

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PLAK TİTREŞİMLERİNİN AKTİF KONTROLÜ

ONUR TUNA

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Makine Teorisi ve Kontrol Programı

Danışman
Doç. Dr. Semih SEZER

Temmuz, 2019

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PLAK TİTREŞİMLERİNİN AKTİF KONTROLÜ

Onur TUNA tarafından hazırlanan tez çalışması 16.07.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Makine Teorisi ve Kontrol Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Semih SEZER

Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Semih SEZER , Danışman

Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Cihan DEMİR, Üye

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof . Dr. Şenol ATAÖĞLU , Üye

İstanbul Teknik Üniversitesi

Danışmanım Doç. Dr. Semih SEZER sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Plak Titreşimlerinin Aktif Kontrolü başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim

Onur TUNA

İmza

Canımdan Çok Sevdığım

Aileme

TEŞEKKÜR

Tezin hazırlanması sırasında yardımlarını esirgemeyen başta danışman hocam Sayın Doç. Dr. Semih SEZER'e, maddi manevi destek olan aileme teşekkür ederim.

Onur TUNA

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ.....	VII
KISALTMA LİSTESİ	VIII
ŞEKİL LİSTESİ	IX
TABLO LİSTESİ.....	XI
ÖZET	XII
ABSTRACT	XIII
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	2
1.3 Hipotez	2
2 PLAK TEORİSİ	4
2.1 Plak Nedir.....	4
2.2 Plak Davranışını Modelleyen Teoriler	4
2.3 Kirchhoff-Love Teorisi	5
2.3.1 Varsayımlar ve Koordinatlar.....	5
2.3.2 Plak Denklemleri.....	6
2.3.3 Sınır Şartları.....	7
2.3.4 Navier Çözümü.....	8
2.3.5 Durum Uzay Formu.....	10
3 KONTROL TEORİSİ.....	12
3.1 Kontrol Teorisi Tarihi.....	12
3.2 Kontrol Yöntemleri.....	13
3.3 H_∞ Kontrolcü	14

4 SAYISAL UYGULAMALAR	18
5 SONUÇ VE ÖNERİLER	85
KAYNAKÇA.....	88
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR.....	91

SİMGE LİSTESİ

a,b	Plak boyutları
A	Sistem Matrisi
A_{mn}	Normal parametresi
B	Giriş Matrisi
C	Çıkış matrisi
$z(t)$	Performans Parametresi
$F(t)$	Zamana bağlı kuvvet ifadesi
D	Plak direngenliği= $Eh^3/12(1-\nu)$
E	Elastisite Modülü
h	Plak kalınlığı
i	Alt indis
K	Kazanç matrisi
m,n	Mod ifadesi
P_z	Düşey kuvvet
x_i, y_i	Kuvvetin x ve y koordinatları
t	Zaman
∇^2	Laplace operatörü ($= \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$)
∇^4	Biharmonik operatör ($= \frac{\partial^4}{\partial x^4} + \frac{\partial^4}{\partial y^2 \partial x^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^4}$)
ν	Poisson oranı
x, y	Uzamsal değişkenler
x_b, y_b	Bozucu giriş noktalarının koordinatları
x_{in}, y_{in}	İncelenecek noktaların koordinatları
$w, W(x, y, t)$	Sehim
ρ	Özkütle
ϕ_{mn}	Zamana bağlı katsayı
ω_{mn}	Doğal frekans
$ \cdot $	H_∞ Normu

KISALTMA LİSTESİ

DME	Doğrusal Matris Eşitsizliği
DZB	Doğrusal Zamandan Bağımsız
LTI	Lineer Time Invariant
LTV	Lineer Time Variant
SISO	Single Input Single Output
MIMO	Multi Input Multi Output

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2. 1	Plak Şekli ve Kuvvet Doğrultusu	4
Şekil 2. 2	Plak, koordinat eksenleri ve deplasmanları	6
Şekil 3. 1	Blok diyagramı gösterimi	14
Şekil 4. 1	Plak boyutları, eyleyici tipi, bozucu giriş ve sensörlerin gösterimi	19
Şekil 4. 2	A tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 1. sensör değerleri.....	20
Şekil 4. 3	A tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 2. sensör değerleri.....	21
Şekil 4. 4	Plak boyutları, eyleyici tipi, bozucu giriş ve sensörlerin gösterimi	23
Şekil 4. 5	B tipi yerleştirilen eyleyicilerin step bozucu giriş altındaki serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 1. sensör değerleri	24
Şekil 4. 6	B tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 2. sensör değerleri.....	25
Şekil 4. 7	Plak boyutları, eyleyici tipi, bozucu giriş ve sensörlerin gösterimi	27
Şekil 4. 8	A tipi yerleştirilen eyleyicilerin sinüs bozucu giriş altında serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 1. sensör değerleri	28
Şekil 4. 9	A tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 2. sensör değerleri.....	29
Şekil 4. 10	Plak boyutları, eyleyici tipi, bozucu giriş ve sensörlerin gösterimi	31
Şekil 4. 11	B tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 1. sensör değerleri.....	32
Şekil 4. 12	B tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 2. sensör değerleri.....	33
Şekil 4. 13	Plak boyutları, eyleyici tipi, bozucu giriş ve sensörlerin gösterimi	35
Şekil 4. 14	A tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 1. sensör değerleri.....	36
Şekil 4. 15	A tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 2. sensör değerleri.....	37
Şekil 4. 16	Plak boyutları, eyleyici tipi, bozucu giriş ve sensörlerin gösterimi	39
Şekil 4. 17	B tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 1. sensör değerleri.....	40
Şekil 4. 18	B tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 2. sensör değerleri.....	41
Şekil 4. 19	Plak boyutları, eyleyici tipi, bozucu giriş ve sensörlerin gösterimi	43
Şekil 4. 20	A tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 1. sensör değerleri.....	44
Şekil 4. 21	Plak boyutları, eyleyici tipi, bozucu giriş ve sensörlerin gösterimi	46
Şekil 4. 22	B tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 1. sensör değerleri.....	47
Şekil 4. 23	B tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 2. sensör değerleri.....	48
Şekil 4. 24	Plak boyutları, eyleyici tipi, bozucu giriş ve sensörlerin gösterimi	50
Şekil 4. 25	A tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 1. sensör değerleri.....	51

Şekil 4. 26	A tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 2. sensör değerleri.....	52
Şekil 4. 27	Plak boyutları, eyleyici tipi, bozucu giriş ve sensörlerin gösterimi	54
Şekil 4. 28	B tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 1. sensör değerleri.....	55
Şekil 4. 29	B tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 2. sensör değerleri.....	56
Şekil 4. 30	Plak boyutları, eyleyici tipi, bozucu giriş ve sensörlerin gösterimi	58
Şekil 4. 31	A tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 1. sensör değerleri.....	59
Şekil 4. 32	A tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 2. sensör değerleri.....	60
Şekil 4. 33	Plak boyutları, eyleyici tipi, bozucu giriş ve sensörlerin gösterimi	62
Şekil 4. 34	B tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 1. sensör değerleri.....	63
Şekil 4. 35	B tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 2. sensör değerleri.....	64
Şekil 4. 36	Plak boyutları, eyleyici tipi, bozucu giriş ve sensörlerin gösterimi	65
Şekil 4. 37	A tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 1. sensör değerleri.....	66
Şekil 4. 38	Plak boyutları, eyleyici tipi, bozucu giriş ve sensörlerin gösterimi	67
Şekil 4. 39	B tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 1. sensör değerleri.....	68
Şekil 4. 40	A tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 1. sensör değerleri.....	69
Şekil 4. 41	B tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 1. sensör değerleri.....	70
Şekil 4. 42	A tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 1. sensör değerleri.....	71
Şekil 4. 43	B tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 1. sensör değerleri.....	72
Şekil 4. 44	1. durum a tipi kontrolcü bode diyagramı.....	73
Şekil 4. 45	1. durum b tipi kontrolcü bode diyagramı.....	74
Şekil 4. 46	2. durum a tipi kontrolcü bode diyagramı.....	75
Şekil 4. 47	2. durum b tipi kontrolcü bode diyagramı.....	76
Şekil 4. 48	3. durum a tipi kontrolcü bode diyagramı.....	77
Şekil 4. 49	3. durum b tipi kontrolcü bode diyagramı.....	78
Şekil 4. 50	4. durum a tipi kontrolcü bode diyagramı.....	79
Şekil 4. 51	4. durum b tipi kontrolcü bode diyagramı.....	80
Şekil 4. 52	5. durum a tipi kontrolcü bode diyagramı.....	81
Şekil 4. 53	5. durum b tipi kontrolcü bode diyagramı.....	82
Şekil 4. 54	6. durum a tipi kontrolcü bode diyagramı.....	83
Şekil 4. 55	6. durum b tipi kontrolcü bode diyagramı.....	84
Şekil 5. 1	A tipi yerleştirme	85
Şekil 5. 2	B tipi yerleştirme	85

TABLO LİSTESİ

Tablo 4. 1	Plak parametreleri.....	18
Tablo 4. 2	Modların doğal frekansları ($\times 10^3$ rad/sn	18
Tablo 4. 3	A tipi eyleyici konumları ve sensör konumları.....	19
Tablo 4. 4	Kapalı çevrim kökleri ($\times 1000$) ve sistem kökleri.....	21
Tablo 4. 5	B tipi eyleyici yerleşimi koordinatları.....	23
Tablo 4. 6	Kapalı çevrim kökleri ve sistem kökleri	25
Tablo 4. 7	A tipi eyleyici konumları ve sensör konumları.....	26
Tablo 4. 8	Kapalı çevrim kökleri ve sistem kökleri	29
Tablo 4. 9	B tipi eyleyici yerleşimi koordinatları.....	30
Tablo 4. 10	Kapalı çevrim kökleri ve sistem kökleri.....	33
Tablo 4. 11	Kapalı çevrim kökleri ve Sistem Kökleri.....	34
Tablo 4. 12	Kapalı çevrim kökleri ve sistem kökleri.....	37
Tablo 4. 13	B tipi eyleyici yerleşimi koordinatları	38
Tablo 4. 14	Kapalı çevrim kökleri ve sistem kökleri.....	41
Tablo 4. 15	A tipi eyleyici konumları ve sensör konumları	42
Tablo 4. 16	B tipi eyleyici yerleşimi koordinatları	46
Tablo 4. 17	Kapalı çevrim kökleri ve sistem kökleri.....	48
Tablo 4. 18	A tipi eyleyici konumları ve sensör konumları	50
Tablo 4. 19	Kapalı çevrim kökleri ve sistem kökleri.....	52
Tablo 4. 20	B tipi eyleyici yerleşimi koordinatları	53
Tablo 4. 21	Kapalı çevrim kökleri ve sistem kökleri.....	56
Tablo 4. 22	A tipi eyleyici konumları ve sensör konumları	57
Tablo 4. 23	Kapalı çevrim kökleri ve sistem kökleri.....	60
Tablo 4. 24	B tipi eyleyici yerleşimi koordinatları	61
Tablo 4. 25	Kapalı çevrim kökleri ve sistem kökleri.....	64
Tablo 4. 26	A tipi eyleyici konumları ve sensör konumları	65
Tablo 4. 27	B tipi eyleyici yerleşimi koordinatları	66
Tablo 4. 28	A tipi eyleyici konumları ve sensör konumları	68
Tablo 4. 29	B tipi eyleyici yerleşimi koordinatları	69
Tablo 4. 30	B tipi eyleyici yerleşimi koordinatları	70
Tablo 4. 31	B tipi eyleyici yerleşimi koordinatları	71

PLAK TİTREŞİMLERİNİN AKTİF KONTROLÜ

Onur TUNA

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Semih SEZER

Bu çalışmada her alanda kullanılan sürekli titreşim altındaki dikdörtgen plakların genliklerinin sönümlenmesi amaçlanmıştır. Öncelikle sönümlenecek plağın geometrik şekli, sınır şartları, bozucu girişin tipi belirlenmiş ardından davranışının modellenmesini sağlayacak plak teorisine karar verilmiştir. Kirchhoff-Love teorisi kullanılarak hareket matematiksel olarak ifade edilmiştir. Elde edilen matematiksel denklem 4. mertebeden 3 değişkene bağlı kısmi diferansiyel denklemdir. Kontrolcü uygulanacak form olan durum-uzay şekline değişkenlerin ayrıştırılması yöntemi ve seri toplamı şeklinde ifade yöntemi kullanılarak dönüştürülmüştür. Bu tez kapsamında plağın dokuz ayrı mod hareketi incelenmiştir. Farklı sayıda piezoelektrik eyleyici ile tam geribeslemeli H-sonsuz kontrolcü uygulanarak her mod sönümlenmeye çalışılmıştır. Çalışmanın devamında piezoelektrik eyleyici yeri değiştirilmiş ve kontrolcü sayısı ile kontrolcü yerleşimi hakkında farklılıklar gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler; H-sonsuz, plak titreşimi, aktif kontrol

Active Control of Plate Vibrations

Onur TUNA

Department of Mechanical Engineering

Master Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Semih SEZER

In this study, it is aimed to dampen the amplitudes of rectangular plates under continuous vibration used in all areas. First of all, the geometric shape of the plaque, boundary conditions, the type of the disturbing entrance were determined and then the plate theory was decided to enable the modeling of its behavior. Movement using the Kirchhoff-Love theory is mathematically expressed. The mathematical equation obtained is the partial differential equation dependent on the 4th order 3 variables. The controller was transformed into a form to be applied to the state-space shape using the method of decomposing variables and serial sum. In this thesis, nine different mode movements of the plate were examined. Each mode was tried to be damped by applying a full feedback H-infinity controller with a different number of piezoelectric actuators. The optimum positioning of the piezoelectric actuator was carried out

Keywords; H-infinity, plate vibrations, active control

1.1 Literatür Özeti

Plak titreşimlerinin kontrolü uçak teknolojisinin yaygınlaşması ve uzay araçlarının gelişmesi ile önem kazanmaktadır. Plakta oluşan düşey titreşimlerin kontrolü düşünüldüğünde bu alandaki çalışmaları pasif ve aktif titreşim kontrolü olarak ayırabiliriz.

(Snowdon, 1975) çalışmasında kenarlarından basit mesnetli bir plağa kütle ekleyerek sönümlemeye çalışmıştır.

Ülkemizde plak titreşimlerinin pasif kontrolü çalışmasını **(Arpacı, 1984)** yapmıştır. Çalışmasının içeriğinde konsol bir plağa kiriş eklenerek frekans yanıtlarını deneysel olarak incelemiştir.

(Elliott, Fuller, & Nelson, 1996) yayınladığı kitapta tek serbestlik dereceli sistem ile başlayarak ince plak titreşimlerinin kontrolünü yapmıştır. LQC, LQR gibi kontrol metotları kullanmış, durum geri beslemeli ve çıkış geri beslemeli durumları incelemiştir.

(Han & Lee, 1999) Makalesinde ise optimizasyon metodu olan genetik algoritmalar yöntemini kullanarak bir kenarı ankastre mesnetli plağın eyleyici konumunun optimizasyonu yapılmıştır.

(Han, Rew, & Lee, 1997) Yaptıkları diğer çalışmada bir kenarı ankastre mesnetli kompozit kirişin LQC ile kontrolünü gerçekleştirmişlerdir.

(Kouhi, Poshtan, & Montazeri, 2007) Bildiri tam metninde kenarlarından basit mesnetli lamine bir alüminyum plağın 0-500 hertz arasındaki ilk 5 frekansını inceleyip bunlara uzamsal H_2 kontrolcü uygulayarak titreşimlerini azaltmıştır.

(Ülker, 2003) Doktora tezinde bir ucundan tutturulmuş kirişin titreşimlerini azaltacak H_∞ kontrolcü tasarımı yapmıştır.

(Leissa, 1969) Klasik plak teorisi kabulü ile bir çok geometrik şekildeki plağın matematiksel incelemesini yapmış ve her sınır şartı için detaylı tablolaştırma yapmıştır.

(Aldraihem, Singh, & Wetherhold, 2000) Sensörlerin boyutu ve piezoelektrik eyleyicilerin konumlarını içeren çalışmada kiriş modelini ele almış ve farklı sınır şartlarındaki durumu sayısal örnekler vererek tablo haline getirmiştir.

(Kim & Junkins, 1991) Yayınladığı çalışmada eyleyicilerin konumlarının kontrol edilebilirliğe etkisini araştırmıştır. Aynı plağa 10 farklı eyleyici konumu için LQC kontrolcü uygulamıştır ve çıkan sonuçları karşılaştırmıştır.

(Malgaca, 2007) Ankastre akıllı yapıların aktif titreşim kontrolünü yapmıştır. Bu yapılar ankastre kiriş, dairesel plak ve dikdörtgensel plaktır. İncelemelerinde önce simülasyon sonra deneysel çalışma yapmıştır.

(Peng, 2005) Genetik algoritma kullanarak plak eyleyicilerinin yer optimizasyonunu gerçekleştirmiştir. Çalışmasının devamında simülasyon programı kullanarak sonuçları kontrol etmiş ve durumları tek grafikte karşılaştırmıştır.

1.2 Tezin Amacı

Düzlemsel taşıyıcı sistem olan plağın titreşimlerinin azaltılması için piezoelektrik eyleyiciler kullanarak kontrolcü tasarımının yapımı amaçlanmıştır. Aktif kontrolcü olarak H sonsuz kontrolcü seçilmiş olup farklı eyleyici yerleşimleri, farklı bozucu girişleri altındaki hem modal hem de toplam titreşim genliklerinin azaltılması amaçlanmıştır. Bu sebeple önce teorik yaklaşımlar incelenecek ardından simülasyon uygulaması yapılacaktır. Son olarak da değişen eyleyici, bozucu, kontrol etkisi tartışılacak ve sonuçlar yorumlanacaktır.

1.3 Hipotez

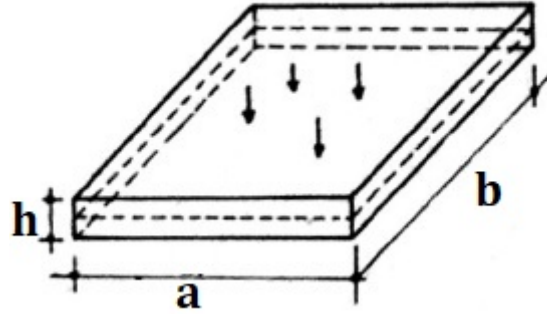
Plak titreşimlerinin kontrolünde eyleyici sayısı ve konumu büyük rol oynamaktadır. Ancak kontrolcü sayısı gözlemlenebilirlik ve kontroledilebilirlik

değerlerini değiştirmektedir. Titreşim kontrolü yaparken karşımıza hangi parametre daha değerli ve etkili sorunu çıkmaktadır. Bunun cevabını verebilmek için bozucu girişi ve kontrol edilecek modları seçmemiz gerekir. Eğer maksimum çökmeyi minimize etmek istiyorsak bire yakın modları analiz etmeli ve kontrolcüyü ona göre tasarlamalıyız ama rezonansa girebileceği düşünülen bir frekans varsa ona yönelmeliyiz. Yine maksimum yer değiştirmeyi mi yoksa noktasal bir çökme bizim için değerliyse ona göre eyleyici yerleşimi yapılmaktadır. Bu tez kapsamında simülasyonla elde edilen değerlere eyleyici sayısı, konumu ve kontrolcü sayısının sonuca ne kadar etki ettiği araştırılacaktır.

2 PLAK TEORİSİ

2.1 Plak Nedir

Tanım 2.1. “Kalınlığı, taşıyıcı boyutlarının yanında çok küçük ve orta düzlemine dik olarak yüklenmiş düzlemsel taşıyıcı sistemlere “plak” denir.” (Berktaş, 1992)



Şekil 2. 1 Plak Şekli ve Kuvvet Doğrultusu

Bir taşıyıcı sisteme plak denebilmesi için boyut şartlarının yanı sıra etkiyen kuvvetlerin orta düzleme dik olması gerekir. Eğer değilse levha adını alır. Elastik yüzey orta düzlemin eğilmesi sayesinde oluşur. Betonarme yapılardaki döşemeler plak cinsinden taşıyıcıya örnek olarak verilebilir.

2.2 Plak Davranışını Modelleyen Teoriler

Plakların davranışlarını anlamak için birçok teori geliştirilmiştir. Bunlar kalın kabuk ve ince kabuk teorisi olarak ikiye ayrılmaktadır. Kalın kabuk teorisi kayma deformasyon etkisini de inceler. Bu sebeple yaklaşım olarak ince kabuğa nazaran gerçeğe daha yakındır.

İnce plak teorisi kuramsal araştırmaları Fransız Matematikçi (Germaine, 1821) ve İngiliz Matematikçi (Love, 1888) tarafından başladığı kabul edilir. Yaptığı çalışmalar sonucunda (Germaine, 1821) Lineer izotropik plak teorisini oluşturmuştur. Love ise

yaptığı bazı kabullerle plağı lineer çözümleme metodunu bulmuştur. İnce kabuk teorisi Kirchhoff yapılan araştırmalar farklılaştıkça daha gerçekçi bir yaklaşım için kayma deformasyonu etkisini ve dönme atalet etkisini içeren bir teori ihtiyacı doğmuştur. (Gol'denveizer, 1961) ince kabuklar ve kısmen kalın kabuklar için çözüm bulabilmişlerdir. Ancak (Timoshenko, 1921), (Reissner, 1945) ve (Mindlin, 1951) kayma deformasyonlarını içeren gerçeğe yakın bir teori oluşturmuşlardır. (Aydın, 2010)

2.3 Kirchhoff-Love Teorisi

İnce kabuk teorisi olarak sınıflandırılır. Orta düzlemin keyfi bir noktasındaki normal üzerinde bulunan bir nokta, deformasyon sonrası oluşan elastik yüzeyin o noktadaki normali üzerinde bulunur. Çubuk sistemlerindeki Bernoulli-Navier hipotezine karşılık gelen Kirchhoff-Love hipotezidir (Berktaş, 1992). Diğer teorilerin geliştirmesine de dayanak olmuştur.

2.3.1 Varsayımlar ve Koordinatlar

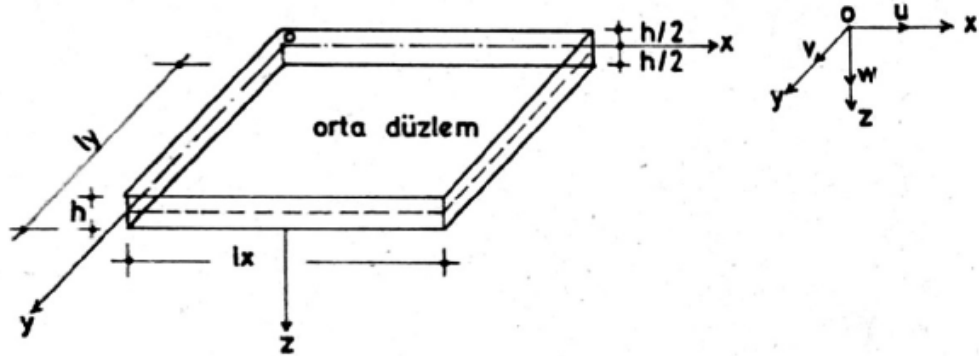
Kirchhoff-Love teorisi plak üzerinde bazı kabullere dayanır. Kabuller (Szilard, 1974) (Kurt, 2010) çalışmasından doğrudan alıntılanmıştır.

- a) Plak malzemesi elastik, homojen ve izotropdur.
- b) Plak başlangıçta düzdür.
- c) Plağın kalınlığı kendini oluşturan diğer kenarlar karşılaştırıldığında yeterince küçüktür.
- d) Plak kalınlığıyla mukayese edildiğinde yer değiştirmeler yeterince küçüktür.
- e) Yer değiştirmiş orta düzlemin eğimleri bütünlüğe nazaran küçüktür.
- f) Deformasyonlar başlangıçta orta düzleme dik düz çizgilerdir ve orta düzleme dik düz çizgiler olarak da kalırlar.
- g) Plağın yer değiştirmesi başlangıç düzlemine dik orta düzlemin noktalarının yer değiştirmesi sonucu oluşur.
- h) Orta düzleme dik gerilmeler ihmal edilir

- i) Düzlem içi kuvvetler tarafından üretilen orta düzlemdeki gerilmeler eğilme sonucu oluşan gerilmelere kıyasla genellikle ihmal edilir.

Yapılan kabullerden sonra koordinat sisteminin nerede olduğu da önemlidir.

Çünkü yapılacak hesaplamalar, verilecek sınır şartları, uygulanacak çözüm yöntemi seçilen koordinat takımının yeri ile anlam kazanacaktır.



Şekil 2. 2 Plak, koordinat eksenleri ve deplasmanları

2.3.2 Plak Denklemleri

Plak diferansiyel denklemlerini elde etmek için çeşitli metotlar vardır.

1. Gerilme, kuvvet ve varsayımlardan gelen eşitliklerini yer değiştirme fonksiyonu şeklinde yazarak biharmonik denklem elde edilebilir,
2. Enerji Metodu

Kirchhoff-Love teorisine göre kenarlarından basit mesnetli plağın diferansiyel ifadesi;

$$D\nabla^2\nabla^2w(x,y,t) = p_z(x,y,t) - \bar{m}\frac{\partial^2w(x,y,t)}{\partial t^2} \quad (2.1)$$

Elde edilen denklemin türü 4. mertebeden 3 değişkene bağlı kısmi diferansiyel denklemdir. Çözümü için kesin ve yaklaşık yöntemler mevcuttur. Ancak hangisinin seçileceği sınır şartına göre belirlenir. Kesin çözüm yapılırken sehim ifadesi zamansal ve uzamsal fonksiyonlar olarak değişkenlerine ayrıştırılabilir kabul edilir.

Daha sonra uzamsal fonksiyonu da 'x' ve 'y' değişkenlerine göre ayrıştırılabilir kabul edilir. Ancak bunun yapılabilmesi için sınır şartlarının uygun olması gerekmektedir.

Hareket denklemini çözmek için kesin ve yaklaşık yöntemler mevcuttur.

Kesin Yöntemler;

- 1) Kapalı Çözüm
- 2) Süperpoze edilmiş özel çözüm
- 3) Çift trigonometrik seri çözümü (Navier Solution)
- 4) Tek trigonometrik seri çözümü (Levy Solution)

Yaklaşık yöntemler;

- 1) Galerkin Metodu
- 2) Rayleigh-Ritz Metodu
- 3) Sonlu Farklar Metodu
- 4) Sonlu Elemanlar Yöntemi

Bu çalışmanın kapsamında kesin çözüm metodu kullanılmış olup navier çift trigonometrik serilerden yararlanılmıştır.

2.3.3 Sınır Şartları

Sınır şartları bir denklemin hangi çözüm yöntemiyle çözüleceğini belirlemektedir. Bazı durumlar için kesin çözümler elde edilirken bazı durumlar için yaklaşık çözüm yöntemleri kullanılır. Yapılan incelemelere göre plağın minimum iki karşılıklı kenarı basit mesnetli olmalıdır ki uzamsal fonksiyon x ve y cinsinden bağımsız değişkenlere ayrıştırılabilsin (Arpacı, 1984). Bu tez kapsamında her kenarından basit mesnetli plak durumu incelenmiştir. Kenarlarından basit mesnetli plağın sınır şartlarının matematiksel ifadesi şu şekildedir.

$$a \geq x \geq 0 \rightarrow W = 0, \quad \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} = 0 \quad (2.2)$$

$$b \geq y \geq 0 \rightarrow W = 0, \quad \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} = 0$$

2.3.4 Navier Çözümü

Navier çözüm yolunun uygulanabilmesi için belli kabullerin yapılması gerekmektedir. Plâğin çökme fonksiyonu görüldüğü üzere x ve y koordinatlarına ve zamanın fonksiyonuna bağlıdır. Daha sonradan da hareket denklemini durum-uzay formuna getirirken de yararlanacağımız kabul şudur, Sehim fonksiyonu zaman ve konum fonksiyonlarına ayrıştırılabilir.

$$w = w(x, y, t) = \phi(t). W(x, y) = \phi. W \quad (2.3)$$

Hareket denkleminde (2.1) yerine yazarsak,

$$\phi D \left(\frac{\partial^4 W}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 W}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 W}{\partial y^4} \right) + \bar{m} W \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = 0 \quad (2.4)$$

Uzamsal sehim fonksiyonunu trigonometrik çift seri açılımı ile ifade edersek,

$$W(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \quad (2.5)$$

$$A_{mn} = \frac{2}{\sqrt{a.b}} \quad (m, n) = 1, 2, 3, \dots$$

Biharmonik denklemdeki türevler alınırsa,

$$\frac{\partial^4 W(x, y)}{\partial x^4} = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left(A_{mn} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \right) \frac{m^4 \pi^4}{a^4} = W_{mn}(x, y) \cdot \frac{m^4 \pi^4}{a^4} \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial^4 W(x, y)}{\partial y^4} = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} (A_{mn} \sin(\frac{m\pi x}{a}) \sin(\frac{n\pi y}{b})) \frac{n^4 \pi^4}{b^4} = W_{mn}(x, y) \cdot \frac{m^4 \pi^4}{b^4} \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial^4 W(x, y)}{\partial x^2 \partial y^2} = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} (A_{mn} \sin(\frac{m\pi x}{a}) \sin(\frac{n\pi y}{b})) \frac{m^2 n^2 \pi^4}{a^2 b^2} = W_{mn}(x, y) \cdot \frac{m^2 n^2 \pi^4}{a^2 b^2} \quad (2.8)$$

bu adımdan sonra m ve n değerleri modları ifade edecek ve işlemler modlara ayrılarak yapılacaktır. Biharmonik denklemde yerine yazılırsa;

$$W_{mn}(x, y) \cdot \left(D \left(\frac{m^4 \pi^4}{a^4} + 2 \frac{m^2 n^2 \pi^4}{a^2 b^2} + \frac{n^4 \pi^4}{b^4} \right) \phi_{mn}(t) + \bar{m} \phi_{mn}''(t) \right) = 0 \quad (2.9)$$

Eşitliği elde edilir. Doğal frekans formülü ile benzerlik göstermektedir.

$$\omega_{mn} = \pi^2 \left[\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right] \sqrt{\frac{D}{\bar{m}}} \quad (m, n = 1, 2, 3 \dots) \quad (2.10)$$

Gerekli düzenlemeler yapılırsa görülüyor ki,

$$W_{mn}(x, y) \cdot (\bar{m} \cdot \phi_{mn}''(t) + \omega_{mn}^2 \cdot \phi_{mn}(t)) = 0 \quad (2.11)$$

“x” ve “y” değişkenlerine bağlı kısmi türevli ifadeler başlangıçta verilen fonksiyon ifadesine göre düzenlendiğinde kısmi türevler kalmamaktadır. Bu özellik, durum uzay formu elde edilmesi ve kontrol uygulanması sırasında yardımcı olacaktır.

Oluşturduğumuz ve düzenleme yapılan denklemler bozucu girişin olmadığı homojen kısımdır. Sisteme bozucu girişi nokta kuvvet olarak eklersek denklem şu hali alacaktır.

$$\rho \cdot h \cdot \phi_{mn}''(t) + D \cdot \pi^4 \cdot \left[\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right]^2 \cdot \phi_{mn}(t) = F(t) W_{mn}(x_i, y_i) \quad (2.12)$$

Kuvvet ifadesi konum ve zaman değişkenlerini içerdiğinde;

$$F = F(t).W_{mn}(x_i, y_i), \quad W_{mn}(x_i, y_i) = \frac{2}{\sqrt{a.b}} \sin\left(\frac{m\pi x_i}{a}\right) \cdot \sin\left(\frac{n\pi y_i}{b}\right) \quad (2.12)$$

olmaktadır. Burada seçilen fonksiyon çözülebilmesi için biharmonik denklemdeki fonksiyonla uyumlu olmalıdır.

Değişkenlerine ayırdığımız haldeki denklemin kuvvet eklenmiş hali uygulamada esas olarak kullanacağımız formül olacaktır. Fakat seçtiğimiz H sonsuz gürbüz kontrolcünün uygulanması sebebiyle bu denklemi durum uzay formuna çevrilmesi gerekmektedir.

$$\rho.h.\phi_{mn}''(t) + D.\pi^4.\left[\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}\right]^2 \cdot \phi_{mn}(t) = F(t)W_{mn}(x_i, y_i) \quad (2.13)$$

2.3.5 Durum Uzay Formu

Modern kontrol ve optimal kontrol yöntemleri klasik kontrolün aksine 's' domaininde değil zaman düzleminde işlem yapmaktadır. Eğer PID kontrolcü uygulanacak olsaydı sistemin diferansiyel denkleminin ve kuvvet ifadesinin laplace dönüşümü yapılacaktı. Uygulayacağımız yöntem H sonsuz olduğu için öncelikle durum uzayı formu elde edilmesi gerekmektedir.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2.14)$$

$$y = Cx + Du$$

Durum uzayı formunun sağladığı en önemli kazanım sistemin kutuplarını A matrisinin özdeğerleri incelendiğinde bulunabilmesidir. Elde edilen kökler negatif reel eksen üzerinde ise kararlı, Pozitif reel eksen üzerinde ise kararsızdır. Köklerin reel değerleri 0 olması durumda marjinal kararlı olmaktadır ve istenmeyen bir durumdur.

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} \ddot{\phi}_{11}(t) \\ \ddot{\phi}_{21}(t) \\ \ddot{\phi}_{31}(t) \\ \vdots \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_{11}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_{21}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \omega_{31}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{11}(t) \\ \phi_{21}(t) \\ \phi_{31}(t) \\ \vdots \end{bmatrix} \\
&= \frac{1}{\rho \cdot h} \begin{bmatrix} F_1 W_{11}(x_1, y_1) + F_2 W_{11}(x_1, y_1) + \dots \\ F_1 W_{21}(x_1, y_1) + F_2 W_{21}(x_1, y_1) + \dots \\ F_1 W_{31}(x_1, y_1) + F_2 W_{31}(x_1, y_1) + \dots \\ \vdots \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{2.15}$$

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} \dot{\phi}_{11} \\ \dot{\phi}_{21} \\ \dot{\phi}_{31} \\ \vdots \\ \ddot{\phi}_{11} \\ \ddot{\phi}_{21} \\ \ddot{\phi}_{31} \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -\omega_{11}^2 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & -\omega_{21}^2 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & -\omega_{31}^2 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{11} \\ \phi_{21} \\ \phi_{31} \\ \vdots \\ \dot{\phi}_{11} \\ \dot{\phi}_{21} \\ \dot{\phi}_{31} \\ \vdots \end{bmatrix} \\
& + \frac{1}{\rho h} \begin{bmatrix} 0 & \dots \\ 0 & \dots \\ 0 & \dots \\ \vdots & \dots \\ W_{11}(x_i, y_i) & \dots \\ W_{21}(x_i, y_i) & \dots \\ W_{31}(x_i, y_i) & \dots \\ \vdots & \vdots \end{bmatrix} [u]
\end{aligned} \tag{2.16}$$

$$\begin{aligned}
& y(t) = \begin{bmatrix} [0]_{9 \times 9} & I_{9 \times 9} \\ [-\omega^2]_{9 \times 9} & [0]_{9 \times 9} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{11} \\ \phi_{21} \\ \phi_{31} \\ \vdots \\ \dot{\phi}_{11} \\ \dot{\phi}_{21} \\ \dot{\phi}_{31} \\ \vdots \end{bmatrix}_{18 \times 1}, \phi(t)W(x, y) = \phi W_{mn}(x_{in}, y_{in}) \\
&= \frac{2}{\sqrt{a \cdot b}} \sin\left(\frac{m\pi x_{in}}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y_{in}}{b}\right)
\end{aligned} \tag{2.17}$$

3.1 Kontrol Teorisi Tarihi

Denetim sistemleri geçmişten günümüze geniş bir kullanım alanına yayılmıştır. İlk örnekleri ilkel olmasına rağmen kendi başına iş görme mantığına göre kullanılıyordu. Medeniyet geliştikçe insanlığın ihtiyacı olan makineler ve sistemler değişmiş ve tarihsel olarak denetim sistemleri de buna paralel gelişme göstermiştir. Bilişsel devrimleri tarım, sanayi ve yazılım olarak sınıflandırırsak her döneme ait farklı ihtiyaçlar oluşmuştur. Tarım devrimini ele aldığımızda ekilen yerin ve yerleşim yerlerinin su ihtiyacı ortaya çıkmış, şehre su sağlamak için kemerler, sulama sistemleri inşa edilmiştir. Su kemerlerindeki suyun seviyesini sabit tutacak kontrolcü sistemleri mekanik olarak İskenderiyeli Ktesbios tarafından MÖ 285-247 yılları arasında bulunduğu bilinmektedir (Yüksel, 2014). Yine insanlığın varoluşundan beri zaman kavramı hep bir merak konusu olmuştur. Kimi alimler ve bilim insanları zamanın anlamı ve sürekliliği hakkında düşünmüş bu sebeple ay güneş ve dünyanın hareketlerini incelemişlerdir. Fakat bilişsel devrimler sırasıyla geldikçe üretim sürekli hale gelmiş ve enlemden, boylamdan mevsime göre değişen güneş saati yerine günü tam olarak istenen aralığa bölebilecek saatler icat edilmiştir. Sanayi devrimine gelmeden yine İskenderiyeli Ktesbios su saati üretmiş ve icadında denetleyici sistemler kullanmıştır. (Yüksel, 2014). 16. Yüzyıla gelindiğinde sanayi devriminin başlarında enerji aktarımı için buhar önemli bir yere sahip olmuştur. Buhar kazanlarındaki basıncın kontrol edilmesi sistemin çalışabilmesi için gereklidir. Fransız D. Papin (1647-1712) ürettiği kontrolcü sistemi ile mümkün olmuştur. Endüstriyel anlamda geri beslemeli denetim sistemini ilk kez James Watt (1769) geliştirmiştir. Watt'ın icadı buhar makinasına akışı ayarlayıp yük değişimlerine rağmen makinenin sabit hıza çalışmasına olanak vermektedir (Yüksel, 2014). Sanayi devrimi ile birlikte mekanik alanlarda kontrolcü sistemi

kullanımı yaygınlaşmıştır. 19. Yüzyıla gelindiğinde diferansiyel olarak kontrolcü sistemin kuramsal çözümü yapılmıştır.

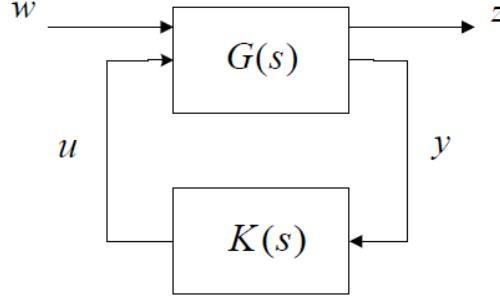
3.2 Kontrol Yöntemleri

Kontrol yöntemleri geçmişten günümüze gelişerek çeşitlenmektedir. Kullanılan yöntemleri genel olarak 2 ana başlıkta inceleyebiliriz. (Özkan, 2009)

- 1) Model Tabanlı Kontrol Metotlar
 - a. Klasik Kontrol Yöntemi
 - b. Modern Kontrol Yöntemi
 - c. Gürbüz Kontrol Yöntemi
- 2) Model Tabanlı olmayan Kontrol Metotları
 - a. Yapay Sinir Ağları Esaslı Kontrol Yöntemi
 - b. Bulanık Mantık Esaslı Kontrol Yöntemi

Klasik kontrol yöntemleri 1930'lara kadar endüstrinin bir çok alanında yaygın bir şekilde kullanılmaktaydı. Klasik kontrol yöntemleri SISO sistemlerde yani tek giriş tek çıkışlı sistemlerde kolayca uygulanabilmektedir. Temel olarak referans girişi ve çıkış hatası ve bu değerlerin türev integral değerleri baz alınarak genlik ve elde edilen kazanç değeriyle çarpılarak kontrol işlemi gerçekleştirilir (Özkan, 2009). Diferansiyel denklemlerin çözümünü kolaylaştırmak için sistem denklemleri, bozucu girişin ifadesi zaman değişkeninden laplace dönüşümü yapılarak işlemler 's' değişkenine çevrilir ve işlemler burada gerçekleştirilir. Gerek kullanılan sistemlerin gelişmesi ve gerek uzay çalışmalarının hız kazanmasıyla MIMO çoklu giriş ve çoklu çıkış ihtiyacı doğmuştur. Bu tür sistemlerin kontrolü amacıyla Modern kontrol teorisi geliştirilmiştir. Maalesef ki modern kontrol yöntemi de parametre değişiklikleri ve belirsiz değerler için kararlı sonuçlar vermemektedir. Bu sebeple Robust Kontrol Metodu 1980'li yıllarda geliştirilmeye başlanmıştır. H_2 veya H_∞ normuna göre kontrolcü tasarımı yapılmaktadır.

3.3 H_∞ Kontrolcü



Şekil 3. 1 Blok diyagramı gösterimi

H_∞ kontrolün temelini oluşturan H uzayları Godfrey Harold Hardy tarafından oluşturulmuştur. Kontrol alanında kullanılmaya başlanması 1970'li yıllara dayanmaktadır. “ H_∞ doğrusal vektör uzayı, sağ yarı açık s düzleminde analitik, ... ile verilen norma göre sınırlı olan fonksiyonların oluşturduğu L_∞ Banach uzayının kapalı bir alt uzayıdır. Bu uzayda tanımlı olan norma H_∞ normu denir. ” (Yazıcı, 2011)

$$\|G(s)\|_\infty = \sigma_{\max}(G(jw)) \quad (3.1)$$

Norm, matris ve vektör gibi bir çok bileşene sahip bir matematiksel ifadenin bir skaler ile ifade edilmesidir. $\|\cdot\|$ ifadesinin norm olabilmesi belli şartlara bağlıdır:

$$\|\cdot\| \geq 0 \quad (3.2)$$

$$\|x\| = 0, \quad x = 0$$

$$\|ax\| = |a| \cdot \|x\|$$

$$\|x + y\| = \|x\| + \|y\|$$

H sonsuz kontrolcü uygulanacak sistemin özelliğine göre kullanılacak matematiksel yöntem değişmektedir. Sistem parametrelerinin değişken veya lineer olup olmamasına göre sınıflandırabiliriz. Durum uzayı formundan ifade edilirse, A matrisinin zamandan bağımsız olması sistem parametrelerinin değişken olmadığı

anlamı taşımaktadır. Bu tip sistemlere LTI (Linear Time Invariant) doğrusal zamandan bağımsız adı verilmektedir. A matrisinin zamana bağlı olduğunu durum ise LTV (Linear Time Variant) olarak adlandırılmaktadır. Bu tip durumlara örnek olarak hareketi sırasında kütlesi büyük oranda değişen roket veya uçak verilebilir. H sonsuz kontrolcü işleminin doğrudan uygulanabilmesi için sistemin lineer olması gerekmektedir. Lineer olmayan sistemler ise lineerleştirme işlemi yapıldıktan sonra kontrol uygulaması yapılır. Klasik kontrol yönteminin aksine analizler zaman düzleminde yapılır. Bir diğer avantajı diferansiyel denklemin çözümlenmesine gerek kalmadan A matrisinin öz değerlerine bakılarak sistemin kutupları yani kararlılığı hakkında bilgi vermesidir.

H sonsuz normunu bulmak için yaygınca kullanılan yöntemler,

- Ortay (Bisection)
- Doğrusal Matris Eşitsizlikleri (LMI)
- Cebirsel Ricatti Eşitsizliği

Tez kapsamında incelenen plak denklemleri doğrusal zamanla değişmeyen bir sistem olarak sınıflandırılmaktadır. Buna uygun H_∞ kontrolcü tasarımı yapılacağı için norm hesaplamasında bu durum dikkate alınacaktır. $x(t)$ durum değişkenleri,

w(t) bozucu girişler olmak üzere A matrisi durum matrisidir. z(t) performans çıkışlarını göstermektedir.

$$\dot{x} = Ax(t) + B_1u(t) + B_2w(t) \quad (3.3)$$

$$z(t) = C_1x(t) + D_1u(t) + D_2w(t)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_{11} \\ \dot{\phi}_{21} \\ \dot{\phi}_{31} \\ \vdots \\ \ddot{\phi}_{11} \\ \ddot{\phi}_{21} \\ \ddot{\phi}_{31} \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 & 0 & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 & 0 & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 1 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -\omega^2_{11} & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots \\ 0 & -\omega^2_{21} & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots \\ 0 & 0 & -\omega^2_{31} & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{11} \\ \phi_{21} \\ \phi_{31} \\ \vdots \\ \ddot{\phi}_{11} \\ \ddot{\phi}_{21} \\ \ddot{\phi}_{31} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$+ \frac{1}{\rho h} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ W_{11}(x_b, y_b) \\ W_{21}(x_b, y_b) \\ W_{31}(x_b, y_b) \\ \vdots \end{bmatrix} [u] + \frac{1}{\rho h} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ W_{11}(x_i, y_i) \\ W_{21}(x_i, y_i) \\ W_{31}(x_i, y_i) \\ \vdots \end{bmatrix} [w]$$

3.3.1 LMI ile H_∞ Normunun Hesaplanması

H sonsuz normunun bulunmasında tez kapsamında bu yöntemden yararlanılacaktır. Aşağıdaki eşitsizlik kurulur ve γ 'nın optimizasyonu yapılmaya çalışılır.

$$\begin{bmatrix} AX + XA^T + B_2W + W^T B_2^T & B_1 & XC_1^T + W^T D_{12}^T \\ B_1^T & -\gamma I & D_{11}^T \\ C_1X + D_{12}W & D_{11} & -\gamma I \end{bmatrix} < 0 \quad (3.5)$$

Bu işlem matematiksel olarak zor olduğu için Matlab'in Yalmip toolbox'ını kullandım. (Löfberg, 2-4 September 2004) Makalesinde kendi yazdığı Yalmip toolbox'ının yarı belirli programlama olduğundan bahsetmektedir. Ricatti denkleminin çözümünden yararlanmaktadır. Konvex optimizasyon yöntemini kullanmaktadır. Kullanılan Sedumi-Yalmip kodlarına github sitesinden ulaşılabilir.

Kapalı çevrimin durum uzay formu ifadesi;

$$\dot{x} = (A + B_2 * K)x(t) + B_1 u(t) \quad (3.6)$$

şeklinde yazılır.

SAYISAL UYGULAMALAR

Kenarlarından basit mesnetli dikdörtgen alüminyum plak sırasıyla birim basamak fonksiyonu, sinüs bozucu girişleri altında h sonsuz kontrolcü ile aktif kontrol sağlanmaya çalışılmıştır. Plak parametreleri (Kurt, 2010) tezinde ele alınan değerler olup tabloda verilmiştir.

Tablo 4. 1 Plak parametreleri

Uzunluk, a (x eksen üzerinde)	Genişlik, b (y eksen üzerinde)	Kalınlık h	Elastiklik modülü, E	Yoğunluk, ρ	Poisson Oranı, ν
300 mm	200 mm	1,4 mm	71 Gpa	2705 kg/m ³	0,33

Tablo 4. 2 Modların doğal frekansları ($\times 10^3$ rad/sn

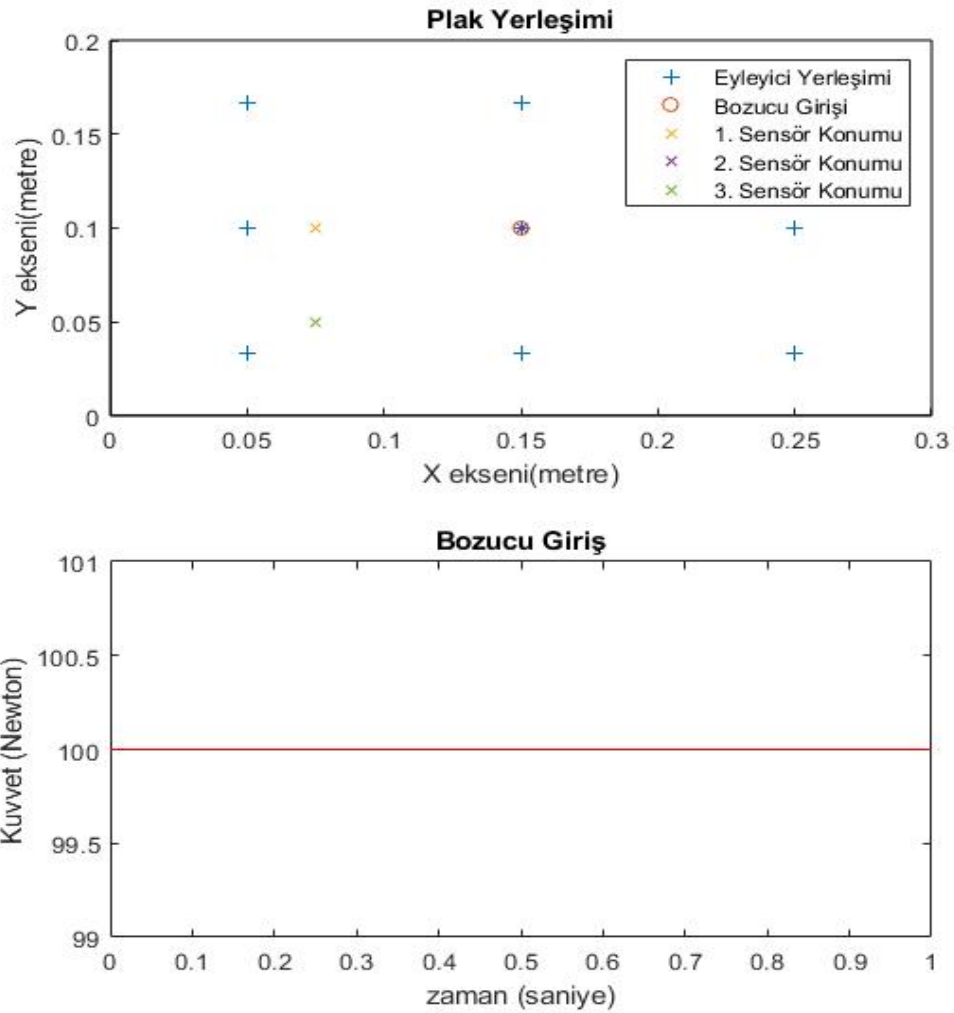
n\m	1	2	3
1	0.7817	2.4053	5.1114
2	1.5033	3.1269	5.8330
3	2.7060	4.3296	7.0356

1. Durum: Tek Kontrolcülü Merkezden Etkiyen Step Input

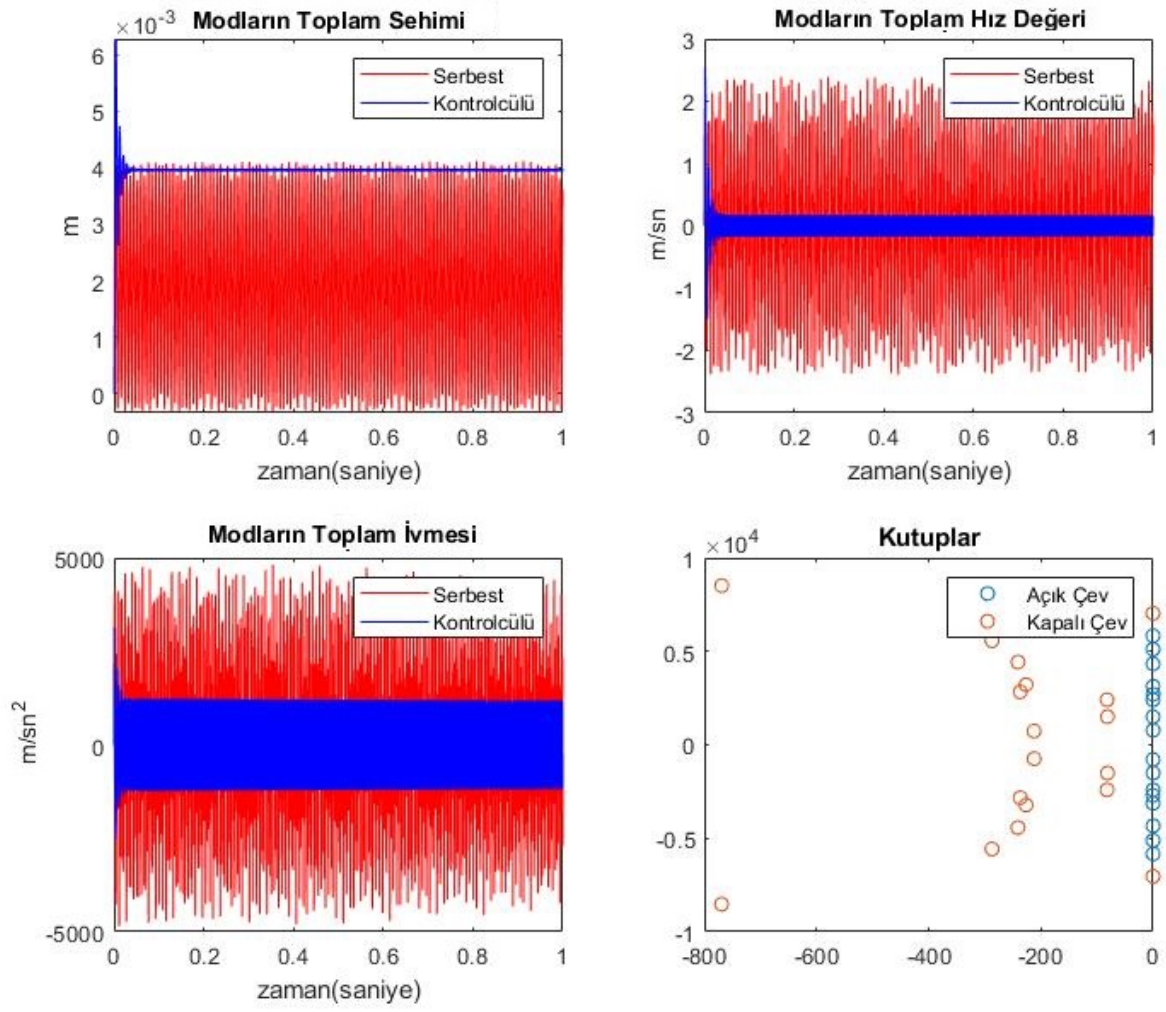
a) A tipi Yerleşim Eyleyici Yerleşimi

Tablo 4. 3 A tipi eyleyici konumları ve sensör konumları

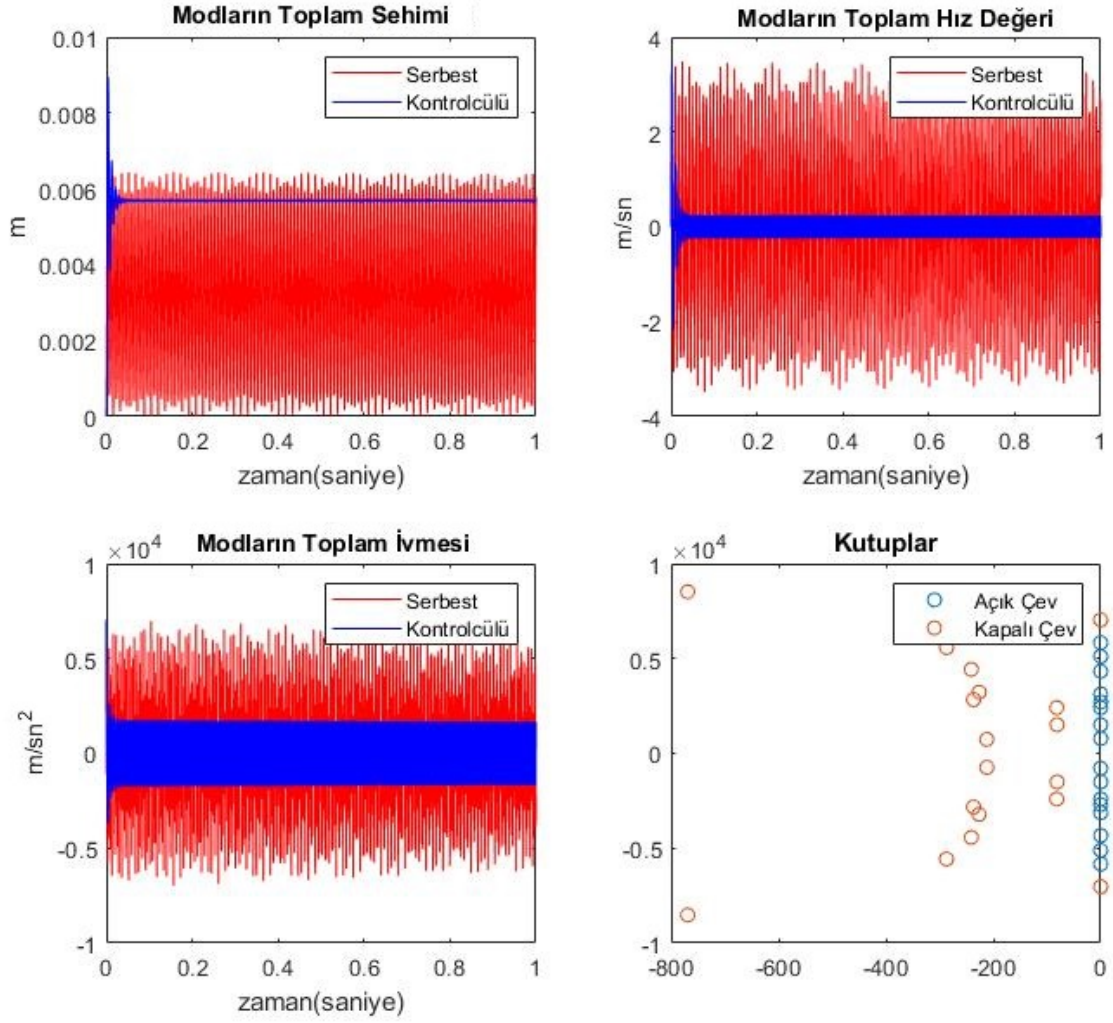
Koordinatlar	1. Eyleyici	2. Eyleyici	3. Eyleyici	4. Eyleyici	5. Eyleyici	6. Eyleyici	7. Eyleyici	8. Eyleyici	1. Sensör	2. Sensör
X eksen (m)	0.05	0.05	0.05	0.15	0.15	0.15	0.25	0.25	0.075	0.15
Y eksen (m)	0.03	0.1	0.1667	0.0333	0.1	0.1667	0.0333	0.1	0.1	0.1



Şekil 4. 1 Plak boyutları, eyleyici tipi, bozucu giriş ve sensörlerin gösterimi



Şekil 4. 2 A tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 1. sensör değerleri



Şekil 4. 3 A tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 2. sensör değerleri

Tablo 4. 4 Kapalı çevrim kökleri (x1000) ve sistem kökleri

Kapalı Çevrim Kutupları	Sistemin Kutupları
-0.7691 + 8.5207i	0.0000 + 0.7817i
-0.7691 - 8.5207i	0.0000 - 0.7817i
-0.2871 + 5.5703i	0.0000 + 5.1114i
-0.2871 - 5.5703i	0.0000 - 5.1114i
-0.2410 + 4.4298i	0.0000 + 3.1269i
-0.2410 - 4.4298i	0.0000 - 3.1269i
-0.2121 + 0.7394i	0.0000 + 2.7060i
-0.2121 - 0.7394i	0.0000 - 2.7060i
-0.0812 + 1.5074i	0.0000 + 7.0356i

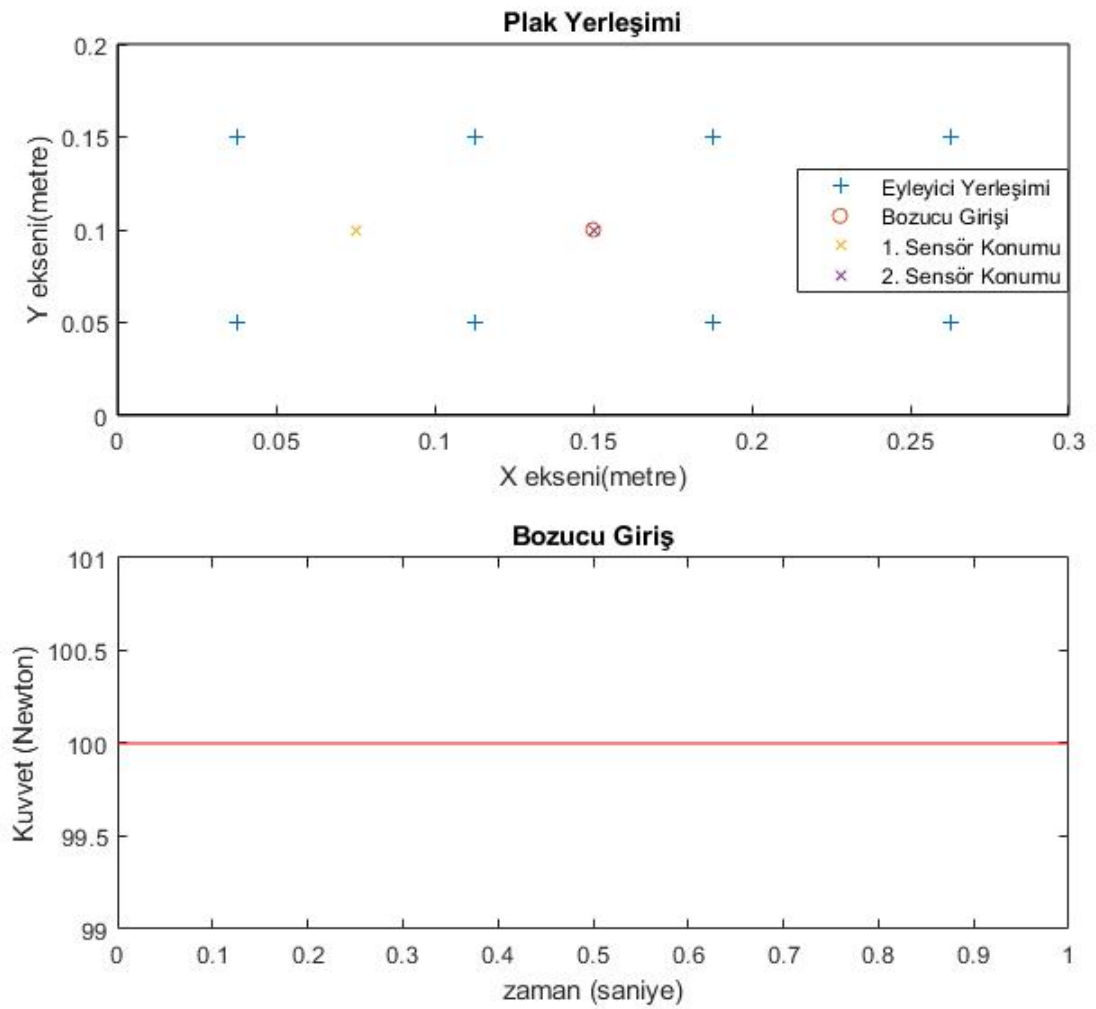
-0.0812 - 1.5074i	0.0000 - 7.0356i
-0.2264 + 3.2189i	0.0000 + 2.4053i
-0.2264 - 3.2189i	0.0000 - 2.4053i
-0.2368 + 2.8314i	0.0000 + 1.5033i
-0.2368 - 2.8314i	0.0000 - 1.5033i
-0.0819 + 2.4074i	0.0000 + 5.8330i
-0.0819 - 2.4074i	0.0000 - 5.8330i
-0.0000 + 7.0356i	0.0000 + 4.3296i
-0.0000 - 7.0356i	0.0000 - 4.3296i

Kontrolcü uygulanmadığında sistemin kutupların reel değeri sıfırdı. Marjinal kararlı denilen bu durum parametre değışikliklerine dayanıklı değildir. Bu sebeple istenmeyen durumdur. Tablodan görüldüğü üzere sistemin kutupları kontrolcü uygulandıktan sonra negatif reel eksene taşınmış oldu. Sistemimiz kararlı durumda.

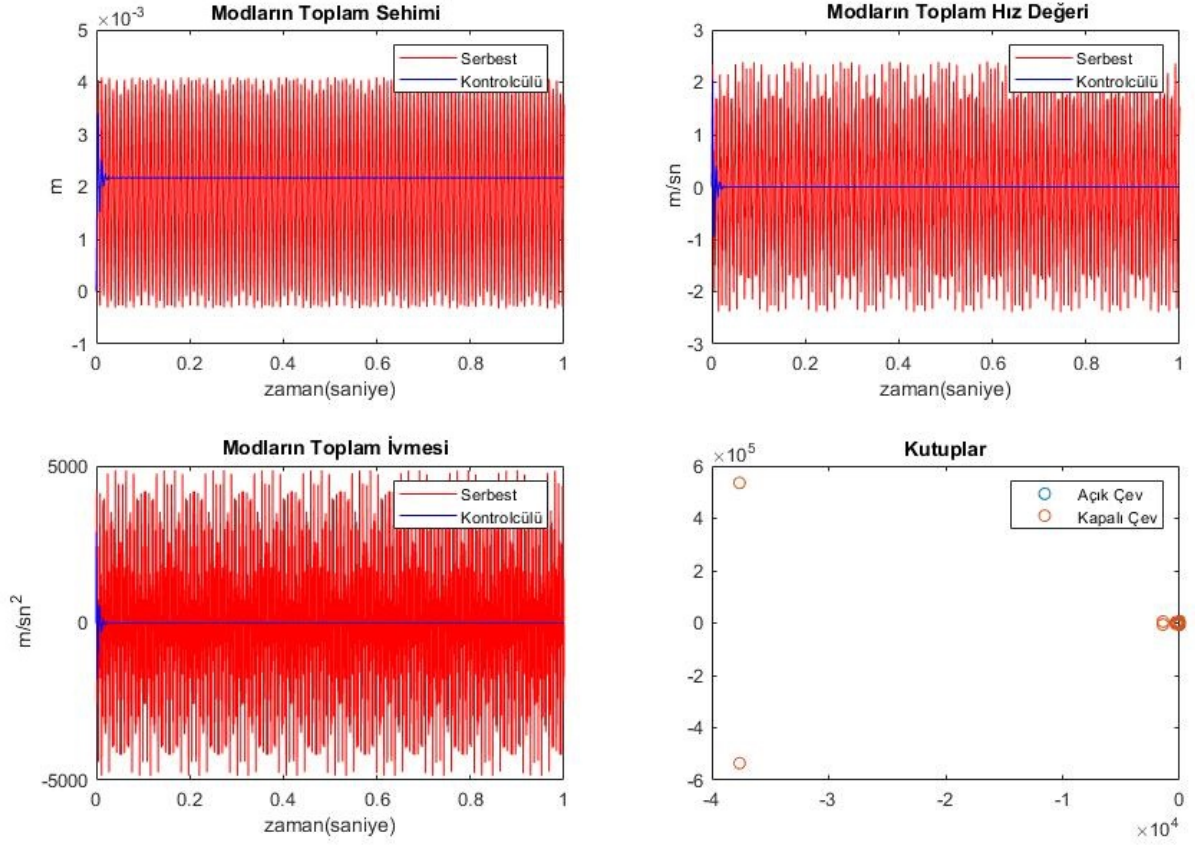
b) B tipi Yerleşim Eyleyici Yerleşimi

Tablo 4. 5 B tipi eyleyici yerleşimi koordinatları

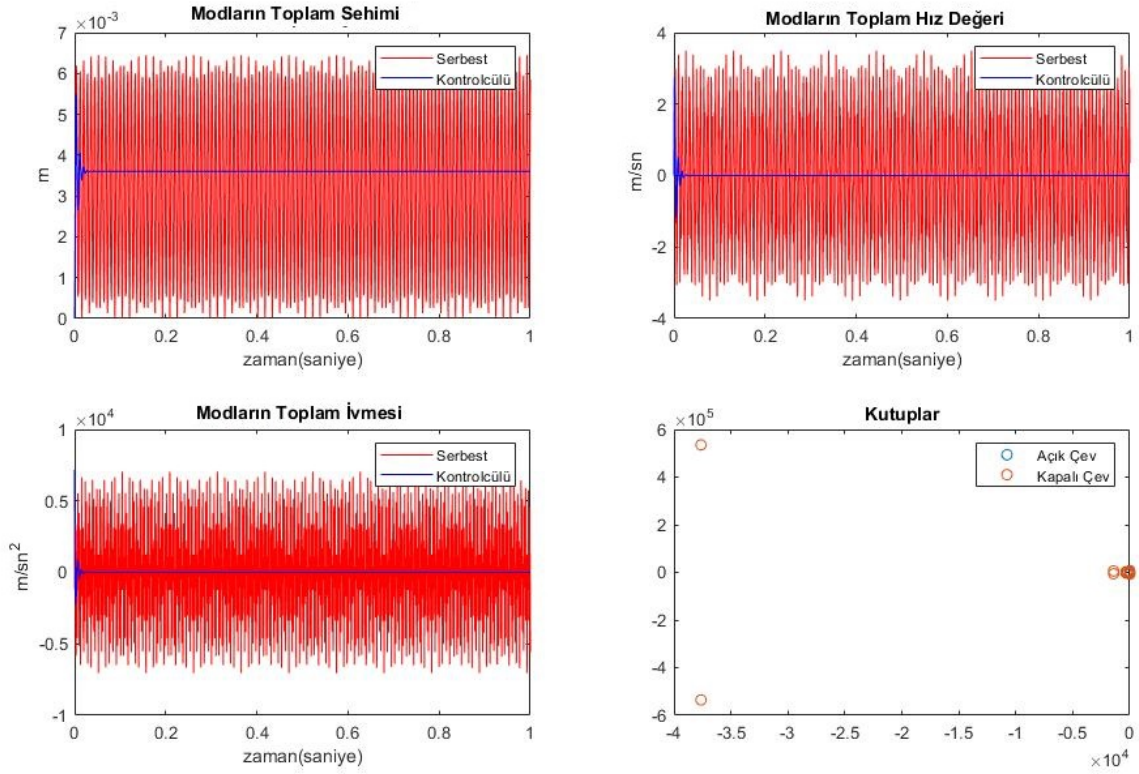
Koordinatlar	1. Eyleyici	2. Eyleyici	3. Eyleyici	4. Eyleyici	5. Eyleyici	6. Eyleyici	7. Eyleyici	8. Eyleyici	1. Sensör	2. Sensör
X eksen (metre)	0.0375	0.1125	0.0375	0.1125	0.1875	0.1875	0.2625	0.2625	0.075	0.15
Y eksen (metre)	0.05	0.05	0.15	0.15	0.05	0.15	0.05	0.15	0.1	0.1



Şekil 4. 4 Plak boyutları, eyleyici tipi, bozucu giriş ve sensörlerin gösterimi



Şekil 4. 5 B tipi yerleştirilen eyleyicilerin step bozucu giriş altındaki serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 1. sensör değerleri



Şekil 4. 6 B tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 2. sensör değerleri

Tablo 4. 6 Kapalı çevrim kökleri ve sistem kökleri

Kapalı Çevrim Kutupları	Sistemin Kutupları
-37624.6891055831 + 535329.394583129i	0.0000 + 0.7817i
-37624.6891055831 - 535329.394583129i	0.0000 - 0.7817i
-1413.09029028022 + 5867.95202237320i	0.0000 + 5.1114i
-1413.09029028022 - 5867.95202237320i	0.0000 - 5.1114i
-179.574255533273 + 801.937210603823i	0.0000 + 3.1269i
-179.574255533273 - 801.937210603823i	0.0000 - 3.1269i
-325.611045078027 + 2785.46318678261i	0.0000 + 2.7060i
-325.611045078027 - 2785.46318678261i	0.0000 - 2.7060i
-5.68434188608080e-13 + 5833.00000000000i	0.0000 + 7.0356i
-5.68434188608080e-13 - 5833.00000000000i	0.0000 - 7.0356i
-9.10375774765271e-10 + 2405.30000000000i	0.0000 + 2.4053i
-9.10375774765271e-10 - 2405.30000000000i	0.0000 - 2.4053i
-1.19015908239817e-13 + 1503.30000000000i	0.0000 + 1.5033i
-1.19015908239817e-13 - 1503.30000000000i	0.0000 - 1.5033i
-5.68434188608080e-14 + 3126.90000000000i	0.0000 + 5.8330i
-5.68434188608080e-14 - 3126.90000000000i	0.0000 - 5.8330i

-3.41060513164848e-13 + 4329.600000000000i	0.0000 + 4.3296i
-3.41060513164848e-13 - 4329.600000000000i	0.0000 - 4.3296i

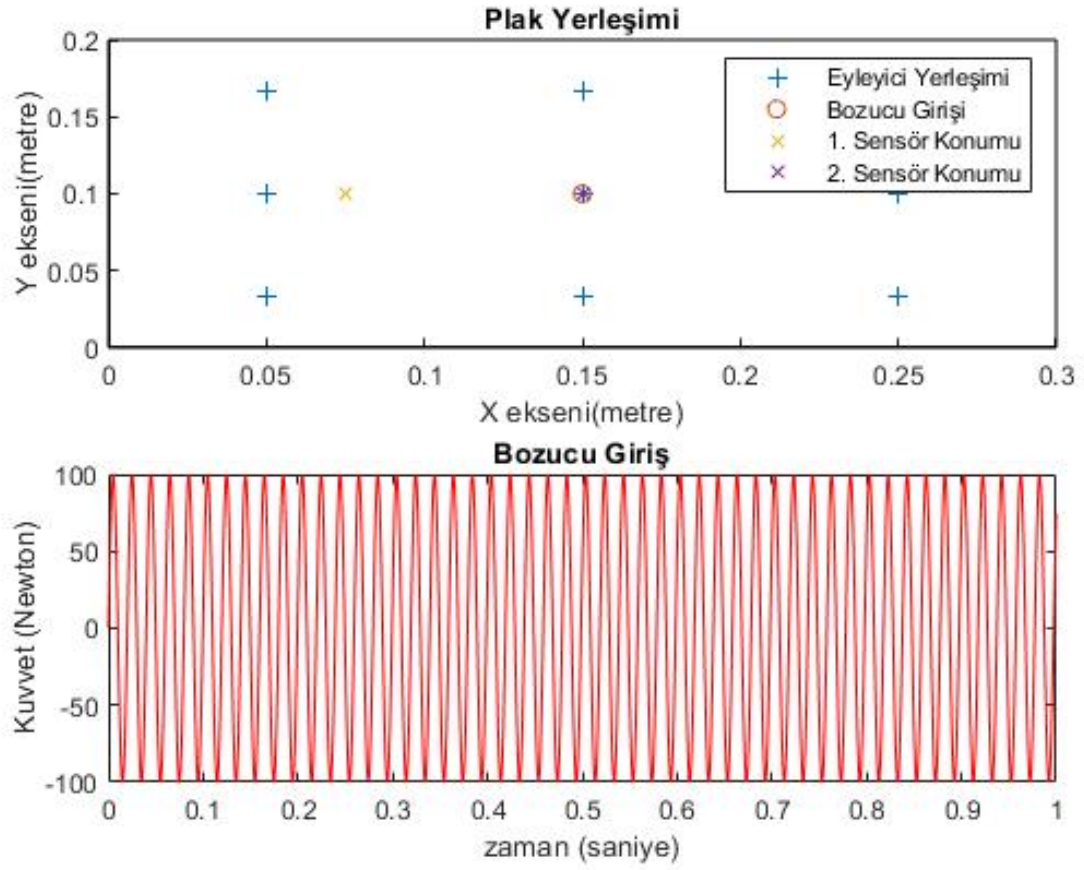
Yine tabloya bakıldığında köklerin reel kısımları negatif tarafa ötelenmiş olduğu gözükmemektedir. Sistemimiz kararlı halde.

2. Durum: Tek Kontrolcülü Merkezden Etkiyen Sinus Input

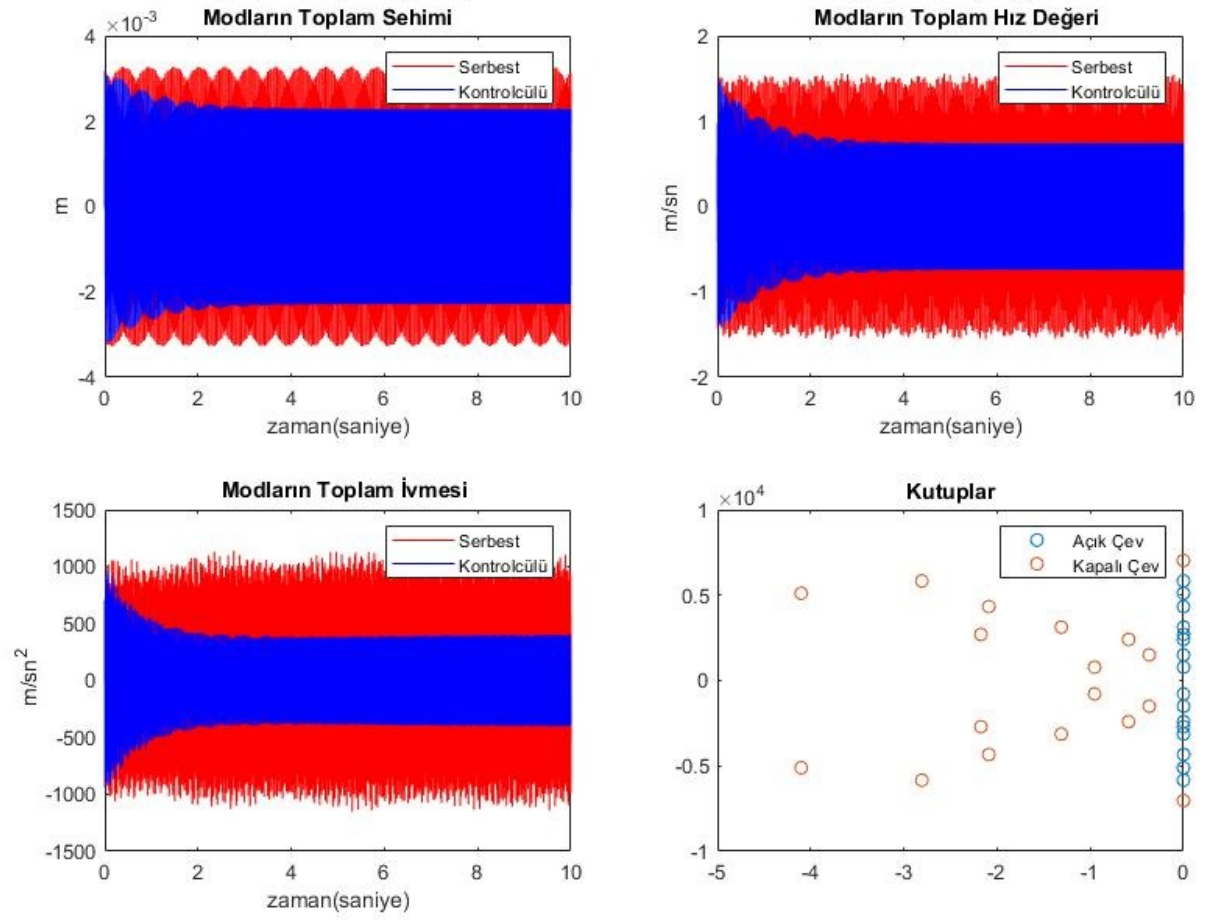
a) A tipi Yerleşim Eyleyici Yerleşimi

Tablo 4. 7 A tipi eyleyici konumları ve sensör konumları

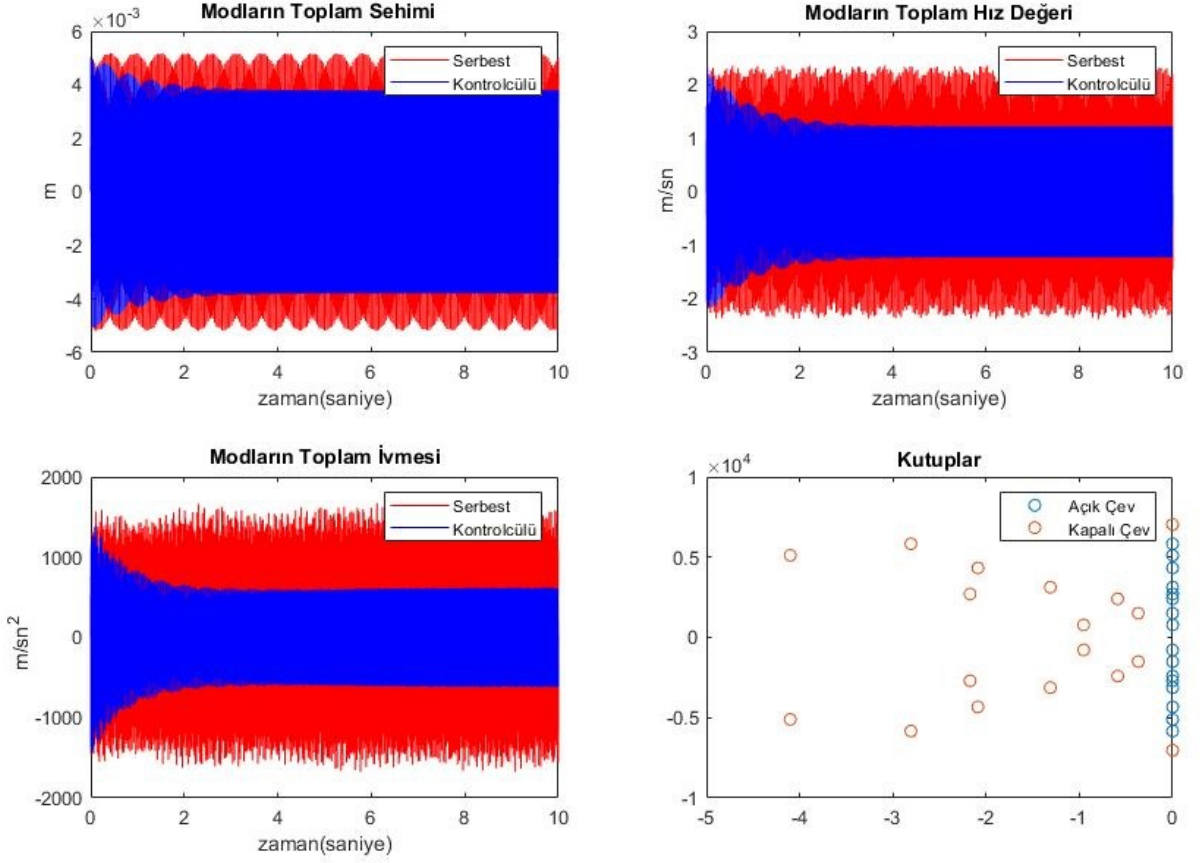
Koordinatlar	1. Eyleyici	2. Eyleyici	3. Eyleyici	4. Eyleyici	5. Eyleyici	6. Eyleyici	7. Eyleyici	8. Eyleyici	1. Sensör	2. Sensör
X eksen (m)	0.05	0.05	0.05	0.15	0.15	0.15	0.25	0.25	0.075	0.15
Y eksen (m)	0.03	0.1	0.1667	0.0333	0.1	0.1667	0.0333	0.1	0.1	0.1



Şekil 4. 7 Plak boyutları, eyleyici tipi, bozucu giriş ve sensörlerin gösterimi



Şekil 4. 8 A tipi yerleştirilen eyleyicilerin sinüs bozucu giriş altında serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 1. sensör değerleri



Şekil 4. 9 A tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 2. sensör değerleri

Tablo 4. 8 Kapalı çevrim kökleri ve sistem kökleri

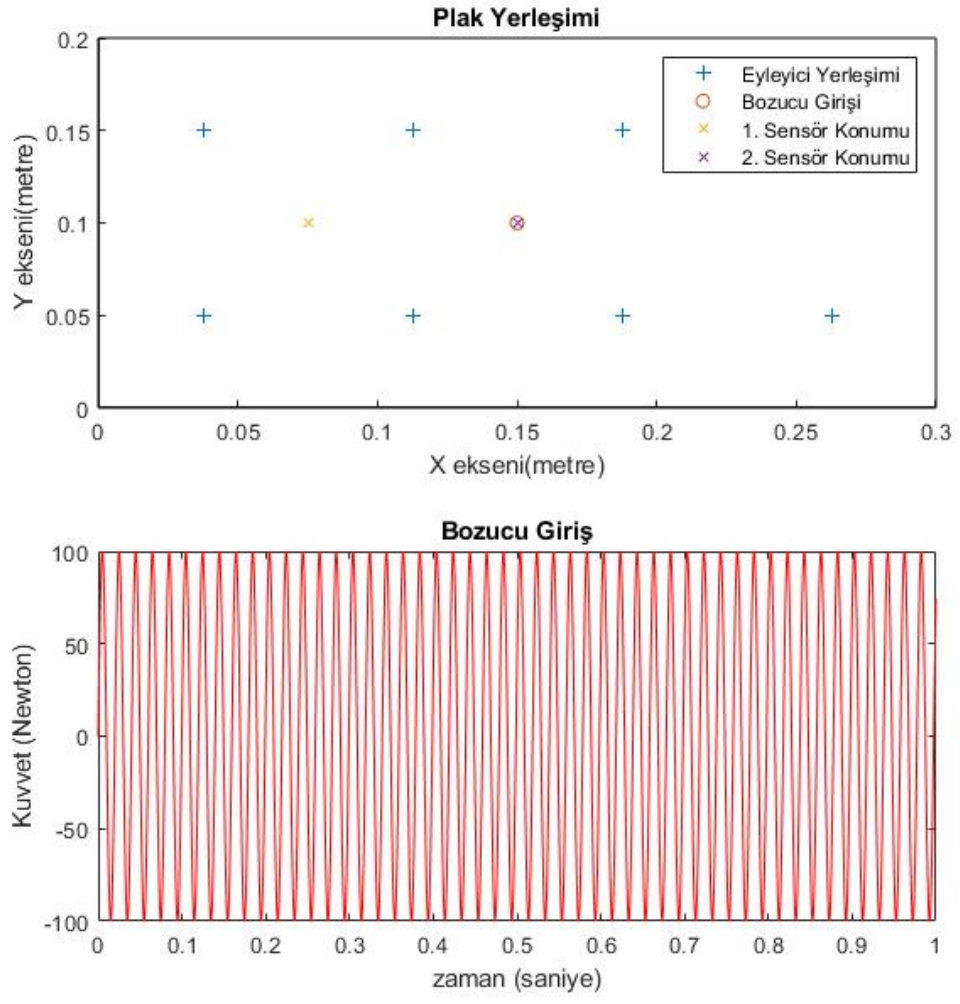
Kapalı Çevrim Kutupları	Sistemin Kutupları
-2.80683431955123 + 5832.68857945907i	0.0000 + 0.7817i
-2.80683431955123 - 5832.68857945907i	0.0000 - 0.7817i
-4.10084924963692 + 5110.57920538372i	0.0000 + 5.1114i
-4.10084924963692 - 5110.57920538372i	0.0000 - 5.1114i
-0.954317806023397 + 780.912977321973i	0.0000 + 3.1269i
-0.954317806023397 - 780.912977321973i	0.0000 - 3.1269i
-2.08850915422272 + 4329.36775277053i	0.0000 + 2.7060i
-2.08850915422272 - 4329.36775277053i	0.0000 - 2.7060i
-0.367699941356648 + 1503.27986268669i	0.0000 + 7.0356i
-0.367699941356648 - 1503.27986268669i	0.0000 - 7.0356i
-1.31119285440701 + 3126.77451568462i	0.0000 + 2.4053i
-1.31119285440701 - 3126.77451568462i	0.0000 - 2.4053i
-2.17292751841370 + 2705.56468275866i	0.0000 + 1.5033i

-2.17292751841370 - 2705.56468275866i	0.0000 - 1.5033i
-0.589366884517688 + 2405.26766976371i	0.0000 + 5.8330i
-0.589366884517688 - 2405.26766976371i	0.0000 - 5.8330i
-6.82121026329696e-13 + 7035.600000000000i	0.0000 + 4.3296i
-6.82121026329696e-13 - 7035.600000000000i	0.0000 - 4.3296i

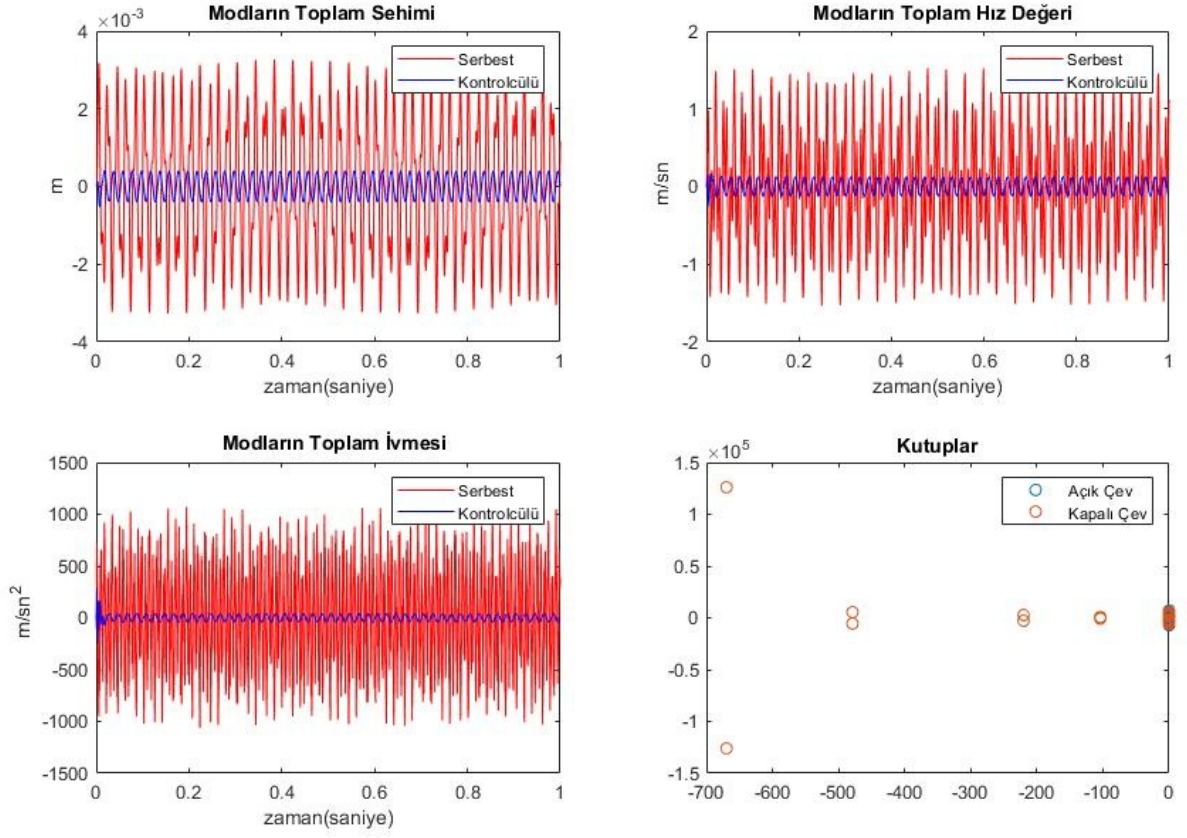
b) B tipi Yerleşim Eyleyici Yerleşimi

Tablo 4. 9 B tipi eyleyici yerleşimi koordinatları

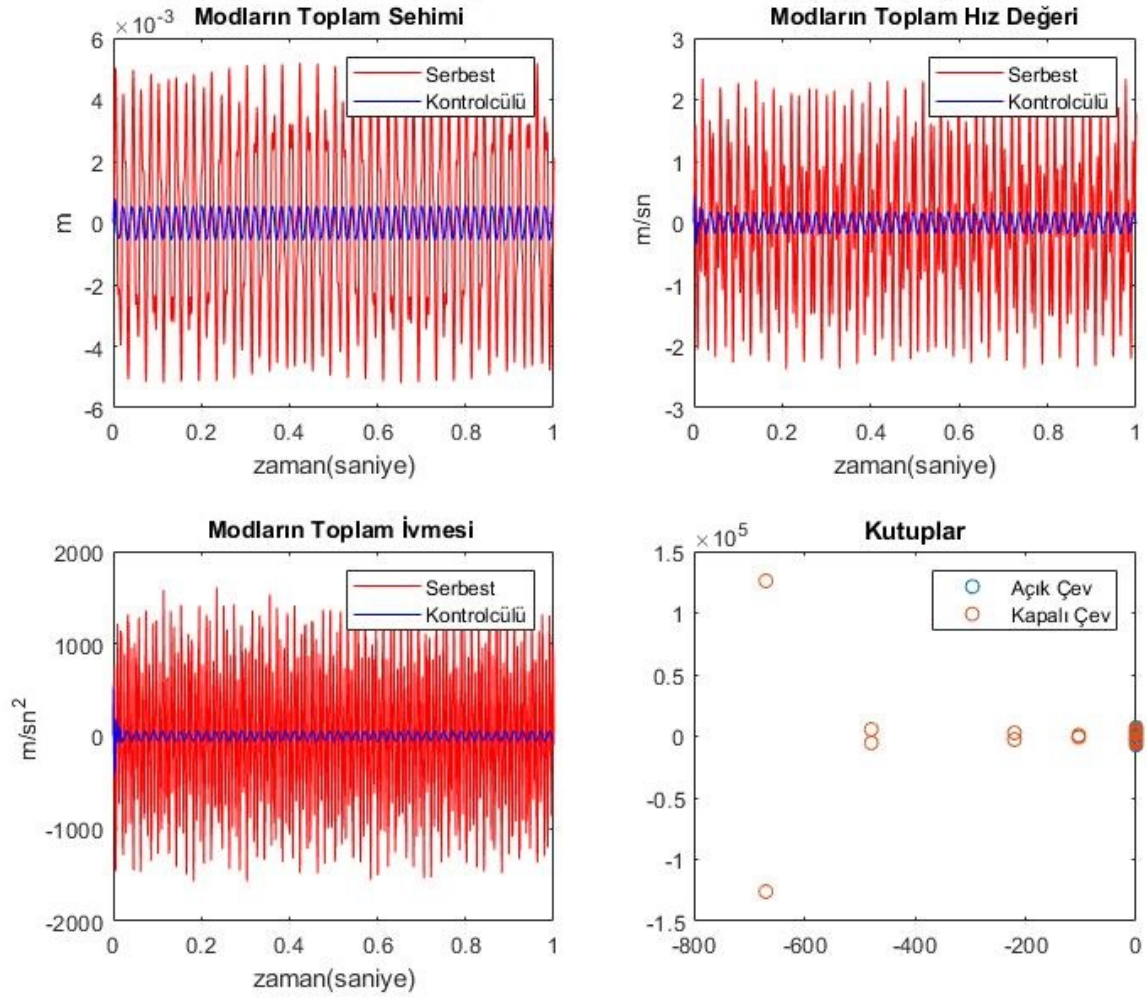
Koordinatlar	1. Eyleyici	2. Eyleyici	3. Eyleyici	4. Eyleyici	5. Eyleyici	6. Eyleyici	7. Eyleyici	8. Eyleyici	1. Sensor	2. Sensor
X Ekseni (metre)	0.0375	0.1125	0.0375	0.1125	0.1875	0.1875	0.2625	0.2625	0.075	0.15
Y Ekseni (metre)	0.05	0.05	0.15	0.15	0.05	0.15	0.05	0.15	0.1	0.1



Şekil 4. 10 Plak boyutları, eyleyici tipi, bozucu giriş ve sensörlerin gösterimi



Şekil 4. 11 B tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 1. sensör değerleri



Şekil 4. 12 B tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 2. sensör değerleri

Tablo 4. 10 Kapalı çevrim kökleri ve sistem kökleri

Kapalı Çevrim Kutupları	Sistemin Kutupları
-669.639052806109 + 126044.882165135i	0.0000 + 0.7817i
-669.639052806109 - 126044.882165135i	0.0000 - 0.7817i
-478.980151361699 + 5516.57937982841i	0.0000 + 5.1114i
-478.980151361699 - 5516.57937982841i	0.0000 - 5.1114i
-103.900034019224 + 811.499527128380i	0.0000 + 3.1269i
-103.900034019224 - 811.499527128380i	0.0000 - 3.1269i
-220.084591448276 + 2744.19824607380i	0.0000 + 2.7060i
-220.084591448276 - 2744.19824607380i	0.0000 - 2.7060i

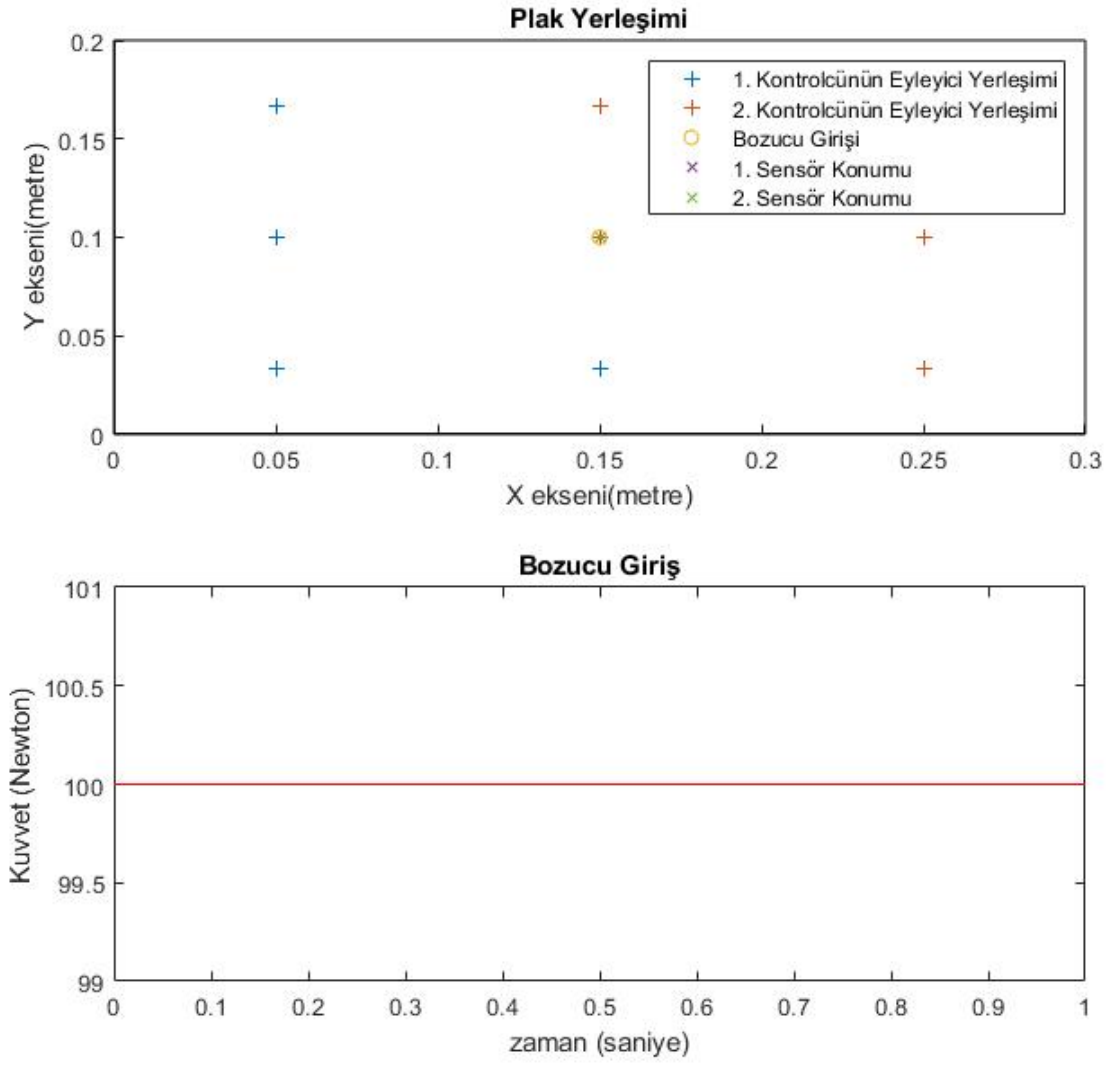
-7.10542735760100e-13 + 5833.000000000001i	0.0000 + 7.0356i
-7.10542735760100e-13 - 5833.000000000001i	0.0000 - 7.0356i
-1.42108547152020e-13 + 4329.600000000000i	0.0000 + 2.4053i
-1.42108547152020e-13 - 4329.600000000000i	0.0000 - 2.4053i
-1.27897692436818e-13 + 3126.900000000000i	0.0000 + 1.5033i
-1.27897692436818e-13 - 3126.900000000000i	0.0000 - 1.5033i
-2.92743607133161e-11 + 2405.300000000000i	0.0000 + 5.8330i
-2.92743607133161e-11 - 2405.300000000000i	0.0000 - 5.8330i
-8.52651282912120e-14 + 1503.300000000000i	0.0000 + 4.3296i
-8.52651282912120e-14 - 1503.300000000000i	0.0000 - 4.3296i

3. Durum: Çift Kontrolcülü Merkezden Etkiyen Step Input

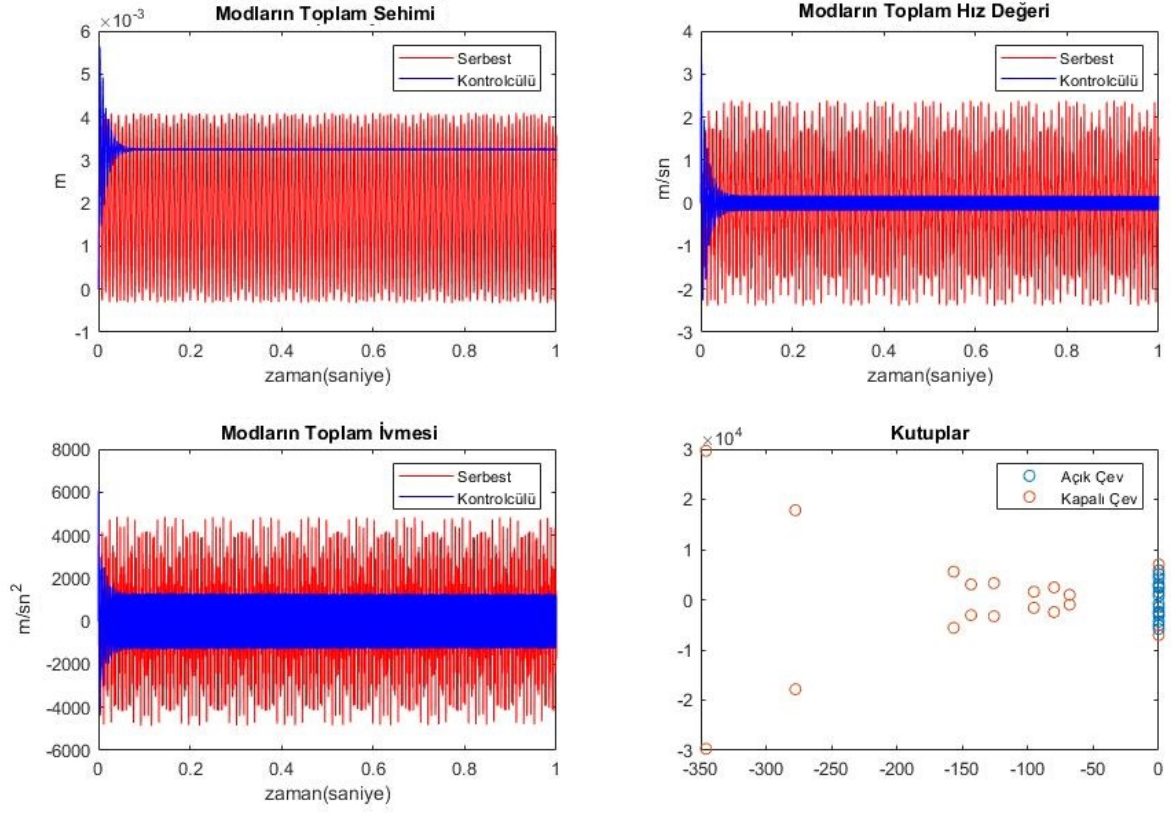
a) A tipi Yerleşim Eyleyici Yerleşimi

Tablo 4. 11 Kapalı çevrim kökleri ve Sistem Kökleri

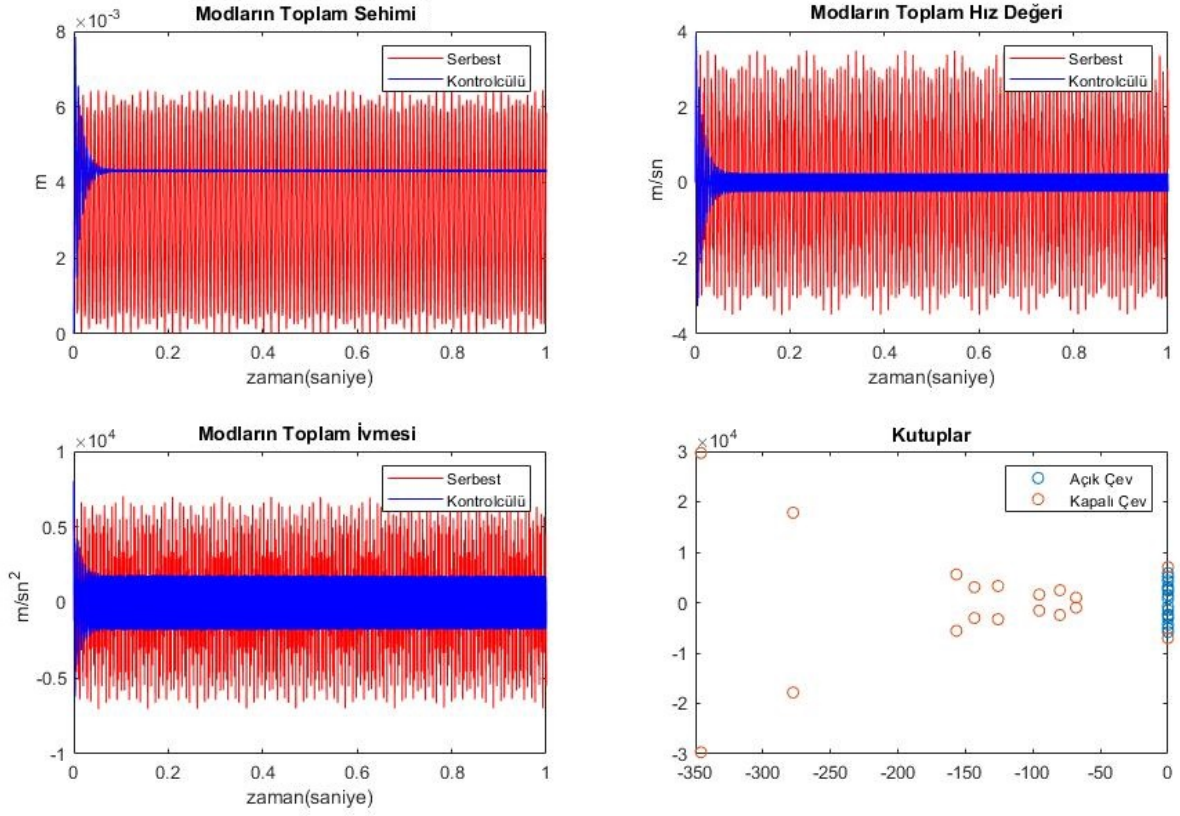
Koordinatlar	1. Eyleyici	2. Eyleyici	3. Eyleyici	4. Eyleyici	5. Eyleyici	6. Eyleyici	7. Eyleyici	8. Eyleyici	1. Sensör	2. Sensör
X eksen (m)	0.05	0.05	0.05	0.15	0.15	0.15	0.25	0.25	0.075	0.15
Y eksen (m)	0.03	0.1	0.1667	0.0333	0.1	0.1667	0.0333	0.1	0.1	0.1



Şekil 4. 13 Plak boyutları, eyleyici tipi, bozucu giriş ve sensörlerin gösterimi



Şekil 4. 14 A tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 1. sensör değerleri



Şekil 4. 15 A tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 2. sensör değerleri

Tablo 4. 12 Kapalı çevrim kökleri ve sistem kökleri

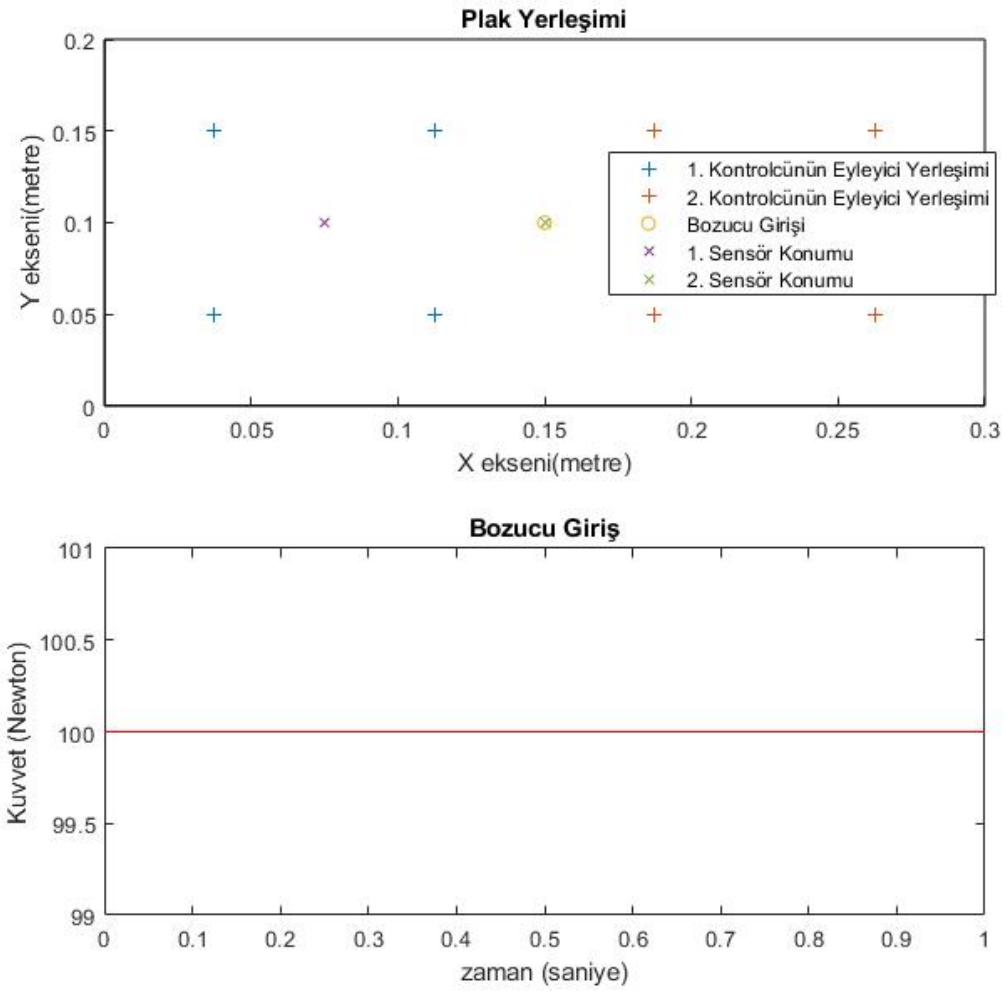
Kapalı Çevrim Kutupları	Sistemin Kutupları
-345.945472851592 + 29679.0249303172i	0.0000 + 0.7817i
-345.945472851592 - 29679.0249303172i	0.0000 - 0.7817i
-277.687980389561 + 17827.1950565937i	0.0000 + 5.1114i
-277.687980389561 - 17827.1950565937i	0.0000 - 5.1114i
-156.701755274926 + 5590.83371872857i	0.0000 + 3.1269i
-156.701755274926 - 5590.83371872857i	0.0000 - 3.1269i
-125.919021319492 + 3299.19752226957i	0.0000 + 2.7060i
-125.919021319492 - 3299.19752226957i	0.0000 - 2.7060i
-143.420392519841 + 3055.51614761447i	0.0000 + 7.0356i
-143.420392519841 - 3055.51614761447i	0.0000 - 7.0356i
-68.0830214078185 + 983.042901754832i	0.0000 + 2.4053i
-68.0830214078185 - 983.042901754832i	0.0000 - 2.4053i
-95.3947236644972 + 1599.76065369504i	0.0000 + 1.5033i
-95.3947236644972 - 1599.76065369504i	0.0000 - 1.5033i
-80.0428160990826 + 2455.68409423861i	0.0000 + 5.8330i

-80.0428160990826 - 2455.68409423861i	0.0000 - 5.8330i
-3.41060513164848e-13 + 7035.600000000000i	0.0000 + 4.3296i
-3.41060513164848e-13 - 7035.600000000000i	0.0000 - 4.3296i

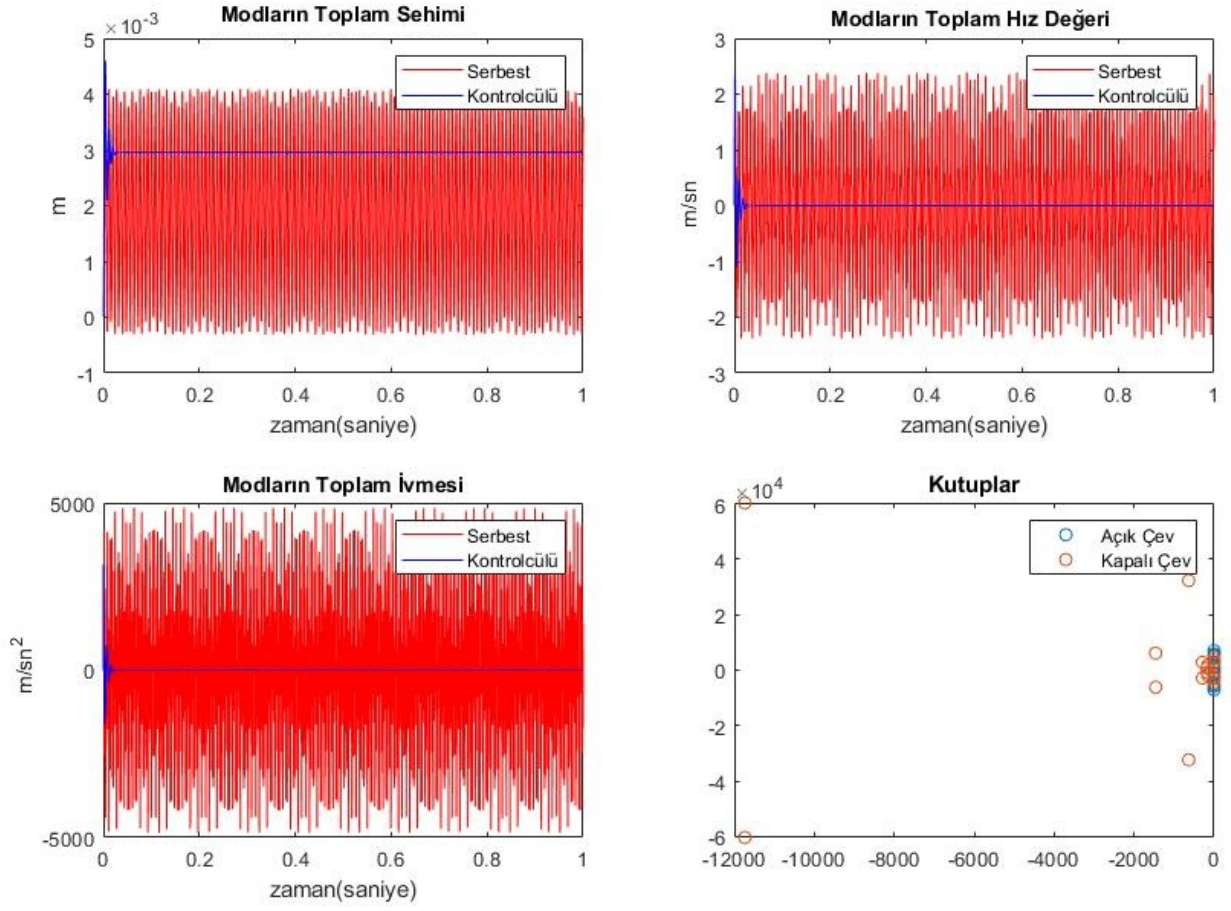
b) B tipi Yerleşim Eyleyici Yerleşimi

Tablo 4. 13 B tipi eyleyici yerleşimi koordinatları

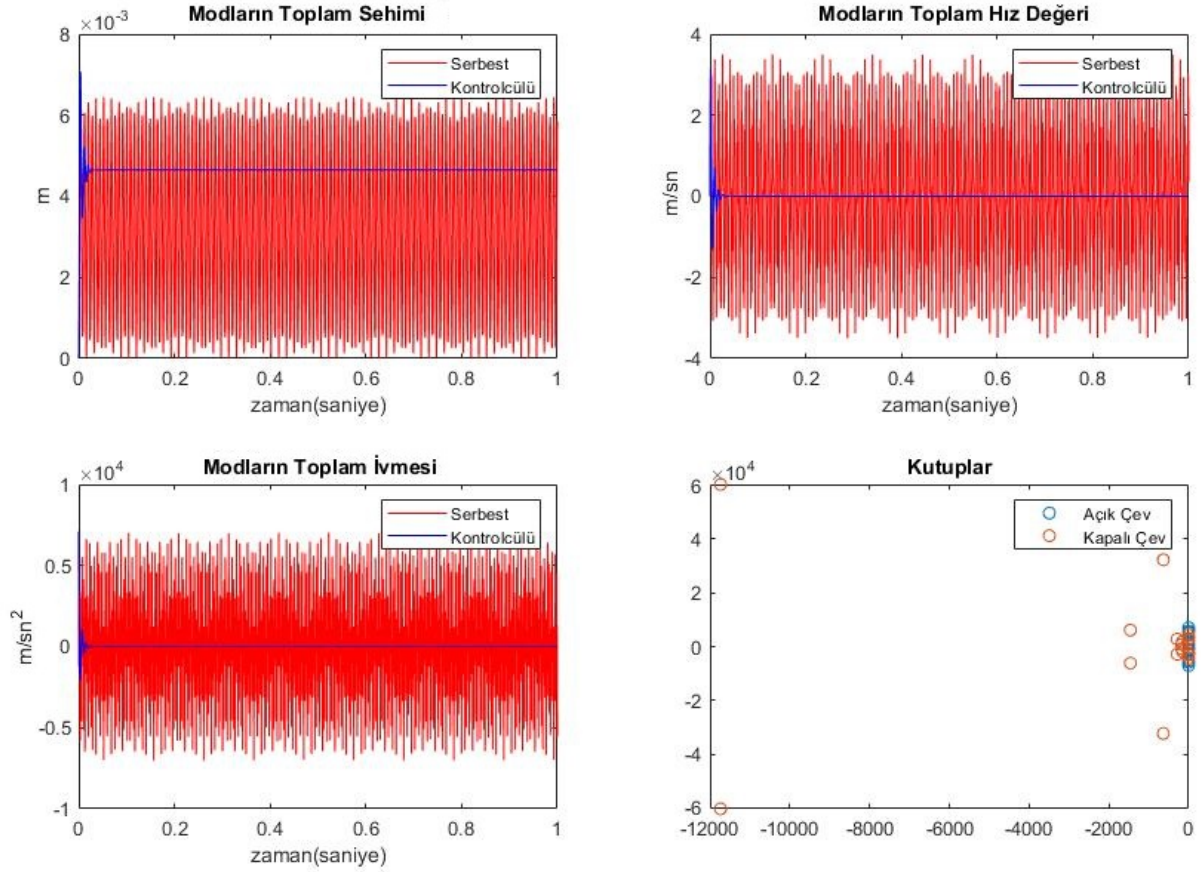
Koordinatlar	1. Eyleyici	2. Eyleyici	3. Eyleyici	4. Eyleyici	5. Eyleyici	6. Eyleyici	7. Eyleyici	8. Eyleyici	1. Sensor	2. Sensor
X Ekseni (metre)	0.0375	0.1125	0.0375	0.1125	0.1875	0.1875	0.2625	0.2625	0.075	0.15
Y Ekseni (metre)	0.05	0.05	0.15	0.15	0.05	0.15	0.05	0.15	0.1	0.1



Şekil 4. 16 Plak boyutları, eyleyici tipi, bozucu giriş ve sensörlerin gösterimi



Şekil 4. 17 B tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 1. sensör değerleri



Şekil 4. 18 B tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 2. sensör değerleri

Tablo 4. 14 Kapalı çevrim kökleri ve sistem kökleri

Kapalı Çevrim Kutupları	Sistemin Kutupları
-11735.6888775435 + 60362.6646440724i	0.0000 + 0.7817i
-11735.6888775435 - 60362.6646440724i	0.0000 - 0.7817i
-634.265767546011 + 32331.8641539221i	0.0000 + 5.1114i
-634.265767546011 - 32331.8641539221i	0.0000 - 5.1114i
-1460.73144879323 + 6141.14975951819i	0.0000 + 3.1269i
-1460.73144879323 - 6141.14975951819i	0.0000 - 3.1269i
-171.446967075304 + 779.798313328301i	0.0000 + 2.7060i
-171.446967075304 - 779.798313328301i	0.0000 - 2.7060i
-159.811230427489 + 1739.94966640224i	0.0000 + 7.0356i
-159.811230427489 - 1739.94966640224i	0.0000 - 7.0356i
-288.180584221628 + 2818.82015902982i	0.0000 + 2.4053i
-288.180584221628 - 2818.82015902982i	0.0000 - 2.4053i
-7.38964445190504e-13 + 4329.600000000000i	0.0000 + 1.5033i

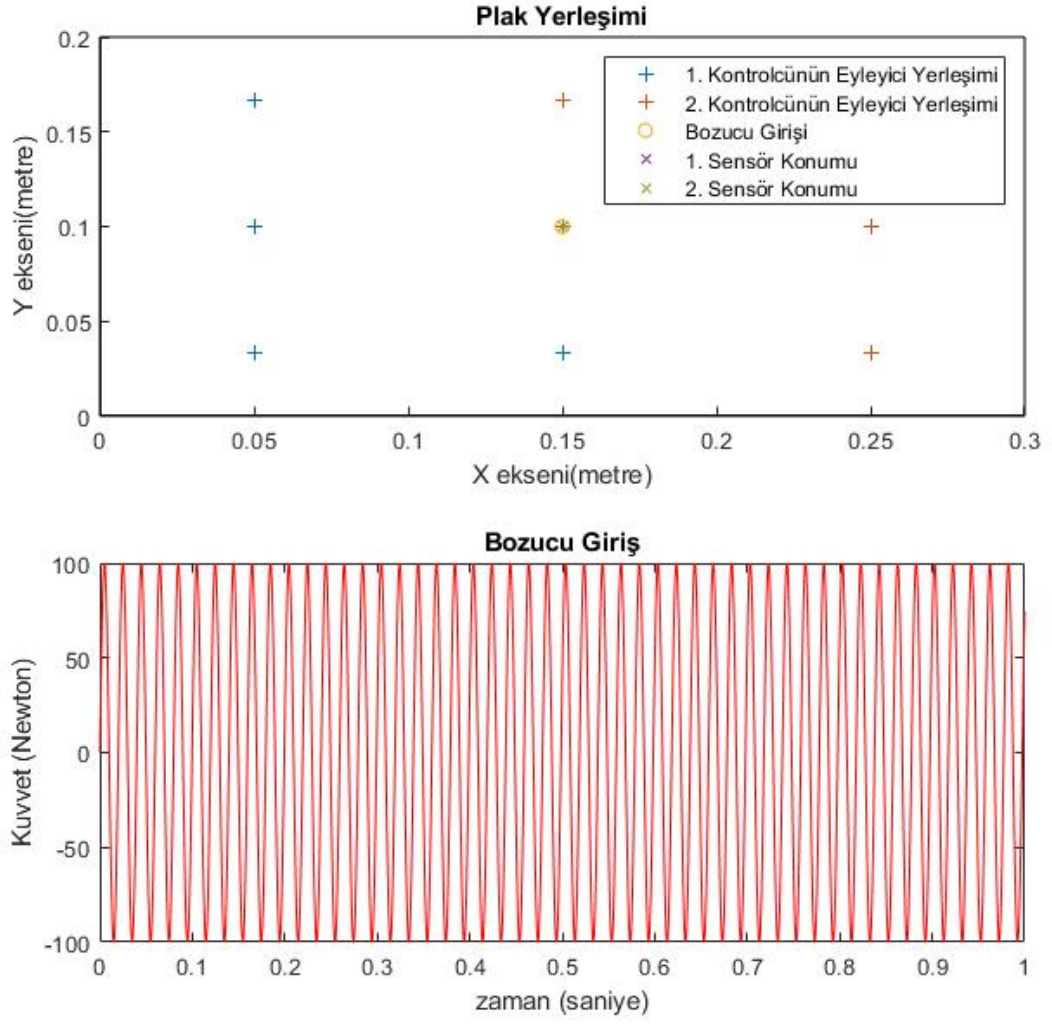
-7.38964445190504e-13 - 4329.600000000000i	0.0000 - 1.5033i
-2.72848410531878e-11 + 2405.300000000000i	0.0000 + 5.8330i
-2.72848410531878e-11 - 2405.300000000000i	0.0000 - 5.8330i
-6.25277607468888e-13 + 3126.900000000000i	0.0000 + 4.3296i
-6.25277607468888e-13 - 3126.900000000000i	0.0000 - 4.3296i

4. Durum: Çift Kontrolcülü Merkezden Etkiyen Sinüs Input

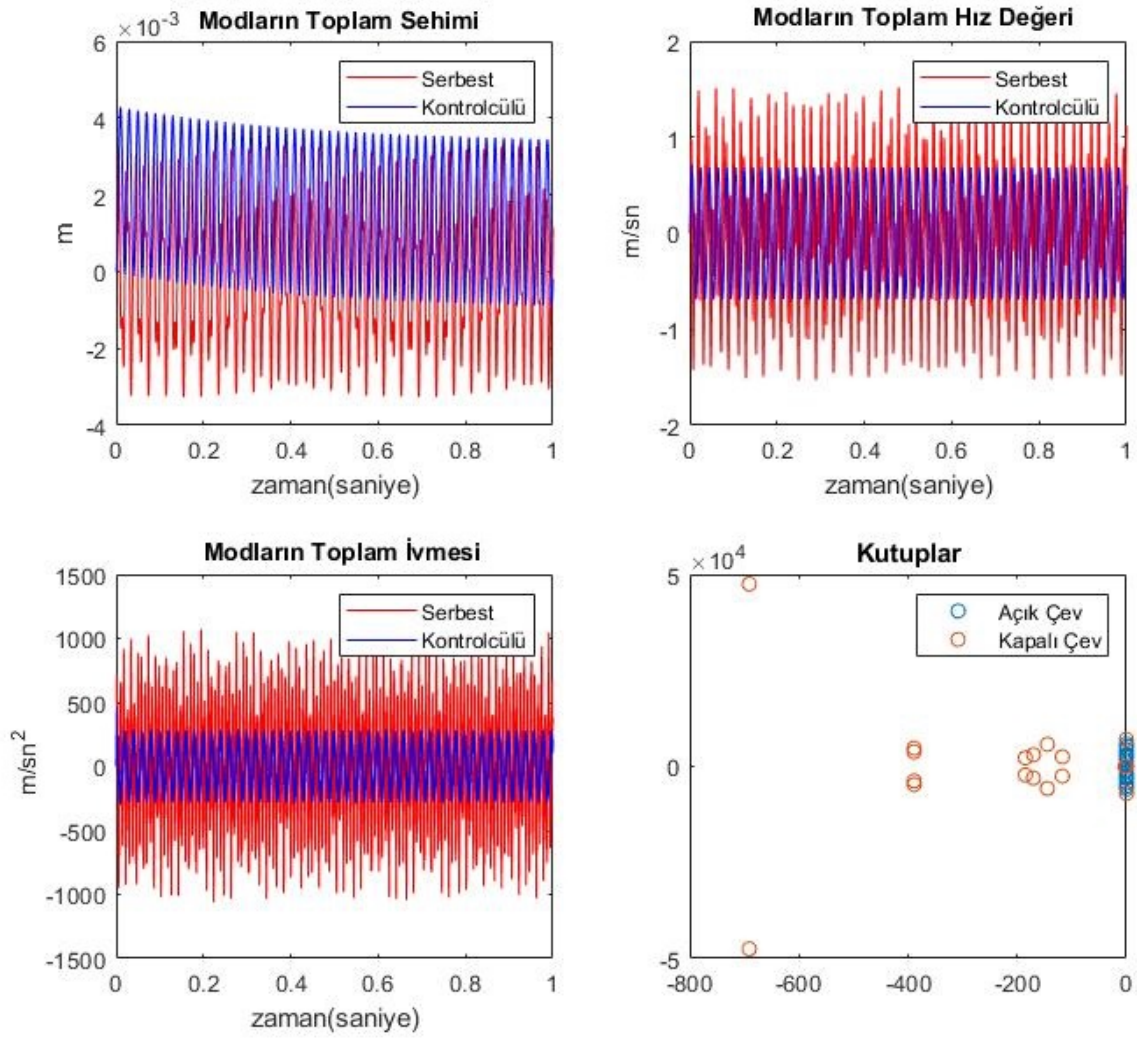
a) A tipi Yerleşim Eyleyici Yerleşimi

Tablo 4. 15 A tipi eyleyici konumları ve sensör konumları

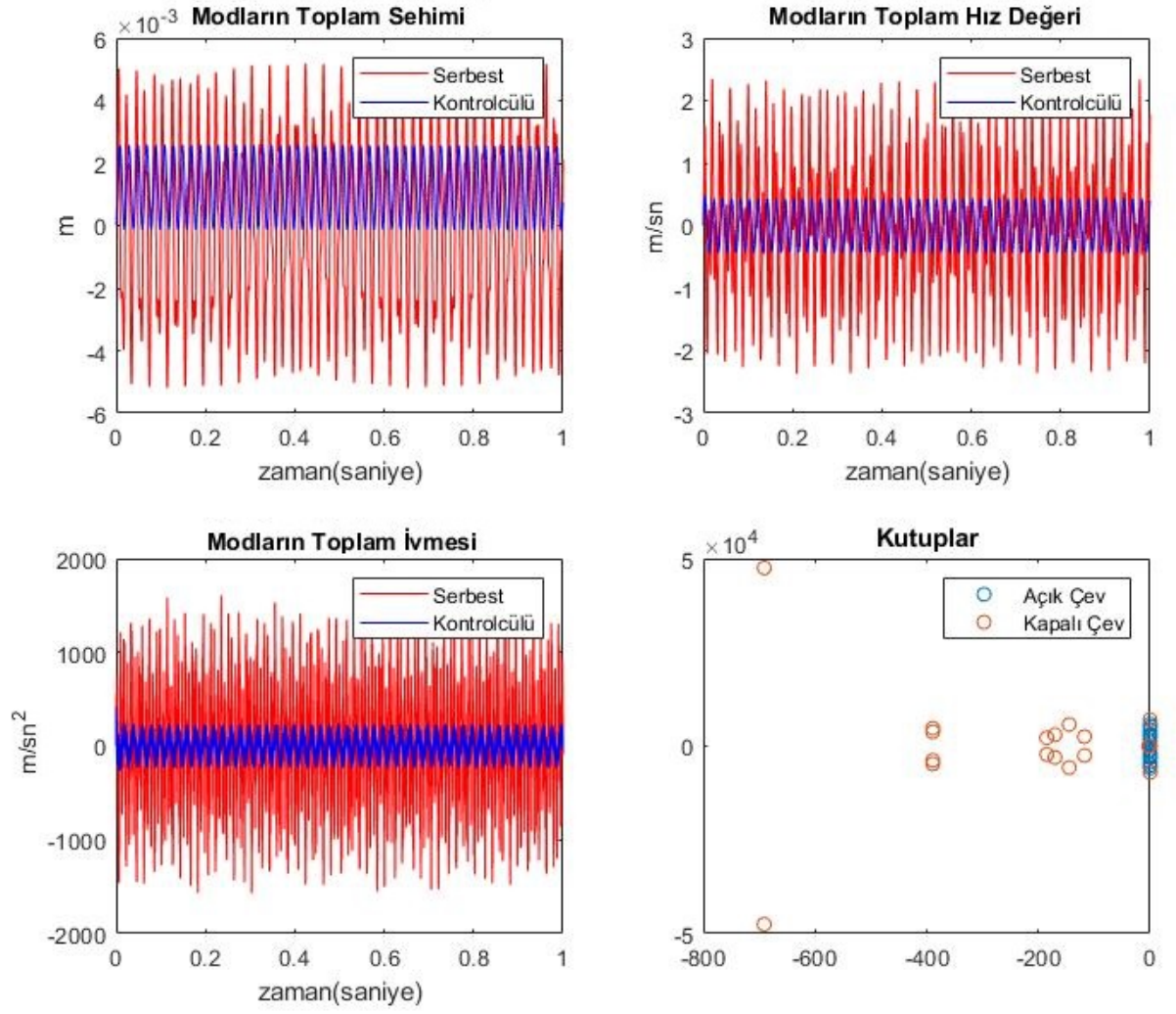
Koordinatlar	1. Eyleyici	2. Eyleyici	3. Eyleyici	4. Eyleyici	5. Eyleyici	6. Eyleyici	7. Eyleyici	8. Eyleyici	1. Sensör	2. Sensör
X ekseni (m)	0.05	0.05	0.05	0.15	0.15	0.15	0.25	0.25	0.075	0.15
Y ekseni (m)	0.03	0.1	0.1667	0.0333	0.1	0.1667	0.0333	0.1	0.1	0.1



Şekil 4. 19 Plak boyutları, eyleyici tipi, bozucu giriş ve sensörlerin gösterimi



Şekil 4. 20 A tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 1. sensör değerleri

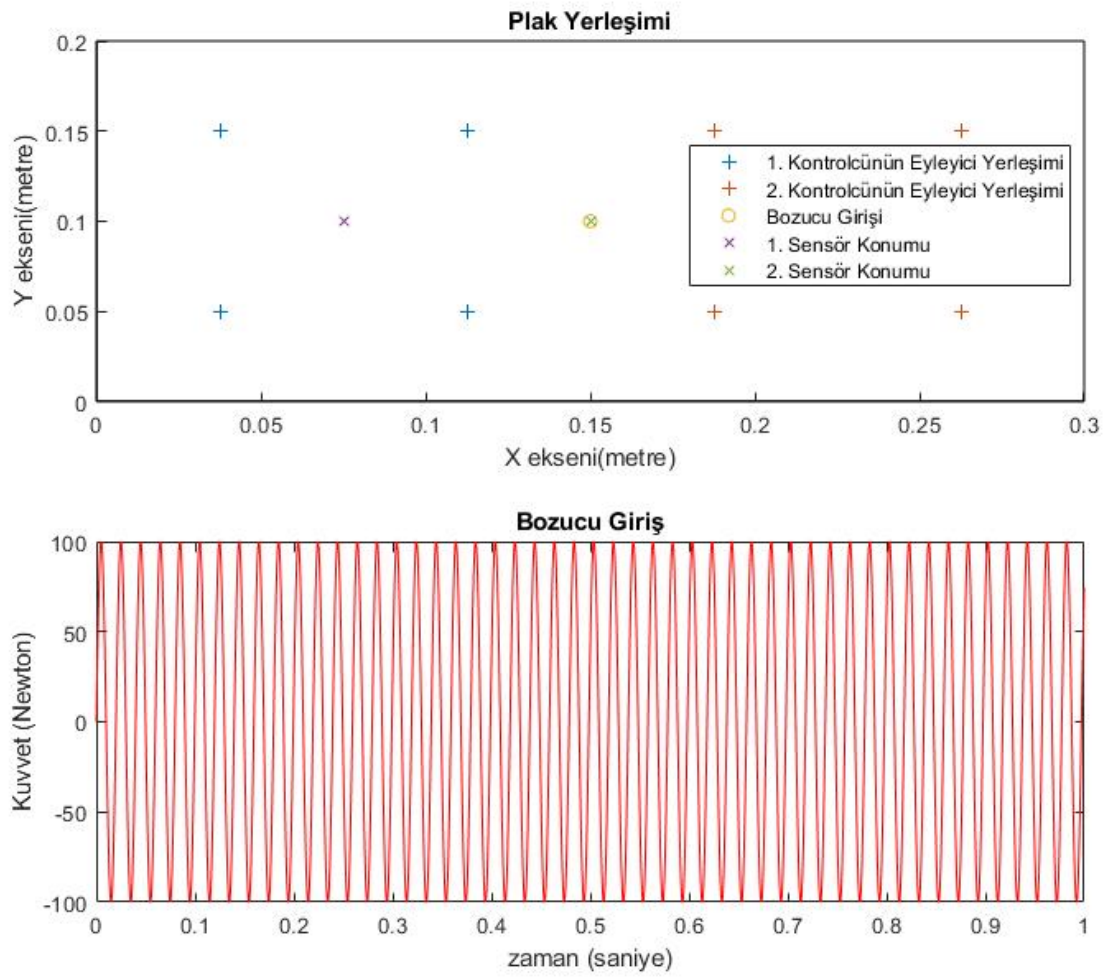


Şekil 4.20 A tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 2. sensör değerleri

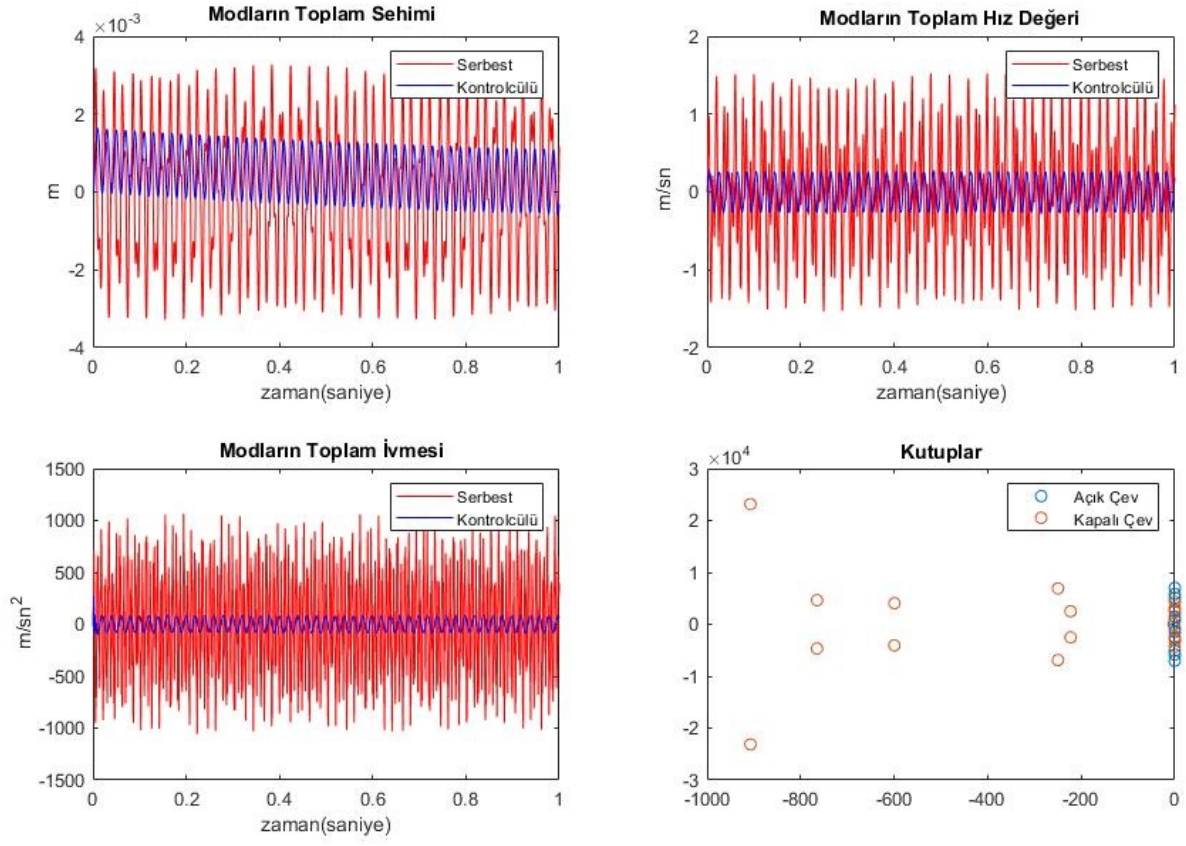
b) B tipi Yerleşim Eyleyici Yerleşimi

Tablo 4. 16 B tipi eyleyici yerleşimi koordinatları

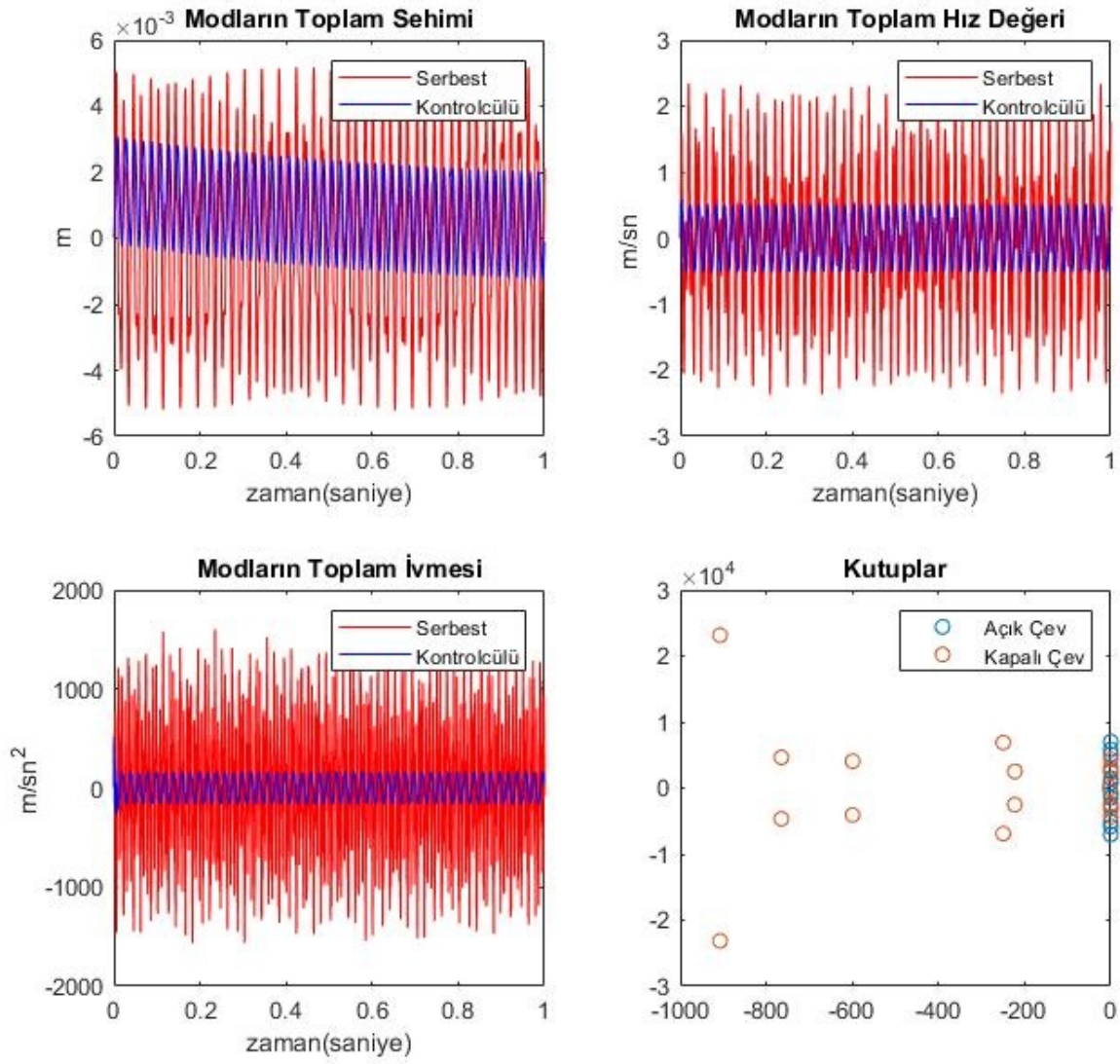
Koordinatlar	1. Eyleyici	2. Eyleyici	3. Eyleyici	4. Eyleyici	5. Eyleyici	6. Eyleyici	7. Eyleyici	8. Eyleyici	1. Sensör	2. Sensör
X Eksen (metre)	0.0375	0.1125	0.0375	0.1125	0.1875	0.1875	0.2625	0.2625	0.075	0.15
Y Eksen (metre)	0.05	0.05	0.15	0.15	0.05	0.15	0.05	0.15	0.1	0.1



Şekil 4. 21 Plak boyutları, eyleyici tipi, bozucu giriş ve sensörlerin gösterimi



Şekil 4. 22 B tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 1. sensör değerleri



Şekil 4. 23 B tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 2. sensör değerleri

Tablo 4. 17 Kapalı çevrim kökleri ve sistem kökleri

Kapalı Çevrim Kutupları	Sistemin Kutupları
$-907.276761826860 + 23145.2621904063i$	$0.0000 + 0.7817i$
$-907.276761826860 - 23145.2621904063i$	$0.0000 - 0.7817i$
$-249.795431678998 + 6900.56498469735i$	$0.0000 + 5.1114i$
$-249.795431678998 - 6900.56498469735i$	$0.0000 - 5.1114i$
$-764.930912042761 + 4652.81773222884i$	$0.0000 + 3.1269i$
$-764.930912042761 - 4652.81773222884i$	$0.0000 - 3.1269i$
$-599.547218802908 + 4070.52865006905i$	$0.0000 + 2.7060i$

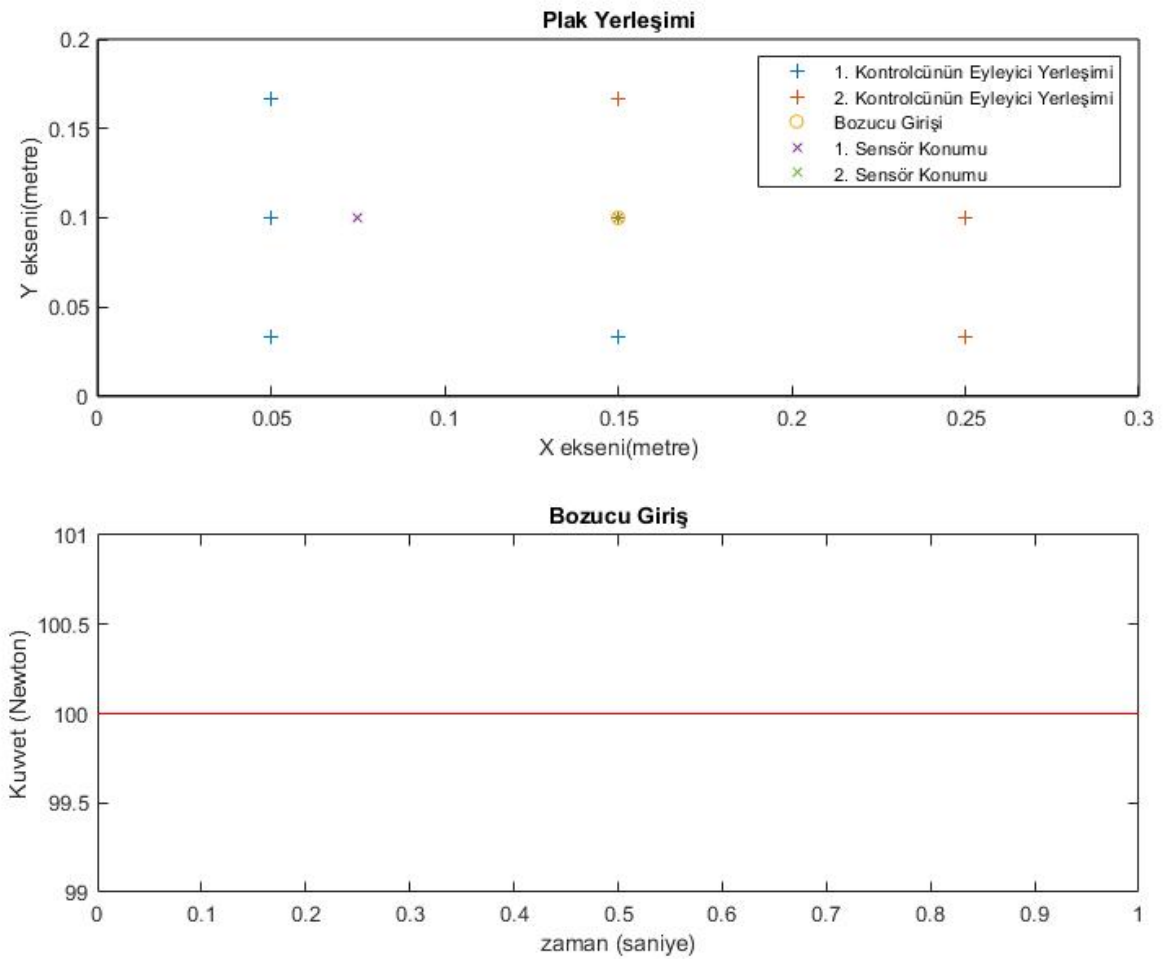
-599.547218802908 - 4070.52865006905i	0.0000 - 2.7060i
-222.852961154757 + 2514.87082747898i	0.0000 + 7.0356i
-222.852961154757 - 2514.87082747898i	0.0000 - 7.0356i
-1.31028208556849 + 0.000000000000000i	0.0000 + 2.4053i
-2.51866298215660 + 0.000000000000000i	0.0000 - 2.4053i
-1.70530256582424e-13 + 4329.600000000000i	0.0000 + 1.5033i
-1.70530256582424e-13 - 4329.600000000000i	0.0000 - 1.5033i
-5.86197757002083e-13 + 2405.300000000000i	0.0000 + 5.8330i
-5.86197757002083e-13 - 2405.300000000000i	0.0000 - 5.8330i
-6.11066752753686e-13 + 3126.900000000000i	0.0000 + 4.3296i
-6.11066752753686e-13 - 3126.900000000000i	0.0000 - 4.3296i

5. Durum: Her Biri Ayrı Kontrolcülü Merkezden Etkiyen Step Input

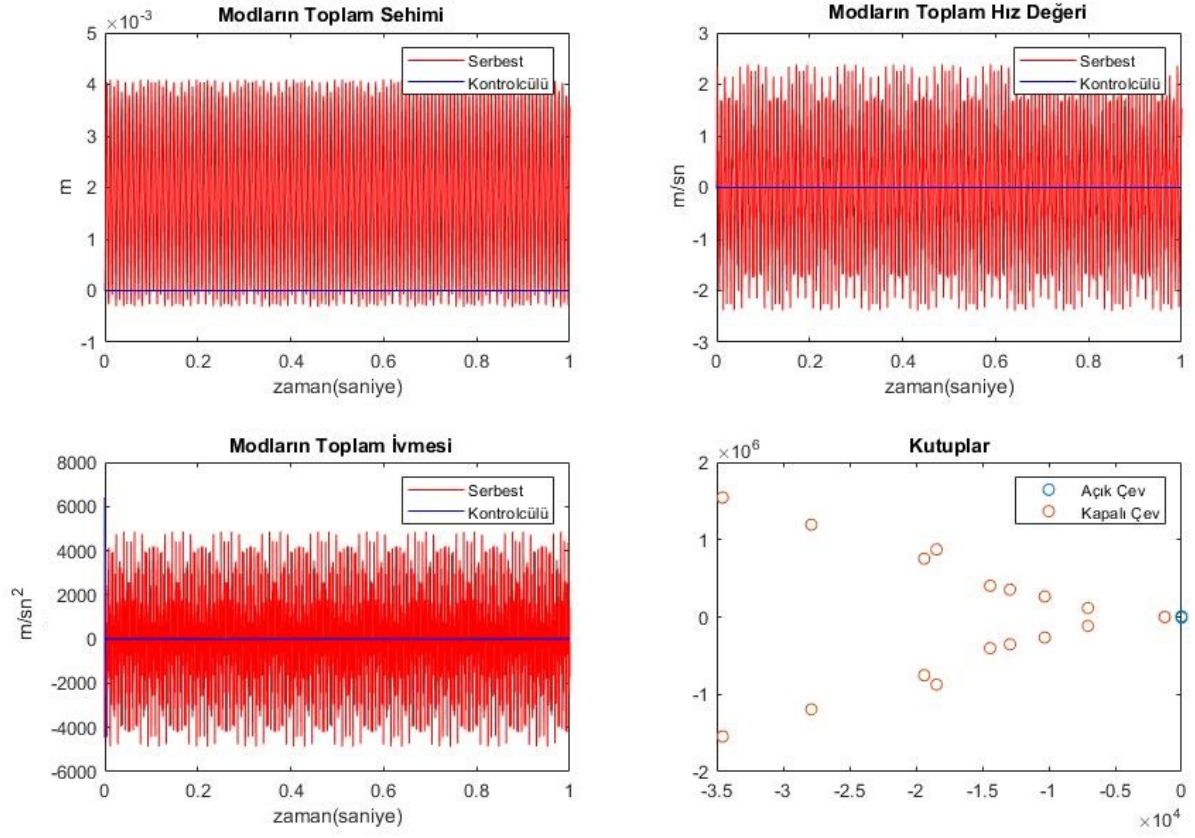
a) A tipi Yerleşim Eyleyici Yerleşimi

Tablo 4. 18 A tipi eyleyici konumları ve sensör konumları

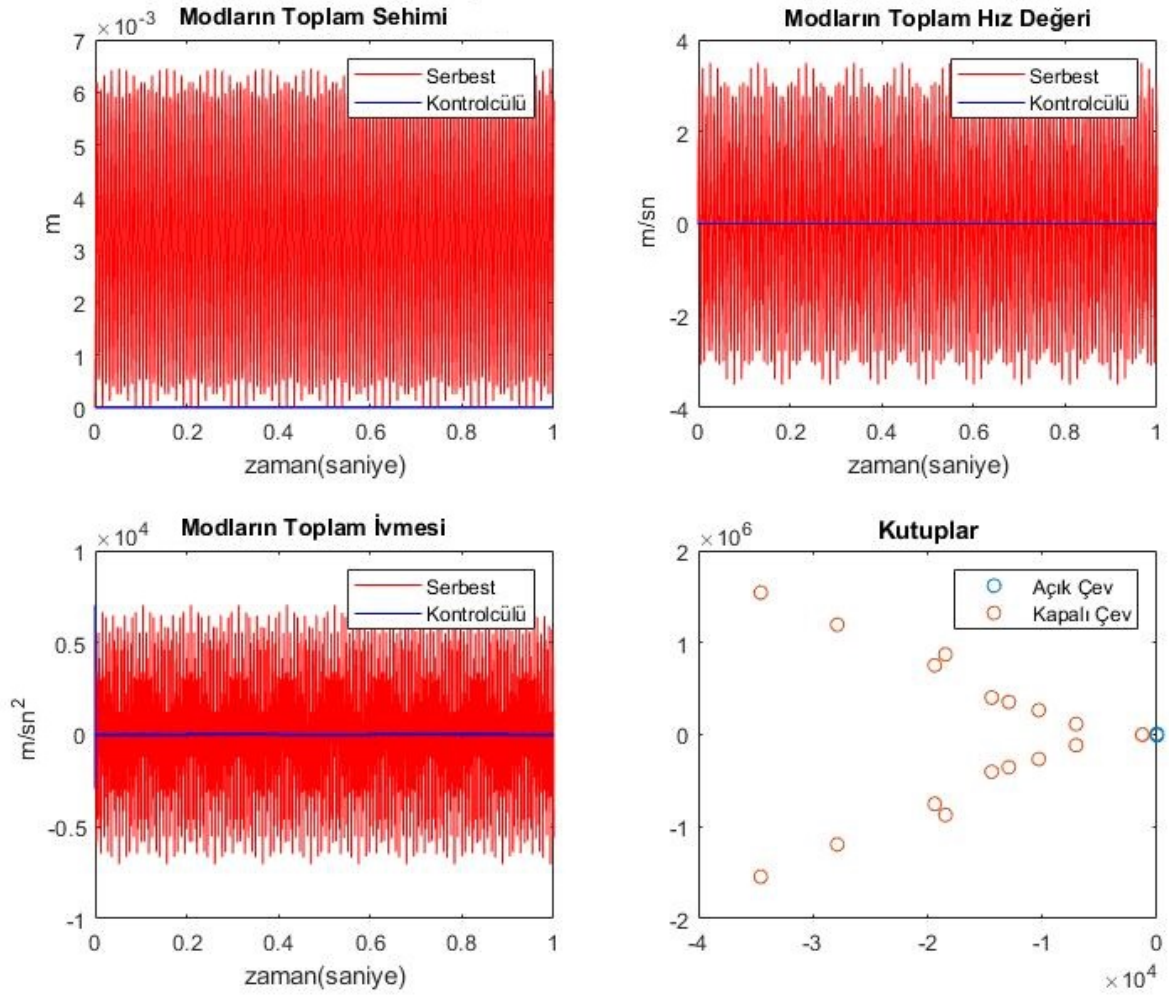
Koordinatlar	1. Eyleyici	2. Eyleyici	3. Eyleyici	4. Eyleyici	5. Eyleyici	6. Eyleyici	7. Eyleyici	8. Eyleyici	1. Sensör	2. Sensör
X eksen (m)	0.05	0.05	0.05	0.15	0.15	0.15	0.25	0.25	0.075	0.15
Y eksen (m)	0.03	0.1	0.1667	0.0333	0.1	0.1667	0.0333	0.1	0.1	0.1



Şekil 4. 24 Plak boyutları, eyleyici tipi, bozucu giriş ve sensörlerin gösterimi



Şekil 4. 25 A tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 1. sensör değerleri



Şekil 4. 26 A tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 2. sensör değerleri

Tablo 4. 19 Kapalı çevrim kökleri ve sistem kökleri

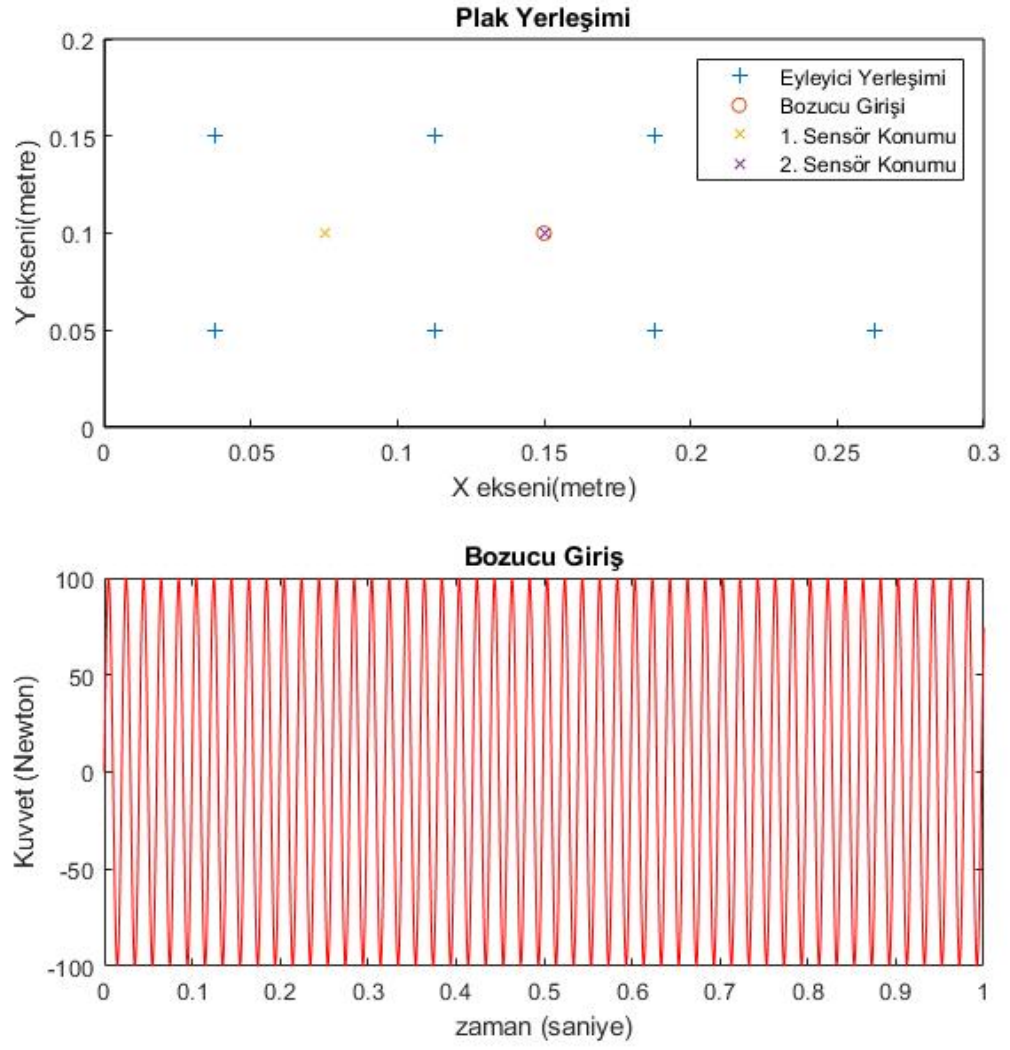
Kapalı Çevrim Kutupları	Sistemin Kutupları
-34549.5561035207 + 1543816.90737827i	0.0000 + 0.7817i
-34549.5561035207 - 1543816.90737827i	0.0000 - 0.7817i
-27876.1388167454 + 1193668.84318464i	0.0000 + 5.1114i
-27876.1388167454 - 1193668.84318464i	0.0000 - 5.1114i
-18444.0715263905 + 872768.489112276i	0.0000 + 3.1269i
-18444.0715263905 - 872768.489112276i	0.0000 - 3.1269i
-19381.8166462898 + 753066.487602428i	0.0000 + 2.7060i
-19381.8166462898 - 753066.487602428i	0.0000 - 2.7060i
-14413.5676089201 + 403201.650672577i	0.0000 + 7.0356i
-14413.5676089201 - 403201.650672577i	0.0000 - 7.0356i

-12920.9154700854 + 353573.307652388i	0.0000 + 2.4053i
-12920.9154700854 - 353573.307652388i	0.0000 - 2.4053i
-10301.4689377921 + 265492.318772945i	0.0000 + 1.5033i
-10301.4689377921 - 265492.318772945i	0.0000 - 1.5033i
-7047.70016113666 + 115251.841308685i	0.0000 + 5.8330i
-7047.70016113666 - 115251.841308685i	0.0000 - 5.8330i
-1273.90870561476 + 1404.64194838888i	0.0000 + 4.3296i
-1273.90870561476 - 1404.64194838888i	0.0000 - 4.3296i

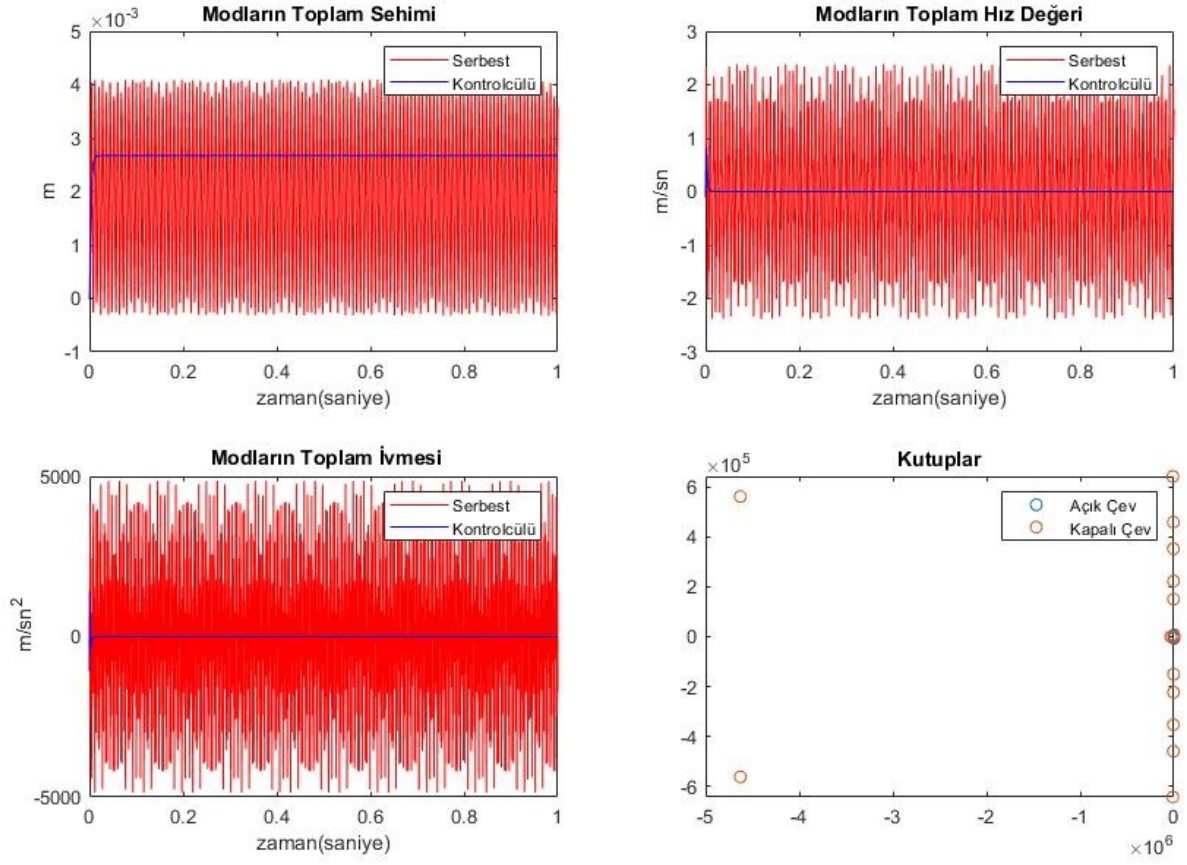
b) B tipi Yerleşim Eyleyici Yerleşimi

Tablo 4. 20 B tipi eyleyici yerleşimi koordinatları

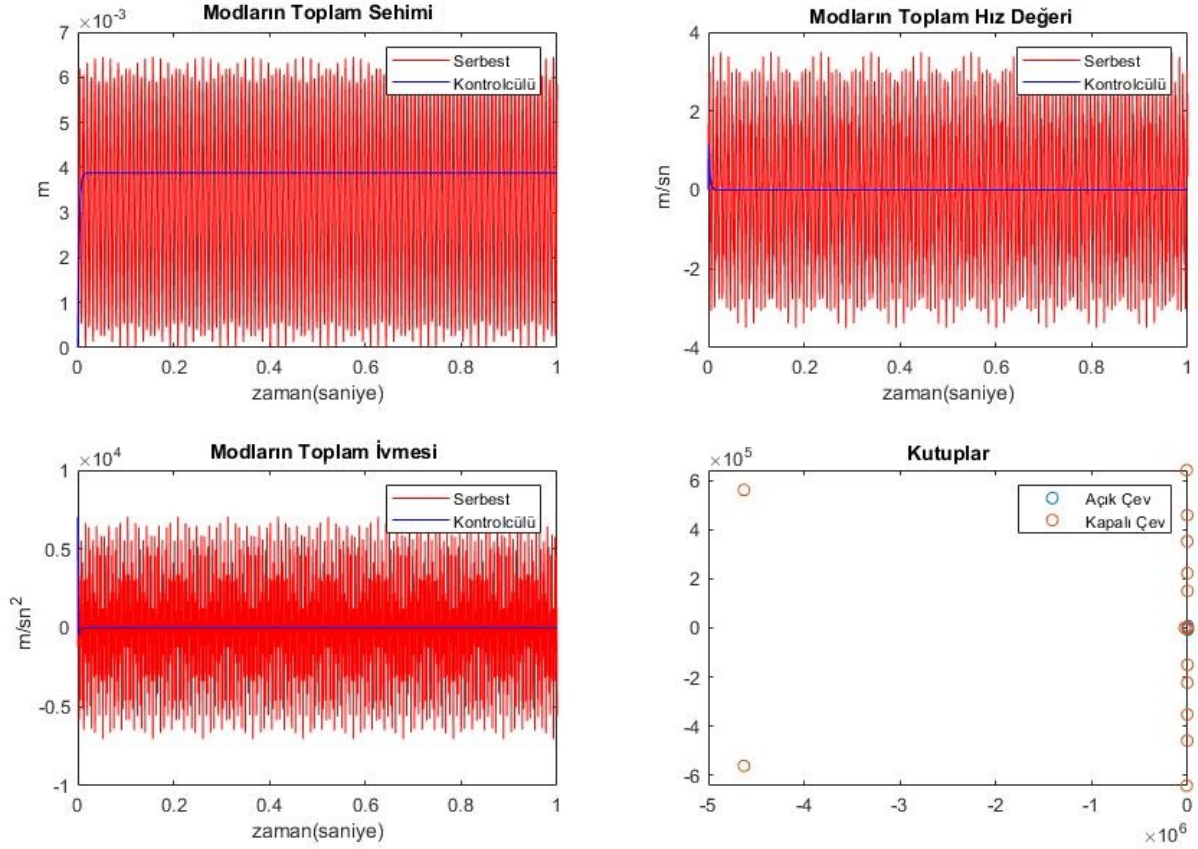
Koordinatlar	1. Eyleyici	2. Eyleyici	3. Eyleyici	4. Eyleyici	5. Eyleyici	6. Eyleyici	7. Eyleyici	8. Eyleyici	1. Sensor	2. Sensor
X Eksen (metre)	0.0375	0.1125	0.0375	0.1125	0.1875	0.1875	0.2625	0.2625	0.075	0.15
Y Eksen (metre)	0.05	0.05	0.15	0.15	0.05	0.15	0.05	0.15	0.1	0.1



Şekil 4. 27 Plak boyutları, eyleyici tipi, bozucu giriş ve sensörlerin gösterimi



Şekil 4. 28 B tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 1. sensör değerleri



Şekil 4. 29 B tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 2. sensör değerleri

Tablo 4. 21 Kapalı çevrim kökleri ve sistem kökleri

Kapalı Çevrim Kutupları	Sistemin Kutupları
-4628118.03794502 + 561128.454438233i	0.0000 + 0.7817i
-4628118.03794502 - 561128.454438233i	0.0000 - 0.7817i
-10406.4897126294 + 641557.549673567i	0.0000 + 5.1114i
-10406.4897126294 - 641557.549673567i	0.0000 - 5.1114i
-5113.61023010465 + 458354.728586771i	0.0000 + 3.1269i
-5113.61023010465 - 458354.728586771i	0.0000 - 3.1269i
-4182.05861020703 + 352011.146769099i	0.0000 + 2.7060i
-4182.05861020703 - 352011.146769099i	0.0000 - 2.7060i
-3003.85873493358 + 222719.385832698i	0.0000 + 7.0356i
-3003.85873493358 - 222719.385832698i	0.0000 - 7.0356i
-2417.43040398862 + 150384.743759429i	0.0000 + 2.4053i
-2417.43040398862 - 150384.743759429i	0.0000 - 2.4053i
-30942.5431192164 + 0.000000000000000i	0.0000 + 1.5033i

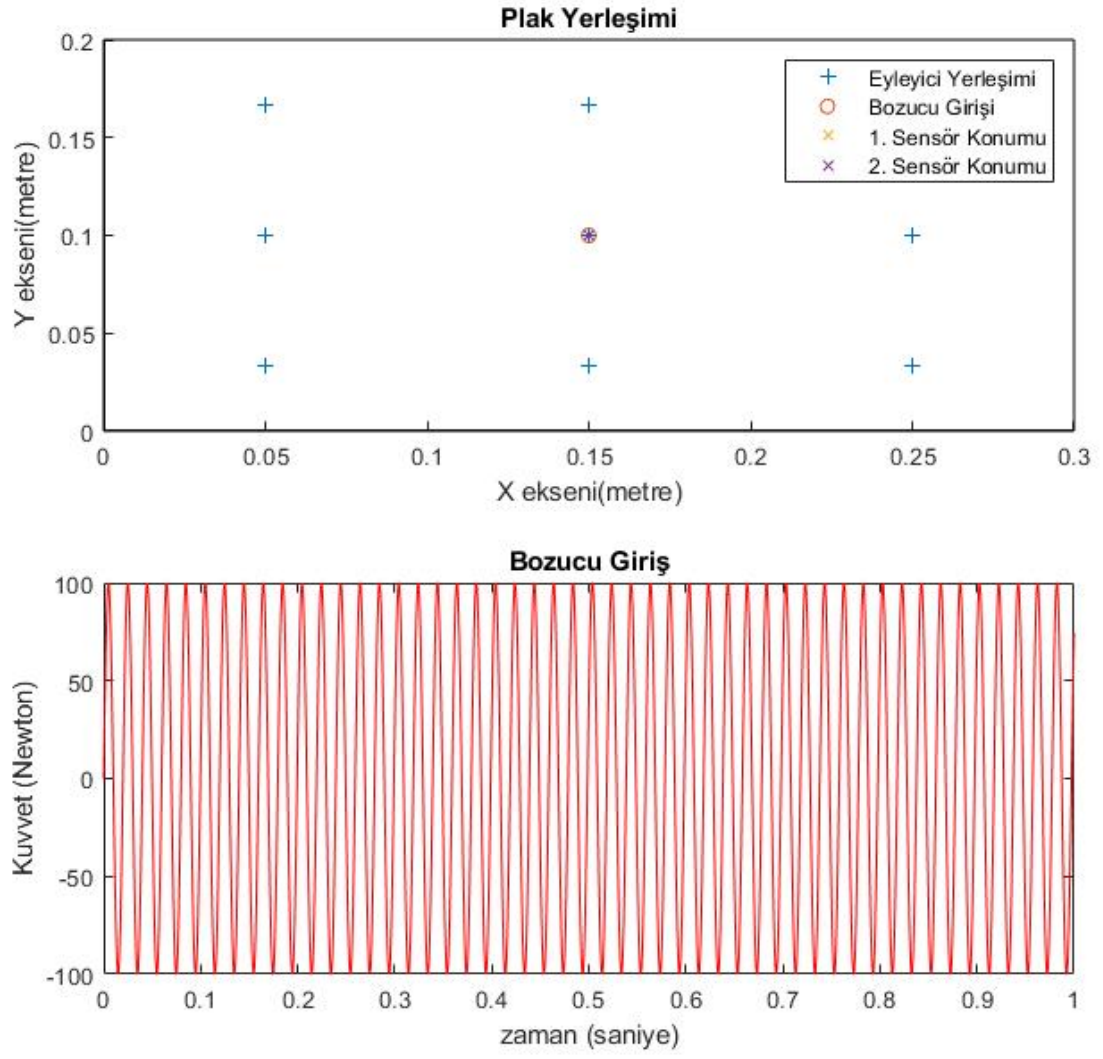
-362.334598429552 + 0.000000000000000i	0.0000 - 1.5033i
-1933.69851346906 + 2202.41054172437i	0.0000 + 5.8330i
-1933.69851346906 - 2202.41054172437i	0.0000 - 5.8330i
-896.956568426472 + 1672.68876350419i	0.0000 + 4.3296i
-896.956568426472 - 1672.68876350419i	0.0000 - 4.3296i

6. Durum: Her Biri Ayrı Kontrolcülü Merkezden Etkiyen Sinüs Input

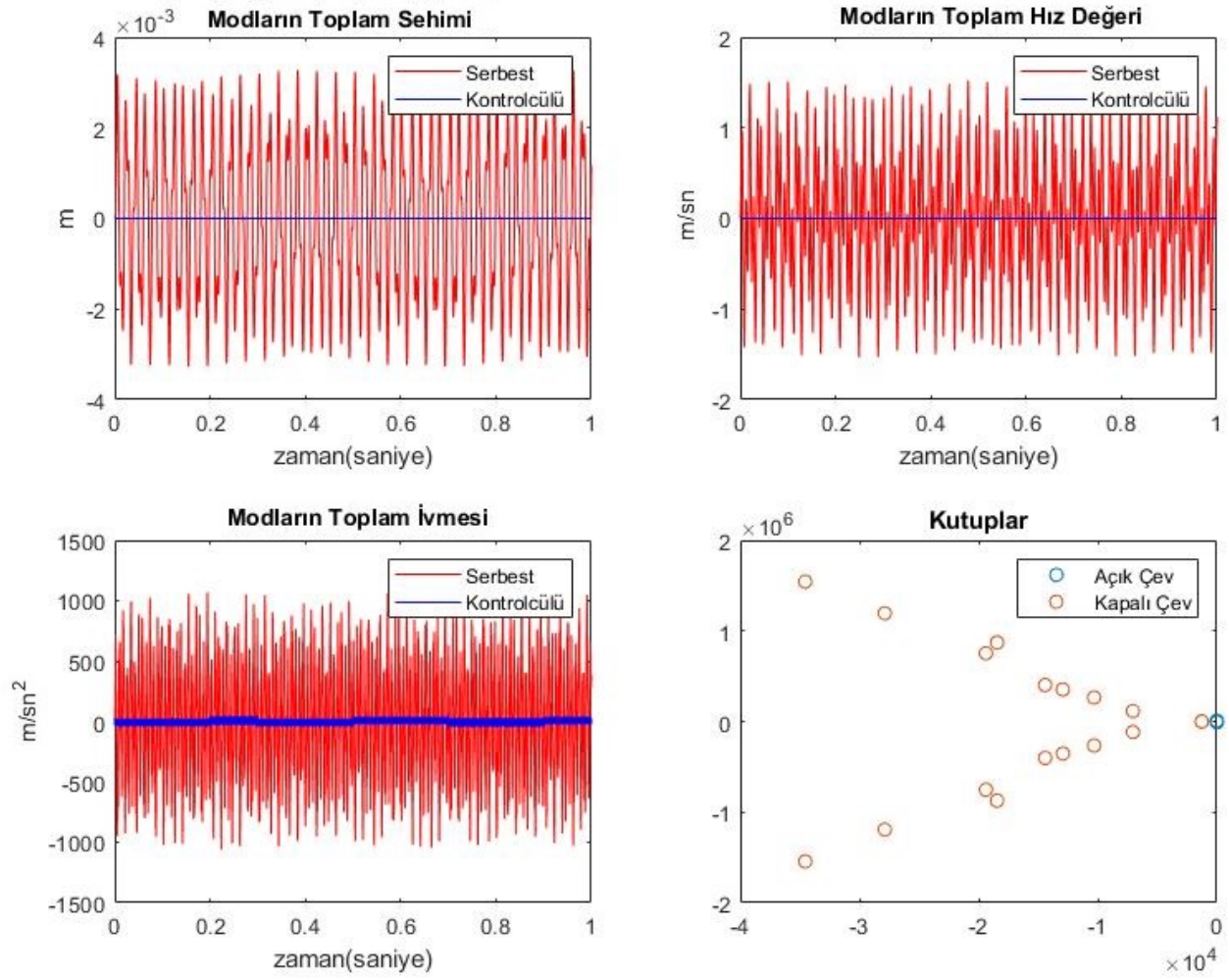
a) A tipi Yerleşim Eyleyici Yerleşimi

Tablo 4. 22 A tipi eyleyici konumları ve sensör konumları

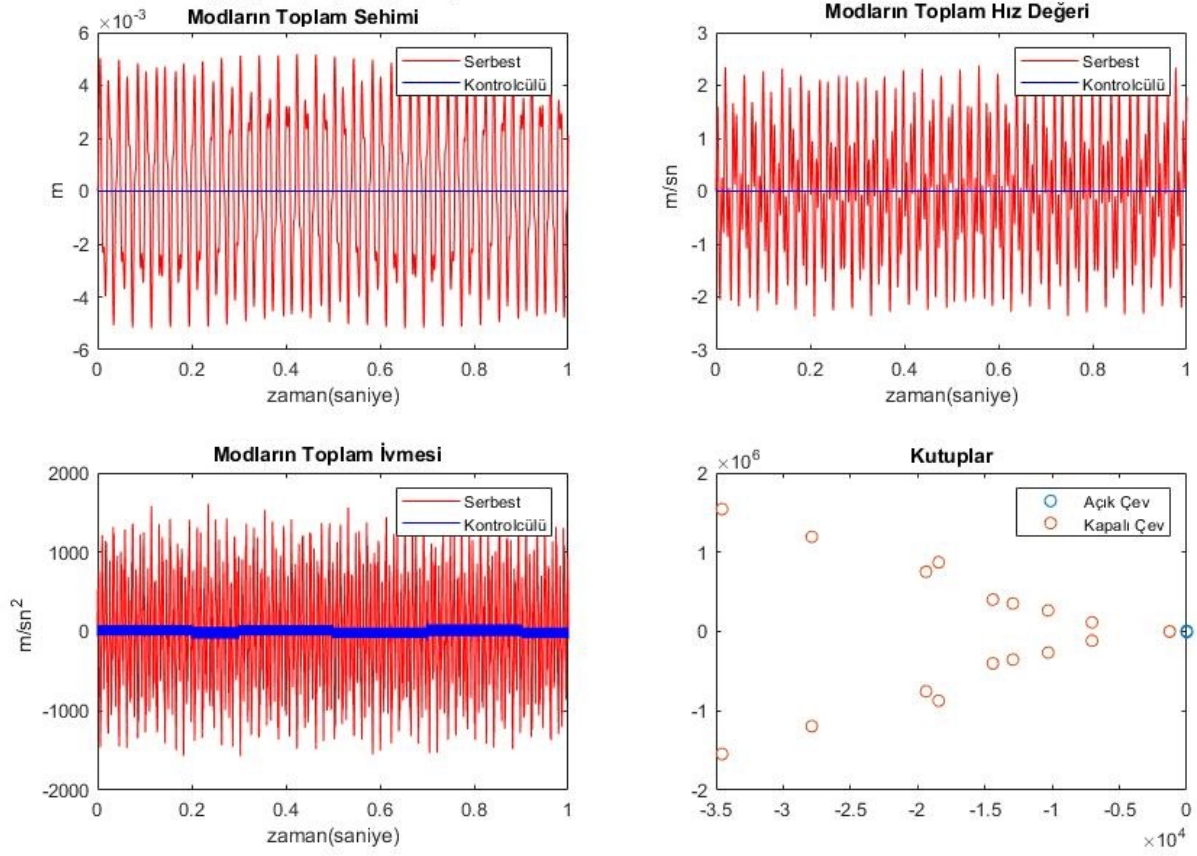
Koordinatlar	1. Eyleyici	2. Eyleyici	3. Eyleyici	4. Eyleyici	5. Eyleyici	6. Eyleyici	7. Eyleyici	8. Eyleyici	1. Sensör	2. Sensör
X eksen (m)	0.05	0.05	0.05	0.15	0.15	0.15	0.25	0.25	0.075	0.15
Y eksen (m)	0.03	0.1	0.1667	0.0333	0.1	0.1667	0.0333	0.1	0.1	0.1



Şekil 4. 30 Plak boyutları, eyleyici tipi, bozucu giriş ve sensörlerin gösterimi



Şekil 4. 31 A tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 1. sensör değerleri



Şekil 4. 32 A tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 2. sensör değerleri

Tablo 4. 23 Kapalı çevrim kökleri ve sistem kökleri

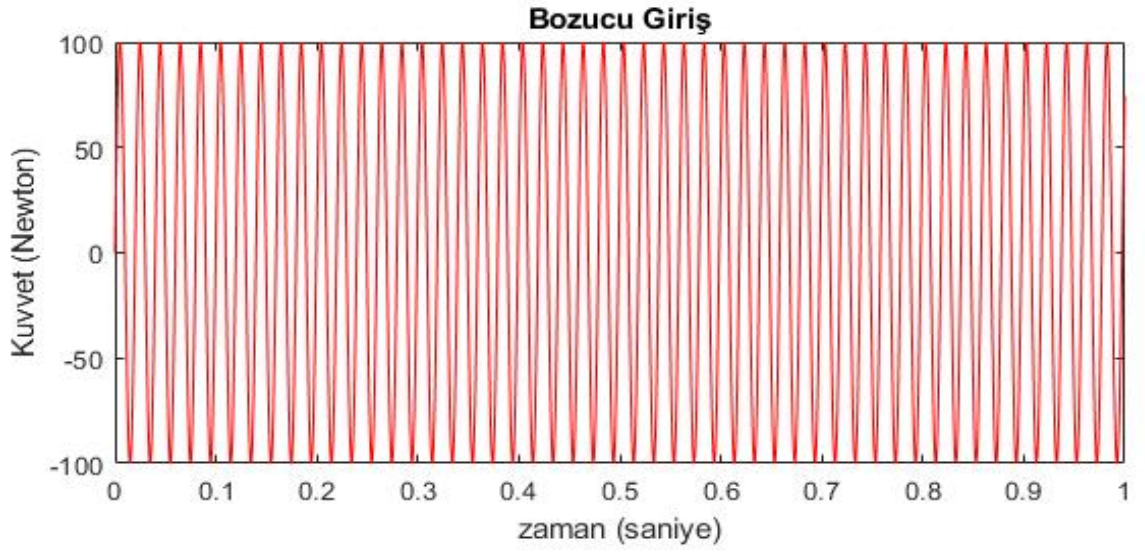
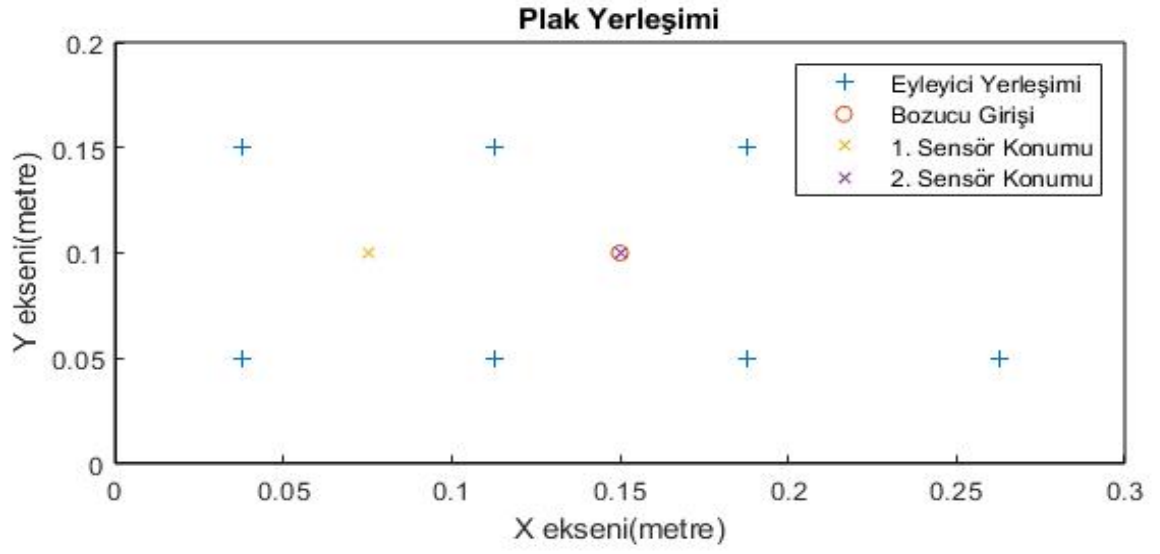
Kapalı Çevrim Kutupları	Sistemin Kutupları
-34549.5561035207 + 1543816.90737827i	0.0000 + 0.7817i
-34549.5561035207 - 1543816.90737827i	0.0000 - 0.7817i
-27876.1388167454 + 1193668.84318464i	0.0000 + 5.1114i
-27876.1388167454 - 1193668.84318464i	0.0000 - 5.1114i
-18444.0715263905 + 872768.489112276i	0.0000 + 3.1269i
-18444.0715263905 - 872768.489112276i	0.0000 - 3.1269i
-19381.8166462898 + 753066.487602428i	0.0000 + 2.7060i
-19381.8166462898 - 753066.487602428i	0.0000 - 2.7060i
-14413.5676089201 + 403201.650672577i	0.0000 + 7.0356i
-14413.5676089201 - 403201.650672577i	0.0000 - 7.0356i
-12920.9154700854 + 353573.307652388i	0.0000 + 2.4053i
-12920.9154700854 - 353573.307652388i	0.0000 - 2.4053i
-10301.4689377921 + 265492.318772945i	0.0000 + 1.5033i

-10301.4689377921 - 265492.318772945i	0.0000 - 1.5033i
-7047.70016113666 + 115251.841308685i	0.0000 + 5.8330i
-7047.70016113666 - 115251.841308685i	0.0000 - 5.8330i
-1273.90870561476 + 1404.64194838888i	0.0000 + 4.3296i
-1273.90870561476 - 1404.64194838888i	0.0000 - 4.3296i

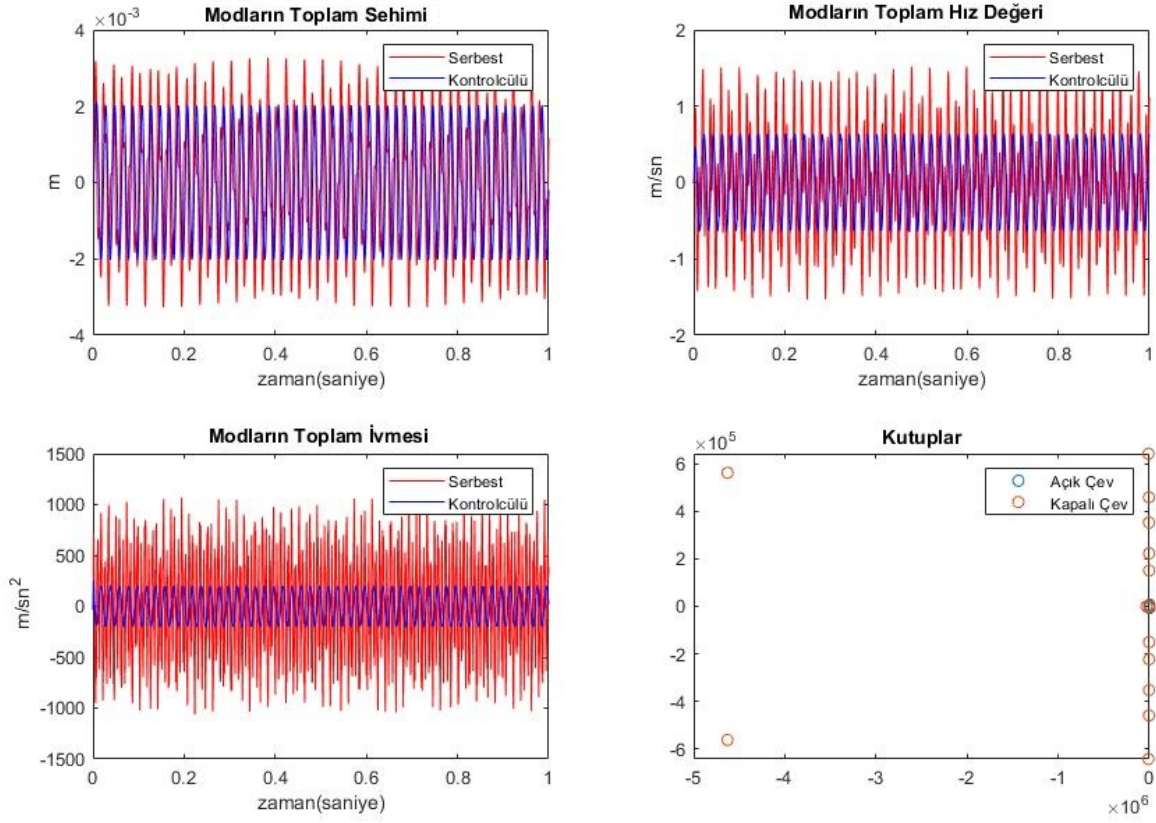
b) B tipi Yerleşim Eyleyici Yerleşimi

Tablo 4. 24 B tipi eyleyici yerleşimi koordinatları

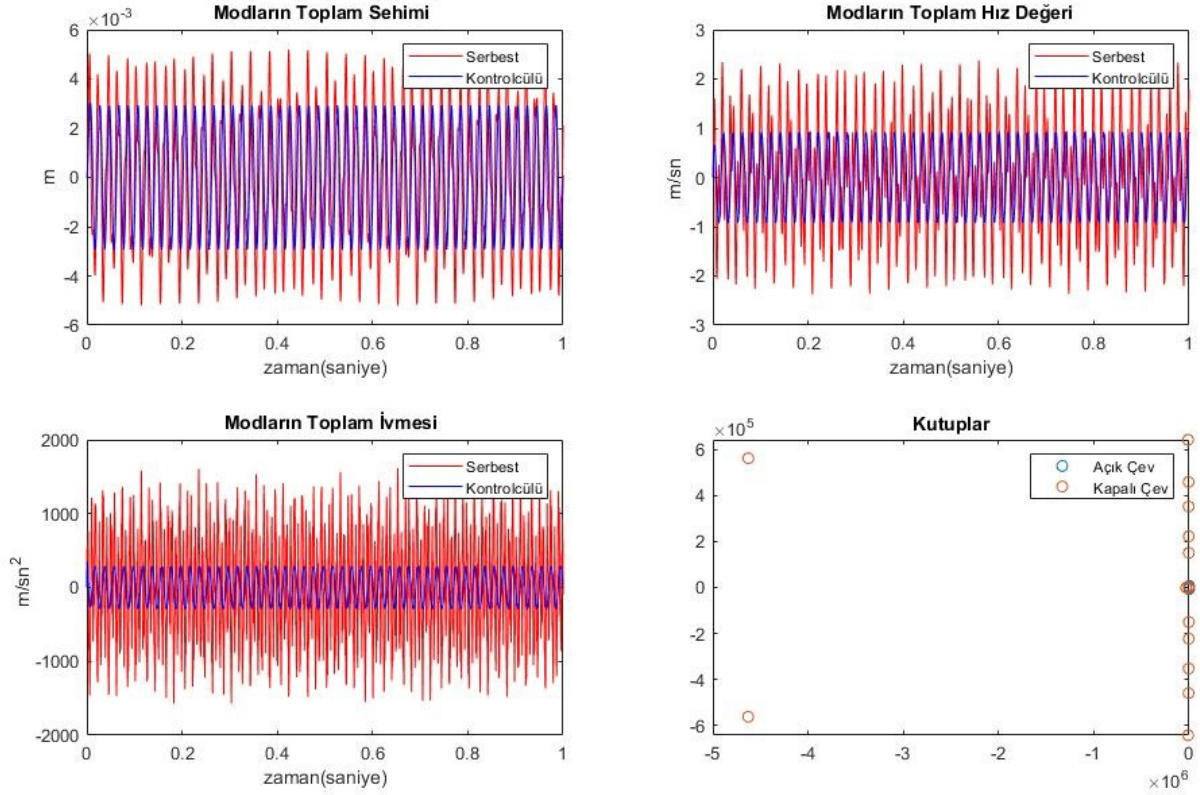
Koordinatlar	1. Eyleyici	2. Eyleyici	3. Eyleyici	4. Eyleyici	5. Eyleyici	6. Eyleyici	7. Eyleyici	8. Eyleyici	1. Sensor	2. Sensor
X Eksen (metre)	0.0375	0.1125	0.0375	0.1125	0.1875	0.1875	0.2625	0.2625	0.075	0.15
Y Eksen (metre)	0.05	0.05	0.15	0.15	0.05	0.15	0.05	0.15	0.1	0.1



Şekil 4. 33 Plak boyutları, eyleyici tipi, bozucu giriş ve sensörlerin gösterimi



Şekil 4. 34 B tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 1. sensör değerleri



Şekil 4. 35 B tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 2. sensör değerleri

Tablo 4. 25 Kapalı çevrim kökleri ve sistem kökleri

Kapalı Çevrim Kutupları	Sistemin Kutupları
-4628118.03794502 + 561128.454438233i	0.0000 + 0.7817i
-4628118.03794502 - 561128.454438233i	0.0000 - 0.7817i
-10406.4897126294 + 641557.549673567i	0.0000 + 5.1114i
-10406.4897126294 - 641557.549673567i	0.0000 - 5.1114i
-5113.61023010465 + 458354.728586771i	0.0000 + 3.1269i
-5113.61023010465 - 458354.728586771i	0.0000 - 3.1269i
-4182.05861020703 + 352011.146769099i	0.0000 + 2.7060i
-4182.05861020703 - 352011.146769099i	0.0000 - 2.7060i
-3003.85873493358 + 222719.385832698i	0.0000 + 7.0356i
-3003.85873493358 - 222719.385832698i	0.0000 - 7.0356i
-2417.43040398862 + 150384.743759429i	0.0000 + 2.4053i
-2417.43040398862 - 150384.743759429i	0.0000 - 2.4053i
-30942.5431192164 + 0.000000000000000i	0.0000 + 1.5033i
-362.334598429552 + 0.000000000000000i	0.0000 - 1.5033i
-1933.69851346906 + 2202.41054172437i	0.0000 + 5.8330i

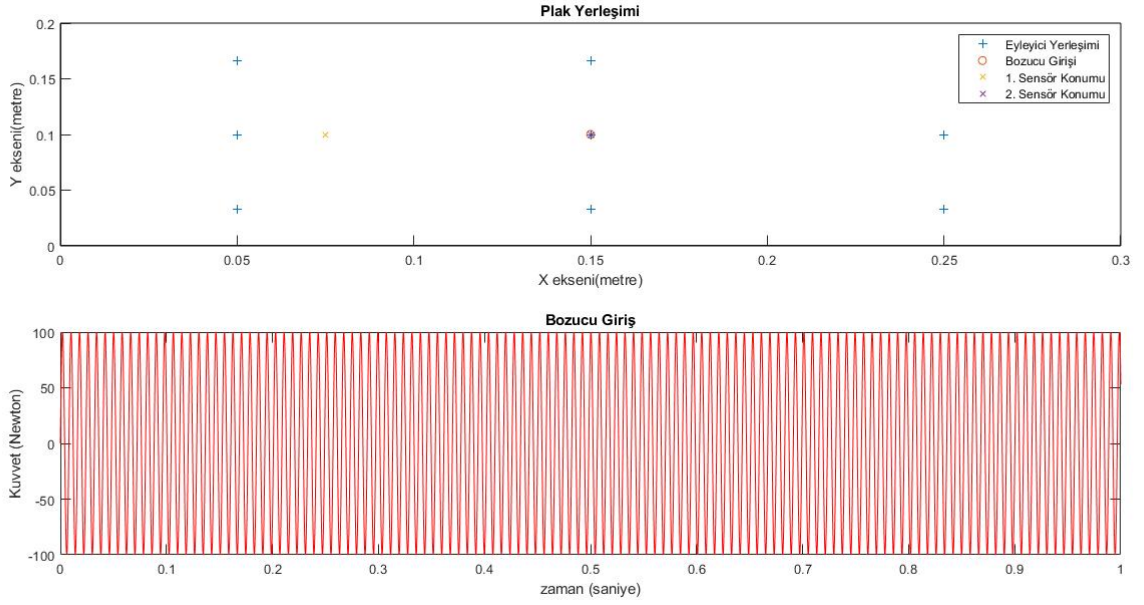
-1933.69851346906 - 2202.41054172437i	0.0000 - 5.8330i
-896.956568426472 + 1672.68876350419i	0.0000 + 4.3296i
-896.956568426472 - 1672.68876350419i	0.0000 - 4.3296i

7. Durum: Tek Kontrolcülü Merkezden Etkiyen Rezonans Input

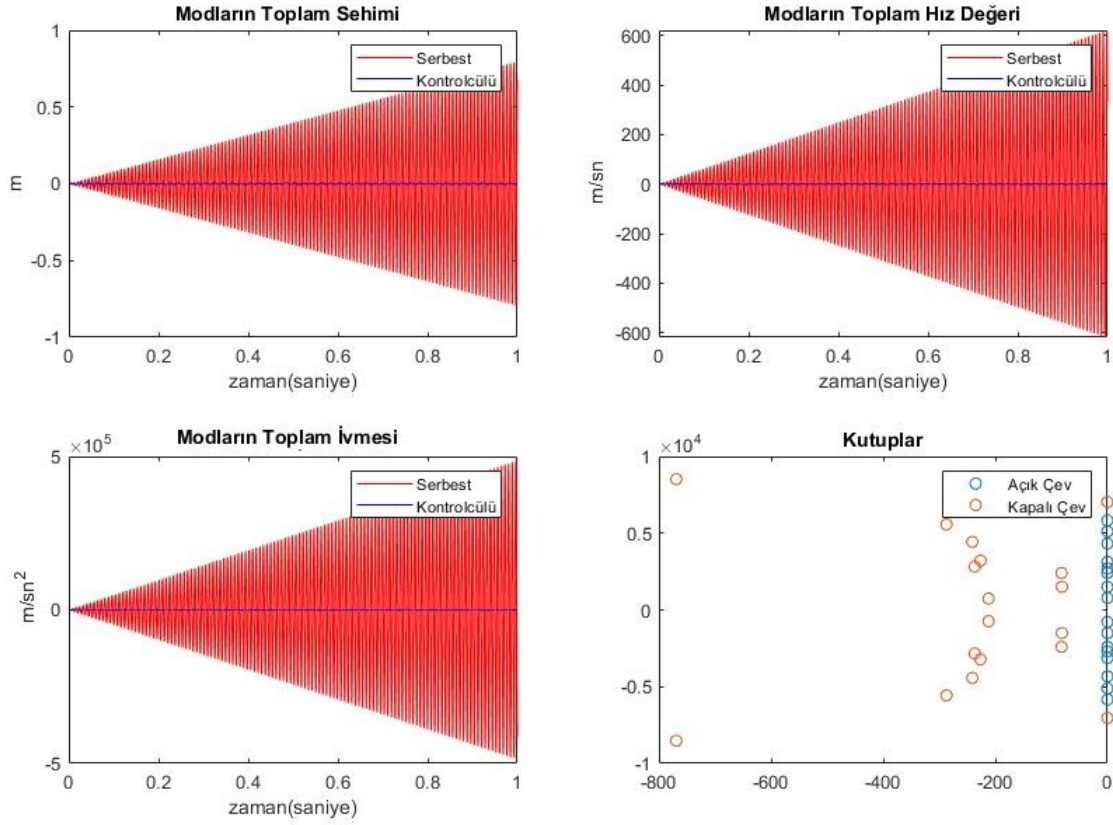
a) A tipi Yerleşim Eyleyici Yerleşimi

Tablo 4. 26 A tipi eyleyici konumları ve sensör konumları

Koordinatlar	1. Eyleyici	2. Eyleyici	3. Eyleyici	4. Eyleyici	5. Eyleyici	6. Eyleyici	7. Eyleyici	8. Eyleyici	1. Sensör	2. Sensör
X ekseni (m)	0.05	0.05	0.05	0.15	0.15	0.15	0.25	0.25	0.075	0.15
Y ekseni (m)	0.03	0.1	0.1667	0.0333	0.1	0.1667	0.0333	0.1	0.1	0.1



Şekil 4. 36 Plak boyutları, eyleyici tipi, bozucu giriş ve sensörlerin gösterimi



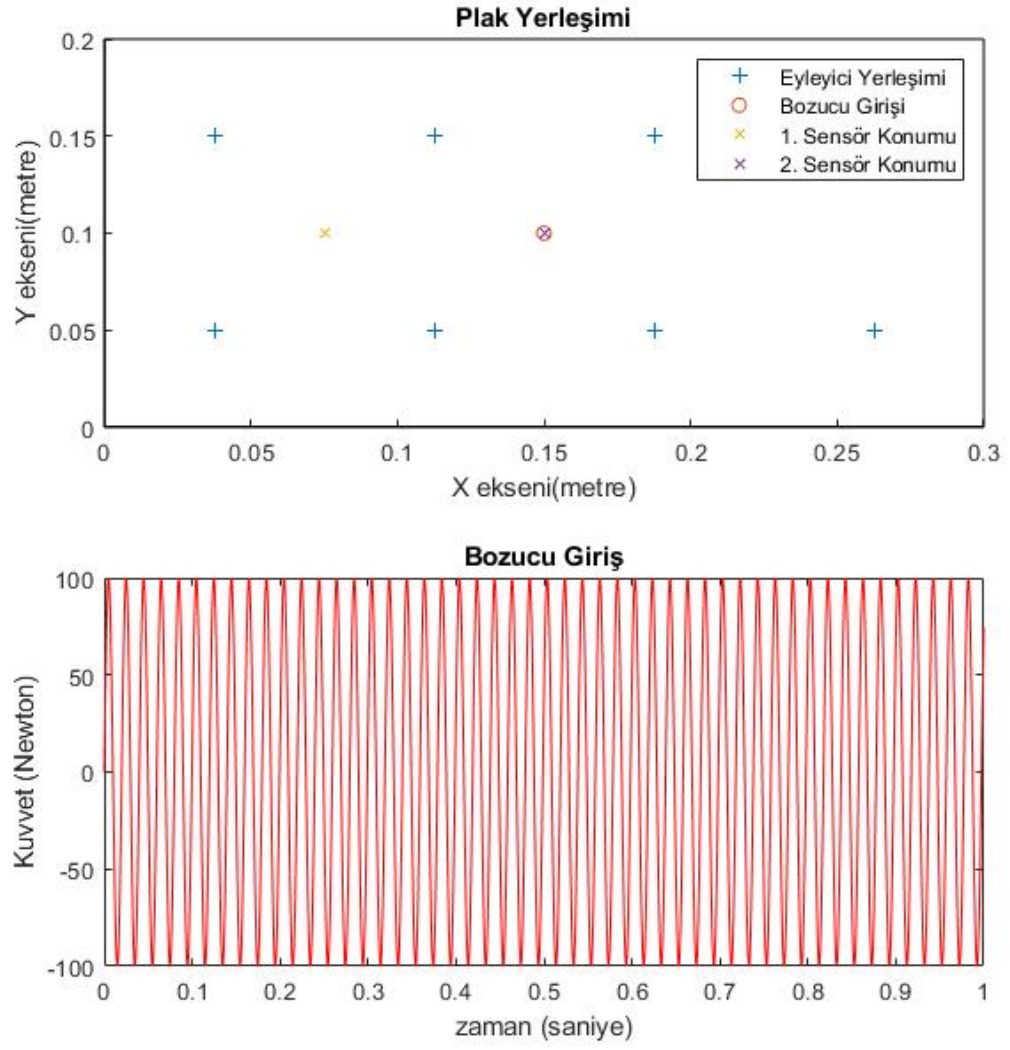
Şekil 4. 37 A tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 1. sensör değerleri

Rezonans durumu için 2. durum A tipi yerleşimdeki kontrolcü kullanılmıştır. Bu sebeple kökleri tekrar verilmemiştir.

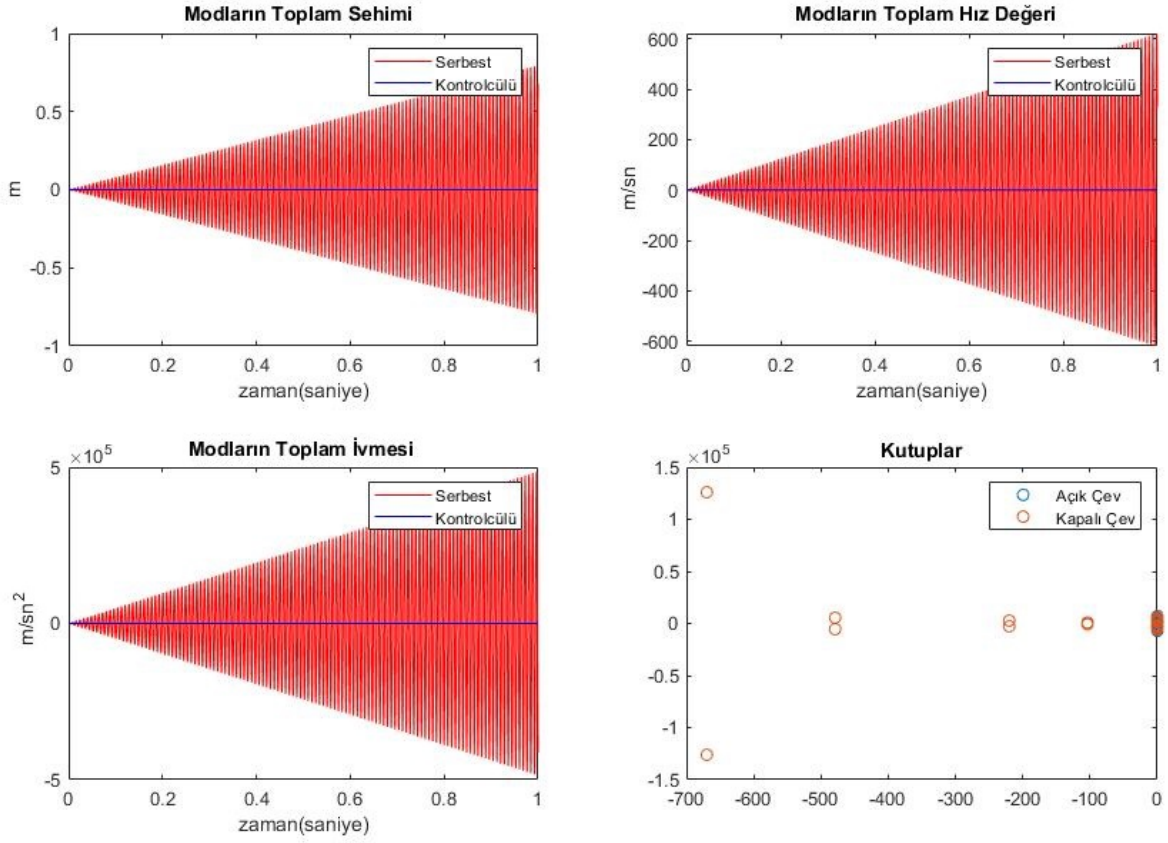
b) B tipi Yerleşim Eyleyici Yerleşimi

Tablo 4. 27 B tipi eyleyici yerleşimi koordinatları

Koordinatlar	1. Eyleyici	2. Eyleyici	3. Eyleyici	4. Eyleyici	5. Eyleyici	6. Eyleyici	7. Eyleyici	8. Eyleyici	1. Sensör	2. Sensör
X Ekseni (metre)	0.0375	0.1125	0.0375	0.1125	0.1875	0.1875	0.2625	0.2625	0.075	0.15
Y Ekseni (metre)	0.05	0.05	0.15	0.15	0.05	0.15	0.05	0.15	0.1	0.1



Şekil 4. 38 Plak boyutları, eyleyici tipi, bozucu giriş ve sensörlerin gösterimi



Şekil 4. 39 B tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 1. sensör değerleri

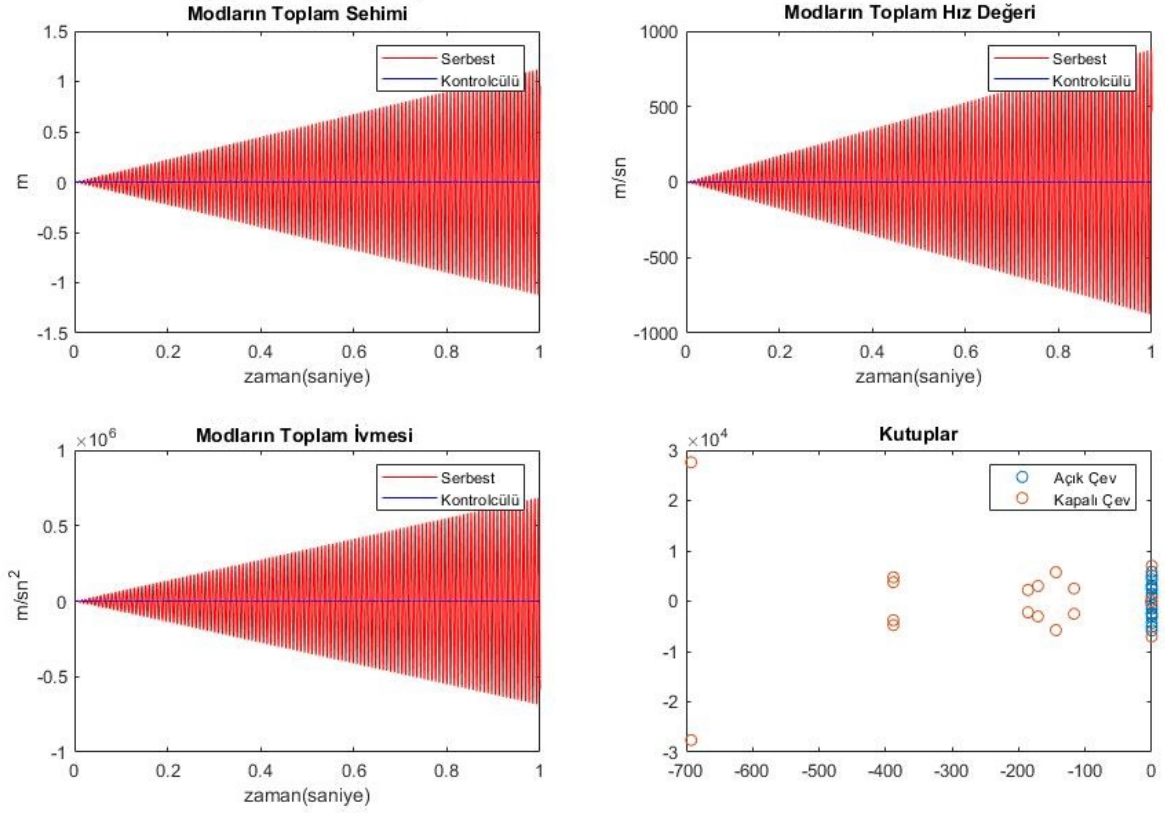
Rezonans durumu için 2. durum B tipi yerleşimdeki kontrolcü kullanılmıştır. Bu sebeple kökleri tekrar verilmemiştir.

8. Durum: Çift Kontrolcü Merkezden Etkiyen Rezonans Input

a) A tipi Yerleşim Eyleyici Yerleşimi

Tablo 4. 28 A tipi eyleyici konumları ve sensör konumları

Koordinatlar	1. Eyleyici	2. Eyleyici	3. Eyleyici	4. Eyleyici	5. Eyleyici	6. Eyleyici	7. Eyleyici	8. Eyleyici	1. Sensör	2. Sensör
X eksen (m)	0.05	0.05	0.05	0.15	0.15	0.15	0.25	0.25	0.075	0.15
Y eksen (m)	0.03	0.1	0.1667	0.0333	0.1	0.1667	0.0333	0.1	0.1	0.1



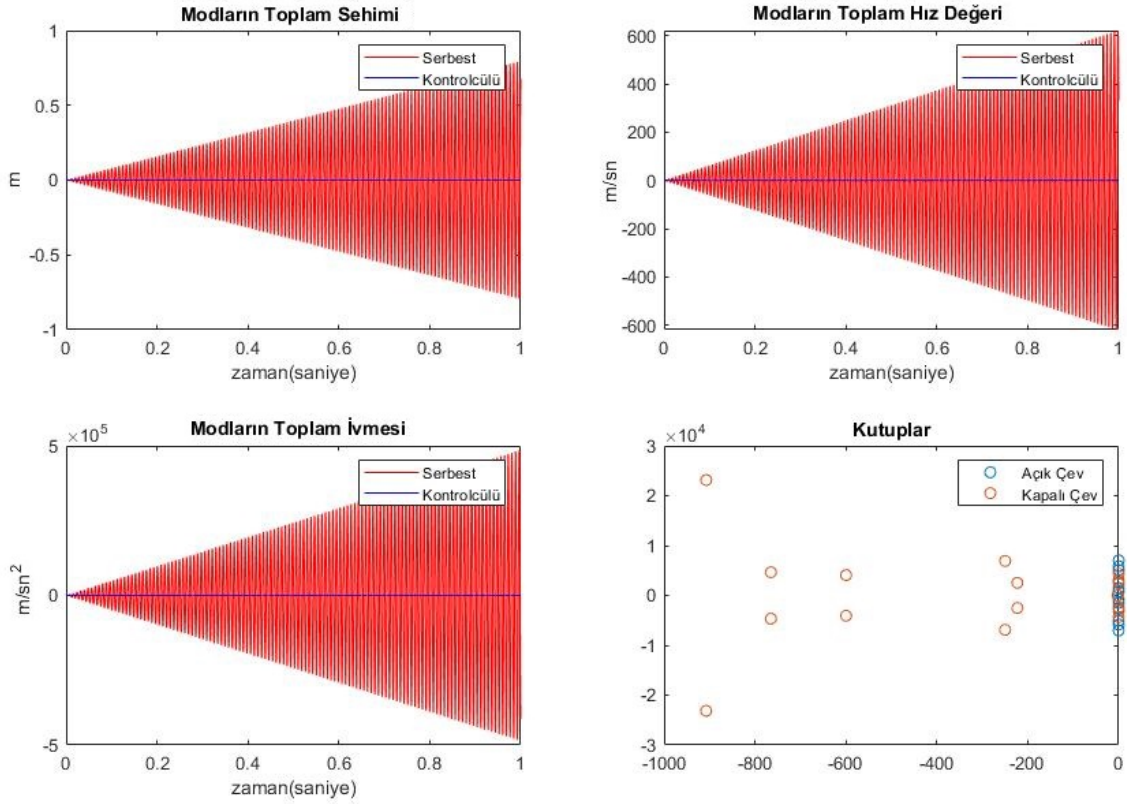
Şekil 4. 40 A tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 1. sensör değerleri

Rezonans durumu için 4. durum A tipi yerleşimdeki kontrolcü kullanılmıştır. Bu sebeple kökleri tekrar verilmemiştir.

b) B tipi Yerleşim Eyleyici Yerleşimi

Tablo 4. 29 B tipi eyleyici yerleşimi koordinatları

Koordinatlar	1. Eyleyici	2. Eyleyici	3. Eyleyici	4. Eyleyici	5. Eyleyici	6. Eyleyici	7. Eyleyici	8. Eyleyici	1. Sensör	2. Sensör
X Eksen (metre)	0.0375	0.1125	0.0375	0.1125	0.1875	0.1875	0.2625	0.2625	0.075	0.15
Y Eksen (metre)	0.05	0.05	0.15	0.15	0.05	0.15	0.05	0.15	0.1	0.1



Şekil 4. 41 B tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 1. sensör değerleri

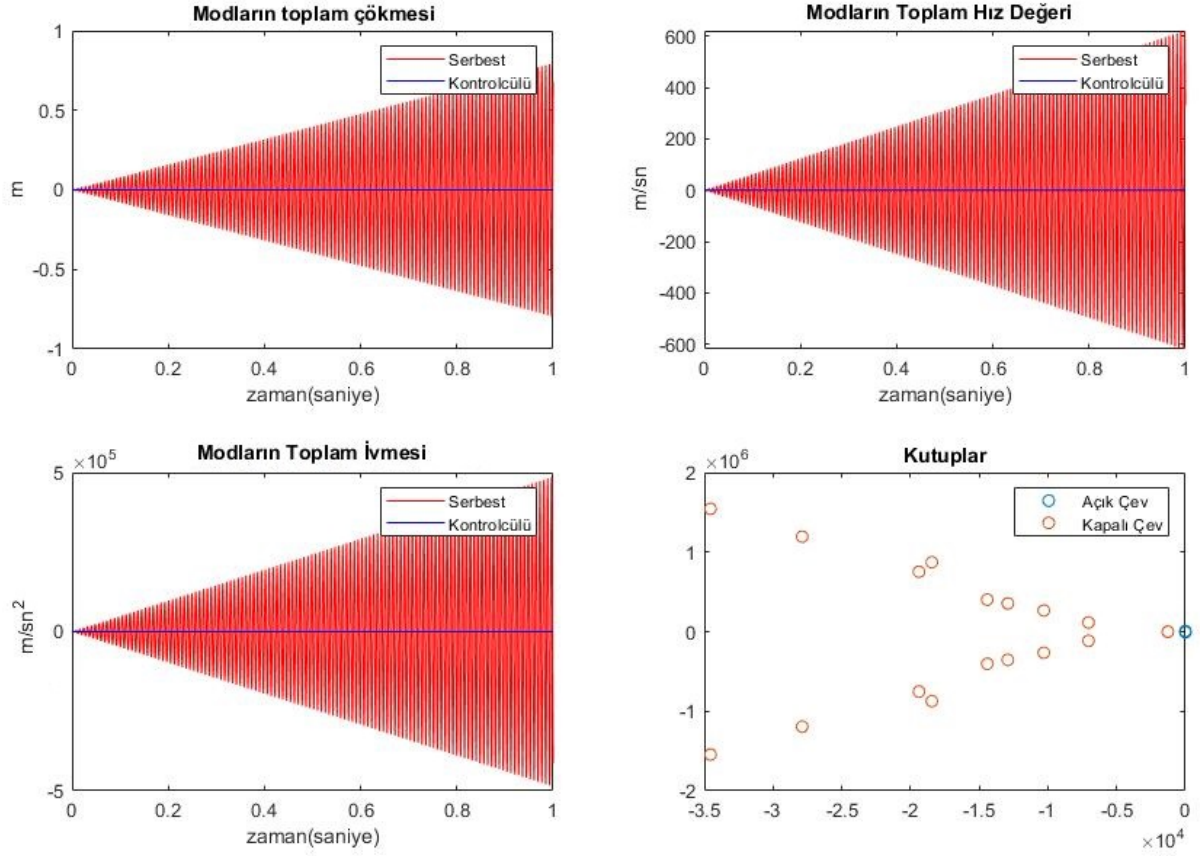
Rezonans durumu için 4. durum B tipi yerleşimdeki kontrolcü kullanılmıştır. Bu sebeple kökleri tekrar verilmemiştir.

9. Durum: Her Biri Ayrı Kontrolcülü Merkezden Etkiyen Rezonans Input

a) A tipi Yerleşim Eyleyici Yerleşimi

Tablo 4. 30 B tipi eyleyici yerleşimi koordinatları

Koordinatlar	1. Eyleyici	2. Eyleyici	3. Eyleyici	4. Eyleyici	5. Eyleyici	6. Eyleyici	7. Eyleyici	8. Eyleyici	1. Sensör	2. Sensör
X ekseni (m)	0.05	0.05	0.05	0.15	0.15	0.15	0.25	0.25	0.075	0.15
Y ekseni (m)	0.03	0.1	0.1667	0.0333	0.1	0.1667	0.0333	0.1	0.1	0.1



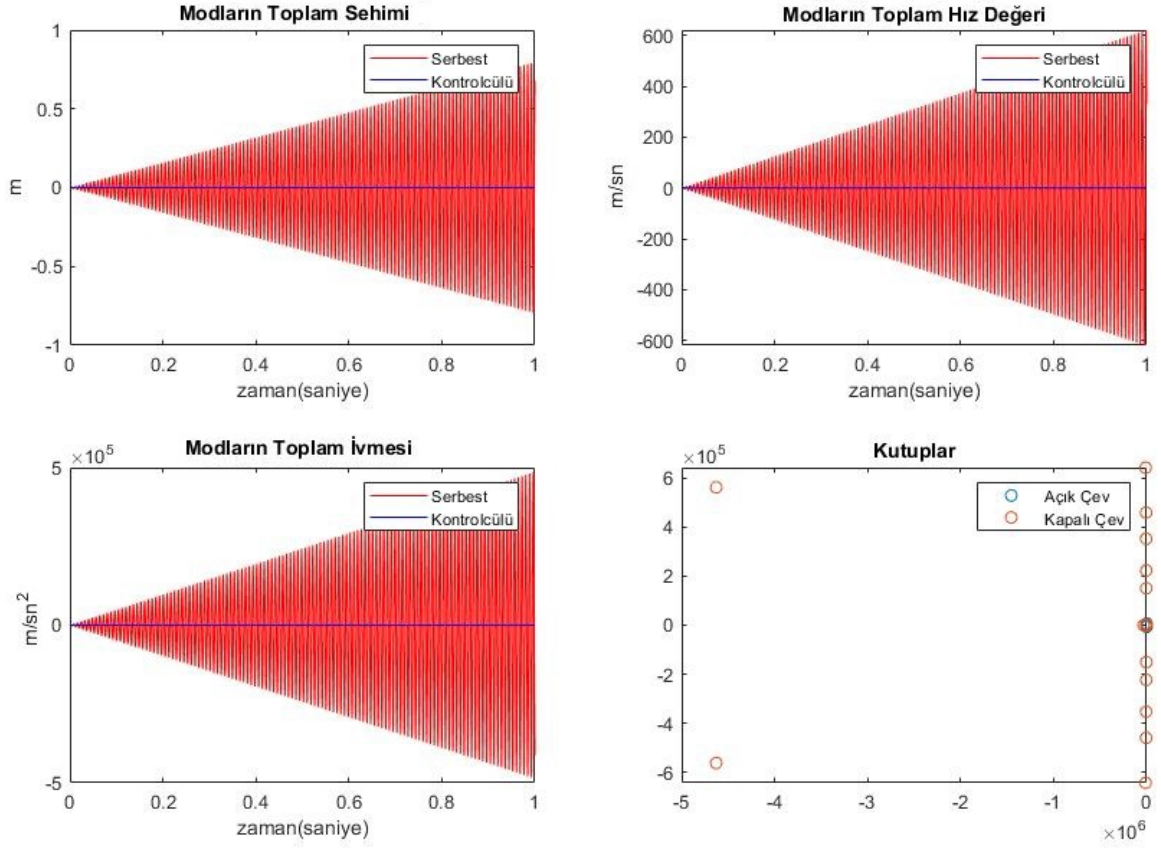
Şekil 4. 42 A tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 1. sensör değerleri

Rezonans durumu için 6. durum A tipi yerleşimdeki kontrolcü kullanılmıştır. Bu sebeple kökleri tekrar verilmemiştir.

b) B tipi Yerleşim Eyleyici Yerleşimi

Tablo 4. 31 B tipi eyleyici yerleşimi koordinatları

Koordinatlar	1. Eyleyici	2. Eyleyici	3. Eyleyici	4. Eyleyici	5. Eyleyici	6. Eyleyici	7. Eyleyici	8. Eyleyici	1. Sensör	2. Sensör
X Eksen (metre)	0.0375	0.1125	0.0375	0.1125	0.1875	0.1875	0.2625	0.2625	0.075	0.15
Y Eksen (metre)	0.05	0.05	0.15	0.15	0.05	0.15	0.05	0.15	0.1	0.1



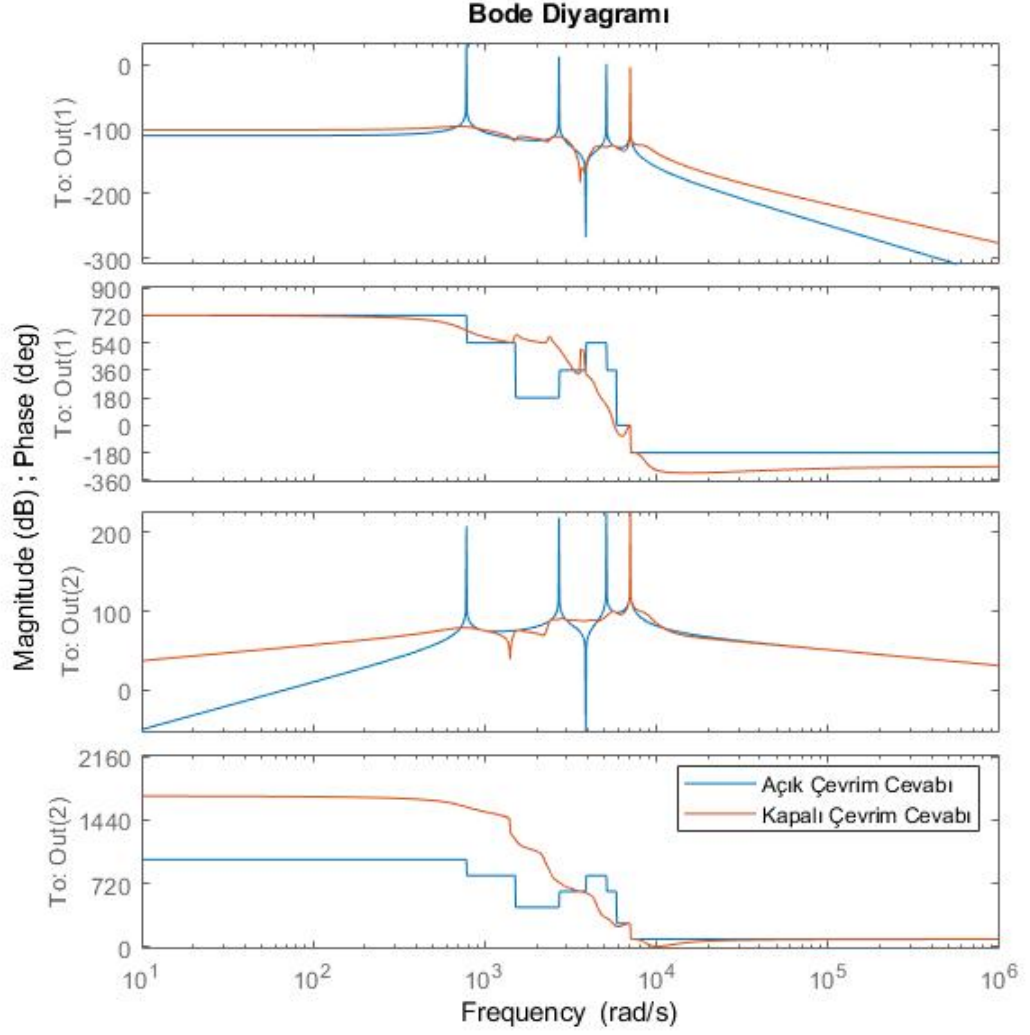
Şekil 4. 43 B tipi yerleştirilen eyleyicilerin serbest ve kontrolcülü toplam çökme, hız ve ivme cevabı 1. sensör değerleri

Rezonans durumu için 6. durum B tipi yerleşimdeki kontrolcü kullanılmıştır. Bu sebeple kökleri tekrar verilmemiştir.

Bode Diyagramları:

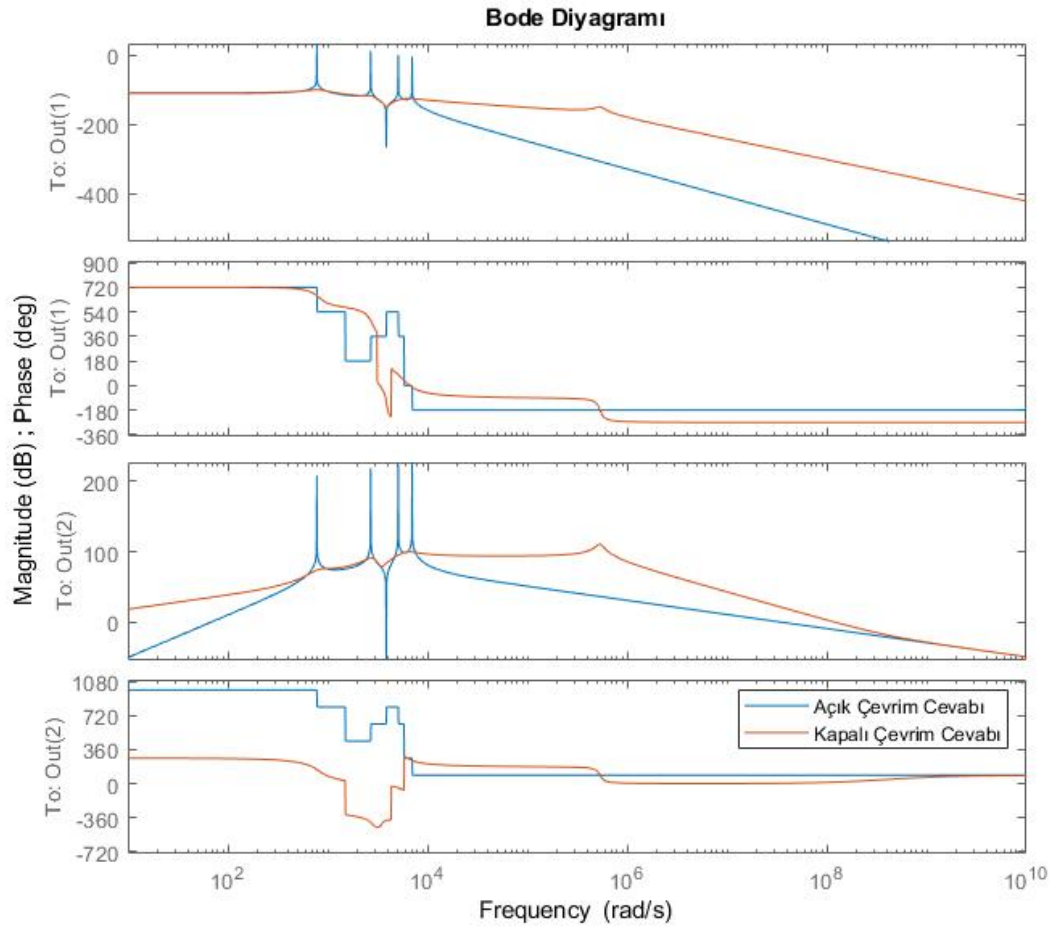
Diyagramlardaki out(1) deplasman toplamalarının frekans cevabını, out(2) ise ivme toplamalarının frekans cevabını ifade etmektedir.

1. Durum A tipi;



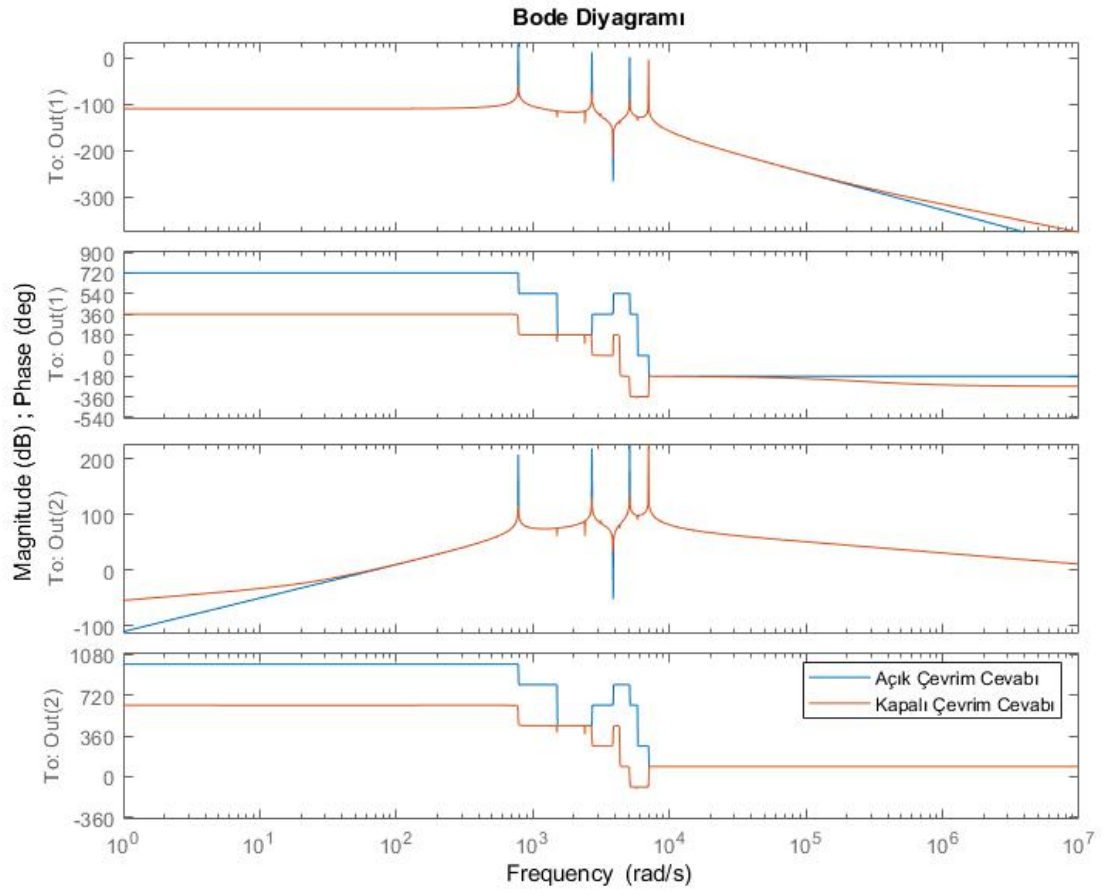
Şekil 4. 44 1. durum a tipi kontrolcü bode diyagramı

1. Durum B tipi;



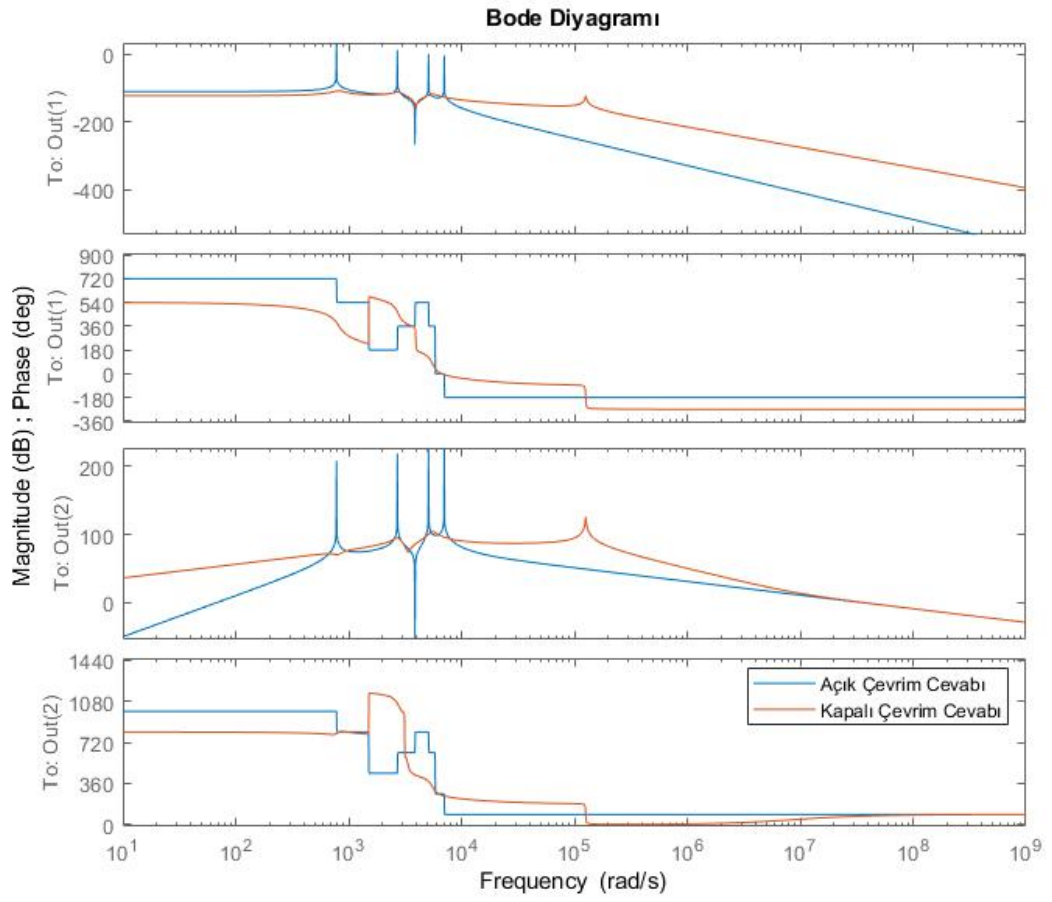
Şekil 4. 45 1. durum b tipi kontrolcü bode diyagramı

2. Durum A tipi;



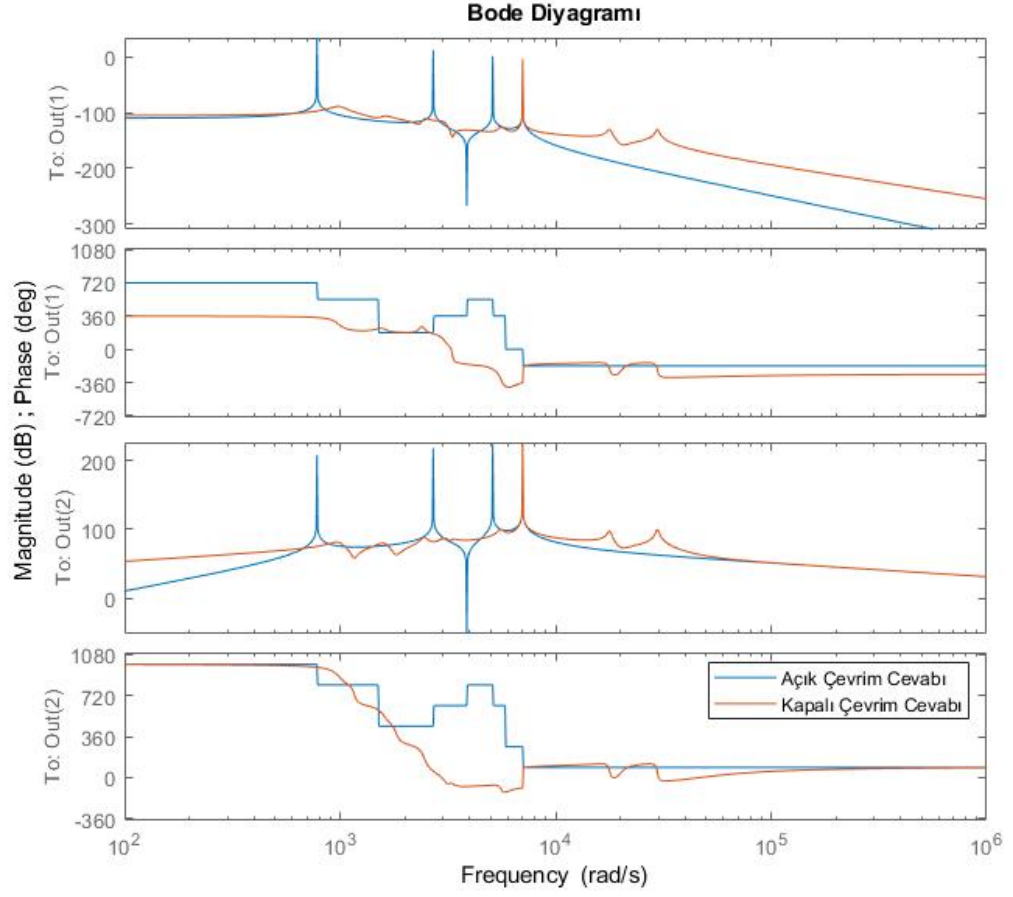
Şekil 4. 46 2. durum a tipi kontrolcü bode diyagramı

2. Durum B tipi;



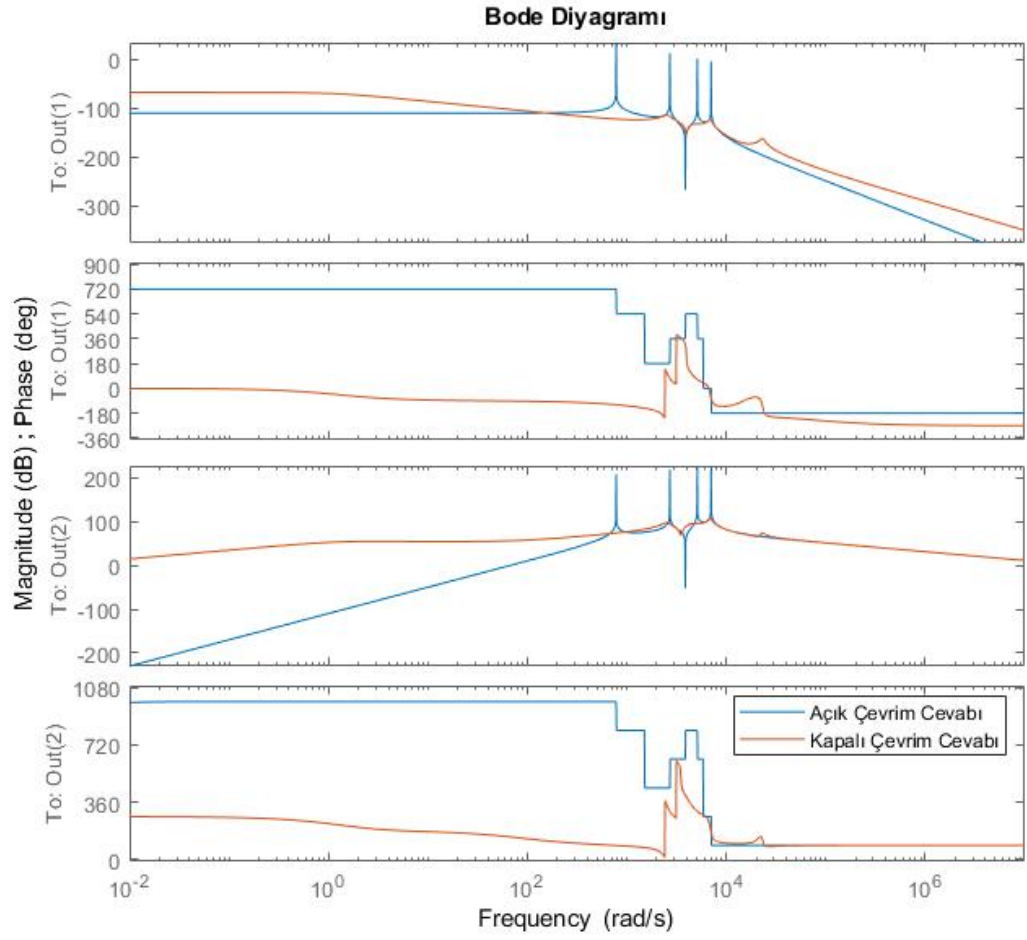
Şekil 4. 47 2. durum b tipi kontrolcü bode diyagramı

3. Durum A tipi;



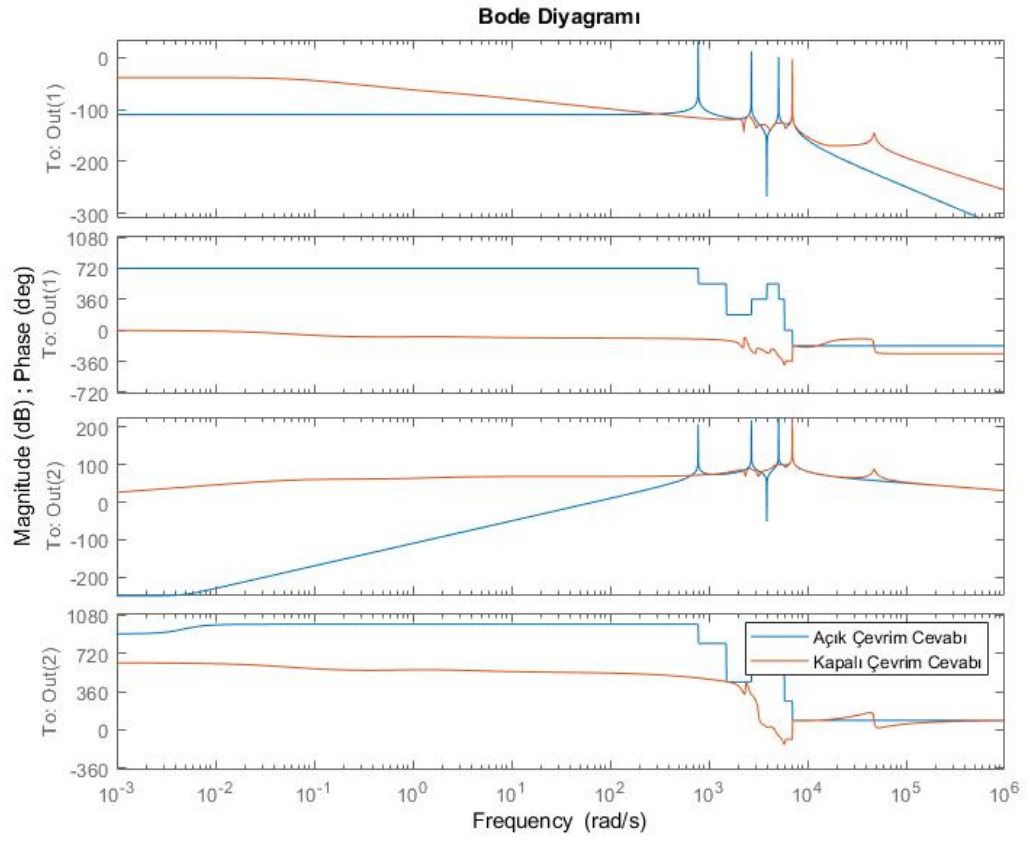
Şekil 4. 48 3. durum a tipi kontrolcü bode diyagramı

3. Durum B tipi;



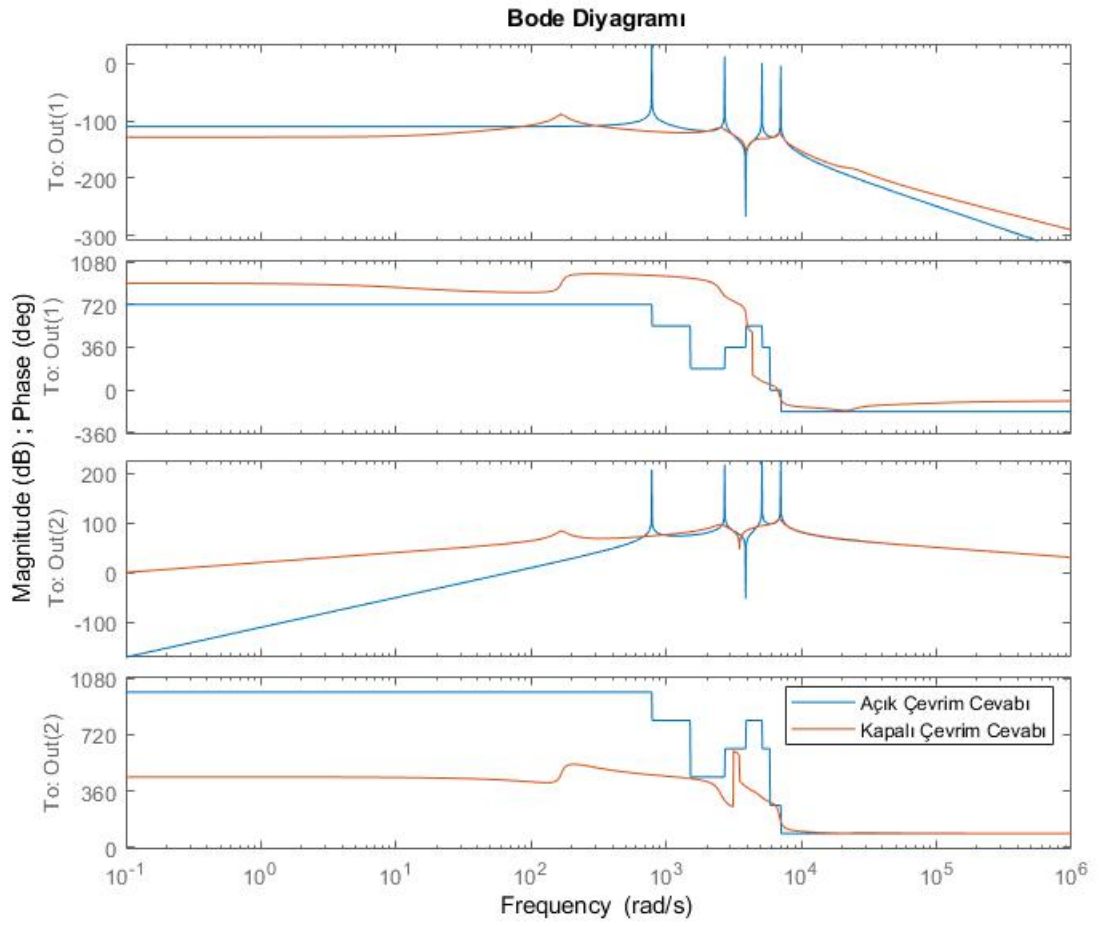
Şekil 4. 49 3. durum b tipi kontrolcü bode diyagramı

4. Durum A tipi



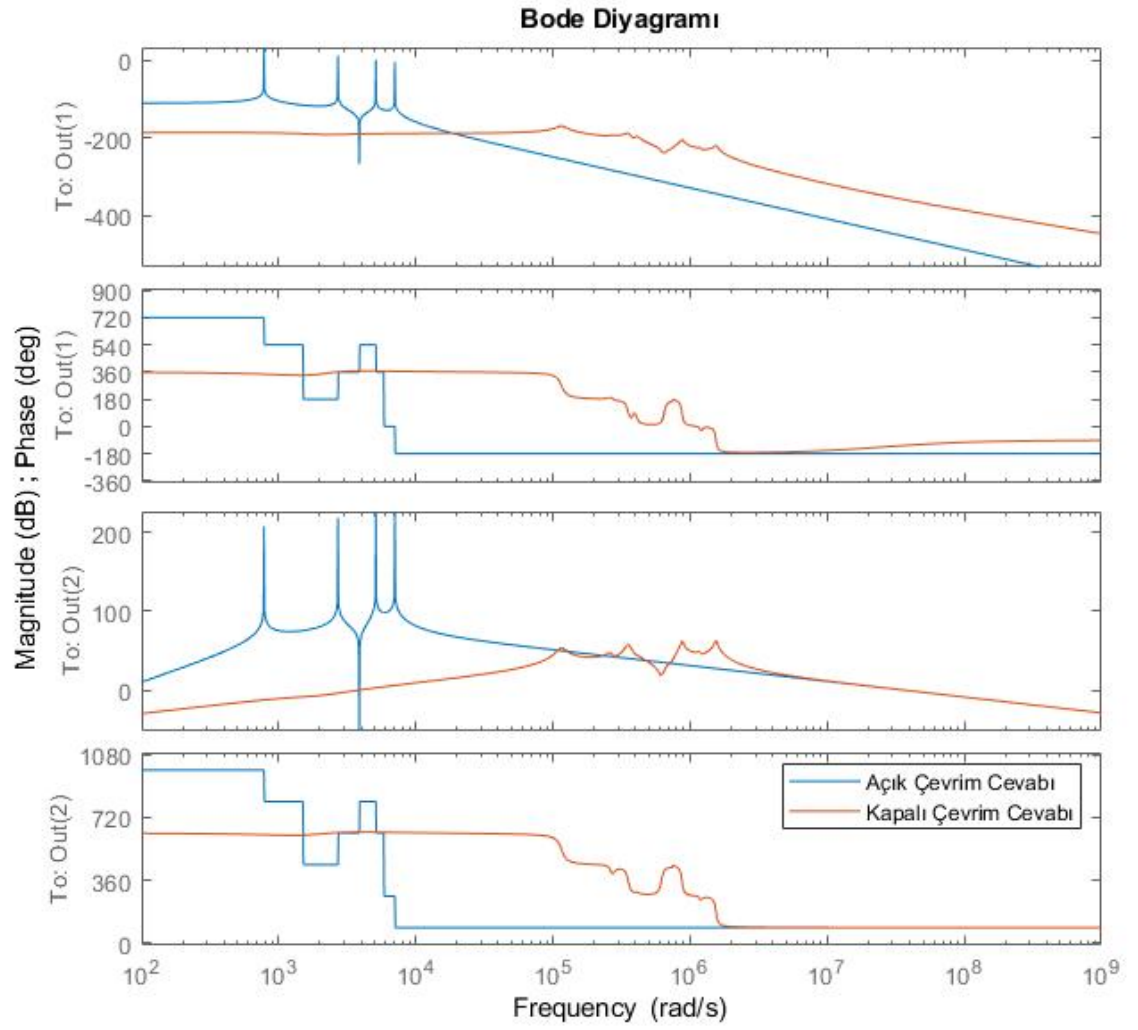
Şekil 4. 50 4. durum a tipi kontrolcü bode diyagramı

4. Durum B tipi



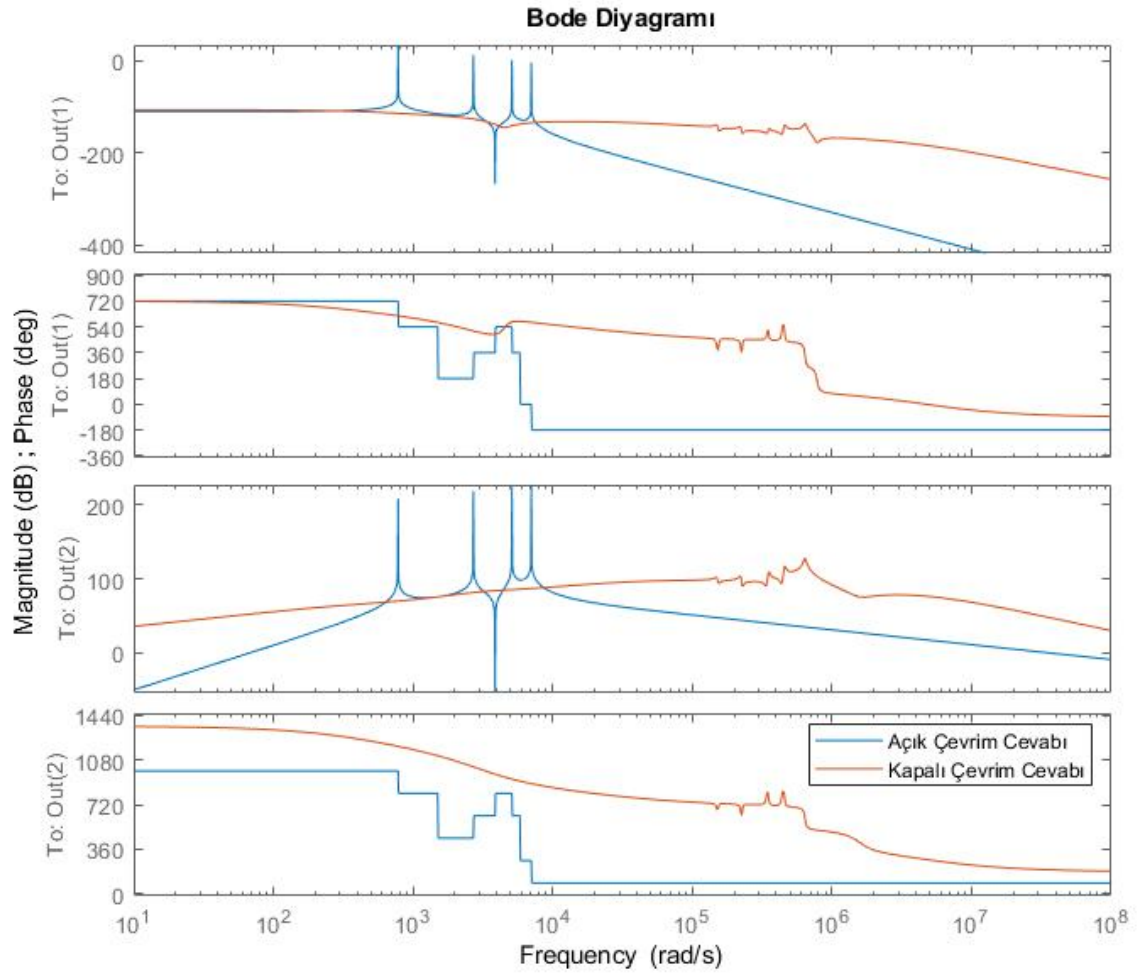
Şekil 4. 51 4. durum b tipi kontrolcü bode diyagramı

5. Durum A tipi



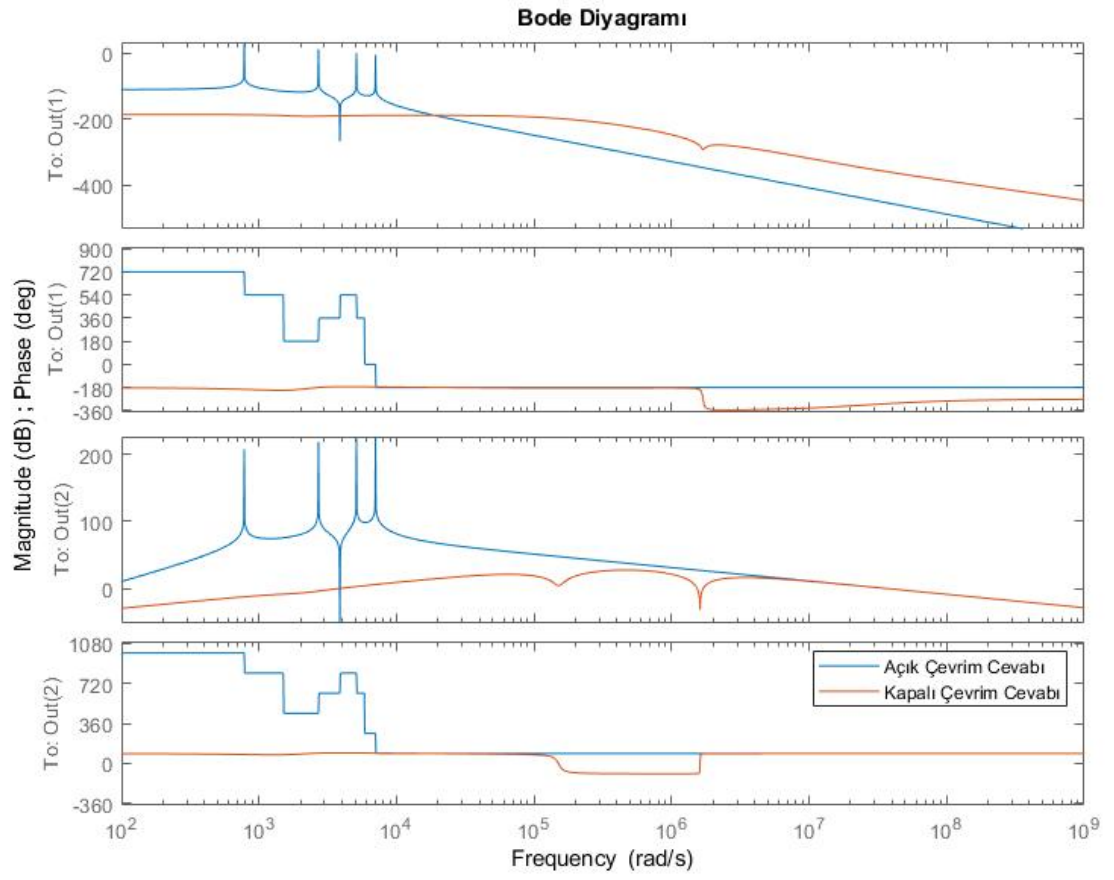
Şekil 4. 52 5. durum a tipi kontrolcü bode diyagramı

5. Durum B tipi



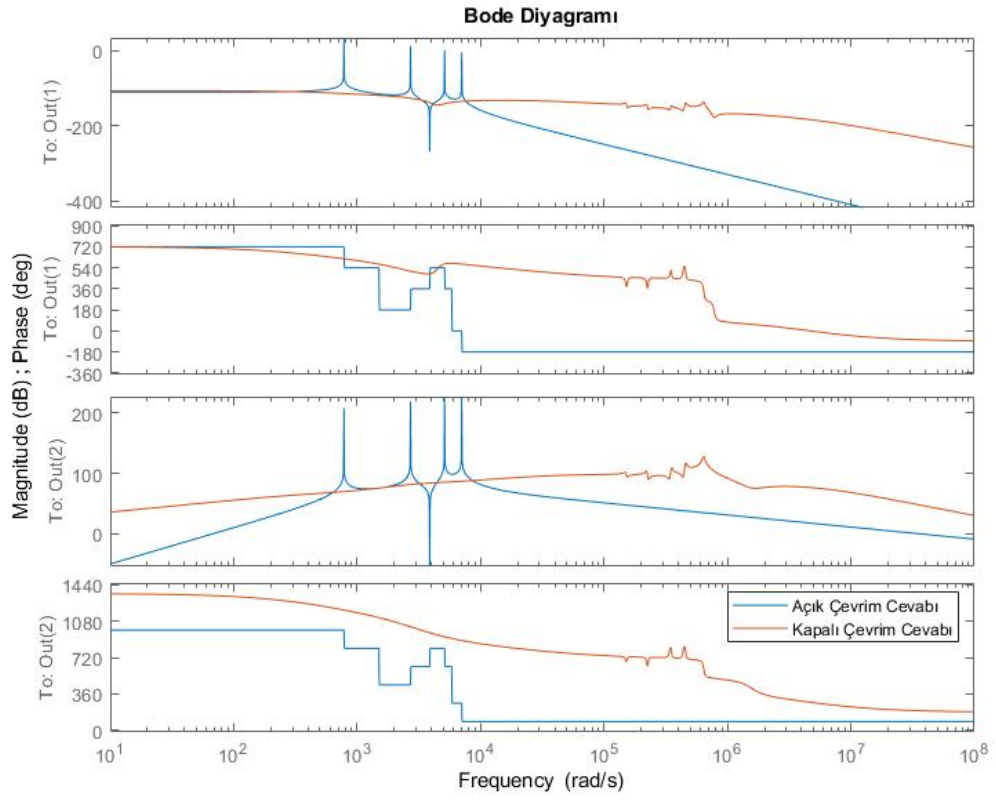
Şekil 4. 53 5. durum b tipi kontrolcü bode diyagramı

6. Durum A tipi



Şekil 4. 54 6. durum a tipi kontrolcü bode diyagramı

6. Durum B tipi

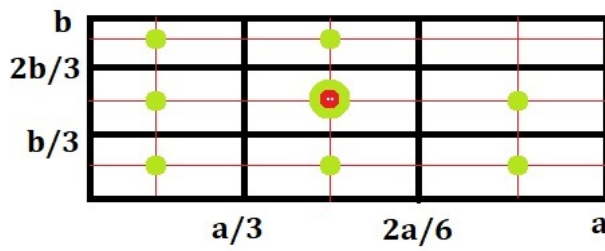


Şekil 4. 55 6. durum b tipi kontrolcü bode diyagramı

Sonuçlar hesaplanırken kuvvetin yeri ve şekli değiştirilmiştir. Son olarak kazanç sayısı 1 ve 2 ve her biri ayrı olarak ayrı ayrı hesaplanmıştır.

- Birim basamak bozucu: 100N
- Sürekli bozucu: $100\sin(315t)$
- Rezonans bozucu: $100\sin(781.7t)$

A tipi eyleyici yerleştirmesi:

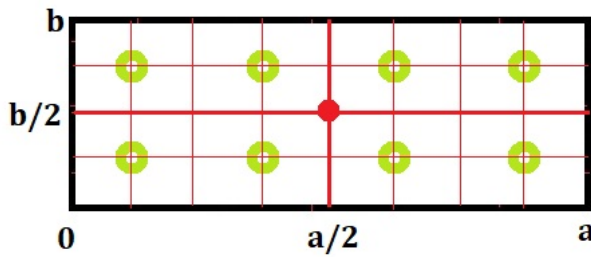


A tipi yerleştirme

Bozucu Giriş
Eyleyiciler

Şekil 5. 1 A tipi yerleştirme

B tipi eyleyici yerleştirmesi;



B tipi yerleştirme

Bozucu Giriş
Eyleyiciler

Şekil 5. 2 B tipi yerleştirme

Yapılan kontrol işleminde sehim ve ivme değerleri azaltılmaya çalışılmıştır. Step input bozucu altındaki A ve B eyleyici yerleşimi karşılaştırıldığında eyleyicilerin

yerleri yapılacak aşım ve oturma zamanına etki ettiği görülmektedir. Tek kontrolcülü step input bozucu girişinde B tipi eyleyici yerleşimi daha verimli çalışmaktadır. Sehim değerlerinde oturma zamanı farkı vardır ancak çökmenin ivme değeri incelendiğinde B tipi eyleyici başarılı bir sönüm yapmaktadır. Çift kontrolcülü step input girişinde A ve B yerleşimleri için maksimum sönümlemede çok büyük bir fark olmamasına rağmen maksimum aşım değeri kötüleşmiştir. Her eyleyicinin ayrı kazanç değerine sahip olduğu durumda ise A ve B yerleşimleri farketmeksizin başarılı bir sönüm yapmıştır.

Sinus bozucu altındaki tek kazançlı A ve B eyleyici yerleşimi karşılaştırıldığında da benzer durum söz konusudur. B tipi eyleyici en başarılı sönümlemeyi yapmıştır. Ancak bozucu girişin sürekli olmasından dolayı titreşim sıfırlanamamıştır. A tipindeki yerleşime göre sinüs bozucu altındaki plaklara 2 kontrolcü denendiğinde 1 kontrolcüye göre kendi içinde daha iyi titreşim kontrolü sağlamıştır ve yerleşme zamanı uzamıştır. B tipi eyleyicide ise iki kazançlı durumda kontrolcünün performansı düştüğü gözlenmektedir. Hem oturma zamanı hem de genlikler bir kontrolcülü kadar iyi bastırılamamıştır. 8 kazançlı durum için ise A tipi yerleşim en verimli sönümünü yapmıştır.

Rezonans etkisi altındaki plakların eyleyici yerleşimleri, kazanç sayısı değişse bile kontrolcü rezonansın yıkıcı etkisinden plağı çıkarmıştır. Grafiklerde verilen kontrolcüsüz rezonans değerleri sehim üzerinde metre boyutuna ulaşmıştır. Bu değer gerçekte olabilecek bir durum değildir. Plağımız gerçekte kontrolcüsüz olarak çalıştırılıyorsa 1 saniye geçmeden kırılacaktı.

Simulasyon gösterimlerinde n ve m değerlerini birden üçe kadar alarak dokuz mod analizi sonucuna göre değerler elde edilmiş ve süperpozisyon ilkesi gereğince her mod etkileşimi toplanabilmiştir. Sensörün yerleşim yeri m'deki 2. modların düğüm noktalarına gelmiştir. Bu sebeple bazı modlardaki değerler 10 üzeri -35 merbetebeleri civarında yeterince küçük çıkmıştır.

Çözüm metodumuzu navier çift trigonometrik toplam serisi üzerinden yaptığımız için bozucu girişin plağın merkezinden gelmesi bazı modlardaki değerleri kontrol edilemez yapmaktadır.

Sonuç olarak eyleyici yerleşimi kazanç sayısı kadar önemlidir. Kazanç sayısının artması eyleyici yerleşimine bağlı olarak her zaman olumlu sonuç vermemektedir. Bu sebeple eyleyici yerleşimi yapmadan önce hangi durumun analiz edildiğine karar verilmesi gerekmektedir. Plakta oluşan maksimum çökme ve çökme ivmesi değerleri sıfırlanmak istiyorsa eyleyici modların düğüm noktalarından uzakta ve tepe noktaları üzerine yerleştirilmedir. Eğer sadece noktasal bir değer sönümlenmek isteniyorsa eyleyiciler etrafına yerleştirildiğinde daha verimli sonuç vereceği görülmektedir.

- Aldraihem, O. J., Singh, T., & Wetherhold, R. C. (2000). Optimal Size and Location of Piezoelectric Actuator/Sensors: Practical Considerations. *JOURNAL OF GUIDANCE , CONTROL AND DYNAMICS*, Vol. 23, No. 2 Page: 509-515.
- Arpacı, M. A. (1984). Dinamik Absorberlerle Titreşim Kontrolü. İstanbul: Makine Fakültesi Ofset Matbaası, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Aydın, S. (2010). *Basit Mesnetlenmiş, Lamine ve Çift Eğrilikli Kompozit Bir Levhanın Statik Mukavemet Analizleri*. İstanbul, Türkiye: Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Berktaş, İ. (1992). *Plak Teorisi ve Uygulamaları küçük sehimli ince plaklar*. İstanbul.
- Elliott, S. J., Fuller, C. R., & Nelson, P. A. (1996). *Active Control of Vibration*. San Diego: Academic Press.
- Germaine, S. (1821). *Recherches sur la Theories des Surfaces Elastiques*. Paris: Mme. Ve. Courcier.
- Gol'denveizer, A. L. (1961). *Theory of Elastic Thin Shells (English Translate)*. New York: Pergamon Press.
- Han, J. H., & Lee, I. (1999). Optimal Placement Of Piezoelectric Sensors And Actuators For Vibration Control Of A Composite Plate Using Genetic Algorithms. *Smart Materials and Structures*, Volume 8 Number 2 page 257-267.
- Han, J. H., Rew, K. H., & Lee, I. (1997). An experimental Study Of Active Vibration Control Of Composite Structures With A Piezo-Ceramic Actuatorand A Piezo-Film Sensor. *Smart Mater. Struct*, Volume 6 Page 549-558.
- Kim, Y., & Junkins, J. L. (1991). Measure of Controllability for Actuator Placement. *Journal of Guidance*, Vol: 14, No: 5, 895-902.
- Kouhi, S., Poshtan, J., & Montazeri, A. (2007). Feedforward and Feedback H2 Controllers for Active Vibration Control of a PZT Laminated Thin Plate. *International Conference on Intelligent and Advanced Systems*, (s. 1017-1022).

- Kurt, İ. (2010). Akıllı Malzemeler Yardımıyla Plak Titreşimlerinin Aktif Kontrolü. İstanbul, Türkiye: Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Leissa, A. W. (1969). *Vibration of Plates*. Washington, D.C.: National Aeronautics And Space Administration.
- Love, A. E. (1888). On the Small Free Vibrations and Deformation of Thin Elastic Shell. *Philosophical Transactions of The Royal Society*, 179: 527-546.
- Löfberg, J. (2-4 September 2004). YALMIP : A toolbox for modeling and optimization in MATLAB. *2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation (IEEE Cat. No.04CH37508)*. New Orleans, LA, USA: IEEE.
- Malgaca, L. (2007). Integration of Active Vibration Control Methods with Finite Element Models of Smart Structures. İzmir, Türkiye: Dokuz Eylül University.
- Mindlin, R. D. (1951). Influence of Rotatory Inertia and Shear on Flexural Motions of Isotropic, Elastic Plates. *Journal of Applied Mechanics*, 73:31-38.
- Özkan, B. (2009). Mekatronik Sistemlerde Uygulanan Belli Başlı Kontrol Yöntemleri. *TÜBAV BİLİM DERGİSİ*, Cilt: 2, Sayı: 3, Sayfa 302-316.
- Peng, F. (2005). Actuator Placement Optimization and Adaptive Vibration Control of Plate Smart Structures. *Journal Of Intelligent Material Systems And Structures*, Vol. 16 263-271.
- Reissner, E. (1945). The Effect of Transverse Shear Deformation on the Bending of Elastic Plates. *ASME Journal of Applied Mechanics*, vol 12, A68-A77.
- Snowdon, J. C. (1975). Vibration of Simply Supported Rectangular and Square Plates to Which Lumped Masses and Dynamic Vibration Absorbers Are Attached. *J. Acous. Am.*, Vol.57, No.3.
- Szilar, R. (1974). *Theory and Analysis of Plates Classical and Numerical Methods*. New Jersey: Prentice-Hall INC.
- Timoshenko, S. P. (1921). On the correction for shear of the differential equation for transverse vibrations of prismatic bars. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* , volume 41, Issue 245, 744-746.

Ülker, F. D. (2003, Eylül). Active Vibration Control Of Smart Structures. Ankara, Türkiye: Ortadoğu Teknik Üniversitesi.

Yazıcı, H. (2011). Eyleyici Gecikmesine Bağlı Doyumlu ve Dayanıklı H sonsuz Denetleyiciyle Deprem Etkisi Altındaki Yapısal Sistemlerin Titreşim Kontrolü. İstanbul, Türkiye: Yıldız Teknik Üniversitesi.

Yüksel, İ. (2014). *Otomatik Kontrol-Sistem Dinamiği ve Denetim Sistemleri* . Bursa: Dora Basım-Yayın.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Uluslararası Konferans:

Tuna O., Sezer S.,(2019), "Vibration Reduction Of A Plate Using Active Control", 4. Uluslararası Mühendislik, Mimarlık Ve Tasarım Kongresi, 23-24 Nisan 2019, İstanbul-Türkiye, pp.138-146