



## Kesme Kuvvetine Bağlı Olarak Parmak Freze Hareket Denklemlerinin Sayısal Analizi

Bayram Sercan Bayram<sup>1,\*</sup> , İhsan Korkut<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

### MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 14.02.2024

Kabul: 21.03.2024

#### Anahtar Kelimeler:

Frezeleme  
Optimizasyon  
Sayısal analiz

### ÖZET

Frezeleme işleminin doğası gereği kesme işleminde oluşan yükler kesintili ve periyodiktir ve bu yükleri altında çalışan kesici takımında oluşan titreşimler kaçınılmazdır. Ancak uygun olmayan kesme şartları altında sisteme etki eden yükler çoğu zaman sönümlenemez ve kararsız durum olarak ifade edilen tırlamaya neden olur. Tırlama kontrol edilemeyen bir titreşim türüdür. Yüzey kalitesi, takım ömrü ve takım tezgahı bileşenleri üzerinde olumsuz etkilere sahiptir. Bu problemin ortadan kaldırılması veya engellenmesi için doğru kesme parametrelerinin belirlenmesi gereklidir. Bu çalışmada, kesme kuvvetleri altında çalışan kesici takımın kararlılığının izlenmesi, tırlama frekanslarının tahmini ve kararlı kesme şartlarının belirlenmesi için bir yöntem sunulmuştur. Sunulan yöntemde parmak freze, ankastre kiriş olarak sönümlü iki serbestlik dereceli sistem olarak modellenmiştir. Matematiksel modelin çözümünde sonlu fark denklemleri kullanılmış ve sistemin cevap fonksiyonları hesaplanmıştır. Sisteme etki eden kesme kuvvetlerinin sürekli zaman fonksiyonları deneysel ölçüm verileri kullanılarak Fourier yaklaşımı yöntemi ile  $F_x$  ve  $F_y$  kuvvet bileşenleri için sırasıyla %94.76 ve %93.81 doğruluk oranları ile elde edilmiştir. Deneylerde iş parçası olarak AISI 4140 ıslah çeliği ve kesici takım olarak 9.5 mm çapında  $38^\circ$  derece helis açısına sahip AlCrN kaplamalı Tungsten karbür (WC) parmak freze kullanılmıştır. Kesme parametreleri olarak iş mili hızı 3350 dev/dk, ilerleme 0.04 mm/diş ve eksenel kesme derinliği 0.5 mm şeklinde seçilmiştir. Sistemin cevap fonksiyonları bilgisayar ortamında Python programlama dili aracılığı ile gerçekleştirilmiş sonuçlar zaman alanında grafiksel olarak verilmiştir. Çalışma, sunulan yöntem ile anlık takım izlemesi, tırlama frekanslarının belirlenmesi, akıllı teknikler ile kararlı kesme aralıklarının tayin edilmesi, yüzey pürüzlülüğü, boyutsal hatalar ve takım ömrünün iyileştirilmesi gibi endüstriyel uygulamaların geliştirilmesine referans teşkil eder.

## Numerical Analysis of End Mill Equations of Motion in Relation to Cutting Force

### ARTICLE INFO

Received: 14.02.2024

Accepted: 21.03.2024

#### Keywords:

Milling  
Optimization  
Numeric analysis

### ABSTRACT

Due to the nature of the milling process, the loads generated in the cutting process are intermittent and periodic, and vibrations in the cutting tool operating under these loads are inevitable. However, under unsuitable cutting conditions, the loads acting on the system cannot be damped most of the time and cause chatter, which is referred to as an unstable condition. Chatter is a type of vibration that cannot be controlled. It has a negative effect on surface finish, tool life, and machine tool components. In order to eliminate or prevent this problem, it is necessary to determine the correct cutting parameters. This study presents a method to monitor the stability of the cutting tool operating under cutting forces, estimate the chatter frequencies, and determine the stable cutting conditions. The end mill is modeled as a two-degree-of-freedom system damped as a cantilever beam in the presented method. Finite difference equations are used to solve the mathematical model, and the system's response functions are calculated. Continuous time functions of the cutting forces acting on the system were obtained by Fourier approximation using experimental measurement data with an accuracy of 94.76% and 93.81% for the  $F_x$  and  $F_y$  force components, respectively. In

\*Sorumlu yazar, e-posta: sercanbayram@gazi.edu.tr

To cite this article: B. S. Bayram, İ. Korkut, Kesme Kuvvetine Bağlı Olarak Parmak Freze Hareket Denklemlerinin Sayısal Analizi, Manufacturing Technologies and Applications, 5(1),14-22, 2024.

<https://doi.org/10.52795/mateca.1436817>, This paper is licensed under a CC BY-NC 4.0

---

the experiments, AISI 4140 tempered steel was used as the workpiece, and an AlCrN-coated tungsten carbide (WC) end mill with a diameter of 9.5 mm and a helix angle of  $38^\circ$  was used as the cutting tool. The cutting parameters selected were spindle speed 3350 rpm, feed 0.04 mm/tooth, and axial cutting depth 0.5 mm. The response functions of the system were performed in the computer environment using the Python programming language, and the results were presented graphically in the time domain. The study is a reference for developing industrial applications such as instant tool monitoring, determination of scratch frequencies, determination of stable cutting intervals with intelligent techniques, improvement of surface roughness, dimensional errors, and tool life with the presented method.

---

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Fizik ve mühendislik alanlarında karşılaşılan birçok problem doğrusal veya doğrusal olmayan birinci veya yüksek mertebeden diferansiyel denklemlerle ifade edilebilir. Bazı diferansiyel denklem sistemleri, analitik yöntemlerle çözülmektedir. Ancak, karmaşık problemleri ifade etmek için kullanılan diferansiyel denklem sistemlerinin analitik çözüm yolu oldukça güçtür. Hatta çoğu zaman olanaksızdır. Araştırmacılar, karmaşık problemlerin çözümünde karşılaşılan bu zorlukların üstesinden gelmek ve problemlerin çözümünü çok daha kısa ve ekonomik biçimde sonuçlandırabilmek için seri çözümlere dayalı sayısal yöntemler geliştirmiştir [1]. En bilinen ve sık kullanılan yöntemler, Sonlu Elemanlar, Sonlu Farklar ve Genelleştirilmiş Diferansiyel Kuadrature metotlarıdır. Sonlu elemanlar ve sonlu farklar metotlarının kullanım alanları teknoloji alanındaki gelişmelere paralel olarak hızla artmıştır.

Hızla gelişen alanlardan bir diğeri ise üretim teknolojileridir. Bilgisayar kontrolü ile çalışan tezgâhların geliştirilmesi ve yaygınlaşması, üretim verimliliği ve zaman tasarrufu için ciddi iyileştirmeler sağlamıştır. Üretimin gerçekleştirildiği birçok alanda sıklıkla kullanılan bilgisayar kontrollü tezgâhlar, imalatta büyük kolaylıklar ve önemli iyileştirmeler sağlamışlardır. Üretim süreçlerindeki gelişmeler ve ihtiyaçlar, araştırmacıların dikkatini çekmiş ve çalışmalarını bu konular üzerine yoğunlaştırmalarına neden olmuştur. Özellikle akıllı üretim tekniklerinin gelişmesi ile kesme sürecinin kararlılık aralıklarının belirlenmesi ve sürecin optimum şartlar altında tamamlanması adına araştırmalar yapılmıştır. Frezeleme süreci ile ilgili olarak yapılan çalışmaların önemli bir kısmı tırlama ve etkilerinin baskılanması alanında gerçekleştirilmiştir. Zhu ve Liu [2], yaptıkları araştırmada, frezeme sırasında oluşan tırlamanın tahmini, tespiti ve önlenmesi için yapılan çalışmaları derinlemesine incelemişlerdir. Yaptıkları araştırmalar sonucunda, tırlama probleminin çözümü için tırlama tahmini, akıllı sistemler ile titreşimlerin algılanması, akıllı sistemlerin tezgah iş miline entegre edilmesi, yüksek örneklemme hızlarında gerçek zamanlı verileri analiz eden kontrol sistemlerinin geliştirilmesi ve kompleks formlara sahip ince cidarlı parçaların işlenmesi sırasında tırlamanın izlenebileceği sistemlerin geliştirilmesi gibi araştırılması gereken konular için önerilerde bulunmuşlardır. Taylor [3] ve Tlustý [4] tırlamanın temel sebeplerini rejeneratif etkiye bağlamışlardır. Rejeneratif etki; periyodik ve kesintili frezeleme süreci sırasında, takım tezgahı modlarından birisi uyarılırsa sistem kararsızlığa girerek rejeneratif tırlamayı meydana getirir. Frezelemenin doğası gereği kesme işlemi kesintilidir. Kesintili ve periyodik olan kuvvetlerin etkisi ile oluşan titreşimler kaçınılmazdır. Zorlanmış titreşim şeklinde de ifade edilen bu titreşimlerin etkisiyle, kesici takım iş parçasının yüzeyinde dalgalar bırakır. Kararsız kesme işleminde ardışık iki dalga arasında faz farklıdır. Stabil kesme işleminde ise yüzeyde oluşan dalgalar aynı fazdadır bu da talaş kalınlığı ve kesme kuvvetlerinin kısmen değişmediği anlamına gelir. Değişken yükler takım aşınması ve boyutsal tolerans değerlerinin artmasına neden olur.

Kararlı kesme işlemi için tezgâhın kararlılık diyagramlarının önceden belirlenmesi önemlidir. Literatürde konu ile ilgili birçok çalışma görülmektedir [5-10]. Kararlı kesme aralıklarının tespit edilmesinde kullanılan Stabilitelob diyagramı (SLD), işlemeyi stabilize etmek için uygun kesme

parametrelerinin seçilmesinde kullanılan bir yöntemdir [11]. SLD, kararlı bir kesme süreci için iş mili hızına bağlı olarak kesme derinliğinin sınırlarını belirleyebilir. SLD için kesme kuvveti katsayıları ve sistemin dinamik davranışı önemli girdi parametreleridir. Kesme kuvveti katsayıları kararlı kesme sınırlarının belirlenmesinin yanı sıra boyutsal hataların tahmin edilmesinde de kullanılır. Katsayıların hesaplanması, mekanistik yöntem olarak bilinen ve araştırmacılar tarafından kabul görmüş metoda dayanır [12]. Sistemin dinamik davranışı, deneysel olarak elde edilen frekans tepki fonksiyonu (FRF) olarak tanımlanabilir. Sistemin dinamik davranışını belirlemek için yani FRF'ni ölçmek için çekiç testi olarak bilinen klasik yöntem kullanılabilir [13]. Frezeleme operasyonlarının kararlılık sınırlarının analizinde kullanılan farklı yöntemlerde mevcuttur. En bilinen yöntemlerden bazıları, sıfır dereceli yaklaşım (ZOA) [14], çoklu frekans çözümü (MFS) [15] ve genişletilmiş çoklu frekans çözümü (EMFS) [16] şeklinde sıralanabilir. Sayılan yöntemlerin hepsi FRF'yi doğrudan kullanırlar. Kararlılık lob diyagramları çok kısa süreler içerisinde elde edilse de tahminler ve ölçümler arasındaki farklar nedeni ile pratik olarak birçok sorun barındırır. Sorunun temel nedeni, kesme mekaniği modellerinin basitleştirilmesi, varsayımlar ve hesaplama katılmayan dinamik faktörler olarak verilebilir. Bununla beraber sistemin analiz edilmesi için kararlılık lob diyagramlarının hesaplanmasını gerektirmeyen çeşitli sayısal yöntemler geliştirilmiştir. Fu ve ark. [17], tırlamanın anlık tespit edilmesinde sinyalleri işlemek için Hilbert-Huang dönüşümünü kullanmışlardır. Çalışmalarının temelinde, enerji toplama karakteristiğine dayalı Hilbert-Huang dönüşümü şeklinde tanımladıkları sayısal bir çözüm yöntemi sunmuşlardır. Sistemin doğal frekanslarında toplanan titreşim enerjisinin, tırlama oluşumunu yansıtan önemli bir sinyal olduğunu belirtmişlerdir. Schmitz [18] çalışmasında, anlık frezeleme ses sinyallerini analiz edilmesiyle tırlamanın tanımlanması için ses sinyallerine dayalı bir yöntem önermiştir. Zhang ve ark. [19], Gizli Markov Model (HMM) ve Yapay Sinir Ağları (YSA) kullanarak tırlama titreşimlerini izlemek için hibrit bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Navarro-Devia ve diğerleri [20], frezeleme için tırlama tespitinde kullanılan yöntemler hakkında detaylı bir araştırma yaparak güncel yöntemleri kapsamlı bir şekilde sunmuşlardır. Çalışmalarında vardıkları sonuca göre tırlama tahminlerinin performansının, kullanılan sinyal tipine, sinyal işleme tekniğine, kullanılan yapay zeka modellerinin seçimine ve eğitimine bağlı olduğunu vurgulamışlardır. Ayrıca tahminlerin doğruluğunun artırılması için titreşim sinyalleri ile birden fazla sinyal ve özellikler kullanıldığında tahminlerin doğruluğunun artacağını belirtmişlerdir. Tran, Liu ve Elsis [21], kararsız kesme koşullarında oluşan titreşimlerin tespit edilmesi için, mikrofon ve ivmeölçer sensörlerinin kullanıldığı çok sensörlü veri füzyonu yöntemini önermişlerdir. Tırlamanın algılanmada ses ve titreşim verilerinin analiz ederek birden fazla sinyali gösterge olarak kullanmışlardır. Akıllı çok sensörlü veri füzyonu şeklinde ifade edilen yöntem ile toplanan verilerin analizi ve sınıflandırılması için akıllı tekniklerden yararlanmışlardır. Ses ve titreşim verilerinden gelen rezonans frekansları için bant genişliklerinin gürültünün tanınmasında etkin bir özellik olduğunu belirtmişler. Önerdikleri yöntemin %97.66 doğruluk oranıyla tırlama tespitini yapabildiği ifade etmişlerdir. Chen ve diğerleri [22], parmak frezeleme prosesi için tırlama ve tırlama frekansı tahmininden oluşan yeni bir anlık tırlama izleme sistemi geliştirmişlerdir. Kararlı bir kesme işlemi sırasında frezeleme sinyalleri temel olarak iş mili ile ilgili frekans bileşenlerinden oluşur. Normalde sinyalin enerjisine bu periyodik frekans bileşenleri hakimdir. Sistem tırlama eğilimi gösterdiğinde izlenen sinyallerin periyodik durumunda yeni frekans bileşenleri ortaya çıkacaktır. Tırlamanın artışı ile sinyallerdeki baskın frekanslar bileşenlerin yerini tırlama frekansları alacaktır ve tırlama frekanslarının enerjisi artmış olacaktır. İşte buradaki enerji değişimi yapılan çalışmada tırlamanın tespiti için bir gösterge olarak alınmıştır. Stavropoulos ve ark. [23], frezelemede titreşimlerin neden olduğu tırlamanın tespiti için varyasyonel mod ayrıştırmasının (VMD) iyileştirilmiş versiyonunu kullanmışlardır. Yöntemde, titreşim sinyalleri VMD ile ayrıştırmışlar ve analiz için bilgi içeren modları belirlemişlerdir. Seçilen modlardan çıkarılan özellikler akıllı tekniklerin eğitiminde kullanmışlardır. Destek vektör

makinelerini ile sistem durumunu tahmin etmek için matematiksel bir model geliştirmişlerdir. Önerdikleri yöntem ile %93 oranında doğruluk ve hızlı bir tespit sağladıklarını belirtmişlerdir. Özşahin ve ark. [24], frezeleme operasyonlarında meydana gelen tırlama tipindeki titreşimlerin verimliliğe olumsuz etkilerinin minimize edilmesi için çalışmışlardır. Kararlılık diyagramlarını kullanarak, farklı tutucu ve takım kombinasyonlarının iş mili dinamiği ve işlem kararlılığı üzerindeki etkilerini araştırılmışlardır. Çomak ve diğerleri, frezeleme süreçleri sırasında oluşan titreşimleri etkileyen parametreler üzerine araştırmalar yapmış ve oluşan titreşimlerin tespiti için geliştirilen analitik yöntemleri deneysel olarak incelemiş ve sonuçlarını çalışmalarında vermişlerdir. Li ve Shin [25], yaptıkları çalışmada, parmak frezeleme için genel kesme şartları altında zaman alanında kesme sürecini simüle eden bir model sunmuşlardır. Araujo ve diğerleri [26], talaş kaldırma işlemlerinde kesici olarak kullanılan parmak frezeleme işlemini iki serbestlik dereceli bir sistem olarak modellemiş ve iş parçasına göre kesicinin titreşim analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Chandiramani ve Pothala [27], tornalama operasyonunda ortogonal kesme işlemi için iki serbestlik dereceli bir model ile kesme dinamiklerini analiz etmişlerdir. Yapılan çalışmada sistemin modellenmesi ve çözümlenmesi karmaşık denklemlerin çözümünü gerektirmektedir. Kompleks problemlerin çözümlerinde sayısal metotlar kullanıldığında hesaplama işlemleri çok daha hızlı olabilir [28]. Bu çalışmada literatürden farklı olarak parmak freze, periyodik ve kesintili kesme kuvvetleri etkisi altında ankastre giriş olarak iki serbestlik dereceli sönümlü bir sistem şeklinde modellenmiştir. Problemin çözümü için sonlu fark denklemleri ile iterpolasyon uygulanmış ve zaman alanında çözümler elde edilmiştir.

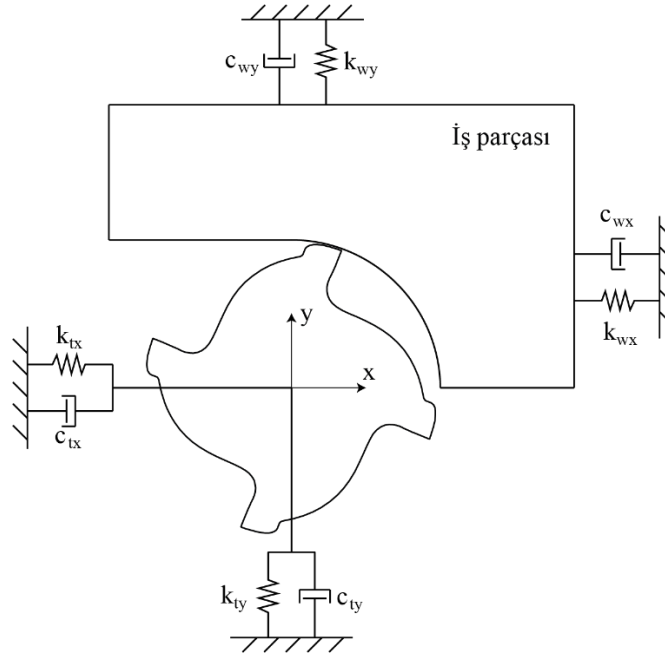
## **2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)**

### **2.1. Modelleme ve Analiz (Modeling and Analysis)**

Frezelemede kesme dinamiği oldukça karmaşık yapıdadır. Teorikte tüm dinamik faktörlerin hesaplanması oldukça güçtür hatta imkansızdır. Çoğu zaman karmaşık mühendislik problemlerinin çözümünde yaklaşık çözümler aranır. Bu sayede, çözülmesi zor ve maliyetli problemler sayısal metotlar kullanılarak çok daha hızlı ve etkin şekilde çözülebilir. Kesme sürecinin performansı, yapısal ve harici dinamik faktöre doğrudan bağlıdır. Sürecin performansı ise çıktı kalitesi ve maliyeti önemli ölçüde etkiler. Uygun bir maliyet ve kalite dengesinin yakalanması için bu faktörlerin etkilerinin optimize edilmesi gerekir.

Yapısal veya harici dinamik etkilerin tamamen ortadan kaldırılması çoğu zaman mümkün değildir. Ancak, tasarım parametreleri, dinamik etkiler göz önüne alınarak belirli tolerans aralıkları arasında belirlenebilir. Bu yüzden, mühendisler tasarımlarını, üretim sürecine uygun tolerans aralıklarında tasarlar. Ancak, yüksek hassasiyet isteyen üretimlerde veya kesme performansının iyileştirilmesi gibi çalışmalarda, sistemin dinamik etkilerinin minimize edilmesi gerekebilir. Bunun için sistem dinamiklerinin iyi araştırılması ve anlaşılması gereklidir.

Karmaşık geometriye parmak freze ve iş parçası, problemin basitleştirilmesi için iki serbestlik derece ve sönümlü yay sistem şeklinde modellenmiş ve Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. İki serbestlik dereceli sönümlü yay sistemi (Two degrees of freedom damped spring system)

Sistemin analiz edilmesi aşağıda verilen hareket denklemlerinin çözümünü gerektirir.

$$\ddot{x}(t) + 2\xi_x\omega_n\dot{x}(t) + \omega_n^2x(t) = \frac{\omega_n^2}{k_x}F_x(t) \quad (1)$$

$$\ddot{y}(t) + 2\xi_y\omega_n\dot{y}(t) + \omega_n^2y(t) = \frac{\omega_n^2}{k_y}F_y(t) \quad (2)$$

Hareket denklemlerinin sayısal çözümü için sistemin ayrıklaştırılması gerekir. Bunun için türevin analitik formu kullanılabilir. Burada, sürekli bir  $y=f(x)$  fonksiyonu  $n$  adet  $(x_i, y_i)$  ayrık noktalardan oluştuğu kabul edilirse, herhangi bir  $x_i$  değerine karşılık gelen  $y_i$  değeri, uygulanacak interpolasyon teknikleri ile yaklaşık olarak bulunabilir. Sürekli  $f(x)$  fonksiyonun türevleri,  $f'(x), f''(x), \dots, f^n(x)$  yerine eşyerleşim polinomları kullanılarak çözüme gidilir. Bu yöntem için yaygın olarak kullanılan ileri, merkezi ve geri fark formülleri kullanılır. Eş. 1 ve Eş. 2 ile verilen denklemler, fark denklemleri kullanılarak ayrık zaman çözümü aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$x(t) = \frac{F_x(t) + x(t-\Delta t) \left[ \frac{c_x}{2\Delta t} - \frac{m_x}{(\Delta t)^2} \right] - x(t+\Delta t) \left[ \frac{m_x}{(\Delta t)^2} + \frac{c_x}{2\Delta t} \right]}{\left( k_x - \frac{2m_x}{(\Delta t)^2} \right)} \quad (3)$$

$$y(t) = \frac{F_y(t) + y(t-\Delta t) \left[ \frac{c_y}{2\Delta t} - \frac{m_y}{(\Delta t)^2} \right] - y(t+\Delta t) \left[ \frac{m_y}{(\Delta t)^2} + \frac{c_y}{2\Delta t} \right]}{\left( k_y - \frac{2m_y}{(\Delta t)^2} \right)} \quad (4)$$

İfadelerde verilen  $\omega_n, \zeta_x, \zeta_y$  ve  $k_x, k_y$  ifadeler, doğal frekans, yapısal sönüm oranları ve yay sabitleridir. Sisteme etki eden kuvvetler zamana bağlı olarak  $F_x$  ve  $F_y$  şeklinde tanımlanmıştır. Eş. 3 ve Eş. 4'te yer alan  $m_{x,y}$  ve  $c_{x,y}$  katsayıları aşağıda verildiği gibidir:

$$\begin{aligned} m_x &= \frac{k_x}{(2\pi\omega_n)^2} & ; & \quad m_y = \frac{k_y}{(2\pi\omega_n)^2} \\ c_x &= 2\pi\zeta_x m\omega_n & ; & \quad c_y = 2\pi\zeta_y m\omega_n \end{aligned} \quad (5)$$

Verilen sistem için  $x_0$  ve  $v_0$  başlangıç şartları ile bilgisayar ortamında, genel programlama dili Python ile interpolasyon yapılarak sayısal çözümler elde edilmiştir. Takım için dairesel giriş varsayımı yapılmış ve direngenlik katsayısı için Eş. 6 ile verilen ilişki kullanılmıştır:

$$k = \frac{3E\pi d^4}{64L^3} \quad (6)$$

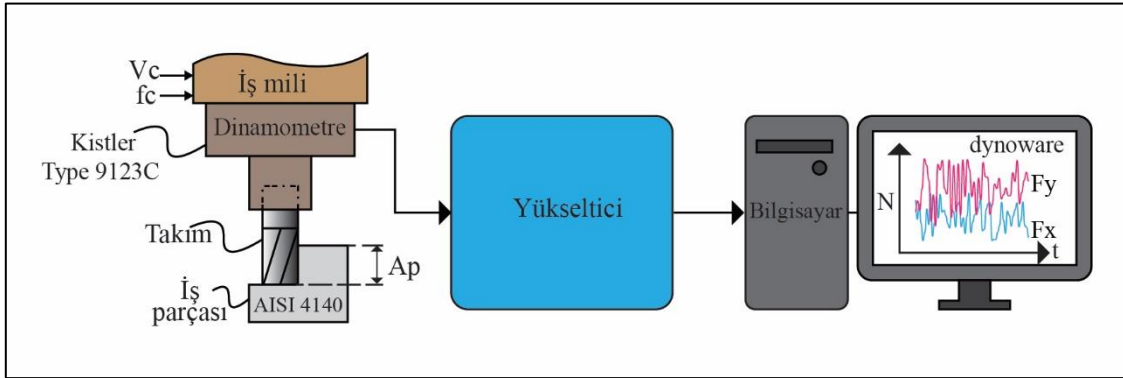
Eş. 6’te yer alan E takım Young modülüdür, d ve L sabitleri ise takım geometrisine bağlı olarak sırasıyla takım çapı ve uzunluk değerleridir. Denklemden verilen sabitlerin değerleri, çözümlerde kullanılmak üzere Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Parametreler (Parameters) [26].

Takım Çapı (d)	Uzunluk (L)	Sönüm Kat. (c)	Elastik Mod. (E)	İş mili hızı ( $\omega$ )
9.5 mm	20 mm	20 Nm/s	200 GPA	3550 dev/dk

## 2.2. Deney Düzenegi (Experimental Setup)

Bu çalışmada, frezeleme deneylerinde iş parçası olarak AISI 4140 ıslah çeliği kullanılmıştır. İş parçası 0.5 mm sabit aksel derinlikte işlenmiş ve kesme kuvvetleri ölçülmüştür. Kesici takım olarak 9.5 mm çapında  $38^\circ$  derece helis açısına sahip Tungsten karbür (WC) hammaddesinden üretilmiş AlCrN kaplamalı 4 ağızlı parmak freze kullanılmıştır. Frezeleme sırasındaki işleme parametreleri için, iş mili hızı 3350 dev/dk ve diş başı ilerleme 0.04 mm/diş seçilmiştir. Kesme işlemi sırasında oluşan kuvvetler Kistler Type 9123C marka ve model üç eksenli kuvvet ve tork ölçebilen dönel dinamometre ile 10 kHz örnekleme aralığında ölçülmüştür. Deney düzeneginin şematik gösterimi Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Deney düzenegi diyagramı (Experimental setup diagram)

## 3. DENEY VE OPTİMİZASYON SONUÇLARI (EXPERIMENT AND OPTIMIZATION RESULTS)

Zorlanmış kuvvet altındaki bir sistemin genel hareket denklemi daha önce verilmişti. Bu denklemlerin sayısal olarak çözümlenmesi için sisteme etki eden kuvvetleri ifade eden kuvvet fonksiyonunun veya hesaplanacak noktadaki kuvvet değerlerinin bilinmesi gerekir.

Çalışmada, sisteme etki eden kuvvet değerlerini ifade eden zamana bağlı bir fonksiyon bulmak için, bir dinamometre yardımı ile frezeleme kuvvetleri ölçülmüştür. Kuvvet değerlerinin genel formu sinüzoid şeklindedir. Ayrık zaman formunda olan dijital verilerin zamana bağlı sürekli bir fonksiyon olarak tanımlaması için Fourier yaklaşımı olarak bilinen matematiksel yöntem kullanılabilir.

DeneySEL ölçümlerle elde edilen kuvvet verilerinden Fourier yaklaşımı metodu ile zamana bağlı sinüzoidal kuvvet fonksiyonları elde edilmiştir.

Fourier serisinin genel matematiksel gösterim Eş. 7’te verildiği gibidir:

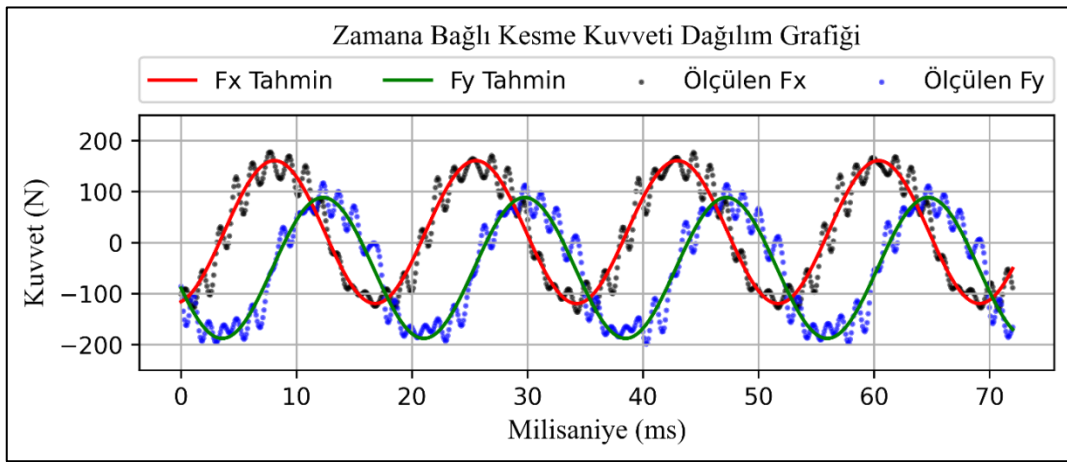
$$f(t) = a_0^{x,y} + a_1^{x,y} \cos(\omega_{x,y} t) + b_1^{x,y} \sin(\omega_{x,y} t) \quad (7)$$

Elde edilen kuvvet fonksiyonlarının gerçek değerlere göre tahmin performansı, optimum katsayı değerleri için Tablo 2’de verilmiştir:

Tablo 1. Kuvvet fonksiyonu için katsayılar ve performansları (Coefficients and performances for the force function)

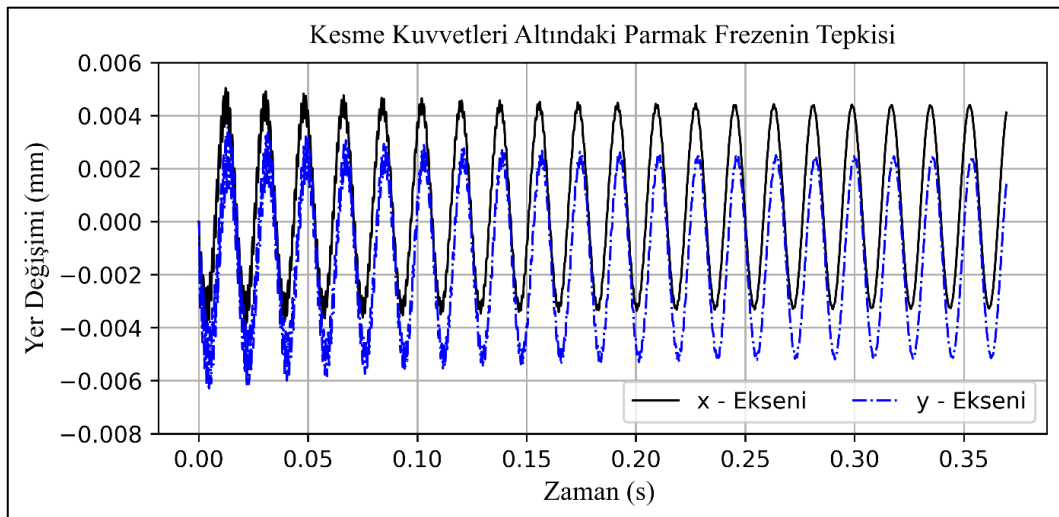
	$A_0$	$A_1$	$B_1$	$\omega$	$R^2$
$F_x$	20.52	-44.06	-133.1	0.3510	0.9476
$F_y$	-49.86	5.733	-138.1	0.3505	0.9381

Kuvvet fonksiyonu ile yapılan tahminler ve gerçek kuvvet verilerinin karşılaştırılması Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 3. Kuvvet fonksiyonunun ve deneysel sonuçların karşılaştırılması (Comparison of force function and experimental results)

Parmak freze ile yapılan talaş kaldırma işlemleri için sunulan dinamik denklemler, sonlu farklar yöntemi sayısal olarak çözümlenmiştir. Sıralı çözümler bilgisayar yardımı ile Python programlama dili kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sönüm katsayısı, Young modülü ve bağlama mesafesi, uzunluğu (l/d) değerleri Tablo 1’de verilmiştir. Yapılan sayısal çözüm için sistemin cevabı Şekil 4’te gösterilmiştir.



Şekil 4. Kesme kuvvetleri altındaki sistemin cevabı (Response of the system under cutting forces)

Şekil 4’te verilen grafik, kesme sırasında takıma etki eden kuvvetlere sistemin verdiği tepkileri ifade etmektedir. Kesici takımın iş parçasına dalma anından sonra 0.1-0.15 saniye aralığında kararlı duruma geçtiği görülmektedir. Grafik incelendiğinde kesme kuvvetlerinin sönümlendiği ve kararlı bir kesme işleminin devam ettiği çıkarımı yapılabilir. Kesme kuvvetlerinin varlığında parmak frezede üzerinde oluşan titreşimler kaçınılmazdır. Dikkat edilmesi gereken nokta, kesme sırasında oluşan titreşimlerin harmonik bileşenlerinden herhangi birisinin takım tezgâhı sisteminin doğal frekansları ile çakışmamasıdır. Doğal frekansların birbirleri ile çakışması sistemin rezonansa girmesiyle ve kararsız durumun ortaya çıkmasına neden olur. Yapılan çalışma ile sistemin tepki fonksiyonları kullanılarak bu istenmeyen durumların engellenmesi için uygulamalar geliştirilebilir.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, periyodik kesme kuvvetleri altında çalışan kesici takım sistemi matematiksel olarak modellenmiş ve sayısal olarak çözümlenmiştir. Kesme kuvveti fonksiyonları Fourier yaklaştırması olarak bilinen yöntemle zamana bağlı olarak elde edilmiştir. Ölçüm sonuçlarına göre, zamana bağlı kuvvet fonksiyonları ile yapılan tahminlerin  $F_x$  ve  $F_y$  bileşenleri sırasıyla %94.76 ve %93.81 doğrulukta olduğu gösterilmiştir. Sunulan yöntem ile kesme kuvvetleri altındaki kesici takım sisteminin cevap fonksiyonları hesaplanmış ve zamana bağlı sonuçları Şekil 4’te verilmiştir.

Sunulan yöntem, endüstriyel alanda frezeleme sürecinin kararlılığı, takım ömrü, yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal hatalar gibi birtakım tahminlerin gerçekleştirilmesine imkân tanır. Frezeleme sürecinin anlık takibi ve kontrolünün yapılabilmesi için gerçek zamanlı uygulamaların geliştirilmesine katkıda bulunabilir.

Sunulan yöntem için kesin sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Kuvvet sinyalleri. Fourier yaklaştırması yöntemi kullanılarak zamana bağlı sürekli  $f(t)$  kuvvet fonksiyonları elde edilmiştir. Elde edilen fonksiyonların gerçek kuvvet verilerine göre doğruluğunun  $F_x$  bileşeni için %94.76 ve  $F_y$  bileşeni için ise %93.81 olduğu gösterilmiştir.
- Kesme kuvvetleri altındaki sistemin cevabı, zaman alanında elde edilmiş ve Şekil 3’te grafiksel olarak verilmiştir. Grafiğe göre sistemin yaklaşık 0.1-0.15 saniye süresi içerisinde kararlı kesme aralığına ulaştığı görülmüştür.
- Çalışmada verilen problemin sunulan sayısal yöntemle çözülebileceği gösterilmiştir.
- Sunulan matematiksel model ile sistemin cevaplarının elde edilebileceği kanıtlanmıştır.

Sunulan yöntem kararlı durum için kesme parametrelerin tahmin edilmesi, anlık kesme sürecinde sistem davranışlarının kontrolü ve tırlama gibi istenmeyen durumların baskılanması gibi uygulamaların geliştirilmesine referans niteliğindedir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından desteklenmiştir (Proje No: BAP-FYL-2021-7274).

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. R. Bellman, J. Casti, Differential quadrature and long-term integration, Journal of Mathematical Analysis and Applications, 34(2):235-238, 1971.
2. L. Zhu, C. Liu, Recent progress of chatter prediction. detection and suppression in milling, Mechanical Systems and Signal Processing, 143, 2020.
3. F.W. Taylor, On the Art of Cutting Metals, American society of mechanical engineers, California, 1906.



4. J. Tlustý, Stability of machine tool against self-excited vibration in machining, *Int. Prod. Eng Res. Conf-Proc.*, 465-474. 1963.
5. K. Li, S. He, H. Liu, X. Mao, B. Li, B. Luo, Bayesian uncertainty quantification and propagation for prediction of milling stability lobe, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 138, 2020.
6. J. Tlustý, W. Zaton, F. Ismail, Stability lobes in milling, *CIRP Annals*, 309–313, 1983.
7. E. Budak, Y. Altintas, Analytical prediction of stability lobes in milling, *CIRP Annals*, 357-362. 1995
8. A. Çomak, E. Budak, Eşzamanlı frezeleme operasyonlarının dinamiği ve kararlılığı, 3. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTIS 2012). 4-5 Ekim 2012, Ankara, Türkiye.
9. Y. Altintas, Y. Cao, Virtual design and optimization of machine tool spindles, *CIRP Annals*, 379–382, 2005.
10. Y. Altintas, *Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations and CNC Design*, 2nd ed., Cambridge University Press, Cambridge, 2012.
11. Z.-Q. Yao, X.-G. Liang, L. Luo, J. Hu, A chatter free calibration method for determining cutter runout and cutting force coefficients in ball-end milling, *Journal of Materials Processing Technology*, 1575–1587, 2013.
12. E. Budak, Y. Altintaş, E.J.A. Armarego, Prediction of milling force coefficients from orthogonal cutting data, *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 216–224, 1996.
13. K. Kiss, D. Hajdu, D. Bachrathy, G. Stepan, Operational stability prediction in milling based on impact tests, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 103:327–339, 2018.
14. Y. Altintaş, E. Budak, Analytical prediction of stability lobes in milling, *CIRP Annals*, 357–362, 1995.
15. E. Budak, Y. Altintas, Analytical prediction of chatter stability in milling-part I: general formulation, *ASME*, 120-29, 1998.
16. D. Bachrathy, G. Stepan, Improved prediction of stability lobes with extended multi frequency solution, *CIRP Annals*, 411–414. 2013.
17. Y. Fu et al., Timely online chatter detection in end milling process, *Mech Syst Signal Process*, 668–688, 2016.
18. T.L. Schmitz, Chatter recognition by a statistical evaluation of the synchronously sampled audio signal, *Journal of Sound and Vibration*, 262(3): 721–730, 2003.
19. C.L. Zhang, X. Yue, Y.T. Jiang, W. Zheng, A hybrid approach of ANN and HMM for cutting chatter monitoring, *Advanced Materials Research*, 3225–3232, 2010.
20. J.H. Navarro-Devia, Y. Chen, D.V. Dao, H. Li, Chatter detection in milling processes—a review on signal processing and condition classification, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 125(9): 3943–3980, 2023.
21. M.-Q. Tran, M.-K. Liu, M. Elsisı, Effective multi-sensor data fusion for chatter detection in milling process, *ISA Transactions*, 514–527, 2022.
22. D. Chen, X. Zhang, H. Zhao, H. Ding, Development of a novel online chatter monitoring system for flexible milling process, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 159, 2021.
23. P. Stavropoulos, T. Souflas, C. Papaioannou, H. Bikas, D. Mourtzis, An adaptive. artificial intelligence-based chatter detection method for milling operations, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 124(7): 2037–2058, 2023.
24. O. Özşahin. E. Budak, H.N. Özgüvenc, Frezeleme esnasındaki tezgâh dinamiğinin belirlenmesi ve modellenmesi, 6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2015), 5-7 Kasım 2015, İstanbul, Türkiye.
25. H. Li, Y.C. Shin, A comprehensive dynamic end milling simulation model, *J Manuf Sci Eng.*, 86–95, 2005.
26. C. Araujo, P. Pacheco, M. Savi, Dynamical analysis of an end milling process, 20th International Congress of Mechanical Engineering, 2009.
27. N.K. Chandiramani, T. Pothala, Dynamics of 2-dof regenerative chatter during turning, *Journal of Sound and Vibration*, 290:448–464, 2006.
28. M. Aydın, B. Kuryel, G. Oturanç, G. Gündüz, Diferansiyel denklemler ve uygulamaları, Baris Yayinlari Fakulteler Kitabevi, Ankara, 2019.