

Mehmet Kubilay Askerden*^{ID}

Fatih Karpaz^{ID}

Mustafa Cemal Çakır^{ID}

Bursa Uludağ Üniversitesi
Makine Mühendisliği
Bursa/Türkiye

Makale Bilgisi:

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 26 Şubat 2025

Kabul: 6 Mayıs 2025

*Sorumlu Yazar: Mehmet Kubilay Askerden

Email: mkaskerden@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.56193/matim.1647309>

Eksenel Kullanım Yoğunluğunun Frezeleme İşlemlerinde Titreşim ve Kesme Performansına Etkisi

Bu çalışma, frezeleme işlemlerinde eksenel kullanım yoğunluğunun titreşim ve kesme performansına etkisini incelemektedir. Belirli eksen ve devir aralıklarında yoğun kullanılan CNC tezgâhlarında iş mili (spindle) ve rulman sağlığının olumsuz etkilendiği ve bunun titreşim seviyelerini artırarak kesme kalitesini düşürdüğü tespit edilmiştir. Çalışmada, homojen takım yolları oluşturma, periyodik bakım stratejileri geliştirme ve dijital ikiz destekli izleme sistemleriyle üretim verimliliğini artırmaya yönelik çözümler önerilmektedir. Sonuçlar, daha uzun takım ömrü, gelişmiş yüzey kalitesi ve optimize edilmiş işleme parametreleriyle üretim süreçlerinin iyileştirilebileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Talaşlı İmalat, Titreşim, İş Mili, Bakım, Frezeleme

GİRİŞ

Talaşlı imalat operasyonlarının geneli işleme stratejilerine bağlı olarak nihai ürünün performansını önemli ölçüde etkileyebilen operasyonlardan oluşmaktadır. Talaşlı imalatla malzemelerin işlenebilirliği kesme parametrelerine, tezgâh sağlığına, kesici takımlara, soğutma sıvısına, takım yolu vb. gibi birçok etmene bağlı olarak bu etmenlerin ortaklaşa çalıştığı oldukça karmaşık bir süreçtir. Bunların hepsinin ortak noktadaki en önemli amacı ise istenilen kalitedeki yüzey bütünlüğünü minimum maliyetle ve en hızlı şekilde imal edebilmektir [1]. Talaşlı imalat operasyonları içerisinde frezeleme operasyonu en çok kullanılan talaşlı imalat operasyonları arasında yer almaktadır. Özellikle otomobil, havacılık ve uzay endüstrileri gibi sektörlerde ince duvar frezeleme gibi oldukça dikkat isteyen frezeleme yöntemleri önemli bir yere sahiptir ve bu alanda çalışmalar günümüzde son hızıyla devam etmektedir [2, 3].

Talaşlı imalat esnasında frezeleme operasyonlarında oluşabilecek istenmeyen titreşimler istenilen kesme parametrelerini etkileyerek kesme operasyonu sonrasında istenilen nihai ürünün kalitesini büyük ölçüde etkilediği belirlenmiştir. Aynı zamanda ise bu konu oldukça popülerliğini koruyarak üzerinde çok fazla modelleme ve deneysel çalışmaların olduğu ve bu çalışmalarla daha iyi yüzey

kalitesi, daha yüksek üretkenlik ve daha uzun takım ömrü ile işlenebilirliğinde arttığı gözlemlenmiştir. [4, 5]. Modellemelerin yanı sıra Raju ve ark. günümüzde oldukça popüler olan makine öğrenmesini kullanarak titreşimlere bağlı yüzey pürüzlülüğünü inceleyerek titreşimleri anlama ve azaltmak için anlık modelleme ile üretim verimliliğini arttıran çalışmaları ile çeşitli sektörlerde istenilen kalitedeki işleme sonuçlarına giden yolu açtı [6]. Geçmişteki çalışmalar incelendiğinde titreşim mekanizmaları hakkında ilk çalışmalar işleme titreşimlerini kendiliğinden oluşan ve/veya zorlanmış titreşimler olarak Arnold [7] tarafından incelenmiştir. Bununla alakalı ilk bilimsel yasaların ise hemen hemen aynı zamanlarda Tobias ve ark. ve Tlustý ve arkadaşları tarafından bağımsız olarak sunulmuştur [8, 9].

Titreşimlerin oluşması ve buna bağlı salgılar, takım tutucunun tezgâha bağlandığı spindle koniği, spindle çanak yayları, spindle rulmanları, spindle balansına sağlığının bozulmasına bağlı olarak artmaktadır. Bu noktada yapılacak periyodik bakım ve kontroller üretim verimliliğinin kontrolü ve iyileştirilmesi noktasında kritik öneme sahiptir [10]. Tlustý ve Tobias oluşabilecek titreşimleri tahmin eden ve ona göre kritik kesme derinliğini ön gören çalışmalar yapmıştır. Altıntaş ve arkadaşları tarafından da bu kesme dinamikleri ve titreşim kararlılığı modelleri incelenmiş ve geliştirilmiştir [11, 12]. Bunun yanı sıra titreşim değerleri istenilenin

dışında olan ve bu titreşimi oluşturabilecek tezgâh sağlığının bozuk olmasıyla birlikte oluşan salgılar, kesici takımın bir diş öncekine kıyasla kesici yarıçapında değişikliğe neden olduğu, değişken talaş kaldırma yüklerine maruz kaldığı ve kesici takımda değişken aşınmalara sebep olduğu gözlemlenmiştir [13]. Bu tip istenmeyen ve verimliliği düşüren olguların azaltılması için sıkı toleranslar ve yüksek yüzey kalitesi istenen birçok sektörde akıllı süreç izleme talebi oldukça ilgi görmektedir. İşlem esnasında gerçek zamanlı veriler ile takip edebilme, işleme doğruluğu, süreç güvenilirliği, üretim sürelerini ve maliyetlerini azaltma ve üretim süreçlerinin otomasyonunu oluşturmak istenmeyen titreşimleri anlamakta oldukça kritiktir. Bahsedilen süreç izleme yöntemi üzerine Bai ve arkadaşları yaptıkları çalışmada titreşim sinyallerine dayanan güvenilir ve sağlam durum izleme yöntemi sunmaktadırlar [14]. Parsa ve arkadaşlarının geliştirdiği dijital ikiz destekli çevrim içi izleme ve kontrol sistemi ile birlikte spindle titreşim verileri, takım aşınma ilerlemesi ve takım kırılma algılaması için geliştirdikleri model üretim tahmini için kullanılır. Bu şekilde işleme esnasında istenmeyen titreşim yani tırlamalardan kaçınmak için dijital ikiz ve entegre çalışan modelin kullanımı işleme sürecinin izlenmesi ve istenilen şekilde ilerlemesi için kullanılır [15]. Askerden ve arkadaşları yaptıkları iki farklı çalışmada bu titreşim ve tezgâh sağlığının istenilen değerlerde olmaması halinde delik delme, yüzey pürüzlülüğü, kesici takım ömrü, istenilen nihai ölçü doğrultusunda sağlıklı olmayan titreşimin etkilerini incelemiş ve bakım yapıp sağlıklı hale gelen titreşimle değerlerini incelemişlerdir. Bu çalışmalar sonucunda sağlıklı haldeki tezgâhla yapılan frezeleme ve delik delme işleminde kesici takım ömründe, yüzey pürüzlülüğünde, istenilen nihai ölçüme tek seferde ulaşmada, tezgâhta operasyon esnasındaki dinamik yüklenmelerde iyileşmeler görülmüştür [16, 17].

Bu çalışmanın amacı ise yapılan birçok spindle sağlık ölçümü esnasında üretilen parçaların geometrisine göre frezeleme esnasında tezgâhın yoğunlukla bir eksen ve belirli devir aralığında çalıştırılması sonucunda tezgâhın o eksen ve devir aralıklarında titreşim değerlerinin sağlıklı olmadığı fark edilmiştir. Ancak diğer eksen ve devir aralıklarında ise titreşim ve diğer sağlık değerleri normal aralıklardadır. Bu da frezeleme esnasında eksenel kullanım yoğunluğuna bağlı tezgâhın o eksenindeki rulman ve diğer bileşenlerinin zamanla ömrünü tamamlayıp sağlığının bozulmasına ve titreşim değerlerinin normalden farklı seyretmesine sebebiyet verdiği gözlemlenmiştir. Bu bilgiler doğrultusunda bu ve benzer tip operasyonda neler yapılabileceği ve dikkat edilmez ve göz ardı edilirse doğurabileceği sonuçlar değerlendirilip tartışılacaktır. Bunun yanında alınabilecek önlemler ve geliştirilebilecek yöntemler üzerinde durulacaktır.

MATERYAL VE METOT

Talaşlı imalat esnasında istenilen nihai ürünü yüksek verimlilikte elde edebilmek adına yapılan CNC spindle sağlık kontrolü statik ve dinamik kontroller olmak üzere iki başlık altında incelenmiştir. Bu incelemelerden çıkan sonuçlar neticesinde elde edilen bilgiler oluşan titreşim kaynaklarının ve bu istenmeyen titreşimlerinin oluşturduğu etkilerin kök nedenini bizlere sunmaktadır. Yapılan sağlık ölçümünde spindle konik içi salgı değeri, spindle 300 mm test bar salgı değeri, spindle çanak yaylarının kontrol edildiği takım çekme kuvveti ölçümünden oluşmaktadır. Dinamik ölçümler ise rulmanların en yakın olduğu bölgeden alınan titreşim ölçer cihazı ile spindle balans hız (mm/s) cinsinden, spindle rulman sağlığı ivme (G) cinsinden her 1000 devirde spindle maksimum devrine kadar ölçülerek analiz edilmektedir. Spindle titreşimlerini ölçmek için Gtech marka VPod-tek prob titreşim ölçme cihazı kullanılmıştır. Şekil 1’de statik ve dinamik ölçümler esnasında alınan görseller görülmektedir.

Statik Ölçümler



Dinamik Ölçümler



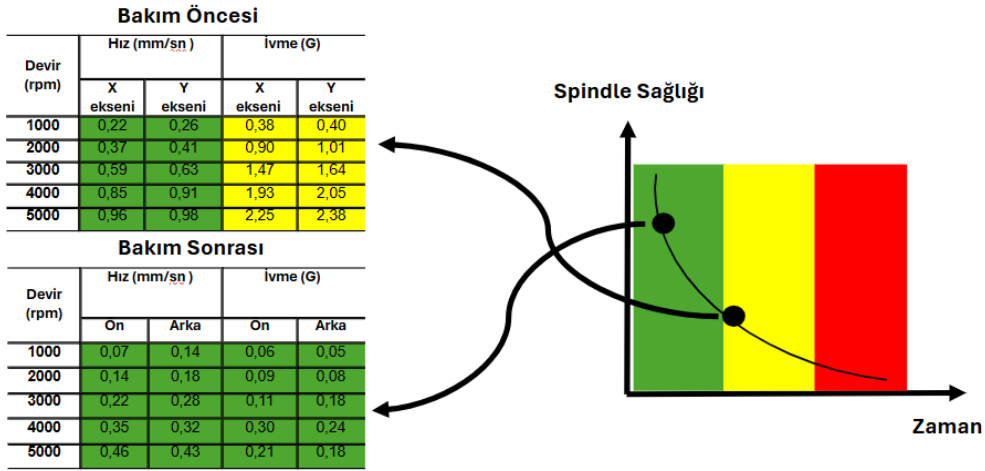
Şekil 1. Statik Ölçümler: A- Konik içi salgı ölçümü B- 300 mm test bar salgı ölçümü C- Takım çekme kuvveti ölçümü, Dinamik Ölçümler: D- Spindle eksenleri balans ve rulman sağlığı ölçümü

Ölçümler değerlendirilirken ise Normal, Kritik, Tehlikeli olarak sınıflandırılacak şekilde tabloda sunulmaktadır. Normal değerler yeşil renkte, kritik değerler sarı renkte, tehlikeli değerler ise kırmızı renkte boyanarak tablo oluşturulmaktadır. Örnek bir titreşim değeri ölçün ait bakım öncesi ve bakım sonrası değerleri ve sınıflandırılma şekli Şekil 2’de gösterilmektedir. Titreşim değerlerinin istenilen düzeye geldikten sonra kritik seviyeden normal seviyeye geçerek spindle ömrünün ve buna bağlı üretim verimliliğinin artması beklenmektedir. Bakım öncesi ölçüme göre yapılacak bakım ve hasar gören mekanizmaların tahmini yapılarak izlenecek yol belirlenmektedir.

Titreşimlerin yanı sıra spindle diğer bileşenleri de ihtiyaç doğrultusunda bakım yapılması gerekmektedir. Çünkü tüm bileşenler bir zincir gibi

birbirini etkilemekte ve talaşlı imalat esnasında oluşabilecek istenmeyen titreşimleri tetiklemektedirler.

Burada uygulanması beklenen ve istenen metot Şekil 3’te gösterilen grafikteki gibi sürekli bir döndü içerisinde anlık olarak takip edilen ve takibe istinaden revize edilmesi gerektiği durumda revize edilebilen bir sistem kurulmasıdır. Takip edilen ve kurulan sistemde alınan verilerin analizi ile birlikte operasyon için gerekli olan modellerin oluşturulması bu modellerle birlikte revize edilen veriler dijital ikiz yardımıyla sisteme entegre edilmesi ve bu döngünün oluşabilecek zorlu ve istenmeyen koşullarda sistemin en verimli şekilde çalışmasını sağlamasıdır. Bu geliştirilmesi beklenen sistem bizlere en verimli koşullarda çalışmayı ve kaliteyi en üst noktaya taşımayı amaçlamaktadır.



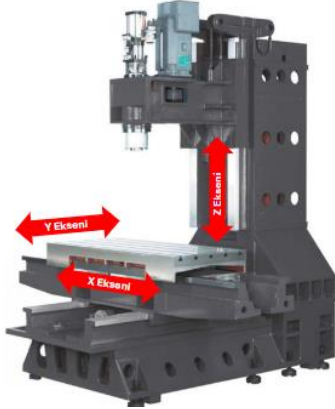
Şekil 2. Bakım öncesi ve bakım sonrası titreşim değerlerinin spindle sağlığı ve zaman çizelgesi üzerindeki etkisi



Şekil 3. Anlık veri toplaması ve dijital ikiz ile sürekli kontrol edilene ve izlenen sistem döngüsü

BULGULAR VE TARTIŞMA

Talaşlı imalatta frezeleme başta olmak üzere birçok operasyonda yoğun olarak kullanılan 3 eksen CNC tezgahlarda tabla eksenlerinin kullanımı imal edilecek parçanın geometrisine göre değişiklikleri göstermektedir. Şekil 4'te dik işlem merkezi tezgâha ait eksenler görülmektedir. Burada talaşlı imalar esnasında 3 eksenle işlenecek parçanın geometrik şekline göre konum almaktadır. Talaş kaldırma esnasında ise eksenlere farklı dinamik yükler yüklenmekte ve bu yüklenmelerde spindle sağlığını bozmaktadır.



Şekil 4. 3 eksen dik işlem merkezi takım tezgâhı ve eksenleri

Periyodik kontroller sırasında veya anormal devam eden nihai ürün verimliliğine bağlı gerçekleştirilen sağlık kontrollerinde hasar tespiti yapılabileceğinden bahsedilmiştir. Ölçümler esnasında seri imalat yapan bir tezgâhta periyodik kontroller sırasında belirli devir aralıklarında ve bir eksenle bir yoğunluk tespit edilmiştir. Bu tezgâha ait X ve Y ekseninden alınan titreşim ölçüm değerleri Tablo 1'de gösterilmiştir. Burada tezgâhta kullanılan en sık devirler, talaşlı imalatı gerçekleştirilen parça, takım yolu ve talaşlı imalat operasyonu incelendiğinde istenmeyen ve sağlıklı olmayan titreşim değerlerinin gerçekleştirilen tek eksen yoğunluklu yapılan frezeleme operasyonu neticesinde olduğu ortaya tespit edilmiştir. Bu ölçümlere binaen istenen nihai ürün verimliliğinin ise istenilen noktada olmadığı operatör tarafından onaylanmıştır.

Tablo verilerinde de görüldüğü üzere sarı ile işaretlenen noktaların eksenleri aynıdır. Çalıştığı devirlerde titreşim seviyesinin yüksekliğine bağlı olarak spindle balansının da yine X ekseninde bozulduğu Hız (mm/s) verileri ile de tespit edilmiştir. Burada elde edilen bulgular neticesinde talaşlı imalat frezeleme esnasında tek eksen yoğunluğunda ve belirli devirler ile çalışan tezgâhta o eksenle spindle rulman sağlığı ve balansının olumsuz etkilenerek olması gerekenden daha hızlı bozulduğu ve istenmeyen titreşim seviyelerine geldiği gözlemlenmiştir.

Tablo 1. Spindle titreşim ölçüm verileri

Devir (rpm)	Hız (mm/sn) (rms)		İvme (G) (rms)	
	X eksen	Y eksen	X eksen	Y eksen
1000	0,07	0,09	0,10	0,11
2000	0,17	0,05	1,22	0,21
3000	0,18	0,07	2,40	0,83
4000	0,24	0,12	2,10	0,60
5000	0,24	0,10	1,45	0,57
6000	0,57	0,15	0,88	0,47
7000	0,63	0,17	0,70	0,64
8000	1,10	0,67	0,70	0,74
9000	1,40	0,70	0,74	0,80
10000	1,50	0,65	0,86	0,82

Askerden ve ark. daha önceki yaptıkları çalışmalarda spindle sağlığına bağlı olarak değişen ve istenmeyen titreşimlerin takım tezgâhı spindle bakımı yapıldıktan sonra iyileşme göstermiştir. Bu çalışmada elde edilen verilere göre kesici takım ömrü yaklaşık olarak %40 oranında iyileşmiş, yüzey pürüzlülüğü yaklaşık olarak %35 oranında iyileşmiş, tezgâh dinamik yüklenmeleri ortalama %15 oranında azalmış ve istenilen nihai ölçüde bakım öncesinde sapma ortalama 0,25 iken bakım sonrasında 0,05 olarak iyileşmiştir. Bu noktada üretim verimliliği ciddi bir şekilde gelişmiştir [16,17].

SONUÇLAR

Talaşlı imalatın birçok etmene bağlı olarak oldukça kapsamlı incelenmesi gerektiği ve her bir etmenin ayrı ayrı değerlendirilmesi gerektiği yapılan çalışma neticesinde de ortaya konulmuştur. Talaşlı imalat frezeleme operasyonunda seri imalat esnasında yoğun olarak kullanılan eksen ve devirlerde spindle bileşenleri ve özellikle rulman sağlığı olumsuz etkilenmektedir. Bu etkilerle birlikte oluşan istenmeyen titreşimler istenilen kalitedeki nihai ürünün oluşmasını olumsuz etkilemektedir. Bu etkiler kesici takım ömrü, yüzey pürüzlülüğü, işleme süresi, tezgâh sağlığı, tezgâh dinamik yüklenmesi, ölçüsel doğruluk olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu çalışma neticesinde talaşlı imalat ile üretilen parçanın:

- 1- Takım yolunun olabildiğinde homojen seçilmesi
- 2- Kullanılan devir ve eksenlerin mümkün olduğunda parça geometrisine göre tek düze kullanılmaması
- 3- Tezgâh tablasına bağlanan parçaların bağlama yöntemlerinin imalatın el verdiği sürece tezgâhı homojen ve verimli kullanacak şekilde tasarlanması
- 4- Belirli periyotlarla spindle sağlık ölçümü yapılarak tezgâhta istenmeyen titreşimlerin önüne geçilmesi
- 5- Dijital ikiz yöntemi ve modeller geliştirilerek anlık ve sürekli takip sisteminin oluşturulması

gibi çalışmalarla daha verimi yüksek üretim yapılabilir.

Gelecekteki çalışmalarda CAM programlarında parçaya, tezgâh bilgilerine göre parçaya standart takım yolları haricinde, özel homojen takım yolu oluşturabilecek arayüzler geliştirilerek ve dijital ikiz ile de işleme öncesinde kontrolü sağlanarak daha verimli bir imalat yapılabilmesi hedeflenmektedir. Bu sayede istenen kalite, hız ve güven ile üretim gerçekleştirerek üretim verimliliği üst seviyelere çıkarılabilir.

THE EFFECT OF AXIAL ENGAGEMENT INTENSITY ON VIBRATION AND CUTTING PERFORMANCE IN MILLING OPERATIONS

This study investigates the effect of axial utilization intensity on vibration and cutting performance in milling operations. It was observed that intensive use of specific axes and speed ranges in CNC machines negatively impacts spindle and bearing health, leading to increased vibration levels and reduced cutting quality. The study proposes solutions to enhance manufacturing efficiency through homogeneous tool path generation, periodic maintenance strategies, and digital twin-assisted monitoring systems. The results indicate that longer tool life, improved surface quality, and optimized machining parameters can be achieved, contributing to more efficient and reliable manufacturing processes.

Keywords: Machining, Vibration, CNC Spindle, Maintenance, Milling

KAYNAKLAR

1. Liao, Z., Schoop, J. M., Saelzer, J., Bergmann, B., Priarone, P. C., Splettstößer, A., ... & Kaynak, Y. (2024). Review of current best-practices in machinability evaluation and understanding for improving machining performance. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 50, 151-184.
2. Aydın, M. (2022). Parmak frezeleme sırasında takım salgısının etkisi dahil edilerek kesme kuvvetlerinin tahmini ve analizi. *Politeknik Dergisi*, 25(1), 157-167.
3. Wan, M., Budak, E., & Zhang, W. H. (2024). Mechanics and dynamics of thin-wall milling process.
4. Altintas, Y., Stepan, G., Budak, E., Schmitz, T., & Kilic, Z. M. (2020). Chatter stability of machining operations. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 142(11), 110801.
5. Caixu, Y. U. E., Haining, G. A. O., Xianli, L. I. U., Liang, S. Y., & Lihui, W. A. N. G. (2019). A review of chatter vibration research in milling. *Chinese Journal of Aeronautics*, 32(2), 215-242.
6. Umamaheswara Raju, R. S., Ravi Kumar, K., Vargish, K., & Bharath Kumar, M. (2025). Machine learning based surface roughness assessment via CNC spindle bearing vibration. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 19(1), 477-494.
7. Arnold, R. (1946). Cutting tools research: report of subcommittee on carbide tools: the mechanism of tool vibration in the cutting of steel. *Proceedings of the institution of mechanical engineers*, 154(1), 261-284.
8. Tobias, S. A., & Fishwick, W. (1958). Theory of regenerative machine tool chatter. *The engineer*, 205(7), 199-203.
9. Tlustý, J. (1963). Stability of machine tool against self-excited vibration in machining. In *Int Prod Eng Res Conf-Proc 1963* (pp. 465-474).
10. Morales Méndez, J. D., & Rodriguez, R. S. (2017). Total productive maintenance (TPM) as a tool for improving productivity: a case study of application in the bottleneck of an auto-parts machining line. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92, 1013-1026.
11. Tlustý, J. (1986). Dynamics of high-speed milling.
12. Altintas, Y., & Weck, M. (2004). Chatter stability of metal cutting and grinding. *CIRP annals*, 53(2), 619-642.
13. Li, H. Z., & Li, X. P. (2005). A numerical study of the effects of cutter runout on milling process geometry based on true tooth trajectory. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 25, 435-443.
14. Bai, L., Zhang, J., Budak, E., Tang, Y., & Zhao, W. (2024). Vibration energy-based indicators for multi-target condition monitoring in milling operations. *Journal of Manufacturing Systems*, 77, 284-300.
15. Bakhshandeh, P., Mohammadi, Y., Altintas, Y., & Bleicher, F. (2024). Digital twin assisted intelligent machining process monitoring and control. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 49, 180-190.
16. Askerden, M. K., Yazar, M., & Talaş, Ş. (2024). Investigation of the Effects of CNC Tool Runout on Machining of 1.2379 Steel and Tool Life. *Engineering Perspective*, 141.
17. Askerden, M. K., Yazar, M., & Talaş, Ş. (2024). Effects Of Cnc Tool Runouts On Drilling Process. *Engineering Perspective*, 119.