

*Araştırma Makalesi -Research Article*

# Ankastre Bir Kirişin Ayırık Zamanlı Titreşim Modelinin Meta-sezgisel Optimizasyon Yöntemleri Kullanılarak Elde Edilmesi

## Obtaining a Discrete Time Vibration Model of a Cantilever Beam by Using Meta-heuristic Optimization Methods

Serkan Çaşka<sup>1</sup>, Muhammed Enes Dokuz<sup>2\*</sup>

*Geliş / Received: 03/08/2021*

*Revize / Revised: 12/12/2021*

*Kabul / Accepted: 24/01/2022*

### ÖZ

Bu çalışmada, ankastre bir kiriş Ansys programında 3 boyutlu olarak modellenmiştir ve kirişe 5 kN'lık bir giriş kuvveti uygulanarak kirişin serbest ucunda meydana gelen yer değişimleri kaydedilmiştir. Kirişe uygulanan giriş kuvveti ve kirişin serbest ucunda oluşan yer değişimine ait çıkış veri seti kullanılarak literatürde dinamik sistemlerin modellenmesinde başarıyla uygulanmış Genetik Algoritmalar ve Parçacık Sürüsü Optimizasyonu yöntemleri ile ayırık zamanlı titreşim modelleri elde edilmiştir. Titreşim modellerinin modelleme başarısını içeren sonuçlar tablo halinde sunulmuştur. Ayrıca, Ansys programından alınan titreşim verisine ait harmonikler ve ayırık zamanlı modellere ait harmonikler Matlab/Simulink ortamında elde edilmiştir. Ayırık zamanlı titreşim modellerinin çıkış grafikleri ve harmonikleri incelendiğinde kirişin çıkış grafikleri ve harmoniklerine oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir. Ayırık zamanlı modellerin kirişin titreşim davranışını başarıyla temsil ettiği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler-** *Ankastre Kiriş, Sistem Modelleme, Genetik Algoritmalar, Parçacık Sürüsü Optimizasyonu*

### ABSTRACT

In this study, a cantilever beam was modeled as 3D by using Ansys program and the displacements at the free end of the beam were recorded after applying an input of 5 kN force to the beam. By using the output data set of the input force applied to the beam and the displacement at the free end of the beam, discrete-time vibration models have been obtained with Genetic Algorithms and Particle Swarm Optimization methods, which have been successfully applied in the modeling of dynamical systems in the literature. The results including the modeling success of the vibration models were presented in tabular form. In addition, harmonics of vibration data taken from Ansys program and harmonics of discrete time models were obtained in Matlab/Simulink environment. When the output graphics and harmonics of discrete-time vibration models was examined, it was determined that they were quite close to output graphics and harmonics of the beam. It was seen that the discrete-time models successfully represent the vibration behavior of the beam.

**Keywords-** *Cantilever Beam, System Modelling, Vibration Analysis, Genetic Algorithms, Particle Swarm Optimization*

<sup>1</sup>İletişim: [serkan.caska@cbu.edu.tr](mailto:serkan.caska@cbu.edu.tr) (<https://orcid.org/0000-0002-2157-8931>)

*Makine Mühendisliği, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Hasan Ferdi Turgutlu Teknoloji Fakültesi, Manisa, Türkiye*

<sup>2</sup>Sorumlu yazar iletişimi: [muhammed.dokuz@cbu.edu.tr](mailto:muhammed.dokuz@cbu.edu.tr) (<https://orcid.org/0000-0002-7515-3744>)

*Makine Mühendisliği, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Hasan Ferdi Turgutlu Teknoloji Fakültesi, Manisa, Türkiye*

## I. GİRİŞ

Kesiti boyuna göre oldukça küçük olan ve boyunun üzerinde bulunduğu eksene dik bir doğrultuda uygulanan kuvvetlerin etkisinde olan taşıyıcı elemanlara kiriş denir. Kirişler mesnetleme türüne göre basit kiriş, çıkmalı kiriş, ankastre kiriş vb. olarak isimlendirilebilir [1]. Ankastre mesnet, bir kirişi mesnetlemek için en kısıtlayıcı yöntemdir ve bu tür mesnetler kirişlerin dönmesine ve ötelenmesine engel olur. Ankastre olarak mesnetlenmiş kiriş literatürde titreşim analizi çalışmalarında kullanılan başlıca kiriş türüdür [2]. Literatürde ankastre kirişlerin analitik ve sonlu elemanlar yöntemiyle titreşim modellerinin elde edilmesini içeren oldukça fazla çalışma vardır [3,4]. Bununla birlikte mühendislik sistemlerinde aynı girişe karşılık gerçek sistem davranışıyla model davranışı arasında fark olabilmektedir. Bu sebeple deney seti üzerinden alınan verilerle elde edilen sistem modelleme yaklaşımları önemli olmaktadır. Deney setinden elde edilen modeller hem gerçek sistem davranışını temsil etmede başarılı olmaktadır hem bu sistemler için tasarlanan kontrolörlerin başarısını arttırmaktadır.

Mühendislik sistemlerinin modellenmesinde deneysel yöntemlerden gün geçtikçe daha fazla faydalanılmaktadır. Dinamik sistemlere ait giriş-çıkış veri setleri ayrık zamanlı ya da sürekli zamanlı modeller elde etmede kullanılmaktadır [5]. Oluşturulan modellere çeşitli giriş sinyalleri uygulanarak sistem davranışı gözlemlenmekte ve gerekliyse aktif kontrolör tasarlanmasında bu modeller kullanılmaktadır [6]. Günümüzde mikroişlemci teknolojisindeki gelişmeler sebebiyle mühendislik sistemlerinin modellenmesi ayrık zamanlı modeller şeklinde de yapılmaktadır [7].

Matlab ortamında matematiksel modellerin temsili Matlab kodları ile yapılabildiği gibi Simulink ortamında da yapılabilmektedir [8]. Simulink, matematiksel modellerin blok diyagramları ile ifade edilmesine imkân vermekte ve kod yazımını azaltmaktadır [9]. Titreşim modellerinin Simulink ortamında ifade edilmesi modellerin analizi açısından kolaylık sağlamaktadır. Hızlı Fourier dönüşümü yapabilen bloklar yardımıyla herhangi bir sistem çıkışına ait harmonikler elde edilebilmektedir [10].

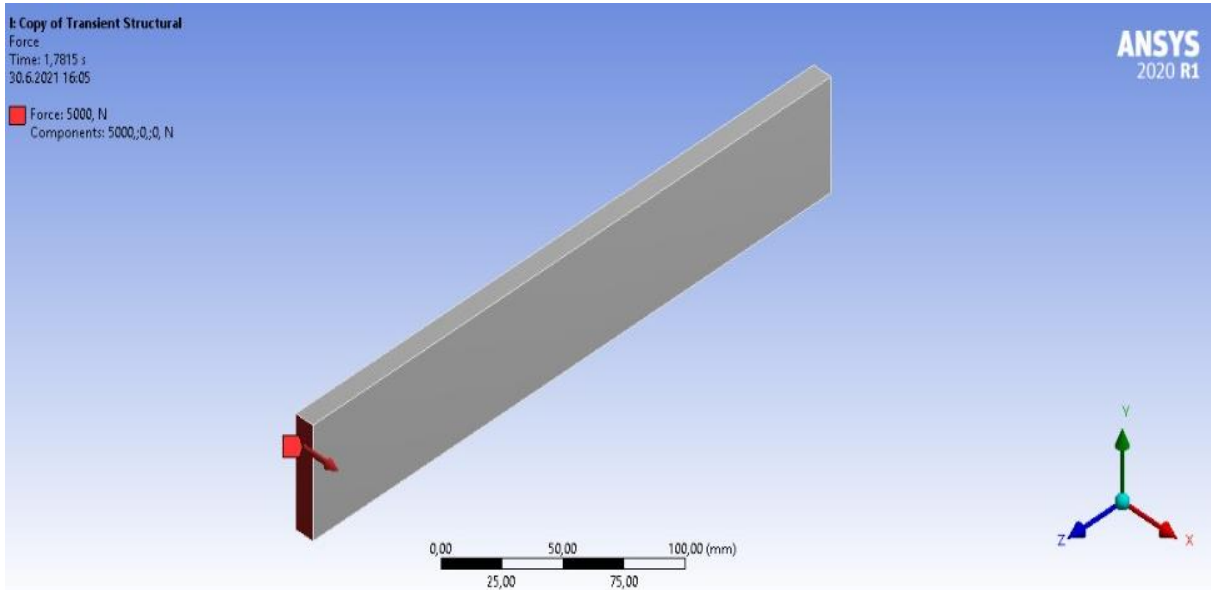
Literatürde ticari mühendislik programları aracılığıyla yapılan titreşim analizi ve modellemeye yönelik çalışmalar mevcuttur [11-13]. Bu çalışmada, akademik ve endüstriyel amaçlı olarak en çok kullanılan analiz programlarından biri olan Ansys programında modellenmiş ankastre bir kirişe 5 kN'lik bir giriş uygulanmıştır ve kirişin serbest ucunda meydana gelen titreşim kaydedilmiştir. Kirişe ait giriş-çıkış veri setleri kullanılarak kirişin titreşimini temsil eden ayrık zamanlı modeller elde edilmiştir. Ansys programından elde edilen titreşim verisine ait ve ayrık zamanlı modelden elde edilen titreşim verisine ait harmonikler ve grafikler Matlab/Simulink ortamında elde edilmiştir.

Bu çalışmada kullanılan algoritmalarından, Genetik Algoritmalar (GA) temel meta-sezgisel optimizasyon algoritmalarından biridir ve literatürde birçok dinamik sisteminin yapısını belirlemek için kullanılmıştır [14]. Genetik algoritmalar yönteminin dinamik sistemlerin tanımlanmasında ve kontrolünde tercih edilmesinin başlıca sebebi yapısının basit ve uzun yıllardır başarıyla kullanılıyor olmasıdır. Sistem modelleme uygulamalarında kullanılan bir diğer meta-sezgisel algoritma da Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) metodudur. PSO algoritması birçok dinamik sistemin modellenmesinde ve bu sistemlere kontrolör tasarlanmasında başarıyla kullanılmıştır [15].

Bu çalışmanın amacı kullanılan meta-sezgisel algoritmaların hangisinin kuvvet girişi-titreşim çıkışı veri setini en doğru şekilde temsil eden dinamik modeli elde edeceğini tespit etmektir. Bu çalışmada, literatürde dinamik sistemlerin modellenmesinde başarıyla uygulanmış Genetik Algoritmalar ve Parçacık Sürüsü Optimizasyonu yöntemleri ile ayrık zamanlı titreşim modelleri elde edilmiştir. Bu algoritmaların literatürde yer alan diğer optimizasyon algoritmalarına göre üstünlükleri prosedürlerinin basit olması ve kod olarak ifade edilmelerinin kolay olmasıdır. Eksik yanları ise yerel minimum olarak adlandırılan optimum olmayan çözümleri elde etme ve bulunan optimum çözümlerin de yaklaşık çözüm olma ihtimalinin olmasıdır.

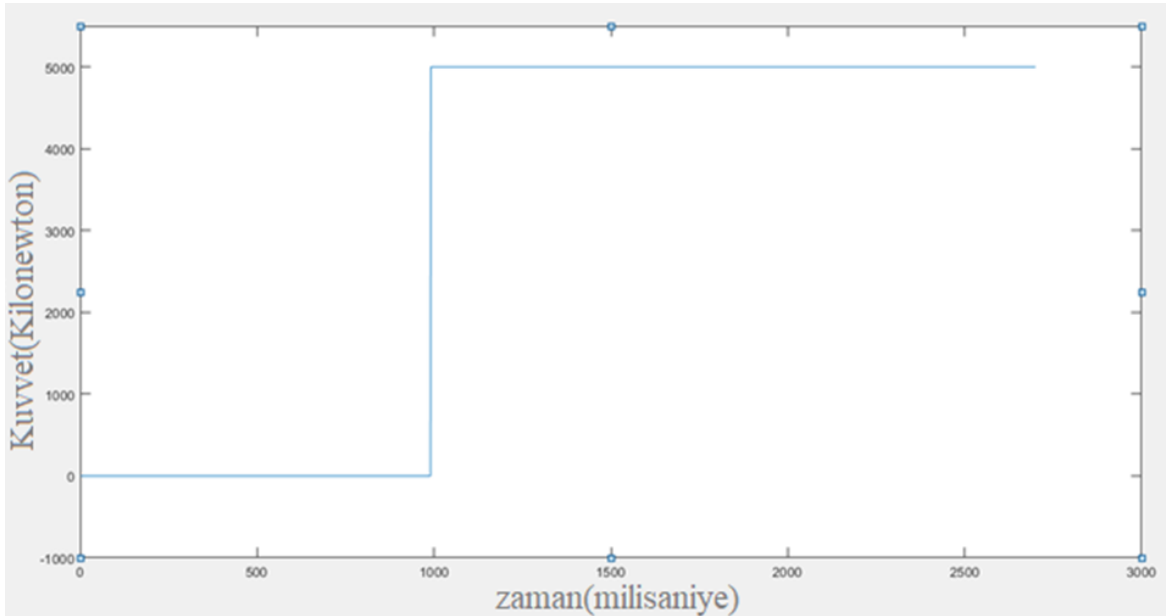
## II. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada elastisite modülü 200 GPa, yoğunluğu 7850 kg/m<sup>3</sup>, poisson oranı 0,3 olan yapısal çelik malzeme özelliklerine ve 10x50x300mm ölçülerine sahip bir kiriş Ansys ortamında 3 boyutlu olarak modellenmiştir. Kiriş bir ucundan ankastre olarak mesnetlenmiş ve kirişin serbest ucuna 5 kN'lik bir kuvvet uygulanmıştır. Model hexahedron metodu ile 80 elemanlı ve 683 düğüm noktalı mesh yapısı ile örülmüştür. Transientstructural (sürekli yapısal) analiz modülünde oluşturulan kuvvet ekseni boyunca oluşacak ekstenel yer değişimi sonlu elemanlar yöntemi ile çözümlenmiştir. Kirişin serbest ucunda meydana gelen yer değişimleri titreşim modelinin elde edilmesinde kullanılmak üzere kaydedilmiştir. Şekil 1'de Ansys ortamında oluşturulmuş ankastre kiriş gösterilmiştir.



Şekil 1. Ansys ortamında modellenmiş ankastre kiriş

Ansys ortamında 3 boyutlu olarak modellenmiş ankastre kirişin serbest ucuna 2,7 saniye boyunca 5 kN'lik bir giriş kuvveti uygulanmış ve çıkış olarak oluşan titreşime ait veriler saniyede 1000 veri içerecek şekilde toplamda 2700 veri kaydedilmiştir. Şekil 2'de kirişe Ansys ortamında x eksenine doğrultusunda uygulanmış giriş kuvvetine ait grafik verilmiştir.



Şekil 2. Kirişe Ansys ortamında uygulanmış giriş kuvveti

Ankastre kirişe uygulanan giriş kuvveti ve girişe karşılık oluşan yer değişimine ait çıkış veri seti kullanılarak Matlab programında PSO ve GA yöntemleri kullanılarak Eşitlik (1)'de ve Eşitlik (2)'de verilen ayrık zamanlı doğrusal modeller elde edilmiştir.

T\_PSO(z)

$$= \frac{0.00000000112048z^4 + 0.000186968238751277z^3 + 0.000668981033825553z^2 - 0.00136796110038221z^1 + 0.000980715072206144}{z^4 - 3.02559885653659z^3 + 3.74552631131522z^2 - 2.16147667125710z + 0.487056527199281}$$

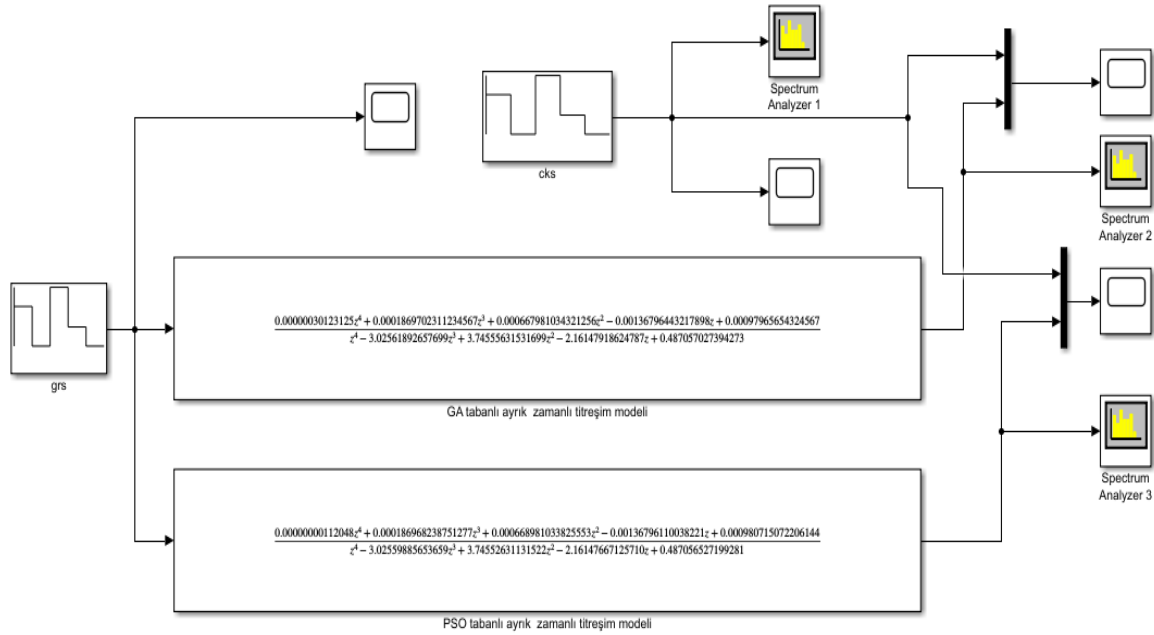
(1)

T\_GA(z)

$$= \frac{0.00000030123125z^4 + 0.0001869702311234567z^3 + 0.000667981034321256z^2 - 0.00136796443217898z + 0.00097965654324567}{z^4 + 3.02561892657699z^3 + 3.74555631531699z^2 - 2.16147918624787z + 0.487057027394273}$$

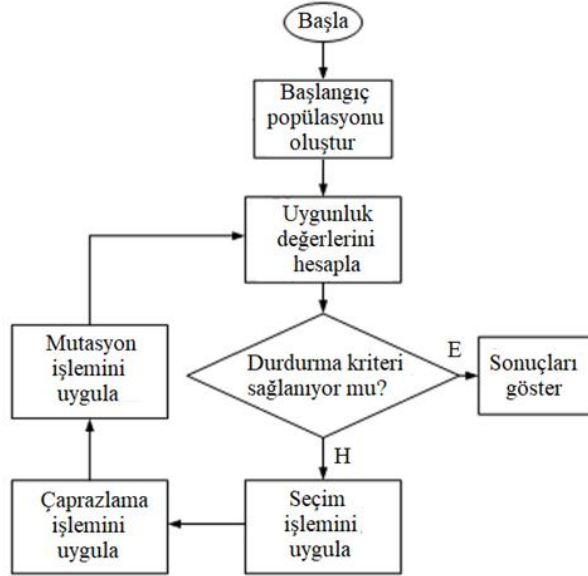
(2)

Eşitlik (1) ve Eşitlik (2)'deki  $z$  bir karmaşık sayıdır ve Z-dönüşümüne uğramış dinamik sistem modellerinin gösteriminde kullanılan bağımsız değişkendir [16]. Elde edilen ayrık zamanlı modellerin çıkışı ve girişin titreşimine ait çıkış verisini tek bir grafikte göstermek için Simulink blok diyagramları oluşturulmuştur. Simulink kütüphanesinde yer alan Spectrum Analyzer bloğu yardımıyla ayrık zamanlı modellere ait ve girişin titreşimine ait harmonikler elde edilmiştir. Ayrık zamanlı titreşim modellerini içeren Simulink blok diyagramı Şekil 3'te gösterildiği gibidir.



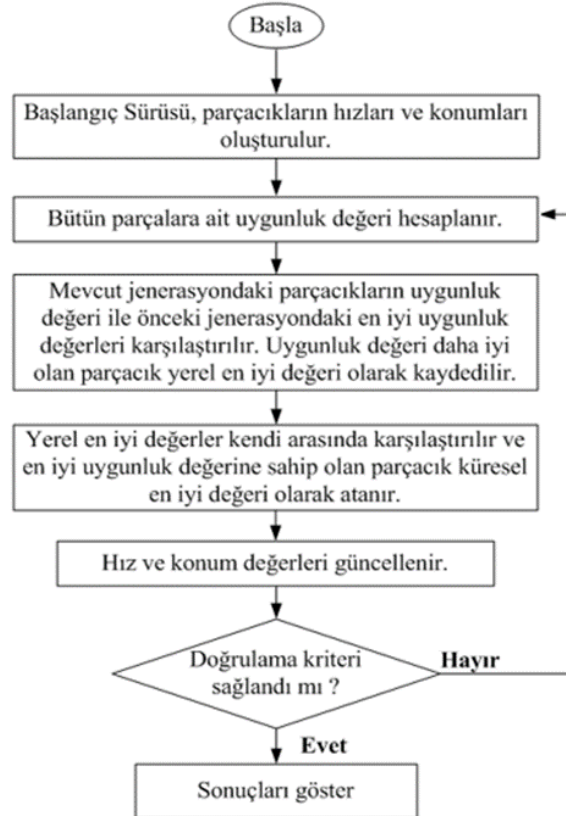
Şekil 3. Ayrık zamanlı titreşim modellerini içeren Simulink blok diyagramı

Bu çalışmada, ayrık zamanlı titreşim modellerinin elde edilmesi için GA ve PSO yöntemleri kullanılmıştır. GA prosedürü, kromozom popülasyonunun oluşturulmasıyla başlamaktadır. Kromozomlar, aday çözümleri temsil etmektedir ve başlangıçta rastgele seçilmektedir. Kromozomlar, genler olarak adlandırılan bitlerden oluşturulur. GA prosedüründe, kromozomların mutasyonunu gerçekleştirmek için mutasyon operatörü kullanılırken, doğal çoğalmayı sağlamak için çaprazlama operatör kullanılmaktadır. Oluşturulan kromozomlardan uygunluk değeri daha iyi olanlarının optimizasyon sürecine katkısını artırmak için kromozomlara seçim işlemi uygulanır. Bu çalışmada, GA prosedüründe tek noktalı çaprazlama, elitist seçim ve %10 mutasyon oranı kullanılmıştır. GA optimizasyon sürecinin akış diyagramı Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. GA yöntemine ait akış diyagramı

Bu çalışmada, meta-sezgisel algoritmalarından olan PSO algoritması da ayrı zamanlı titreşim modeli elde edilmesinde kullanılmıştır. PSO algoritması, kuş ve balık sürülerinin sosyal davranışları dikkate alınarak 1995 yılında geliştirilmiştir. Bu algoritmanın çalışma mantığı balık ve kuş sürülerinin yiyecek veya yuva bulmak için bir alanı incelemesine dayalıdır. PSO algoritmasında kullanılan sürü içerisindeki her bir elemana parçacık denir. PSO'ya ait işlemlerden oluşan akış diyagramı Şekil 5'te verilmiştir. Bu çalışma kapsamında PSO algoritmasında kullanılan parametreler Tablo 1'de görüldüğü gibidir.



Şekil 5. PSO yöntemine ait akış diyagramı

**Tablo 1.** PSO yöntemine ait parametreler

Parametre ismi	Parametre değeri
Sürü büyüklüğü	50
Hızlanma katsayıları	1
Eylemsizlik momenti	0.9

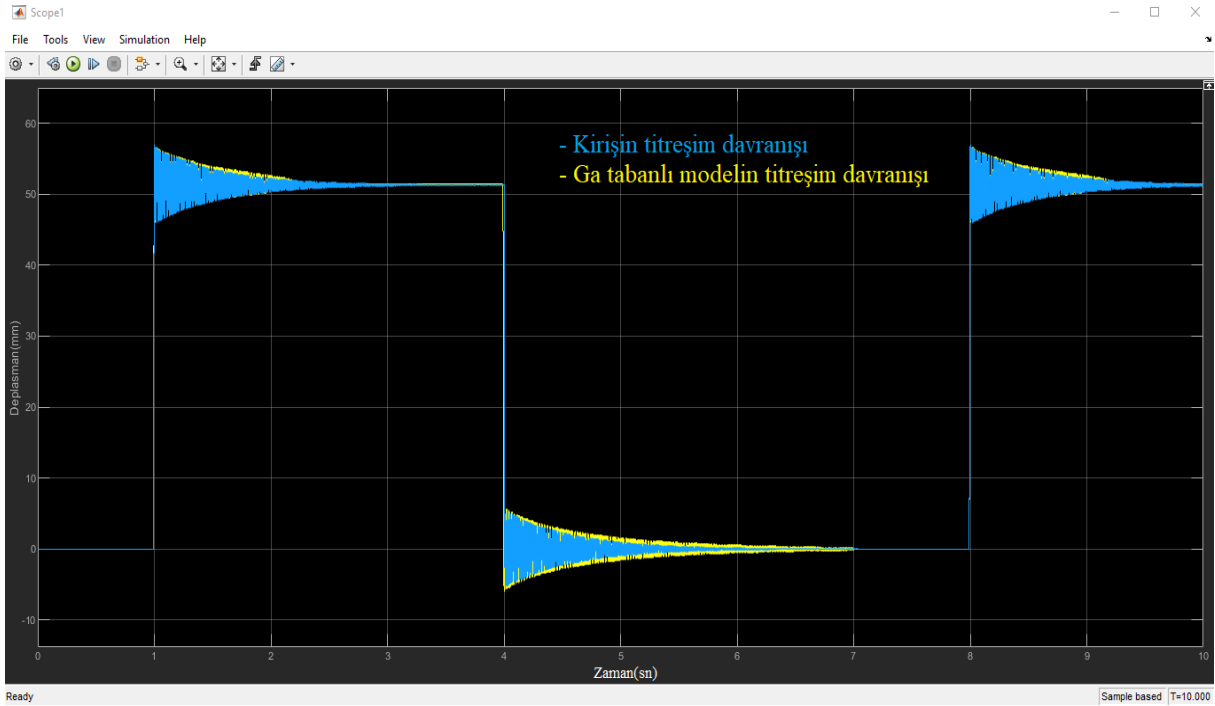
### III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, öncelikle kirişin titreşimine ait giriş-çıkış verileri arasındaki ilişkiyi en iyi temsil eden modeli elde etmek için Matlab üzerinde birçok deneme yapılmış ve sonuçta modelin 4 adet kutup ve 4 adet sıfır içeren bir yapıda olması gerektiğine karar verilmiştir. Ayrık zamanlı modellerin katsayılarını bulmada kullanılan GA ve PSO yöntemlerine ait modelleme başarısını gösteren  $R^2$  ve ortalama karesel hata (mse) değerleri Tablo 2’de gösterildiği gibidir.

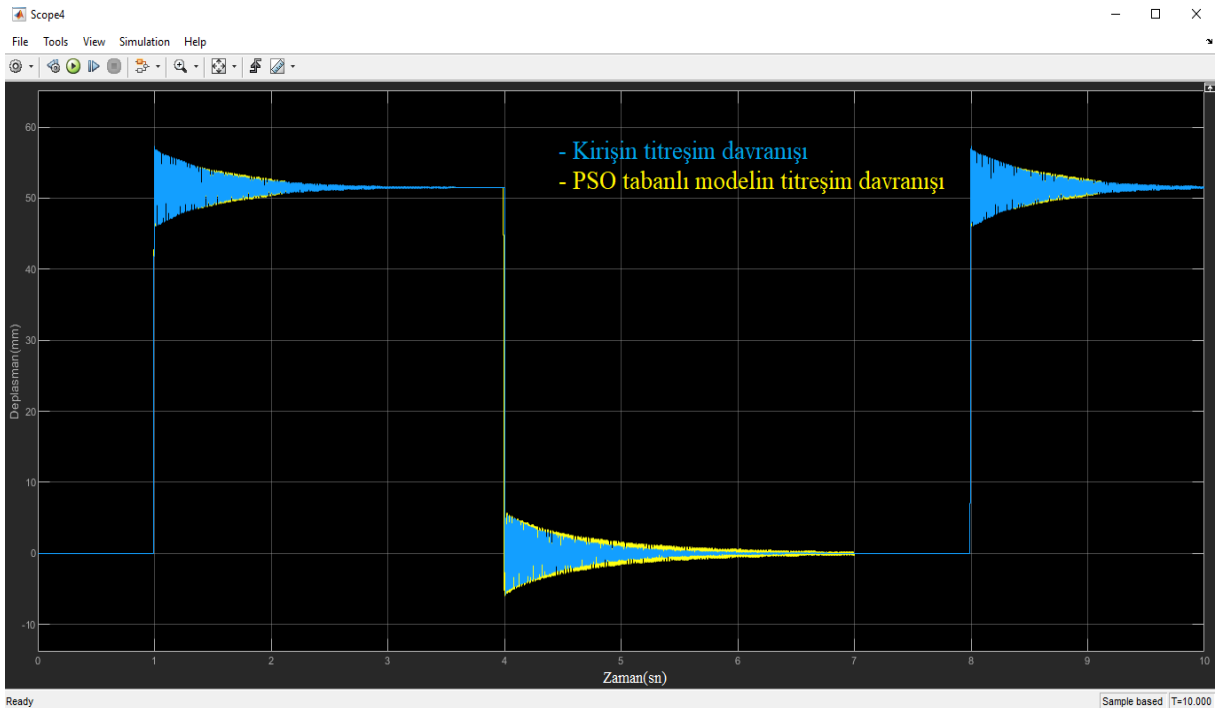
**Tablo 2.** Ayrık zamanlı modellere ait  $R^2$  ve mse değerleri

Model	$R^2$	mse
GA tabanlı ayrık model	0.931	$4.934 \times 10^{-3}$
PSO tabanlı ayrık model	0.963	$4.056 \times 10^{-3}$

Simulink kütüphanesinde yer alan Scope bloğu yardımıyla ayrık zamanlı modellerin ve kirişin titreşimine ait çıkış grafikleri elde edilmiştir. Giriş kuvvetine karşılık kirişte oluşan titreşim ile GA ve PSO yöntemleriyle elde edilen ayrık zamanlı sistemlerin çıkışı sırasıyla Şekil 6’da ve Şekil 7’de gösterilmektedir. Çıkış grafikleri incelendiğinde birbirine oldukça yakın olduğu ve ayrık zamanlı modellerin kirişin titreşim davranışını başarıyla temsil ettiği görülmüştür. Grafiklerin tam olarak üst üste olmaması modelleme başarısı ile ilgilidir.  $R^2$  değeri 1’e daha yakın olan ve mse değeri 0’a daha yakın olan modeller elde edilmesi durumunda grafikler birbirine daha çok benzeyecektir.



Şekil 6. Giriş kuvvetine karşılık kirişte oluşan titreşim ve GA tabanlı ayrık zamanlı modelin titreşim davranışı



Şekil 7. Giriş kuvvetine karşılık kirişte oluşan titreşim ve PSO tabanlı ayrık zamanlı modelin titreşim davranışı

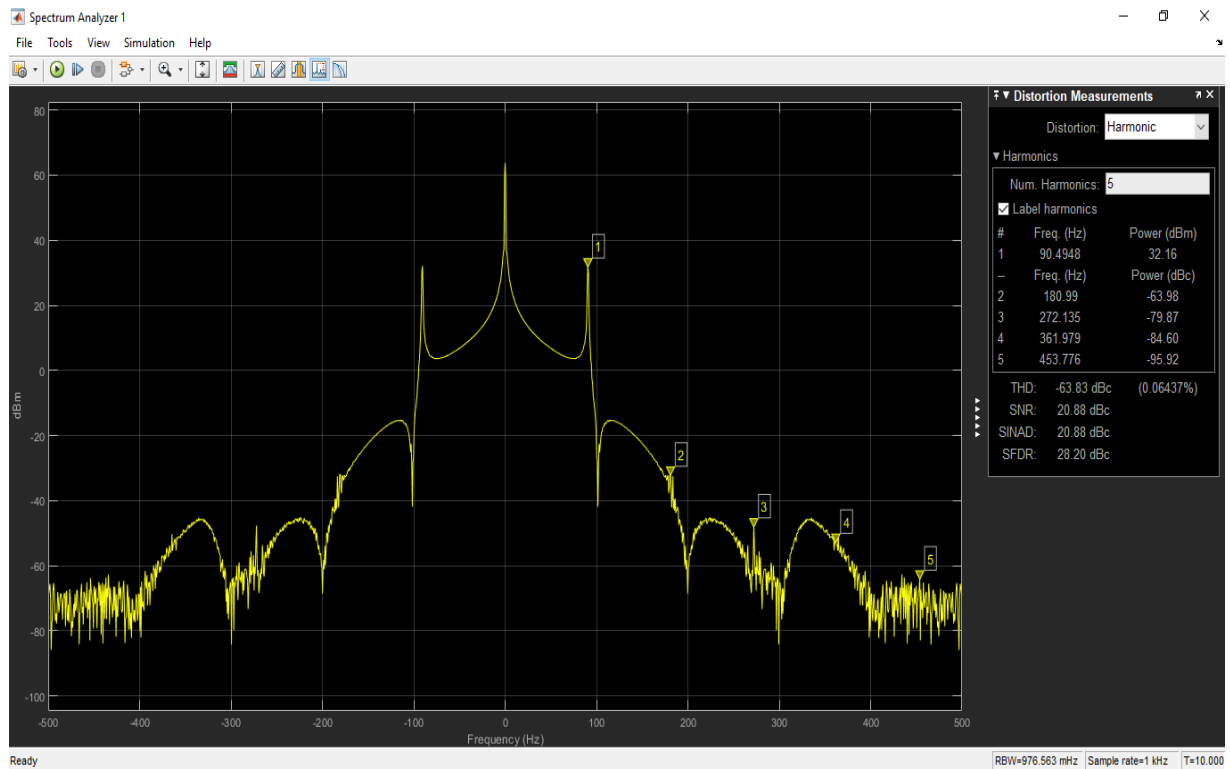
Şekil 3'te görülen Simulink blok diyagramında yer alan Spectrum Analyzer bloğu kullanılarak ayrık zamanlı modellere ait ve kirişin titreşimine ait harmonikler elde edilmiştir. Harmonikler incelendiğinde ayrık zamanlı modellerden elde edilen harmoniklerin değerinin aynı olduğu ve Ansys kiriş modelinin harmoniklerine oldukça yakın oldukları tespit edilmiş ve ayrık zamanlı modellerin kirişin titreşim davranışını başarıyla temsil ettiği doğrulanmıştır. Şekil 8'de Spectrum Analyzer bloğu ile harmoniklerin edilmesi gösterilmiştir. Tablo 3'te



kirişin titreşiminden elde edilen ve ayrık zamanlı modellerin çıkışından elde edilen ilk üç harmonik gösterilmektedir.

**Tablo 3.** Kirişin titreşiminden elde edilen ve ayrık zamanlı modellerin çıkışından elde edilen harmonikler

Veri kaynağı	1. Harmonik(Hz)	2. Harmonik(Hz)	3. Harmonik(Hz)
Ansys Kiriş titreşimi	90.495	180.990	272.135
GA tabanlı ayrık model çıkışı	90.495	180.339	271.484
PSO tabanlı ayrık model çıkışı	90.495	180.339	271.484



**Şekil 8.** Kiriş titreşimine ait harmoniklerin elde edilmesi

#### IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Ansys ortamında oluşturulmuş bir ankastre kirişin serbest ucuna kuvvet uygulanması sonucu oluşan titreşim ile bu kuvvet girişi-titreşim çıkışı veri kümesinden elde edilen ayrık zamanlı modellerin aynı kuvvet girişine karşılık oluşturduğu çıkışının benzerliğini araştırılmıştır. Sonuçların benzerliğini ispatlamak için Matlab/Simulink ortamında Hızlı Fourier dönüşümü yapabilen “Spectrum Analyzer” bloğu ve çıkış grafiklerini görüntülenmesini sağlayan “Scope” bloğu kullanılmıştır. Ayrık zamanlı modellerden edilen çıkış grafikleri ve harmonikleri incelendiğinde, kirişin Ansys modelinden elde edilen çıkış grafiğine ve harmoniklerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Bu durum ayrık zamanlı modellerin ankastre bir kirişin titreşim davranışını başarıyla temsil edebildiğini göstermiştir. Bununla birlikte elde edilen R<sup>2</sup> değerleri, mse değerleri incelendiğinde PSO yönteminin GA yönteminden daha başarılı olduğu tespit edilmiştir.

Bu çalışmada Ansys üzerinde modellenmiş bir kirişin titreşim modelleri Matlab ortamında elde edilmiştir. Simülasyon ortamında bir giriş işaretini istenen genlikte ve sürede uygulamak ve çıkışı istenen sıklıkta veri ile gözlemlemek mümkündür. Ayrıca simülasyon ortamında kiriş üzerine aktüatörler ve sensörler yerleştirilmesi gerekmemektedir. Gerçek bir deney seti üzerinde yer alacak ankastre bir kirişin titreşim modeli elde edilmek istendiğinde ise kiriş üzerine aktüatör ve sensör elemanları yerleştirilmelidir. Bu şartlar altında kirişin titreşim



davranışı değişecektir. Ayrıca titreşim verisinin sensörden alınma sıklığı modelleme başarısı açısından oldukça önemlidir.

Bu çalışmada Ansys üzerinde modellenmiş kirişin titreşimine ait verinin sıklığı saniyede 1000 veridir. Gerçek bir deney seti üzerinde yer alan sensörlerden bu sıklıkta veri alabilmek için kullanılacak veri toplama kartının ya da mikrokontrolörün yüksek bir işlem kapasitesine sahip olması beklenir. Aksi halde modelleme başarısı da düşük olacaktır. Ayrıca gerçek deney seti üzerindeki bir sensörden okunan verinin elektriksel gürültü içermesi de muhtemeldir ve bu da modelleme başarısını düşürecektir. Yazarlar gelecek çalışması olarak, gerçek bir deney seti üzerinde yer alacak bir kirişin titreşiminin meta-sezgisel yöntemlerle ayrık zamanlı olarak modellenmesi durumunda oluşacak modelleme başarısını araştırmayı planlamaktadır.

Bu çalışmada, literatürde dinamik sistemlerin modellenmesinde başarıyla uygulanmış Genetik Algoritmalar ve Parçacık Sürüsü Optimizasyonu yöntemleri ile ayrık zamanlı titreşim modelleri elde edilmiştir. Bu algoritmaların literatürde yer alan diğer optimizasyon algoritmalarına göre üstünlükleri prosedürlerinin basit olması ve kod olarak ifade edilmelerinin kolay olmasıdır. Eksik yanları ise yerel minimum olarak adlandırılan optimum olmayan çözümleri elde etme ve bulunan optimum çözümlerin de yaklaşık çözüm olma ihtimalinin olmasıdır. Bu sebeple farklı optimizasyon algoritmaları kullanılarak R2 ve mse değerleri bakımından daha iyi modeller elde edilebilir.

#### KAYNAKLAR

- [1] Sunguroğlu, N. G. (2015). *Sivriltilmiş Ankastr Kiriş Yapılarda Kiriş Teorilerinin İncelenmesi ve Titreşim Analizi Uygulamaları*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [2] Uslu Uysal, M., (2018). Deleminasyon içeren eğri eksenli kompozit kirişlerin titreşim davranışlarının incelenmesi. *DÜMF Fen ve Mühendislik Dergisi*, 9(2), 775-784.
- [3] Yavuz, Ş., Uyar, M., Malgaca, L., & Karagülle H., (2018). Eşdeğer Kütle-Yay-Sönüm Elemanı Kullanılan Ankastr Kompozit Bir Kirişin Titreşim Analizi, *DÜMF Fen ve Mühendislik Dergisi*, 20(60), 946 - 954.
- [4] Yanık., F., & Yaylı M. Ö. (2015). Rijit Olmayan Sınır Koşullarında Elastik Zemine Oturan Bir Çubuğun Eksenel Titreşim Analizi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2(1), 35 - 44.
- [5] Wills, A., Mills, A., & Ninness, B., (2009). A MATLAB Software Environment for System Identification. *Proceedings of the 15th IFAC Symposium on System Identification*, 6-8 July, Saint-Malo, France, 741-746.
- [6] Yıldız, K. (2019). İnce Cidarlı Kompozit Kiriş Olarak Modellenmiş Uçak Kanatlarının Eğilme-Eğilme Bağlaşım Titreşiminin Aktif Kontrolü. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (17), 1274-1284.
- [7] Wang, X., Huang, Q., Zhang B., Chen, D., & Guan Q, (2021). Z domain modeling of peak current mode control for full bridge DC DC buck converters, *Journal of Power Electronics*, 21, 27-37.
- [8] Fei, G, Fei, Q. X., & Pei, Z., (2014). The Application of Simulink for Vibration Simulation of Suspension Dual-mass System, *Sensors&Transducers*, 175(7), 6-10.
- [9] Kaplan, K., Kuncan, M., Polat, H., Tepe, B., & Ertunç H.M. (2020). PID ve Bulanık Mantık Tabanlı DC Motorun Gerçek Zamanlı Konum Kontrolü, *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10(2), 900-916.
- [10] Lin, H.C., Ye, Y.C., Huang B.J., & Su J.L. (2016). Bearing vibration detection and analysis using enhanced fast Fourier transform, *Advances in Mechanical Engineering*, 8(10), 1-14.
- [11] Karagülle, H., Malgaca, L. & Öktem, H.F. (2004). Analysis by active vibration control in smart structures by ANSYS, *Smart Materials and Structures*, 13(4), 661-667.
- [12] Yavuz, Ş., & Hira Karagülle, H. (2021). Analysis of vibration control of a single-link epoxy-glass composite manipulator by FFT method, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36(2), 685-699.
- [13] Akdağ, M., & Şen, H. (2021). Tek Eksen Esnek Manipülörün Titreşim Kontrolü için S-eğrisi Hareket Profili Tasarımı, *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 23(68), 661-676.
- [14] Jayachitra, A., & Vinodha, R. (2014). Genetic Algorithm Based PID Controller Tuning Approach for Continuous Stirred Tank Reactor, *Advances in Artificial Intelligence*, 2014, 1-8.

- [15] Mukhtar, A., Tayal, V. K. & Singh, H. (2019). PSO Optimized PID Controller Design for the Process Liquid Level Control, 3rd International Conference on Recent Developments in Control, Automation & Power Engineering (RDCAPE), 10-11 October, Noida, India.
- [16] Noda, T., & Ramirez, A. (2007). z-Transform-Based Methods for Electromagnetic Transient Simulations, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 22(3), 1799-1805.