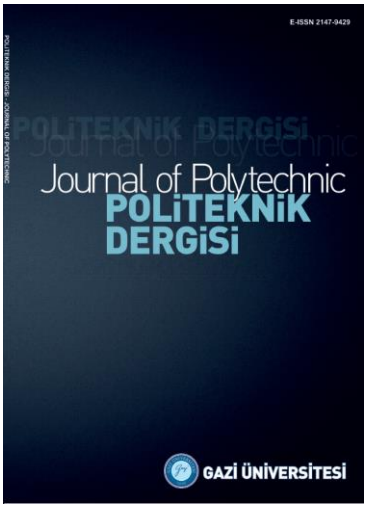


POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)
URL: http://dergipark.org.tr/politeknik

CLARIVATE ANALYTICS
EMERGING SOURCES CITATION INDEX
INDEXED

Testere frezelerle kanal açma işlemlerinde dinamik davranışların incelenmesi

Investigation of dynamic behaviors in grooving operations with saw milling machines

***Yazar(lar) (Author(s))**: Hasan Basri ULAŞ [1], Furgan MİHMAT [2], Halil DEMİR [3]*

ORCID[1]: 0000-0002-9754-6055

ORCID[2]: 0009-0003-6044-2206

ORCID[3]: 0000-0002-9802-083X

ERKEN GÖRÜNÜM

To cite to this article: Ulaş H.B., Mihmat F. ve Demir H., "Testere Frezelerle Kanal Açma İşlemlerinde Dinamik Davranışların İncelenmesi", ***Journal of Polytechnic***, *(*): *, (*).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Ulaş H.B., Mihmat F. ve Demir H., "Testere Frezelerle Kanal Açma İşlemlerinde Dinamik Davranışların İncelenmesi", ***Politeknik Dergisi***, *(*): *, (*).

Erişim linki (To link to this article): http://dergipark.org.tr/politeknik/archive

DOI: 10.2339/politeknik.1509422

Testere Frezelerle Kanal Açma İşlemlerinde Dinamik Davranışların İncelenmesi

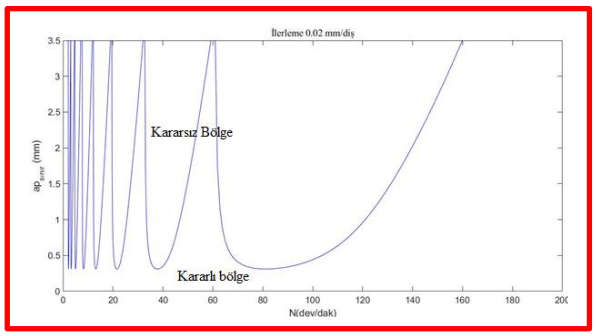
Investigation of Dynamic Behaviors in Grooving Operations with Saw Milling Machines

Önemli noktalar (Highlights)

- *Dairesel Testere Frezeleme (Circular Saw Milling)*
- *Matematiksel Modelleme (Mathematical Modeling)*
- *Kararlılık Diyagramı (Stability Diagram)*
- *Frekans Tepki Cevabı (Frequency Response Response))*
- *İşlenebilirlik (Machining)*

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Testere frezeleme işlemi; deneysel, matematiksel modelleme ve analitik hesaplamalar sonucunda elde edilen kesme kuvvetleri ile matematiksel modelleme de elde edilen kesme kuvvetleri, çalışma frekansı ve kararlılık eğrileri kıyaslanmıştır./ Circular saw milling process; the cutting forces obtained as a result of experimental, mathematical modeling and analytical calculations were compared with the cutting forces, operating frequency and stability curves obtained in mathematical modeling.



Şekil. Kararlılık grafiği **/ Figure.** Stability diagram

Amaç (Aim)

Frezeleme işleminde oluşacak kesme kuvveti, Frekans cevabı ve talaş derinliğinin kararlılığı araştırılmıştır./ The cutting force, frequency response and stability of the depth of cut during the milling process were investigated.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Analitik hesaplama, Deneysel çalışma ve Matematiksel modelleme sonuçları kıyaslanmıştır. / Analytical calculation, Experimental study and Mathematical modeling results were compared.

Özgünlük (Originality)

Matematiksel modelleme ve Deneysel çalışma sonuçlarında bazı saplamalar olduğu tespit edilmiştir./ It has been determined that there are some deviations in the mathematical modeling and experimental study results.

Bulgular (Findings)

Analitik ile Matematiksel modelleme sonuçlarının çok yakın olduğu görülmüştür./ It has been observed that the analytical and mathematical modeling results are very close

Sonuç (Conclusion)

Deneysel ve matematiksel sonuçların hata oranları belirlenmiştir. / Error rates of experimental and mathematical results were determined.

Etik Standartların Beyanı (*Declaration of Ethical Standards*)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Testere Frezelerle Kanal Açma İşlemlerinde Dinamik Davranışların İncelenmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Hasan Basri ULAŞ[1*], Furgan MİHMAT[2], Halil DEMİR[3]

[1]Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye
[2]Ankatool Mühendislik Makine Sanayi Ankara, Türkiye
[3]Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Karabük Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 02.07.2024 ; Kabul/Accepted : 16.04.2025 ; Erken Görünüm/Early View : 22.05.2025)

ÖZ

Kanal açma işlemlerinde karşılaşılan tırlama, imalatı olumsuz yönde etkileyen faktörlerden birisidir. Bu süreçteki titreşimi; malzeme yapısı, işlenebilirlik parametreleri, iş mili, kesici takım, takım tutucu ve rijitlik gibi parametreler etkilenmektedir. Elde edilen sonucunda tezgâh ömrü, iş parçasının yüzey ve boyut kalitesi, takım aşınması vb. çıktılar yönünden kritik bir önem taşımaktadır. Bu çalışmada, TS-ISO-8688 standardına uygun olarak hazırlanan AISI-D2 sıcak iş takım çeliği ve AISI-H13 soğuk iş takım çeliği malzemeden deney numuneleri, HSS dairesel freze çakıları (DIN-1837A standardına uygun) kullanılarak, kanal frezeleme işlemine tabi tutulmuştur. Kanal frezeleme deneyleri, devir sayısı ve talaş derinliği sabit tutularak beş farklı tabla ilerleme hızı soğutma sıvısı kullanılmadan gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, aynı yönlü frezeleme tekniği kullanılarak testere freze ile işlenen deney numunesi malzemesinin, kesici takımın özellikleri dikkate alınarak analitik, simülasyon ve deneysel kararlılık analizleri yapılmıştır. İş parçası frekans tepki cevabı temel parametre olarak değerlendirilerek oluşturulan, her talaş kaldırma, frekans tepki cevabı ve kararlılık diyagramları deney sonuçları ile kıyaslanmıştır. Çalışmada; iki serbestlik derecesine sahip deney düzeneğinde kanal frezeleme deneyleri ile de talaş kaldırmayla ortaya çıkan iş parçası ve takım davranışlarındaki değişiminden veriler elde edilmiştir. Yapılan teorik, simülasyon ve deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen veriler yorumlanmıştır. Analitik ve matematiksel modelleme sonuçları büyük oranda örtüşürken, deneysel sonuçlarda sapmalar gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Aynı yönlü frezeleme, Frekans tepki cevabı, Kanal frezeleme, Tırlama.

Investigation of Dynamic Behaviors In Grooving Operations with Saw Milling Machines

ABSTRACT

Chatter encountered during slot milling operations is one of the factors that affects manufacturing. Vibration in this process; parameters such as material structure, machinability parameters, spindle, cutting tool, tool holder and rigidity are affected. As a result, machine life, surface and dimensional quality of the workpiece, tool wear, etc. It is of critical importance in terms of outputs such as in this study, test samples made of AISI D2 hot work tool steel and AISI H13 cold work tool steel, prepared in accordance with TS ISO 8688 standard, were subjected to slot milling using HSS circular saw milling cutters (in accordance with DIN 1837A standard). Slot milling experiments were carried out at five different table feed rates without using coolant, keeping the speed and depth of cut constant. In this study, analytical, simulation and experimental stability analyzes were carried out on the test sample material processed with a circular saw tool using the same directional milling technique, taking into account the properties of the cutting tool. The workpiece frequency response response was evaluated as the basic parameter and each chip removal, frequency response response and stability diagrams were compared with the experimental results. In the study; Using a two-degree-of-freedom experimental setup, data were obtained from the change in workpiece and tool behavior resulting from machining through slot milling experiments. The data obtained as a result of the theoretical, simulation and experimental studies were interpreted. While the analytical and mathematical modeling results largely overlap, deviations have been observed in the experimental results.

Keywords: Down milling, Frequency response function, Slot milling, Chatter

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Frezeleme operasyonlarında kesme kuvvetleri ve davranışları dinamik olarak tahmin edilebilmektedir. İmalat işlemlerinde tezgâh, kesici takım, ve imalat parametreleri yapılması düşünülen talaşlı imalat proses türleri anlamında önemli olmakla birlikte imalat maliyetini ve süresini doğrudan etkilemektedir.

Gelişen teknoloji, üretim, imalat, malzeme gibi sektörlerden taleplerini her geçen gün artırarak devam etmektedir. Bu süreçte imalat sektöründe maliyetlerin düşürülerek daha kaliteli üretim yapma ihtiyacını karşılayabilmek için kesici takım, işleme ve malzeme maliyetlerinin düşürülmesi zorunluluğu artarken en kısa sürede işleme de önem kazanmaktadır. Yüksek hızlı frezeleme işlemi, imalat sanayinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Frezeleme işleminin verimliliği için, yüksek talaş kaldırma oranı ve en az hatalı yüzey oluşturma hızı konusunda talepler ortaya çıkmaktadır. Son yıllarda, akademik ve endüstriyel araştırmacılar, talaş kaldırma işleminde tırlama titreşimlerinin önlenmesine büyük önem vermektedirler [1-5].

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : bulas@gazi.edu.tr

ERKEN GÖRÜNÜM

Bu çalışmada; önemli ölçüde, işlenebilirliğin performansının analiz edilmesi, kesme kuvvetlerinin hesaplanması, kararlılık ve frekans cevapları vb. için uygun analitik ve modelleme yöntemlerine duyulan ihtiyaç değerlendirilmektedir. Genel olarak kesme işlemi, takım tezgâhı, kesici takım ve iş parçası arasındaki dinamik etkileşimlerin bir sonucu olduğundan dolayı matematiksel açıklamalar, kinematik, dinamik, talaş oluşumunun geometrisi ve iş parçasının mekanik ve termomekanik özellikleri dikkate alınmalıdır. Kesme işleminin mekaniği ve talaş oluşumu, işleme teknolojilerinin geliştirilmesinde anahtar konu olarak her zamankinden daha fazla kabul edilmektedir. Kesme işleminin karmaşıklığına sebep olan dönüşümlerden sadece birkaçını saymak gerekirse, kesme bölgelerindeki elastoplastik deformasyonlar, takım/talaş ve takım/iş parçası arasındaki değişken sürtünme, ısı enerjisi oluşumu ve transferi, yapışma ve difüzyon ile malzeme yapısı gibi iç içe geçmiş fiziksel olaylardan kaynaklanmaktadır[6].

Frezeleme operasyonlarında kesme kuvvetlerinin tahmin edilmesine yönelik kesme yaklaşımları incelenerek, analitik yaklaşımın, kesici takım geometrisine göre yapılan frezeleme testlerinden belirlenen özgül kesme kuvveti katsayılarına bağlı olduğu bilinmektedir. Deneysel olarak belirlenen dik kesme (ortogonal) kesme açısı, sürtünme katsayısı ve kesme gerilimi veya eğik kesme analizine dayanan frezeleme modellerine dayanmaktadır. Yapılan bir çalışmada frezelememede kesme kuvveti katsayısı tahmini için, Ti6Al4V titanyum alaşımının çeşitli tırlama, eksantriklik, salgısız kesme koşulları ve kesici geometrik özellikleri için frezelenmesi sırasında deneysel olarak doğrulanarak elde edilen verilerle özgül kesme kuvveti katsayısı ks11'i oluşturan değişkenlerden bir kısmı deneysel çalışma ile de doğrulanmıştır [7].

Kesme işlemleri genellikle üç boyutlu ve geometrik olarak karmaşık olmasına rağmen, metal kesmenin genel mekaniğini açıklamak için genellikle iki boyutlu dik kesmenin basit durumu kullanılmaktadır. Dik kesmede işleme sonucu oluşan atık malzeme, takım-iş parçasının göreceli hareket yönüne dik olan bir kesici takım tarafından uzaklaştırılmaktadır [8].

Frezeleme işlemi sırasında (özellikle diş sayısı fazla olan kesici takımlarda) kesme sürecinde bir sonraki diş bu dalgalı yüzeye dalmakta ve yeni bir dalgalı yüzey oluşturmaktadır. Talaş kalınlığından dolayı kesici takıma uygulanan kuvvet, önceki kesici kenarından arta kalan dalga (tornalamada ise önceki devirde kalan yüzey olarak değerlendirilmektedir) ile gerçek dişin bıraktığı dalga arasındaki faz farkına bağlı olarak değişmektedir [1,6]. İmalat süreçlerinde tırlama iki ana sınıfta incelenebilmektedir; birincisi tırlama kesme işleminin doğasından (takım ile iş parçası arasındaki sürtünme, talaş oluşumu üzerindeki termo-mekanik etki veya mod birleştirme), ikincisi ise iş parçası yüzeysel özelliklerinden kaynaklanana rejeneratif/yenilemeli özelliklerden kaynaklanmaktadır. Burada rejeneratif tırlama oluşan tırlamanın en önemli nedenidir. İşlenebilirlikte tırlama mekanizmasına bağlı olarak sürtünmeli tırlama, termo-mekanik, mod birleştirme ve rejeneratif tırlama arasında ayrım yapmak mümkün olabilmektedir [9]. Bu tırlama çeşitlerini kısaca incelersek; boşluk yüzeyindeki sürtünme, kesme kuvveti F yönünde titreşimi tetiklediğinde ve itme kuvveti Ft yönünde sınırlar oluşturduğunda sürtünmeli tırlama meydana gelmektedir [10]. Plastik deformasyon bölgesindeki sıcaklık ve gerinim hızı nedeniyle termomekanik çatlamalar meydana gelmektedir [6]. İtme kuvveti yönündeki titreşim, kesme kuvveti yönünde titreşim oluştuğunda bunun tersi durumda mod bağlantı çatlağı oluşmaktadır. [11] Bu, kesme ve itme kuvveti yönlerinde eş zamanlı titreşime neden olmaktadır. Fiziksel olarak talaş ve boşluk yüzeylerindeki sürtünme, talaş kalınlığı değişimi, kayma açısı salınımları ve rejenerasyon/yenileme etkisi gibi bir dizi sebepten kaynaklanmaktadır [6]. Yenileyici tırlama, kendi kendini uyarım sinyali vererek uyaran titreşimin en yaygın biçimi olarak bilinmektedir. İşlenebilirlik işlemlerinin çoğunda, karşılaşılan titreşimlerin artmasına neden olabilecek üst üste binen genlikler içerdiğinden sıklıkla meydana gelebilmektedir. Kesici takım titreşimleri nedeniyle iş parçası yüzeyinde dalgalı bir yüzey oluşmaktadır İkinci dereceden diferansiyel denklemin özdeğerlerinin odak noktaları incelenmesi daha fazla bilgi sahibi olunması açısından önemlidir. [12]

Rejeneratif tırlama, takım tezgâhlarındaki işlenebilirlik süreçlerinde kendiliğinden oluşan titreşimden dolayı, frezeleme takım tezgâhı kullanıcılarının ve imalatçıların genelde istemedikleri bilinen bir gerçektir. Bu sebeple, Malzeme Kaldırma Oranı (MRR) üzerindeki bir sınırlama göz ardı edilirse kötü yüzey kalitesine (yüzey pürüzlülüğü, yanıklar veya dalgalılık) ve erken takım aşınmasına neden olabilmektedir. Bu bağlamda kararlılık eğrileri, iş mili hızını titreşimsiz maksimum kesme derinliği ile ilişkilendirebilmektedir. Kesme derinliği işleminin sönümlenmesine bağlı olan kontrol sınırı şartlarını aşarsa titreşimler kararsız hale gelmekte ve tırlama ile karşı karşıya kalınmaktadır. [1,5]. Kararlı veya kararsız bir kesme işlemi arasındaki sınır, iş mili devir sayısının bir fonksiyonu olarak eksenel kesme derinliği açısından yorumlanması kararlılık diyagramları ile yapılabilmektedir. Bu diyagramları kullanarak işleme parametrelerinin spesifik kombinasyonunu bulmak mümkün olabilmekte ve maksimum titreşimsiz malzeme kaldırma oranı elde edilebilmektedir [13]. Parmak frezeleme işleminde kesici takımda oluşan salgıyı incelerken, takımın durağan hali, salgısı ile parmak frezeleme için kesme geometrisi, diş yarıçapı, talaş kalınlığı, giriş ve çıkış açıları için matematiksel modeller geliştirilmiştir. Yapılan bir çalışmada kullanılan geometrik model, parmak frezeleme için kesici salgısı ile kesme kuvveti özelliklerini tahmin etmek amacıyla daha önce geliştirilen kesme kuvveti modelleriyle birleştirilmiş ve seçilen model ile AISI 7075 alüminyum malzeme için ölçülen ve tahmin edilen kuvvetlerin karşılaştırılması yoluyla doğrulanmıştır. Çalışmada takım salgısı ile aynı zamanda kuvvet sinyalinin frekans

ERKEN GÖRÜNÜM

içeriğini takım kesici kenarlarının geçiş frekansları ve tezgâh iş mili dönüş frekans cevaplarını incelemiştir. Çalışmada takımda oluşan salgının, kesmeye aktif olarak katılan kesici kenarların ortalama talaş kalınlığını arttırdığı ve maksimum kuvvetin ortalama kuvvete oranını arttırdığı görülmektedir [14]. Frezeleme işlemlerinde kararlılık diyagramlarını iki serbestlik derecesine sahip olan model ile analitik tahmini için yeni bir yöntem araştırılan çalışmada sunulan model, kesici takım-iş parçası temas bölgesindeki yapının transfer fonksiyonlarını, statik kesme kuvveti katsayılarını, radyal dalmayı ve kesicideki diş sayısı parametrelerinden oluşmaktadır. Zamanla değişen dinamik kesme kuvveti katsayıları, Fourier serisi bileşenleriyle yaklaşık olarak hesaplanmakta ve tırlamasız eksenel kesme derinliği ve iş mili devir sayısı, herhangi bir sayısal doğrulamaya ihtiyaç kalmadan doğrudan önerilen doğrusal analitik model üzerinden hesaplanmaktadır. Analitik olarak tahmin edilen kararlılık eğrileri, zaman bölgesinde yapılan diğer çalışmalarla kararlılıkları karşılaştırılmıştır [15]. İşlenebilirlik sürecinde kesme sisteminin fonksiyonları olan değişkenlerin kesme öncesi ve sonrası dinamik cevaplarının tahmin edilebileceğini, dolayısıyla gerekli deneysel çalışma ölçümlerin sayısının önemli ölçüde azalttığı görülmektedir [16].

Kesme kuvvetleri ve titreşimler kesici takımda deformasyonlara neden olmakta, oluşan bu deformasyonlardan dolayı ölçüsel ve şekilsel hatalar oluşmaktadır. Frezeleme kuvvetleri, kesici takım geometrisi, kesme koşulları ve iş parçası malzemesine bağımlı olarak modellenmektedir. Oluşturulan modellemeler sonucu elde edilen kuvvet tahminleri, işlenmiş yüzeydeki form hatalarının hesaplanmasında kullanılabilmektedir. Tırlama, kesici takım ve iş parçası arasındaki dinamik etkileşimler nedeniyle oluşmaktadır. Tırlama düşük yüzey kalitesine ve istikrarsız ürün kalitesine sebep olduğu bilinmektedir. Parmak frezenin statik ve dinamik özellikleri, form hataları ve tırlama kararlılık sınırlarını ölçmeden tahmin etmek için gereklidir. Yapılan bir araştırmada kesici takımın statik ve dinamik özelliklerini tahmin etmekte kullanılabilecek genel denklemler ile takım ve takım tutucunun statik ve dinamik karakterleri sonlu elemanlar analizi yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Takım ve takım tutucuların çok çeşitli düzenek ve geometrileri göz önüne alındığında, tamamı için ayrı ayrı sonlu elemanlar analizi yapmak çok zaman alıcı ve çok enerji harcanan bir süreçtir. Aynı araştırmada helisel kanallı parmak freze çakılarına yönelik olarak elde edilen modellerin statik ve dinamik karakterleri belirlemede doğru sonuçlar verdiği ispatlanmıştır. Elde edilen sonuçlar ayrıca sonlu elemanlar analizi yapılarak doğrulanmıştır [17]. Talaşlı imalat sırasında iş parçasında genelde istenmeden oluşan izler işleme metodu, kesicinin malzemesi, kaplaması, işlenen malzeme, işleme sırasında oluşan fiziksel, kimyasal etkenler ve kesme mekaniğinde kaynaklanabilen yüzey kalitesinde oluşan varyasyonlar/sapmalar yüzey pürüzlülüğü olarak adlandırılmaktadır. İstenen yüzey kalitesinde işlenen bir yüzey, korozyon direncini, yorulma mukavemetini ve sürtünme ömrünü önemli derecede olumlu yönde artırabilmektedir. Ayrıca pürüzlülük, yüzey sürtünmesine sebep olan temas, aşınma, ısı transferi, yağ filminin oluşması (dolayısı ile tolerans hesabı) ve dayanım ömrü gibi parçaların çeşitli görev fonksiyonlarını etkilemektedir. Tırlama veya takım tezgâhı titreşimleri, iş malzemesinin yapısındaki kusurlar, takım aşınması veya talaş oluşumunun düzensizlikleri, işleme sırasında yüzeyin bozulmasına katkıda bulunmaktadır [18]. Yüzey pürüzlülüğünü tahmin etmek, ilerleme ve kesme hızı gibi işleme parametrelerinin uyumu ile iş parçası kalitesinin yükselmesine vesile olacaktır [19].

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Yapılan çalışmada iş parçası olarak iki farklı çelik seçilmiş olup, birincisi, yüksek sertlik, mukavemet, menevişe direnci, tokluk, iyi işlenebilirlik, ısıl işlemde mükemmel boyutsal kararlılık özelliklerine ve yüzey işlemine de uygun olan AISI H13 (1.2344) çeliğidir. İkincisi, molibden ve vanadyum ile alaşımlanmış, yüksek karbonlu ve kromlu, yüksek aşınma direncine, yüksek alaşım içeriği mükemmel sertleşebilirlik ve iyi boyutsal stabiliteye sahip olan AISI D2 (1.2379) çeliğidir. AISI H13 ve AISI D2 çeliklerine ait kimyasal kompozisyonlar ve sertlik değerleri Çizelge 1'de görülmektedir.

Deneysel çalışmada kullanılan deney parçaları TS ISO 8688 standardına ve IT 8'e uygun olarak hazırlanmıştır. Çalışmada kullanılan iş parçasına ait görsel ve ölçüleri Şekil 1'de verilmiştir.

Frezeleme işlemi 2000 dev/dak iş mili dönme hızına ve 630 mm/dak tabla ilerlemesine sahip Şekil 2'de gösterilmiş olan üniversal freze tezgâhında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kanal açma işlemi için Gerlinger marka yüksek hız çeliği (HSS) testere freze çakısı DIN-1837A standardına uygun seçilmiştir. Testere freze çakısı malafa miline yatay eksende bağlanmıştır. Testere freze çakısına ve tutucuya ait özellikler Çizelge 2'de verilmiştir.

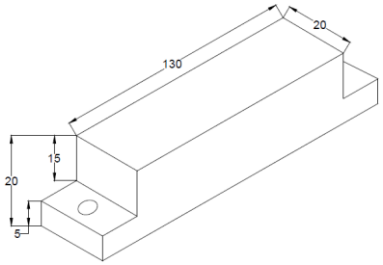
Çizelge 1. Deney malzemelerinin kimyasal kompozisyonu ve sertlik değerleri. (Chemical composition and hardness values of test materials.)

	Sertlik	Kimyasal Bileşim							
	(HB)	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	V
AISI H13	213	0,40	0,31	0,021	0,002	0,87	4,90	1,25	0,89
AISI D2	229	1,59	0,25	0,023	0,006	0,33	11,34	0,72	0,74

ERKEN GÖRÜNÜM

Çizelge 2. Kesici takım ve takım tutucu özellikleri (Cutting tool and tool holder features)

Kesici Takım				Takım tutucu		
Çap (mm)	Genişlik (mm)	Kesici ağız sayısı (diş)	Delik çapı (mm)	Şaft çapı (mm)	Şaft boyu (mm)	Konik Ölçüsü (Mors)
125	3	100	22	22	200	7



Şekil 1. Deney numunesi ve ölçüleri [20,21]
(Experiment sample and dimensions

Şekil 2. Deney düzeneği [20,21]
(Experimental setup)

Şekil 2 'de görülen deney düzeneğinde deneysel verilerin alınabilmesi için dinamometre üzerindeki sinyal akışını gösteren devre Şekil 3'de verilmektedir. Kırmızı ile çizilen hat besleme hattını mavi ile çizilen

Çizelge 3. İlerleme hızına göre diş başına ilerleme oranı
(Feed velocity per tooth according to feed rate)

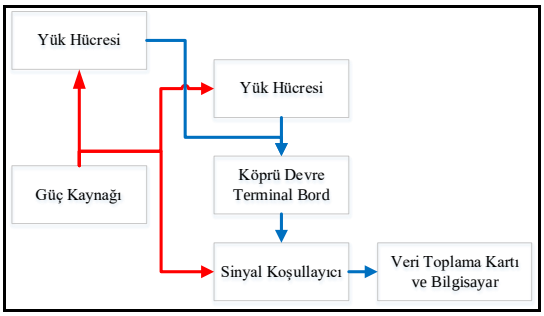
S'(mm/dak)	20	40	63	80	100
f_z (mm/diş)	0.004	0.008	0.0126	0.016	0.02

hat ise elde edilen sinyalleri göstermektedir. Sinyallerin elde edilmesi sürecinde TEDEA HUNTLEIGH 1263 modeli yük hücresi, 24 Voltluk Güç kaynağı, Advantech 818 H veri toplama kartı ve terminal bordu ile ADAM 3016 sinyal koşullayıcı kullanılmıştır.

Deneyler kesme hızı (19.625 m/dak) ve kesme derinliği (1,5 mm) sabit tutularak 5 farklı ilerleme hızında (20, 40, 63, 80, 100 mm/dak) yapılmıştır. Kesme işlemi deney numunelerinin 130 mm boyunca yapılmıştır. Deney parametreleri Çizelge 3 de görülmektedir.

Şekil 2 'de görülen deney düzeneğinde deneysel verilerin alınabilmesi için dinamometre üzerindeki sinyal akışını gösteren devre Şekil 3'de verilmektedir. Kırmızı ile çizilen hat besleme hattını mavi ile çizilen hat ise elde edilen sinyalleri göstermektedir. Sinyallerin elde edilmesi sürecinde TEDEA HUNTLEIGH 1263 modeli yük hücresi, 24 Voltluk Güç kaynağı, Advantech 818 H veri toplama kartı ve terminal bordu ile ADAM 3016 sinyal koşullayıcı kullanılmıştır.

Deneyler kesme hızı (19.625 m/dak) ve kesme derinliği (1,5 mm) sabit tutularak 5 farklı ilerleme hızında (20, 40, 63, 80, 100 mm/dak) yapılmıştır. Kesme işlemi deney numunelerinin 130 mm boyunca yapılmıştır. Deney parametreleri Çizelge 3 de görülmektedir.



Şekil 3. Dinamometre sinyal akışı [20,21]
(Dynamometer signal flow)

3. ANALİTİK MODELLEME (ANALYTICAL MODELING)

İşlenebilirlikle ilgili olarak yapılan analitik hesaplamalar genellikle statiktir. Dinamik olarak hesaplamalar genellikle akademik çalışmalarda ve simülasyon çalışmalarında yapılmaktadır.

Her malzemenin Özgül Kesme Kuvveti katsayısı, takım talaş açısı 0° olan, 1 mm talaş kalınlığında ve 1 mm karelik bir talaş alanını kesmek için gereken kesme yönündeki kuvvet ks11 adını almaktadır. Özgül Kesme Kuvveti katsayısı (k_{s11}-N/mm2); talaş kaldırma süreçlerinde 1 mm kalınlığında ve 1 mm^2'lik alanındaki talaş istenen kesme yönündeki kuvveti ifade eden katsayısıdır. 700 ile 4000 N/mm^2 aralığında değere sahip olan Ks özgül kesme kuvveti ise her malzemenin normalleştirilmiş noktasından uzaklaştıkça nasıl değiştiğini gösteren bir z (birincil faktör) sabiti ile bulunmaktadır. Ks özgül kesme kuvveti değeri talaş kalınlığı azaldıkça artmaktadır. Gerekli işleme gücünü, kesme kuvvetlerini ve torku hesaplamak için zorunlu bir değerdir. k_{s11}, ve hm z nin fonksiyonu olup, z ise 0.2 ile 0.3 arasında değer almaktadır. Kaldırılacak olan talaş hacmi küçüldükçe özgül kesme kuvveti (Ks-N/mm^2)

değeri katlanarak artmakta hatta en fazla alması gereken değerin katları şeklinde yükselebilmektedir.

Denklem 1-5 kullanılarak kesme kuvveti Fs hesaplanmıştır. Kesme kuvveti diş başına ilerleme, kesme derinliği, kesme parametreleri, özgül kesme direnci, talaş kalınlığı gibi Denklem 5 de görülen değişkenlerin fonksiyonudur [22-27]. S', ilerleme hızının (mm/diş) hesaplanmasında Denklem 1 kullanılmıştır. Denklem 1'deki fz ilerleme oranını (mm/diş), Z kesici takım diş sayısı ve N devir sayısını (dev/dak) ifade etmektedir. Denklem 2'nin kullanılması ile $\cos\varphi_s$ kesme kavrama açısı (derece) hesaplanmaktadır. Denklem 2'deki a_p kesme derinliğini (mm) ve D kesici takım çapını (mm) temsil etmektedir. Denklem 3 ile h_m ortalama talaş kalınlığı (mm) hesaplanmaktadır. Buradaki κ yerleşme açısını (derece) ifade eder. Denklem 4 ile z_e iş parçası ile temas eden diş sayısı değeri hesaplanmaktadır. Son olarak Denklem 5 ile Fs kesme kuvveti (N/mm^2) hesaplanmaktadır. Buradaki b talaş genişliğini (mm), k_{s11} birim özgül kesme kuvveti katsayısını (N/mm^2), C iş parçası malzemesi için katsayı (boyutsuz), k_a aşınma faktörü (boyutsuz) ve k_T takım malzemesine göre talaş kaldırma yöntemi faktörünü temsil etmektedir. Burada kullanılan k_a ve k_T değerleri sırası ile 1,3 ve 1,56 sabit değerle alınmıştır.

$$S' = f_z . Z . N \quad (1)$$

$$cos\varphi_s = 1 - \frac{2a_p}{D} \quad (2)$$

$$h_m = \frac{360^o}{\pi * \varphi_s} \frac{a_p}{D} f_z sin\kappa \quad (3)$$

$$Z_e = Z \frac{\varphi_s}{360} \quad (4)$$

$$F_s = Z_e b \frac{360^o}{\pi * \varphi_s} \frac{a_p}{D} f_z sin\kappa \left(\frac{k_{s11}}{\left(\frac{360^o}{\pi * \varphi_s} \frac{a_p}{D} f_z sin\kappa\right)^z} \frac{C - 1.5\pi^0}{100} \frac{94 - 1.5\lambda}{100} k_T k_a \right) \quad (5)$$

Denklem 1-5 kullanılarak kesme kuvveti Fs hesaplanmıştır. Kesme kuvveti diş başına ilerleme, kesme derinliği, kesici takım kesme parametreleri, özgül kesme direnci, talaş kalınlığı gibi Denklem 5 de görülen değişkenlerin fonksiyonudur [22-26]. Analitik hesaplamalarda tüm değişkenler ve formüller excel paket programına girilerek hesaplama sonuçları elde edilmiştir. Kesme kuvveti Fs'nin hesaplanmasında kullanılan değişkenler Çizelge 4'de gösterilmiştir.

3. MATEMATİKSEL MODELLEME ve SİMÜLASYON (MATHEMATICAL MODELING and SIMULATION)

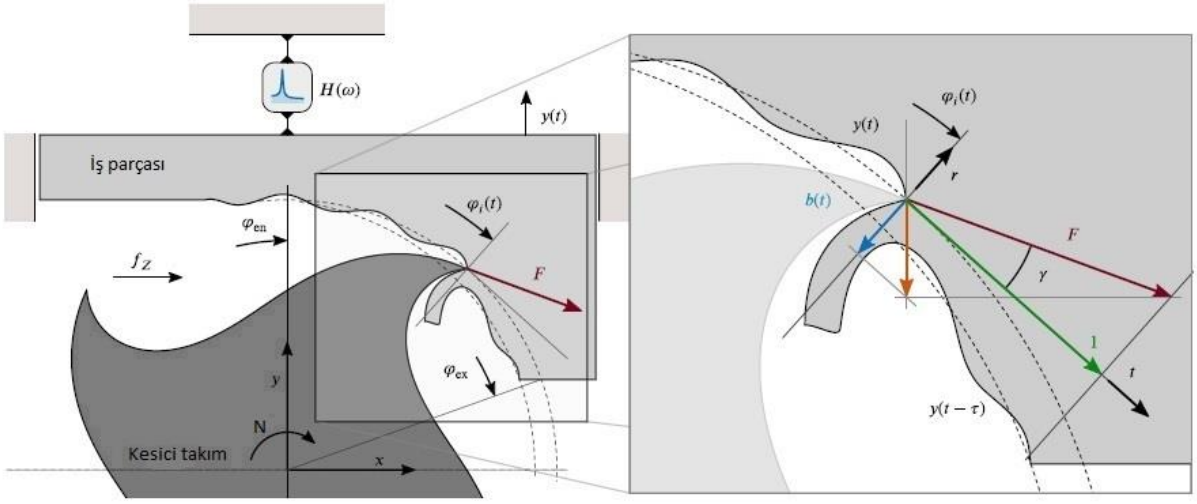
Talaşlı imalatta tırlamayla ilgili mevcut tüm teoriler ve analizler, yapının doğrusal titreşim sistemi varsayımlarına ve çoğunlukla titreşimin kesme kuvveti üzerindeki doğrusal etkisine dayanmaktadır. Bununla birlikte, tırlama başladığında süresiz olarak büyümediği, ancak sonlu bir titreşim genliğinde sabitlendiği de iyi bilinmektedir [27]. Talaş kaldırma işleminin dinamiği, zamanla değişen periyodik katsayılara sahip bir dizi diferansiyel fark denklemiyle tanımlanabilmektedir. Böyle bir durumda işleme sisteminin sistemin kararlılığı Fourier analizi ve doğrusal periyodik sistemlerin

Çizelge 4. Fs'nin hesaplanmasında kullanılan değişkenler ve boyutları (Variables and dimensions used in calculating Fs)

Parametreler	Açıklamalar	Seviyeler
a_p (mm)	Kesme Derinliği	1.5
b (mm)	Talaş Genişliği	3
C (boyutsuz)	İş Parçası Malzemesi Katsayısı	109
D (mm)	Kesici Takım Çapı	125
k_a (boyutsuz)	Aşınma Faktörü	1.3
k_{s11} (N/mm^2)	Özgül Kesme Kuvveti Katsayısı	2450
k_T	Talaş kaldırma Yöntemi Faktörü	1.56
N (dev/dak)	Devir Sayısı	50
S` (mm/dak)	İlerleme Hızı	20, 40, 63, 80 ve 100
Z (diş)	Kesici Takım Diş Sayısı	100
z_e	Temas Eden Diş Sayısı	0.23
κ (°)	Yerleşme Açısı	90
γ (°)	Talaş Açısı	15
λ	Büzülme Oranı	12
F_s (N/mm^2)	Kesme Kuvveti	
f_z (mm/diş)	İlerleme Oranı	
h_m (mm)	Ortalama Talaş Kalınlığı	
K_s ((N/mm^2)	Özgül Kesme Kuvveti	
φ_s (°)	Kesme Kavrama Açısı	
φ_i (°)	Kesen kenarın konum açısı	
φ_{en} (°)	Kesen kenarın giriş açısı	
φ_{ex} (°)	Kesen kenarın çıkış açısı	

parametrik transfer fonksiyonlarının temel özellikleri kullanılarak incelenmektedir. Ortaya çıkan karakteristik denklem sonsuz mertebededir ve sabit katsayılara sahiptir. Bazı kısaltmaların sonucunda elde edilen denklemlere, kontrol teorisinin standart tekniklerini kullanarak stabilite sınırını belirlemek için kullanılmaktadır [28]. Mekanistik yaklaşımın, her kesici geometri için frezeleme testlerinden belirlenen frezeleme kuvveti katsayılarına bağlı olduğu gösterilmiştir. Bunun aksine, birleşik kesme mekaniği yaklaşımı, takım geometrik değişkenlerini içeren, deneysel olarak belirlenmiş bir ortogonal kesme veri tabanına (yani kesme açısı, sürtünme katsayısı ve kesme gerilimi) ve genel bir eğik kesme analizine dayanan frezeleme

BASILMIŞTIR



Şekil 4. Frezeleme işleminin şematik gösterimi [33,42] (Schematic illustration of the milling process)

modellerine dayanmaktadır. Tüm kuvvet bileşenleri ve kesici geometrik tasarımlar için frezeleme kuvveti katsayılarının, ortogonal kesme veri tabanından ve tahmine dayalı mekanik frezeleme modellerinde kullanılmak üzere genel eğik kesme analizinden tahmin edilebileceği gösterilmektedir. Bu yöntemlerle, kuvvet tahminine yönelik mekanik yaklaşım için her bir frezeleme takımı geometrisinin deneysel kalibrasyonu ihtiyacını ortadan kaldırmakta ve daha karmaşık kesici tasarımlara uygulanabilmektedir [29]. Benzer şekilde zaman alanını kullanarak simülasyonlarına başlanılmıştır[30]. Bir frezeleme prosesinin zaman alanı simülasyonunun çoklu çalıştırmalarının sonuçlarının değerlendirilmesi için kararlılık ve FRF diyagramları kullanılmaktadır. Bu diyagramlar, çeşitli eksenel kesme derinlikleri ve iş mili hızı aracılığıyla çok sayıda simülasyondan kaynaklanan kuvvetlerin, sapmaların veya yüzey kalitesinin genliklerini özetlemektedir [31].

Frezeleme sürecindeki kesme işlemi en temel kütle, sönümleyici ve yay diferansiyel denklemi ile modellenebilmektedir. Burada M kütle, C sönümleme, Kr ise sertliği, y yer değiştirme olarak kabul edilirse F kesme kuvvetini verecektir. Burada sistem cevabı her mod etkisinin süperpozisyonu olarak hesaplanmalıdır [32].

$$M\ddot{y}(t) + C\dot{y}(t) + K_r y(t) = F(t) \qquad (6)$$

6 nolu denklemi oluşturan bileşenlerin dinamik davranışları dikkate alındığında 7 nolu denklem elde edilmektedir [34].

$$\ddot{y}(t) + 2\xi w_n \dot{y}(t) + w_n^2 y(t) = \frac{w_n^2}{k} F(t, y(t), y(t-\tau)) \qquad (7)$$

7 nolu denklemde ξ sönüm oranını, w_n doğal frekansı ifade etmektedir. 3 nolu denklemdeki ortalama talaş kalınlığı statik hesaplamalar için verilmektedir. Simülasyon çalışmalarında ise talaş derinliğinin dinamik olarak değiştiği bilinmektedir [34-36]. Denklem 8 de ϕ_j emas eden kesici kenarını ifade etmektedir.

$$h_{mj}\left(\phi_j(t)\right) = c\,sin\phi_j(t) + -y(t-T)\,sin\phi_j(t) - -y(t)\,sin\phi_j(t) \qquad (8)$$

Kesme işleminin bileşenleri Fx ve Fy 9 ve 10 nolu denklemlerde verilmektedir [37-41]. F kuvveti ile x eksenideki bileşeni arasında oluşan β açısı oluşmaktadır. Bu açı kesme esnasında oluşan Ks özgül kesme kuvvetinin bileşenlerini (k_t, k_r) de etkilemektedir. 8 nolu denklemde verilen kesici kenara göre değişen ortalama talaş kalınlığının F kesme kuvvetini etkileyecektir. Elde edilen denklem 11'e göre çözülürse kararlılık grafiği elde edilmektedir.

$$F_x = \sum_{j=0}^{N-1} g\left(\phi_j(t)\right) - F_{tj}cos\phi_j(t) - F_{rj}sin\phi_j(t) \qquad (9)$$

$$F_y = \sum_{j=0}^{N-1} g\left(\phi_j(t)\right) F_{tj}sin\phi_j(t) - F_{rj}cos\phi_j(t) \qquad (10)$$

9 ve 10 nolu denklemler F kuvvetinin bileşenleridir. Elde dilen F denklemi 7 nolu denklem formuna dönüştürüldüğünde gerekli sistem dinamiği ve kontrol kuralları uygulanmaktadır.

$$a_{p(sınır)} = \frac{-1}{2K_s Cos(\beta) * Re[FRF]} \qquad (11)$$

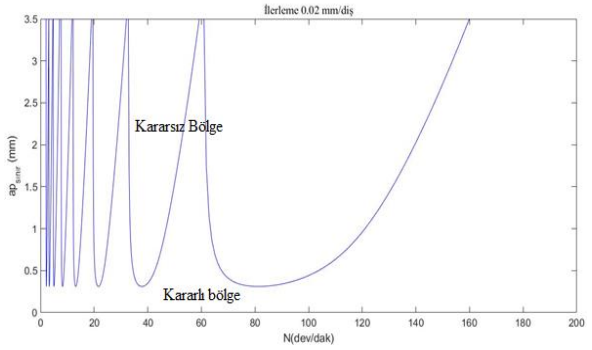
Frezelemede kesme mekaniği incelendiğinde dik kesmede kesme hızının (v) kesici kenara dik olduğu, eğik kesmede ise kesici kenara normale oranla dar bir açıyla eğimli olduğu dik ve eğik kesme işlemleri detayları Şekil 4'de görülmektedir [33,42]. Yukarıda verilen formüller ve kontrol kuramları Matlab yazılıma girilerek grafiksel sonuçlar elde edilmiştir.

Rejeneratif/yenilemeli tek yönlü frezelemede; radyal etkinin kararlılık üzerindeki etkisi frezeleme işleminin basitleştirilmiş bir analitik modelini geliştirilerek bazı yaklaşımlar değerlendirilmektedir. Burada; öncelikle genel amaçlı frezeleme modelleri genellikle üç boyutlu kartezyen koordinat (x y z) yaklaşımı ile oluşturulurken, ince cidarlı frezeleme işlemleri gibi bazı talaş kaldırma işlemlerinde, ilerleme hareketine dik olan yerde tek yönlü(tek eksende) frezeleme modeli kullanılmaktadır. Bu yaklaşımların ikincisi ise, düz yivli (helis açısı 90°)bir

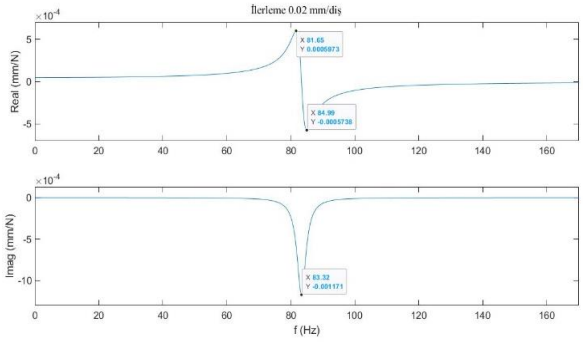
ERKEN GÖRÜNÜM

testere freze çakısı dikkate alarak basitleştirilmiş bir yaklaşımdır. Yukarıda kabullenilen basitleştirilmiş yaklaşımlar ile kesici takımdan elde edilen sonuçlar testere frezeden daha karmaşık takım geometrilerine modellenmesinde yardımcı olabilmektedir. Modellemelerde tipik olarak birden fazla sınırlayıcı esnek mod olmasına rağmen, temel model, doğal frekansı ω_n, yansıtılan modal sertliği k ve sönüm oranı ζ ile y yönünde tek bir modu değerlendirilmektedir [44-46].

Şekil 5.de Kararlılık diyagramı, Şekil 6. Frekans cevap fonksiyonu grafiği verilmiştir. Yapılan işlenebilirlik çalışması için tipik bir kararlılık diyagramının detayları Şekil 5'de görülmektedir. Bu grafiğin incelenmesi, kendiliğinden uyarılan tırlamanın hesaplanması



Şekil 5. Kararlılık diyagramı (Stability diagram)



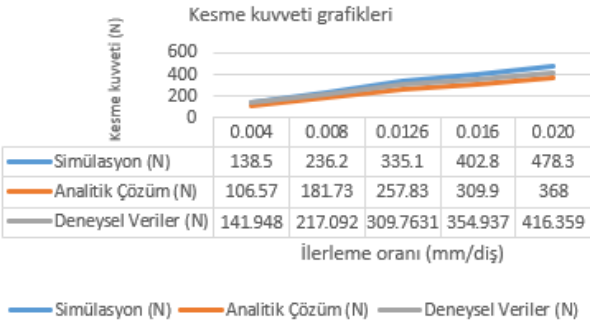
Şekil 6. Frekans Cevap Fonksiyonu Grafiği (Frequency Response Function Graph diagram)

tanımlanan sorununun çözümüne yönelik olarak başarıyı göstermektedir. Şekil 5'e bakıldığında, sınıflandırma amacıyla kararlılık eğrileri (8 farklı eğri), bu eğrilerin teğet bölgesi ve kararlı/kararsız bölge olarak adlandırılabilen üç kısımla tanımlanabilmektedir. Kararlılık diyagramları, iş mili devrinin bir fonksiyonu olarak kesme derinliğinin kritik değerindeki değişimi tanımlamaktadır. Bu eğrileri elde etmek için 2, 3, 5, 8, 13, 22, 38, 80 dev/dak denk gelen kararlılık eğrileri çizilmiştir. Grafik yorumlandığında 50 dev/dak'da 1.55 mm, 100 dev/dak'da 0.5 mm ve 150 dev/dak ise 2.7 mm kesme derinliğini kritik olduğu görülmektedir. Grafik incelendiğinde eğrilerin altında kalan alanda imalat parametrelerinin seçilmesi halinde titreşimin dolayısı ile tırlamanın azalacağı ve dolayısı ile hem yüzey kalitesinin iyileşeceğini hem de birim zamanda kaldırılan talaş miktarının (MRR) artacağını göstermektedir. İmalat süreçlerine başlamadan genel olarak simülasyon çalışmasının yapılması elde edilmesi planlanan mamül yada yarı mamülün kalitesinin izlenebilirliği açısından önemlidir.

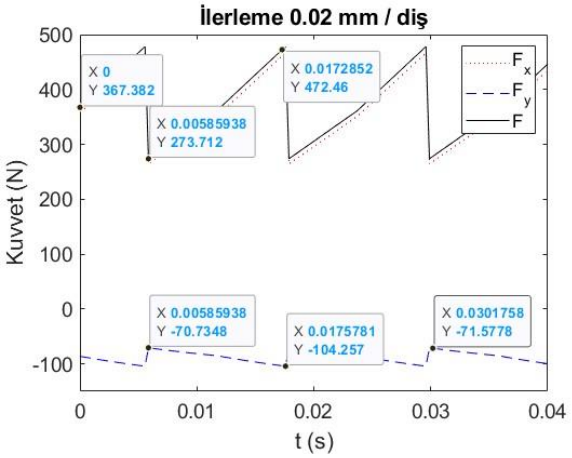
Transfer fonksiyonunun gerçel ve sanal kısımları Şekil 6'da kutupsal grafikle gösterilmektedir. Sıfır frekans geçişinde gerçek kısım statik esnekliğe (1/k) eşittir. Uyarma frekansı doğal frekansa yaklaştıkça, sistem rezonansa girer, titreşimlerin genliği maksimum olur ve faz açısı -83.3 dereceye yaklaşmaktadır. Uyarma ve yanıt arasındaki zaman gecikmesi, harmonik uyarma frekansı ω 'da $\tau_d = {}^{\varphi}/_{\omega}$ ile değerlendirilebilmektedir. Uyarma frekansı artmaya devam ederse, faz açısı -166.67 dereceye yaklaşmaktadır veya gecikme, uyarılma periyodunun yarısı olmaktadır. Fiziksel yapı yüksek frekanslı bozulmalara cevap veremediği için titreşimlerin genliği azalmaktadır. Sönüm oranı, sertlik ve doğal frekans, Fourier analizörü ile ölçülen transfer fonksiyonundan tahmin edilebilmektedir. Sıfır uyarma frekansında (ω = 0), (ω)'nin büyüklüğü ve gerçek alan G(ω) (G(ω) F(s)) nin tranfer fonsiyonundan elde edilmektedir) statik esnekliğe (1/k) eşittir. (ω)'nin maksimum büyüklüğü $\omega = \omega_n\sqrt{1-2\xi^2}$'de meydana gelmektedir. F(t) (yani frezeleme kuvveti), $\tau = {}^{2\pi}/_{\omega}$ (yani diş periyodu) periyoduyla periyodik olduğunda, Fourier serisinde genişletilebilmektedir. Fourier katsayılarının tam çözümü, periyodik zorlama fonksiyonu F(t)'nin matematiksel gösteriminde sürekli integraller alınarak bulunabilmektedir[46]. Aynı zamanda Şekil 6'da elde edilen frekans cevap fonksiyonu değerinin 83.3 Hz olduğu görülmektedir. Bu frekans değeri kesici kenarın frekans değerini göstermektedir. Bu değer analitik olarak da doğrulanmıştır.

Çizelge 4'de 5 farklı ilerleme oranına göre elde edilen Kuvvet- Faz açısı, Zaman, Frekans cevap fonksiyonu eğrileri görülmektedir. Çizelge 4 incelendiğinde her bir ilerleme oranı için oluşturulan Kuvvet-Zaman ve Kuvvet-Faz grafiklerinin aynı olduğu görülmektedir. Yapılan modelleme çalışmasının akabinde elde edilen matematiksel denklemlerin çözümleri yapıldığında yapılan kodlama ile denklemler birbirini doğrular niteliktedir. Kuvvet faz grafiklerinde her bir dişin frekansına göre oluşan kesme kuvvetlerindeki değişim görülmektedir. Kesici takımda 100 diş bulunduğu için her bir kesici kenar 3.6o malzemeye dalmaktadır. Bu dalma şekli ve bu esnada oluşan kuvvetteki değişim üçgen şeklinde olan kuvvet değişimlerinde açıklanabilmektedir. Bu grafiklerde elde edilen kuvvet grafiklerinin esas anlamında şekilleri [47,48] le uyum göstermektedir. Aynı şekilde Çizelge 4'de görülen Kuvvet-Frekans cevap fonsiyonu grafikleri ise her 83.3 frekansta bir yenilenmektedir. Bu da takımın periyodundan kaynaklanmaktadır. Burada elde edilen grafiklerde [49]' uyum göstermektedir.

ÖRNEK



Şekil 7. Kesme kuvveti kıyaslama grafiği (Cutting force comparison chart)



Şekil 8. Kesme zaman grafiği (Cutting time graph)

Şekil 8'deki grafik, 0.02 mm/diş ilerleme değerinde gerçekleştirilen talaş kaldırma işlemi sırasında kesici takımın maruz kaldığı kuvvet bileşenlerinin (Fx, Fy ve F) zamana bağlı değişimini ortaya koymaktadır. Grafikte yer alan Fx kuvvet bileşeni, kesme yönündeki kuvveti temsil etmekte olup pozitif değerlerde seyrederken yaklaşık 273–472 N aralığında periyodik dalgalanmalar sergilemektedir. Bu periyodik yapı, takımın her bir dişinin iş parçası ile temas etmesiyle oluşan kuvvet piklerinin bir cevabıdır. Özellikle 0.0172852 saniyede ulaşılan 472.46 N'lik maksimum değer, takımın iş parçası ile en geniş temas yüzeyine sahip olduğu anda meydana gelen kuvvet artışının bir göstergesidir.

Diğer yandan, Fy kuvvet bileşeni ilerleme yönünde ortaya çıkan kuvveti temsil etmekte olup negatif değerlere sahiptir ve bu durum takımın ilerleme yönünde maruz kaldığı direnç kuvvetinin bir göstergesi olarak yorumlanmaktadır. Fy bileşeni yaklaşık -70 ile -104 N aralığında değişmekte olup, en düşük değeri 0.0175781 saniyede -104.257 N olarak gerçekleşmektedir. Bu nokta, Fx'in en yüksek seviyeye yaklaştığı zamana oldukça yakın olması bakımından dikkat çekici olup, kuvvet bileşenlerinin birbirine senkronize şekilde davrandığını göstermektedir.

Fx ve Fy bileşenlerinin bileşkesi olan toplam kesme kuvveti F, grafikte siyah eğri ile temsil edilmiş olup zaman ekseninde ani sıçramalar ve düşüşlerle karakterize edilen dinamik bir cevap serisini göstermektedir. Bu durum, kesici takımın dişleri arasında kalan boşluklarda iş parçası ile temasın kesilmesi sonucu oluşan süreksiz talaş kaldırma evrelerini ifade etmektedir. Özellikle 0–0.02 saniye aralığında gözlemlenen keskin geçişler, takımın bir dişinin malzemeyi kesmeye başlaması ve ardından boşluğa girmesiyle meydana gelen kuvvet salınımlarının doğrudan bir göstergesidir.

İşleme parametresi olarak belirtilen 0.02 mm/diş ilerleme oranı, her bir takım dişinin iş parçasında 0.02 mm ilerlediğini göstermekte olup bu değer genellikle hassas yüzey kalitesi gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir. Ancak bu düşük ilerleme değerine rağmen kesme kuvvetlerinin oldukça yüksek seviyelerde seyretmesi, işlenen malzemenin sertliği, kesici takım geometrisi ve kesme hızı gibi diğer parametrelerle ilişkili olarak değerlendirilmektedir. Grafikteki dik sıçramalar ve ani düşüşler, talaş kaldırma sürecinin süreksiz ve dinamik bir yapıda gerçekleştiğine işaret etmekte olup, bu durumun takım ömrü ve yüzey kalitesi üzerinde olumsuz etkiler yaratabileceği öngörülmektedir.

Özetle, söz konusu grafik, takım-tezgâh-malzeme etkileşiminin zaman ekseninde oldukça kompleks ve yüksek frekanslı olduğunu göstermekte; talaş kaldırma işleminin mekanik ve dinamik karakteristiklerini açık biçimde ortaya koymaktadır. Bu veriler, özellikle takım kuvvet analizi, süreç optimizasyonu ve kestirimci bakım stratejilerinin geliştirilmesinde yüksek çözünürlüklü bir referans niteliği taşımaktadır.

Çizelge 6'deki Kesme Kuvvetlerinin Faz Açısı, Zaman ve Frekans Açısından Karşılaştırmalı Analizi deney sonuçları karşılaştırıldığında (İlerleme: 0.004–0.02 mm/diş);

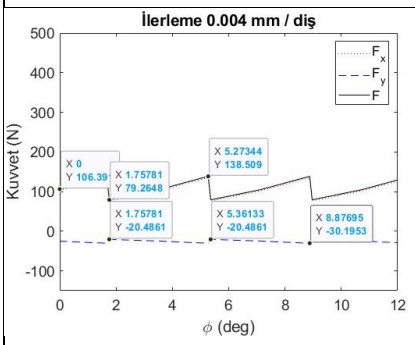
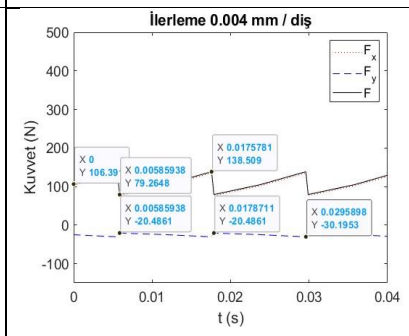
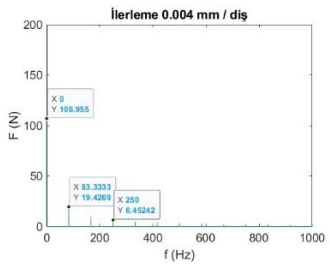
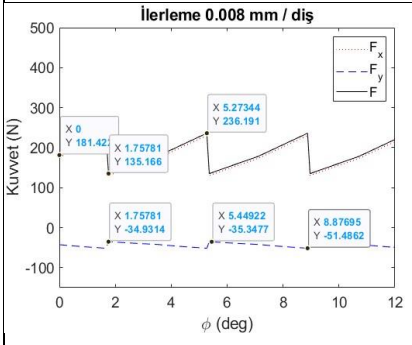
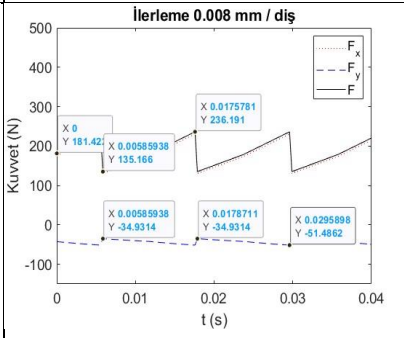
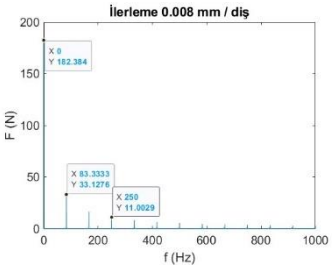
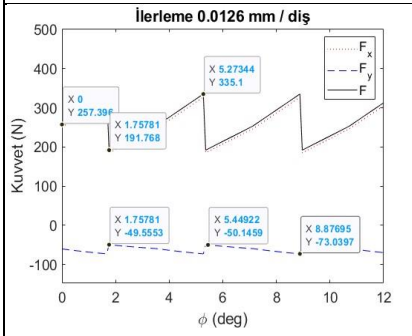
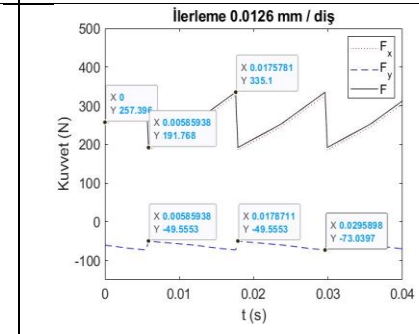
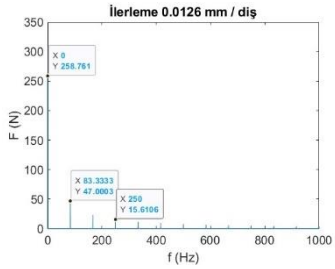
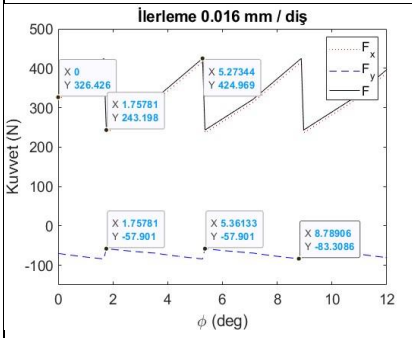
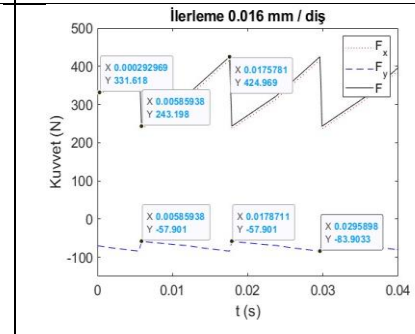
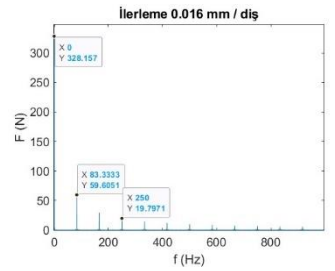
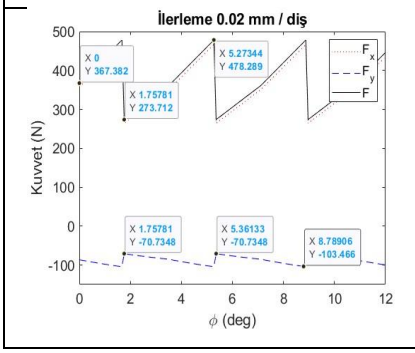
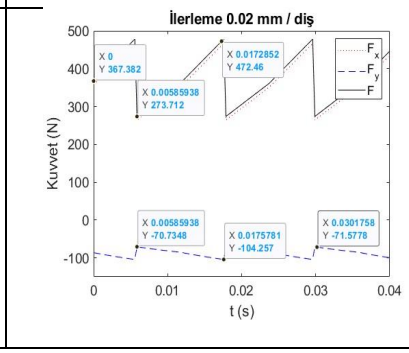
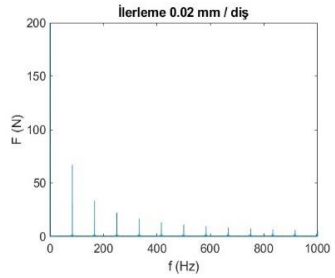
Faz Açısına Göre Kesme Kuvvetleri

Kesme kuvvetlerinin faz açısına göre dağılımı, her ilerleme değerinde belirgin bir artış göstermektedir. Fx bileşeni, tüm ilerlemelerde pozitif kalırken Fy genellikle negatif yönde seyretmektedir. İlerleme arttıkça hem Fx hem de Fy bileşenlerinin genliklerinde önemli artışlar gözlenmektedir. Özellikle 0.004 mm/diş ilerleme oranı düşük ilerleme oranı değerinde Fx ≈ 135 N civarında iken, bu değer 0.02 mm/diş ilerleme oranında ≈ 470 N seviyesine çıkmaktadır. Bu durum, ilerleme miktarının arttırılmasının kesme kuvveti üzerindeki lineer olmayan etkisini açıkça göstermektedir.

Fy bileşeninde ise benzer bir eğilim söz konusudur; negatif yönlü maksimum değer -24.86 N'den (0.004 mm/diş ilerleme oranı) -104.26 N'ye (0.02 mm/diş ilerleme oranı) kadar düşmektedir. Bu artış, takımın ilerleme yönünde maruz kaldığı direnç kuvvetinin ciddi biçimde arttığını göstermektedir.

ERKEN GÖRÜNÜM

Çizelge 5. Kuvvete karşı Faz açısı, Zaman, Frekans değişimleri (Phase angle, Time, Frequency changes against force)

Kuvvet-Faz Açısı	Kuvvet-Zaman	Kuvvet-Frekans
		
		
		
		
		

Çizelge 6. Dinamik cevap karşılaştırma çizelgesi (Dynamic response comparison table)

İlerleme Oranı (mm/diş)	Fx Maks (N)	Fy Min (N)	F Spektrum Genliği	Dinamiklik
0.004	≈ 135	≈ -25	Düşük	Kararlı
0.008	≈ 260	≈ -50	Orta	Artmakta
0.0126	≈ 345	≈ -72	Yüksek	Belirgin
0.016	≈ 410	≈ -90	Çok yüksek	Titreşimli
0.02	≈ 470	≈ -104	En yüksek	Potansiyel Tırlama Riski

Zamana Göre Kuvvet Davranışı

Tüm ilerleme oranı değerlerinde zamana bağlı kuvvet eğrileri, talaş kaldırma işleminin periyodik doğasını net bir şekilde yansıtmaktadır. Düşük ilerleme oranı değerlerinde (örneğin 0.004 mm/diş) bu periyodik yapı daha küçük genlikli ve daha düşük eğimli iken, ilerleme miktarı arttıkça bu periyodik yapı daha sivri tepelere dönüşmekte ve daha ani kuvvet değişimleri gözlenmektedir.

Özetle; 0.0126 mm/diş ileleme oranı ve üzerindeki ilerleme oranı değerlerinde Fx eğrisindeki keskin yükselişler, takımın her bir dişinin iş parçasına giriş anında oluşan kuvvetin daha agresif bir şekilde yükseldiğini ve ardından ani düşüşlerle talaş kopuşunun gerçekleştiğini işaret etmektedir. Zaman ekseninde bu keskinlik, talaş kaldırma işleminin daha dinamik ve titreşimli hale geldiğini göstermektedir.

Frekans Spektrumları

Frekans alanındaki grafikler, talaş kaldırma işleminin harmonik karakterini değerlendirmek açısından son derece değerlidir. En belirgin harmonik bileşenler tüm ilerleme oranı değerlerinde benzer bir temel frekans çevresinde yoğunlaşmakta, ancak ilerleme miktarı arttıkça bu harmoniklerin enerjisi (yani spektrum amplitüdü/genliği) artmaktadır. 0.004 mm/diş ilerleme oranında spektrum oldukça dar bantlı ve düşük genliklidir, bu da düşük kesme şiddeti ve nispeten kararlı talaş kaldırma anlamına gelmektedir. 0.016–0.02 mm/diş ilerleme oranı aralığında ise harmoniklerin genliği gözle görülür şekilde artmakta, bu da sistemin dinamik davranışının daha uyarılmış hâle geldiğini ve potansiyel tırlamaların belirginleşebileceğinin göstergesidir.

4. SONUÇ (DISCUSSION)

Elde edilen sonuçlar dinamik şartlardaki matematiksel denklemlerin çözümleri ile elde edilmiştir. Şekil 7 de analitik simülasyon ve deneysel olarak elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır. Bu kıyaslama sonucunda simülasyon sonucunda çıkan değerler analitik çözümden yüksek gibi görünmektedir. Ancak simülasyon grafiği incelendiğinde analitik çözüm statik olduğu için kuvvet eğrisinin absis eksenine paralel gibi tek değer çıkmaktadır. Ancak simülasyon grafiğinden alınan veriler incelendiğinde kesme kuvvetinin ordinatı kestiği nokta 367.4 N olduğu görülmekte ve 478.3 N' kesme kuvvetine kadar testere dişi şeklinde çıkmaktadır. Akabinde tekrar 273.7 N değerine düşmektedir. Üçgenin hipotenüsüne benzer bir yol izlemektedir. Üçgenin ağırlık merkezi hesabı yapıldığında 367 N civarında bir değer elde edilmektedir. Bu değerde analitik çözüme yakın bir değerdir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(ları) çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Hasan Basri ULAŞ: Matematiksel modellemeyi ve yorumlamayı gerçekleştirerek makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Furgan MİHMAT: Deney düzeneğini kurararak deneyleri gerçekleştirmiştir.

Halil DEMİR: Makalenin literatür taraması ve yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Insperger, T.; Mann, B.P.; Stépán, G. and Bayly, P.V., "Stability of up-milling and down-milling. Part 1: Alternative analytical methods", ***International Journal of Machine Tools and Manufacture***, Vol. 43, No. 1, pp. 25-34, (2003a).

[2] Insperger, T.; Mann, B.P.; Stépán, G. and Bayly, P.V., "Stability of up-milling and down-milling. Part 2: Experimental verification", ***International Journal of Machine Tools and Manufacture***, Vol. 43, No. 1, pp. 35-40, (2003b).

[3] Altintas, Y., "***Metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design.***" Manufacturing Automation (2000).

[4] Altintas, Y. and Budak, E., "Analytical prediction of stability lobes in milling", ***Annals of the CIRP***, Vol. 44, No. 1, pp. 357-362, (1995).

[5] Bediaga, I., Igor, E., and Jokin M., "Time and frequency domain models for chatter prediction in milling." ***DAAAM International Scientific Book 2005***: 33-48., (2005).

[6] Wiercigroch, M., and Budak, E., "Sources of nonlinearities, chatter generation and suppression in metal cutting." ***Philosophical Transactions of the Royal***

ERKEN GÖRÜNÜM

Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 663-693, (2001).

[7] Budak, E., Altintas Y. "Prediction of milling force coefficients from orthogonal cutting data." ***ASME Prod. Eng. Div Publ. Ped***., 453-460: 64 (1993).

[8] Quintana B.G., "Stability lobes diagram identification and surface roughness monitoring in milling processes", ***Doctoral dissertation, Universitat de Girona***., (2010).

[9] Faassen, R., Petrus H., "Chatter prediction and control for high-speed milling: modelling and experiments", ***Phd. Thesis*** (2007).

[10] Wiercigroch, M. and Anton M. K., "Frictional chatter in orthogonal metal cutting" ***Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A***: ***Mathematical, Physical and Engineering Sciences:*** 713-738, (2001).

[11] Tlusty, J., and Polacek, M.. "The stability of machine tools against self-excited vibrations in machining", ***International Research in Production Engineering***, 465-474, (1963).

[12] Ganguli, A. B., et al. "Active damping of chatter in machine tools-demonstration with a 'hardware-in-the-loop'simulator." ***Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering***, 359-369, (2005).

[13] Faassen, R. P. H., et al. "Prediction of regenerative chatter by modelling and analysis of high-speed milling." ***International Journal of Machine Tools and Manufacture***, 1437-1446,(2003).

[14] Kline, W.A., and Richard E.D., "The effect of runout on cutting geometry and forces in end milling." ***International Journal of Machine Tool Design and Research***, 123-140, (1983).

[15] Altintaş, Y., and Budak, E., "Analytical prediction of stability lobes in milling." ***CIRP Annals***, 357-362, (1995).

[16] Schmitz, T.L., and Donalson, R. R., "Predicting high-speed machining dynamics by substructure analysis." ***CIRP Annals***, 303-308, 49.1 (2000).

[17] Kıvanç, E.B., "Modeling statics and dynamics of milling machine components", ***Phd. Thesis***, (2003).

[18] Boothroyd, Geoffrey, ***Fundamentals of metal machining and machine tools***. Vol. 28. Crc Press, (1988).

[19] Sarı, Hüseyin. "Frezelemede takım geometrisi ve tırlama titreşimlerinin yüzey pürüzlülüğüne etkileri", ***Msc Thesis***, (2008).

[20] Mihmat, Fürğan, "Farklı çeliklerin testere freze çakılarıyla işlenebilirliklerinin incelenmesi", ***Msc Thesis***. ***E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü***, (2009).

[21] Ulaş, H.B., Mihmat, F., and Demiri H., "DIN 1.2344 sıcak iş takım çeliğinin testere freze çakılarıyla işlenebilirliğinin araştırılması." ***Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi***, 170-178, (2010).

[22] Mendi, F., ***Takım Tezgahları Teori ve Hesapları***, Gazi Kitabevi, Ankara, (2006).

[23] Tschätsch, Heinz. ***Applied machining technology***. Springer Science & Business Media, (2010).

[24] Huda, Zainul. ***Manufacturing: mathematical models, problems, and solutions***. CRC Press, (2018).

[25] Akkurt, Mustafa.***Talaş kaldırma yöntemleri ve takım tezgâhları***. Birsen Yayınevi, (1992).

[26] Shaw, Milton Clayton, and J. O. Cookson, ***Metal cutting principles***. Vol. 2. No. 3. New York: Oxford university press, (2005).

[27] Tlusty, J., and F. Ismail. "Basic non-linearity in machining chatter." ***CIRP Annals*** 30.1: 299-304, (1981).

[28] Minis, Ioannis, and Rafael Yanushevsky. "A new theoretical approach for the prediction of machine tool chatter in milling." ***J. Eng. Ind.*** 1-8. (1993).

[29] Budak, Erhan, Yusuf Altintas, and E. J. A. Armarego. "Prediction of milling force coefficients from orthogonal cutting data". ***J. Manuf. Sci. Eng.***, 216-224 (1996).

[30] Smith, S. and Tlusty, J. "Efficient simulation programs for chatter in milling", ***Annals of the CIRP***, Vol. 42, No.1, pp. 463-466, (1993).

[31] Smith, S., and J. Tlusty. "Efficient simulation programs for chatter in milling." ***CIRP annals*** 42.1 463-466, (1993).

[32] Bediaga, Iñigo, Igor Egana, and Jokin Munoa. "Time and frequency domain models for chatter prediction in milling." ***DAAAM International Scientific Book 2005*** 33-48, (2005).

[33] Sanz-Calle, Markel, et al. "On the effect of radial engagement on the milling stability of modes perpendicular to the feed direction." ***CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*** 49 111-127, (2024).

[34] Tlusty, J., and F. Ismail. "Basic non-linearity in machining chatter." ***CIRP Annals***, 299-304, (1981).

[35] Smith, S., and J. Tlusty. "Efficient simulation programs for chatter in milling." ***CIRP annals*** 463-466, (1993).

[36] Minis, Ioannis, and Rafael Yanushevsky. "A new theoretical approach for the prediction of machine tool chatter in milling", ***J. Eng. Ind.,*** 1-8, Feb (1993).

[37] Budak, Erhan, and Yusuf Altintas. "Analytical prediction of chatter stability in milling—part I: general formulation. ***J. Dyn. Sys., Meas., Control***. " 22-30, (1998).

[38] Davies, Matthew A., et al. "Stability prediction for low radial immersion milling." ***J. Manuf. Sci. Eng.*** 124.2 217-225., (2002).

[39] Insperger, Tamás, et al. "Multiple chatter frequencies in milling processes." ***Journal of sound and vibration*** 333-345, (2003).

[40] Altıntas, Y., et al. "Analytical prediction of stability lobes in ball end milling." ***J. Manuf. Sci. Eng.*** 586-592, (1999).

[41] Sastry, Sridhar, Shiv G. Kapoor, and Richard E. DeVor. "Floquet theory based approach for stability analysis of the variable speed face-milling process." ***J. Manuf. Sci. Eng.*** 10-17, (2002).

[42] Altintas, Y., ***Manufacturing automation metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design***, 2nd Edition, (2012).

[43] Sanz-Calle, Markel, et al. "On the effect of radial engagement on the milling stability of modes perpendicular to the feed direction." ***CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*** 49: 111-127, (2024).

ERKEN GÖRÜNÜM

[44] Kline, W. A., R. E. DeVor, and I. A. Shareef. "The prediction of surface accuracy in end milling." ***J. Eng. Ind.*** 272-278, Aug (1982).

[45] Engin, Serafettin, and Yusuf Altintas. "Mechanics and dynamics of general milling cutters.: Part I: helical end mills." ***International journal of machine tools and manufacture*** 2195-2212, (2001).

[46] Altintas, Yusuf. "Technology of manufacturing automation." ***Manufacturing automation*** (2012).

[47] Yoon, M. C., and Y. G. Kim. "Cutting dynamic force modelling of endmilling operation." ***Journal of materials processing technology***, 1383-1389, (2004).

[48] Ko, Jeong Hoon, et al. "Development of a virtual machining system, part 1: approximation of the size effect for cutting force prediction." ***International Journal of Machine Tools and Manufacture,*** 1595-1605, (2002).

[49] Schmitz, Tony L., Matthew A. Davies, and Michael D. Kennedy. "Tool point frequency response prediction for high-speed machining by RCSA." ***J. Manuf. Sci. Eng***. 700-707, (2001).

ERKEN GÖRÜNÜM