğutma/yağlama sıvısı kesme bölgesine basınçlı ve pülverize bir şekilde aktarıldığı için kesme bölgesi hem soğutulmakta hem de yağlama yapılarak sürtünme azaltılmaktadır. Böylece takım aşınması azaltılarak kesici takımın ömrü artmaktadır. 125 m/dak ve 250 m/dak kesme hızlarında, ilerleme hızlarının artmasıyla takım yan aşınma değerlerinin azaldığı görülmektedir. Ayrıca kesme hızının 125 m/dak'dan 250 m/dak'ya çıkmasıyla takım yan aşınmasının arttığı gözlemlenmiştir.

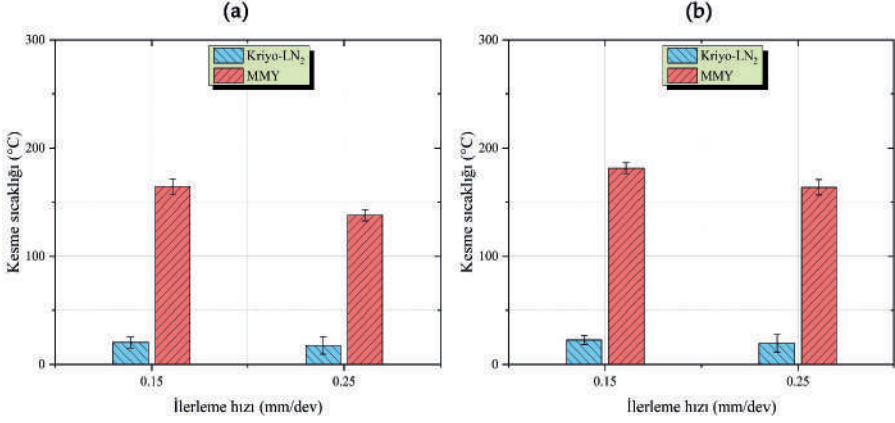


Şekil 3. Farklı kesme hızlarında soğutma/yağlama koşullarının takım yan aşınması üzerindeki etkileri; a) 125 m/dak, b) 250 m/dak.

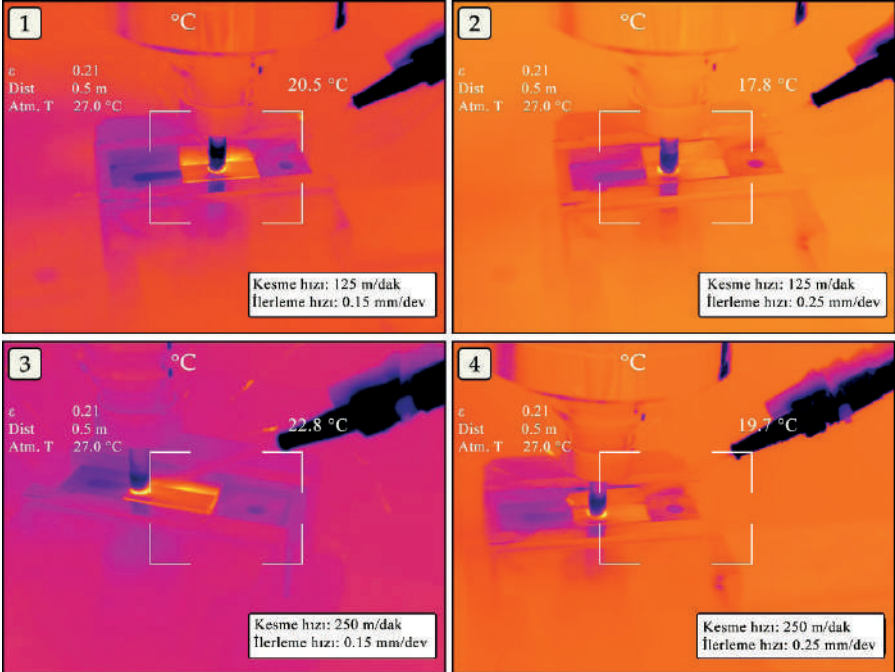
3.3. Kesme sıcaklığı

Talaşlı imalat işlemlerinde malzeme kaldırma gücündeki artış kesici takımın yan kenarlarında yüksek sıcaklıklara neden olmakta ve kesme süreçlerinde tüketilen gücün büyük bir kısmı ısıya dönüşmektedir. Kesme bölgesinde oluşan yüksek ısı kesici takım, iş parçası, talaş ve kesme sıvısı üzerine dağılır [25]. Bu nedenle kesici takımın kabul edilebilir aşınma oranlarında yüksek sıcaklıklar kontrol altında tutulmalıdır. Normal şartlarda kesici takımda meydana gelen yüksek sıcaklıklar işleme hızını sınırlayabilmektedir. Bu yüzden kesici takımlar için yüksek sıcaklık şartlarına dayanıklı yeni malzemelerin geliştirilmesi hız kazanmaktadır. Ayrıca, frezeleme gibi darbeli kesimin olduğu bazı işlemlerde, kesici takım bir termal döngüye ve mekanik şoka dayanmalı ve yüksek kesme hızlarını desteklemek için iyi bir tokluğa sahip olmalıdır. Bazı talaşlı imalat işlemlerinde kullanılan kesme sıvıları kritik öneme sahiptir ve çoğu zaman kesme sıvısı olmadan verimli bir işleme yapılamamaktadır [26]. Kesme sıvısının görevi kesici takımı, iş parçasını ve takım tezgahını soğutmaktır. Ayrıca başka bir görevi de koşullara bağlı olarak takım-talaş arayüzünde yağlayıcı özelliği göstermesidir. Şekil 4'te farklı kesme hızlarında, soğutma/yağlama koşullarının kesme sıcaklığı üzerindeki etkileri gösterilmektedir. Kriyo-LN₂ ortamında tüm kesme ve ilerleme hızlarında yapılan frezelemede kesme sıcaklığının oldukça azaldığı görülmektedir. Bunun sebebi kriyojenik soğutmada kullanılan sıvı azotun çok düşük sıcaklıklara (~ -196 °C) sahip olmasına atfedilmektedir. Kesme hızının 125 m/dak'dan 250 m/dak'ya çıkmasıyla kesme sıcaklıklarının arttığı gözlenmiştir. Ayrıca tüm kesme hızlarında ilerleme hızlarının artmasıyla

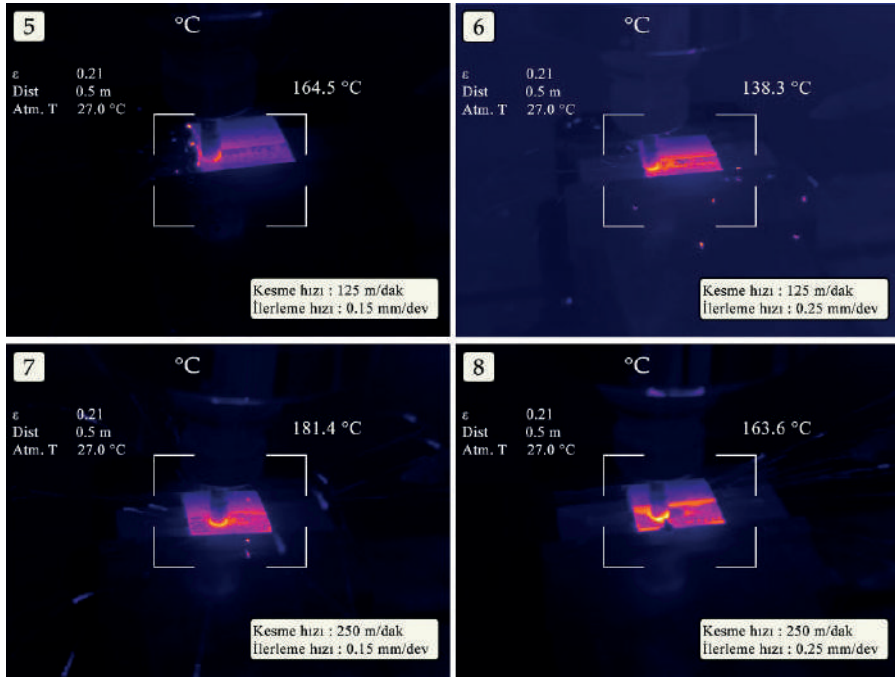
kesme sıcaklıklarının azaldığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak kriyojenik soğutma yöntemi ile kesme sıcaklıklarının oldukça azaltılabileceği ortaya çıkmaktadır. Şekil 5 ve Şekil 6'da farklı kesme ortamlarında yapılan işleme sırasında termal kamera yardımıyla elde edilen görüntüler gösterilmektedir.



Şekil 4. Farklı kesme hızlarında soğutma/yağlama koşullarının kesme sıcaklığı üzerindeki etkileri; a) 125 m/dak, b) 250 m/dak.



Şekil 5. Kriyojenik soğutma ortamında yapılan deneylerin termal kamera ile çekilen resimleri



Şekil 6. MMY soğutma ortamında yapılan deneylerin termal kamera ile çekilen resimleri

4. Sonuçlar

Bu çalışmada yüksek mukavemete sahip S960 çeliğinin farklı kesme ve ilerleme hızlarında ve sürdürülebilir kesme koşulları altında frezelenmesi araştırılmıştır. Bu bağlamda yüzey pürüzlülüğü, takım yan aşınması ve kesme sıcaklığı analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir.

Yüzey pürüzlülüğü açısından değerlendirildiğinde, kriyo-LN₂ ortamının daha verimli olduğu sonucuna varılmıştır. Tüm kesme hızlarında, ilerleme hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğünün arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca kesme hızının 125 m/dak'dan 250 m/dak'ya çıkmasıyla yüzey pürüzlülüğü MMY ortamına kıyasla azalmıştır.

MMY kesme ortamında, kriyo-LN₂ kesme ortamına kıyasla takım yan aşınmasının azaldığı belirlenmiştir. 125 m/dak ve 250 m/dak kesme hızlarında, ilerleme hızlarının artmasıyla takım yan aşınma değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Kesme hızının 125 m/dak'dan 250 m/dak'ya çıkmasıyla takım yan aşınması artış göstermiştir.

Kriyo-LN₂ ortamında tüm kesme ve ilerleme hızlarında yapılan frezelemede kesme sıcaklığının oldukça azaldığı tespit edilmiştir. Kesme hızlarının artmasıyla kesme sıcaklıklarının arttığı gözlenmiştir. Ayrıca tüm kesme hızlarında ilerleme hızlarının artmasıyla kesme sıcaklıklarının azaldığı belirlenmiştir.

Kaynakça

- [1] X. Qiang, F. S. K. Bijlaard, and H. Kolstein, "Post-fire performance of very high strength steel S960," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 80, pp. 235-242, 2013/01/01/ 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.09.002>.
- [2] W. Guo, D. Crowther, J. A. Francis, A. Thompson, Z. Liu, and L. Li, "Microstructure and mechanical properties of laser welded S960 high strength steel," *Mater. Des.*, vol. 85, pp. 534-548, 2015/11/15/ 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.07.037>.
- [3] M. Abdul Hadi, J. A. Ghani, C. H. Che Haron, and M. S. Kasim, "Effect of cutting speed on the carbide cutting tool in milling Inconel 718 alloy," *J. Mater. Res.*, vol. 31, no. 13, pp. 1885-1892, 2016/07/01 2016, doi: [10.1557/jmr.2015.380](https://doi.org/10.1557/jmr.2015.380).
- [4] Ü. A. Usca, M. Uzun, S. Şap, K. Giasin, D. Y. Pimenov, and C. Prakash, "Determination of machinability metrics of AISI 5140 steel for gear manufacturing using different cooling/lubrication conditions," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 21, pp. 893-904, 2022/11/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.09.067>.
- [5] J. Prasanna, L. Karunamoorthy, M. Venkat Raman, S. Prashanth, and D. Raj Chordia, "Optimization of process parameters of small hole dry drilling in Ti-6Al-4V using Taguchi and grey relational analysis," *Measurement*, vol. 48, pp. 346-354, 2014/02/01/ 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.11.020>.
- [6] S. Şap, Ü. A. Usca, M. Uzun, M. Kuntoğlu, and E. Salur, "Performance evaluation of AlTiN coated carbide tools during machining of ceramic reinforced Cu-based hybrid composites under cryogenic, pure-minimum quantity lubrication and dry regimes," *J. Compos. Mater.*, vol. 56, no. 22, pp. 3401-3421, 2022/09/01 2022, doi: <https://doi.org/10.1177/00219983221115846>.
- [7] F. Pusavec *et al.*, "Sustainable machining of high temperature Nickel alloy – Inconel 718: part 1 – predictive performance models," *J. Clean. Prod.*, vol. 81, pp. 255-269, 2014/10/15/ 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.040>.
- [8] M. A. Xavier and M. Adithan, "Determining the influence of cutting fluids on tool wear and surface roughness during turning of AISI 304 austenitic stainless steel," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 209, no. 2, pp. 900-909, 2009/01/19/ 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.02.068>.
- [9] Ü. Değirmenci, Ü. A. Usca, and S. Şap, "Machining characterization and optimization under different cooling/lubrication conditions of Al-4Gr hybrid composites fabricated by vacuum sintering," *Vacuum*, vol.

- 208, p. 111741, 2023/02/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2022.111741>.
- [10] O. Öndin, T. Kıvak, M. Sarıkaya, and Ç. V. Yıldırım, "Investigation of the influence of MWCNTs mixed nanofluid on the machinability characteristics of PH 13-8 Mo stainless steel," *Tribol. Int.*, vol. 148, p. 106323, 2020/08/01/2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106323>.
- [11] H. Hegab and H. A. Kishawy, "Towards Sustainable Machining of Inconel 718 Using Nano-Fluid Minimum Quantity Lubrication," *J. Manuf. Mater. Process.*, vol. 2, no. 3, doi: 10.3390/jmmp2030050.
- [12] A. T. Abbas *et al.*, "Sustainability assessment associated with surface roughness and power consumption characteristics in nanofluid MQL-assisted turning of AISI 1045 steel," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 105, no. 1, pp. 1311-1327, 2019/11/01 2019, doi: 10.1007/s00170-019-04325-6.
- [13] G. Singh *et al.*, "Investigations of Machining Characteristics in the Upgraded MQL-Assisted Turning of Pure Titanium Alloys Using Evolutionary Algorithms," *Materials*, vol. 12, no. 6, p. 999, 2019, doi: <https://doi.org/10.3390/ma12060999>.
- [14] Ü. A. Usca, S. Şap, and M. Uzun, "Evaluation of Machinability of Cu Matrix Composite Materials by Computer Numerical Control Milling under Cryogenic LN2 and Minimum Quantity Lubrication," *J. Mater. Eng. Perform.*, pp. 1-15, 2022/08/29 2022, doi: <https://doi.org/10.1007/s11665-022-07262-w>.
- [15] Chetan, S. Ghosh, and P. V. Rao, "Comparison between sustainable cryogenic techniques and nano-MQL cooling mode in turning of nickel-based alloy," *J. Clean. Prod.*, vol. 231, pp. 1036-1049, 2019/09/10/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.196>.
- [16] M. Danish, M. K. Gupta, S. Rubaiee, A. Ahmed, M. Sarıkaya, and G. M. Krolczyk, "Environmental, technological and economical aspects of cryogenic assisted hard machining operation of inconel 718: A step towards green manufacturing," *J. Clean. Prod.*, vol. 337, p. 130483, 2022/02/20/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130483>.
- [17] N. R. Dhar and M. Kamruzzaman, "Cutting temperature, tool wear, surface roughness and dimensional deviation in turning AISI-4037 steel under cryogenic condition," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 47, no. 5, pp. 754-759, 2007/04/01/ 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.09.018>.
- [18] S. Y. Hong, Y. Ding, and J. Jeong, "Experimental Evaluation of Friction Coefficient and Liquid Nitrogen Lubrication Effect in Cryogenic Machining," *Mach. Sci. Technol.*, vol. 6, no. 2, pp. 235-250, 2002/10/09 2002, doi: 10.1081/MST-120005958.

- [19] S. Şap, M. Uzun, Ü. A. Usca, D. Y. Pimenov, K. Giasin, and S. Wojciechowski, "Investigation of machinability of Ti-B-SiCp reinforced Cu hybrid composites in dry turning," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 18, pp. 1474-1487, 2022/05/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.03.049>.
- [20] W. Akhtar, J. Sun, P. Sun, W. Chen, and Z. Saleem, "Tool wear mechanisms in the machining of Nickel based super-alloys: A review," *Front. Mech. Eng.*, vol. 9, no. 2, pp. 106-119, 2014/06/01 2014, doi: 10.1007/s11465-014-0301-2.
- [21] S. A. S. Amiril, E. A. Rahim, and S. Syahrullail, "A review on ionic liquids as sustainable lubricants in manufacturing and engineering: Recent research, performance, and applications," *J. Clean. Prod.*, vol. 168, pp. 1571-1589, 2017/12/01/ 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.197>.
- [22] R. Anburaj and M. Pradeep Kumar, "Influences of cryogenic CO2 and LN2 on surface integrity of inconel 625 during face milling," *Mater. Manuf. Process*, vol. 36, no. 16, pp. 1829-1839, 2021/12/10 2021, doi: 10.1080/10426914.2021.1914850.
- [23] J. L. Cantero, J. Díaz-Álvarez, D. Infante-García, M. Rodríguez, and V. Criado, "High Speed Finish Turning of Inconel 718 Using PCBN Tools under Dry Conditions," *Metals*, vol. 8, no. 3, p. 192, 2018. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2075-4701/8/3/192>.
- [24] M. Danish, M. K. Gupta, S. Rubaiee, A. Ahmed, and M. E. Korkmaz, "Influence of hybrid Cryo-MQL lubri-cooling strategy on the machining and tribological characteristics of Inconel 718," *Tribol. Int.*, vol. 163, p. 107178, 2021/11/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107178>.
- [25] M. Bacci da Silva and J. Wallbank, "Cutting temperature: prediction and measurement methods—a review," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 88, no. 1, pp. 195-202, 1999/04/15/ 1999, doi: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00395-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00395-1).
- [26] A. K. M. K. Islam, M. Mia, and N. R. Dhar, "Effects of internal cooling by cryogenic on the machinability of hardened steel," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 90, no. 1, pp. 11-20, 2017/04/01 2017, doi: 10.1007/s00170-016-9373-y.