



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University

## Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 21.11.2023  
Kabul Tarihi : 20.05.2024

Received Date : 21.11.2023  
Accepted Date : 20.05.2024

### LAZER KESİM MAKİNELERİNDE İŞ PARÇASI KALINLIĞININ TİTREŞİM KAYNAKLI ÜRETİM HATALARINA ETKİSİ: DENEYSEL BİR İNCELEME

#### THE EFFECT OF WORKPIECE THICKNESS ON VIBRATION-INDUCED PRODUCTION ERRORS IN LASER CUTTING MACHINES: AN EXPERIMENTAL STUDY

Deniz KAYA<sup>1\*</sup> (ORCID: 0000-0001-6926-8206)

Derya MERT<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0003-2208-6848)

Ahmet KAHRAMAN<sup>1</sup> (ORCID: 0009-0008-1684-5848)

Murat REİS<sup>2</sup> (ORCID: 0000-0001-5853-488X)

<sup>1</sup> Durmazlar Makina San. ve Tic. A.Ş., Bursa, Türkiye

<sup>2</sup> Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Deniz KAYA, dkaya@durmazlar.com.tr

#### ÖZET

Lazer kesimde, özellikle karmaşık hatlara ve dar toleranslara sahip küçük parçaların üretiminde titreşimler, kesim kenarlarında kusurlara neden olarak ürün kalitesini olumsuz etkileyebilmektedir. Lazer kesim kafasının ve iş parçasının birbirine göre göreceli konumundaki mikro sapmalar, lazer kesim işlemindeki hataların kaynağını oluşturmaktadır. Lazer kesim kafasını taşıyan hareketli kütlelerin ivmesinin sınırlandırılması, gövde titreşimlerini azaltarak kesim doğruluğunu artırabilmekte ancak bu önlem, üretim hızını düşmesine neden olmaktadır. Bu çalışma, yüksek kesme hızlarını temsil eden aşırı çalışma koşulları altında bir lazer kesme makinesindeki titreşimleri analiz etmektedir. Bu amaçla ölçüm hassasiyeti ve veri toplama hızı yüksek olmasına rağmen oldukça ekonomik bir titreşim ölçüm cihazı geliştirilmiştir. Bu cihaz yardımıyla makine gövdesinde ve farklı kalınlıktaki iş parçalarında meydana gelen titreşimler tespit edilmiştir. Sonuçlar, iş parçası kalınlığı azaldıkça makine gövdesi titreşimlerinin iş parçası üzerindeki etkisinin önemli ölçüde artma eğiliminde olduğunu ve bu durumun parça üzerinde kesme kusurlarına neden olabileceğini göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** İvme, titreşim, lazer, sac, kesim

#### ABSTRACT

In laser cutting, especially in producing small parts with complex lines and tight tolerances, vibrations can cause defects on the cut edges, negatively affecting product quality. Micro deviations in the relative position of the laser cutting head and the workpiece relative to each other are the sources of errors in the laser cutting process. Limiting the acceleration of the moving masses carrying the laser cutting head can increase cutting accuracy by reducing body vibrations, but this measure minimizes the production speed. This study analyzes vibrations in a laser cutting machine under extreme operating conditions representing high cutting speeds. For this purpose, a very economical vibration measurement device has been developed, although its measurement sensitivity and data collection speed are high. With the help of this device, vibrations occurring in the machine body and workpieces of different thicknesses were detected. The results show that as the workpiece thickness decreases, the effect of machine body vibrations on the workpiece tends to increase significantly, which can cause cutting defects.

**Keywords:** Acceleration, vibration, laser, sheet, cutting

ToCite: KAYA, D., MERT, D., KAHRAMAN, A., REİS, M. (2024). LAZER KESİM MAKİNELERİNDE İŞ PARÇASI KALINLIĞININ TİTREŞİM KAYNAKLI ÜRETİM HATALARINA ETKİSİ: DENEYSEL BİR İNCELEME. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(2), 470-480.

## GİRİŞ

Lazer kesim makineleri, metal işleme, plastik işleme ve diğer endüstriyel uygulamalarda hızlı, kesin ve verimli kesim süreçleri oluşturmak için yaygın olarak kullanılır. Lazer kesim makineleri, gelişen lazer teknolojisi sayesinde daha yüksek kesim kalitesi ve iş verimliliği sunmaktadır. Teknolojik gelişmeler sayesinde bu makinelerin kapasiteleri ve kesim doğruluğu sürekli artmaktadır. Yüksek üretim hızı için lazer kesim işleminde makinelerden ani yön değiştirmeler, yüksek hızlı ve ivmeli hareketler yapması beklenir. Bu durum makine yapısında ve kesilen iş parçasında titreşimlere neden olmakta ve bu titreşimler lazer kesim kalitesini önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Bu titreşimler hareketli kütlelere etkiyen kuvvetler veya sistemin mekanik tasarımından kaynaklanan dolaylı etkilerle oluşan salınımlar tarafından tetiklenebilir (Troncossi vd., 2008). Titreşimler, lazer kesim makineleri ve üretim robotlarının hassas pozisyonlama ve ölçüm görevlerini yapmasını zorlaştırabilir ve doğruluk ile tekrarlanabilirlik performansını bozabilir. Bu hataları önlemek için, makinelerin stabil olması ve titreşimleri sönmüleyecek tedbirlerle donatılmış olması gerekir. Ayrıca, titreşim filtreleme ve pozisyon kontrol tekniklerinin uygulanması da titreşimleri azaltmada faydalı olabilmektedir (Hace vd., 1999; Ghany vd., 2006). Robotik sistemlerin yapısal dinamiği aynı zamanda kendi hareketi nedeniyle uyarıldığı için oluşan konum hataları ve titreşimleri önlemek için birçok kontrol yöntemi geliştirilmiştir (Berninger vd, 2020). Bir lazer kesme makinesine klasik modal analiz tekniklerini uygulamış ve çalışmada çıkış verileri ile kesim sonuçlarını doğrudan etkileyen titreşim modlarını sunulmuştur (Schedlinski & Lüscher, 2002). Hashemzadeh vd., (2012), düşük güçlü CO<sub>2</sub> lazerle PMMA kesimi sırasında iş parçası titreşiminin etkisini incelemiştir. Çalışmada iş parçasının titreşiminin kesme hızını artırırken ısı tesiri altındaki bölgenin (ITAB) boyutunu artırdığını gösterilmiştir. Tonoli vd., (2011), mikro-mekanik lazer merkezinin çalışma hücrelerinde kullanılan aktif izolasyon ve titreşim sönmüleme cihazını ele almış ve aktif elektromanyetik aktüatörler kullanarak titreşim sönmülemesi gerçekleştirmiştir.

Titreşim lazer kesim işleminde her zaman istenmeyen bir durum olmayabilir. Zira, literatürde Hashemzadeh vd., (2012) iş parçası olarak polimetil metakrilatın (PMMA) kasıtlı olarak düşük frekansta titreştirilirken CO<sub>2</sub> lazerle kesilmesi sonucunda kesim kalitesine olumlu etkisi araştırılmıştır. Bahsedilen çalışmada iş parçaları CO<sub>2</sub> lazeri kullanılarak kesilirken lazer kesime paralel yönde düşük frekansta titreştirilmiş ve iş parçası titreşimi kullanımının kesme işlemini iyileştirdiği gösterilmiştir. Ancak iş parçası titreşimi kullanıldığında ısı tesiri altındaki bölgenin (ITAB) kapsamı artmıştır. Isı tesiri altındaki bölgede artış olması malzemenin kristal yapısında değişikliklere neden olabilir ve bu durum malzemenin mukavemetine, sertliğine veya diğer mekanik özellikleri üzerinde etkiler bırakabilir.

Sonlu elemanlar analizi yazılımı ANSYS ile lazer kesim makinesindeki sönümsüz serbest titreşimini modal analiz teknikleri ile incelenmiştir (Zhang vd., 2014). Denkena vd., (2015), frezeleme işlemine alternatif olarak lazer kesimi kullanmayı amaçlayan bir makine konsepti ve kontrol stratejisi sunmuştur. Çalışmada yüksek yörünge hızı ve yörünge doğruluğunun elde edilmesi için iki yeni kontrol stratejisi uygulanmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Lazer kesim işleminde kesim yapılacak malzemenin üzerine yerleştirilen çیتالardaki şekil bozuklukları da malzemenin tam olarak oturmamasına ve kesim esnasında titreşimlere neden olabilmektedir (Struckmeier vd., 2020). Düz yataklı lazer kesme makinelerinin programlarını otomatik olarak oluştururken ham malzemenin destek uçlarının konumunu belirlemenin önemini vurgulamış ve yeni bir ölçüm yöntemi tanıtmışlardır. Bu ölçüm yönteminin farklı çevresel değişikliklere karşı dayanıklı olduğu ve  $\pm 0.8$  mm'lik bir doğrulukla çalıştığı bulunmuştur.

Lazer kesme işlemi sırasında oluşan malzeme kaybı ve kesme aralığının genişliğini (kerf genişliği) tahmin etmek özellikle ince malzemelerin hassas lazer kesim işlemlerinde önemlidir ve titreşim kerf genişliğini etkileyebilmektedir. (Kusuma & Huang, 2023), üç farklı makine öğrenmesi modellerini kullanarak tarayıcı kafaya sahip bir sistemde atımlı lazerle düz bir hattaki kesim işlemi sonucu oluşturulan ortalama kerf genişliğini titreşim sinyallerini girdi olarak kullanıp tahmin edecek bir model oluşturmuştur. Farklı lazer parametreleriyle yapılan kesimler esnasında iş parçası üzerinden üç eksen de titreşim verileri toplanmıştır. Makine öğrenmesi aracılığıyla titreşim ve kerf genişliği arasında bir korelasyon elde edilmiştir. Kusuma ve Huang, (2023), atımlı lazer kesim makinesinden ölçülen titreşim sinyallerini kullanarak, düz bir yarığın kesit genişliğini Derin Sinir Ağları (DSA) tahmin modelleri ile öngörülmesini araştırmışlardır. Çalışmada zaman bazında titreşim sinyallerinin istatistiksel özellikleri ve dalgalet dönüşüm sinyallerinden elde edilen özellikler olmak üzere iki farklı giriş verisi işlenmiştir. DSA'nın çıkışı, iş parçasının ortalama kesit genişliğini tahmin etmek için kullanılmıştır. Giriş verileri ile kesit genişliği arasındaki ilişki, çeşitli istatistiksel analizlerle incelenmiştir. Girdu ve Gheorghe, (2023), Hardox çeliğinin lazer kesim işleminde kesilen yüzeylerin entropisi ve sertliği arasındaki ilişkiyi bulmak için yaptığı araştırmada kesim işlemi esnasında oluşan titreşimlerin sonucunda malzemenin iç yapısındaki bileşenlerin yer değiştirdiğini ve bu durumun malzemenin ısıdan

etkilenen bölgesinde sertlik düşüşüne neden olduğunu ileri sürmüştür. Venkata Rao vd., (2024) yaptıkları araştırmada 6 mm kalınlığındaki sac metalin lazer kesim işleminde farklı parametrelerle yaptıkları kesim işlemi esnasında malzeme üzerinden titreşim verilerini toplamışlardır. Bu titreşim verilerini kullanarak lazer kesim işleminin kalitesini belirleyen yüzey pürüzlülüğü, kerf genişliği ve malzeme giderme miktarını tahmin edecek bir korelasyon elde ederek matematiksel model oluşturmuşlardır. Çalışmada lazer gücü ve kesim hızının bu çıktılar üzerinde önemli etkiye sahip olduğu gözlenmiştir. Daha yüksek lazer gücünde bile kesme hızı arttığında sac metaldeki titreşimin yatay eksenlerde (x ve y yönlerinde) daha yüksek genliklere ulaştığı gözlemlenmiştir.

Lazerli üretimin haricindeki klasik üretim yöntemlerinde de makine gövdesi titreşimleri ele alınmıştır. (Vieira vd., 2012) bilgisayar destekli analizler ve prototip üretimler gerçekleştirilerek kompozit yapıda üretilen hareketli makine parçaları sayesinde titreşimleri minimize etmeye yönelik çalışmalar gerçekleştirmiştir (Çelenk, 2018). (Chen, 2016), üç boyutlu CNC lazer kesim makinesinin titreşimlerini sonlu eleman analizi yazılım platformunu kullanarak incelemiştir. Bu çalışmada, üç boyutlu CNC lazer kesim makinesinin ana hareketli parçalarının anlık modal analizi ve dinamik temas analizi için modal süperpozisyon teorileri kullanılmıştır. Mohd Ghazali ve Rahiman, (2021), makine izleme ve teşhis için güncel titreşim analizini sistemli bir şekilde gözden geçirmişlerdir. Bu çalışma, veri toplama özellik çıkarma ve yapay zeka kullanarak arıza tanıma tekniklerini içermektedir. Gelecekte, zaman etki alanı istatistiksel özelliklerinin ve derin öğrenme yaklaşımlarının birleştirilmesi beklenmektedir, böylece arıza özellikleri ham titreşim sinyallerinden otomatik olarak çıkarılabileceği ön görülmektedir.

Bu çalışmanın ilk bölümünde, makine ve sac parçanın titreşimlerini ölçmek üzere tasarlanan titreşim ölçüm cihazı tanıtılmaktadır. Cihaz endüstriyel bir veri toplama cihazının hızına yakın bir veri toplama hızına ve 12 bit gibi görece yüksek ölçüm hassasiyetine sahip olmasına karşın oldukça düşük maliyetlidir. İkinci bölümde, lazer kesim makinesinin üç eksendeki ani hareketlerinin neden olacağı muhtemel titreşimleri temsil eden test senaryoları tanıtılmakta ve son bölümde ise test sonuçları sunulmaktadır. Son bölümde, sonuçların değerlendirilmesi ile farklı sac kalınlıklarının kesiminde kaliteyi etkileyen parametreler ve üretim hatalarını minimize etmek için alınabilecek önlemler tartışılmıştır.

## MATERYAL VE METOD

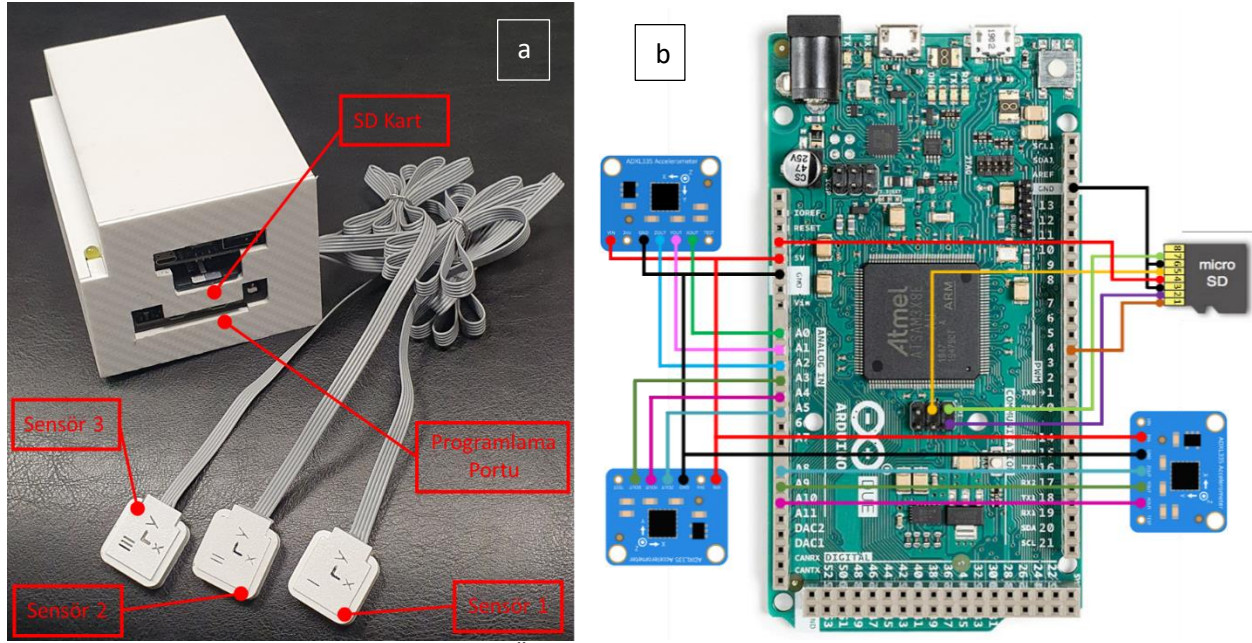
### *Titreşim Ölçüm Cihazının Tasarımı*

Lazer kesim makinesine entegre edilecek titreşim ölçüm sisteminin yüksek hızda ve hassas ivme ölçümü yapabilmesi, aynı zamanda ekonomik olması çalışmada isneilen özellikler olarak öne çıkmaktadır. Bu nedenle, çalışmada istenilen özellikleri taşıyan Arduino Due kontrol kartı kullanılmıştır. Arduino Due, 32-bit ARM Cortex-M3 tabanlı bir mikrodenetleyici olan AT91SAM3X8E'yi kullanır, 12-bit analog girişlere sahiptir ve 3.3V işletim gerilimi kullanır (Analog Devices, 2010). İşlem hızı gerektiren projeler için sıklıkla kullanılmaktadır. Yüksek hızlı analog ADXL serisi ivme sensörleri arasında yapılan ön testler sonucunda, ADXL335 serisi analog ivme sensörlerinin Arduino Due'nun yüksek hızına daha uygun olduğu ve daha düşük parazit değerleri ile ölçüm yapmanın mümkün olduğu görülmüştür. ADXL335, analog bir ivme sensördür ve ölçüm hızı, kullanılan mikrodenetleyici veya veri toplama cihazının örnekleme hızına bağlıdır. Yapılan çalışmada Arduino'nun ADC'si yaklaşık 10.000 örnekleme/saniye hızında çalışmaktadır. Ancak bu örnekleme hızı, ADC çözünürlüğüne, işlemci yüküne, karta bağlanan senör sayısına ve diğer işlemlere bağlı olarak değişebilmektedir.

Şekil 1.a titreşim ölçüm cihazının fotoğrafını ve Şekil 1.b devre şemasını göstermektedir. Bu sistem, üç adet ADXL335 analog titreşim sensörü kullanarak lazer kesim makinesinin üç farklı noktasından üç farklı eksende ivme ölçümü yapabilecek şekilde tasarlanmıştır. Kontrol kartı programlanırken “delay()” fonksiyonu aracılığıyla üç sensörden eş zamanlı gelen toplam veri sayısı saniyede 10.000 veri olacak şekilde sınırlandırılmıştır. Arduino'nun güç modülü sayesinde, ölçüm cihazı kablosuz olarak lazer kesim makinesinin her noktasına yerleştirilebilmektedir. En yüksek hızda veri toplamak için, ivme sensöründen gelen ham dijital sinyaller SD karta kaydedilir ve bu veriler daha sonra MATLAB ortamında ivme sinyaline dönüştürülür. Bu yaklaşım, işlemciyi matematiksel matris işlemleri ile yavaşlatmadan mümkün olan en yüksek hızda veri toplama olanağı sağlar. SD kartta “.csv” uzantılı bir dosyada zamanın milisaniye cinsinden kaydedildiği, ardışık sütunlarda ise sırasıyla x, y ve z eksenlerindeki ivmeyi temsil eden dijital sayı değerleri bulunmaktadır. Bu ham veriler, MATLAB programı kullanılarak ivme verilerine dönüştürülür ve sonuçlar bölümünde sunulan grafikler elde edilir.

## Test Metodu

Lazer kesim makinelerinde ayarlama yapılırken, oluşabilecek titreşimler dikkate alarak hassas bir şekilde ayarlanma yapılmalıdır. Optik lazer sistemi için emniyetli ivme ve ivme türevi değerleri optik sistem üreticisi tarafından belirlenir. Bu nedenle optik lazer sistemi lazer kesim makinesine göre daha yüksek ivme ve ivme türevi değerleri ile çalışabilir. Ancak lazer kesim makinesinin eksen hareketlerinin dinamik sınırları belirlenirken, güvenli ve hassas kesim kabiliyetini artırmak için maksimum çalışma ivmesi değerleri sınırlandırılır. Bu nedenle, lazer kesim makinesinin titreşim açısından genel durumunun ortaya konulması, optik lazer kesim sistemin tam performansla kullanılabilmesi için oldukça önemlidir.



Şekil 1. a. Titreşim Ölçüm Cihazı b. Devre Bağlantı Şeması

Bu çalışma kapsamındaki testler Durmazlar Makine'ye ait HD-F 3015 V 2D lazer kesim makinesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Cihazın toplam kütlesi 11.000 kg'dır ve 36 adet klipsli çelik dübel (M16) üzerine oturtularak 18 adet gövde ayar civatasıyla zemine sabitlenmiştir. Makinenin sabitlendiği beton derinliği 300 mm ve beton çevresi titreşimleri daha iyi sönmemesi için asfaltla doldurulmuştur. Makinede lazer kesim kafası olarak, Precitec ProCutter 2.0 lazer kesim kafası kullanılmıştır. Lazer kesim kafasının sac üzerindeki hareketlerini kontrol eden eksenler, z ekseninin yaklaşma ve uzaklaşma hareketlerini, y eksenini boyunca yapılan hareketleri kesim parçası üzerinde sağ ve sol yönde yatay hareketleri ve x eksenini üzerindeki hareketleri kesim parçası üzerinde ileri ve geri yönde yatay hareketleri temsil eder (Şekil 2.a). Lazer kesim makinelerinde, lazer kesim başlığının x, y ve z eksenlerindeki ani hareketleri makine gövdesinde titreşimlere neden olabilir. Bu titreşimler, hızdaki ani yön değişikliklerinin yanı sıra, kütle miktarına ve gövdenin yerine bağlantı şartlarına bağlı olarak da ortaya çıkabilmektedir. Lazer kesim işleminde, makine titreşimlerini minimize etmek ve hareketli parçaları dinamik yüklerden korumak için maksimum ivme ve ivme türevi değerleri belirlenir ve lazer kesim kafası bu kritik ivme değerini aşmayacak şekilde programlanır. Maksimum ivme değerleri, kullanılan ekipmanın türüne ve üreticiye bağlı olarak değişebilir. Genel olarak, bu değerler, lazer kesim makinesinin güvenli ve etkili bir şekilde çalışmasını sağlamak için dikkatle belirlenmelidir. Lazer kesim makinelerinde kullanılan maksimum çalışma ivmeleri, farklı eksenlerde değişiklik gösterebilir. Genel olarak karşılaşılan ivme değerleri aşağıdaki gibidir:

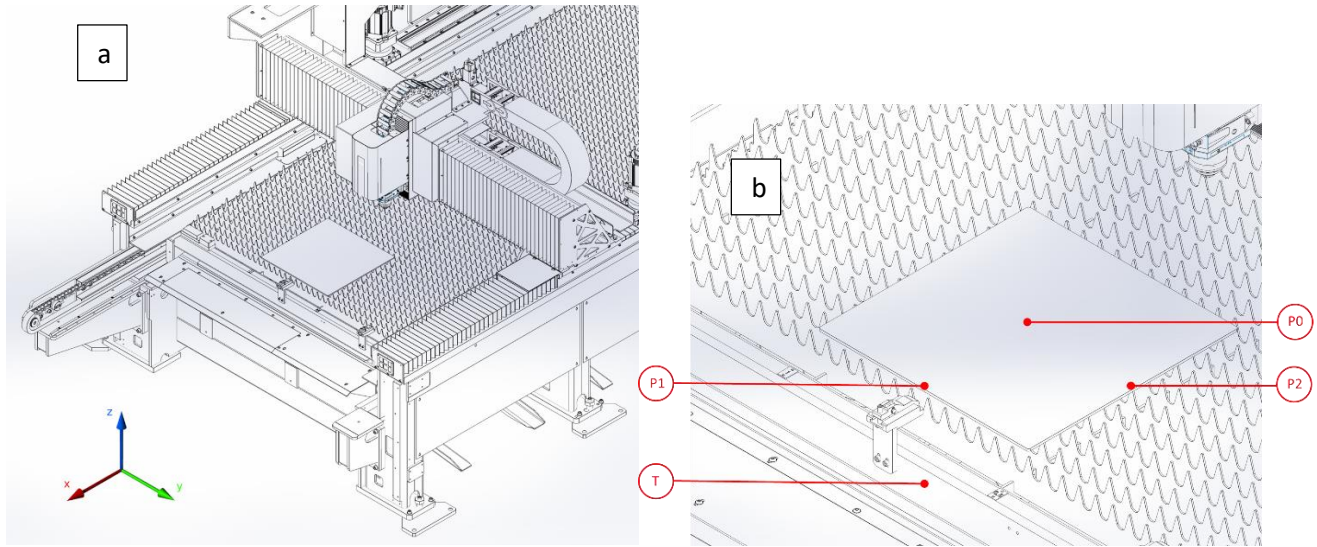
- x eksenini üzerindeki maksimum çalışma ivmesi, genellikle 0.5 g ile 2.0 g arasında değişmektedir.
- y eksenini üzerindeki maksimum çalışma ivmesi, genellikle 0.5 g ile 2.0 g arasında değişmektedir.
- z eksenini üzerindeki maksimum çalışma ivmesi, genellikle daha düşük bir değere sahiptir ve yaklaşık 0.2 g ile 0.5 g arasında değişmektedir.

Kesim işlemi sırasında lazer kesim kafası yatayda x ve y eksenleriyle hareket ettirilir. Bu eksenlerdeki daha yüksek ivmeli hareketler kesim hızını arttıracaktır. Lazer kesim kafasının düşeydeki iş malzemesine yaklaşma ve uzaklaşma

hareketi z eksenine gerçekleştirilir. Kesim performansında bir etkisi olmadığı için daha düşük ivmeler bu ekseninde yeterli olmaktadır.

Bu ivme değerleri, lazer kesim makinelerinin performansını belirler ve kesim işleminin hızını, hassasiyetini ve kalitesini etkiler. Her makinenin tasarımı ve teknik özellikleri farklı olduğundan, her makine için özel olarak hangi ivmeye ihtiyaç duyulduğunu belirlemek önemlidir.

Bu bilgilere dayanarak, titreşim ölçümleri için aşağıdaki çalışma senaryosu oluşturulmuştur: Lazer kesim makinesi, sırasıyla x, y ve z eksenlerinde (Şekil 2'de gösterildiği gibi), Tablo 1'de belirtilen maksimum ivme değerleri ile 100 mm'lik bir strok içerisinde 30 saniyede toplam 30 adet salınım hareketi yapacak şekilde tasarlanmıştır. Aynı zamanda, makinenin tablasına ve köprüsüne yerleştirilen ivme sensörleri ile ölçüm yapılır. Bu maksimum ivme değerleri, salınım hareketinin dönüş anlarında hızın yavaşlatılması ve hızlandırılması anlarını ifade eder. Toplam süresi 210 saniye olan bir test senaryosu oluşturulmuştur. Bu senaryoya göre, cihaz 0-30, 60-90, 120-150 ve 180-210 saniye aralıklarında boşta bekler. 30-60 saniye aralığında x ekseninde, 90-120 saniye aralığında y ekseninde, 150-180 saniye aralığında ise z ekseninde maksimum hızda salınım hareketi yapar. Bu test senaryosu ile lazer kesim makinesinin ekstrem çalışma koşullarını simüle etmek ve bu çalışma şartlarında oluşan maksimum ivme değerlerini ölçmek amaçlanmaktadır. Bu test yöntemi makinenin performansını değerlendirmek ve tasarımını optimize etmek için önemli veriler sunar.



Şekil 2. a. Lazer Kesim Makinesinde Lazer Kesim Kafasının Hareket Eksenleri (x ve y : Yatay Eksenler, z : Düşey Eksen), b. İş Parçası Titreşim Ölçüm Noktaları, (T, P0, P1, P2).

Tablo 1. Lazer Kesim Makinesi Test Senaryosu

Zaman (saniye)	Durum	x	y	z
0-30	Hareket yok	-	-	-
30-60	x'de salınım (485 kg)	$\pm 2g$	-	-
60-90	Hareket yok	-	-	-
90-120	y'de salınım (120 kg)	-	$\pm 2g$	-
120-150	Hareket yok	-	-	-
150-180	z'de salınım (20 kg)	-	-	$\pm 2g$
180-210	Hareket yok	-	-	-

## SONUÇLAR

Şekil 3, farklı kalınlıklardaki (1-3-4 mm) iş parçalarının Şekil 2.b'de gösterilen T ve P0 noktalarının x, y ve z eksenlerindeki normalize ivme genliklerinin (gRMS) değerlerinin zamana göre değişimini göstermektedir.

Normalize ivme (gRMS) ivmenin belirli bir aralıktaki hesaplanan ortalama genlik değerinin yer çekimi ivmesine bölünmesiyle elde edilir (Wijker, 2009). Titreşimin hasar verme etkisini gösteren kullanışlı bir büyüklüktür.

Matematiksel olarak ifade edilirse, gRMS ivme değeri Eş. 1'deki formülle hesaplanır:

$$gRMS = \frac{1}{g} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i^2} \quad (1)$$

Burada, N örnekleme sayısını,  $a_i$  her bir ivme ölçümünü ve Eş. 2 ise tüm ölçümlerin karelerinin toplamını ifade etmektedir.

$$\sum_{i=1}^N a_i^2 \quad (2)$$

Bu çalışmada her bir eksen için gRMS değeri ayrı ayrı hesaplanmış ve ortalama genlik değerinin hesabında zaman adımı 100 milisaniye olarak seçilmiştir. Şekilde dikey eksen gRMS değerlerini, yatay eksen ise zamanı göstermektedir. Noktalı mavi çizgiler x ekseninde, kesik-noktalı kırmızı çizgiler y ekseninde, sürekli sarı çizgiler ise z ekseninde oluşan gRMS değerlerini göstermektedir. 30-60 saniye aralığında lazer kesim kafası x ekseninde, 90-120 saniye aralığında y ekseninde ve 150-180 saniye aralığında z ekseninde salınım hareketi yapmaktadır.

Şekil 3 incelendiğinde lazer kesim makinesi tablası ile görece kalın sacların neredeyse aynı şekilde titreşim davranışı sergilediği görülmektedir. Lazer kesim kafasının x eksenindeki yüksek ivmeli salınımları yine tablanın, 4 mm ve 3 mm kalınlıktaki sacların orta noktalarında ve sadece x ekseninde belirgin bir titreşimin olduğu görülmektedir. Bu lazer kesim kafası ile birlikte başlığı z ve y eksenlerinde süren motorların ve tüm taşıyıcı sistemin birlikte hareket etmesinde dolayı salınım esnasında atalet kuvvetlerinin görece büyük oluşundan kaynaklanmaktadır.

Şekil 3'te lazer kesim kafasının tüm eksenlerdeki ekstrem salınımlarına karşı taşıyıcı tablanın ve iş parçasının y ekseninde belirgin bir titreşim oluşturmadığı yani y eksenindeki titreşim seviyelerinin oldukça düşük olduğu görülmektedir. Buna karşın 1 mm kalınlıktaki görece ince iş parçalarında x ve z eksenlerinde belirgin titreşimler oluşmaktadır. Bu titreşimler beklenildiği gibi lazer kesim kafasının x eksenindeki salınımlarında maksimum değerleri aldığı görülmektedir. Bunu hareketli kütle ile doğru orantılı olarak sırasıyla y ve z eksenleri izlemektedir. Buradan yola çıkarak hareketli kütlenin gövde ve iş parçası üzerindeki titreşimlerden ne oranda sorumlu olduğu anlaşılmaktadır. 1mm'lik görece en ince iş parçasında z eksenindeki titreşimlerin baskın hale geldiği şekilden anlaşılmaktadır.

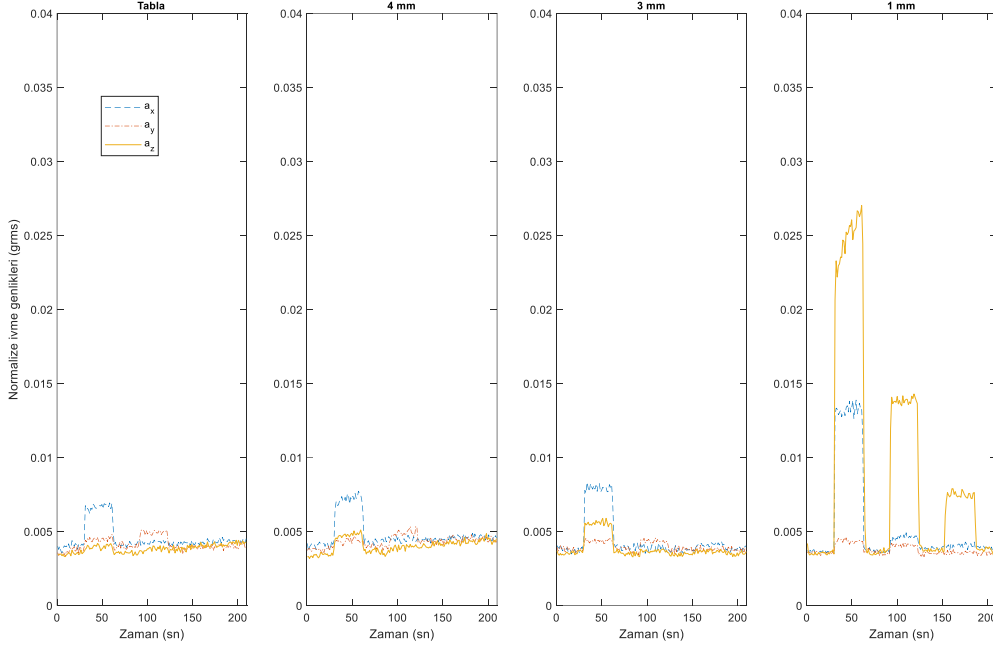
Belirli bir kalınlığın altındaki saclarda titreşimin daha belirgin olduğu ve iş parçası titreşimlerinin iş parçasını taşıyan tablanın titreşimlerinden Şekil 3'te belirgin bir şekilde ayrıştığı görülmektedir. Bunun başlıca nedeni, ince sacların daha esnek, çarpık ve hafif olması nedeniyle tabla tırnaklarına tam oturmaması olabilir. Görece ince sacların daha elastik yapısı, sacın düşük frekanslarda ancak yüksek genlikte titreşim davranışı göstermesine neden olmaktadır. Şekil 3'te görüldüğü üzere ince saclarda yüksek esnekliğin neden olduğu dalgalanma hareketi z ekseninde önemli ölçüde bir titreşime neden olmaktadır. Bu da lazer kesim işlemi esnasında muhtemel kesim hatalarına ve nihai üründe kusurlara yol açabilir. İş parçasının dalgalı ve düzensiz kesim kenarları, kesilen yüzeyin pürüzlü olması bu kusurlardan bazılarıdır.

İnce saclarda gözlenen görece yüksek titreşimler bu durumun daha detaylı olarak analiz edilmesini gerekli kılmıştır. Bu amaçla ince saclarda üç farklı noktadan eş zamanlı titreşim sinyalleri toplanarak Şekil 4'te verilen sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6, farklı kalınlıklardaki (0,6 mm, 1 mm ve 1,5 mm) iş parçalarının Şekil 2.b'de gösterilen noktalarının (P0), ön orta (P1) ve yan orta (P2) noktalarının x, y ve z eksenlerindeki normalize ivme genliklerinin (gRMS) değerlerinin zamana göre değişimini göstermektedir.

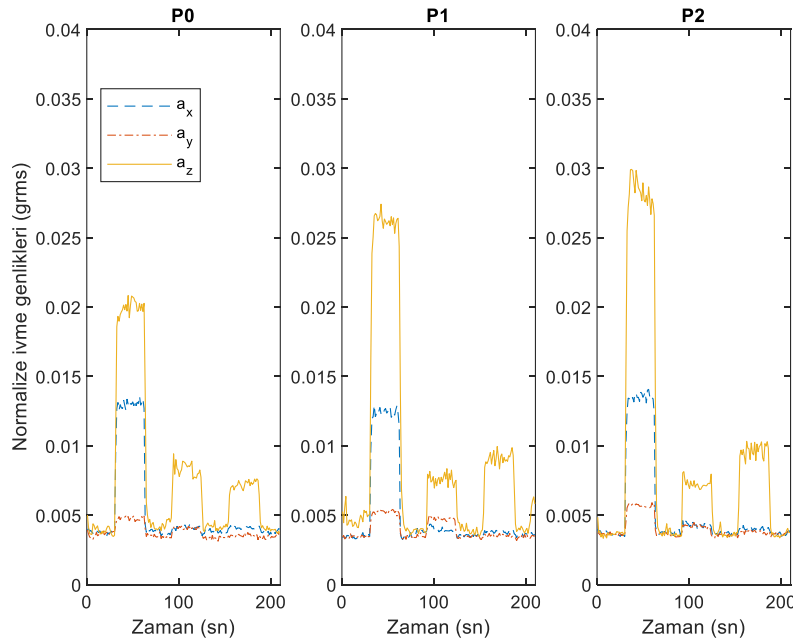
Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6'da görece ince sacların farklı noktalarından alınan normalize ivme değerlerini gösteren grafikler incelendiğinde, sacın bazen kenar kısımlarındaki titreşimlerin orta bölgeye göre arttığı bazen bunun tam tersinin meydana geldiği görülmektedir. Bu durum ince sacın tabla üzerinde mükemmel bir düz yüzey olarak durmayışından kaynaklanmaktadır. Periyodik hareketlerde z eksenindeki dikey titreşimlerin arttığı noktalar sacın

düz olmamasından dolayı tabla tırnaklarına tam temas etmeyen noktalardır. Sacın düzgünsüzlüğüne bağlı olarak bu noktalar bazen sacın kenarında, bazen de sacın ortasında olabilmektedir. Bu etkinin de katkısıyla ince saclarda baskın titreşimlerin açık bir şekilde z ekseninde meydana geldiği görülmektedir.

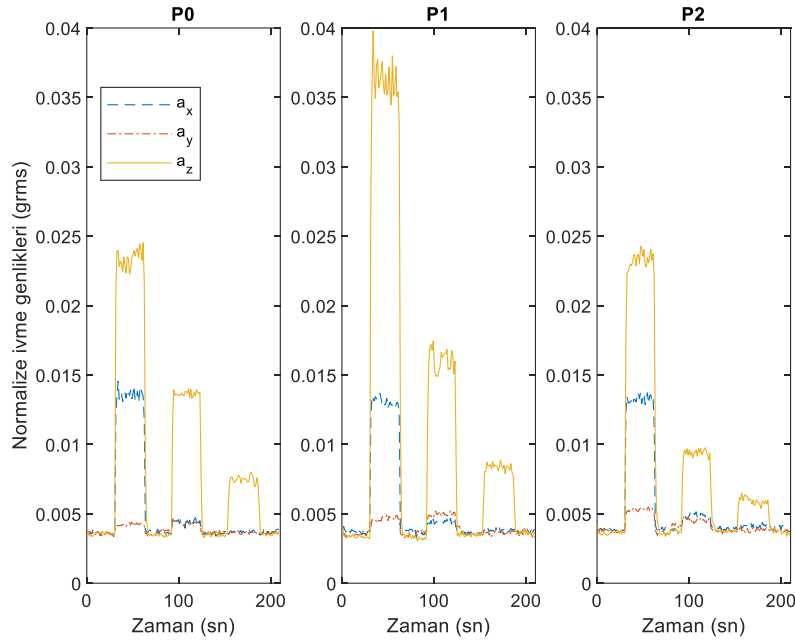
Sonuç olarak tablanın yer çekimi kuvvetinin etkisi ile zemine oturduğu, bunun sonucunda da dikey eksenin salınım hareketlerinden en az etkilendiği, ancak tablanın ray üzerinde x eksenine paralel olarak gidip gelebilme yeteneğine sahip olmasının etkisi ile kesici kafa salınımların en çok x ekseninde titreşime sebep olduğu görülmüştür. Yatay y eksenini yataklarının görece daha sabit bir yapıda ve raylar üzerinde sabitlenmiş biçimde olmasının etkisiyle y eksenindeki titreşimlerin, salınımlardan x eksenine göre daha az etkilendiği görülmüştür.



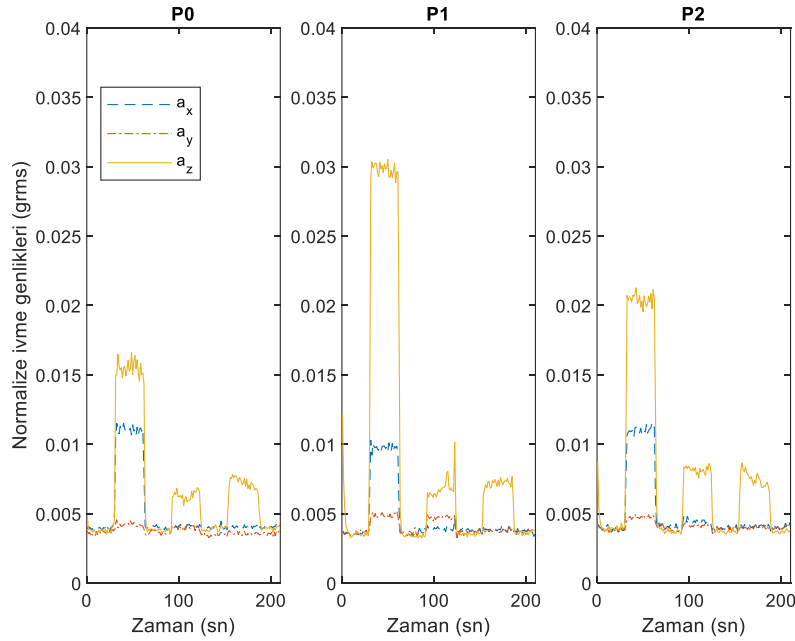
**Şekil 3.** Sac Yerleşim Tablasının (T) ve 1000 x 1000 mm Boyutlarındaki ve 4 mm, 3 mm, ve 1 mm Kalınlığındaki İş Parçalarının Orta Noktalarının (P0) x, y ve z Eksenlerindeki Normalize İvme Genliklerinin (gRMS) Değerlerinin Zamana Göre Değişimi.



**Şekil 4.** 0,6 mm Kalınlığındaki İş Parçasının Farklı Noktalarının (P0, P1, P2) x, y ve z Eksenlerindeki Normalize İvme Genliklerinin (gRMS) Değerlerinin Zamana Göre Değişimi



Şekil 5. 1 mm Kalınlığındaki İş Parçasının Farklı Noktalarının (P0, P1, P2) x, y ve z Eksenlerindeki Normalize İvme Genliklerinin (gRMS) Değerlerinin Zamana Göre Değişimi



Şekil 6. 1,5 mm Kalınlığındaki İş Parçasının Farklı Noktalarının (P0, P1, P2) x, y ve z Eksenlerindeki Normalize İvme Genliklerinin (gRMS) Değerlerinin Zamana Göre Değişimi

## TARTIŞMA

Talaşlı imalat makinelerindeki titreşimleri ölçmenin ve etkilerini anlamının, üretim kalitesi ve verimliliğe etkisi literatürdeki birçok çalışmada gösterilmiştir. Bu durum lazer kesim makinelerinde de geçerlidir ve gövde titreşimlerinin belli sınırlarda kaldığını bilmek veya bunu sağlamak kesim kalitesini artırırken, makine ömrünü de uzatmaktadır. Ancak lazer kesim makinelerinde titreşime neden olan etkenler talaşlı imalata göre çok daha azdır. Çünkü torna ve frezede tezgahlarında dönme hareketi yapan kütleler ve bu kütlelerin balansından dolayı ortaya çıkması muhtemel titreşim kaynakları bulunmaktadır. Buna karşılık servo motorlarla tahrik edilerek doğrusal hareketler yapan lazer kesim makinelerinin titreşimleri daha düşük seviyededir. Dahası iş parçası ile lazer kesim kafası arasında temas olmadığından talaş kaldırma işlemindeki titreşimler de lazer kesiminde söz konusu değildir. Lazer teknolojisindeki yenilikler çok küçük parçaların hassas bir şekilde kesimini mümkün kılmaktadır ve pek çok



alanda iş parçaları lazer kesim sonrası ek bir işlem gerektirmeden nihai formuna getirilebilmektedir. Bu nedenle günümüzde lazer kesim makinelerinden beklenen kesim hassasiyeti giderek artmakta ve çok düşük seviyelerde olsa dahi kesici kafanın hareketi neticesinde oluşan gövde ve iş parçası titreşimleri önem arz etmektedir.

Bu çalışmada, lazer kesim makinelerinde kesici kafanın aşırı salınım hareketlerinin neden olduğu gövde titreşimlerinin, farklı kalınlıktaki iş parçalarına etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Titreşimler, kesim kalitesini etkilemenin yanı sıra makine bileşenlerinin ömrünü de kısaltabilmektedir. Titreşim zaman içerisinde makinenin bozulması, kesim kalitesinin düşmesi ve lens odaklarında kaçıklık oluşmasına sebep olabilmektedir. Özellikle mikro imalatta ince sacların kesiminde lazer kesim makinelerinin hassasiyeti önemli olmaktadır. Bu makinelerle üretilen ürünler, sağlık, savunma sanayii gibi boyut hassasiyetinin önemli olduğu alanlarda kullanılırken kesim kalitesi büyük önem taşır. Bu çalışma ile sac kalınlığına bağlı olarak makinenin çalışma eksenlerinde oluşan iş parçası titreşimlerinin belirlenmesi ve buradan yola çıkarak hangi eksenle önlemler alınması gerektiğini tespit etmeyi amaçlanmıştır. Literatürde lazer kesim makinelerinin çalışma esnasında iş parçasında oluşan titreşimleri ele alan bir çalışma bulunmamaktadır. Çalışmada lazer kesim makinesine kolayca entegre olabilen, üretim maliyetlerini minimum seviyede olacak şekilde bir titreşim ölçüm cihazı geliştirilmiştir. Bu cihaz yardımıyla ve belirlenen uç çalışma şartlarında kesim kalitesi için belirleyici olan noktalardan titreşim dataları toplanmıştır.

Deneyler hareketli kütlelerin atalet etkisinin titreşimin en belirleyici sebebi olduğunu göstermektedir. Lazer kesim makinesinde en yüksek titreşimler lazer kesim kafası x ekseninde salınım yaptığına ortaya çıkmaktadır. Zira x ekseninde hareket eden kütle y ve z eksenlerindeki hareketi sağlayan ray ve motorların yanında kesici kafa dahil olmak üzere tüm hareketli kütleleri ihtiva etmektedir. En fazla titreşimin meydana geldiği x yönünde hareket eden ve tüm hareketli kütleleri taşıyan köprü üzerinde topoloji optimizasyonu yapılabilir. Bunun dışında y ve z eksenlerinin daha az kütle içermesinden dolayı salınım hareketinin titreşime etkisi görece düşük kalmaktadır. Bu sonuçlara bakıldığında lazer kafasının bu eksenlerde daha yüksek ivmelerle çalıştırılabileceği anlamı taşımaktadır. Ancak pek çok makine üreticisi her üç eksenle de aynı limit ivme değerlerini kullanmaktadır.

Deneyler kesici kafa hareketinin salınımindan dolayı oluşan titreşimlerin ince saclarda belirgin olduğunu göstermiştir. Makine gövdesinden tablaya aktarılan düşük genlikli ancak çok yüksek frekanslı titreşimler, tabladan çok daha esnek olan saca aktarılırken daha düşük frekanslı ancak yüksek genlikli titreşimlere dönüşmektedir. Görece ince sacların daha elastik yapısı, sacın düşük frekanslarda ancak yüksek genlikte titreşim davranışı göstermesine neden olur. Bu da lazer kesim işlemi esnasında muhtemel kesim hatalarına ve nihai üründe kusurlara yol açabilir. Bu kusurlar boyutsal olarak ve kesim kenarlarından anlaşılabilir. Buna karşın kalın saclar makine gövdesi ve taşıyıcı tabla ile neredeyse aynı titreşim davranışını sergilemektedir. İnce sacların şekil bozuklukları ve yüzey düzgünlükleri sebebiyle tabla tırnaklarına tam temas etmemeleri, kenara yakın noktalarda yukarı kalkma ve kıvrılma gibi etkenler nedeniyle dikey yönde esnekliğe sahip olmaları, gövde titreşimlerinden daha çok etkilenmelerine neden olmaktadır. Hatta kesim esnasında lazer kafasından parçaya gelen koruyucu gaz akışı da iş parçasında dikey yönde titreşime ve yer değiştirmeye sebep olabilmektedir. Bu durum gelecekteki çalışmalarda detaylı olarak ele alınmalıdır.

Lazer kesim makinelerinde dikey eksen üzerinde "Clearance Control" adı verilen kesici kafa ile iş parçası arasındaki mesafe kontrolünü sağlayan, iş parçasının yüzey düzgünlüklerinde kafanın saca çarpmasını önleyen ve odak uzaklığını otomatik olarak ayarlanan mesafe değerinde tutan bir teknoloji mevcuttur. Burada kesim kalitesini etkileyen önemli risklerden biri de, iş parçasının dikey titreşim hızının, konum hatalarını kesim esnasında otomatik olarak düzelten 'Clearance Control' hızından yüksek olması kesim kalitesini olumsuz yönde etkileyen en önemli faktördür. Bu durum lazer demetinin odak ayarının bozulmasına ve kesim kalitesinin düşmesine neden olabilir. Sonuçlar kesici kafanın tüm eksenlerdeki salınım hareketlerinden en az etkilenen eksenin y eksenini olduğunu göstermektedir. Bu sacı taşıyan tablanın x ekseninde hareket serbestliğinin olması, buna karşın y ekseninde hareket serbestliğinin olmayışı nedeniyle tablanın bu eksenle daha rijit bir yatak yapısına sahip oluşu ile açıklanabilir. Buradan tüm eksenleri tahrik eden ağırlıkları taşıyan x eksenini ile ilgili hem tabla hem de sac için iyileştirme çalışmaları yapılması gerektiği görülmektedir.

Gelecekte kesim kalitesini artırmak için yapılabilecek tedbirler arasında, makinenin ve iş parçasının titreşimini azaltacak aktif titreşim sönümleyici ayaklar kullanılması gibi mekanik iyileştirmeler bulunmaktadır. Ayrıca, kesim kafasının titreşimleri ölçülerek ani hareketlerde kesim kafasının yörüngeden sapması belirlenebilir. Titreşimlerin özellikle ince saclarda daha fazla meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu nedenle, lazer kesim sırasında ince saclarda odak kayması etkisinin ve boyutsal düzgünlüklerin derecesinin belirleneceği deneyler yapılabilir. Ayrıca, farklı

titreşim seviyelerinde oluşan kesim yüzeyleri mikroskop altında incelenerek çalışma alanı genişletilebilir. Farklı kalınlıktaki iş parçalarında rezonans riski de gelecekte detaylı olarak ele alınması gereken araştırma konularıdır. Bu amaçla titreşim kaynaklarının ve iş parçası numunelerinin doğal frekanslarını belirlemek için spektral analizler de yapılabilir.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma Durmazlar Makina San. ve Tic. A.Ş. ve TÜBİTAK BİDEB tarafından, TÜBİTAK 2244 Sanayi Doktora Programı kapsamında desteklenmiştir (Proje No: 119C115). Teşekkürlerimizi sunarız.

## KAYNAKLAR

- Analog Devices, (2010). Small, Low Power, 3-Axis  $\pm 3g$  Accelerometer (ADXL335) Data Sheet <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adxl335.pdf> 25.10.2023
- Berninger, T. F. C., Slimak, T., Weber, T., & Rixen, D. J. (2020). An external stabilization unit for high-precision applications of robot manipulators. İçinde *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems* (ss. 4276-4282). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/IROS45743.2020.9341454>
- Chen, Y.-X. (2016). Modal Analysis of Three Dimensional Numerical Control Laser Cutting Machine Based on Finite Element Method. *Proceedings of the 3rd International Conference on Material Engineering and Application*. <https://doi.org/10.2991/icmea-16.2016.40>
- Çelenk, O. (2018). Kompozit-Alüminyum Hibrit Yapının Lazer Kesim Tezgâhı Y-Eksenine Uygulanması, *Yüksek Lisans Tezi*, Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa 127s.
- Denkena, B., Eckl, M., & Lepper, T. (2015). Advanced control strategies for active vibration suppression in laser cutting machines. *International Journal of Automation Technology*, 9(4), 425-435. <https://doi.org/10.20965/ijat.2015.p0425>
- Ghany, K. A., Rafea, H. A., & Newishy, M. (2006). Using a Nd:YAG laser and six axes robot to cut zinc-coated steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28(11-12), 1111-1117. <https://doi.org/10.1007/s00170-004-2468-x>
- Girdu, C. C., & Gheorghe, C. (2023). Study of the Relationship between Entropy and Hardness in Laser Cutting of Hardox Steel. *Materials*, 16(13). <https://doi.org/10.3390/ma16134540>
- Hace, A., Jezernik, K., & Terbuc, M. (1999). VSS motion control for a laser-cutting machine. *Control Engineering Practice*, 9(1), 66-67. [https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(00\)00089-7](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(00)00089-7)
- Hashemzadeh, M., Voisey, K. T., & Kazerooni, M. (2012). The effects of low-frequency workpiece vibration on low-power CO 2 laser cutting of PMMA: An experimental investigation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 63(1-4), 33-40. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3881-6>
- Kusuma, A. I., & Huang, Y. M. (2023). Product quality prediction in pulsed laser cutting of silicon steel sheet using vibration signals and deep neural network. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 34(4), 1683-1699. <https://doi.org/10.1007/s10845-021-01881-1>
- Mohd Ghazali, M. H., & Rahiman, W. (2021). Vibration Analysis for Machine Monitoring and Diagnosis: A Systematic Review. *Shock and Vibration*. Hindawi Limited. <https://doi.org/10.1155/2021/9469318>
- Schedlinski, C., & Lüscher, M. (2002). *Application of Classical and Output-Only Modal Analysis to a Laser Cutting Machine*. Proc.
- Struckmeier, F., Zhao, J., & León, F. P. (2020). Measuring the supporting slats of laser cutting machines using laser triangulation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 108(11-12), 3819-3833. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05640-z>
- Tonoli, A., Bonfitto, A., Silvagni, M., D., L., & Zenerino, E. (2011). Active Isolation and Damping of Vibrations for High Precision Laser Cutting Machine. İçinde *Vibration Analysis and Control - New Trends and Developments*. InTech. <https://doi.org/10.5772/25092>

Troncossi, M., Troiani, E., & Rivola, A. (2008). Design Optimization Of A Laser Cutting Machine By Elastodynamic Modeling, *Proceedings of the 9th Biennial ASME Conference on Engineering Systems Design and Analysis*.

Venkata Rao, K., Suvarna Raju, L., Suresh, G., Ranganayakulu, J., & Krishna, J. (2024). Modelling of kerf width and surface roughness using vibration signals in laser beam machining of stainless steel using design of experiments. *Optics and Laser Technology*, 169. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.110146>

Vieira, D. G. P., Meireles, J. F., Nunes, J. P., & Da Silva, L. F. M. (2012). Substituting conventional steel alloys by carbon fibre composites in structural parts of an existing laser cutting equipment. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* (C. 43, ss. 468-478). <https://doi.org/10.1002/mawe.201200983>

Wijker, Jaap J. (2009). *Random Vibrations in Spacecraft Structures Design: Theory and Applications*, Springer Dordrecht.

Zhang, Q. P., Wang, Z. R., & Wang, Y. F. (2014). Dynamic analysis and experimental research of laser cutting machines. İçinde *Advanced Materials Research* (C. 915-916, ss. 31-34). Trans Tech Publications. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.915-916.31>