



## Kiriş Titreşimleri İçin Vibroport Cihazı ve LabVIEW Altında Çalışan Ölçüm Ünitesi Kullanımının İncelenmesi

Ferid KÖSTEKÇİ<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup>Hitit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Çorum, Türkiye

### Makale Bilgileri

#### Makale geçmişi:

Alındı 30 Eylül 2022

Kabul edildi 31 Ekim 2022

#### Anahtar kelimeler:

Mekanik titreşimler  
Çubuk titreşimleri  
Serbest titreşimler  
Doğal frekans  
İvmeölçer  
Mod şekli  
Vibroport 80

### Özet

Bir yapıyı, makınayı veya mekanik sistemi meydana getiren tipik elemanlardan biri de elastik kirişlerdir. Çalışma koşulları altında kirişlerde enine titreşimler meydana gelebilir. Bunun sonucunda ortaya çıkabilecek sakinlerden kaçınmak için endüstriyel amaçla tasarım şekillendirilirken titreşimle ilgili karakteristikler de dikkate alınmaktadır. Bu nedenle doğal frekans, mod sönüm oranı ve mod şekli olmak üzere elemanın serbest titreşim karakteristiklerinin bilinmesi gerekir. Bu çalışmada, iki ucu serbest düşey ve yatay duran alüminyum kiriş için ivmeölçer kullanılarak titreşim ölçüm uygulamaları yapılmıştır. İvmeölçer ile ölçüm yapmak için Vibroport 80 portatif titreşim ölçüm cihazı ve LabVIEW altında çalışan Ölçüm Ünitesi olmak üzere iki farklı enstrüman kullanılmıştır. Ölçüm Ünitesi, gerekli aletlerden ve aletlerin LabVIEW altında çalışmasını sağlamak üzere hazırlanmış bilgisayar programından oluşmaktadır. Çalışmanın amacı, cihaz ve Ölçüm Ünitesi'nin kiriş enine titreşimlerinin ölçümünde kullanımı bakımından araştırma yapmaktır. Portatif ve kompakt yapısı nedeniyle Vibroport 80 cihazı endüstriyel ortamlarda kullanım açısından pratiklik sağlamaktadır. Cihazda bulunan hazır program modülleri ivme frekans cevabını göstermektedir. Sonuçlar frekans bazında kaydedilebilmektedir. Teorik ve ölçüm değerlerine dayalı sonuçlar arasında, sınır şartlarının gerçekleştirilmesinden kaynaklı olabilecek farkların en az olması için her iki ucunda da serbest sınır koşulu bulunan dikdörtgen kesitli alüminyum kiriş kullanılmıştır. Serbest sınır koşullarının gerçeğe en yakın olmasını sağlamak amacıyla askı bağlantısı esnek elemanla gerçekleştirilmiştir. Darbe çekici ile kirişe vurmak suretiyle impuls kuvvet girdisi tatbik edilmiştir. Uygulanan tahrik kuvveti kirişin elastik denge halini bozmaktadır. Uygulama sırasında malzemesi farklı üç adet uç kullanılmıştır. Bundan amaç impuls girdinin tahrik süresini dolayısıyla girdi frekans değerini değiştirmektir. Bu durum daha büyük doğal frekans değerlerinin deneysel olarak elde edilmesine olanak sağlamaktadır. İmpuls kuvvetin ve kiriş ivme değerlerinin zamana bağlı değişimine ait veri kümesi Ölçüm Ünitesi ile TDMS formatında dosyalara kaydedilebilmektedir. Bu işlem LabVIEW ortamında hazırlanan bilgisayar programları ile gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar ile elde edilen doğal frekans değerlerinin, teorik hesaplar sonucu bulunan değerler ile yaklaşık olarak aynı çıktığı görülmüştür.

## Examination of the Use of Vibroport Device and Measurement Unit Operating Under LabVIEW for Beam Vibration

Ferid KÖSTEKÇİ<sup>a,\*</sup> 

<sup>a</sup> Hitit University, Engineering Faculty, Mechanical Engineering Department, Çorum, Türkiye

---

### Article Info

#### Article history:

Received 30 September 2022

Accepted 31 October 2022

#### Keywords:

Mechanical vibrations

Beam vibrations

Free vibrations

Natural frequency

Accelerometer

Mode shape

Vibroport 80

---

### Abstract

Elastic beams are one of the typical elements that make up a structure, machine or mechanical system. Transverse vibrations can occur in beams under operating conditions. In order to avoid the inconveniences that may arise as a result of this, vibration-related characteristics are also taken into account while shaping the design for industrial purposes. For this reason, the free vibration characteristics of the element, such as natural frequency, mode damping ratio, and mode shape, must be known. In this study, vibration measurement applications have been made using accelerometers for an aluminum beam that is free vertical and horizontal at both ends. Two different instruments, the Vibroport 80 portable vibration measuring device and the Measurement Unit operating under LabVIEW, were used to measure with the accelerometer. The Measurement Unit consists of the necessary instruments and a computer program designed to enable the instruments to work under LabVIEW. The aim of the study is to investigate the use of the device and the Measurement Unit in the measurement of beam transverse vibrations. Due to its portable and compact structure, the Vibroport 80 device provides practicality in terms of use in industrial environments. Ready-made program modules in the device show the acceleration frequency response. Results can be recorded on a frequency basis. A rectangular aluminum beam with free boundary conditions at both ends was used in order to minimize the differences between the theoretical and measurement results based on the realization of boundary conditions. In order to ensure that the free boundary conditions are closest to reality, the suspension connection is made with a flexible element. Impulse force input is applied by hitting the beam with impact hammer. The applied driving force disrupts the elastic equilibrium state of the beam. During the application, three tips of different materials were used. The purpose of this is to change the excitation time of the impulse input, hence the input frequency value. This is to allow larger natural frequency values to be obtained experimentally. The data set of the time dependent variation of the impulse force and beam acceleration values can be saved to files in TDMS format with the Measurement Unit. This process was carried out with computer programs prepared in the LabVIEW environment. It has been observed that the natural frequency values obtained by experimental studies are approximately the same as the values found as a result of theoretical calculations.

---

\* Sorumlu yazar E-posta adresi: feridkostekci@hitit.edu.tr

## 1. Giriş

Bir yapıyı, makinayı veya mekanik sistemi meydana getiren tipik elemanlardan biri de elastik kirişlerdir. Çalışma koşulları altında kirişlerde enine titreşimler meydana gelebilir. Bunun sonucunda ortaya çıkabilecek sakıncalardan kaçınmak için, endüstriyel amaçla tasarım şekillendirilirken titreşimle ilgili karakteristikler de dikkate alınır. Bu nedenle doğal frekans, mod sönüm oranı ve mod şekli olmak üzere elemanın serbest titreşim karakteristiklerinin bilinmesi gerekir.

Bir çubuğun tabii (doğal) frekansı, mod şekli ve sönüm oranı, bu nesnenin titreşim karakteristikleri olarak adlandırılmaktadır [1].

İmpuls girdi ile uyarma tekniği malzemenin elastik özelliklerini tespit etmek için bir test yöntemidir. İmpuls uyarı testinde ivmeölçer için en uygun konumun tespitine çalışılmaktadır [2]. İmpuls uyarı testi aynı zamanda dinamik mekanik test olarak da bilinmektedir. Dikdörtgen kesitli çelik kirişin enine titreşimleri için yapılmış bir çalışmada FFT analizi ile ilk dört doğal frekans çeşitli sensör konumları için elde edilmektedir. İvmeölçer için en uygun konum tespiti amacıyla bir yöntem oluşturabilmek gayesiyle doğal frekansların genlikleri en büyük değere bölünerek normalizasyon gerçekleştirilmiştir. Böylece sayısal olarak grafikler çizilmiştir. Bu grafiklerden 300 mm boyundaki kiriş için orta noktasından impuls tahrik uygulandığından en iyi sonuç veren konumun orta noktanın 100 mm sağı olduğu tespit edilmiştir.

Dikdörtgen kesitli bir ucu serbest bir ucu ankastre kirişin dinamik elastisite modülünü elde etmek için sönümlü serbest titreşim testi kullanılmaktadır [3]. 2024-T3 alüminyumun kirişe uygun bir başlık takılı darbe çekici ile impuls girdi uygulanmaktadır. Azalan genlik zamanın fonksiyonu olarak kaydedilmiştir. Frekans Cevap Fonksiyonu ile doğal titreşimin frekans değerleri bulunmaktadır. Ankastre kiriş ve ivmeölçerin kütesinden meydana gelen sistem kiriş uç noktasının deplasmanına göre tek serbestlik dereceli yay-kütle-amortisör sistemine indirgenmiştir. Dinamik elastisite modülü formülünde deneysel olarak ulaşılan doğal frekans değerleri kullanılarak kompleks elastisite modülünün bileşenleri bulunmaktadır.

Bir yapının yapısal durumu, dinamik karakteristik değerlerinde meydana gelen değişim bakımından durum izleme tekniği ile sürekli takip altında tutulabilir. Doğal frekans, sönüm ve mod şekli yapının doğal karakteristik değerleri olarak bilinmektedir [4]. Çelik, pirinç, bakır ve alüminyum malzemedan yapılmış ve serbest-serbest sınır şartları altındaki kirişler (10 mm x 10 mm x 1100 mm) darbe çekici ile tahrik edilmektedir. Titreşim analiz cihazının OROS programı ile deneysel verilere dayanan Frekans Cevap Fonksiyonları elde edilmektedir. Frekans Cevap Fonksiyonları modal analiz programı olan Smart Office'de kullanılmak suretiyle çelik, pirinç, bakır ve alüminyum kiriş için ilk altı doğal titreşim frekansı bulunmaktadır. Teorik frekans değerleri ile deneylere dayalı frekans değerleri arasında fark olduğu görülmektedir.

Çalışmada tipik eleman olan kirişe darbe çekici ile impuls tahrik kuvveti girdisi uygulanmaktadır. İvmeölçer ile ivme verileri elde edilmektedir. Veri toplama amacıyla LabVIEW altında çalışan NI-DAQ 9178 veri toplama ünitesi ve NI 9234 modülü kullanılmıştır. İlk iki mod şeklinin FFT analizörü kullanılmadan elde edilmiş olması çalışmanın bilime katkısı olarak sunulmaktadır [5]. Alüminyum ankastre kiriş boyu (3 mm x 21 mm x 351 mm) eşit on dört parça olacak şekilde işaretlenmiştir. Darbe çekicinin vurulduğu çizgi her defasında değiştirilmektedir bu esnada ivmeölçerin yeri kirişin uç noktasında sabit tutulmaktadır. İvme verilerine eğri düzleştirme tekniği uygulanmak suretiyle ilk iki mod şekli elde edilmiştir. Sonra aynı çalışmada her defasında aynı noktadan tahrik uygulanıp bu kez ivmeölçerin yeri değiştirilmektedir. LabVIEW'de kaydedilen ivmeölçer verileri Matlab'da işlenmiştir. İvme verilerine eğri düzleştirme tekniği uygulanmak suretiyle ilk iki mod şekli elde edildiğinde aynı mod şekline ulaşıldığı tespit edilmiştir.

İvmeölçer kütesinin (27 gram), ince çelik kirişlerin (25.3 mm x 3.4 mm x 610.3 mm, 39.4 mm x 5.7 mm x 452 mm) doğal frekans değerlerine etkisi incelenmektedir [6]. Deneysel olarak gerçekleştirilmesinin kolay olması sebebiyle yatay kiriş için serbest-serbest sınır koşulları oluşturulmuştur. İvmeölçer ve FFT Analizörü kullanılmak suretiyle elde edilen doğal titreşim frekans değerlerinin analitik işlemler sonucu

bulunmuş değerlerden daha küçük çıktığı tespit edilmiştir. Aradaki farkın sınır koşulları, malzeme özellikleri, ivmeölçer kütlesi ve ivmeölçerin konumu kaynaklı olabileceği belirtilmektedir. İvmeölçerin konumunun analitik olarak hesaplanan doğal frekans değerleri üzerindeki etkisi mesafelerin oranı olarak incelenmektedir. İlk üç doğal frekans değerinin, ivmeölçerin kirişin sol ucuna uzaklığının kiriş boyuna oranı şeklinde bir parametreye duyarlı olduğu grafiksel olarak gösterilmiştir. İvmeölçerin, kirişin düğüm noktasına yerleştirilmesi halinde kütlenin doğal frekans değerindeki etkisinin azaldığı belirtilmiştir. ANSYS ile yapılan sonlu elemanlar hesabına göre ivmeölçer kütlesi dahil edilmediğinde doğal frekans değeri daha yüksek çıkmaktadır.

İvmeölçer ile ölçüm yapmak için Vibroport 80 portatif titreşim ölçüm ve analiz cihazı kullanılabilir [7]. Vibroport 80 ve Vibrotest 80 cihazları Bruel Kjaer Vibro firmasının ürünü olup portatif ve kompakt yapıları nedeniyle bu cihazlar endüstriyel ortamlarda kullanım açısından pratiklik sağlamaktadır. Bruel Kjaer Vibro firmasının Vibroport 60 analizör cihazı yirmi dört saat usulüne göre çalışan plantlerde elektrik motoru ve karıştırıcı gibi büyük ebatlı ekipman ve makinaların rulman frekanslarını düzenli olarak izleme ve analiz gayesiyle kullanılabilir [7]. Cihaz limit değerlerle karşılaştırmak suretiyle arıza ihtimali ortaya çıkmış makina ve ekipmanlar için rulman değişim uyarısı vermektedir. Vibrotest 80 analizörü eksenden kaçıklık imal edilmiş kovan içindeki dönen milin sebep olduğu titreşim ivme verilerinin ölçümünde kullanılmıştır [8].

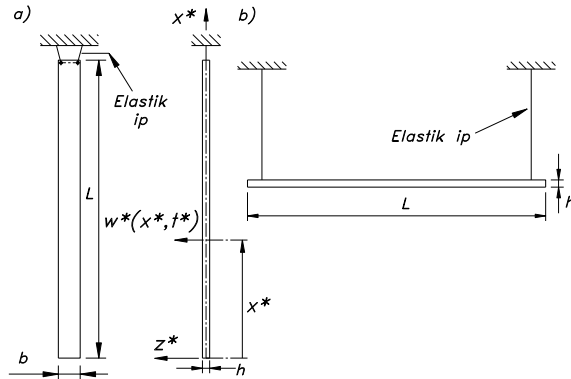
Bu çalışmada, ivmeölçer kullanılarak düşey ve yatay duran iki ucu serbest alüminyum kiriş için titreşim ölçüm uygulamaları yapılmaktadır. İvmeölçer ile ölçüm yapmak için Vibroport 80 portatif titreşim ölçüm cihazı ve LabVIEW altında çalışan Ölçüm Ünitesi olmak üzere iki farklı enstrüman kullanılmaktadır. Ölçüm Ünitesi, gerekli modüllerden ve modüllerin LabVIEW altında çalışmasını sağlamak üzere hazırlanmış bilgisayar programından oluşmaktadır. Çalışmanın amacı, cihaz ve Ölçüm Ünitesi'nin kiriş enine titreşimlerinin ölçümünde kullanımı bakımından araştırma yapmaktır.

## 2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada, teorik ve deneysel çalışmalar için dikdörtgen kesitli alüminyum kiriş kullanılmıştır. Elastik nesne olan kirişte çalışma koşulları altında enine titreşimler (eğilme titreşimleri) meydana gelebilir. Bilindiği üzere bu tip nesnelere için yaygın parametrelili (sürekli) matematik model [9] kullanılmaktadır. Sürekli yapı modelleri için Euler-Bernoulli Kiriş Teorisi (Basit Kiriş Teorisi) [10, 11] veya Timoshenko Kiriş Teorisi kullanılmaktadır.

### 2.1. Problem Formülasyonu

Şekil 1'de şematik görünüşü verilen sistemde, serbest-serbest sınır koşulları oluşacak şekilde kiriş (sürekli ortam) düşey ve yatay asılmıştır.



Şekil 1. Serbest-serbest sınır koşulları oluşacak şekilde düşey (a) ve yatay (b) asılmış kiriş

Aşağıdaki şekil ve bağıntılarda (\*) işareti boyutlu (birimli) büyüklükleri göstermektedir. Bu minvalde boyutlu zaman  $t^*$  sembolü ile gösterilmiştir. Sürekli ortamın herhangi bir dik kesitinin, eğilme (enine) titreşimine karşılık gelen deplasmanı  $w^*(x^*, t^*)$  ve Kartezyen Eksen Takımı'nda alt uca (Şekil 1 a) göre aksenal doğrultudaki koordinatı ise  $x^*$  ile gösterilmektedir.  $z^*$  ise şekle göre yatay koordinatı göstermektedir.  $L$ , boyutlu olmak üzere kiriş uzunluğu (sürekli ortam boyu) olmaktadır. Sürekli ortam, iki ucu serbest Euler-Bernoulli kirişi olarak ele alınmıştır. Bu sabit kesitli kirişin kütle yoğunluğunun  $\rho$ , dik kesit alanının  $A$ , elastisite modülünün sabit ve  $E$  olduğu ve dik kesit alanı atalet momentinin ise  $I$  olduğu varsayılmıştır.

Korunumlu bu sistemin hareket denklemini ve eş zamanlı olarak sınır şartlarını elde etmek için Hamilton Prensibi [9, 10] kullanılmıştır. Bu prensibe göre, (1)'de olduğu gibi Lagrangian'ın zaman üzerinden integralinin varyasyonu [12] sıfırdır.

$$\delta \int_{t_1^*}^{t_2^*} \mathcal{L} dt^* = 0 \quad (1)$$

burada  $\delta$  işareti varyasyonu ve  $\mathcal{L}$  ise Lagrangian'ı göstermekte olup  $\mathcal{L} = T - \Pi$  şeklinde sırasıyla kinetik ve potansiyel enerjinin farkıdır.

Kirişin diferansiyel uzunluktaki bir elemanın hareketi ele alınarak (2) ve (3)'de verilen kinetik ve elastik potansiyel enerji ifadeleri çıkarılmıştır. (3)'de verilen terim eğilme kaynaklı elastik potansiyel enerji bağıntısıdır.

$$T = \int_{x^*=x_0^*}^{x_1^*} (1/2)\rho A (\dot{w}^*)^2 dx^* \quad (2)$$

$$\Pi = \int_{x^*=x_0^*}^{x_1^*} (1/2)EI ((w^*)'')^2 dx^* \quad (3)$$

burada (·) zaman terimi olan  $t^*$ 'a göre ve (·)' mekan değişkeni olan  $x^*$ 'a göre türevleri göstermektedir. İki uç noktada,  $x_0^*$  ve  $x_1^*$  konum gösteren değişkenler sırasıyla 0 ve  $L$  değerini alacaklar.

(2) ve (3)'de verilen enerji terimlerini Lagrangian formülünde yerlerine koymak suretiyle Lagrangian bulunmuştur. Devamında Hamilton Prensibi'nin uygulaması olarak Lagrangian'ın varyasyonu alınmıştır. İşlemler yapıldıktan sonra enine hareket için boyutlu hareket denklemi olan (4) nolu denklem elde edilmiştir. (5)'de verilen boyutlu sınır koşulları da eş zamanlı olarak çıkarılmıştır.

$$\rho A \ddot{w}^* + EI (w^*)'''' = 0 \quad (4)$$

$$+EI (w^*)'' \Big|_{x^*=x_0^*} = 0; -EI (w^*)'' \Big|_{x^*=x_1^*} = 0; +EI (w^*)''' \Big|_{x^*=x_0^*} = 0; -EI (w^*)''' \Big|_{x^*=x_1^*} = 0 \quad (5)$$

Elde edilen hareket denklemi ve sınır şartlarının alan, yoğunluk ve elastisite modülü gibi parametrelere bağlı olduğu görülmektedir. Parametrelere bağımlılığı azaltıp işlemlere boyutsuz olarak devam etmek için (6)'da verilen kabulleri kullanıp boyutsuz hareket denklemi ve boyutsuz sınır şartları elde edilecektir.

Boyutsuzlaştırma [13, 14] işlemi ile geometrik yapı ve malzeme değerleri tanımlanan başka parametrelerin içine konmuş olmaktadır. Bu ise, denklemlerin görünümünde ve işlemlerde sadelik getirmektedir [15].

$$x_0 = x_0^*/L; x_1 = x_1^*/L; w = w^*/r; t = \gamma_t t^* \quad (6)$$

burada  $r$  kesit alanı atalet yarıçapını göstermektedir. İşlemlerden sonra (6)'da kullanılan  $\gamma_t$  teriminin karşılığı, (8)'de verilen serbest titreşimin boyutsuz hareket denklemi ile (9)'da verilen boyutsuz sınır şartları elde edilmiştir.

$$\gamma_t = (1/L^2)(EI/\rho A)^{1/2} \quad (7)$$

$$w^{iv}(x,t) + \ddot{w}(x,t) = 0 \quad (8)$$

$$+(EI r/L^2)w''\Big|_{x=0} = 0; -(EI r/L^2)w''\Big|_{x=1} = 0; +(EI r/L^3)w'''\Big|_{x=0} = 0; -(EI r/L^3)w'''\Big|_{x=1} = 0 \quad (9)$$

(8)'de verilen hareket denklemini Değişkenlerin Ayrılması Metodu [9] ile çözülecektir. Çözüm fonksiyonu zamana ve mekana bağlı fonksiyonların çarpımı şeklinde (10)'da verilmiştir.

(10)'da verilen Çözüm Fonksiyonu hareket denkleminde ve sınır şartlarında yerine yazılmıştır. İşlemler yapılırsa  $Y(x)$  ve  $T(t)$  fonksiyonları için (11a)'da verilen iki adet adi diferansiyel denklem ve (11b)'de verilen sınır şartları elde edilir [9].

$$w(x,t) = Y(x)T(t) \quad (10)$$

$$Y^{iv}(x) - \omega^2 Y(x) = 0 \text{ (a); } \ddot{T}(t) + \omega^2 T(t) = 0 \text{ (b)} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} +(EI r/L^2)Y''(x)\Big|_{x=0} = 0; -(EI r/L^2)Y''(x)\Big|_{x=1} = 0; \\ +(EI r/L^3)Y'''(x)\Big|_{x=0} = 0; -(EI r/L^3)Y'''(x)\Big|_{x=1} = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

İşlemleri kolaylaştırmak için (11a)'da  $\omega^2$  yerine  $\beta^4$  yazıldıktan sonra iki adi diferansiyel denklemin (13 a ve b)'de verilen çözümü elde edilmiştir.

$$Y(x) = c_1 \cos(\beta x) + c_2 \sin(\beta x) + c_3 \cosh(\beta x) + c_4 \sinh(\beta x) \text{ (a); } T(t) = A \sin(\omega t) + B \cos(\omega t) \text{ (b)} \quad (13)$$

$c_1, c_2, c_3$  ve  $c_4$  integrasyon sabitleridir. (12)'de verilen sınır şartlarından, doğal frekansların elde edileceği Karakteristik Denkleme [16] ulaşılmıştır. (14)'deki Karakteristik Denkleme  $\beta$ 'nin karesi boyutsuz doğal frekansa karşılık gelmektedir.

$$\cos(\beta) = 1/\cosh(\beta) \quad (14)$$

Tablo 1'de verilen Mathematica ortamında yazılan program Karakteristik denklemin 5 civarındaki  $\beta$  kökünü ve buna karşılık gelen  $\omega$  boyutsuz frekans değerini bulmak için kullanılmıştır.

Boyutsuz doğal frekans değerleri  $\gamma_t$  ile çarpılarak boyutlu dairesel doğal frekans değerleri elde edilmiştir. Tablo 2'de  $f_n$  ile Hz cinsinden dairesel doğal frekans değerleri göstermektedir. Tablo 2'de üçüncü moddan itibaren  $f_n$  [Hz] frekans değeri  $f_n = \pi^2 (n + (1/2))^2$  şeklinde formül [17] halinde ifade

edilebilir. Denklemde n mod numarasını göstermektedir.

**Tablo 1.** Karakteristik denklemde  $\beta$  köklerini ve  $\omega$  doğal frekanslarını bulmak için kullanılan Mathematica programı

```
Plot[{Cos[x], (+1/Cosh[x])}, {x, 0, 14.5}tip, PlotRange -> {-1.1, 1.1}]
{B1} = FindRoot[Cosh[x]*Cos[x] == +1, {x, 5}, WorkingPrecision ->
60];
B = B1[[2]];
Print["B=", Style[B, 16, Blue]];
W = B^2;
Print["W=", Style[W, 16, Blue]];
```

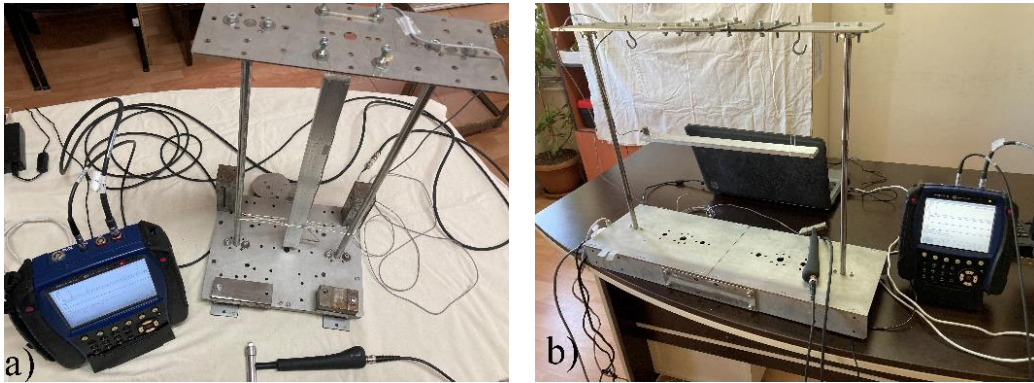
(7)'de formülü belirtilmiş olan  $\gamma_t$ 'nin değeri malzeme numarası 6013 kodlu alüminyum kiriş için 87.199996 çıkmaktadır. Bu malzemenin elastisite modülü ve yoğunluğu sırasıyla  $E = 71 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$  [18] ve  $\rho = 2753.65 \text{ kg/m}^3$  alınmıştır.

**Tablo 2.** Kiriş enine doğal titreşimin frekans değerleri

Mod n	Teorik			Deneysel										
				Düşey			Yatay (En zemine paralel)				Yatay (En zemine dik)			
	$\beta$	$\omega$	$f_n$ [Hz]	$f_n$ [Hz]			$f_n$ [Hz]				$f_n$ [Hz]			
			A	P	Y	A	% fark	P	Y	A	% fark	P	Y	
1	4.73004	22.373	310.503	302.3	302.5	302.5	302.3	2.64	302.3	302.3	303.04	2.40	303.0	303.0
2	7.85320	61.672	855.915	841.6	837.6	-	841.6	1.67	841.1	-	840.0	1.86	841.1	-
3	10.99560	120.903	1677.93	1654.2	1643.6	-	1654.2	1.41	Değer vok	-	1662.8	0.90	1662.6	-
4	14.13716	199.859	2773.71	2726.2	2709.8	-	2726.2	1.71	Değer vok	-	2751.0	0.82	Değer vok	-

### 3. Deneysel Çalışma, Yöntem ve Bulgular

Bu kısımda tek eksenli piezoelektrik tip ivmeölçer (Bruel & Kjaer 4533B) kullanılarak düşey ve yatay olarak asılı duran iki ucu serbest dikdörtgen kesitli alüminyum kiriş (30.2 mm x 10 mm x 410 mm) için ivme ölçüm uygulamaları yapılmıştır (Şekil 2 a ve b).



**Şekil 2.** Çalışma ünitesine düşey ve yatay olarak asılmış duran iki ucu serbest alüminyum kiriş

Kiriş Şekil 2 a'da düşey b'de ise yatay olarak asılmıştır. Kirişin 30.2 mm 'lik eni yere paralel (Şekil 2 b) ve yere dik olarak durmak üzere yatay askılama iki şekilde gerçekleştirilmiştir. 4533B ivmeölçerin

kütlesi 10.5 gram gelmektedir.

Teorik ve ölçüm değerlerine dayalı sonuçlar arasında, sınır şartlarının gerçekleştirilmesinden kaynaklı olabilecek farkların [4] en az olması için her iki ucunda da serbest sınır koşulu bulunan kiriş düzeneği (Şekil 2 a ve b) oluşturulmuştur. Misina kullanılan askı bağlantı serbest sınır şartlarının gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. İdeale yakın serbest sınır koşullarının oluşması için askı bağlantıda esnek askı eleman (esnek misina) kullanılması gerekmektedir. Askı elemanının esnek olması sayesinde kirişin doğal titreşim hareketleri askı noktalarında kesintiye uğramayacaktır. Esnek askı elemanı kullanmanın başka faydalı yönleri de bulunmaktadır. Deney ünitesi şasisine bağlantının mevcut olması nedeniyle şasi hareketlerinden kaynaklı olabilecek ve sonuçta kirişin de hareket etmesiyle neticelenebilecek bazı titreşimlerin kirişe ulaşmaması yönünde esnek askı elemanı bir izolasyon ve yutma kapasitesi sağlamaktadır. Böylece ivme değerlerini filtreleme ihtiyacı azalmış olmaktadır.

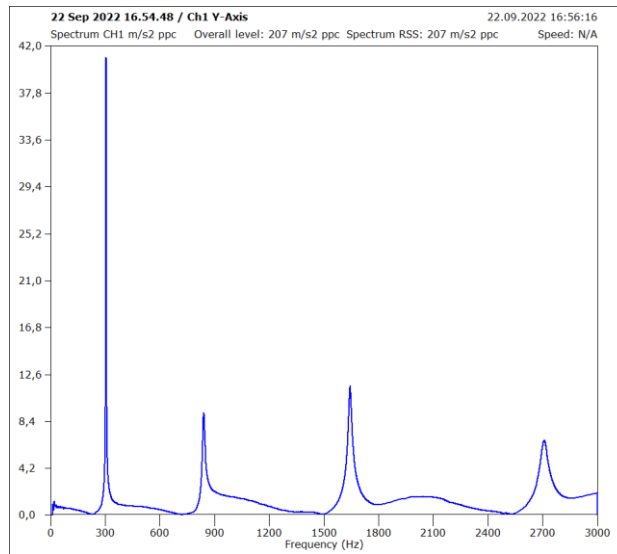
Darbe Çekici (Bruel & Kjaer 8206-002) ile vurmak suretiyle kirişe impuls kuvvet girdisi tatbik edilmiştir. Uygulanan tahrik kuvveti kirişin elastik denge halini bozmaktadır. Girdi uygulandıktan sonra kiriş serbest titreşim yapacak ve bir müddet sonra titreşim sönümlenecektir. Uygulama sırasında Darbe Çekici için vuruş başlığı olarak uç malzemesi farklı başlıklar kullanılmıştır. Alüminyum, plastik ve yumuşak uçlu olmak üzere her defasında farklı bir başlık çekice takılmıştır. Vuruş başlığı uç malzemesinin sertliğine göre impuls girdinin tahrik süresi dolayısıyla girdi frekans değeri değişmektedir. Bu durum daha büyük doğal frekans değerlerinin deneysel olarak elde edilmesine olanak sağlamaktadır.

Düşey olarak asılmış kirişte ivmeölçer kirişin en alt ucuna macun ile tutturulmuştur. Tahrik uygulaması ivmeölçer hizasından olmak üzere kirişin arka yüzünden yatay olarak yapılmıştır (Şekil 2 a).

Yatay olarak asılmış kirişin sol uç kısmına ivmeölçerin yerleşimi ve bağlantıda kalması macun ile sağlanmıştır (Şekil 2 b). Kirişin orta noktasından düşey tahrik uygulaması yapılmıştır.

İvmeölçer verileri FFT analizi yapabilen dört kanallı veri derleme ve analiz cihazı (Brüel & Kjaer Vibroport 80) ile alınmıştır. Portatif ve kompakt yapısı nedeniyle Vibroport 80 cihazı (Şekil 2 a ve b) endüstriyel ortamlarda kullanım açısından pratiklik sağlamaktadır. Cihazda bulunan FFT modülü kullanılırken cihaza filtreleme için alt değer olarak 10 Hz üst değer olarak 3000 Hz girilmiştir. Üst değer olarak 3000 Hz seçimine Tablo 2 yardımıyla karar verilmiştir.

Alüminyum uçlu başlık kullanılan Darbe Çekici ile impuls tahrik kuvveti uygulanmış düşey asılı kirişin doğal titreşim frekans grafiği Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3. Doğal titreşimin frekans değerleri: Alüminyum uçlu başlık ile

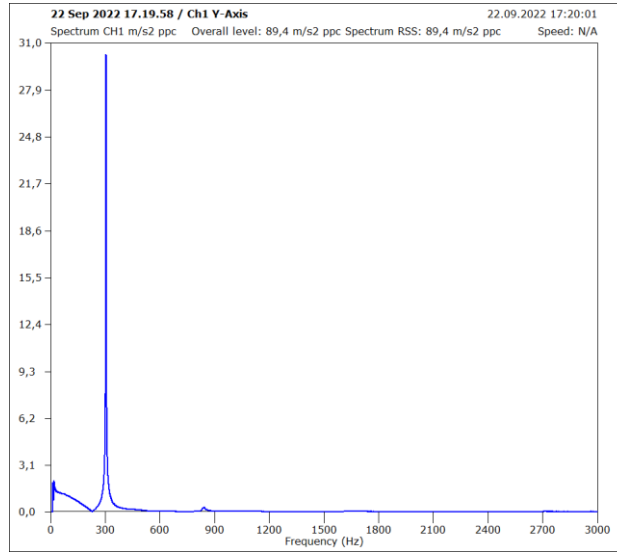
Deneysel çalışmalarda kirişin enine doğal titreşiminin frekans analizi için Vibroport 80 cihazı FFT modülü üzerinden çalıştırılmıştır. FFT modülü ivme seçeneği kısmı ile ivmeölçerden anlık olarak derlenen



verileri kullanmıştır. Düşey ve yatay kiriş için FFT modülü ile Hz cinsinden bulunan frekans değerleri Tablo 2'de gösterilmiştir. Tablo 2'de A, P ve Y sembolleri sırasıyla alüminyum, beyaz plastik ve yumuşak uçlu çekiç başlıklarını sembolize etmektedir. Vibroport 80 cihazının FFT modülü ile kirişin ilk dört doğal frekansı teorik değerlere yakın çıkmakla birlikte arada fark bulunmaktadır.

Kirişin 30.2 mm'lik eni yere paralel ve yere dik olarak durmak üzere yatay askılama iki şekilde gerçekleştirilmiştir. Düşey ve yatay kiriş için FFT modülü ile elde edilen frekans değerleri teorik değerlere göre incelendiğinde arada bulunan farkın kiriş eninin yere dik olması durumunda birinci moddan sonra azaldığı tespit edilmiştir.

Yumuşak uçlu başlıkla impuls tahrik kuvveti uygulanmış düşey asılı kirişin doğal titreşim frekans grafiği Şekil 4'de verilmiştir. Bu grafiklerden okunan değerler kirişin doğal titreşim frekansları olarak Tablo 2'dedir.



Şekil 4. Doğal titreşimin frekans değerleri: Yumuşak uçlu başlık ile

İmpuls kuvvetin ve kiriş ivme değerlerinin zamana bağlı değişimine ait veri kümesi Ölçüm Ünitesi (Şekil 5) ile TDMS formatında dosyalara kaydedilebilmektedir. Bu işlem LabVIEW ortamında hazırlanan bilgisayar programları ile gerçekleştirilmektedir. Veri toplama sisteminin çalıştırılmasında, örnekleme frekansı olarak 2049.180328 Hz kullanıldı. Örnekleme frekansı için 50000 Hz e kadar değerler seçilebilmektedir.

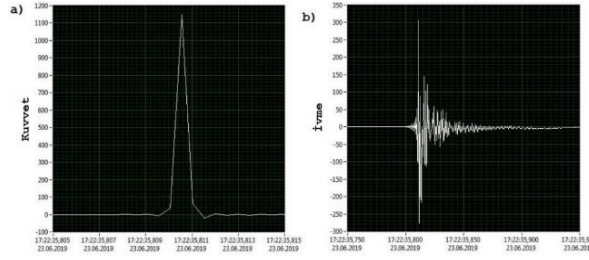


Şekil 5. Ölçüm ünitesi

Sert plastik uç takılı darbe çekici ile kirişe düşey doğrultuda impuls kuvvet girdisinin uygulandığı deney çalışması için darbe çekici kuvvet sensöründen ve ivmeölçerden elde edilen verilerin zamana göre ayrı ayrı değişimleri Şekil 6'da gösterilmiştir.

Bu şekillerde, kuvvet birimi N, ivme birimi  $m/s^2$  dir. Grafiklerde düşey eksenler ölçülen büyüklüklerin şiddetini yatay eksen ise tarih ve zamanı göstermektedir. Zaman gösteriminde saniyeden

sonra gelen ve virgülle ayrılmış kısım ms (milisaniye) dir.



Şekil 6: a) Darbe çekicinin uyguladığı impuls kuvvet b) Kütlein ivmesi

Darbe çekici ile impuls girdi olarak kirişe bir kuvvet uygulandığı Şekil 6-a'da görülmektedir. Böylece zamana göre impuls kuvvetin değişimi saptanmış olmaktadır. Bu kuvvetin etkisiyle kirişin ivmesinin değişimi Şekil 6-b'de verilmiştir.

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, iki ucu serbest düşey ve yatay duran alüminyum kiriş için ivmeölçer kullanılarak titreşim ölçüm uygulamaları yapılmaktadır. İvmeölçer ile ölçüm yapmak için Vibroport 80 portatif titreşim ölçüm cihazı ve LabVIEW altında çalışan Ölçüm Ünitesi olmak üzere iki farklı enstrüman kullanılmıştır. Ölçüm Ünitesi, gerekli aletlerden ve aletlerin LabVIEW altında çalışmasını sağlamak üzere hazırlanmış bilgisayar programından oluşmaktadır. Cihaz ve Ölçüm Ünitesi'nin kiriş enine titreşimlerinin ölçümünde kullanımı bakımından araştırma yapılmıştır. Çalışmalarda kiriş düşey ve yatay olarak esnek elemanla asılmıştır. Yatay askılama kiriş eni yere paralel ve yere dik olarak durmak üzere iki şekilde gerçekleştirilmiştir. Vibroport 80 cihazının FFT modülü ile kirişin ilk dört doğal frekansı teorik değerlere yakın çıkmakla birlikte arada fark bulunmaktadır. Düşey ve yatay kiriş için FFT modülü ile elde edilen frekans değerleri teorik değerlere göre incelendiğinde arada bulunan farkın kiriş eninin yere dik olması durumunda birinci moddan sonra azaldığı tespit edilmiştir.

#### Kaynaklar

- [1] A. Bayraktar ve T. Türker, "Deneysel modal analiz yöntemi ile düzlem çerçevelerin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi," *Deprem Sempozyumu Kocaeli 2005*, Bildirler Kitabı içinde s. 1035-1041. Trabzon, 23-25 Mart 2005: Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü.
- [2] A. R. Bahari, M. Z. Nuawi, A. A. M. Isa, M. M. Padzi, ve Z. I. Rizman, "Optimal contact sensor mounting position for İmpulsive excitation technique," *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, cilt. 5-2, s. 165-170, 2018, doi: 10.21833/ijaas.2018.02.024.
- [3] E. C. Botelho, A. N. Campos, E. de Barros, L. C. Pardini, ve M. C. Rezende, "Damping behavior of continuous fiber/metal composite materials by the free vibration method," *Composites Part B: Engineering*, cilt. 37-2-3, s. 255-263, 2005, doi: 10.1016/j.compositesb.2005.04.003.
- [4] D. R. Prasad ve D. R. Seshu, "A study on dynamic characteristics of structural materials using modal analysis," *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*, cilt. 9-2, s. 141-152, 2008.
- [5] C. A. Chandra ve P. K. Samal, "Experimental determination of mode shapes of beams by roving impact test," *Materials Today: Proceedings*, cilt. 46-19, s. 9159-9163, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.01.119.
- [6] M. S. Kotambkar, "Effect of mass attachment on natural frequency of free-free beam: Analytical, numerical and experimental investigation," *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies*, cilt. 3-4, s. 102-105, 2014.
- [7] T. Geramitchioski ve L. Trajcevski, "Vibration monitoring for fault detection and process control of the motor-mixer aggregate in feni industry-macedonia," *11th International Congress Machines, Technologies, Materials 2014*, Bildirler Kitabı içinde s. 50-54. Varna, Bulgaria, 17 - 20 Eylül 2014: Faculty of Technical Science – University St. Kliment Ohridski Bitola, Macedonia.
- [8] N. Alçelik ve M. Kam, "Dönen makinelerde aksenal kaçıklık ve dengesizliğin titreşim analizi," *BŞEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, cilt. 7-Özel Sayı, s. 256-269, 2020, doi: 10.35193/bseufbd. 669289.
- [9] M. Gürgöze, *Analitik metotlarla titreşimlerin etüdü*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, 1984.

- [10]A. H. Nayfeh ve P. F. Pai, *Linear and nonlinear structural mechanics*, 1 ed. John Wiley & Sons, Inc., 2004.
- [11]F. Pasin, *Mekanik sistemler dinamiği*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Rektörlüğü, 1994.
- [12]S. M. Bağdatlı, E. Özkaya, ve H. R. Öz, "Eksenel hareketli çok mesnetli kirişin enine nonlineer titreşimleri," *15. Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu*, Bildirler Kitabı içinde s. 695-706. Niğde Üniv. Mühendislik Fakültesi, 16 - 18 Haziran 2011.
- [13]A. H. Nayfeh, *Introduction to perturbation techniques*. Wiley, 1993.
- [14]B. B. Özhan ve M. Pakdemirli, "Effect of viscoelasticity on the natural frequencies of axially moving continua," *Advances in Mechanical Engineering*, cilt. 2013-s. 1-7, 2013, doi: 10.1155/2013/169598.
- [15]S. M. Bağdatlı, E. Özkaya, ve H. R. Öz, "Dynamics of axially accelerating beams with an intermediate support," *Journal of Vibration and Acoustics*, cilt. 133-3, s. 031013 1-10, 2011, doi: 10.1115/1.4003205.
- [16]S. G. Kelly, *Advanced vibration analysis*. Boca Raton, FL: CRC Press Taylor & Francis Group, 2007.
- [17]O. Heybey ve F. E. Karasz, "Experimental study of flexural vibrations in thick beams," *Journal of Applied Physics*, cilt. 47-7, s. 3252-3260, 1976, doi: 10.1063/1.323123.
- [18]Referans Metal. "[Http://referansmetal.Com/alasimli-aluminyum/product/309/en-aw-almg1si0-8cumn-6013-t6-t651](http://referansmetal.Com/alasimli-aluminyum/product/309/en-aw-almg1si0-8cumn-6013-t6-t651)." (Erişim 28.09.2022).