

Nozul Geometrisinin MQL ve Hava Soğutma Sistemlerindeki Yüzey Soğutma Performansına Etkisi

Şule Özkan^a, Anıl Gökhan Göktaş^a, Ali Taner Kuzu^{a*}

^aİşık Üniversitesi, Şile, İstanbul, 34398, Türkiye

* Corresponding author: Ali Taner Kuzu E-mail address: alitaner.kuzu@isikun.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, talaşlı imalatta sürdürülebilir soğutma–yağlama uygulamalarına yönelik olarak dört farklı nozul tasarımının soğutma performansı incelenmiştir. Karbon çelik plaka 90 °C'ye ısıtılmış ve üç farklı ortamda (MQL, basınçlı hava, CO₂) soğutulmuştur. Sıcaklık verileri, plaka üzerinde üç noktaya yerleştirilen K tipi termokupullarla kaydedilmiş ve 90 °C'den 50 °C'ye düşüş süresi performans kriteri olarak kullanılmıştır. Bulgular, MQL'de dar çıkış çaplı nozulların merkez bölgelerde, hava ve CO₂'de ise geniş çıkış çaplı nozulların daha yüksek soğutma etkinliği sağladığını göstermiştir. En kısa soğutma süreleri CO₂ ile elde edilmiş, MQL ise sınırlı soğutma kapasitesiyle en uzun süreleri vermiştir. Sonuç olarak, nozul geometrisinin ve akışkan türünün soğutma performansını belirleyen kritik faktörler olduğu ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Sürdürülebilir talaşlı imalat, Soğutma–yağlama, Minimum miktarda yağlama (MQL), Kriyojenik soğutma, Karbondioksit (CO₂), Basınçlı hava, Nozul tasarımı

1. Giriş

Günümüz imalat sektöründe talaşlı işleme süreçlerinin sürdürülebilir hale getirilmesi giderek daha kritik bir gereklilik haline gelmiştir. Talaşlı imalat, üretim maliyetlerinin önemli bir bölümünü oluşturmasının yanı sıra yüksek enerji tüketimi, atık üretimi ve çevresel etkileriyle de dikkat çekmektedir [1]. Bu süreçlerde ortaya çıkan ısı ve takım aşınmasının kontrol altına alınması için kullanılan soğutma–yağlama sistemleri tarihsel olarak verimliliğin anahtarı olmuştur. Ancak geleneksel kesme sıvılarının içerdiği kimyasalların çevre ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri, sürdürülebilir üretim hedefleri doğrultusunda yeni soğutma–yağlama yaklaşımlarının geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır [2,3].

Geleneksel kesme sıvılarının petrokimyasal içerikleri, toksik atık oluşumu ve su kirliliği gibi olumsuzlukları nedeniyle kuru ve yarı-kuru işleme yöntemleri giderek daha fazla araştırılmaktadır [4]. Kuru işleme en çevre dostu yöntemlerden biri olmakla birlikte, özellikle titanyum ve süperalaşım gibi zor işlenen malzemelerde yüksek sıcaklık ve aşınma problemleri nedeniyle sınırlı uygulama alanına sahiptir [5]. Bu bağlamda, mineral yağlar yerine biyobozunur yağlar, yüksek basınçlı hava, kriyojenik akışkanlar ve minimum miktarda yağlama (MQL) sistemleri gibi alternatif yöntemler geliştirilmiş ve talaşlı imalat süreçlerinde uygulanmaya başlanmıştır [6,7].

Bu alternatifler arasında MQL, karbondioksit (CO₂) ve sıvı azot (LN₂) gibi kriyojenik yöntemler öne çıkmaktadır. MQL, kesme bölgesine düşük miktarda yağ–hava karışımı püskürtülerek hem yağlama hem de sınırlı soğutma

sağlamaktadır [8]. Bu yöntem, kuru kesmeye kıyasla kesme kuvvetini, yüzey pürüzlülüğünü ve takım aşınmasını azaltabilmektedir [9]. Kriyojenik soğutma ise LN₂ veya CO₂ gibi akışkanlarla kesme bölgesindeki ısıyı hızla uzaklaştırmakta, böylece yüzey pürüzlülüğünde iyileşme ve takım ömründe artış sağlamaktadır [10,11]. Bununla birlikte, MQL sistemlerinde sınırlı soğutma kapasitesi, kriyojenik uygulamalarda ise ek ekipman ihtiyacı ve yağlama eksikliği dezavantaj olarak öne çıkmaktadır [12]. Bu nedenle, hibrit çözümler (ör. MQL+CO₂, MQL+LN₂) literatürde giderek daha fazla ilgi görmektedir [13].

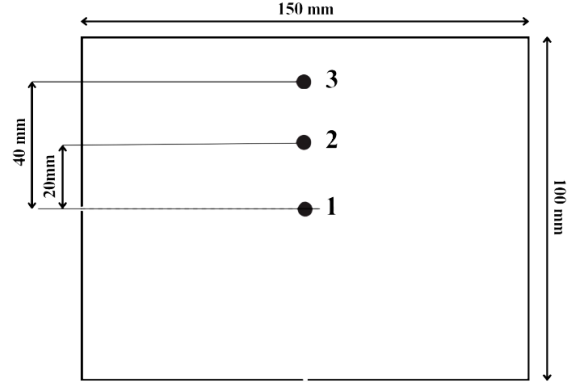
Soğutma performansının yalnızca kullanılan akışkan türüne değil, aynı zamanda bu akışkanın kesme bölgesine nasıl iletildiğine de bağlı olduğu bilinmektedir. Bu noktada nozul tasarımı kritik bir rol oynamaktadır [14]. Nozulun çıkış çapı, uzunluğu, açısı ve kesme bölgesine mesafesi akışın etkinliğini ve soğutma/yağlama performansını doğrudan etkilemektedir. Bu bağlamda, farklı nozul geometrilerinin alternatif soğutma–yağlama yöntemleri ile birlikte incelenmesi, talaşlı imalat süreçlerinin hem sürdürülebilirlik hem de verimlilik hedeflerine ulaşması açısından önem taşımaktadır.

2. Gereç ve Yöntem

Deneylerde, yüzey soğutma performansını değerlendirmek amacıyla 100 mm × 100 mm boyutlarında ve 10 mm kalınlığında karbon çelikten imal edilmiş düz bir test plakası kullanılmıştır. Plaka, alt yüzeyine doğrudan temas ettirilen sıcaklık kontrollü bir hot plate yardımıyla ısıtılmış ve her deney başlangıcında plaka sıcaklığı 90 °C'ye ulaşıncaya

kadar kontrol edilmiştir. Hedef sıcaklığa ulaşıldığında, seçilen nozul–akışkan kombinasyonu devreye alınarak soğutma işlemi başlatılmıştır.

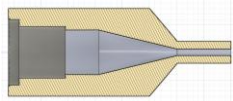
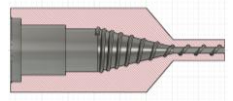
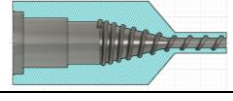
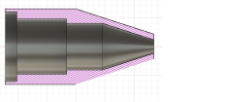
Deney düzeneği Şekil 1’de gösterilmiştir. Sistemin ana bileşenleri test plakası ve üzerine yerleştirilmiş termokupllar, plaka üzerine akış sağlayan nozullar, MQL cihazı, kompresör, PID kontrol cihazı, güç kaynağı ve veri kaydedici sistemden oluşmaktadır. Plaka sıcaklığı PID kontrol cihazı tarafından sabit tutulmuş, tüm elektriksel besleme güç kaynağı üzerinden sağlanmıştır. Basınçlı hava, kompresör aracılığıyla 6 bar basınçla sisteme iletilmiş, yalnızca hava kullanılan deneylerde doğrudan nozul girişine verilmiş, MQL uygulamasında ise MQL cihazı üzerinden geçerek sentetik kesme yağı ile karıştırılmıştır. Nozullar, plaka yüzeyine 150 mm mesafeden dik doğrultuda konumlandırılmıştır. Termokupllardan elde edilen sıcaklık verileri veri kaydedici aracılığıyla bilgisayara aktarılmış ve 1 kHz örnekleme frekansında kaydedilmiştir.



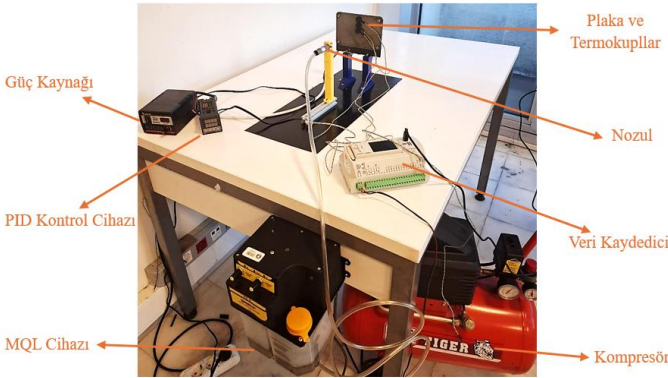
Şekil 2: Plaka ve Termokupl Konumları

Çalışmada kullanılan nozul tasarımları Tablo 1’de sunulmuştur. Tüm nozul tasarımlarında yağın doğrudan kesme bölgesine iletilmesini sağlamak üzere aksel bir iç parça bulunmakta ve bu parçanın etrafından geçirilen basınçlı hava ile yağ karıştırılarak çıkış ucundan pulverize edilmiş ince damlacıklar hâlinde püskürtülmektedir. Nozul 1, 28 mm uzunluğa ve 1.2 mm çıkış çapına sahiptir. Nozul 2, yine 28 mm uzunluğa ve 1.2 mm çıkış çapına sahip olmakla birlikte farklı bir iç kanal profili ile akışı yönlendirmektedir. Nozul 3, 28 mm uzunlukta ve 2.0 mm çıkış çapına sahip olup helisel kanal yapısı sayesinde akışa dönel hareket kazandırmaktadır. Nozul 4 ise 15 mm uzunluğa ve 2.3 mm çıkış çapına sahip olup daha kısa ve geniş kesitli bir çıkış geometrisine sahiptir.

Tablo 1. Deneysel çalışmada kullanılan nozulların geometrik özellikleri

Nozul No.	Nozul Kesit Alanı	Nozul Uzunluğu (mm)	Nozul Çıkış Çapı (mm)
1		28	1.2
2		28	1.2
3		28	2
4		15	2.3

Soğutma–yağlama sisteminde üç farklı akışkan ortamı test edilmiştir. Bunlar basınçlı hava, basınçlı karbondioksit ve hava ve yağ karışımıdır. MQL uygulamasında, taşıyıcı hava içerisine yaklaşık 50 ± 5 mL/h oranında sentetik kesme yağı enjekte edilmiş ve oluşan yağ sisi nozullar aracılığıyla



Şekil 1: Deney Düzeneği

Termokuplların plaka üzerindeki yerleşimi Şekil 2’de gösterilmektedir. Termokupl 1 püskürtme merkezine karşılık gelen plakanın ortasına, Termokupl 2 merkezden yaklaşık 25 mm uzaklıktaki ara bölgeye ve Termokupl 3 köşeye yakın, kenardan yaklaşık 10–15 mm içerideki noktaya sabitlenmiştir. Bu düzen sayesinde hem merkezdeki yoğun soğutma etkisi hem de çevresel bölgelerdeki yayılma etkisi izlenmiştir.

plaka yüzeyine püskürtülmüştür. Her iki durumda da püskürtme işlemi dik doğrultuda ve 150 mm sabit mesafeden gerçekleştirilmiştir.

Deney prosedüründe, soğutma performansı plaka yüzey sıcaklığının 90 °C'den 50 °C'ye düşmesi için geçen süreye göre değerlendirilmiştir. Her bir konfigürasyon için, çelik plaka yüzeyindeki üç farklı noktadan elde edilen sıcaklık–zaman verileri analiz edilmiş; 90 °C'den 50 °C'ye düşüş süreleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, her bir nozulun oluşturduğu soğutma etkisinin yüzeydeki yayılım karakteristiği, boya içeren püskürtme yöntemi ile görsel olarak belirlenmiş ve ilgili çaplar ölçülmüştür. Bu kapsamda, hem zamana bağlı soğuma eğrileri hem de alan etkisine dayalı karşılaştırmalar yapılarak, nozul geometrisinin ve akışkan türünün soğutma etkinliği üzerindeki bireysel ve birleşik etkileri detaylı biçimde ortaya konmuştur.

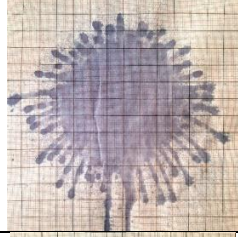
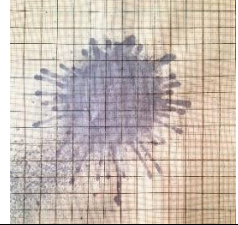
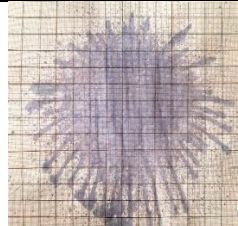
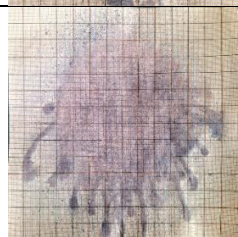
3. Bulgular

Bu bölümde, farklı nozul geometrileri ve uygulanan üç ayrı akışkan ortamının (yalnızca hava, MQL ve CO₂) yüzey soğutma performansı üzerindeki etkilerine ait deneysel bulgular sunulmaktadır.

3.1 Nozulların Soğutma Etki Alanı Karşılaştırması

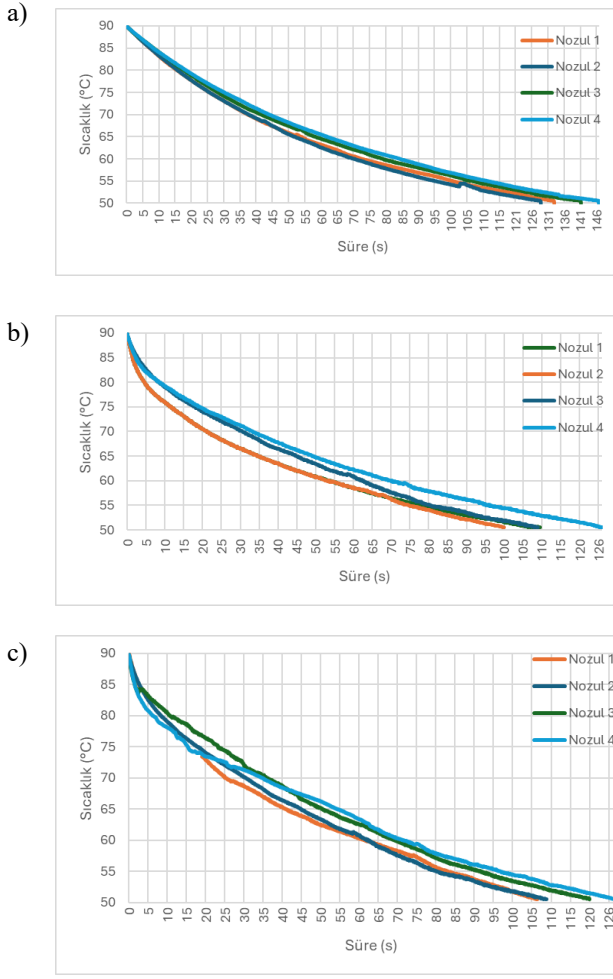
Tablo 2'de farklı nozul tasarımlarının yüzey üzerinde oluşturduğu püskürtme yayılımı ve buna karşılık gelen ıslaklık çapları sunulmaktadır. Bulgulara göre, Nozul 2 en küçük çapı (55 mm) üretmiş ve dar bir etki alanında yoğun soğutma sağlamıştır. Buna karşın, Nozul 4 en geniş yayılımı (90 mm) göstermiş, kısa ve geniş çıkış geometrisi nedeniyle akışı yüzey üzerinde daha geniş bir alana dağıtmış ancak merkezdeki yoğunluğu azaltmıştır. Nozul 1 (70 mm) ve Nozul 3 (80 mm) orta seviyede geniş alanlar oluşturmuş olup, özellikle helisel kanal yapısına sahip Nozul 3'ün akışa döne hareket kazandırması sayesinde daha homojen bir dağılım elde edilmiştir. Bu sonuçlar, nozul geometrisinin yalnızca soğutma süresini değil, aynı zamanda yüzeydeki yayılım karakteristiğini de doğrudan etkileyen belirleyici bir faktör olduğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 2. Farklı nozul geometrilerinin çıkış çapı ve oluşturduğu ıslaklık çapları

Nozul No.	Islaklık Çapı (mm)	Bulguların Görüntüsü
1	70	
2	55	
3	80	
4	90	

3.2 Farklı Akışkan Uygulamalarında Nozulların Soğutma Performansları

MQL koşullarında gerçekleştirilen deneylerde, nozulların soğutma performansları plaka yüzeyine yerleştirilen üç farklı termokupl'dan elde edilen sıcaklık–zaman verileriyle değerlendirilmiştir. Şekil 3'te sunulan eğriler ve Tablo 3'deki soğuma süreleri incelendiğinde, Nozul 2'nin Termokupl 1 ve Termokupl 2 bölgelerinde en iyi soğutma performansını gösterdiği, Termokupl 3 konumunda ise Nozul 1'in daha etkin sonuçlar verdiği görülmektedir. Bu durum, benzer çıkış çapına sahip olmalarına rağmen Nozul 2'nin helisel iç yapısı sayesinde akışı daha odaklı yönlendirmesi, Nozul 1'in ise daha geniş püskürtme alanı sağlamasıyla açıklanabilir. Dolayısıyla, MQL sisteminde dar çıkış çaplı nozullar merkez bölgelerde daha avantajlı, geniş yayımlı nozullar ise çevresel bölgelerde daha etkilidir.



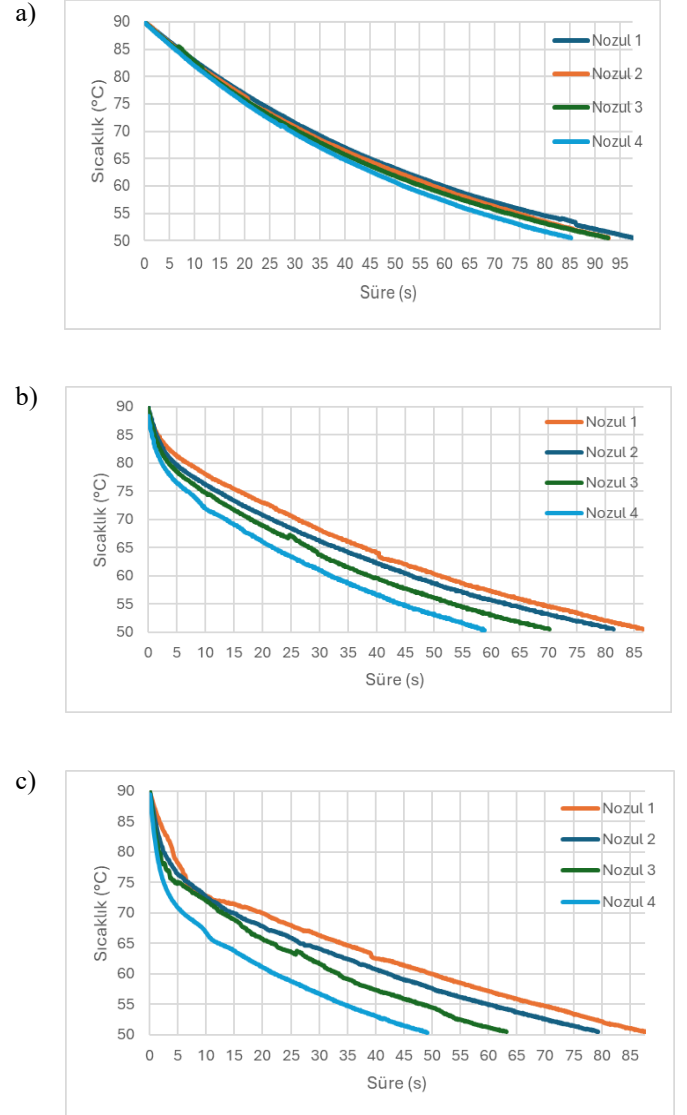
Şekil 3: MQL ile Yapılan Testlerde sıcaklık dağılımları a)TC1, b)TC2 ve c)TC3

Tablo 3. MQL ile yapılan testlerde termokuplların soğuma süreleri

Nozul	TC1 (saniye)	TC2 (saniye)	TC3 (saniye)
1	132	109	107
2	128	100	110
3	140	109	121
4	145	127	127

Yalnızca basınçlı hava ile yapılan testlerde elde edilen sıcaklık–zaman eğrileri Şekil 4’de, soğuma süreleri ise Tablo 4’te sunulmaktadır. Bulgulara göre, Nozul 4 tüm termokupl konumlarında en kısa soğuma süresini sağlayarak en yüksek performansı göstermiştir. Özellikle Termokupl 3 bölgesinde 49 s ile en hızlı düşüş elde edilmiştir. Nozul 3 de merkezden uzak noktalarda (Termokupl 2 ve 3) yüksek soğutma etkinliği sağlamış, buna karşılık Nozul 1 ve Nozul 2 daha düşük performans göstermiştir. Bu sonuç, hava uygulamalarında geniş çıkış çapına sahip nozulların daha yüksek debi ile daha geniş alanı etkileyerek ısı transferini

hızlandırdığına işaret etmektedir. Ayrıca genel karşılaştırmada, hava ile yapılan soğutmanın MQL’ye kıyasla daha kısa sürede gerçekleştiği görülmüştür.



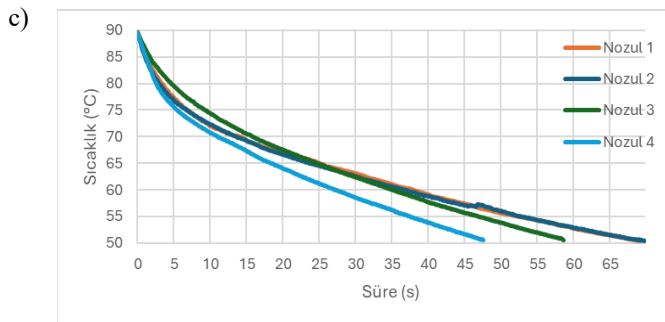
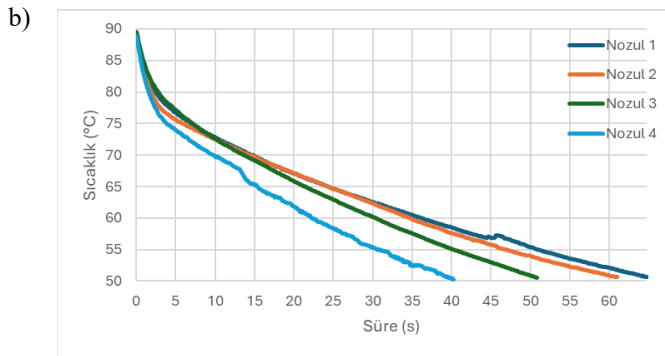
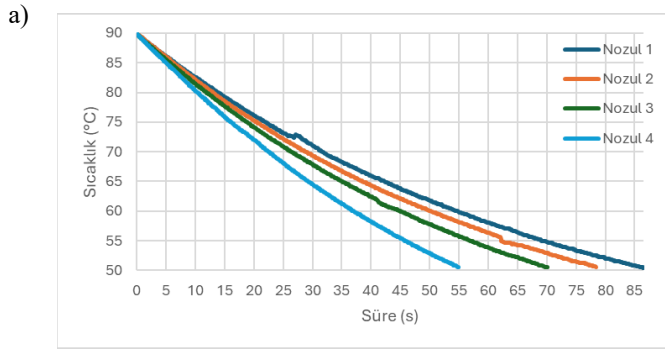
Şekil 4: Hava ile Yapılan Testlerde sıcaklık dağılımları a)TC1, b)TC2 ve c)TC3

Tablo 4. Hava ile yapılan testlerde termokuplların soğuma süreleri

Nozul	TC1 (saniye)	TC2 (saniye)	TC3 (saniye)
1	98	82	80
2	94	87	88
3	93	70	63
4	85	59	49

CO₂ kullanılan deneylerde ise soğutma performansının diğer iki ortama kıyasla belirgin şekilde daha yüksek olduğu

tespit edilmiştir. Şekil 5 ve Tablo 5 incelendiğinde, Nozul 4'ün tüm termokupl konumlarında en kısa sürede (55 s, 41 s ve 47 s) 90 °C'den 50 °C'ye düşüşü sağladığı, dolayısıyla en yüksek soğutma kapasitesini sunduğu belirlenmiştir. Nozul 3 de benzer şekilde yüksek performans göstermiş, ancak Nozul 1 ve 2 daha uzun soğuma süreleri ile sınırlı etki sağlamıştır. CO₂ testlerinde elde edilen sıralamanın hava deneyleri ile büyük ölçüde benzerlik göstermesi, akışkan tipinden bağımsız olarak nozul geometrisinin performans üzerinde belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, CO₂'nin hava ve diğer akışkanlara göre daha iyi soğutma sağlamanın temel nedenlerinden biri Joule–Thomson etkisidir. Yüksek basınçlı tüpte bulunan CO₂, nozul çıkışında 6 bar seviyelerine düştüğünde genişleme sonucu sıcaklığı önemli ölçüde azalır. Bu ek soğuma etkisi, deneylerde CO₂'nin üstün soğutma performansı sergilemesinde kritik rol oynamaktadır.



Şekil 5: CO₂ ile Yapılan Testlerde sıcaklık dağılımları
a)TC1, b)TC2 ve c)TC3

Tablo 5. CO₂ ile yapılan testlerde termokuplların soğuma süreleri

Nozul	TC1 (saniye)	TC2 (saniye)	TC3 (saniye)
1	86	61	68
2	78	65	68
3	70	51	58
4	55	41	47

Genel olarak değerlendirildiğinde, MQL deneylerinde dar çıkış çaplı nozullar (Nozul 1 ve 2) merkez bölgelerde daha yüksek etkinlik göstermiş, hava ve CO₂ deneylerinde ise geniş çıkış çapına sahip nozullar (Nozul 3 ve 4) daha hızlı soğutma sağlamıştır. Ayrıca üç akışkan ortamı kıyaslandığında, en kısa soğuma sürelerinin CO₂, ardından hava ve en uzun sürelerin MQL koşullarında elde edildiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu bulgular, soğutma performansının hem akışkan türüne hem de nozul geometrisine bağlı olarak değiştiğini ve uygulama koşullarına göre en uygun nozul–akışkan kombinasyonunun seçilmesinin kritik önem taşıdığını göstermektedir

Tablo 6: Nozulların maximum hız değerleri

Nozzle No.	Hava (m/s)	CO ₂ (m/s)
1	877	709
2	896	733
3	993	821
4	1018	843

Tablo 6'da verilen maksimum hız değerleri, dört farklı nozul tasarımı için hem hava hem de CO₂ akışkanları kullanılarak yapılan sayısal analizlerin sonuçlarını göstermektedir. ANSYS Fluent ortamında yürütülen bu analizlerde, akış alanındaki türbülanslı davranışı en doğru şekilde yansıtmak amacıyla k-ε modeli tercih edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, nozulların çıkış geometrisine bağlı olarak hızların belirgin şekilde değiştiğini ortaya koymaktadır. Örneğin, hava akışında en yüksek hız Nozul 4 ile 1018 m/s'ye ulaşırken, en düşük hız Nozul 1'de 877 m/s olarak hesaplanmıştır. Benzer eğilim CO₂ için de geçerli olup, hız değerleri 709 m/s ile 843 m/s arasında değişmektedir. Bu farklılık, dar çıkış çapına sahip nozulların akışı daha odaklı ancak nispeten düşük hızlarda yönlendirdiğini, geniş çıkış çapına sahip nozulların ise daha yüksek hızlara ulaşarak çıkış kesitinde daha fazla momentum transferi sağladığını göstermektedir. Dolayısıyla, sayısal modellemeler hem akışkan tipine hem de nozul geometrisine bağlı olarak çıkış hızlarının farklılık gösterdiğini, bu parametrelerin soğutma etkinliği üzerinde kritik rol oynadığını doğrulamaktadır.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, farklı geometrilere sahip dört nozulun soğutma performansı üç ayrı akışkan ortamında (MQL, yalnızca hava ve yalnızca CO₂) deneysel olarak incelenmiş,

bulgular sayısal analizlerle desteklenmiştir. Elde edilen sonuçlar, soğutma performansının hem kullanılan akışkan türüne hem de nozul geometrisine bağlı olarak önemli ölçüde değiştiğini göstermektedir.

MQL uygulamalarında, dar çıkış çapına sahip nozullar (Nozul 1 ve 2) merkez bölgelerde daha etkin sonuçlar üretmiş, buna karşılık daha geniş püskürtme açısına sahip Nozul 1 çevresel bölgelerde üstünlük sağlamıştır. Yalnızca hava kullanılan deneylerde, geniş çıkış çapına sahip nozullar (Nozul 3 ve özellikle Nozul 4) daha kısa soğuma süreleriyle öne çıkmış ve konvektif soğutma mekanizmasıyla yüksek performans sergilemiştir. CO₂ ile yapılan deneylerde ise, tüm akışkan ortamları arasında en hızlı soğuma süreleri elde edilmiş, özellikle Nozul 4 tüm ölçüm noktalarında en yüksek soğutma kapasitesini göstermiştir.

Ayrıca, ANSYS Fluent ile gerçekleştirilen analizlerden elde edilen maksimum hız değerleri de bu bulguları desteklemektedir. Sayısal sonuçlar, nozul çıkış hızlarının hem akışkan tipine hem de nozul geometrisine bağlı olarak değiştiğini ve geniş çıkış çaplı nozulların daha yüksek hızlara ulaştığını ortaya koymuştur.

Genel olarak, bu çalışma nozul geometrisinin, akışkan tipinin ve püskürtme özelliklerinin yüzey soğutma performansı üzerinde kritik rol oynadığını göstermektedir. Sonuçlar, sürdürülebilir üretim uygulamalarında, enerji tüketimini azaltırken etkili ısı yönetim sağlayacak uygun nozul-akışkan kombinasyonlarının seçilmesine yönelik değerli bir yol haritası sunmaktadır.

Referanslar

1. Hegab, H., Kishawy, H. A., & Darras, B. (2019). Sustainable cooling and lubrication strategies in machining processes: a comparative study. *Procedia Manufacturing*, 33, 786-793.
2. Roy S, Das A, Kumar R, Das SR, Rafiqi M, Sharma P. Exploring the viability of alternative cooling-lubrication strategies in machining processes: A comprehensive review on the performance and sustainability assessment. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2025 Feb;239(3):307-49.
3. Khatai S, Sahoo AK, Kumar R, Panda A. Recent research progress on various cooling and lubrication techniques used in sustainable hard machining: A comprehensive review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2024 Dec;238(6):3009-53.
4. Pereira LB, Sad CM, Castro EV, Filgueiras PR, Lacerda Jr V. Environmental impacts related to drilling fluid waste and treatment methods: A critical review. *Fuel*. 2022 Feb 15;310:122301.
5. Pawanr S, Gupta K. Dry machining techniques for sustainability in metal cutting: a review. *Processes*. 2024 Feb 19;12(2):417.
6. Goindi GS, Sarkar P. Dry machining: a step towards sustainable machining—challenges and future directions. *Journal of cleaner production*. 2017 Nov 1;165:1557-71.
7. Said Z, Gupta M, Hegab H, Arora N, Khan AM, Jamil M, Bellos E. A comprehensive review on minimum quantity lubrication (MQL) in machining processes using nano-cutting fluids. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019 Dec;105(5):2057-86.
8. Singh T, Singh P, Dureja JS, Dogra M, Singh H, Bhatti MS. A review of near dry machining/minimum quantity lubrication machining of difficult to machine alloys. *International journal of Machining and Machinability of Materials*. 2016;18(3):213-51.
9. Danish M, Gupta MK, Rubaiee S, Ahmed A, Korkmaz ME. Influence of hybrid Cryo-MQL lubri-cooling strategy on the machining and tribological characteristics of Inconel 718. *Tribology International*. 2021 Nov 1;163:107178.
10. Yildiz Y, Nalbant M. A review of cryogenic cooling in machining processes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2008 Jul 1;48(9):947-64.
11. Şirin E. Evaluation of tribological performance of MQL technique combined with LN₂, CO₂, N₂ ecological cooling/lubrication techniques when turning of Hastelloy C22 superalloy. *Tribology International*. 2023 Oct 1;188:108786.
12. Suresh R, Basavarajappa S, Gaitonde VN, Samuel GL, Davim JP. State-of-the-art research in machinability of hardened steels. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2013 Feb;227(2):191-209.
13. Yaqoob S, Ghani JA, Juri AZ, Muhamad SS, Haron CH, Jouini N. A review of sustainable hybrid lubrication (Cryo-MQL) techniques in machining processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024 Mar;131(1):151-69.
14. Gariani S, Sultan A, Jegandi K, Dao T. Applications of cooling and lubrication nozzles in grinding, milling, and turning: A review emphasising nozzle design, location and orientation.