

Sonlu Elemanlar Yöntemi Kullanılarak Ti-6Al-4V'nin Yüksek Hızlı Mikro Frezelenmesinde Kesme Kuvvetlerinin İncelenmesi

Aybars MAHMAT*¹

¹ Munzur University, Faculty of Engineering, Mechanical Engineering, Tunceli, Turkey (ORCID: 0000-0001-9261-0620),
aybarsmahmat@munzur.edu.tr

(Received: 12 November 2024, Accepted: 16 November 2024)

(3rd International Conference on Contemporary Academic Research ICCAR 2024, 10-11 November 2024)

ATIF/REFERENCE: Mahmat, A. (2024). Sonlu Elemanlar Yöntemi Kullanılarak Ti-6Al-4V'nin Yüksek Hızlı Mikro Frezelenmesinde Kesme Kuvvetlerinin İncelenmesi, *International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches*, 8(10), 196-203.

Özet – Bu çalışmada Ti6Al4V alaşımının mikro frezelenmesinde kesme hızı, ilerleme hızı ve soğutma yönteminin kesme kuvvetine olan etkileri deneysel ve sayısal olarak belirlenmiştir. Ti6Al4V alaşımlarının geleneksel soğutma yöntemleriyle işlenmesi işlenebilirliği kısıtlamaktadır. Bu çalışmanın amacı Ti6Al4V alaşımını farklı soğutma yöntemleri (minimum miktarda yağlama(MMY) ve kuru) ve işleme parametrelerinin uygulanmasıyla işlenebilirliğini artırmaktır. İşleme parametreleri, kesme hızı (25000, 30.000 ve 35.000 rpm), ilerleme hızı (0,12, 0,15 ve 0,175 mm/dev) ve kesme derinliği (0,02 mm) olarak seçilmiştir. Bu çalışma sonucunda deneysel sonuçların sonlu elemanlar analizi sonuçlarına oldukça yakın olduğu belirlenmiştir. MMY soğutma yöntemi kuru işlemeye göre hem deneysel hem de analiz sonuçlarına göre kesme kuvvetini azaltmıştır. Kesme hızının artması kesme kuvvetini azaltırken ilerleme hızının artması kesme kuvvetini artırmıştır.

Anahtar Kelimeler:

I. GİRİŞ

Son yıllarda üretimde alaşım ve kompozit malzemelerin geliştirilmiştir. Bu malzemelerin geleneksel yöntemlerle işlenmesi esnasında zaman, boyut, yüzey kalitesi ve maliyet yönünden iyileştirme için yüksek kesme hızlarına çıkılması gerekmektedir. Üretim maliyetlerini düşürmesinden dolayı, son zamanlarda çelik ve titanyum alaşımlarının yüksek hızla üretimi/kesilmesi (YHÜ/K) gittikçe artan bir kabul görmektedir (Gong vd., 2017). Yüksek kesme hızları geleneksel yöntemlere göre maliyet yönünden daha avantajlıdır. Ayrıca iş parçasının yüzey pürüzlülüğü geleneksel yöntemlere göre daha düşük elde edilmektedir (Bandapalli vd., 2017). Kesme hızının yüksek olması kesme bölgesinde yüksek sıcaklık oluşturur. Bu durum kesici takımında aşınmalar oluşturarak işlenebilirliği azaltır. Yapılan çalışmalarda, kalıp üretiminde kullanılan dökme demir, çelik ve Ti6Al4V alaşımlarının farklı kesici takımlarla yüksek kesme hızlarında frezelenmesinde, kesme hızının artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün azaldığı görülmüştür (Ghoreishi vd., 2018; Molaiekiya vd., 2020; Thi-Hoa vd., 2018). Titanyum ve alaşımlarıyla yapılan bir çalışmada, iş mili hızını 30.000'den 70.000'e yükselterek ve ilerleme hızı ve derinliğinin sabit tutularak yapılan mikro frezeleme de takım aşınmasını azalttığı görülmüştür (Bandapalli vd., 2018).

Titanyum ve alaşımları gibi sert malzemelerin işlenmesi, yüksek tokluk, düşük ısı iletkenliği ve yüksek sıcaklıklarda yüksek kimyasal reaktivite nedeniyle işlenmesi zordur. Olağanüstü mükemmel korozyon

direnci ve ağırlık oranına göre yüksek mukavemeti nedeniyle , Ti-6Al-4V alaşımı havacılık, uzay ve biyomedikal endüstrilerinde çeşitli işlenmiş parçalar üretmek için yaygın olarak kullanılmaktadır (Bogdan-Chudy vd., 2022). Bu nedenle, yüksek verimlilikle işlenmeleri endüstri için çok önemli bir konudur (Gaurav vd., 2021). Ancak düşük ısı iletkenliği , yüksek kimyasal reaktivite ve faz dönüşümünün varlığı Ti-6Al-4V alaşımının işlenmesini zorlaştırır (Jamil vd., 2021). Titanyum alaşımları yüksek hızlarda işlenmesi sorunlu olabilir. Bunun nedeni düşük termal iletkenliğe sahip olmalarından dolayı kesici takımın reaksiyona girme eğiliminde olmalarıdır (Lu vd., 2020). Talaşlı imalatta performans karakteristikleri üzerine olan etkisi nedeniyle yüksek hızlı frezeleme son dönemlerde popüler olmuştur (Li vd., 2018). Yüksek hızlı frezeleme, havacılık, otomotiv, uçak ve kalıp yapım endüstrilerinde üretkenliği artırmak ve aynı anda nihai ürünlerin yüzey kalitelerini iyileştirmek için yaygın olarak kullanılan en uygun maliyetli ve verimli modern üretim teknolojilerinden biridir. Ancak Ti-6Al-4V alaşımının yüksek hızlı frezelenmesi termal gerilimlere ve aşırı sıcaklıklara neden olur. Bu olumsuzlukların sebebi iş parçasının plastik deformasyonu ve kesme bölgesinde oluşan aşırı sürtünmedir (Ramoni vd., 2021).

Talaşlı imalatta işlenebilirlik kesme bölgesinde oluşan sıcaklığa, yüzey pürüzlülüğüne, kesme kuvvetine takım ömrüne ve kesme bölgesinde oluşan gerilmelere bağlıdır. İşlenebilirliğin araştırılmasında yapılan deneysel çalışmalar sonuçların doğruluğu bakımından avantajlıdır. Ancak maliyet ve zaman kaybına neden olmaktadır (Shatla vd., 2001; Yadav vd., 2015). Deneysel çalışmalar yerine yaklaşık çözüm yöntemleri uygulanmaya başlanmıştır. Bu yöntemlerden biri olan sonlu elemanlar metodu deneysel sonuçlara yakın sonuçlar vermesinden dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar metoduyla çalışan Deform ve Ansys ve benzeri uygulamalar kesme parametrelerine göre modelleme yaparak performans karakteristiklerini belirlemektedir. 2D FEM modelleri, ortogonal kesme işlemi araştırmaları için oldukça yararlı olduğunu kanıtlamıştır. FEM simülasyonunun sonuçları, takım geometrisi ve işleme parametrelerinin optimizasyonu için bir temel oluşturmuştur (Tamang vd., 2020). Davoudinejad vd. (Davoudinejad vd., 2017), çapak oluşumunu, talaş akışını ve kesme kuvvetlerini tahmin etmek için helis açısını ve kesici kenar yarıçapını değiştirerek Al6061-T6 üzerinde 3B-FEM analizi gerçekleştirdiler ve giriş ve üstteki bir çapağın boyutunun ilerleme hızı tarafından abartıldığı ve hem FEM hem de deneysel kesme kuvveti profillerinin ilerleme ve enine yönlerde eşleştiği sonucuna vardılar. Frezeleme yöntemiyle yapılan bir çalışmada, işleme esnasında oluşan kuvvet değerlerinin deneysel ve analizleri incelenmiştir. Çalışma sonucunda deneysel ve sonlu eleman analizi sonuçları %85 yakın olduğu görülmüştür. Ayrıca talaş formunun deneysel çalışmanın ve sonlu elemanlar analizi sonucuyla tutarlı olduğu görülmüştür (Babitsky vd., 2004).

Bu çalışmanın amacı, Ti6Al4V alaşımının mikro frezelenmesinde kesme hızı, ilerleme hızı ve soğutma yönteminin kesme kuvvetine olan etkilerini belirlemektir. Bu bağlamda deneysel ve sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

Deneysel çalışmalarda 400x900x5 mm boyutlarında Ti6Al4V titanyum alaşımlı numuneler kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan Ti6Al4V alaşımının mekanik ve kimyasal özellikleri Tablo 1’de verilmiştir. Kesici takım olarak 1 mm çapında, TiSiN bazlı preventa kaplamalı kesici uç kullanılmıştır. Kesme parametrelerinin etkilerinin değerlendirilmesi için üç farklı kesme hızı (25000, 30000, 35000 rpm), üç farklı ilerleme hızı (0,12, 0,15, 0,175 mm/dev) ve iki soğutma yöntemi (geleneksel, MMY) olmak üzere 18 adet deney gerçekleştirilmiştir. Deneyde kullanılan parametreler Tablo 2’de verilmiştir. Şekil 1’de deney düzeneği verilmiştir. Kesme kuvvetlerini ölçmek için dinamometre (ME-SYSTEME-K3D160; Germany) kullanılmıştır. MMY yönteminde WERTE marka STN 40 model MMY ünitesi kullanıldı. Kesme sıvısı hazırlama işlemlerinde 1/20 oranında boraks-etilen glikol karışımı içerisine hacimce % 1 oranında nano boyutlu Al2O3 partikül eklendi. Karışımdaki Al2O3 nano partiküller 50-100 nm

boyutlarındadır. Sonlu elemanlar analiz yöntemi kullanarak çözüm yapan DEFORM paket programında, kesme işleminin simülasyonu yapılmıştır. DEFORM 3D V10 paket programıyla kesme kuvvetleri sayısal olarak tespit edilmiştir. Analiz çalışmalarında SI birimi kullanılmıştır. İşleme parametreleri programın işlem kurulum bölümünde analiz programına tanıtılmıştır. Soğutma yönteminin ısı taşınım ve sürtünme katsayıları ilgili literatür araştırmalarından ve deneysel sonuçlardan belirlenerek programın işlem koşulları panelinde soğutma yöntemleri (soğutma sınır şartları) modellenmiştir. Programda, iş parçası plastik ve kesici takım ise rijit olarak modellenmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan kesici takım, olabildiğince gerçeğine uygun bir şekilde SolidWorks programında modellenerek, Deform 3D V10 paket programına eklenmiştir. İş parçasının modellenmesinde Johnson-Cook (JC modeli) malzeme modeli kullanılmıştır. Programdaki malzeme kütüphanesinde iş parçası malzeme modelinin olmaması nedeniyle Ti6Al4V alaşımı için yeni bir malzeme modeli tanımlanmıştır. İş parçası malzemesi, izotropik sertleştirme ile elasto-plastik olarak modellenip ve akış gerilimi, JC modeli yapıcı modeline göre gerinim, gerinim hızı ve sıcaklığın fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. JC modeli, yüksek gerinim ve gerinim oranlarını içeren mekanik süreçleri modellemek için çok kullanışlıdır. JC modeli, iş parçası malzemelerinin akış gerilimi davranışını gerinim, gerinim hızı ve sıcaklığın çarpan etkileri olarak değerlendiren bir modeldir.

$$\sigma = (A + B \cdot \epsilon_n) \cdot [1 + C \cdot \ln(\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0)] \cdot [1 - ((T - T_r) / (T_m - T_r))^m]$$

burada A ve B, sırasıyla oda sıcaklığında (Tr) malzemenin başlangıç akma gerilmesi ve gerinim sertleşme katsayısıdır. ε, n, C ve m sırasıyla eşdeğer plastik gerinim, gerinim sertleşme katsayısı, gerinim hızı duyarlılığı ve ısı yumuşama katsayısıdır. T, mutlak sıcaklıktır ve Tm, malzemenin erime sıcaklığıdır. Ti6Al4V alaşımının mekanik özellikleri Tablo 4 verilmiştir.

Tablo 1. Ti6Al4V alaşımının mekanik özellikleri ve kimyasal bileşimi

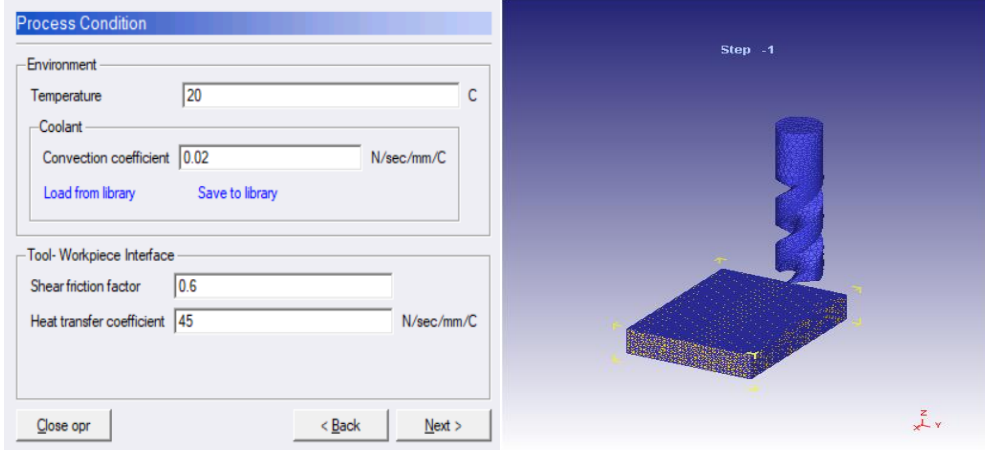
Özellikler	Değerleri
Akma Gerilmesi (A)	782,7 MPa
Gerinim Sertleşmesi Katsayısı (B)	498,4 MPa
Gerinim Hızı Sabiti(C)	0,028
Mutlak Sıcaklık (T)	273 K
Erime Sıcaklığı (Tm)	1860 K
Isıl Yumuşama Katsayısı (m)	1
Young Modülü	110 GPa
Poisson Oranı	0,22
Gerinim Sertleşme Sabiti (n)	0,28

Tablo 2. Deneysel parametreler

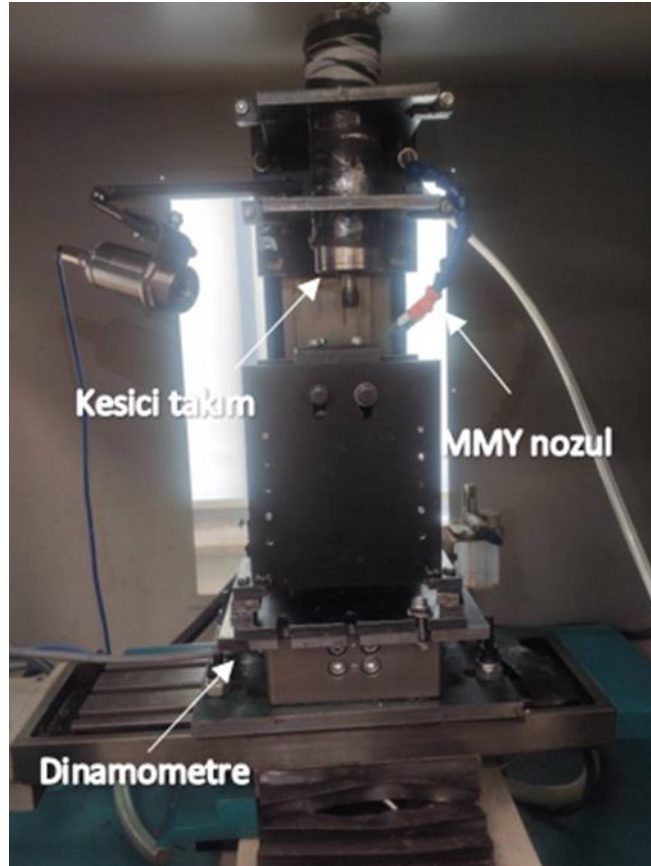
Parametre	Birimler	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Kesme hızı	rpm	25000	30000	35000
Soğutma yöntemi	-	Kuru	MMY	
İlerleme hızı	(mm/dev)	0,12	0,15	0,175
Kesici takım çapı	(mm)	1		

Soğutma sıvısının ısı taşınım katsayısı sınır şartları sonlu elemanlar analiz programına tanıtıldı. Kuru işleme şartlarında kesici takım ve iş parçası arasındaki sürtünme katsayısı 0,6, durgun hava için ısı taşınım katsayısı 0,0263 W/m. oK olarak alındı (Hadad & Sadeghi, 2012). Hacimsel %1 Al2O3 katkı

emülsiyon yağlayıcı boraks-etilen glikol karışımı ile yapılan MMY için ısı taşınım katsayısı sınır şartı olarak $0,92 \text{ W/m} \cdot \text{oK}$ (Sharma vd., 2016).



Şekil 1. Deform ara yüzü



Şekil 2. Deney düzeneği

III. ARAŞTIRMA VE BULGULAR

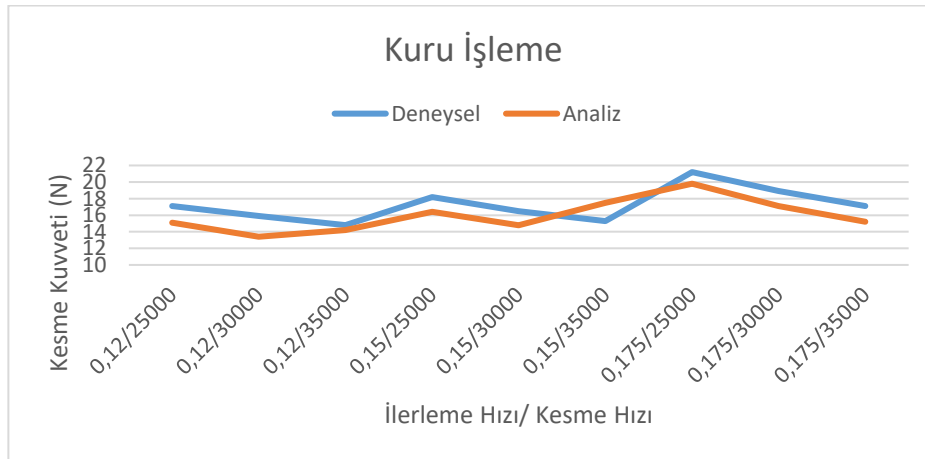
Kesici takım çeşitli koşullar altında simüle edilmiş ve ana kesme kuvvetleri tahmin edilmiştir . İş parçası ve kesici takımın temas başlangıç noktasına uygulanan çok ince mesh yapısıyla iş parçası malzemesi ile kesici takım düğüm noktalarının örtüşmesi önlenmeye çalışıldı. Kesme bölgesi mesh boyutu kesici takımın uç yarıçapından küçük seçilerek analiz çalışmaları yapıldı. Mesh yapısı ince tutularak yapılan

analizlerde deneyler erken aşamada sonlanarak sonuç vermedi. Yapılan ön deneyler sonucunda ideal bir mesh yapısı elde edilerek analiz çalışmaları yapıldı. İş parçasının sonlu elemanlar ağı 90.000 tetrahedron yapılı düğümden, kesici takımın sonlu elemanlar ağı ise 17.000 tetrahedron yapılı düğümden oluşmaktadır. İlerleme hızı, kesme hızı ve soğutma yöntemine göre kesme kuvvetinin deneysel ve sayısal olarak değişimi Tablo 3’de gösterilmiştir.

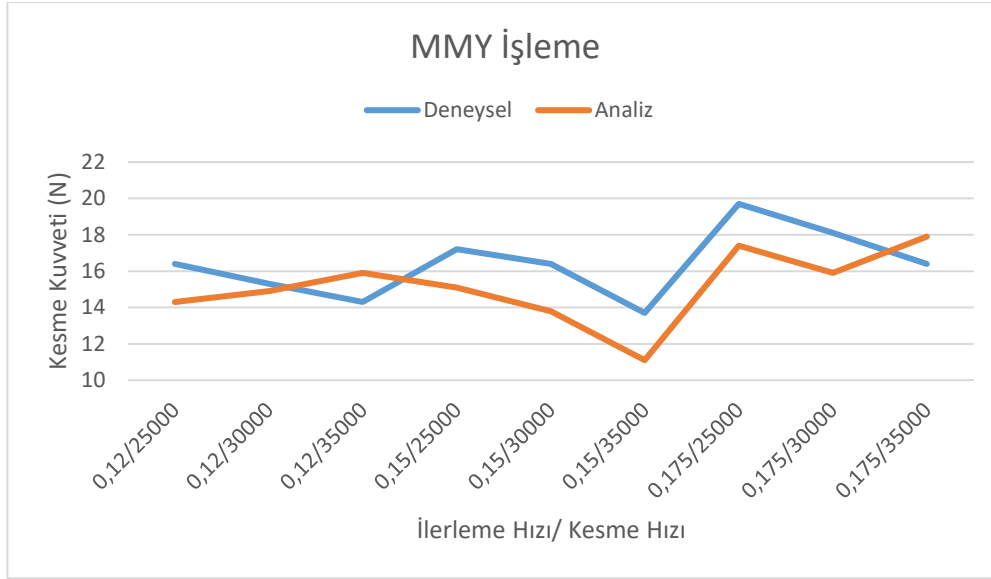
Tablo 3. Deneysel ve sayısal kesme kuvvetleri

Deney no	İlerleme Hızı(mm/dev)/Kesme hızı(rpm)	Kuru		MMY	
		Deneysel Kesme kuvvetleri (N)	Sayısal Kesme kuvvetleri(N)	Deneysel Kesme kuvvetleri (N)	Sayısal Kesme kuvvetleri(N)
1	0,12/25000	17,1	16,2	16,4	17,9
2	0,12/30000	15,9	16,7	15,3	14,1
3	0,12/35000	14,8	13,5	14,3	15,1
4	0,15/25000	18,2	17,4	17,2	17,6
5	0,15/30000	16,5	15,2	16,4	16,2
6	0,15/35000	15,3	15,6	13,7	15,5
7	0,175/25000	21,2	20,9	19,7	18,8
8	0,175/30000	18,9	18,3	18,1	18,5
9	0,175/35000	17,1	16,1	16,4	16,1

Tablo 3’te görüldüğü gibi kuru ve MMY ile işlemede ilerleme hızının artmasına bağlı olarak kesme kuvvetinde artış görülmüştür (Şekil 3) . İlerleme hızının artmasıyla kaldırılan talaş miktarının artmasına bağlı olarak kesme kuvveti artar (Sur vd., 2022). İlerleme hızının artmasıyla birim zamanda daha fazla talaş kaldırılmasından dolayı kesici takım üzerindeki ağırlık artar ve bu ağırlık kesme kuvvetini artırır. Kesme hızının artmasıyla her iki soğutma yönteminde kesme kuvvetinin azaldığı görülmüştür. Artan kesme hızının daha büyük kesme açısı ile daha ince talaş oluşumuna yol açması sonucunda kesme kuvveti azalır. Ayrıca kesme hızının artması kesme bölgesinde termal yumuşamaya sebep olur ve sürtünme azalır. Sürtünmenin azalması kesme kuvvetini azaltır (Shi vd., 2013). Soğutma yöntemlerine göre kesme kuvveti incelendiğinde MMY ile elde edilen kesme kuvveti değerleri kuru işlemeye göre düşük elde edilmiştir. Kuru işlemeye göre MMY’de soğutma sıvısı iş parçası-kesici takım arasına daha iyi nüfuz ederek sürtünmeyi azaltır. Ayrıca nano partiküller kesme bölgesinde daha iyi bir yağ filmi tabakası oluşturur (Saha vd., 2021; Talib & Rahim, 2018). Bu nedenle kesme kuvveti azalır.



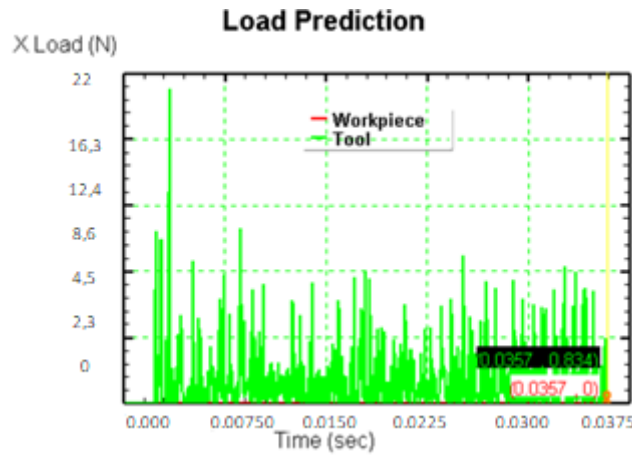
(a)



(b)

Şekil 3. İlerleme hızı, kesme hızı ve soğutma yöntemlerine göre deneysel ve analiz kesme kuvveti değerleri, a) Kuru b) MMY

Kesici takım çeşitli koşullar altında simüle edilmiş ve ana kesme kuvvetleri tahmin edilmiştir. Şekil 4’de 25.000 rpm kesme hızında 0,175 mm/dev ilerleme hızında kuru işlemedeki kesme kuvvetinin analiz sonucunda elde edilen simülasyon sonucu görülmektedir. Şekil 4’e göre sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen kuvvet değerlerinde anlık tepe noktalarından dolayı deneysel sonuçlar ile analiz sonuçları arasında farklılıklar olduğu görülmektedir. Fakat analiz sonuçlarından elde edilen ortalama kuvvet değerleri deneysel sonuçlara yakın değerler olduğu görülmüştür. Bundan dolayı karşılaştırma yapılırken analiz sonuçlarından elde edilen kesme kuvveti değerlerinin ortalaması alınarak karşılaştırma yapılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre, en yüksek kesme kuvveti değeri 21,2 N elde edilirken, analiz sonuçlarındaki ortalama kesme kuvvet değeri yaklaşık %7 oranında bir farkla 19,8 N olarak gerçekleşti.



Şekil 4. $V_c = 25000$ rpm, $f = 0,175$ mm/dev’de simüle edilmiş sonuç

IV. SONUÇLAR

Ti6Al4V alaşımının mikro frezelenmesinde kesme hızı, ilerleme hızı ve soğutma yönteminin kesme kuvvetine olan etkilerini deneysel ve sonlu elemanlar analizleriyle incelenmiştir. Temel sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

- Her iki işleme yönteminde ilerleme hızının artması sonucunda hem deneysel hem de analiz sonuçlarına göre kesme kuvveti artmıştır.
- Kesme hızının artması sonucunda her iki soğutma yöntemine göre hem deneysel hem de analiz sonuçlarına göre kesme kuvveti azalmıştır.
- MMY soğutma yöntemi kuru işlemeye göre hem deneysel hem de analiz sonuçlarına göre kesme kuvvetini azaltmıştır.
- Sonlu elemanlar analiz sonuçlarında kesme kuvveti değerlerinde anlık tepeler oluştu. Deneysel sonuçlar ile analiz sonuçlarının yaklaşım oranı oldukça anlamlı olduğu görüldü. Deneysel sonuçlar ile simülasyon programında elde edilen sonuçları \pm %10'luk hata sınırları içerisinde kaldığı belirlendi.

KAYNAKLAR

- Babitsky, V. I., Mitrofanov, A. V., & Silberschmidt, V. V. (2004). Ultrasonically assisted turning of aviation materials: Simulations and experimental study. *Ultrasonics*, 42(1), 81-86. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2004.02.001>
- Bandapalli, C., Sutaria, B. M., Bhatt, D. V., & Singh, K. K. (2017). Experimental Investigation and Estimation of Surface Roughness using ANN, GMDH & MRA models in High Speed Micro End Milling of Titanium Alloy (Grade-5). *Materials Today: Proceedings*, 4(2, Part A), 1019-1028. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.01.115>
- Bandapalli, C., Sutaria, B. M., Prasad Bhatt, D. V., & Singh, K. K. (2018). Tool Wear Analysis of Micro End Mills—Uncoated and PVD Coated TiAlN & AlTiN in High Speed Micro Milling of Titanium Alloy—Ti-0.3Mo-0.8Ni. *Procedia CIRP*, 77, 626-629. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.191>
- Bogdan-Chudy, M., Niesłony, P., Gupta, M. K., Wojciechowski, S., Maruda, R. W., Gawlik, J., & Królczyk, G. M. (2022). Tribological and thermal behavior with wear identification in contact interaction of the Ti6Al4V-sintered carbide with AlTiN coatings pair. *Tribology International*, 167, 107394. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107394>
- Davoudinejad, A., Parenti, P., & Annoni, M. (2017). 3D finite element prediction of chip flow, burr formation, and cutting forces in micro end-milling of aluminum 6061-T6. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 12(2), 203-214. <https://doi.org/10.1007/s11465-017-0421-6>
- Gaurav, G., Sharma, A., Dangayach, G. S., & Meena, M. L. (2021). Bibliometric analysis of machining of titanium alloy research. *Materials Today: Proceedings*, 44, 4031-4038. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.217>
- Ghoreishi, R., Roohi, A. H., & Ghadikolaei, A. D. (2018). Analysis of the influence of cutting parameters on surface roughness and cutting forces in high speed face milling of Al/SiC MMC. *Materials Research Express*, 5(8), 086521. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aad164>
- Gong, F., Zhao, J., Jiang, Y., Tao, H., Li, Z., & Zang, J. (2017). Fatigue failure of coated carbide tool and its influence on cutting performance in face milling SKD11 hardened steel. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 64, 27-34. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2017.01.001>
- Hadad, M., & Sadeghi, B. (2012). Thermal analysis of minimum quantity lubrication-MQL grinding process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 63, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.07.003>
- Jamil, M., Zhao, W., He, N., Gupta, M. K., Sarikaya, M., Khan, A. M., R, S. M., Siengchin, S., & Pimenov, D. Y. (2021). Sustainable milling of Ti-6Al-4V: A trade-off between energy efficiency, carbon emissions and machining characteristics under MQL and cryogenic environment. *Journal of Cleaner Production*, 281, 125374. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125374>

- Li, B., Zhang, S., Zhang, Q., Chen, J., & Zhang, J. (2018). Modelling of phase transformations induced by thermo-mechanical loads considering stress-strain effects in hard milling of AISI H13 steel. *International Journal of Mechanical Sciences*, 149, 241-253. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.10.010>
- Lu, Z., Zhang, D., Zhang, X., & Peng, Z. (2020). Effects of high-pressure coolant on cutting performance of high-speed ultrasonic vibration cutting titanium alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 279, 116584. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116584>
- Molaiekiya, F., Aramesh, M., & Veldhuis, S. C. (2020). Chip formation and tribological behavior in high-speed milling of IN718 with ceramic tools. *Wear*, 446-447, 203191. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203191>
- Ramoni, M., Shanmugam, R., Ross, N. S., & Gupta, M. K. (2021). An experimental investigation of hybrid manufactured SLM based Al-Si10-Mg alloy under mist cooling conditions. *Journal of Manufacturing Processes*, 70, 225-235. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.08.045>
- Saha, S., Deb, S., & Bandyopadhyay, P. P. (2021). Progressive wear based tool failure analysis during dry and MQL assisted sustainable micro-milling. *International Journal of Mechanical Sciences*, 212, 106844. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106844>
- Sharma, A. K., Tiwari, A. K., & Dixit, A. R. (2016). Effects of Minimum Quantity Lubrication (MQL) in machining processes using conventional and nanofluid based cutting fluids: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 127, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.146>
- Shatla, M., Kerk, C., & Altan, T. (2001). Process modeling in machining. Part II: Validation and applications of the determined flow stress data. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41(11), 1659-1680. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(01\)00017-7](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(01)00017-7)
- Shi, Q., Li, L., He, N., Zhao, W., & Liu, X. (2013). Experimental study in high speed milling of titanium alloy TC21. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 64(1), 49-54. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-3997-3>
- Sur, G., Motorcu, A. R., & Nohutçu, S. (2022). Single and multi-objective optimization for cutting force and surface roughness in peripheral milling of Ti6Al4V using fixed and variable helix angle tools. *Journal of Manufacturing Processes*, 80, 529-545. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.06.016>
- Talib, N., & Rahim, E. A. (2018). Performance of modified jatropha oil in combination with hexagonal boron nitride particles as a bio-based lubricant for green machining. *Tribology International*, 118, 89-104. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.09.016>
- Tamang, S. K., Teyi, N., & Tsumkhapa, R. T. (2020). Numerical Simulation of Cutting Force in High Speed Machining of Inconel 718. *Key Engineering Materials*, 856, 43-49. Research, Invention and Innovation Congress. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.856.43>
- Thi-Hoa, P., Thi-Bich, M., Van-Canh, T., Tien-Long, B., & Duc-Toan, N. (2018). A study on the cutting force and chip shrinkage coefficient in high-speed milling of A6061 aluminum alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 98(1), 177-188. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1063-x>
- Yadav, R. K., Abhishek, K., & Mahapatra, S. S. (2015). A simulation approach for estimating flank wear and material removal rate in turning of Inconel 718. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 52, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2014.12.004>