

İş Parçası Dinamiğinin Frezeleme Kararlılığına Etkisinin İncelenmesi

Kadir KIRAN^{*1,2}, Mehmet Cengiz KAYACAN³¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksekokulu, Uçak Gövde-Motor Bakım Bölümü, 32260, Isparta, Türkiye²Süleyman Demirel Üniversitesi, Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi (YETEM), Tasarım ve İmalat Birimi, 32260, Isparta, Türkiye³Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 32260, Isparta, Türkiye

*Sorumlu yazar e-posta: kadirkiran@sdu.edu.tr

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-6109-435X>

cengizkayacan@sdu.edu.tr

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-0993-243X>

Geliş Tarihi: 26.09.2021

Kabul Tarihi: 15.02.2022

Öz

Frezeleme operasyonlarında tırlama titreşimleri üretkenliği olumsuz yönde etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Kesme parametrelerine, Tezgâh/iş mili-takım tutucu-takım sistemi ve/veya iş parçası dinamiğine bağlı olarak ortaya çıkan bu titreşimler Tezgâh/iş mili ömrü, iş parçası yüzey ve boyut kalitesi, takım aşınması vb. gibi açılardan kritik bir önem taşımaktadır. Bu çalışmada frezeleme işleminde iş parçası dinamiği dikkate alınarak hem teorik hem de deneysel kararlılık analizleri yapılmıştır. İş parçası frekans tepki fonksiyonu temel faktör olarak değerlendirilip, her talaş kaldırma adımı için kararlılık diyagramları oluşturulmuştur. Tek serbestlik dereceli deney düzeneği üzerinde gerçekleştirilen frezeleme testleri ile de talaş kaldırmayla ortaya çıkan iş parçası dinamiği değişiminin kararlılık sınırlarına etkisi irdelenmiştir. Teorik ve deneysel çalışmalar neticesinde iş parçası dinamiği değişiminin kararlı ve kararsız kesme bölgelerinin değişimine yol açtığı gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar esnek iş parçalarının frezelemesinde de iş parçası dinamiğinin süreç verimliliği üzerinde kayda değer bir oranda etkisinin olduğunu ortaya çıkarmıştır.

Anahtar kelimeler

Tırlama;
İş parçası dinamiği;
Kararlılık diyagramı;
Frezeleme

Investigation of Workpiece Dynamics Influence on Milling Stability

Abstract

Chatter vibrations are one of the most important factors that negatively affects the productivity in the milling operations. Those vibrations, which occur depending upon the cutting parameters, the Machine/Spindle-tool holder-tool assembly and/or the workpiece dynamics, have a critical importance in terms of the Machine/Spindle life, the workpiece surface and dimensional quality, tool wear etc. In this study, both theoretical and experimental stability analysis have been performed by taking into account the workpiece dynamics during the milling process. Stability lobe diagrams have been created for each material removal step by considering the workpiece frequency response function as a fundamental factor. Effect of the workpiece dynamics alteration arising due to the material removal on the stability limits has been examined with the milling tests performed on a single degree of freedom experimental setup. As a result of the theoretical and experimental work, it has been observed that the variation of the workpiece dynamics leads to change in the stable and unstable regions. The obtained results have revealed that the workpiece dynamics has remarkable influence on the process efficiency in the milling of the flexible workpieces.

Keywords

Chatter;
Workpiece dynamics;
Stability lobe diagram;
Milling

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Frezeleme operasyonlarında Tezgâh/iş mili-takım tutucu-takım sistemi ve/veya iş parçası frekans tepki fonksiyonu (FTF) zorlanmış ve kendinden kaynaklı ya da tırlama titreşimlerinin oluşmasındaki temel faktördür. Kararlı bir yapıya sahip olan zorlanmış

titreşimler iş parçasında boyutlarında hataya yol açarken kararsız bir davranış sergileyen tırlama titreşimleri iş parçası yüzeyinin bozulmasına, takım aşınmasının hızlanmasına, tezgâh/iş milinin zarar görmesine neden olma potansiyeline sahiptir. Rijit yapıya sahip iş parçalarının frezelemesinde Tezgâh/iş mili-takım tutucu-takım sistemi dinamiği

baskın olarak ortaya çıkan titreşimlerin büyüklüklerini belirlemektir. Fakat esnek iş parçalarının (ince cidarlı parçalar) imalatı sırasında yapılan frezeleme operasyonlarında ise iş parçası dinamik esnekliği büyük rol oynayarak sürecin verimliliğini etkilemektedir. Ayrıca talaş kaldırma ile iş parçası dinamik davranışı takım yolu boyunca sürekli olarak değişkenlik sergilemektedir. Bu da süreç modelleri ile elde edilen kararlılık sınırlarının değişmesine neden olmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalarda bu durumun altı çizilerek çeşitli matematiksel modelleme (analitik ve nümerik yaklaşımlar ile) ve deneysel çalışmalar ile problemin çözümüne katkılar sağlanmıştır. Örneğin, Bravo vd. (2005) tarafından yapılan çalışmada Tezgâh/İş mili-takım tutucu-takım sistemi ve iş parçası dinamiği dikkate alınarak üç boyutlu bir kararlılık diyagramı oluşturulmuştur. Kararlılık diyagramının oluşturulmasında Fourier serisi yaklaşımı (Altintas ve Budak 1995) kullanılırken, Tezgâh/İş mili-takım tutucu-takım sistemi ve iş parçası FTF'leri çekiç testi ile ölçülmüştür. Talaş kaldırma adımlarının dahil edildiği üç boyutlu kararlılık diyagramı deneysel çalışmalar ile test edilmiştir. Thévenot vd. (2006) ise benzer bir yaklaşım ile takım yolu boyunca talaş kaldırma ile ortaya çıkan iş parçası dinamiği değişimini dikkate alarak üç boyutlu bir kararlılık diyagramı ortaya çıkarmışlardır. Sonlu elemanlar analizi (SEA) ve deneysel çalışmalar ile iş parçası FTF'leri elde edilmiştir. Deneysel olarak doğrulama sonuçlarını da içeren çalışmada yazarlar, esnek iş parçalarının frezeleme operasyonlarında iş parçası dinamiğinin her talaş kaldırma adımında farklılık göstermesinden dolayı değişken iş mili devir sayısının kullanılmasının gerektiğini vurgulamışlardır. Campa vd. (2007)'nin sunduğu çalışmada ise ince cidarlı tabana sahip iş parçalarının frezeleme operasyonlarında kararlılık analizleri yapılmıştır. Köşe yuvarlamalı kesici takımın kullanıldığı çalışmada, kesici takım eksenini boyunca takım dış açısının ve kesici takım helis açısına göre kesme kuvveti sabitlerinin değişkenlik sergilediği belirtilmiştir. Bu durumda kararlılık modelinin analitik çözümünü gerçekleştirebilmek için her iki parametrenin ortalaması alınmıştır. Campa vd. (2011) tarafından sunulan çalışmada iş parçası dinamiğinin takım yolu boyunca talaş kaldırma ile

ortaya çıkan değişimi dikkate alınarak yukarıdaki yaklaşımın bir miktar daha gelişmesi sağlanmıştır. Çalışmada yazarlar iş parçası FTF'lerini hem SEA hem de ölçüm ile elde ederek üç boyutlu kararlılık diyagramı ortaya çıkarmışlardır. Kararlılık limitlerinin çeşitli frezeleme deneyleri ile test edilmesi sonucunda deneysel sonuçlar ile matematiksel tahminlerin %87 oranında uyumlu olduğu rapor edilmiştir. Öte yandan, ince duvarlı parçaların köşe yuvarlamalı kesici takım ile frezeleme operasyonlarında kararlılık analizleri Adetoro vd. (2010) tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kesme kuvveti sabitlerinin kesme derinliği boyunca gösterdiği doğrusal olmayan davranış ve kesici takım dış açısı analizlerinde dikkate alınarak, üç boyutlu dinamik frezeleme sisteminin karakteristik denklemi (Altintas 2001) nümerik olarak çözülmüştür. Talaş kaldırma ile takım yolu boyunca değişiklik gösteren iş parçası dinamiği ise SEA ile hesaplanmıştır. Çeşitli kesme parametrelerinde yapılan frezeleme testleri ile kararlılık tahminleri doğrulanmıştır. Eksioğlu vd. (2012) ise frezeleme sürecinde iş parçası ve takım dinamiği, süreç sönümü, kesici takımdaki radyal ve aksel salgı, kesici takım helis açısı, değişken kesici takım dış aralığı vb. gibi durumların dikkate alındığı genelleştirilmiş bir ayrık-zaman modeli sunmuşlardır. Model vasıtasıyla yapılan simülasyonlar ile frezelemede tırlama titreşimleri, iş parçası boyut hatası ve kesme kuvvetleri tahmin edilebilmektedir. Deneysel çalışmalar ile doğrulanan simülasyon sonuçları neticesinde, sunulan yöntemin hesap süresi uzun ve karmaşık yapıya sahip olan nümerik yaklaşımlara alternatif olarak kullanılabilenliği vurgulanmıştır. Farklı bir yaklaşım ile Smith ve Tlusty (1993) frezelemede kesme kuvvetlerinin tepe noktalarını kullanarak bir kararlılık diyagramı oluşturmuşlardır. Kesme kuvvetleri yenilemeli kuvvet, dinamik sehim modeli (Smith ve Tlusty 1991) temelli zaman ortamı simülasyonları ile hesaplanmıştır. Tepeden-tepeye diyagramı olarak anılan bu diyagram, bir dizi iş mili devir sayısı-aksel kesme derinliği kombinasyonunda gerçekleştirilen zaman ortamı simülasyonları ile meydana getirilmektedir. Bu sayede kararlı ve kararsız kesmenin yapılabileceği alanlar tespit edilebilmektedir. Aynı yaklaşım Rubeo ve Schmitz (2016) tarafından esnek iş parçalarının

frezelenmesinde global olarak kararlılık limitlerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Üç kenarı sabit bir kenarı serbest esnek iş parçasının frezelenmesini konu alan çalışmada, iş parçası dinamiğinin yanı sıra takım dinamiği de simülasyonlarda dikkate alınmıştır. Deneysel çalışmalar neticesinde bu yaklaşımın hem lokal hem de global ölçekte hassas tahminler yapabildiği görülmüştür. Adı geçen çalışmaya ek olarak, aynı yazarlar zaman ortamı simülasyonuna bir kararlılık metriği tanımlayarak kararlılık sınırlarını net olarak elde etmeye imkân sağlayan bir çalışma (Rubeo ve Schmitz 2017) gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada zaman ortamı simülasyonları vasıtasıyla hesaplanan takım-ış parçası bağıl titreşimi frekans ortamına aktarılmıştır ve kararlılık metriği, titreşimlerin tırlama frekansındaki genliğinin takım dış geçiş frekansındaki genliğine oranı olarak tanımlanmıştır. Öte yandan, Dang vd. (2022) ince cidarlı tabana sahip iş parçalarının frezelenmesinde literatürde var olan çalışmalarda genel olarak sadece takım ve iş parçasının dinamik sehimleri dikkate alınarak çalışmalar gerçekleştirildiğini vurgulamıştır. Oysaki takım statik sehiminin de frezeleme kararlılığına ciddi oranda etkisi olduğunu belirtilmiştir. Bu kapsamda yazarların geliştirdiği modelde hem statik hem de dinamik sehim değerleri dikkate alınmıştır ve kurulan modelin tahmin etme kabiliyeti statik takım sehimini dikkate almayan modellere göre %22.22 geliştirildiği rapor edilmiştir. Wang vd. (2022) ince cidarlı parçaların 5 eksen frezelemesinde hem iş parçası mod şekil değişimini hem de takım oryantasyonunu dikkate alarak bir kararlılık analiz gerçekleştirmişlerdir. Dikkate alınan bu iki faktör ile kararlılık limitlerinin hassas bir şekilde tahmin edilebildiği ve sunulan kararlılık modelinin ince cidarlı parçaların frezelenmesinde ortaya çıkan tırlamanın azaltılması için takım oryantasyonunun optimize edilmesinde kullanılabileceği belirtilmiştir. Esnek bir kesici takım-ış parçası sisteminin 4 serbestlik dereceli frezeleme modeli Zhang vd. (2022) tarafından literatüre kazandırılmıştır. Yazarlar 4. serbestlik derecesini takım ve iş parçası ilerleme yönlerinin kombinasyonunu olarak tanımlamıştır. Deneysel çalışmalar ile geliştirilen model test edilmiş ve esnek kesici takım-ış parçası sisteminin frezeleme kararlılığının ilerleme yönüne

kayda değer oranda bağlı olduğu gösterilmiştir. Tüm bu modelleme çalışmalarına ek olarak, literatürde ince cidarlı iş parçalarının frezelenmesinde tırlamayı en aza indirebilmek amacıyla bir dizi işleme mekanizmaları geliştirilmiştir. Örneğin, Yuan vd. (2021) esnek iş parçasına çift taraflı bir destek yapısı tasarımı gerçekleştirerek, yapının etkinliği hem teorik hem de deneysel olarak incelenmiştir. Teorik ve deneysel sonuçlar neticesinde, geliştirilen destek yapının kullanılması ile tırlama titreşimlerinin önemli oranda azaldığı görülmüştür. Li vd. (2022) esnek iş mili-takım-ış parçası sisteminde frezeleme esnasında tırlamayı kontrol altında tutmak için iki adet strateji sunmuştur. Birinci stratejide sadece takım şaftının deplasmanı geri besleme olarak kullanılırken, ikinci stratejide takım ucu ve iş parçası deplasmanlarının farkı geri besleme olarak kullanılmıştır. Sunulan aktif tırlama kontrol stratejileri ile talaş kaldırma oranının büyük ölçüde artırıldığı rapor edilmiştir. Öte yandan, Wan vd. (2022) esnek iş parçalarının frezelenmesinde ortaya çıkan titreşimleri sönmölemek amacıyla iş parçası için hareketli bir destek yapısı tasarlamıştır. Pratik olarak uygulanabilen bu mekanik destek yapısı takım yolu boyunca iş parçasına temas ederek iş parçasının rijitliğini ve sönmö kabiliyetini artırmaktadır. Böylece tırlama olmadan daha yüksek talaş kaldırma oranlarına ulaşmak mümkün kılınmaktadır. Bu çalışmalara ilave olarak, Ma vd. (2022) ve Jiang vd. (2022) çeşitli mekanizmalar ile esnek iş parçalarının frezelenmesi sürecini geliştirmeyi hedefleyerek yüksek talaş kaldırma oranlarında kaliteli iş parçası yüzeyleri elde etmişlerdir. Ayrıca esnek iş parçalarının frezelenmesini konu alan birçok çalışma Fei vd. (2020) tarafından derleme olarak sunulmuştur.

Bu çalışmada frezeleme işleminde talaş kaldırma ile ortaya çıkan iş parçası dinamiği değişiminin kararlılık sınırlarına etkisi hem teorik hem de deneysel olarak incelenmiştir. Literatür çalışmalarından da görüleceği üzere esnek iş parçalarının frezelenmesinde talaş kaldırma oranına bağlı olarak iş parçası dinamiği takım yolu boyunca değişkenlik sergilemektedir. Bu durum dikkate alınarak kararlılık sınırlarını daha sağlıklı test edebilmek adına deneysel çalışmalarda gerçek esnek iş parçası

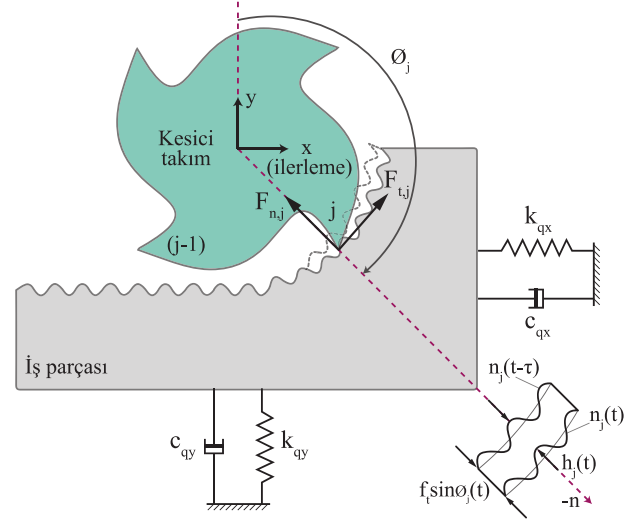
kullanmak yerine esnek iş parçası dinamiğini temsil edecek tek serbestlik dereceli esnek bir düzenek tasarlanıp imal edilmiştir. Düzenek esnekliği yaprak yaylar tarafından sağlanmaktadır ve tüm deneylerde bu yayların geometrisi sabit tutulmuştur. Böylece esnek iş parçasının direngenlik katsayısı tüm deneylerde sabit kalmıştır. Sadece talaş kaldırmadan dolayı ortaya çıkan iş parçası doğal frekans değişimi dikkate alınmıştır. Bu da kararlılık sınırlarının hassas bir şekilde test edilmesine imkân sağlamıştır. Ayrıca her bir deneysel çalışma için esnek bir iş parçası imal edilmesi hem zaman kaybına hem de malzeme sarfiyatına yol açacaktır. Tasarlanan ve imal edilen deney düzeneği ile bu durumda önüne geçilmiştir. Ek olarak, deney düzeneğinde yer alan yaprak yayların geometrisi (kalınlık, boy ve genişlik) değiştirilerek farklı iş parçası dinamiği de elde edilebilmektedir. Böylece imal edilen düzenek ilerleyen çalışmalarda da kolaylıkla kullanılabilir.

Çalışmanın ilk kısmında, frezeleme operasyonları için tırlama titreşimlerinin matematiksel altyapısı sunulmuştur. Ardından, deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği deney düzeneği hakkında bilgilere yer verilmiştir. Son olarak da deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen bulgulara ve bu sonuçlar ışığında iş parçası dinamiğinin frezeleme sürecinin verimliliği üzerine olan etkisine değinilmiştir.

2. Frezeleme Sürecinde Tırlama Titreşimleri

Frezeleme operasyonları sırasında meydana gelen Tezgâh/İş mili-takım tutucu-takım sistemi ve/veya iş parçası titreşimleri iş parçasında dalgalı bir yüzey oluşmasına sebep olmaktadır. Birbirini takip eden kesici takım dişlerinin iş parçası üzerinde bıraktığı dalgalı yüzeyler arasında faz kayması olması durumunda dinamik talaş kalınlığı değişkenlik sergileyerek tırlama titreşimleri ortaya çıkmaktadır. Bu durum şematik olarak Şekil 1'de gösterilmiştir. Böylece, talaş kesitinin bir fonksiyonu olan kesme kuvvetleri de frezeleme sırasında değişken olmaktadır. Meydana gelen değişken kesme kuvvetleri Tezgâh/İş mili-takım tutucu-takım sistemi ve/veya iş parçası titreşimlerini büyütme ve iş parçası yüzeyinin tekrar dalgalanmasına yol

açmaktadır. Bu durum adeta geri beslemeli bir sistem olarak çalışmaktadır. Kararsız bir yapıya sahip olan tırlama titreşimleri tırlama frekansında üstel olarak büyümektedir. Tırlama frekansı ise Tezgâh/İş mili-takım tutucu-takım sistemi ve/veya iş parçasının baskın modunun doğal frekansına yakın bir değere sahiptir (Altıntaş 2012).



Şekil 1. Esnek iş parçalarının frezelenmesinde tırlama titreşimleri

Bu çalışmada esnek iş parçası iki serbestlik dereceli olarak Şekil 1'de görüldüğü gibi değerlendirilmiştir. Tezgâh/İş mili-takım tutucu-takım sistemi ise rijit olarak kabul edilmiştir. Bu durumda esnek iş parçasının frezelenmesinde takım dişi j için dinamik talaş kalınlığı:

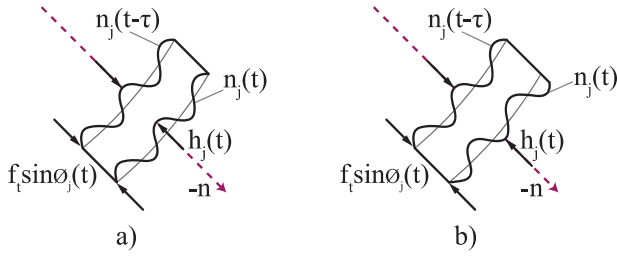
$$h_j(t) = f_t \sin \phi_j(t) - n_j(t) + n_j(t - \tau) \quad (1)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir (Altıntaş 2012). Eşitlikte yer alan f_t ilerleme, $\phi_j(t) = \frac{2\pi\Omega}{60} t$ zamana bağlı diş açısı, Ω (dev/dak) iş mili devir sayısı, $f_t \sin \phi_j$ statik talaş kalınlığı, $n_j(t)$ ve $n_j(t - \tau)$ ise iş parçasının sırasıyla şu anki ve bir önceki diş periyodunda ($\tau = \frac{60}{\Omega N_t}$ (s)) yüzey normali yönündeki "n" titreşimleridir. Bu titreşimler, iş parçasının şu anki ve bir önceki diş periyodundaki x ve y -yönü titreşimlerinin " $x_i(t)$, $y_i(t)$, $x_i(t - \tau)$, $y_i(t - \tau)$ " yüzey normaline koordinat transformasyonu ile:

$$n_j(t) = -x_i(t) \sin \phi_j(t) - y_i(t) \cos \phi_j(t) \quad (2)$$

$$n_j(t - \tau) = -x_i(t - \tau) \sin \phi_j(t) - y_i(t - \tau) \cos \phi_j(t) \quad (3)$$

şeklinde elde edilmektedir. Şu anki ve bir önceki diş periyodunda kesim yapan dişlerin iş parçası yüzeyinde oluşturduğu dalgaların aynı fazda (Şekil 2(a)) ve faz kaymasının (Şekil 2(b)) olduğu durumlar Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. Şu anki (j .) ve bir önceki ($(j - 1)$.) kesici takım dişinin iş parçası yüzeyinde oluşturduğu dalgalı yüzeyler: a) Yüzeyler aynı fazda b) Yüzeylerde faz kayması mevcut

Dalgaların aynı fazda olması durumunda dinamik talaş kalınlığındaki değişkenlik ihmal edilebilmektedir. Kesme kuvvetleri de dinamik talaş kalınlığına bağlı olduğundan, kuvvetlerde de kayda değer bir değişkenlik oluşmamaktadır. Bu durumda iş parçasında kararlı bir yapıya sahip olan zorlanmış titreşimler meydana gelmektedir (Kıran vd. 2017). Öte yandan, birbirini takip eden kesici takım dişlerinin iş parçası yüzeyinde bıraktığı dalgalar arasında faz farkı olması sonucunda dinamik talaş kalınlığında kayda değer oranda değişkenlik meydana gelmektedir (Şekil 2b). Dolayısıyla kesme kuvvetlerinde de değişkenlik ortaya çıkmaktadır. Bu durumda tırlama titreşimleri ortaya çıkarak kararsız bir frezeleme yapılmasına neden olmaktadır. Frezeleme operasyonlarında kararlı ve kararsız kesme parametreleri analitik veya nümerik yöntemler ile oluşturulan kararlılık diyagramları ile tespit edilebilmektedir. Bu çalışmada esnek iş parçasının frezelenmesi için kararlılık diyagramları Altintas ve Budak (1995) tarafından geliştirilen Fourier serisi yaklaşımı kullanılarak oluşturulmuştur. Adı geçen yaklaşımda frezeleme operasyonları için limit aksenal kesme derinliği:

$$b_{lim} = -\frac{2\pi\Lambda_G}{N_t K_t} (1 + \kappa^2) \quad (4)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada, K_t , N_t ve Λ_G sırasıyla teğetsel kesme kuvveti sabiti, kesici takımdaki toplam diş sayısı ve dinamik frezeleme sisteminin karakteristik denkleminin öz değerinin

gerçek kısmıdır. $\kappa = \frac{\Lambda_s}{\Lambda_G}$ ise öz değerlerin sanal kısmının gerçek kısmına oranıdır. Dinamik frezeleme sisteminin karakteristik denkleminin karmaşık öz değerleri ise Eşitlik (5) ile hesaplanabilmektedir.

$$\Lambda_{1,2} = -\frac{1}{2b_0} \left(b_1 \pm \sqrt{b_1^2 - 4b_0} \right) \quad (5)$$

Eşitlikte yer alan $\Lambda = \Lambda_G + i\Lambda_s$, $b_0 = FTF_{xx-i}FTF_{yy-i}(\alpha_{xx}\alpha_{yy} - \alpha_{xy}\alpha_{yx})$ ve $b_1 = \alpha_{xx}FTF_{xx-i} + \alpha_{yy}FTF_{yy-i}$ olarak tanımlanmaktadır. FTF_{xx-i} ve FTF_{yy-i} Tezgâh/İş mili-takım tutucu-takım sistemi ve/veya iş parçasının sırasıyla x ve y -yönü deplasman-kuvvet direkt FTF'leri olabilmektedir. Bu çalışmada, Tezgâh/İş mili-takım tutucu-takım sistemi rijit kabul edilip, iş parçası dinamiği dikkate alındığından adı geçen FTF'ler iş parçasına aittir. Yönel oryantasyon faktörleri α_{xx} , α_{xy} , α_{yx} ve α_{yy} ise:

$$\alpha_{xx} = \frac{1}{2} [\cos(2\phi) - 2K_r\phi + K_r \sin(2\phi)]_{\phi_s}^{\phi_e} \quad (6)$$

$$\alpha_{xy} = \frac{1}{2} [-\sin(2\phi) - 2\phi + K_r \cos(2\phi)]_{\phi_s}^{\phi_e} \quad (7)$$

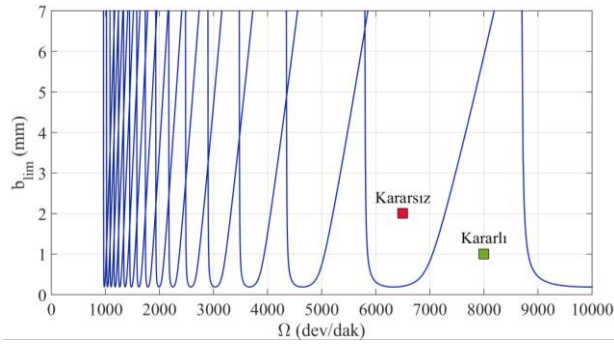
$$\alpha_{yx} = \frac{1}{2} [-\sin(2\phi) + 2\phi + K_r \cos(2\phi)]_{\phi_s}^{\phi_e} \quad (8)$$

$$\alpha_{yy} = \frac{1}{2} [-\cos(2\phi) - 2K_r\phi - K_r \sin(2\phi)]_{\phi_s}^{\phi_e} \quad (9)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Eşitliklerde görülen ϕ_s kesici takım diş giriş açısını, ϕ_e kesici takım diş çıkış açısını, K_t ve K_r ise kesme sabitlerini temsil etmektedir. Bahsi geçen sabitler arasındaki ilişki: $K_t = \frac{K_s}{\sqrt{1+K_r^2}}$, $K_r = \frac{1}{\tan(\beta)}$ olarak yazılmaktadır. Burada, K_s özgül kesme kuvveti değeri, β ise kuvvet açısıdır. Frezeleme için limit aksenal kesme derinliğinin hesaplanmasının ardından, frekansa bağlı iş mili devir sayısı ise Eşitlik (10) ile elde edilebilmektedir.

$$\Omega = \frac{60}{N_t \tau} \quad (10)$$

Bu eşitlikte görülen kesici takım diş periyodu: $\tau = \frac{1}{\omega_c} (\varepsilon + k \cdot 2\pi)$ (s) olarak yazılmaktadır. Ayrıca, ω_c (rad/s) tırlama frekansını, $\varepsilon = \pi - 2\psi$ (rad) birbirini izleyen kesici takım dişlerinin iş parçasına bıraktığı dalgalı yüzeyler arasındaki faz kaymasını, $k = 0,1,2,\dots$ (loblar) ise dişler arasındaki dalgalı yüzeylerin sayısını temsil etmektedir. Ayrıca $\psi = \tan^{-1}(\kappa)$ (rad) olarak hesaplanmaktadır. Şekil 3'te yukarıda özetlenen kararlılık modeli vasıtasıyla oluşturulan kararlılık diyagramı görülmektedir. Frezeleme operasyonlarında kararlı ve kararsız kesme bölgelerinin tayinine imkân sağlayan bu diyagram ile tırlama titreşimlerinden kaçınarak yüksek talaş kaldırma oranlarına ulaşmak mümkün olmaktadır (Altintas 2012).



Şekil 3. Frezeleme operasyonu için örnek bir kararlılık diyagramı

3. DeneY düzeneği

İş parçası dinamiği dikkate alınarak oluşturulan kararlılık diyagramlarının deneysel olarak testini gerçekleştirebilmek amacıyla Şekil 4(a)'da görülen tek serbestlik dereceli (TSD) deney düzeneği (Kıran ve Kayacan 2019) tasarlanmıştır. Bu düzenek temel olarak esnek iş parçası dinamiğini temsil etmektedir. Üst ve alt plaka, baskı pabuçları, iş parçası ve dört adet yaprak yaydan meydana gelen deney düzeneği y-yönünde bir esnekliğe sahiptir. Bu esneklik düzenekte kullanılan 4 adet yaprak yay tarafından sağlanmaktadır. Düzenekteki alt plaka, üst plaka ve baskı pabuçları imalatında AISI 1040 çelik kullanılmıştır. Yaprak yaylar ise AISI 1075 yay çeliğinden imal edilmiştir. 40 x 96 x 11 mm boyutlarına sahip 6013-T6 alüminyum malzemeli iş parçası şekilde görüldüğü gibi deney düzeneğinin

üst plakasına tutturulmuştur. Deney düzeneğinin y-yönü direngenlik katsayısı " k_{yy} (N/m)" yaprak yayların geometrisine ve elastisite modülüne bağlı olarak Eşitlik (11) ile hesaplanabilmektedir (Smith 2000). Bu bağıntıda, E , w_y , t_y ve l_y sırasıyla yaprak yayların elastisite modülü, genişliği, kalınlığı ve uzunluğudur (Çizelge 1).

$$k_{yy} = 4Ew_y \left(\frac{t_y}{l_y} \right)^3 \quad (11)$$

Çizelge 1. Yaprak yay boyutları ve Elastisite modülü

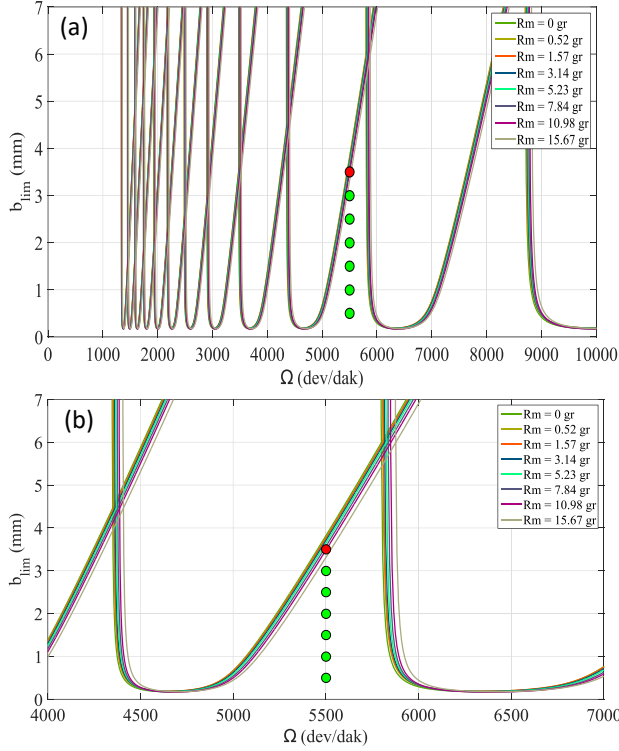
w_y	t_y	l_y	E
(mm)	(mm)	(mm)	(GPa)
15	1.5	45	200

Deney düzeneğinin sönümsüz doğal frekansı " ω_n (rad/s)" ise:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_{yy}}{m_e}} \quad (12)$$

şeklinde elde edilebilmektedir (Smith 2000). Eşitlikte yer alan $m_e = m_p + \frac{26}{35}m_l$ eşdeğer kütle olarak tanımlanmaktadır. m_p hareketli parçaların (üst plaka, baskı pabuçları, bağlantı vidaları ve iş parçası) kütlelerinin toplamı, m_l ise yaprak yayların toplam kütleleridir. Tasarım ve hesaplamaların ardından TSD deney düzeneğinin imalatı gerçekleştirilerek Şekil 4(b)'de görülen deneysel sistem kurulmuştur. Kararlılık diyagramlarını oluşturmak amacıyla her talaş kaldırma adımından önce ve sonra TSD deney düzeneğinin deplasman-kuvvet FTF'sinin ölçümü şekilde görülen ekipmanlar vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Burada, çekiç (Kistler 9722A2000, Duyarlılık = 2.39 mV/N, çelik uç) ile bir kuvvet uygulanarak TSD deney düzeneği uyarılmıştır. Düzeneğin bu kuvvete olan tepkisi ise ivme ölçer (Kistler 8702B500, Duyarlılık = 10.13 mV/g) vasıtasıyla ölçülmüştür. Bahsi geçen ölçümlerde CUTPRO® yazılımının MALTF modülü kullanılmıştır. Her bir ölçüme tepe alma yöntemi ile modal eğri uydurma (Schmitz 2011) yapılmıştır ve bu FTF'ler kullanılarak kararlılık diyagramları oluşturulmuştur.

Kararlılık limitlerini daha sağlıklı test edebilmek adına kararlılık diyagramları belirli talaş kaldırma aralıkları için oluşturulmuştur. İlk olarak $R_m = 0-15.67$ gr talaş kaldırma adımlarında ölçülen FTF'ler kullanılarak kararlılık diyagramları elde edilmiştir. Bu diyagramların genel ve detay görünümü sırasıyla Şekil 7(a) ve 7(b)'de verilmiştir.



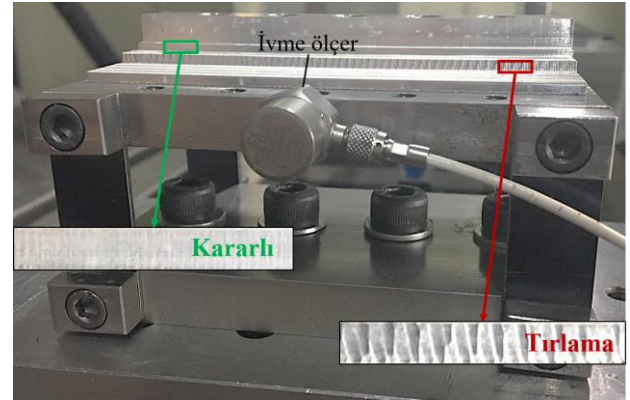
Şekil 7. İş parçası dinamiğine göre kararlılık diyagramları: $R_m = 0-15.67$ gr: (a) Genel görünümü (b) Detay görünümü

Şekillerde görüldüğü üzere TSD deney düzeneğinde talaş kaldırılması ile ortaya çıkan doğal frekans değişimi kararlılık sınırlarının sağa doğru kaymasına yol açmaktadır. Başka bir deyişle, kararlı ve kararsız kesme bölgeleri değişikliğe uğramaktadır. Bu değişimi test etmek amacıyla şekillerde gösterilen noktalarda frezeleme operasyonları yapılarak kesme işleminin kararlı ya da kararsız olduğunun tespiti yapılmıştır. Test noktalarında kesme derinliği 0.5 mm'lik adımlarla artırılırken diğer tüm kesme parametreleri sabit tutulmuştur. Frezeleme testlerinde kullanılan kesme parametreleri Çizelge 2'de verilmiştir. Bu kesme parametrelerinde frezeleme işlemleri aynı yönlü olarak ve soğutma sıvısı kullanılmadan yapılmıştır. Takım-iş parçası çiftine ait kesme sabitleri ise $K_t = 677.48 \text{ N/mm}^2$, $K_r = 0.1844$ olarak hesaplanıp kararlılık diyagramlarının oluşturulmasında kullanılmıştır. Şekil 7'de görülen yeşil noktalar kararlı frezelemeyi, kırmızı nokta ise kesme esnasında tırlamanın meydana geldiğini belirtmektedir.

Çizelge 2. Frezeleme testlerinde kullanılan kesme parametreleri ($R_m = 0-15.67$ gr)

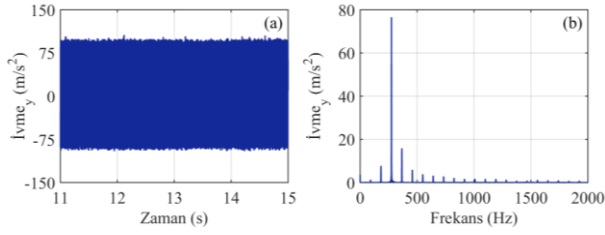
Ω (dev/dak)	5500	-	-	-	-	-	-
f_t (mm/diş)	0.1	-	-	-	-	-	-
b_{lim} (mm)	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5
a (mm)	4	-	-	-	-	-	-

Frezeleme işleminde tırlama olup olmadığının tespiti hem iş parçasının yüzeyine bakılarak hem de kesme esnasında ölçülen TSD deney düzeneği y -yönü ivme sinyali analiz edilerek yapılmıştır. Örnek olması adına, kararlı ve kararsız kesme sonucu ortaya çıkan iş parçası yüzeyler Şekil 8'de gösterilmiştir.



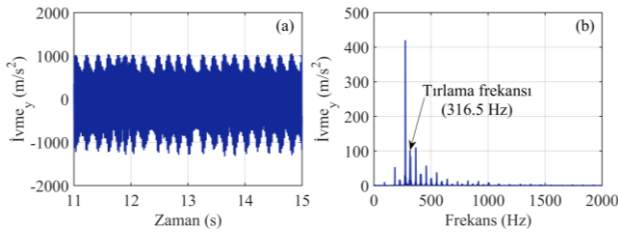
Şekil 8. Tırlama ve tırlama olmadan yapılan frezeleme sonucu elde edilen iş parçası yüzeyleri

$\Omega = 5500$ dev/dak, $f_t = 0.1$ mm/diş, $a = 4$ mm, $b_{lim} = 0.5$ mm kesme parametrelerinde (kararlı kesme bölgesinde) gerçekleştirilen aynı yönlü frezeleme operasyonunda tırlamaya rastlanmamıştır. Bu tespit frezeleme esnasında ölçülen TSD deney düzeneği ivme sinyali (Şekil 9) analiz edilerek yapılmıştır. Şekil 9(b) yakından incelendiğinde, sadece takım diş geçiş frekansında ($f_{tdg} = 91.66$ Hz) ve harmoniklerinde frekans içerikleri görülmektedir. TSD deney düzeneğinin doğal frekansı yakınlarında herhangi bir tırlama frekansı mevcut değildir. Düzenek kesme esnasında yalnızca zorlanmış titreşim yapmaktadır. Bu titreşim genlikleri ise düzeneğin doğal frekansına yakın olan takım diş geçiş frekansında veya harmoniklerinde daha yüksek olmaktadır. Bu durumu Şekil 9(b)'de gözlemlemek mümkündür. TSD deney düzeneğinin doğal frekansına (289.5 Hz) yakın olan takım diş geçiş frekansının 3. Harmoniğinde (yani 274.98 Hz yer alan harmoniği) önemli oranda zorlanmış titreşim meydana gelmektedir.



Şekil 9. Frezeleme testi sırasında ölçülen TSD deney düzeneği y-yönü ivmesi: (a) Zaman ortamında (b) Frekans ortamında

Diğer kesme parametreleri sabit tutulurken eksenel kesme derinliği adım adım artırılarak Şekil 7'de gösterilen yeşil noktalarda yapılan frezeleme operasyonlarında tırlama ile karşılaşmamıştır ve kesme esnasında benzer ivme sinyalleri elde edilmiştir. Fakat, $\Omega = 5500$ dev/dak, $f_t = 0.1$ mm/diş, $a = 4$ mm, $b_{lim} = 3.5$ mm kesme parametrelerinde yapılan aynı yönlü frezelemede tırlama ortaya çıkmıştır. Bu deney sırasında ölçülen TSD deney düzeneği y -yönü ivmesi zaman ve frekans ortamında Şekil 10'da gösterilmiştir.



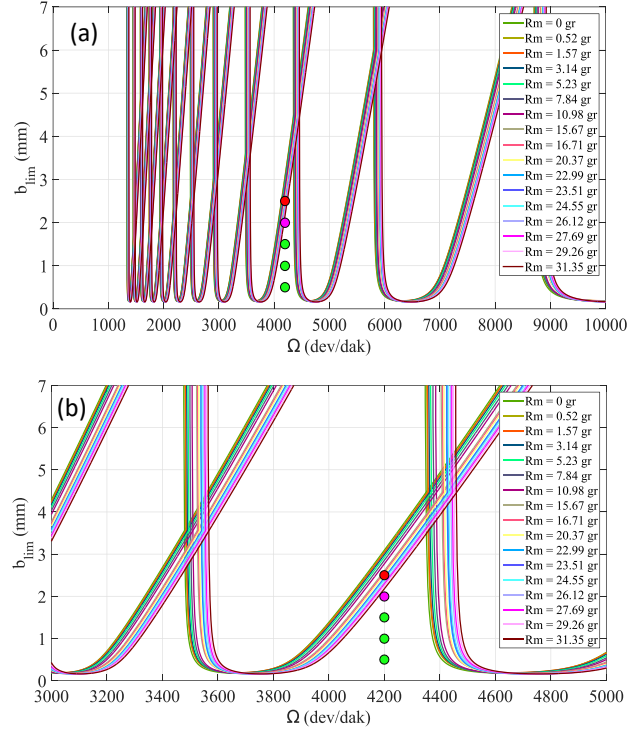
Şekil 10. Frezeleme testi sırasında ölçülen TSD deney düzeneği y-yönü ivmesi: (a) Zaman ortamında (b) Frekans ortamında

Şekil 10(a)'da görülen zaman ortamındaki ivme sinyali incelendiğinde, sinyalin tırlama sonucunda değişkenlik sergilediği görülmektedir. Aynı sinyale frekans ortamında bakıldığında (Şekil 10(b)) ise takım diş geçiş frekansı ve harmoniklerine ek olarak, TSD deney düzeneği doğal frekansı (293.3 Hz) yakınında, yani 316.5 Hz'de bir tırlama frekansı görülmektedir. Bu da kesme işleminin kararsız olduğunu belirtmektedir. Öte yandan, kararlılık limitlerini farklı iş mili devir sayısında test edebilmek amacıyla bir sonraki aynı yönlü frezeleme testleri Çizelge 3'de verilen kesme parametrelerinde gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3. Frezeleme testlerinde kullanılan kesme parametreleri (Rm = 0-31.35 gr)

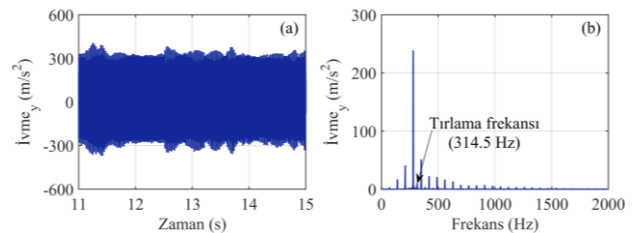
Ω (dev/dak)	4200	-	-	-	-
f_t (mm/diş)	0.1	-	-	-	-
b_{lim} (mm)	0.5	1	1.5	2	2.5
a (mm)	4	-	-	-	-

Bir önceki sunulan deneysel çalışmalarda olduğu gibi talaş kaldırma ile iş parçası dinamiği değişimi dikkate alınarak kararlılık diyagramları oluşturulmuştur. Bu diyagramların kararlı ve kararsız frezelemenin yapıldığı test noktaları ile birlikte genel görünümü Şekil 11(a)'da, detay görünüşü ise Şekil 11(b)'de gösterilmiştir.



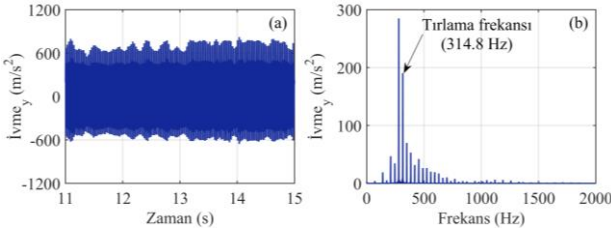
Şekil 11. İş parçası dinamiğine göre kararlılık diyagramları: Rm = 0-31.35 gr: (a) Genel görünümü (b) Detay görünümü

Şekillerde görülen yeşil test noktalarında gerçekleştirilen aynı yönlü frezeleme operasyonlarında herhangi bir tırlamaya rastlanmamıştır. Ayrıca şekillerde verilen pembe test noktası ($b_{lim} = 2$ mm) kararlı kesme bölgesinden kararsız kesme bölgesine geçiş noktası olarak belirlenmiştir. Bu tespit, adı geçen test noktasında gerçekleştirilen frezeleme operasyonu sırasında ölçülen TSD deney düzeneği y-yönü ivme sinyaline (Şekil 12) dayanarak yapılmıştır.



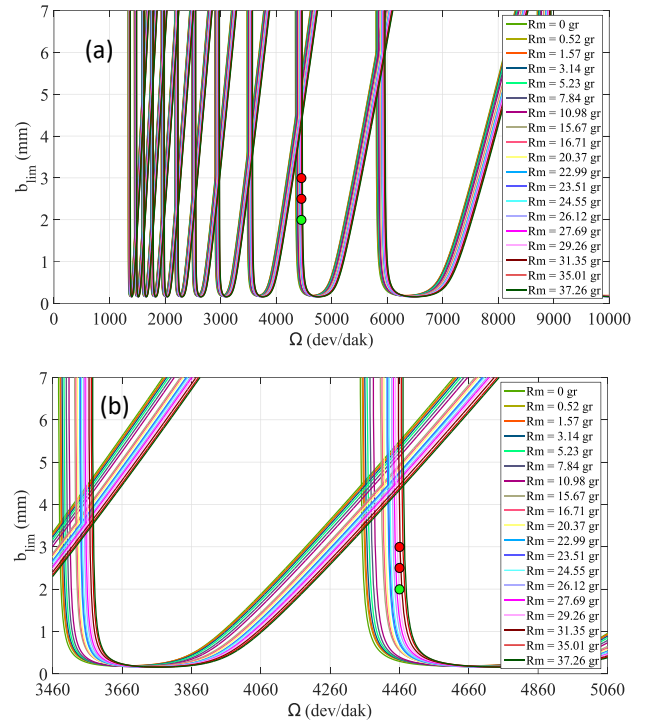
Şekil 12. Frezeleme testi sırasında ölçülen TSD deney düzeneği y -yönü ivmesi: (a) Zaman ortamında (b) Frekans ortamında

Şekil 12(b) vasıtasıyla ölçülen ivme sinyali frekans ortamında incelendiğinde, takım diş geçiş frekansı ve harmoniklerine ek olarak bir de 314.4 Hz'de tırlama frekansı mevcuttur. Bu frekanstaki titreşim seviyesi oldukça düşüktür ve çok hassas olmayan frezeleme operasyonları için ihmal edilebileceği kanaatine varılmıştır. Dolayısıyla bu test noktası kararsız kesme bölgesine geçiş noktası olarak belirlenmiştir. Geçiş noktasından sonra eksenel kesme derinliği artırılarak $\Omega = 4200$ dev/dak, $f_t = 0.1$ mm/diş, $a = 4$ mm, $b_{lim} = 2.5$ mm kesme parametreleri ile yapılan aynı yönlü frezeleme operasyonunda tırlama meydana gelmiştir. Bu deney sırasında ölçülen TSD deney düzeneği y-yönü ivmesi zaman ve frekans ortamında Şekil 13'de sunulmuştur. İvme sinyali frekans ortamında incelendiğinde (Şekil 13(b)), takım diş geçiş ve frekansı ($f_{tdg} = 70$ Hz) harmoniklerinin yanı sıra tırlama frekans içerikleri de gözlemlenmektedir. Özellikle 314.8 Hz'de kayda değer oranda tırlama titreşimi ortaya çıkmıştır.



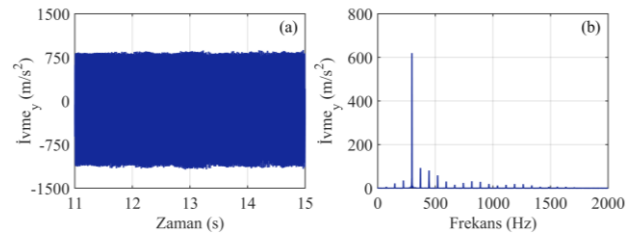
Şekil 13. Frezeleme testi sırasında ölçülen TSD deney düzeneği y -yönü ivmesi: (a) Zaman ortamında (b) Frekans ortamında

Yapılan deneysel analizleri bir adım daha öteye taşımak ve kararlılık sınırlarının talaş kaldırma ile ortaya çıkan iş parçası FTF değişimine olan hassasiyetini detaylı incelemek adına, $\Omega = 4460$ dev/dak, $f_t = 0.1$ mm/diş, $a = 4$ mm, $b_{lim} = 2, 2.5, 3$ mm kesme parametrelerinde 3 adet daha deney yapılmıştır. Bahsi geçen test noktaları kararlılık diyagramları ile birlikte Şekil 14(a)'da gösterilmiştir. İş parçası dinamiği değişime göre farklılık sergileyen kararlılık sınırlarını daha net görebilmek amacıyla diyagramların detay görünüşü ise Şekil14(b)'de verilmiştir. Bu şekilde gözlemlenebileceği üzere, talaş kaldırma ile iş parçası doğal frekansının artması neticesinde kararlılık sınırları sağ tarafa doğru kaymaktadır. Dolayısıyla da kararlı ve kararsız kesme bölgeleri değişime maruz kalmaktadır. Şekilde yer alan test noktaları vasıtasıyla bu durumu teyit etmek mümkündür.



Şekil 14. İş parçası dinamiğine göre kararlılık diyagramları: Rm = 0-37.26 gr: (a) Genel görünümü (b) Detay görünümü

Başka bir deyişle, iş parçası dinamiğinin değişimi dikkate alınmadan sadece hiç talaş kaldırılmadan ölçülen FTF (Rm=0 gr) ile oluşturulan kararlılık sınırlarına göre 2 mm kesme derinliğinde (Şekil 14(b) yeşil nokta) yapılan frezeleme sırasında tırlama meydana gelmesi beklenirdi. Çünkü adı geçen test noktası Rm=0 gr'de ölçülen FTF ile elde edilen kararlılık diyagramının kararsız kesme bölgesinde yer almaktadır. Fakat bu durumun aksine, Şekil 14 'de yer alan yeşil noktada kararlı bir frezeleme operasyonu yapılabilmektedir. Adı geçen deney sırasında ölçülen ivme sinyali (Şekil 15) bu gözlemi teyit etmektedir. Ayrıca elde edilen bu deneysel sonuç talaş kaldırma ile ortaya çıkan iş parçası dinamiği değişiminin kararlılık sınırları üzerindeki etkisini daha açık ve net bir şekilde ortaya çıkarır niteliktedir.



Şekil 15. Frezeleme testi sırasında ölçülen TSD deney düzeneği y -yönü ivmesi: (a) Zaman ortamında (b) Frekans ortamında

Her ne kadar bu çalışmada kullanılan deney düzeneği farklı olsa da buraya kadar sunulan bulgular genel olarak değerlendirildiğinde literatürde yer verilen bulgular ile örtüşmektedir. Örneğin, Bravo vd. (2005), Thévenot vd. (2006), Fei vd. (2020) ve Dang vd. (2022)'nin sunduğu çalışmalarda da iş parçası dinamiğinin talaş kaldırma oranına bağlı olarak değişimi ile kararlılık sınırlarında önemli oranda değişkenlik meydana geldiği vurgulanmıştır.

5. Sonuçlar

Buraya kadar sunulan kararlılık analizi sonuçlarına genel olarak bakıldığında, kullanılan kararlılık modelinin hassas bir şekilde kararlı kararsız kesme bölgelerini tayin edebildiği görülmektedir. TSD deney düzeneği üzerinde gerçekleştirilen bu analizler ile, iş parçası dinamiği değişimin kararlılık sınırlarını kayda değer oranda etkilediği gözlemlenmiştir. Önceki bölümlerde detaylı olarak ele alındığı üzere, kullanılan deney düzeneğinin direngenlik katsayısı sabittir ve talaş kaldırma ile sadece doğal frekans değerinde artış meydana gelmektedir. Beklenildiği gibi, bahsi geçen artış kararlı ve kararsız kesme bölgelerinde değişime yol açmıştır. Öte yandan, gerçek esnek iş parçalarının (ince duvarlı iş parçaları) frezeleme esnasında talaş kaldırma oranına bağlı olarak iş parçasının hem direngenlik katsayısında hem de doğal frekansında değişim meydana gelmektedir (Kiran ve Kayacan, 2019). Bu durum, TSD deney düzeneğine kıyasla, kararlılık sınırlarının daha fazla değişmesine sebebiyet verecektir. Dolayısıyla, kararlı ve kararsız kesme bölgelerini daha sağlıklı analiz edebilmek için kararlılık diyagramlarının üç boyutlu olarak ifade edilmesi yerinde bir yaklaşım olacaktır. Başka bir deyişle, kararlılık diyagramına üçüncü bir boyut olarak talaş kaldırma ile iş parçası dinamiğinin dahil edilmesi, bu tarz parçaların frezelenmesinde global ölçekte tırlama olan ve olmayan bölgelerin tespiti için fayda sağlayacaktır. Böylece, frezeleme süreci öncesinde bir işlem planlaması ve optimizasyonu (kesme parametreleri ve takım yolu optimizasyonu) yapılarak tırlama olmadan yüksek talaş kaldırma oranlarına ulaşmak mümkün olabilecektir.

Teşekkür

Bu çalışmayı, 4254-D2-15 numaralı doktora projesi kapsamında maddi olarak destekleyen Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkür ederiz. Ayrıca

deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği Süleyman Demirel Üniversitesi Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi (YETEM) Tasarım ve İmalat Birimi'ne de teşekkürlerimizi sunarız.

6. Kaynaklar

- Adetoro, O., Sim, W., Wen, P. 2010. An Improved Prediction of Stability Lobes using Nonlinear Thin Wall Dynamics. *Journal of Materials Processing Technology*, **210(6)**, 969–979.
- Altintas, Y., Budak, E. 1995. Analytical Prediction of Stability Lobes in Milling. *CIRP Annals Manufacturing Technology*, **44(1)**, 357–362.
- Altintas, Y. 2001. Analytical Prediction of Three Dimensional Chatter Stability in Milling. *JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing*, **44(3)**, 717–723.
- Altintas, Y., 2012. *Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design*. Cambridge University Press, Cambridge, 363.
- Bravo, U., Altuzarra, O., De Lacalle, L.L., Sánchez, J., Campa, F. 2005. Stability Limits of Milling Considering the Flexibility of the Workpiece and the Machine. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **45(15)**, 1669–1680.
- Campa, F., de Lacalle, L.L., Lamikiz, A., Sanchez, J. 2007. Selection of Cutting Conditions for a Stable Milling of Flexible Parts with Bull-Nose End Mills. *Journal of Materials Processing Technology*, **191(1)**, 279–282.
- Campa, F., De Lacalle, L.L., Celaya, A. 2011. Chatter Avoidance in the Milling of Thin Floors with BullNose End Mills: Model and Stability Diagrams. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **51(1)**, 43–53.
- Dang, X.B., Wan, M., Zhang, W.H. and Yang, Y., 2022. Stability Analysis of The Milling Process of the Thin Floor Structures. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **165**, 108311.
- Eksioglu, C., Kilic, Z., Altintas, Y. 2012. Discrete Time Prediction of Chatter Stability, Cutting Forces, and Surface Location Errors in Flexible Milling systems. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, **134(6)**, 061006.
- Fei, J., Xu, F., Lin, B. and Huang, T., 2020. State of the Art in Milling Process of the Flexible Workpiece. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **109(5)**, 1695-1725.

- Jiang, X., Wu, K., Zhang, Y. and He, S., 2022. Improved Vibration Suppression Modeling for Reinforcement Clamping by Eco-friendly Magnetorheological Fluid During Milling of Annular Thin-Walled Workpiece. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 1-16.
- Kıran, K., Rubeo, M., Kayacan, M.C., Schmitz, T., 2017. Two Degree of Freedom Frequency Domain Surface Location Error Prediction. *Precision Engineering*, **48**, 234–242.
- Kıran, K., Kayacan, M.C., 2019. Cutting Force Modeling and Accurate Measurement in Milling of Flexible Workpieces. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **133**, 106284.
- Kıran, K., Kayacan, M.C., 2019. Effect of Material Removal on Workpiece Dynamics in Milling: Modeling and Measurement. *Precision Engineering*, **60**, 506–519.
- Li, D., Cao, H. and Chen, X., 2022. Active Control of Milling Chatter Considering the Coupling Effect of Spindle-Tool and Workpiece Systems. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **169**, 108769.
- Ma, J., Li, Y., Zhang, D., Zhao, B., Wang, G. and Pang, X., 2022. Dynamic Response Prediction Model of Thin-Wall Workpiece-Fixture System with Magnetorheological Damping in Milling. *Journal of Manufacturing Processes*, **74**, 500-510.
- Rubeo, M.A., Schmitz, T.L. 2016. Global Stability Predictions for Flexible Workpiece Milling using Time Domain Simulation. *Journal of Manufacturing Systems*, **40**, 8–14.
- Rubeo, M.A., Schmitz, T.L. 2017. Amplitude Ratio: A New Metric for Milling Stability Identification. *Procedia Manufacturing*, **10**, 351–362.
- Smith, S., Tlustý, J. 1993. Efficient Simulation Programs for Chatter in Milling. *CIRP Annals Manufacturing Technology*, **42(1)**, 463–466.
- Smith, S., Tlustý, J. 1991. An Overview of Modeling and Simulation of The Milling Process. *Journal of Engineering for Industry*, **113(2)**, 169–175.
- Smith, S.T., 2000. *Flexures: Elements of Elastic Mechanisms*. CRC Press, London, 423.
- Schmitz, T.L., Smith, K.S., 2011. *Mechanical Vibrations: Modeling and Measurement*. Springer, New York, 373.
- Thévenot, V., Arnaud, L., Dessein, G., CazenaveLarroche, G. 2006. Influence of Material Removal on the Dynamic Behavior of Thin-Walled Structures in Peripheral Milling. *Machining Science and Technology*, **10(3)**, 275-287.
- Wan, M., Dang, X.B., Zhang, W.H. and Yang, Y., 2022. Chatter Suppression In The Milling Process of the Weakly-Rigid Workpiece through a Moving Fixture. *Journal of Materials Processing Technology*, **299**, 117293.
- Wang, D., Ren, J. and Tian, W., 2022. Influences of Modal Shape and Tool Orientation on Evolution of Dynamic Responses in 5-Axis Milling of Thin-Walled Parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-24.
- Yuan, H., Wan, M., Yang, Y. and Zhang, W.H., 2021. Mitigation of Chatter in Thin-Wall Milling by Using Double-Side Support Device. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **115(1)**, 213-232.
- Zhang, X., Zhao, Z., Chen, K. and Zhao, W., 2022. Generalized Modeling of Milling Dynamics for the 4DOF Machining System with Asymmetric Flexibility. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **169**, 108750.