

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ESNEK BAĞLI BİR ROBOT KOLUNUN TİTREŞİMLERİNİN
GİRİŞ ŞEKİLLENDİRME İLE KONTROLÜ

CUMHUR ÖZKAN

KOCAELİ 2020

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ESNEK BAĞLI BİR ROBOT KOLUNUN TİTREŞİMLERİNİN
GİRİŞ ŞEKİLLENDİRME İLE KONTROLÜ

CUMHUR ÖZKAN

Dr. Öğr. Üyesi Serkan ZEREN
Danışman, Kocaeli Üniversitesi
Prof. Dr. H. Metin ERTUNÇ
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi
Doç. Dr. Akın Oğuz KAPTI
Jüri Üyesi, Sakarya Üniversitesi


.....
.....
.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 06.02.2020

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında, esnek bağı bir robot kolunun giriş şekillendirme yöntemleriyle kontrolü incelenmiş ve Ansys Mechanical APDL benzetim ortamında çalışan, şekillendirilmiş komutlarla kontrol edilen bir sistemde meydana gelen titreşimlerin analiz edilebilmesini sağlayacak parametrik programlar geliştirilmiştir.

Bu çalışmada beni hiç yalnız bırakmayan, bilgi, deneyim ve kıymetli vaktini hiç esirgmeden bana yol gösteren danışmanım Sn. Dr. Öğr. Üyesi Serkan ZEREN'e çok teşekkür ederim.

Şubat – 2020

Cumhur ÖZKAN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iv
TABLolar DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
GİRİŞ	1
1. GİRİŞ ŞEKİLLENDİRME KONUSUNDA YAPILMIŞ ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	3
1.1. Posicast Kontrol ve Giriş Şekillendirmenin Ortaya Çıkışı	3
1.2. Gürbüz Şekillendiricilerin Geliştirilmesi	5
1.3. Şekillendirici Gürbüzlüğünü Arttırma Çalışmaları	6
1.4. Uyarlamalı Giriş Şekillendiriciler	7
1.5. Giriş Şekillendirme Üzerine Yapılan Diğer Önemli Çalışmalar	9
1.6. Giriş Şekillendirme Yöntemlerinden Faydalanılan Örnek Çalışmalar	10
1.7. Temel Kaynaklar ve Diğer Önemli Çalışmalar	13
2. GİRİŞ ŞEKİLLENDİRME	14
2.1. Artık Titreşim Genliği Denklemlerinin Elde Edilişleri	15
2.2. ZV Sıfır Titreşim Şekillendiriciler	17
2.3. ZVD Sıfır Titreşim-Türevsel Şekillendiriciler	20
2.4. ZVDD Sıfır Titreşim-Türevsel-Türevsel Şekillendiriciler	23
2.5. Daha Üst Mertebeden Türevsel Sıfır Titreşim Giriş Şekillendiriciler	26
2.6. Şekillendirilmiş Kontrol Komutlarının Elde Edilmesi	26
3. BENZETİM ORTAMINDA YAPILAN ÇALIŞMA VE DENEYLER	28
3.1. Esnek Bağlı Robot Kolunun Modal Analizi ve Mod Şekilleri	29
3.2. Esnek Bağlı Robot Kolunun Serbest Salınım Analizi ve Grafiği	30
3.3. Uç Kütlesinin Modal Frekansa Etkisi	32
3.4. Esnek Bağlı Robot Kolunun Titreşimlerinin Giriş Şekillendirmeye Kontrolüne İlişkin Deneyler	34
3.4.1. Kolun 30° dönme hareketi sonucunda oluşan titreşimlerin incelenmesi	36
3.4.1.1. Kolun 30° dönme hareketi deneylerinde kullanılan komutlar	36
3.4.1.2. Uç kütlesinin 0,030 kg olduğu durumda 30° dönme hareketi sonuçları	39
3.4.1.3. Uç kütlesinin 0,015 kg olduğu durumda 30° dönme hareketi sonuçları	42
3.4.1.4. Uç kütlesinin 0,045 kg olduğu durumda 30° dönme hareketi sonuçları	45
3.4.1.5. Farklı uç kütleler için 30° dönme komutundan dolayı oluşan titreşimlerin karşılaştırılması	49

3.4.2. Kolun 60° dönme hareketi sonucunda oluşan titreşimlerin incelenmesi	52
3.4.2.1. Kolun 60° dönme hareketi deneylerinde kullanılan komutlar	52
3.4.2.2. Uç kütlelerinin 0,030 kg olduğu durumda 60° dönme hareketi sonuçları	54
3.4.2.3. Uç kütlelerinin 0,015 kg olduğu durumda 60° dönme hareketi sonuçları	57
3.4.2.4. Uç kütlelerinin 0,045 kg olduğu durumda 60° dönme hareketi sonuçları	60
3.4.2.5. Farklı uç kütleleri için 60° dönme komutundan dolayı oluşan titreşimlerin karşılaştırılması	63
3.4.3. Kolun 90° dönme hareketi sonucunda oluşan titreşimlerin incelenmesi	65
3.4.3.1. Kolun 90° dönme hareketi deneylerinde kullanılan komutlar	65
3.4.3.2. Uç kütlelerinin 0,030 kg olduğu durumda 90° dönme hareketi sonuçları	68
3.4.3.3. Uç kütlelerinin 0,015 kg olduğu durumda 90° dönme hareketi sonuçları	71
3.4.3.4. Uç kütlelerinin 0,045 kg olduğu durumda 90° dönme hareketi sonuçları	74
3.4.3.5. Farklı uç kütleleri için 90° dönme komutundan dolayı oluşan titreşimlerin karşılaştırılması	76
3.4.4. Deney sonuçlarının genel değerlendirmesi	79
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	85
KAYNAKLAR	88
EKLER	96
ÖZGEÇMİŞ	127

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Bir sarkacın konumunun sadece mesnede kuvvet uygulanarak posicast kontrolü. a) Başlangıç konumu b) Mesnet, m konumuna getirilir c) Yük maksimum salınım noktasına ulaşır d) Mesnet, f konumuna getirilir.....	4
Şekil 2.1.	İki dürtülü bir şekillendiricinin temsili olarak titreşim engelleme süreci a) Her iki dürtü için ayrı ayrı sistem yanıtları b) İki dürtü için birleşik sistem yanıtı.....	14
Şekil 2.2.	ZV şekillendiricinin duyarlılık grafiği	19
Şekil 2.3.	ZVD şekillendiricinin duyarlılık grafiği	23
Şekil 2.4.	ZVDD şekillendiricinin duyarlılık grafiği.....	25
Şekil 2.5.	Sürekli bir komutla iki dürtülü şekillendiricinin konvolüsyonu a) Referans komut b) Giriş şekillendirici c) Şekillendirilmiş komut ve bileşenleri	27
Şekil 3.1.	Esnek bağlı robot kolunun bilgisayarda oluşturulmuş model resmi	28
Şekil 3.2.	Ucunda 0,00397 kg noktasal kütle bulunan esnek kol modelinin y eksenindeki a) 1. mod b) 2. mod c) 3. mod d) 4. mod e) 5. mod şekilleri.....	30
Şekil 3.3.	Akyüz'ün kendi çalışmasında yaptığı deney sonucunda verdiği esnek bağa ait serbest salınım grafiği.....	31
Şekil 3.4.	Benzetim sonucu elde edilen serbest salınım grafiği	32
Şekil 3.5.	Esnek bağlı robot kolunun ucuna eklenen noktasal kütleyle bağlı olarak modal frekanslarda meydana gelen değişimler a) 1.mod b) 2.mod c) 3.mod d) 4.mod e) 5. mod.....	33
Şekil 3.6.	Kol eklemine verilen şekillendirilmemiş temel komut ve diğer şekillendirilmiş komutlar (30° dönme hareketi için)	38
Şekil 3.7.	Esnek kol ucunun x eksenine göre yer değişimi (0,030 kg kol ucu kütleyle 30° dönme hareketi için).....	40
Şekil 3.8.	Esnek kol ucunun y eksenine göre yer değişimi (0,030 kg kol ucu kütleyle 30° dönme hareketi için).....	40
Şekil 3.9.	Esnek kol ucunda oluşan titreşimler (0,030 kg kol ucu kütleyle 30° dönme hareketi için).....	41
Şekil 3.10.	Esnek kol ucunda hareket tamamlandıktan sonra oluşan artık titreşimler (0,030 kg kol ucu kütleyle 30° dönme hareketi için)	41
Şekil 3.11.	Esnek kol ucunun x eksenine göre yer değişimi (0,015 kg kol ucu kütleyle 30° dönme hareketi için).....	43
Şekil 3.12.	Esnek kol ucunun y eksenine göre yer değişimi (0,015 kg kol ucu kütleyle 30° dönme hareketi için).....	43
Şekil 3.13.	Esnek kol ucunda oluşan titreşimler (0,015 kg kol ucu kütleyle 30° dönme hareketi için).....	44
Şekil 3.14.	Esnek kol ucunda hareket tamamlandıktan sonra oluşan artık titreşimler (0,015 kg kol ucu kütleyle 30° dönme hareketi için)	44

Şekil 3.15. Esnek kol ucunun x eksenine göre yer değişimi (0,045 kg kol ucu kütlesiyle 30° dönme hareketi için).....	46
Şekil 3.16. Esnek kol ucunun y eksenine göre yer değişimi (0,045 kg kol ucu kütlesiyle 30° dönme hareketi için).....	47
Şekil 3.17. Esnek kol ucunda oluşan titreşimler (0,045 kg kol ucu kütlesiyle 30° dönme hareketi için).....	47
Şekil 3.18. Esnek kol ucunda hareket tamamlandıktan sonra oluşan artık titreşimler (0,045 kg kol ucu kütlesiyle 30° dönme hareketi için).....	48
Şekil 3.19. Şekillendirilmemiş 30° dönme hareketi komutu sonucunda farklı uç kütleli esnek kolların uçlarında oluşan titreşimlerin karşılaştırması.....	49
Şekil 3.20. ZV Şekillendirmeli 30° dönme hareketi komutu sonucunda farklı uç kütleli esnek kolların uçlarında oluşan titreşimlerin karşılaştırması.....	50
Şekil 3.21. ZVD Şekillendirmeli 30° dönme hareketi komutu sonucunda farklı uç kütleli esnek kolların uçlarında oluşan titreşimlerin karşılaştırması.....	50
Şekil 3.22. ZVDD Şekillendirmeli 30° dönme hareketi komutu sonucunda farklı uç kütleli esnek kolların uçlarında oluşan titreşimlerin karşılaştırması.....	51
Şekil 3.23. Kol eklemine verilen şekillendirilmemiş temel komut ve diğer şekillendirilmiş komutlar (60° dönme hareketi için).....	54
Şekil 3.24. Esnek kol ucunun x eksenine göre yer değişimi (0,030 kg kol ucu kütlesiyle 60° dönme hareketi için).....	55
Şekil 3.25. Esnek kol ucunun y eksenine göre yer değişimi (0,030 kg kol ucu kütlesiyle 60° dönme hareketi için).....	55
Şekil 3.26. Esnek kol ucunda oluşan titreşimler (0,030 kg kol ucu kütlesiyle 60° dönme hareketi için).....	56
Şekil 3.27. Esnek kol ucunda hareket tamamlandıktan sonra oluşan artık titreşimler (0,030 kg kol ucu kütlesiyle 60° dönme hareketi için).....	56
Şekil 3.28. Esnek kol ucunun x eksenine göre yer değişimi (0,015 kg kol ucu kütlesiyle 60° dönme hareketi için).....	58
Şekil 3.29. Esnek kol ucunun y eksenine göre yer değişimi (0,015 kg kol ucu kütlesiyle 60° dönme hareketi için).....	58
Şekil 3.30. Esnek kol ucunda oluşan titreşimler (0,015 kg kol ucu kütlesiyle 60° dönme hareketi için).....	59
Şekil 3.31. Esnek kol ucunda hareket tamamlandıktan sonra oluşan artık titreşimler (0,015 kg kol ucu kütlesiyle 60° dönme hareketi için).....	59
Şekil 3.32. Esnek kol ucunun x eksenine göre yer değişimi (0,045 kg kol ucu kütlesiyle 60° dönme hareketi için).....	61
Şekil 3.33. Esnek kol ucunun y eksenine göre yer değişimi (0,045 kg kol ucu kütlesiyle 60° dönme hareketi için).....	61
Şekil 3.34. Esnek kol ucunda oluşan titreşimler (0,045 kg kol ucu kütlesiyle 60° dönme hareketi için).....	62
Şekil 3.35. Esnek kol ucunda hareket tamamlandıktan sonra oluşan artık titreşimler (0,045 kg kol ucu kütlesiyle 60° dönme hareketi için).....	62
Şekil 3.36. Şekillendirilmemiş 60° dönme hareketi komutu sonucunda farklı uç kütleli esnek kolların uçlarında oluşan titreşimlerin karşılaştırması.....	63

Şekil 3.37. ZV Şekillendirmeli 60° dönme hareketi komutu sonucunda farklı uç kütleli esnek kolların uçlarında oluşan titreşimlerin karşılaştırması.....	64
Şekil 3.38. ZVD Şekillendirmeli 60° dönme hareketi komutu sonucunda farklı uç kütleli esnek kolların uçlarında oluşan titreşimlerin karşılaştırması.....	64
Şekil 3.39. ZVDD Şekillendirmeli 60° dönme hareketi komutu sonucunda farklı uç kütleli esnek kolların uçlarında oluşan titreşimlerin karşılaştırması.....	65
Şekil 3.40. Kol eklemine verilen şekillendirilmemiş temel komut ve diğer şekillendirilmiş komutlar (90° dönme hareketi için)	67
Şekil 3.41. Esnek kol ucunun x eksenine göre yer değişimi (0,030 kg kol ucu kütleliyle 90° dönme hareketi için).....	68
Şekil 3.42. Esnek kol ucunun y eksenine göre yer değişimi (0,030 kg kol ucu kütleliyle 90° dönme hareketi için).....	69
Şekil 3.43. Esnek kol ucunda oluşan titreşimler (0,030 kg kol ucu kütleliyle 90° dönme hareketi için).....	69
Şekil 3.44. Esnek kol ucunda hareket tamamlandıktan sonra oluşan artık titreşimler (0,030 kg kol ucu kütleliyle 90° dönme hareketi için)	70
Şekil 3.45. Esnek kol ucunun x eksenine göre yer değişimi (0,015 kg kol ucu kütleliyle 90° dönme hareketi için).....	71
Şekil 3.46. Esnek kol ucunun y eksenine göre yer değişimi (0,015 kg kol ucu kütleliyle 90° dönme hareketi için).....	72
Şekil 3.47. Esnek kol ucunda oluşan titreşimler (0,015 kg kol ucu kütleliyle 90° dönme hareketi için).....	72
Şekil 3.48. Esnek kol ucunda hareket tamamlandıktan sonra oluşan artık titreşimler (0,015 kg kol ucu kütleliyle 90° dönme hareketi için)	73
Şekil 3.49. Esnek kol ucunun x eksenine göre yer değişimi (0,045 kg kol ucu kütleliyle 90° dönme hareketi için).....	74
Şekil 3.50. Esnek kol ucunun y eksenine göre yer değişimi (0,045 kg kol ucu kütleliyle 90° dönme hareketi için).....	75
Şekil 3.51. Esnek kol ucunda oluşan titreşimler (0,045 kg kol ucu kütleliyle 90° dönme hareketi için).....	75
Şekil 3.52. Esnek kol ucunda hareket tamamlandıktan sonra oluşan artık titreşimler (0,045 kg kol ucu kütleliyle 90° dönme hareketi için)	76
Şekil 3.53. Şekillendirilmemiş 90° dönme hareketi komutu sonucunda farklı uç kütleli esnek kolların uçlarında oluşan titreşimlerin karşılaştırması.....	77
Şekil 3.54. ZV Şekillendirmeli 90° dönme hareketi komutu sonucunda farklı uç kütleli esnek kolların uçlarında oluşan titreşimlerin karşılaştırması.....	77
Şekil 3.55. ZVD Şekillendirmeli 90° dönme hareketi komutu sonucunda farklı uç kütleli esnek kolların uçlarında oluşan titreşimlerin karşılaştırması.....	78
Şekil 3.56. ZVDD Şekillendirmeli 90° dönme hareketi komutu sonucunda farklı uç kütleli esnek kolların uçlarında oluşan titreşimlerin karşılaştırması.....	78

TABLolar DİZİNİ

Tablo 3.1. Esnek bağlı robot kolu modelinde kullanılan ölçü ve malzeme değerleri.....	28
Tablo 3.2. Esnek bağlı kolun sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan modal analiz deneyi sonuçları	29
Tablo 3.3. Referans model için hesaplanmış giriş şekillendirici parametreleri.....	36
Tablo 3.4. Şekillendirilmemiş temel komut (30° dönme hareketi için)	37
Tablo 3.5. Şekillendirilmiş konum kontrol komutları (30° dönme hareketi için).....	37
Tablo 3.6. Uç kütleinin 0,030 kg olduğu durumda 30° dönme hareketi sonucu oluşan artık titreşim değerleri	42
Tablo 3.7. Uç kütleinin 0,015 kg olduğu durumda 30° dönme hareketi sonucu oluşan artık titreşim değerleri	45
Tablo 3.8. Uç kütleinin 0,045 kg olduğu durumda 30° dönme hareketi sonucu oluşan artık titreşim değerleri	48
Tablo 3.9. Şekillendirilmemiş temel komut (60° dönme hareketi için)	52
Tablo 3.10. Şekillendirilmiş konum kontrol komutları (60° dönme hareketi için).....	52
Tablo 3.11. Uç kütleinin 0,030 kg olduğu durumda 60° dönme hareketi sonucu oluşan artık titreşim değerleri	57
Tablo 3.12. Uç kütleinin 0,015 kg olduğu durumda 60° dönme hareketi sonucu oluşan artık titreşim değerleri	60
Tablo 3.13. Uç kütleinin 0,045 kg olduğu durumda 60° dönme hareketi sonucu oluşan artık titreşim değerleri	63
Tablo 3.14. Şekillendirilmemiş temel komut (90° dönme hareketi için)	66
Tablo 3.15. Şekillendirilmiş konum kontrol komutları (90° dönme hareketi için).....	66
Tablo 3.16. Uç kütleinin 0,030 kg olduğu durumda 90° dönme hareketi sonucu oluşan artık titreşim değerleri	70
Tablo 3.17. Uç kütleinin 0,015 kg olduğu durumda 90° dönme hareketi sonucu oluşan artık titreşim değerleri	73
Tablo 3.18. Uç kütleinin 0,045 kg olduğu durumda 90° dönme hareketi sonucu oluşan artık titreşim değerleri	76
Tablo 3.19. Artık titreşim değerlerinin, komut ve uç kütlelerine göre karşılaştırmaları	79
Tablo 3.20. Kontrol komutlarının tamamlanma zamanları	82

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A_i	: Dürtü genliği
A_Σ	: Artık titreşim genliği
T_d	: Sönümlü salınım periyodu
V	: Oransal artık titreşim genliği
β	: Sönüm için rijitlik matrisi katsayısı
δ	: Logaritmik azalım
ζ	: Sönüm oranı
ω_d	: Sönümlü doğal frekans
ω_g	: Sistemin gerçek frekansı
ω_m	: Modelleme frekansı
ω_n	: Sönümsüz doğal frekans

Kısaltmalar

APDL	: ANSYS Parametric Design Language (ANSYS Parametrik Tasarım Dili)
EI	: Extra-Insensitive (Ekstra Duyarsız)
MIS	: Modified Input Shaping (Değiştirilmiş Giriş Şekillendirme)
SI	: Specified-Insensitivity (Belirlenmiş Duyarsızlık)
SNA	: Specified Negative Amplitude (Belirlenmiş Negatif Genlikli)
UM	: Unity Magnitude (Birim Genlikli)
ZV	: Zero Vibration (Sıfır Titreşim)
ZVD	: Zero Vibration and Derivative (Sıfır Titreşim-Türevsel)
ZVDD	: Zero Vibration Double Derivative (Sıfır Titreşim-Türevsel-Türevsel)

ESNEK BAĞLI BİR ROBOT KOLUNUN TİTREŞİMLERİNİN GİRİŞ ŞEKİLLENDİRME İLE KONTROLÜ

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, esnek bağlı bir robot kolunda dönme hareketi sonucunda oluşan artık titreşimlerin giriş şekillendirme yöntemleriyle kontrolünü incelemek ve kontrol deneylerinin benzetim ortamında yapılmasını sağlayacak programlar geliştirmektir.

Benzetim programları, Ansys Mechanical APDL platformunda çalışmak üzere geliştirilmiştir. Bu programlar ile parametrik olarak esnek bir robot kolu modelinin oluşturulmasına, şekillendirilmiş hareket komutlarının üretilmesine ve bu komutlar sonucunda meydana gelen titreşimlerin kolay ve hızlı şekilde analizine olanak sağlayacak bir deney ortamının geliştirilmesi hedeflenmiştir.

Esnek bağlı bir robot kolunun şekillendirilmiş komutlarla titreşim kontrolü, bu programlar yardımıyla değişik çalışma şartları için yapılan deneylerle analiz edilmiştir. Alınan sonuçlar, detaylı sayısal veriler ve grafiklerle sunulmuştur.

Geliştirilen programlarının kaynak kodları, bu konuda yapılacak başka araştırmalarda da kullanılabilirleri amacıyla ekler bölümünde açık olarak paylaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Benzetim, Esnek Robot Kolu, Giriş Şekillendirme, Titreşim Kontrolü.

VIBRATION CONTROL OF A FLEXIBLE ROBOT MANIPULATOR WITH INPUT SHAPING METHOD

ABSTRACT

The purpose of this study is to analyze the control of residual vibrations caused by rotational movement in a flexible robot arm using input shaping methods and to develop computer programs for conducting experiments on simulation environment.

Simulation programs are developed in Ansys Mechanical APDL platform. With these programs, it is aimed to develop an experiment environment that will enable creating a flexible robot arm model parametrically, producing shaped motion commands and analyzing the vibrations caused by these commands quickly and easily.

The vibration control of a flexible link robot manipulator with shaped commands has been analyzed by experiments for various working conditions with the help of these programs. The results are presented with detailed numerical data and graphics.

The source code is shared in the appendices section to ensure that programs can be used in other research studies on this subject.

Keywords: Simulation, Flexible Manipulator, Input Shaping, Vibration Control.

GİRİŞ

Esnek dinamik sistemlerde oluşan geçici şekil değişiklikleri ve artık titreşimler, kontrol edilmek istenen bu tür bir sistemden beklenen konum hassasiyeti, verimlilik, hız ve güvenlik gibi özelliklerin elde edilmesini zorlaştıran unsurlardır [1]. Bu sistemlerin kontrolü için başvurulabilecek iki temel yaklaşım vardır. Bunlar, sistem yapısını değiştirmek suretiyle uygulanan pasif kontrol ve sistem girişlerini değiştirmek suretiyle uygulanan aktif kontrol yöntemleridir [2].

Sistem yapısının değiştirildiği pasif kontrol yöntemlerinde, sisteme uygulanan girişlere etki etmeden sadece kütle ve sönüm oranı gibi sistem tepkisinde belirleyici olan parametreleri değiştirmek amacıyla kütle veya damper eklemek gibi uygulamalarla hedeflenen sistem davranışı elde edilmeye çalışılır.

Sisteme uygulanan giriş işareti değiştirilerek hedeflenen sistem tepkisinin elde edilmeye çalışıldığı aktif kontrol yöntemleri de ikiye ayrılırlar [2]. Bunların ilki geri beslemeli kontrol ve ikincisi de ileri beslemeli, diğer adıyla komut şekillendirme ile kontrol yöntemleridir.

Geri beslemeli kontrol yönteminde, sistemin girişlere verdiği tepkiler algılayıcılar tarafından ölçülür. Bu ölçüm bilgileri, belirli zaman aralıklarıyla sistemin giriş değişkeninin ayarlanmasında kullanılarak sistemin salınımı ve gerekli diğer durumları kontrol edilir. Bu yöntem, aynı zamanda kapalı döngülü kontrol sistemi olarak da adlandırılır.

Komut şekillendirme veya diğer adıyla ileri beslemeli kontrol yönteminde ise bir hareket veya dürtü sonucu meydana gelen salınım, tamamen açık döngü olarak, diğer bir deyişle herhangi bir geri besleme olmadan, sistemin dinamik etkilere vereceği tepkiyi öngörerek oluşturulmuş başka hareket veya dürtülerin uygulanmasıyla yok edilmeye çalışılır [3].

Komut şekillendirme bir alt türü olan giriş şekillendirme ise birbirlerinin yarattığı titreşimleri yok etmek üzere tasarlanmış bir dizi dürtünün, temel referans komutla konvolüsyonları sonucunda şekillendirilmiş komutların elde edilmesi yöntemidir [1].

Bu çalışmanın hedefleri doğrultusunda, giriş şekillendirme yöntemlerinin teorik gösterimlerinin yanı sıra esnek bir robot kolunu kontrol etmek amacıyla oluşturulmuş şekillendirilmiş konum komutları da verilmiştir. Elde edilen şekillendirilmiş komutlar ile bilgisayar benzetimi ortamında deneyler yapılarak alınan sonuçlar grafik ve sayısal veriler ile gösterilmiştir.

Üretilen komutlarla, bilgisayar benzetimi ortamında deneyler yapılabilmesi için ANSYS Parametrik Tasarım Dili (APDL: ANSYS Parametric Design Language) kullanılarak, değişik koşullar altında giriş şekillendiricili kontrol analizlerinin kolay ve hızlı şekilde yapılmasını sağlamak amacıyla gerekli görevleri yerine getiren programlar geliştirilmiştir. Bu programlar, diğer araştırmacıların kendi çalışmalarında faydalanmalarına olanak sağlama amacı da gözetilerek geliştirilmiş ve açık olarak sunulmuştur.

Yapılan çalışmalar, ilgili konu başlıkları altında detaylıca sunulmuştur. Bölüm 1’de şekillendirme yöntemlerinin ortaya çıkışı, gelişimi ve yapılan önceki çalışmalar hakkında genel bilgiler sunulmuştur. Konuyla ilgili olarak günümüze kadar yapılan çalışma, yayın ve makaleler tanıtılmıştır. Bölüm 2’de giriş şekillendirme teorisi ve temel denklemleri verilmiştir. Bölüm 3’te benzetim ortamında yapılan deneyler ve alınan sonuçlar detaylıca sunulmuştur. Bölüm 4’te alınan sonuçlar değerlendirilmiş ve öneriler sunulmuştur. Ekler bölümünde de geliştirilen bilgisayar programlarının kaynak kodları verilmiştir.

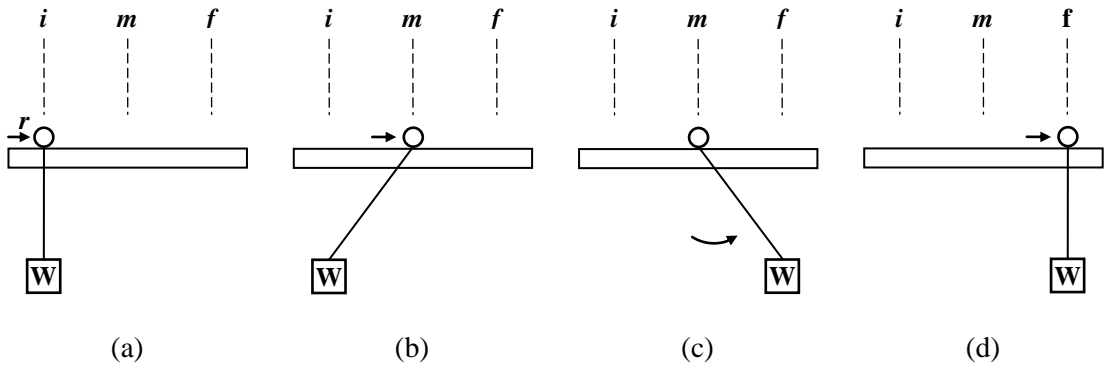
1. GİRİŞ ŞEKİLLENDİRME KONUSUNDA YAPILMIŞ ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, giriş şekillendirmenin ortaya çıkışı, gelişimi ve bu yöntem üzerine yapılan önemli çalışmalar tanıtılmış, yapılan literatür taraması sonucu elde edilen bilgiler paylaşılmıştır.

1.1. Posicast Kontrol ve Giriş Şekillendirmenin Ortaya Çıkışı

Giriş şekillendirme ile kontrol yönteminin temelleri, ilk olarak Smith tarafından geliştirilerek 1958 yılında Posicast adıyla tanıtılan kontrol yöntemine dayanır [4,5]. Bu yöntemde, yapılmak istenen hareket, uygun genliklere sahip ve yarım periyot zaman aralıklı iki adıma bölünerek gerçekleştirilir. İlk adımda başlayan hareket sonucunda oluşan salınım, yarım periyot gecikmeli olarak gerçekleştirilen ikinci adımda yok edilerek toplam hareket salınımsız olarak tamamlanır. Birinci adımın genliği, hareketin tamamını gerçekleştirmeye yetecek oranda olmalıdır. İkinci adımın genliği ise birinci adımın genliğine bağlı olarak sistemde artakalan enerjiyi tam olarak yok edecek oranda belirlenmelidir.

Smith, yukarıda anlatılan posicast kontrol yönteminin işleyiş prensibini, Şekil 1.1’de görülen sarkaç sisteminin temsili hareketiyle tarif etmiştir [5]. Burada (a)’da görülen sarkaç gibi asılı duran ağır bir yük, i başlangıç konumundan f nihai konumuna en kısa sürede artık titreşim oluşturmayacak şekilde hareket ettirmek istenmektedir. Kayar mesnet r , nihai konuma ulaşmak için öncelikle (b)’de gösterildiği gibi yapılması gereken hareketin yarısına denk gelecek şekilde m orta noktasına kadar hareket ettirilir. W yükü (c)’de gösterildiği gibi sallanarak yarım periyotluk sürenin sonunda maksimum salınım noktası olan f nihai konumuna ulaşır. Kayar mesnet r ise bu ana dek m orta noktasında hareket ettirilmeden sabit tutulur ve W yükü f konumuna ulaştığı anda ani bir hareketle (d)’de gösterildiği gibi f nihai konumuna getirilerek yer değiştirme hareketi tamamlanır.



Şekil 1.1. Bir sarkacın konumunun sadece mesnede kuvvet uygulanarak posicast kontrolü. a) Başlangıç konumu b) Mesnet, m konumuna getirilir c) Yük maksimum salınım noktasına ulaşır d) Mesnet, f konumuna getirilir [5]

İlerleyen yıllarda araştırmacılar, posicast kontrolün gerçek sistemlere uygulanma usulleri ile yöntemin değişik ve yüksek mertebeden sistemlere de uyarlanması konularında kapsamlı çalışmalar yapmışlardır [6-9]. Yapılan çalışmalar, posicast kontrol yönteminin gerçek sistemlere uyarlanması hususunda genel olarak iki temel sorunla karşılaşıldığını göstermiştir.

Bunların ilki, şekillendirilmiş girişin gecikmeli adımının, o dönemlerde sahip olunan analog bilgisayar veya devre teknolojisini kullanarak doğru zamanda, doğru genlik değerinde sisteme uygulanmasında karşılaşılan zorluklardır.

Uygulamada karşılaşılan ikinci ve belki de daha önemli sorun ise posicast kontrol yönteminin modelleme hatalarına karşı çok duyarlı olmasıdır. Posicast kontrol yöntemiyle ancak sistem doğal frekansı ve sönümlenme oranı kesin olarak bilindiği takdirde, artık titreşim oluşturmayan bir hareket oluşturulabilir. Oysa pek çok esnek sistemin parametreleri, gerek modelleme hataları gerekse de çalışma şartlarına bağlı olarak tasarım esnasında belirlenen değerlerine göre önemli değişiklikler gösterebilirler. Bunun neticesinde de posicast yöntemiyle, açık döngü çalışma koşulu altında, sistemde artık titreşimlerin oluşmasını engellemek mümkün olmamaktadır.

Bahsi geçen bu sebepler, ilk sıfır titreşimli (ZV: Zero Vibration) şekillendirici olan posicast kontrol yönteminin uzunca bir zaman geniş bir kullanım alanı bulmasına mani olmuştur [1,10].

1.2. Gürbüz Şekillendiricilerin Geliştirilmesi

Singer ve Seering, posicast kontrol yönteminin temel matematiksel denklemlerini, modelleme hatalarına karşı daha az duyarlı olacak şekilde geliştirmişlerdir [11,12]. İlk olarak 1989 yılında tanıttıkları bu yeni yöntem, sadece artık titreşimi veren denklemin değil, bu denklemin frekansa göre türevinin de sifıra eşit olması kısıtının, modelleme aşamasına eklenmesine dayanır. Bu kısıt denkleminin eklenmesi, modellenen frekans değerinden daha geniş bir aralıkta, artık titreşimi düşük seviyelerde tutabilen bir şekillendiricinin elde edilmesini sağlar. Modelleme hatalarına karşı daha az duyarlılık gösteren giriş şekillendiriciler kısaca gürbüz şekillendiriciler olarak anılırlar.

Aynı şekilde denklemin daha üst dereceden türevleri de modele kısıt denklemi olarak eklenebilir. Eklenen her kısıt denklemi şekillendiricinin gürbüzlüğünü artırır. Fakat eklenen her kısıt denklemi sistemin oturma değerine ulaşma süresinin uzamasına sebep olur. Bunun nedeni uygulanan dürtü sayısının, giriş şekillendiriciye eklenen kısıt denklemi sayısı kadar artması ve sistemin ancak son dürtü de uygulandıktan sonra yerleşme değerine ulaşmasıdır.

Bir kısıt denkleminin eklenmesiyle oluşturulan üç dürtülü giriş şekillendiriciler, Sıfır Titreşim-Türevsel (ZVD: Zero Vibration and Derivative) şekillendiriciler olarak ve iki ek kısıt denklemli, dört dürtülü olanları da Sıfır Titreşim-Türevsel-Türevsel (ZVDD: Zero Vibration Double Derivative) olarak adlandırılırlar [2,10].

Singer ve Seering'in, geliştirdikleri gürbüz şekillendiriciler sayesinde, giriş şekillendirmeli kontrol, daha uygulanabilir bir titreşim azaltma yöntemi haline gelmiş ve kullanımı hızla yaygınlaşmaya başlamıştır. Sayısal bilgisayar ve kontrol devrelerinin de bu dönemde daha gelişerek yaygınlaşmaya başlamaları, giriş şekillendirmenin kullanışlı bir kontrol yöntemi olmasında önemli bir etken olmuştur.

Giriş şekillendirmede ortaya çıkan bu gelişmeden sonra farklı araştırmacılar da kendi çalışmalarında bu yöntemden faydalanmaya ve deneyler yapmaya başlamışlardır. Tzes ve Yurkovich [13], esnek bağlı manipülatör kontrolü ile ilgili yaptıkları çalışmada, Yurkovich ve diğ. [14], bağlaşıklık esnek bağlı sistemlerin kontrolü ile ilgili çalışmalarında, Khorrami ve diğ. [15], iki esnek bağlı manipülatörün kontrolü ile

ilgili yaptıkları deneysel çalışmalarında giriş şekillendirici yöntemini kullanmışlar veya değerlendirmişlerdir.

1.3. Şekillendirici Gürbüzlüğünü Arttırma Çalışmaları

ZVD şekillendiricilerin ortaya çıkışından sonra daha gürbüz şekillendiricilerin geliştirilmesi konusunda araştırmalar devam etmiştir.

Singhose ve diğ. [16], titreşimin hiçbir zaman tam olarak yok edilemeyeceği fikrinden yola çıkarak, türevsel şekillendiriciler gibi modelleme frekansında sıfır artık titreşimi amaçlamak yerine, makul seviyede artık titreşim bırakmayı hedefleyen Ekstra Duyarsız (EI: Extra-Insensitive) şekillendiriciyi geliştirmişlerdir. Titreşimi sınırlı seviyede tutmayı amaçlamak, ZVD ile aynı sürede çalışan fakat ondan daha gürbüz olan bir şekillendiricinin oluşturulmasına olanak vermiştir. Sistem değişkenlerinin daha da belirsiz olduğu durumlarda artan gürbüzlük ihtiyacını karşılamak amacıyla çok hörgüçlü (multi-hump) EI şekillendirici tipleri de geliştirilmiştir [17].

Sabit bir frekansa göre tasarlanan ZVD, EI gibi önceki şekillendiricilerin yeterli gürbüzlüğü sağlayamadığı, hareket esnasında doğal frekansı değişen sistemler de mevcuttur. Bu gibi durumlarda daha iyi sonuçlar vermek üzere frekans örnekleme olarak adlandırılan bir şekillendirme yöntemi geliştirilmiştir [18,19]. Bu yöntem, sistem tasarımcısının, titreşimin engelleneceği frekans aralığını belirlemeye olanak verir ve bu sebeple daha çok Belirlenmiş Duyarsızlık (SI: Specified-Insensitivity) şekillendirici adıyla anılır. Önceden tahmin edilen modelleme hatalarını göz önüne alarak sistem frekanslarını ağırlıklandıran, daha etkili SI şekillendirici yöntemleri de geliştirilmiştir [20,21].

Shan ve diğ. [22], ZV şekillendiriciler gibi sıfır titreşimi gerçekleştirebilecek çok sayıda giriş şekillendirici oluşturulabileceği ana fikrinden yola çıkarak, Değiştirilmiş Giriş Şekillendirme (MIS: Modified Input Shaping) olarak adlandırdıkları yöntemi geliştirmişlerdir. Yöntemin geliştirilme amacı daha fazla gürbüzlük elde etmek ve çok modlu sistemlerde titreşimi engellemek olarak tarif edilmiştir. Geleneksel ZV şekillendiriciye alternatif olan MIS ZV şekillendirici, daha fazla dürtü kullanıldığından dolayı sıfır titreşime daha uzun sürede ulaşır. MIS ZV amaca göre n

adet dürtü içerecek şekilde tasarlanabilir. Gürbüzlüğü artırmak amacıyla, iki aynı veya farklı uzunluktaki MIS ZV şekillendiricinin konvolüsyonu ile MIS ZVD şekillendirici elde edilir. Farklı araştırmacılar tarafından yapılan karşılaştırmalı deneyler, MIS ZVD şekillendiricilerin klasik ZVD şekillendiricilere denk sayılabilecek oranda gürbüzlük sağladıklarını göstermiştir. [23,24].

Bu bölümde anlatılan çalışmalar neticesinde geliştirilen şekillendiriciler, kendinden gürbüz şekillendiricilerdir. Matematiksel olarak ZV şekillendiriciden türetilmişlerdir. Açık döngü çalışma şartlarında, herhangi bir geri beslemeye ihtiyaç duymadan gürbüzlük artışı sağlarlar. Bu özellikleri kolay tatbik edilmeleri açısından bir avantaj sağlar. Dezavantajları ise gürbüzlüğü arttırmak için ihtiyaç duyulan ek dürtülerin, şekillendirici süresini veya diğer deyişle yükselme zamanını uzatmalarıdır.

1.4. Uyarlamalı Giriş Şekillendiriciler

Kendinden gürbüz olmayan bir şekillendiriciyi, gürbüzleştirmek için geri beslemeden faydalanan yöntemler de geliştirilmiştir. Geri beslemeden alınan ölçümler sayesinde giriş şekillendirici parametrelerinin, sistemin o anki durumuna göre sürekli olarak uygun hale getirilerek kullanıldığı bu yöntemler, genel olarak uyarlamalı giriş şekillendirme olarak anılırlar. Uyarlamalı şekillendiriciler, kendinden gürbüz şekillendiricilere kıyasla görevlerini daha kısa zamanda yerine getirmelerine karşın tatbik edilmeleri daha karmaşıktır.

Tzes ve Yurkovich [25], şekillendirici parametrelerini hesaplamak için algılayıcılardan aldıkları verileri, frekans uzayında işledikleri uyarlamalı bir şekillendirme yöntemi geliştirmişlerdir. Özellikle tek esnek bağlı bir robot kolunun kontrolü için geliştirdikleri bu yöntemde kolun ucundaki ivmeölçerden alınan ölçüm değerleri modal frekansların kestiriminde kullanılmaktadır. Frekans değerlerinin en kısa sürede hesaplanabilmesi için frekans uzayında gerçekleştirilen, zamanla değişen transfer fonksiyonu kestirimi yaklaşımından faydalanılarak sistemin ikinci modal frekans değeri bulunmuştur. İkinci modal frekans değerinden tablo yardımıyla hesaplanan birinci modal frekans ve buna bağlı olarak zaman aralığı değerleri vasıtasıyla kontrol komutunu şekillendirmek için kullanılacak ZV şekillendirici oluşturulmuştur. Taşınan yükteki değişim veya modellenemeyen dinamik etkilerin olması sebebiyle sistem parametrelerinde meydana gelen değişikliklere göre sürekli

olarak hesaplanan ZV şekillendirici sayesinde, kendinden gürbüz şekillendiricilerden çok daha hızlı olarak titreşimsiz sistem tepkisi elde edilmesini sağlayabilen kontrol komutları üretilebilmiştir.

Khorrani ve diğ. [26], yine frekans uzayında yaptıkları çalışma sonucunda, çok bağlı esnek manipülatörler için genelleştirilmiş bir uyarlamalı giriş şekillendirme yöntemi geliştirmişlerdir. Birinci modal frekansı ikincisinin değerinden hesaplarken çalışılan deney sistemine göre belirli noktalara göre önceden hazırladıkları yük-frekans tablosundan faydalanmışlar, aradaki değerleriyse oluşturdukları dördüncü dereceden polinomsal yaklaşırma denklemlerini kullanarak hesaplamışlardır. Yaptıkları deneylerde bu yöntemle hesaplanan kestirimleri kullanarak oluşturulan şekillendiricilerin, yükü değişken çok bağlı esnek kollarda etkili sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

Frekans uzayına nazaran göreceli olarak daha az bilgi işlem gücü gerektiren ve hesaplamaların daha hızlı yapılabildiği zaman uzayında tasarlanmış uyarlamalı giriş şekillendiriciler de geliştirilmiştir. İlk örneklerinden biri olarak Bodson [27], zaman uzayında, sadece motor şaftına bağlı enkoderden alınan ölçümlerle gerçek zamanda şekillendirici parametrelerinin ayarlandığı ve frekans uzayı yöntemlerine göre daha az bilgi işlem gücü gerektiren bir şekillendirici uyarlama yöntemi geliştirmiştir.

Park ve diğ. [28], önceden planlanmış ve tekrarlı hareketler yapan endüstriyel robotlar gibi sistemlerde kullanmaya uygun, bir önceki hareket adımından elde edilen verilerle yinelemeli olarak şekillendiricinin parametrelerini güncelleyen, yinelemeli tekrarlı giriş şekillendirme olarak adlandırdıkları bir yöntem geliştirmişlerdir. Cutforth ve Pao [29], yinelemeli tekrarlı giriş şekillendirme yöntemini geliştirerek, sadece tekrarlı değil tekrarsız hareketlere ve değişik giriş tiplerine de çalışma anında uyum sağlayan uyarlamalı bir şekillendirici geliştirmişlerdir.

Pereira ve diğ. [30], hareket esnasında şekillendirici parametrelerini güncelleyebilen, her hareket öncesi büyük belirsizliklere karşı gürbüz bir uyarlamalı şekillendirici geliştirmişlerdir. Çevrim içi olarak, geçerli titreşim modunun periyodunun yarısından daha kısa sürede yeni şekillendirici parametrelerini hesaplayabilen bu yöntemde, sistemin doğal frekans ve sönüm oranını belirlemek için asimptotik olmayan cebirsel kestirme yönteminden faydalanılmıştır.

Önceki uyarlamalı yöntemlerden farklı olarak, sistem kestirim hatasını küçültmeye odaklanmak yerine bir şekillendiriciyi doğrudan artık titreşimi yok etmeye uygun hale getirmeyi hedefleyen bir filtreleme yöntemi geliştirilmiştir [31,32]. Şekillendirici dürtü genliklerinin rastgele seçilen zamanlara göre istenen moddaki titreşimleri yok edecek şekilde hesaplanarak belirlenmesi, geliştirilen yöntemin ayırt edici özelliklerinin başında gelir.

Daha etkili ve kolay uygulanabilir kendinden gürbüz veya uyarlamalı giriş şekillendiricilerin geliştirilmesi aktif bir çalışma konusudur. Doğrusal olmayanlar da dâhil değişik yapıları pek çok sistemde, genel veya özel olarak uygulanabilecek yeni şekillendirici yaklaşımlarının tanıtıldığı pek çok çalışma mevcuttur [33-44].

1.5. Giriş Şekillendirme Üzerine Yapılan Diğer Önemli Çalışmalar

Giriş şekillendirme yöntemleri sadece tek modlu değil birden çok mod frekansında meydana gelen titreşimleri de yok etmek için kullanılabilirler. Singer [11], birden çok mod frekansında meydana gelen titreşimleri gidermek için iki yöntem tarif etmiştir. İlk yöntemde, her biri tek titreşim frekansı için ayrı ayrı oluşturulmuş şekillendiriciler, konvolüsyon ile bir araya getirilerek tüm frekanslardaki titreşimleri yok edebilen tek bir şekillendirici elde edilir. Uygulaması kolay olan bu yöntemin dezavantajı ise nihai şekillendirici süresinin her bir mod için kullanılan şekillendiricilerin sürelerinin toplamına eşit olması dolayısı ile uzamasıdır. İkinci yöntem ise her bir titreşim modu için gereken kısıt denklemlerinin bir araya getirilerek tek seferde doğrudan çözülmesi suretiyle çok modlu şekillendiricinin oluşturulması temeline dayanır. Elde edilmesi biraz daha zahmetli olan bu şekillendirici ise konvolüsyon ile elde edilene göre çok daha az sayıda dürtü içerir ve dolayısıyla daha kısa sürede sonuç üretir.

Hyde ve Seering [45], doğrudan çözüm yöntemini geliştirmek için optimizasyona dayanan bir yöntem üzerine çalışmışlardır. Singh ve Heppler [46], birden çok mod frekansında meydana gelen titreşimleri en az sayıda dürtü ile yok etmeyi amaçlayan başka bir yöntem üzerinde çalışmışlardır.

İki modlu şekillendiriciler için her iki yöntemin karşılaştırıldığı bir çalışmada, konvolüsyonla oluşturulan şekillendiricilerin ikinci moddaki hatalara karşı daha

gürbüz olmalarına karşın doğrudan çözüm yönteminin şekillendirici süresini kısalttığı fakat mod oranı arttıkça da kazanılan zamanın azaldığı gösterilmiştir [47]. Sung ve Singhose [48], iki modlu esnek bir sistem üzerinde tek ve çok modlu şekillendiricilerin gürbüzlüklerini karşılaştıran örnek bir çalışma yapmışlardır.

Giriş şekillendirmenin yapısından ötürü gürbüzlüğün artması, aynı zamanda şekillendirme süresinin de artmasına sebep olmaktadır. Belirli bir sürede hareketi tamamlaması gereken sistemlerde kullanabilmek için öncekiler gibi sadece pozitif değil negatif genlikli dürtüler de içeren giriş şekillendiriciler geliştirilmiştir [49]. Negatif genlikli dürtüler içeren bu tür şekillendiriciler, Birim Genlikli (UM: Unity Magnitude) Giriş Şekillendiriciler olarak anılırlar. Negatif dürtüler, şekillendirme süresini kısaltırlarken yüksek mod frekanslarını tahrik edebilirler ve gürbüzlükte bir miktar düşüşe sebep olabilirler. Bu olumsuzluklara çare olarak da negatif dürtü genliğinin kısıtlandığı Belirlenmiş Negatif Genlikli (SNA: Specified Negative Amplitude) şekillendiriciler geliştirilmiştir [50].

Değişik giriş şekillendirme yöntemlerinin gürbüzlük, etkinlik, verim ve benzeri kısıtlara göre farklı sistemler üzerinde karşılaştırmalarının gerçekleştirildiği, bilgilendirici çalışmalar da yapılmıştır [23,51-58].

1.6. Giriş Şekillendirme Yöntemlerinden Faydalanılan Örnek Çalışmalar

Giriş şekillendirme yöntemleri, nispeten kolay uygulanabilmeleri, geri besleme olmadan da istenmeyen titreşimlerin giderilmesindeki etkinlikleri ve kapalı döngü çalışan sistemlerle de uyumlu çalışabilmeleri sayesinde çok çeşitli uygulama alanında değerlendirilmişlerdir. Bu bölümde, yapılan çalışmalardan örnekler verilmiştir.

Kwon ve diğ. [59], esnek yapılu uzun erişim robot kolunun kontrolü için çeşitli yöntemleri denedikleri çalışmalarında giriş şekillendirme yöntemine de yer vermişlerdir. Önceden model bilgisi gerektirmesi ve hesaplama yüküne karşın ileri beslemeli yöntemlerin kontrol komutlarını takip yeteneğinin neredeyse mükemmel olduğunu ifade etmişlerdir.

Grosser ve Singhose [60], esnek telerobotik kolların kontrolünde, kullanıcıların yaşadıkları gecikme algısını gidermek için birim genlikli SI şekillendiricilerden türettikleri yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda istenen hareketin %90'lık kısmını çok daha hızlı yaparak algılanan gecikmenin azaltılabildiğini göstermişlerdir.

Kapucu ve diğ. [61], tek esnek eklemlili ve bağılı bir manipülatörün artık titreşimlerini azaltmak üzere üç değişik yöntemin karşılaştırmasını yaptıkları çalışmada sıfır titreşim şekillendiriciyi de incelemişler, çalışmanın sonucunda her üç yöntemin üstünlüklerini ve yetersizliklerini karşılaştırmalı olarak vermişlerdir.

Mohamed ve Tokhi [62], esnek bir robot kolunun kontrolü için çeşitli komut şekillendirme yöntemlerini denedikleri çalışmada, giriş şekillendirme yöntemleri ile de uygulamalar yapmışlar ve başarılı sonuçlar almışlardır.

Alıcı ve diğ. [63], esnek eklemlili bir robot kolunun kontrolünde gürbüz şekillendiricilerden faydalandıkları bir çalışma yapmışlardır.

Chang ve diğ. [64], bir robot kolunun ucuna bağılı sallanan bir yükün kontrolünü gerçek zamanlı olarak uzaktan internet bağlantısı ile yapan ve bağlantıda oluşan gecikmelerin sebep olduğu etkileri gidermek amacıyla giriş şekillendirme yöntemlerini kullandıkları bir çalışma yapmışlardır.

Feliu ve diğ. [65], ileri beslemeli kontrolü, optimal bir mekanik tasarımla bir arada kullanarak çok modlu tek esnek bağılı bir manipülatörde oluşan titreşimleri gidermeyi amaçlayan kapsamlı bir çalışma yapmışlardır.

Freese ve diğ. [66], mobil bir mayın arama robotunun manipülatör ucunda oluşan titreşimlerini gidermek için giriş şekillendirme ve geri besleme yöntemlerini kullandıkları bir çalışma yapmışlardır.

Hongxia ve diğ. [67], esnek kollu sepetli bir vincin taşıdığı yükte meydana gelen salınımların giderilmesinde iki modlu ZV ve EI şekillendiricilerin etkinliği üzerine bir inceleme çalışması yapmışlardır.

Hayta ve Kapucu [68], esnek uzuvlu bir manipülatörün, verilen ivme girdisiyle artık titreşim oluşmasını engelleyecek şekilde, istenen hareket süresi için hareket profillerinin giriş şekillendirme yöntemiyle oluşturulması üzerine bir çalışma yapmışlardır.

Luo ve diğ. [69], otomatik bozucu etki engelleme yöntemi kullanılarak geri beslemeden alınan verilerle şekillendirici parametrelerinin ayarlanması temeline dayanan bir aktif titreşim kontrol yöntemi geliştirmişler ve etkinliğini esnek bir manipülatör üzerinde değerlendirmişlerdir.

Gürleyük ve diğ. [70], el hareketleri ile idare edilen bir vinç sisteminin taşıdığı yükte meydana gelen salınımları, ZV şekillendirici ile kontrol altına aldıkları bir çalışma yapmışlardır.

Shin ve Rhim [71], yatay ekseninde ileri geri hareket eden, güneş paneli taşıma amaçlı esnek bir robotta oluşan dikey titreşimlerin azaltılması amaçlı bir çalışma yapmışlardır.

Nguyen ve Ngo [72], esnek robot kolunun giriş şekillendirmeyele kontrolü için oluşturdukları algoritmaları ticari bir hareket kontrol ünitesiyle uygulamak suretiyle değerlendirmişlerdir.

Shah ve diğ. [73], su altında çalışan bir sistemin titreşimlerinin açık döngülü kontrolü üzerine yaptıkları çalışmayı yakıt ikmal makinesi üzerinde uygulamışlardır.

Mar ve diğ. [74], çift sarkaç sisteminin kontrolünü, geri beslemeyle gürbüzleştirilmiş uyarlamalı giriş şekillendirme yöntemiyle gerçekleştirdikleri bir çalışma yapmışlardır.

Newman ve Vaughan [75], öncekilerden daha verimli bir uyarlamalı giriş şekillendirme yöntemi oluşturmak amacıyla geri besleme kazançlarıyla şekillendirici dürtü serilerinin eş zamanlı tasarımına dayanan yeni bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Yöntemin etkinliğini, iki esnek bağlı bir robot kolu benzetimi üzerinde incelemişlerdir.

Sahoo ve Singhose [76], insanlarla birlikte görev yapmak için tasarlanmış yumuşak gövdeli robotların insanlarla çarpışmaları durumunda giriş şekillendirmenin çarpışma sonucu ortaya çıkan darbe şiddetlerine olan etkilerini araştırdıkları bir çalışma yapmışlardır. Yumuşak robot olarak davranışsal benzerliğinden dolayı bir vince bağlı taşıma kablosunu, insan vücudunu temsilen de alüminyum levhalardan imal ettikleri esnek bir kolu kullanmışlardır.

1.7. Temel Kaynaklar ve Diğer Önemli Çalışmalar

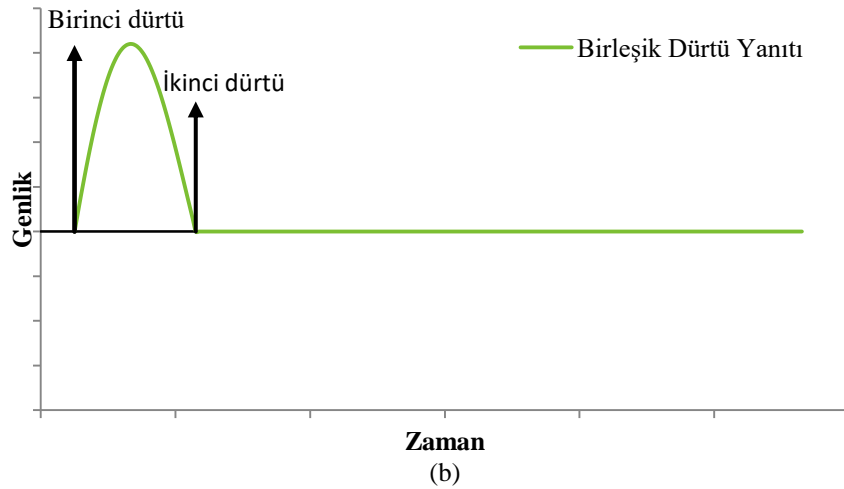
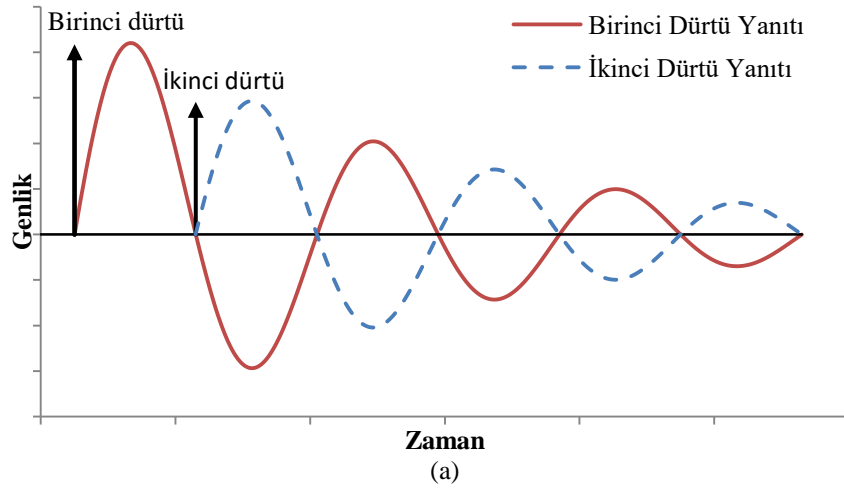
Posicast kontrol ile ilgili temel bilgilere, geliştiricisi Smith'in konuyla ilgili ilk makalesi ve geri beslemeli kontrol sistemlerini konu alan kitabından erişilebilir [4,5]. Singer'in doktora tezi, sıfır titreşim giriş şekillendirici ve bundan türetilen gürbüz şekillendiricilerin teorileri ve oluşturulmalarını gösteren temel çalışmadır [11]. Bu çalışmanın ardından Singer ve Seering tarafından yazılan makale, konunun kapsamlı bir özetini içerir ve giriş şekillendirme ile ilgili yayımlanan neredeyse tüm makalelerde temel yayın olarak referans gösterilir [12].

Singhose tarafından kaleme alınan, esnek sistemler alanında komut şekillendirmenin ilk 50 yılında yapılan çalışmaları ve meydana gelen gelişmeleri ele aldığı makale, yol gösterici mahiyetinde ilk okunması gereken kaynakların başında gelir [1]. Bu tez çalışmasında, bahsi geçen makaleyle beraber giriş şekillendirme üzerine yazılmış iki ayrı kitaptan çok faydalanılmıştır. Bunların ilki, Singhose ve Seering tarafından yazılmıştır ve dinamik sistemler için komut oluşturma amacıyla giriş şekillendirmenin kullanılmasını gösterir [10]. Çok çeşitli giriş şekillendirme yöntemleri hakkında teorik ve uygulamalı bilgiler sunmasının yanı sıra konunun tarihsel gelişimini de ayrı bir bölümde incelemiştir. İkinci kitap ise Gürleyük tarafından Türkçe yazılmış, giriş şekillendirmeyi temelden ele alan ve anlaşılır uygulamalı örneklerle pekiştirerek okuyucuyu konuya hazırlayan değerli bir kaynaktır [2].

2. GİRİŞ ŞEKİLLENDİRME

Bu bölümde ilk olarak giriş şekillendirme yönteminin temel eşitliklerinin elde edilmişleri gösterilmiştir. Sonraki bölümlerde bu eşitliklerden faydalanılarak türetilen ZV, ZVD ve ZVDD giriş şekillendiriciler tanıtılmış ve temel denklemleri verilmiştir.

Bir giriş şekillendiricinin temel işleyiş mantığı, daha önce belirtildiği gibi ilk dürtünün yarattığı salınımı, gecikmeli olarak uygulanan bir veya daha fazla dürtüyle yok etmektir. Bu işleyişe örnek olarak, Şekil 2.1’de iki dürtülü bir şekillendiricinin artık titreşimleri yok etme yöntemi gösterilmektedir.



Şekil 2.1. İki dürtülü bir şekillendiricinin temsili olarak titreşim engelleme süreci a) Her iki dürtü için ayrı ayrı sistem yanıtları b) İki dürtü için birleşik sistem yanıtı [12]

Şekilden görüldüğü gibi ilk dürtünün oluşturduğu salınımdan yarım periyot sonra ilk dürtüyle aynı yönde, genliği sönüme göre hesaplanan ikinci bir dürtü uygulanarak artık salınım tamamen yok edilir.

2.1. Artık Titreşim Genliği Denklemlerinin Elde Edilişleri

İkinci dereceden eksik sönümlü bir sistemde, uygulanan tek bir dürtü sonucunda meydana gelen artık titreşimin genliği belirli bir t zamanı için aşağıdaki denklemle elde edilebilir [10].

$$y_0(t) = \left[A_0 \frac{\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n(t-t_0)} \right] \sin(\omega_d(t-t_0)) \quad (2.1)$$

Burada, A_0 dürtü genliği, t_0 dürtünün uygulandığı zaman, ω_n sönümsüz doğal frekans ve ζ sönüm oranıdır. ω_d ise sönümlü doğal frekans olup Denklem (2.2)'deki gibi bulunur.

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1-\zeta^2} \quad (2.2)$$

Art arda uygulanan m adet dürtünün, son dürtü uygulandıktan sonra meydana getirdiği artık titreşimin genliği ise Denklem (2.1) kullanılarak her dürtü için ayrı ayrı hesaplanan titreşim genliklerinin toplamına eşittir ve aşağıdaki gibi gösterilir.

$$y_\Sigma = \sum_{i=1}^m \left[A_i \frac{\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n(t-t_i)} \right] \sin(\omega_d(t-t_i)) \quad (2.3)$$

Bu denklem, Denklem (2.4)'te verilen trigonometrik dönüşümlerden faydalanılarak toplam artık titreşim genliğini veren bir ifade elde etmek için düzenlenebilir [10,12].

$$\sum_{i=1}^m B_i \sin(\omega_n t + \phi_i) = A_\Sigma \sin(\omega_n t + \psi) \quad (2.4)$$

Burada, A_Σ , B_i , ϕ_i ve ψ aşağıdaki gibidirler:

$$A_\Sigma = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^m B_i \cos \phi_i \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^m B_i \sin \phi_i \right)^2} \quad (2.5)$$

$$B_i = \frac{A_i \omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta \omega_n (t-t_i)} \quad (2.6)$$

$$\phi_i = \omega_d t_i \quad (2.7)$$

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{i=1}^m B_i \cos \phi_i}{\sum_{i=1}^m B_i \sin \phi_i} \right) \quad (2.8)$$

Bu denklemler yerlerine koyulup, sadeleştirmeler yapılarak, son dürtü zamanı t_m için A_Σ artık titreşim genliğini veren eşitlik, Denklem (2.9)'da görüldüğü gibi elde edilir.

$$A_\Sigma = \frac{\omega_d}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta \omega_n t_m} \sqrt{[C(\omega_n, \zeta)]^2 + [S(\omega_n, \zeta)]^2} \quad (2.9)$$

Denklemdaki C ve S ifadeleri aşağıdaki gibidir:

$$C(\omega_n, \zeta) = \sum_{i=1}^m A_i e^{\zeta \omega_n t_i} (\cos \omega_d t_i) \quad (2.10)$$

$$S(\omega_n, \zeta) = \sum_{i=1}^m A_i e^{\zeta \omega_n t_i} (\sin \omega_d t_i) \quad (2.11)$$

Denklem (2.12)'de ise tek bir birim dürtünün yaratacağı artık titreşimin genliği verilmiştir.

$$A_1 = \frac{\omega_d}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (2.12)$$

Denklem (2.9), Denklem (2.12)'ye bölünerek, artık titreşim genliği birimsiz olarak elde edilebilir.

$$V(\omega_n, \zeta) = \frac{A_\Sigma}{A_1} = e^{-\zeta \omega_n t_m} \sqrt{[C(\omega_n, \zeta)]^2 + [S(\omega_n, \zeta)]^2} \quad (2.13)$$

Burada V , sistemin sönümsüz doğal frekansı ve sönüm oranının fonksiyonu olarak, son dürtü zamanı t_m için oransal artık titreşim genliğini ifade eder.

Gerçekleştirilen bir dizi dürtü sonrasında sistemde hiç artık titreşim kalmaması istendiğinde, Denklem (2.13)'te verilen V ifadesinin sıfıra eşit olmasını sağlayacak dürtü genlikleri ve zamanlarının hesaplanması gerekir. Bu koşulları sağlayacak sonsuz çözüm vardır. Apaçık çözümden sakınmak ve şekillendirilmiş girişin,

şekillendirilmemiş girişin verdiği sürekli hal yanıtıyla aynı sonucu vermesi için dürtü genlikleri toplamda bire eşit olacak şekilde kısıtlanarak çözüm sayısı sınırlanabilir.

$$\sum_{i=1}^n A_i = 1 \quad (2.14)$$

Denklem (2.14)'te verilen eşitliği çok büyük pozitif ve negatif dürtü genlikleri ile de sağlamak mümkündür. Birbirine ters yönlü ve büyük genlikteki dürtüler, gerçek bir sistemde kullanılan eyleyicilerin aşırı yüklenmesine sebep olabilir. Bu duruma çözüm üretmek için artık titreşim denklemlerinin çözümünde sadece pozitif değerli dürtü genliklerinin kullanılması şeklinde bir kısıt oluşturulabilir.

$$A_i > 0 \quad i=1, \dots, n \quad (2.15)$$

Bu kısıtlamaya uygun olarak sadece pozitif değerli dürtü genlikleri kullanılarak oluşturulan şekillendiriciler, pozitif giriş şekillendiriciler olarak anılırlar.

2.2. ZV Sıfır Titreşim Şekillendiriciler

İki dürtülü ZV şekillendirici ile kontrol yönteminde, başlangıç anında uygulanan ilk dürtü sonucunda sistemde meydana gelen titreşimlerin, doğru zaman ve genlikte uygulanan ikinci bir dürtü ile yok edilmesi amaçlanır.

ZV giriş şekillendirici, Denklem (2.14) ve (2.15)'te verilen kısıtlara uygun olarak artık titreşim genliğini veren Denklem (2.13)'ün, iki dürtülü şekilde oluşturulduktan sonra sıfıra eşitlenip çözülmesiyle elde edilir.

Denklem (2.13)'ün sıfır olması için Denklem (2.10) ve (2.11)'in ikisinin de sıfıra eşit olması gerekir. Bu denklemler, iki dürtü ile oluşturulup sıfıra eşitlendiklerinde ZV şekillendiricinin ilk iki kısıt denklemini elde edilmiş olur [10].

$$C(\omega_n, \zeta) = A_1 e^{\zeta \omega_n t_1} (\cos \omega_d t_1) + A_2 e^{\zeta \omega_n t_2} (\cos \omega_d t_2) = 0 \quad (2.16)$$

$$S(\omega_n, \zeta) = A_1 e^{\zeta \omega_n t_1} (\sin \omega_d t_1) + A_2 e^{\zeta \omega_n t_2} (\sin \omega_d t_2) = 0 \quad (2.17)$$

Denklemlerde görülebileceği gibi mevcut durumda A_1 , A_2 dürtü genlikleri ve t_1 , t_2 dürtü zamanları olmak üzere dört bilinmeyen mevcuttur. Dürtülerin en kısa zamanda tamamlanması için ilk dürtü zamanı sıfır olarak alınır.

$$t_1=0 \quad (2.18)$$

Bu durumda bilinmeyen sayısı üçe düşmüş olur. Denklem (2.14), (2.16) ve (2.17) buna göre düzenlenerek aşağıdaki gibi sadeleştirilirler.

$$A_1+A_2=1 \quad (2.19)$$

$$A_1+A_2e^{\zeta\omega_n t_2}(\cos\omega_d t_2)=0 \quad (2.20)$$

$$0+A_2e^{\zeta\omega_n t_2}(\sin\omega_d t_2)=0 \quad (2.21)$$

Denklem (2.21)'in apaçık çözümü haricinde sıfır olması için sinüslü terimin sıfıra eşit olması gereklidir. Bu da ancak sinüs fonksiyonunun parametresinin π ve katları olması durumunda mümkündür. Bu bağlamda, dürtü dizisinin en kısa zamanda tamamlanması için sinüs teriminin değeri π olmalıdır. Böylece ikinci dürtü zamanı aşağıdaki gibi bulunur.

$$t_2 = \frac{\pi}{\omega_d} = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} = \frac{T_d}{2} \quad (2.22)$$

Burada T_d , sönümlü salınım periyodudur. Denklem (2.19) ve (2.22)'de verilen eşitliklerin, Denklem (2.20)'de yerlerine konulması aşağıdaki sonucu verir.

$$A_1 - (1-A_1)e^{\left(\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right)} = 0 \quad (2.23)$$

Denklem (2.23) çözülerek A_1 dürtü genliği aşağıdaki gibi bulunur.

$$A_1 = \frac{1}{1+e^{\left(\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right)}} = \frac{1}{1+K} \quad (2.24)$$

Denklem (2.24)'ün tekrar Denklem (2.19)'da yerine konmasıyla da A_2 aşağıdaki gibi bulunur.

$$A_2 = \frac{e^{\left(\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right)}}{1+e^{\left(\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right)}} = \frac{K}{1+K} \quad (2.25)$$

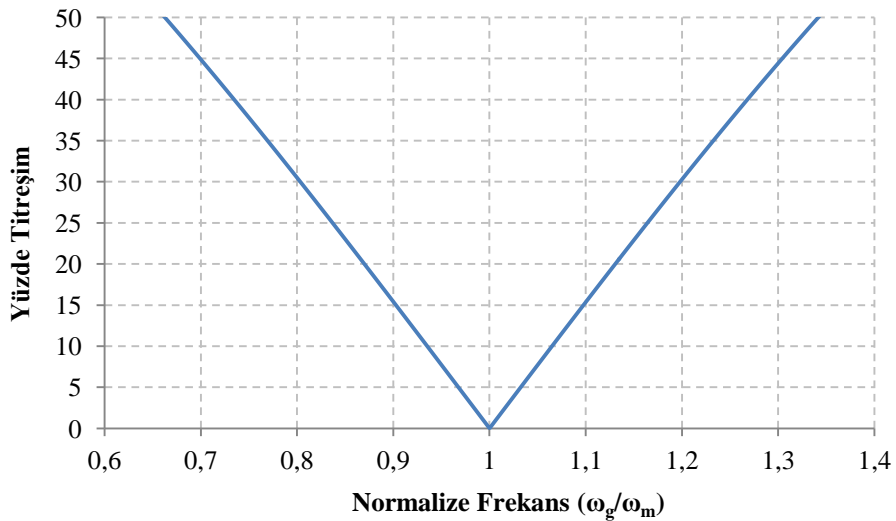
Denklem (2.24) ve (2.25)'de K aşağıda verildiği gibidir:

$$K = e^{\left(\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right)} \quad (2.26)$$

Elde edilen sonuçlara istinaden, sıfır titreşimi sağlayan iki dürtülü ZV giriş şekillendiricinin dürtü genlikleri ve zamanları, aşağıda matris biçiminde verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{1+K} & \frac{K}{1+K} \\ 0 & \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} \end{bmatrix} \quad i=1,2 \quad (2.27)$$

Görüldüğü gibi sadece ω_n doğal frekans ve ζ sönüm oranı değerlerinin Denklem (2.26) ve (2.27)'de yerlerine koyulup çözülmesi ile bu özelliklere sahip herhangi bir sistem için iki dürtülü ZV giriş şekillendirici kolayca hesaplanabilmektedir.



Şekil 2.2. ZV şekillendiricinin duyarlılık grafiği

Şekil 2.2’de doğal frekansı 12,387 rad/s ve sönüm oranı 0,01062 olan örnek bir sistem modeli için hesaplanmış ZV şekillendiricinin modelleme hatalarına karşı duyarlılık eğrisi verilmiştir. Yatay eksen de verilen normalize frekans, ω_g sistemin gerçekteki frekansının, ω_m modelleme frekansına oranıdır. Dikey eksen ise Denklem (2.13) ile hesaplanan artık titreşim oranını yüzde olarak ifade etmektedir.

Şekilden görüldüğü gibi gerçek sistemin frekansındaki değişimler sonucunda artık titreşimler çok hızlı şekilde artmaktadır. Bu da ZV şekillendiricinin modelleme hatalarına karşı çok duyarlı olduğunu göstermektedir.

2.3. ZVD Sıfır Titreşim-Türevsel Şekillendiriciler

Önceki bölümde anlatılan iki dürtülü ZV şekillendiriciyle ancak doğal frekans ve sönüm oranı değerleri kesin olarak bilindiği zaman, artık titreşimler tamamen yok edilebilmektedir. Gerçekte ise bir sistemin doğal frekansını ve sönüm oranını hatasız olarak belirlemek veya modellemek çoğu zaman mümkün değildir. Bazı sistemlerde bu parametreler, çalışma esnasında sürekli olarak değişim de gösterebilmektedirler. Bu gibi sebeplerle doğal frekans ve sönüm oranında meydana gelen belirsizlikler veya değişimlere karşı denklem sistemine yeni kısıtlar eklemek suretiyle şekillendirici duyarlılığını azaltmak mümkündür.

Bu amaçla Denklem (2.10) ve (2.11)’in doğal frekansa göre kısmi türevleri alınarak iki tane ek kısıt denklemi elde edilir [12]. Bu işlemin matematiksel anlamı, doğal frekansta oluşan değişimlere karşın artık titreşimdeki değişimlerin küçük tutulmaya çalışılmasıdır [11]. Sisteme iki yeni kısıt denklemi eklendiğinden çözüm sağlanabilmesi için ek olarak iki tane daha bilinmeyene ihtiyaç vardır. Bu iki bilinmeyen, şekillendirici dürtü sayısının ikiden üçe arttırılması neticesinde, üçüncü dürtünün genliği A_3 ve dürtü zamanı t_3 değişkenleri olarak elde edilirler. Bu denklem sisteminin çözülmesiyle de üç dürtülü, gürbüz ZVD giriş şekillendirici elde edilmiş olur.

ZVD şekillendirici değerlerinin hesaplanabilmesi için öncelikle Denklem (2.10) ve (2.11), üç dürtü ile oluşturulup sıfıra eşitlenerek ilk iki kısıt denklemi elde edilir.

$$C(\omega_n, \zeta) = A_1 e^{\zeta \omega_n t_1} (\cos \omega_d t_1) + A_2 e^{\zeta \omega_n t_2} (\cos \omega_d t_2) + A_3 e^{\zeta \omega_n t_3} (\cos \omega_d t_3) = 0 \quad (2.28)$$

$$S(\omega_n, \zeta) = A_1 e^{\zeta \omega_n t_1} (\sin \omega_d t_1) + A_2 e^{\zeta \omega_n t_2} (\sin \omega_d t_2) + A_3 e^{\zeta \omega_n t_3} (\sin \omega_d t_3) = 0 \quad (2.29)$$

Dürtülerin en kısa zamanda tamamlanması için ilk dürtü zamanı sıfır olarak alınır.

$$t_1 = 0 \quad (2.30)$$

Böylece bilinmeyen sayısı beşe düşürülmüş olur. Denklem (2.14)'te verilen birim genlik denklemi de üç dürtü ile aşağıdaki şekilde üçüncü kısıt denklemi olarak elde edilir.

$$A_1 + A_2 + A_3 = 1 \quad (2.31)$$

İlk dürtü zamanı sıfır olduğundan, Denklem (2.28) ve (2.29) aşağıdaki gibi düzenlenerek türevleri alınır.

$$\frac{\partial C(\omega_n, \zeta)}{\partial \omega_n} [A_1 + A_2 e^{\zeta \omega_n t_2} (\cos \omega_d t_2) + A_3 e^{\zeta \omega_n t_3} (\cos \omega_d t_3)] = 0 \quad (2.32)$$

$$\frac{\partial S(\omega_n, \zeta)}{\partial \omega_n} [0 + A_2 e^{\zeta \omega_n t_2} (\sin \omega_d t_2) + A_3 e^{\zeta \omega_n t_3} (\sin \omega_d t_3)] = 0 \quad (2.33)$$

Denklemlerin türevleri aşağıdaki gibi elde edilir [2].

$$A_2 \zeta t_2 e^{\zeta \omega_n t_2} (\cos \omega_d t_2) - A_2 \sqrt{1 - \zeta^2} t_2 e^{\zeta \omega_n t_2} (\sin \omega_d t_2) + A_3 \zeta t_3 e^{\zeta \omega_n t_3} (\cos \omega_d t_3) - A_3 \sqrt{1 - \zeta^2} t_3 e^{\zeta \omega_n t_3} (\sin \omega_d t_3) = 0 \quad (2.34)$$

$$A_2 \zeta t_2 e^{\zeta \omega_n t_2} (\sin \omega_d t_2) + A_2 \sqrt{1 - \zeta^2} t_2 e^{\zeta \omega_n t_2} (\cos \omega_d t_2) + A_3 \zeta t_3 e^{\zeta \omega_n t_3} (\sin \omega_d t_3) + A_3 \sqrt{1 - \zeta^2} t_3 e^{\zeta \omega_n t_3} (\cos \omega_d t_3) = 0 \quad (2.35)$$

Dürtü dizisinin en kısa zamanda tamamlanması için Denklem (2.28)'de sinüs terimlerinin parametreleri π ve 2π 'ye eşit olmalıdır. Böylece ikinci ve üçüncü dürtü zamanları aşağıdaki gibi bulunur.

$$t_2 = \frac{\pi}{\omega_d} = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} = \frac{T_d}{2} \quad (2.36)$$

$$t_3 = \frac{2\pi}{\omega_d} = \frac{2\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} = T_d \quad (2.37)$$

Elde edilen sonuçlar ile Denklem (2.34) ve (2.35)'te verilen yeni kısıt eşitlikleri de kullanılmak suretiyle A_1 , A_2 ve A_3 dürtü genlikleri aşağıdaki gibi bulunur.

$$A_1 = \frac{1}{1+2K+K^2} \quad (2.38)$$

$$A_2 = \frac{2K}{1+2K+K^2} \quad (2.39)$$

$$A_3 = \frac{K^2}{1+2K+K^2} \quad (2.40)$$

Bu eşitliklerde K katsayısı daha önce Denklem (2.26)'da verilen aynı eşitliği ifade etmekte olup aşağıda tekrar verilmiştir.

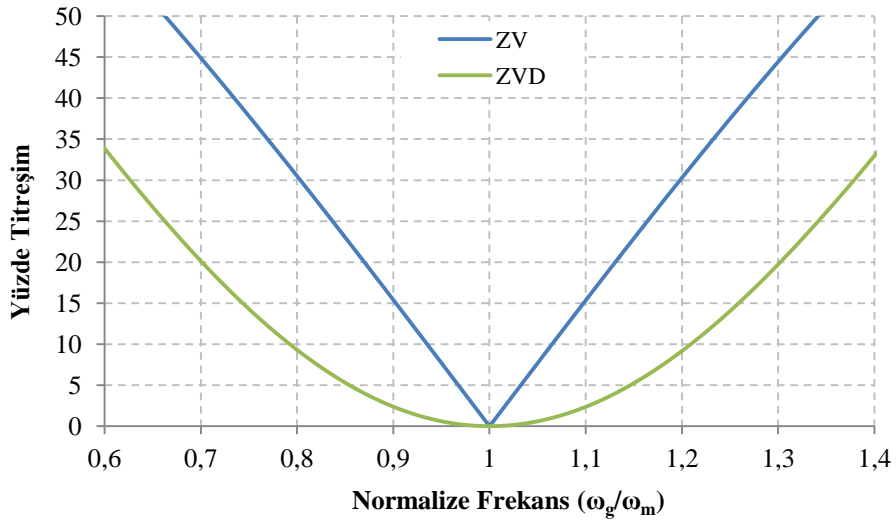
$$K = e^{\left(\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right)} \quad (2.41)$$

Sıfır titreşimi sağlayan üç dürtülü ZVD giriş şekillendiricinin dürtü genlikleri ve zamanları, aşağıda matris biçiminde verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{(1+K)^2} & \frac{2K}{(1+K)^2} & \frac{K^2}{(1+K)^2} \\ 0 & \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} & \frac{2\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} \end{bmatrix} \quad i=1,2,3 \quad (2.42)$$

ZV şekillendirici için olduğu gibi sadece ω_n doğal frekans ve ζ sönüm oranı değerlerinin Denklem (2.41) ve (2.42)'de yerlerine koyulup çözülmesi ile bu özelliklere sahip herhangi bir sistem için üç dürtülü ZVD giriş şekillendirici kolayca hesaplanabilmektedir.

Şekil 2.3'te ZVD şekillendiricinin duyarlılık eğrisi, önceki bölümde aynı örnek sistem modeli kullanılarak çizilen ZV şekillendirici eğrisiyle birlikte karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 2.3. ZVD şekillendiricinin duyarlılık grafiği

Görüldüğü gibi ZVD şekillendirici için gerçek sistemin salınım frekansının, modellenenden farkına bağlı olarak artık titreşimlerde meydana gelen artış, ZV şekillendiriciye oranla belirgin şekilde daha azdır. Belli bir oranda artık titreşimin kabul edilebilir olduğu durumlarda ZVD giriş şekillendirici daha geniş bir frekans aralığında kullanılabilir.

Diğer yandan ZVD şekillendirici, gürbüzlüğü arttırmak için ZV şekillendiriciden bir tane daha fazla dürtü kullandığından şekillendirme süreci, sistemin salınım periyodunun yarısı kadar daha geç tamamlanır.

2.4. ZVDD Sıfır Titreşim-Türevsel-Türevsel Şekillendiriciler

Şekillendirici gürbüzlüğünü daha da arttırmak için artık titreşim denklemlerinin ikinci türevleri de alınarak iki yeni kısıt denklemi oluşturulabilir. Bu durumda denklem sisteminin çözülebilmesi için ek olarak iki bilinmeyen daha gerekir. Bu

gereksinim, şekillendirici dürtü sayısını dörde arttırmak suretiyle elde edilen dördüncü dürtünün genliği A_4 ve dürtü zamanı t_4 değişkenleriyle karşılanır. Elde edilen dört dürtülü ve daha gürbüz bu şekillendirici ZVDD şekillendirici olarak adlandırılır.

ZVD şekillendiricide kullanılan kısıt denklemlerine eklenen iki yeni kısıt denklemi, Denklem (2.10) ve (2.11)'in ikinci türevlerinin sıfıra eşitlenmesiyle elde edilirler.

$$\frac{\partial^2 C(\omega_n, \zeta)}{\partial \omega_n^2} = 0 \quad (2.43)$$

$$\frac{\partial^2 S(\omega_n, \zeta)}{\partial \omega_n^2} = 0 \quad (2.44)$$

Bu türev eşitlikleri çözülüp diğer kısıt denklemleri ile birlikte kullanılarak ve dürtü dizisinin en kısa zamanda tamamlanması için de sinüs terimlerinin parametreleri π , 2π ve 3π 'ye eşit olacak şekilde kısıt denklemleri çözüldüğünde dürtü zamanları aşağıdaki gibi elde edilir.

$$t_2 = \frac{\pi}{\omega_d} = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} = \frac{T_d}{2} \quad (2.45)$$

$$t_3 = \frac{2\pi}{\omega_d} = \frac{2\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} = T_d \quad (2.46)$$

$$t_4 = \frac{3\pi}{\omega_d} = \frac{3\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} = \frac{3T_d}{2} \quad (2.47)$$

Dürtü genlikleri ise aşağıdaki gibi bulunur:

$$A_1 = \frac{1}{1+3K+3K^2+K^3} \quad (2.48)$$

$$A_2 = \frac{3K}{1+3K+3K^2+K^3} \quad (2.49)$$

$$A_3 = \frac{3K^2}{1+3K+3K^2+K^3} \quad (2.50)$$

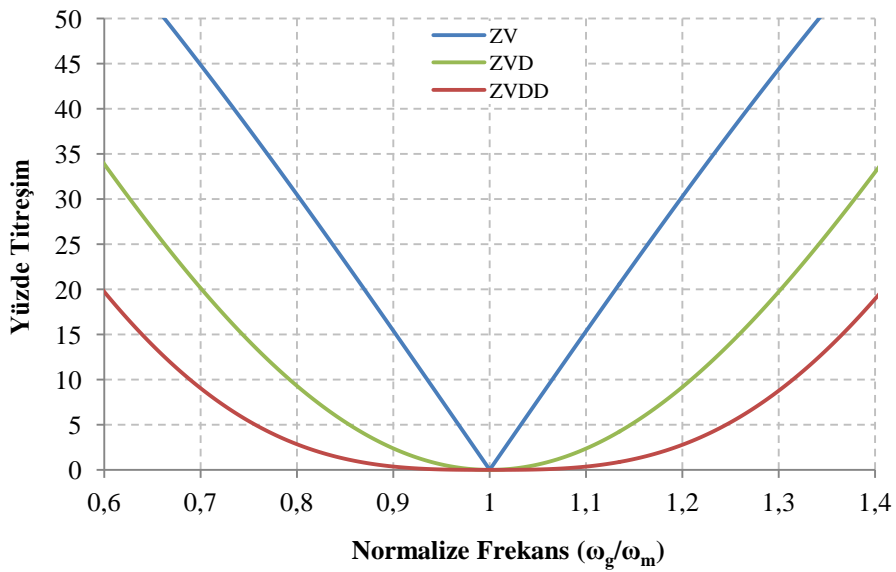
$$A_4 = \frac{K^3}{1+3K+3K^2+K^3} \quad (2.51)$$

Bu eşitliklerde de K katsayısı daha önce Denklem (2.26) ve (2.41)'de verilen aynı eşitliği ifade eder. Eşitlikler, önceki şekillendiriciler için olduğu gibi aşağıda matris biçiminde verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{(1+K)^3} & \frac{3K}{(1+K)^3} & \frac{3K^2}{(1+K)^3} & \frac{K^3}{(1+K)^3} \\ 0 & \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} & \frac{2\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} & \frac{3\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} \end{bmatrix} \quad i=1,2,3,4 \quad (2.52)$$

Yine öncekilerde olduğu gibi sadece ω_n doğal frekans ve ζ sönüm oranı değerlerinin Denklem (2.52)'de yerlerine koyulup çözülmesi ile bu özelliklere sahip herhangi bir sistem için dört dürtülü ZVDD giriş şekillendirici kolayca hesaplanabilmektedir.

ZVDD şekillendiricinin duyarlılık eğrisi önceki bölümlerde aynı örnek sistem modeli kullanılarak çizilen ZV ve ZVD şekillendiricilerin eğrileriyle birlikte karşılaştırmalı olarak Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4. ZVDD şekillendiricinin duyarlılık grafiği

Beklendiği gibi ZVDD giriş şekillendiricinin frekans farkına bağlı modelleme hatalarına karşı duyarlılığı, ZV ve ZVD şekillendiricilerden daha azdır. Buna karşın ZVDD şekillendirici, gürbüzlüğü arttırmak için bir dürtü daha fazla kullandığından şekillendirme süreci, ZVD şekillendiriciye göre sistemin salınım periyodunun yarısı kadar daha geç tamamlanmaktadır.

2.5. Daha Üst Mertebeden Türevsel Sıfır Titreşim Giriş Şekillendiriciler

Benzer şekilde titreşim genliği denklemlerinin daha üst merteben türevlerini almak suretiyle türetilen yeni kısıt denklemleri sayesinde şekillendirici gürbüzlüğünü daha da arttırmak mümkündür. Bu denklemlerin çözülebilmesi için ikişer ek bilinmeyen daha gerekeceğinden dürtü sayısı, şekillendiriciye eklenen türev mertebesi kadar artacaktır.

Eklenen her dürtü, şekillendirme sürecini sistemin yarım periyodu kadar daha uzatacaktır. Bu sebeple pratikte ZVDD şekillendiriciden daha yüksek mertebeden türevsel şekillendiriciler pek fazla tercih edilmemektedirler.

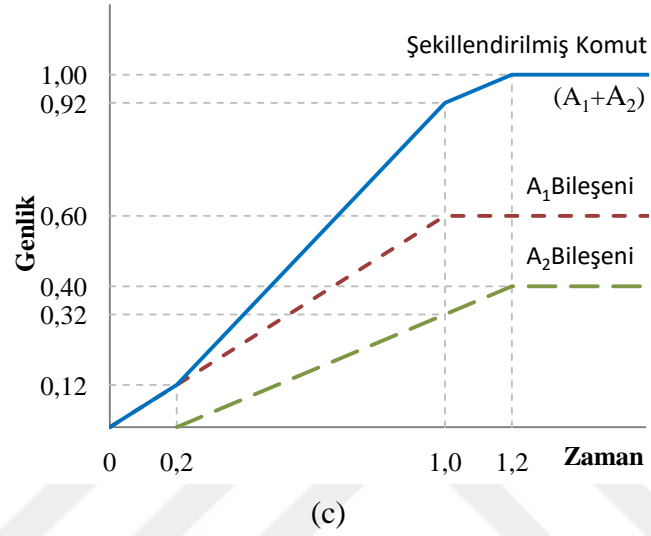
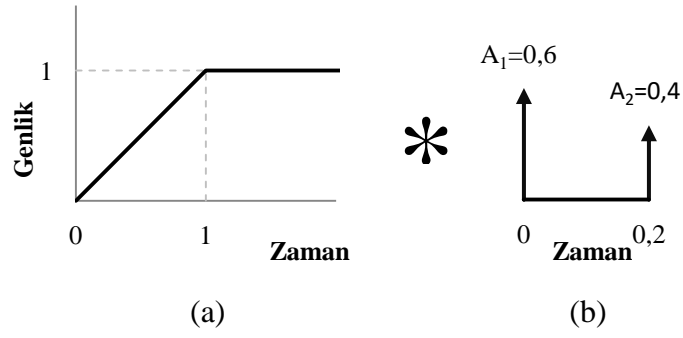
2.6. Şekillendirilmiş Kontrol Komutlarının Elde Edilmesi

Gerçek bir sistem, yapısına uygun ve fiziki olarak gerçekleştirilebilir komutlarla kontrol edilebilir. Bu referans komutlar, hesaplanan giriş şekillendirici dürtüleri ile konvolüsyon işlemine tabi tutulurlar. Böylece, sistem tarafından gerçekleştirilebilir ve artık titreşim üretmeyen şekillendirilmiş komutlar elde edilir.

Konvolüsyon işlemi, referans komutun her bir şekillendirici dürtüsünün genliğiyle ölçeklenerek oluşturulmuş ve dürtü zamanına kaydırılmış kopyalarının toplamı olarak ifade edilebilir.

Şekil 2.5'te örnek olarak bir referans komutun iki dürtülü şekillendirici ile konvolüsyonu gösterilmiştir.

Konvolüsyon işlemine referans komutun giriş şekillendiricinin ilk dürtüsünün genliğiyle ölçekli bir kopyası oluşturularak başlanır. Referans komutun şekillendiricinin ilk dürtüsünün genlik değeri 0,6 ile ölçekli kopyası olan A_1 bileşeni, kırmızı kesikli çizgi ile gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Sürekli bir komutla iki dürtülü şekillendiricinin konvolüsyonu a) Referans komut b) Giriş şekillendirici c) Şekillendirilmiş komut ve bileşenleri

A_1 bileşenin başlangıç zamanı, birinci dürtü zamanına eşit olarak sıfırdır. Yeşil kesikli çizgi ile çizilen A_2 bileşeni ise referans komutun şekillendiricinin ikinci dürtüsünün genliğiyle ölçeklenmiş kopyasıdır. Bu bileşen, ikinci dürtü zamanı 0,2'den başlayacak şekilde zaman düzlemine yerleştirilir. Son olarak A_1 ve A_2 bileşenlerinin genlikleri zaman düzlemi boyunca birbirleriyle toplanarak şekillendirilmiş komut elde edilir.

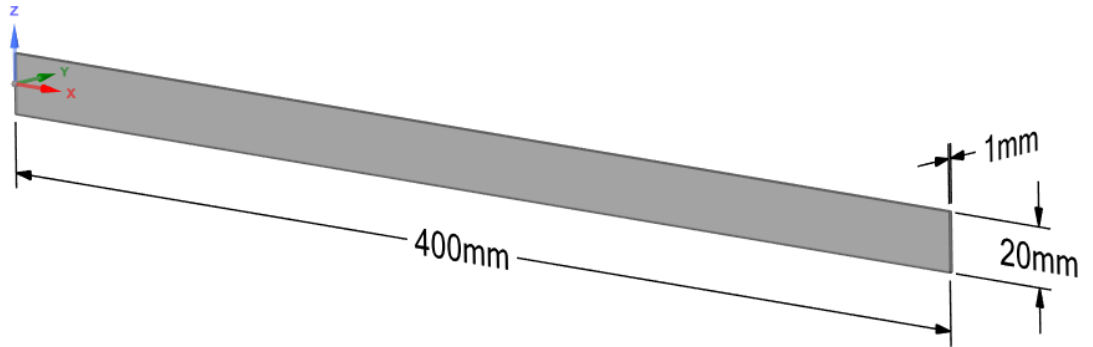
3. BENZETİM ORTAMINDA YAPILAN ÇALIŞMA VE DENEYLER

Bu bölümde yapılan deneylerde kullanılan robot kolu modelinin mekanik özellikleri, Akyüz'ün [77] kendi tez çalışması kapsamında geliştirdiği esnek bağlı robot kolu için verdiği değerler örnek alınarak belirlenmiştir. Modelleme için kullanılan temel değerler Tablo 3.1'de gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Esnek bağlı robot kolu modelinde kullanılan ölçü ve malzeme değerleri

Parametre	Değer
Kol Boyu	0,4 m
Kol Yüksekliği	0,02 m
Kol Kalınlığı	0,001 m
İmalat Malzemesi	Alüminyum
Elastisite Modülü	$6,9 \times 10^{10}$ Pa
Poisson's Oranı	0,33
Yoğunluk	2710 kg/m^3
Kol Ağırlığı	0,021 kg

Esnek bağlı robot kolunun verilen ölçülere göre bilgisayar destekli çizim programıyla oluşturulmuş üç boyutlu görünümü Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Eksen çizgilerinin gösterildiği kısım, kolun eklem yerini temsil etmektedir. Kol, z eksenini etrafında dönme hareketi yapmaktadır.



Şekil 3.1. Esnek bağlı robot kolunun bilgisayarda oluşturulmuş model resmi

3.1. Esnek Bağlı Robot Kolunun Modal Analizi ve Mod Şekilleri

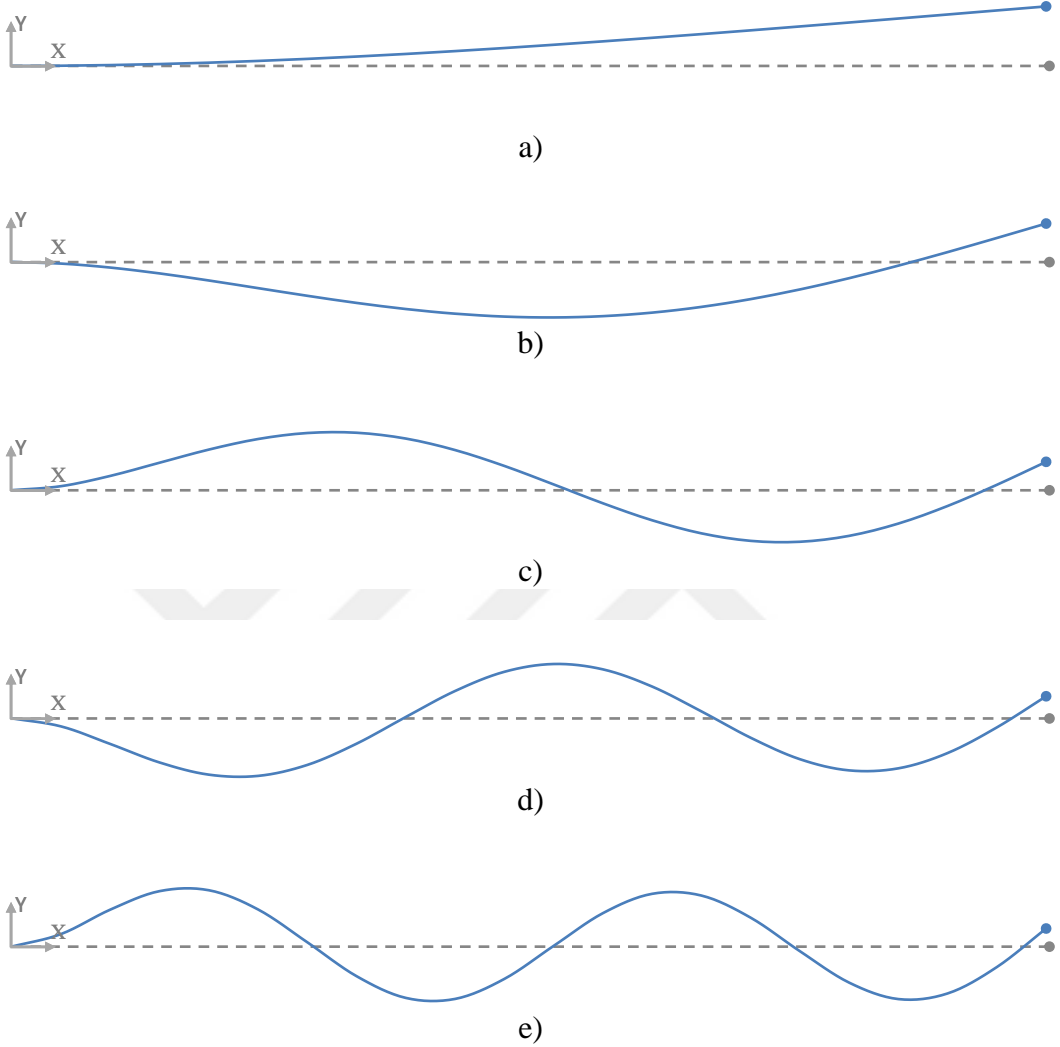
Akyüz, yaptığı deneyler sonucunda üzerinde çalıştığı esnek bağlı robot kolunun, ucuna ivmeölçer sabitlenmiş olduğu haliyle, birinci modal frekansının 3,86 Hz olduğunu belirlemiştir [77]. Ansys Mechanical APDL ortamında sonlu elemanlar yöntemiyle modal analiz deneyleri gerçekleştirmek amacıyla kaynak kodları Ek-A bölümünde Algoritma A.1 başlığı altında verilen parametrik program oluşturulmuştur. Bu program kullanılarak esnek bağlı robot kolunun sayısal modeli Tablo 3.1’de verilen ölçü ve malzeme özellikleri kullanılarak oluşturulmuştur. Gerçek sistemde kullanılan ivmeölçeri temsil etmesi amacıyla da kolun ucuna 0,00397 kg noktasal kütle eklenmiştir.

Kol modeli, eklem yerinden ankastre mesnet ile sabitlenmiştir. Sadece düzlem içinde oluşan titreşimlerin modal frekanslarını elde etmek amacıyla kolun z ekseninde yer değiştirme ve x eksenini etrafında dönme hareketi yapmasını engelleyecek şekilde serbestlik derecesi kısıtları oluşturulmuştur. Esnek kolun düzlem içi titreşimlerinin ilk 5 mod frekansını bulmak için yapılan modal analiz deneyleri sonucunda, gerçek fiziki sistemde olduğu gibi birinci modal frekans değeri 3,86 Hz olarak elde edilmiştir. Sonuç hassasiyetini değerlendirmek için modal analiz deneyi 21 ve 100 elemandan oluşan iki ayrı sonlu elemanlar modeliyle tekrar edilmiştir. Alınan sonuçlara göre 21 elemanlı sonlu elemanlar modelinin verdiği sonuçların yeterli doğruluk ve hassasiyete sahip olduğu değerlendirilmiştir. Her iki deney sonucunda da elde edilen ilk 5 modal frekans değerleri, dört ondalık haneye yuvarlanmış olarak Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2. Esnek bağlı kolun sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan modal analiz deneyi sonuçları

Mod No.	Mod Frekansı (Hz)	
	21 Elemanlı Model	100 Elemanlı Model
Mod 1	3,8599	3,8599
Mod 2	26,5912	26,5911
Mod 3	77,9312	77,9289
Mod 4	157,1656	157,1465
Mod 5	264,8154	264,7239

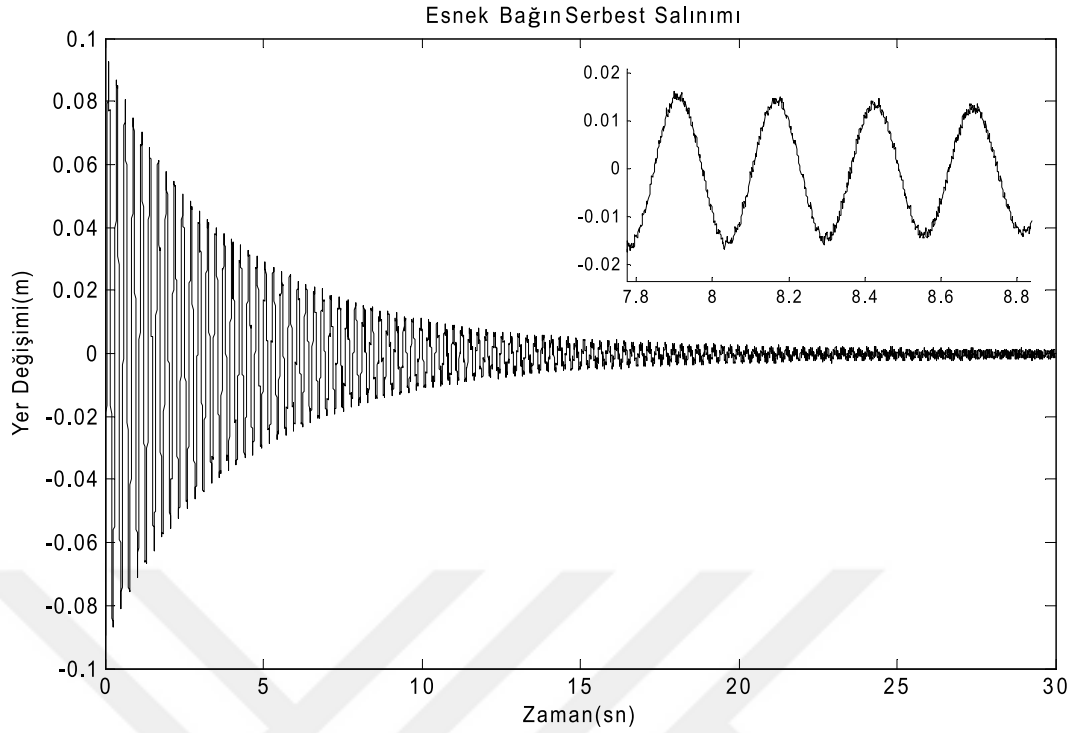
Şekil 3.2’de, ucuna 0,00397 kg noktasal kütle eklenmiş durumdaki esnek kol modelinin y eksenindeki ilk 5 moduna ait mod şekilleri verilmiştir.



Şekil 3.2. Ucunda 0,00397 kg noktasal kütle bulunan esnek kol modelinin y eksenindeki a) 1. mod b) 2. mod c) 3. mod d) 4. mod e) 5. mod şekilleri

3.2. Esnek Bağlı Robot Kolunun Serbest Salınım Analizi ve Grafiği

Akyüz, temel salınım frekansını belirlemek için kullandığı esnek bağ ile bir serbest salınım deneyi yapmıştır. Deneyde bir ucunu sabitlediği esnek bağın diğer ucuna belirli bir yer değiştirme verdikten sonra ucu serbest bırakmış ve oluşan salınımları incelemiştir. Şekil 3.3’te deney sonucunda meydana gelen salınımına ilişkin verdiği grafik gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Akyüz'ün kendi çalışmasında yaptığı deney sonucunda verdiği esnek bağa ait serbest salınım grafiği [77]

Sonraki deneylerde de kullanmak için gerçek fiziki sistemin sönüm oranı, Şekil 3.3'teki grafikten faydalanılarak tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla logaritmik azalım yöntemi kullanılmıştır. Logaritmik azalım δ , eksik sönümlü bir sistemde art arda meydana gelen iki salınımın genliklerinin birbirlerine oranlarının doğal logaritması olarak tanımlanır [78].

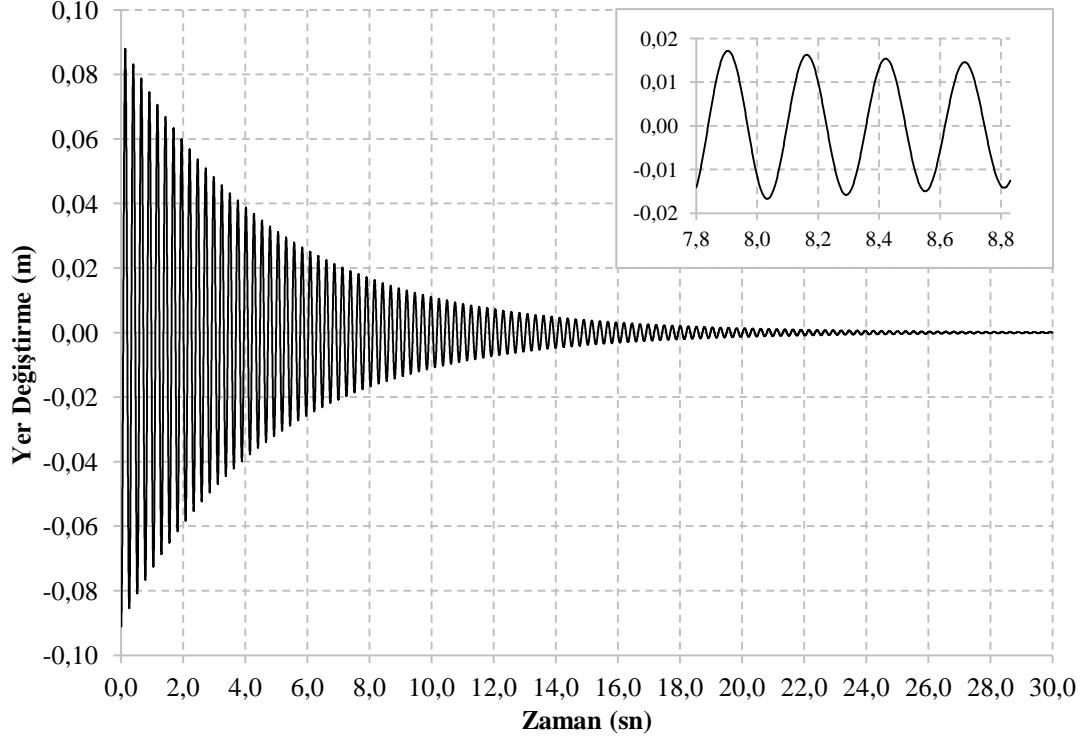
$$\delta = \ln \left(\frac{x(t)}{x(t+T_d)} \right) \quad (3.1)$$

$$\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{4\pi^2 + \delta^2}} \quad (3.2)$$

Denklem (3.1)'de δ logaritmik azalımı, $x(t)$ salınımın bir periyot arayla seçilen iki tepe noktasından ilkinin genliğini ve $x(t+T_d)$ de ikincisinin genliğini ifade etmektedir. Denklem (3.2)'de yerine konan δ ile de ζ sönüm oranı elde edilir.

Yapılan ölçüm ve hesaplamalar sonucunda, verilen esnek bağı robot kolu için ζ sönüm oranının yaklaşık olarak 0,008605 olduğu belirlenmiştir. Bu deneyin benzetimini gerçekleştirmek amacıyla Ansys ortamında çalışan parametrik bir serbest salınım programı yazılmıştır. Programın kaynak kodları, Ek-A bölümünde

Algoritma A.2 başlığı altında verilmiştir. Bu program vasıtasıyla önceki bölümde verilen esnek kol modeline, belirlenen sönüm oranı ve gerçeğe yakın bir başlangıç koşulu uygulamak suretiyle serbest salınım deneyinin benzetimi yapılmıştır. Şekil 3.4'te benzetim sonucu elde edilen serbest salınım grafiği verilmiştir.



Şekil 3.4. Benzetim sonucu elde edilen serbest salınım grafiği

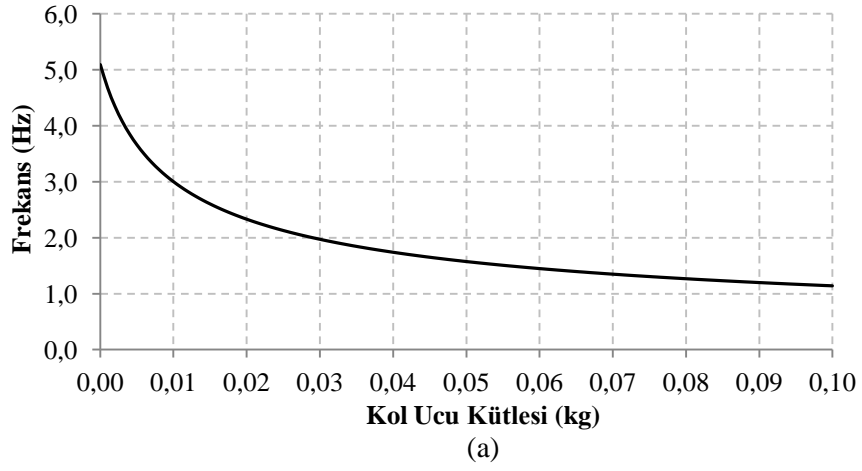
3.3. Uç Kütlesinin Modal Frekansa Etkisi

Tablo 3.1'de verilen değerlerle oluşturulan esnek bağlı robot kolunun, ucuna eklenen kütle büyüklüğüne bağlı olarak modal frekanslarında meydana gelen değişimleri incelemek için benzetim deneyleri yapılmıştır.

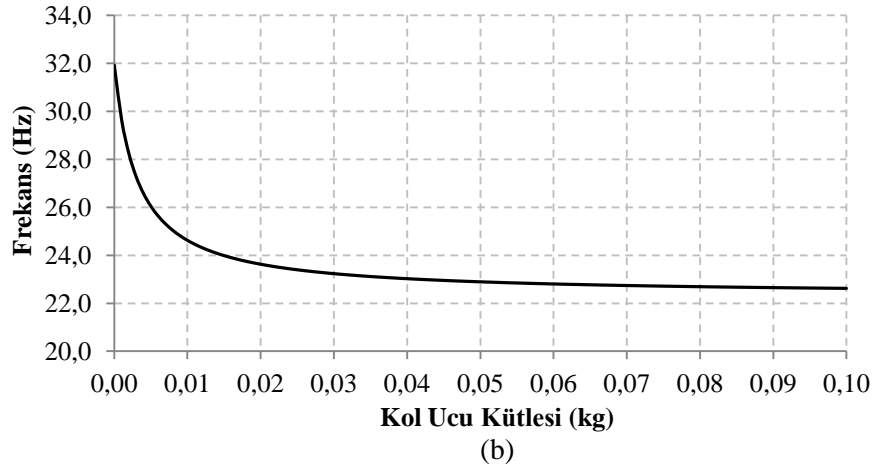
Bu amaçla esnek bağlı kolun sonlu elemanlar modeline verilen uç kütle aralığı ve artım miktarı için otomatik olarak modal analiz deneyleri yapan APDL programı yazılmıştır.

Şekil 3.5'te, esnek kol ucuna eklenen noktasal kütle büyüklüğüne bağlı olarak modal frekansta meydana gelen değişimleri göstermek amacıyla benzetim deneylerinden elde edilen sonuçlara göre çizilmiş grafikler verilmiştir.

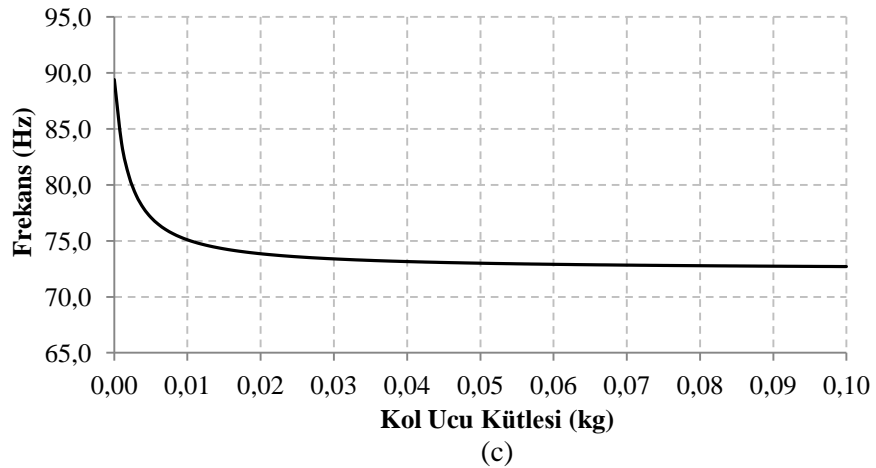
1. Modal Frekans Değişimi



2. Modal Frekans Değişimi

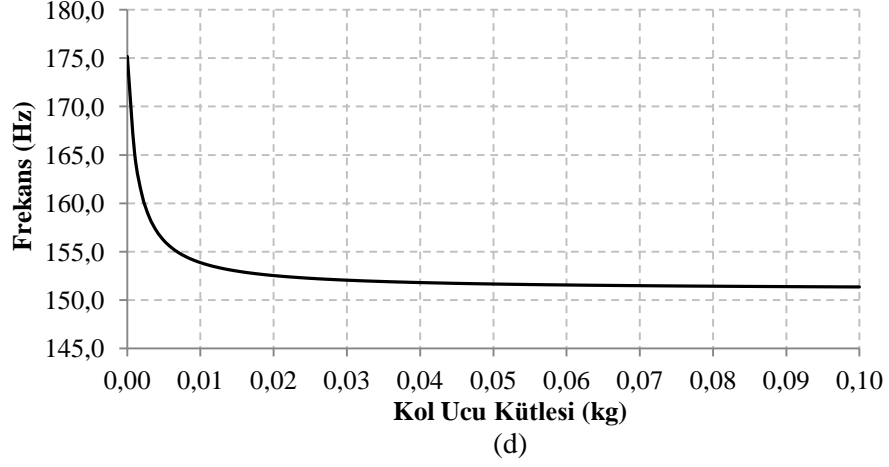


3. Modal Frekans Değişimi

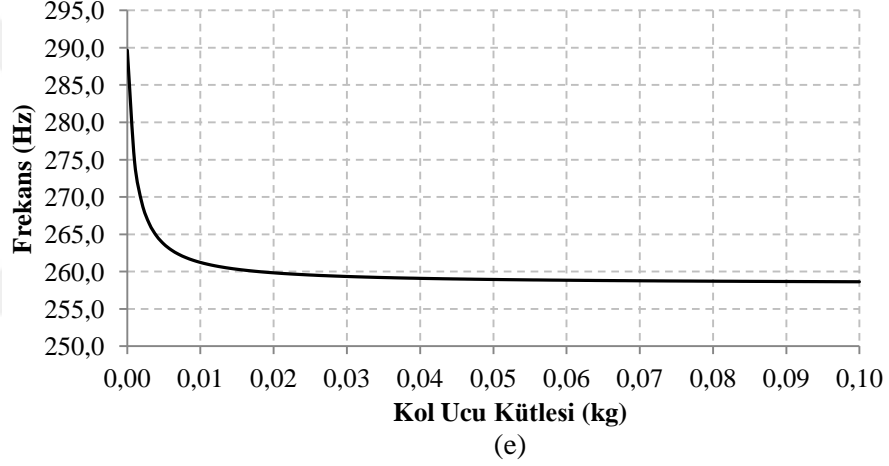


Şekil 3.5. Esnek bağlı robot kolunun ucuna eklenen noktasal kütleyle bağlı olarak modal frekanslarda meydana gelen değişimler a) 1.mod b) 2.mod c) 3.mod d) 4.mod e) 5. mod

4. Modal Frekans Değişimi



5. Modal Frekans Değişimi



Şekil 3.5.(Devam) Esnek bağlı robot kolunun ucuna eklenen noktasal kütleyle bağlı olarak modal frekanslarda meydana gelen değişimler a) 1.mod b) 2.mod c) 3.mod d) 4.mod e) 5. mod

Grafiklerden görüldüğü gibi uç kütlesi arttıkça, esnek kolun mod frekansları doğrusal olmayan bir şekilde azalmaktadır.

3.4. Esnek Bağlı Robot Kolunun Titreşimlerinin Giriş Şekillendirmeye Kontrolüne İlişkin Deneyler

Benzetim ortamında yapılan bir dizi deney vasıtasıyla dönme hareketi sonucu tek eklemlili esnek bağlı bir robot kolunda meydana gelen artık titreşimleri önlemek için ZV, ZVD ve ZVDD giriş şekillendirme yöntemleriyle şekillendirilmiş konum kontrol komutlarının kullanımı incelenmiştir.

Ansys ortamında çalışan parametrik program kullanılarak yapılan deneylerle bu şekillendiricilerin artık titreşimleri önleme kabiliyetleri, aynı sistemin kontrolü için farklı kontrol komutlarına tatbik edilme olanakları ve modelleme hatalarına karşı duyarlılıkları da analiz edilmiştir.

Benzetim ortamında esnek bağın sonlu elemanlar modeli BEAM188 çubuk elemanı kullanılarak oluşturulmuştur. Uç kütlesi, esnek bağ modelinin en ucundaki düğüme yerleştirilen MASS21 noktasal kütle elemanı ile modellenmiştir. Kol eklemi, MPC184 dönel eklem elemanı kullanılarak modellenmiştir. Bu elemanın bir ucu sabit yere, diğer ucu da TARGE170 bağlantı elemanı kullanılarak esnek kola sabitlenmiştir [79]. Geliştirilen programın kaynak kodları açık olarak Ek-A bölümünde Algoritma A.3 başlığı altında paylaşılmıştır.

Deneysel için üç değişik esnek kol modeli oluşturulmuştur. Modeller, Tablo 3.1’de verilen aynı mekanik özelliklere sahip olup taşıdıkları farklı kol ucu kütleleri ile birbirlerinden ayrılırlar. İlk olarak, deneylere temel oluşturan esnek kol, ucunda 0,030 kg noktasal kütle ekli halde modellenmiştir. Bu model, bundan sonraki bölümlerde referans model olarak anılacaktır. Diğer iki esnek kol modelinden ilki, 0,015 kg ve diğeri de 0,045 kg noktasal kütle ekli olarak modelleme hatalarının artık titreşime etkilerinin analizinde kullanılmak için oluşturulmuşlardır.

0,030 kg uç kütleli referans modelin mod frekanslarını bulmak için modal analizi yapılmış ve birinci mod frekansı 1,9715 Hz olarak tespit edilmiştir. Referans kolun sönüm oranı da 0,01062 olarak alınmıştır.

Bu iki parametre kullanılarak referans modele verilecek komutların şekillendirilmesi için kullanılmak üzere ZV, ZVD ve ZVDD giriş şekillendirici dürtü zamanları ve genlikleri hesaplanmıştır. Referans modelin birinci mod frekansında meydana gelen artık titreşimleri önlemek için hesaplanan şekillendirici parametreleri Tablo 3.3’te görülmektedir.

Deney amaçları doğrultusunda, esnek kollarda meydana gelen artık titreşimler, 30°, 60° ve 90° dönme hareketleri için analiz edilmiştir. Bunun için öncelikle esnek kol modellerinin 1 rad/sn (yaklaşık 57,3°/sn) sabit açısal hız ile 30°, 60° ve 90° dönme hareketi yapmalarını sağlayacak temel konum değiştirme komutları oluşturulmuştur.

Tablo 3.3.Referans model için hesaplanmış giriş şekillendirici parametreleri

Sıra	Zaman (sn)	Dürtü Genliği
ZV Şekillendirici		
1.	0,0	0,5083
2.	0,2536	0,4917
ZVD Şekillendirici		
1.	0,0	0,2584
2.	0,2536	0,4999
3.	0,5072	0,2417
ZVDD Şekillendirici		
1.	0,0	0,1314
2.	0,2536	0,3812
3.	0,5072	0,3686
4.	0,7608	0,1188

Daha sonra, giriş şekillendirici dürtülerinin temel komutlarla konvolüsyonu gerçekleştirilerek şekillendirilmiş konum değiştirme komutları elde edilmiştir. Esnek kol modeli değişmediğinden, farklı açılarda dönme hareketi gerçekleştiren şekillendirilmiş komutları oluşturmak için aynı giriş şekillendiriciler kullanılmıştır.

Oluşturulan komutlar, deney bilgileri ve sonuçları, dönme açılarına göre gruplanarak takip eden alt bölümlerde detaylıca sunulmuştur. Son olarak, Bölüm 3.4.4'te de tüm deneylerden elde edilen sonuçların genel bir değerlendirmesi yapılmıştır.

3.4.1. Kolun 30° dönme hareketi sonucunda oluşan titreşimlerin incelenmesi

Bu bölümde, esnek bağlı robot kolunun değişik uç kütleleri ile 30° dönme hareketi yapması sonucunda meydana gelen titreşimler ve bunların giriş şekillendirme yöntemleriyle kontrolüne ilişkin gerçekleştirilen deneyler paylaşılmıştır.

3.4.1.1. Kolun 30° dönme hareketi deneylerinde kullanılan komutlar

Seçilen esnek kol modelinin 1 rad/s hızla 30° dönmesini sağlamak için oluşturulan temel konum değiştirme komutu Tablo 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.4.Şekillendirilmemiş temel komut (30° dönme hareketi için)

Adım	Zaman (sn)	Komut	
		radyan	derece
1.	0,0	0,0	0,0
2.	0,5236	0,5236	30,00
3.	3,0	0,5236	30,00

Tabloda görüldüğü gibi temel komut üç adımdan oluşmaktadır. Birinci adımda dönme hareketine başlamadan önce esnek kol eklemine konumu, t=0 sn başlangıç zamanı için 0° olarak belirlenmiştir. İkinci adım, dönme hareketinin tamamlanıp kolun duracağı zaman ve konumu belirtmektedir. Buna göre 1 rad/s açısal hızla dönme hareketi yapıldığında kol eklemi, t=0,5236 sn anında 30° dönme hareketini tamamlayarak durma konumuna ulaşır. Üçüncü adım, önceden belirlenmiş analiz süresi sonu olan t=3,0 sn anına kadar kol eklemine aynı konumda sabit kalacağını ifade eder. Temel komutun Tablo 3.3'te verilen ZV, ZVD ve ZVDD şekillendiricilerle konvolüsyonu sonucunda 30° dönme hareketi için elde edilen şekillendirilmiş konum kontrol komutları, Tablo 3.5'te verilmiştir.

Tablo 3.5.Şekillendirilmiş konum kontrol komutları (30° dönme hareketi için)

Adım	Zaman (sn)	Komut	
		radyan	derece
ZV Şekillendirmeli Komut			
1.	0,0	0,0	0,0
2.	0,2536	0,1289	7,39
3.	0,5236	0,3989	22,86
4.	0,7772	0,5236	30,00
5.	3,0	0,5236	30,00
ZVD Şekillendirmeli Komut			
1.	0,0	0,0	0,0
2.	0,2536	0,0655	3,76
3.	0,5072	0,2579	14,77

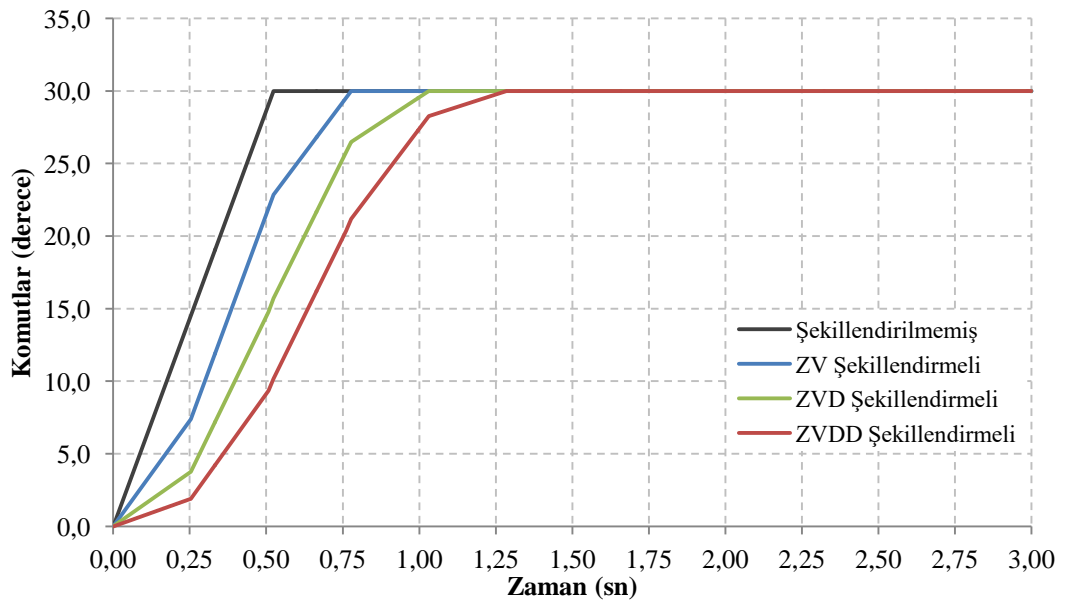
Tablo 3.5.(Devam)Şekillendirilmiş konum kontrol komutları (30° dönme hareketi için)

4.	0,5236	0,2742	15,71
5.	0,7772	0,4623	26,49
6.	1,0308	0,5236	30,00
7.	3,0	0,5236	30,00

ZVDD Şekillendirmeli Komut

1.	0,0	0,0	0,0
2.	0,2536	0,0333	1,91
3.	0,5072	0,1633	9,36
4.	0,5236	0,1777	10,18
5.	0,7608	0,3556	20,38
6.	0,7772	0,3698	21,19
7.	1,0308	0,4935	28,27
8.	1,2844	0,5236	30,00
9.	3,0	0,5236	30,00

Şekil 3.6'da sırasıyla Tablo 3.4 ve Tablo 3.5'te verilen, 30° dönme hareketi için oluşturulmuş şekillendirilmemiş temel komut ile ZV, ZVD ve ZVDD şekillendirmeli komutlar, zaman-konum grafiği üstünde karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Kol eklemine verilen şekillendirilmemiş temel komut ve diğer şekillendirilmiş komutlar (30° dönme hareketi için)

Tablo 3.4, Tablo 3.5 ve Şekil 3.6’da görüldüğü gibi temel komutla kontrol edilen esnek kol, 30° dönme hareketini 0,5236 sn’de tamamlar. Aynı hareket ZV şekillendirmeli komut ile 0,7772 sn’de tamamlanmaktadır. Aradaki 0,2536 sn’lik gecikme 0,030 kg uç kütleli esnek kolun doğal salınım periyodunun yarısına eşittir. ZVD şekillendirmeli komut, aynı hareketi ZV şekillendiriciden yarım periyot gecikmeyle 1,0308 sn’de gerçekleştirir. Son olarak ZVDD şekillendirmeli komut da aynı hareketi ZVD şekillendirmeli komuttan yarım periyot gecikmeyle 1,2844 sn’de tamamlamaktadır.

ZV, ZVD ve ZVDD şekillendirmeli komutlar, 0,030 kg uç kütleli esnek kolun titreşimlerini önlemek üzere hesaplanmış giriş şekillendiriciler ile oluşturulmuşlardır. 30° dönme hareketi için 0,030 kg uç kütleli esnek kolun kontrol edildiği deneylerle şekillendirilmiş komutların modelleme hatası olmayan ideal şartlar altındaki titreşim önleme özellikleri incelenmiştir.

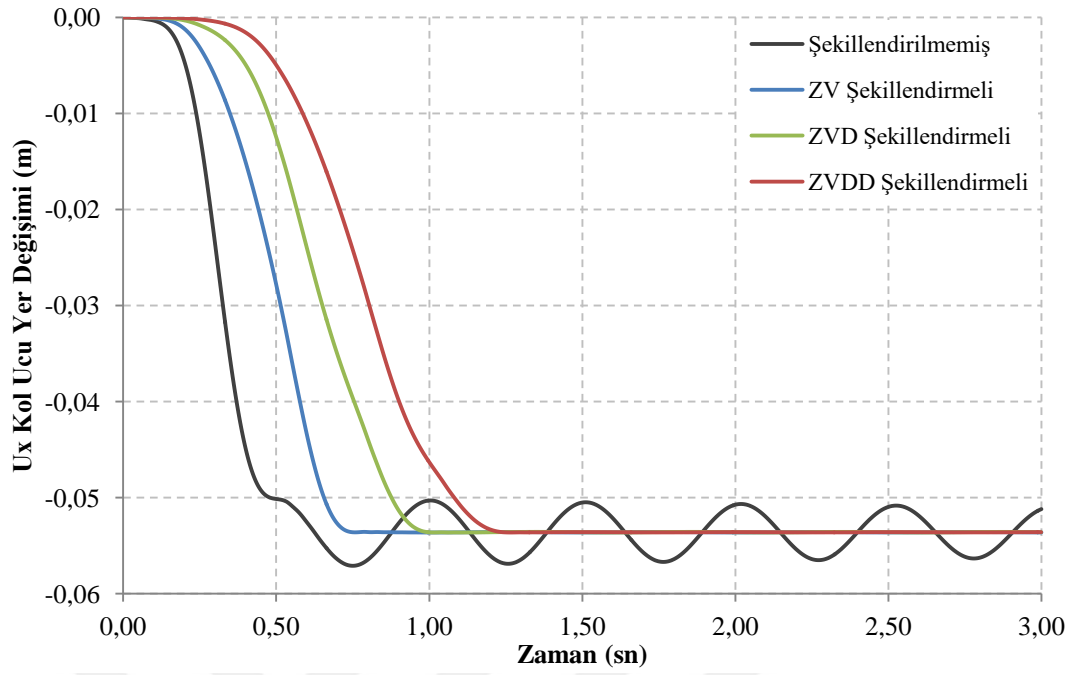
0,015 kg ve 0,045 kg uç kütleli modellerin aynı komutlarla kontrol edildiği deneylerle de giriş şekillendirmeli komutların modelleme hatalarına karşı duyarlılıkları incelenmiştir.

3.4.1.2. Uç kütlelerinin 0,030 kg olduğu durumda 30° dönme hareketi sonuçları

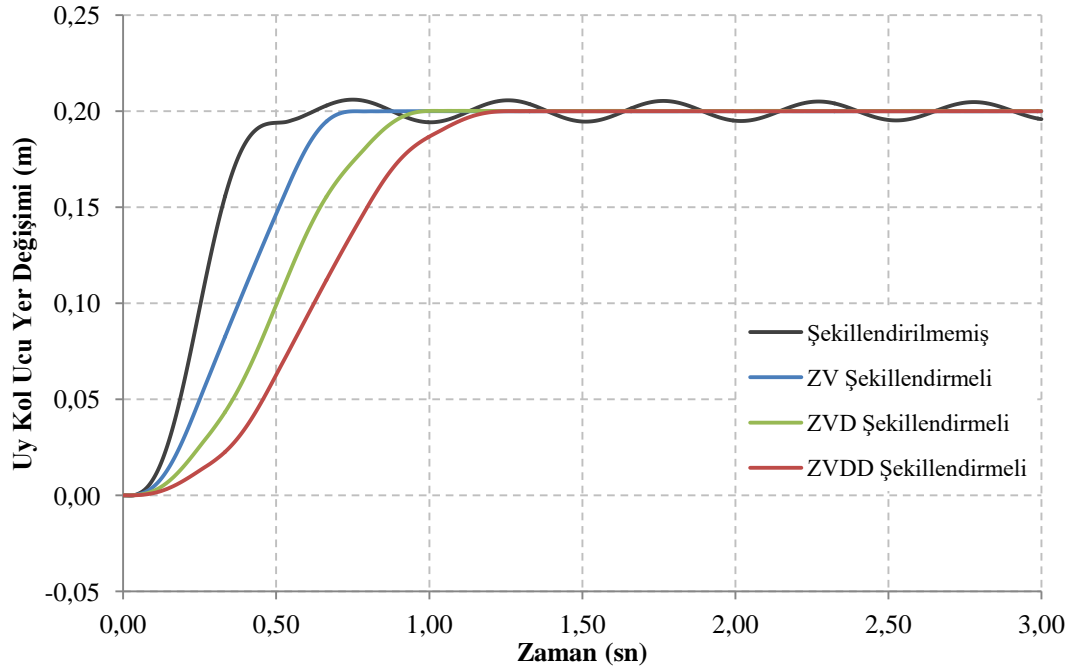
Bu bölümde, modelleme hatası bulunmayan şartlarda giriş şekillendirmeli komutlarla gerçekleştirilen 30° dönme hareketi deneylerinin sonuçları paylaşılmıştır.

Öncelikle, Tablo 3.4’te verilen şekillendirilmemiş temel komut kullanılarak 0,030 kg uç kütleli esnek kol ile 30° dönme hareketi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, aynı dönme hareketi, Tablo 3.5’te verilen ZV, ZVD ve ZVDD şekillendirmeli komutlar kullanılarak tekrar edilmiştir.

Kullanılan tüm komutlar için esnek kolun uç noktasının, x ve y eksenlerine göre yer değişimleri, sırasıyla Şekil 3.7 ve Şekil 3.8’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Grafikler, kol ucunun başlangıç konumuna göre yer değişimini, hareketin başlangıç anından analiz süresinin sonuna kadar göstermektedir.

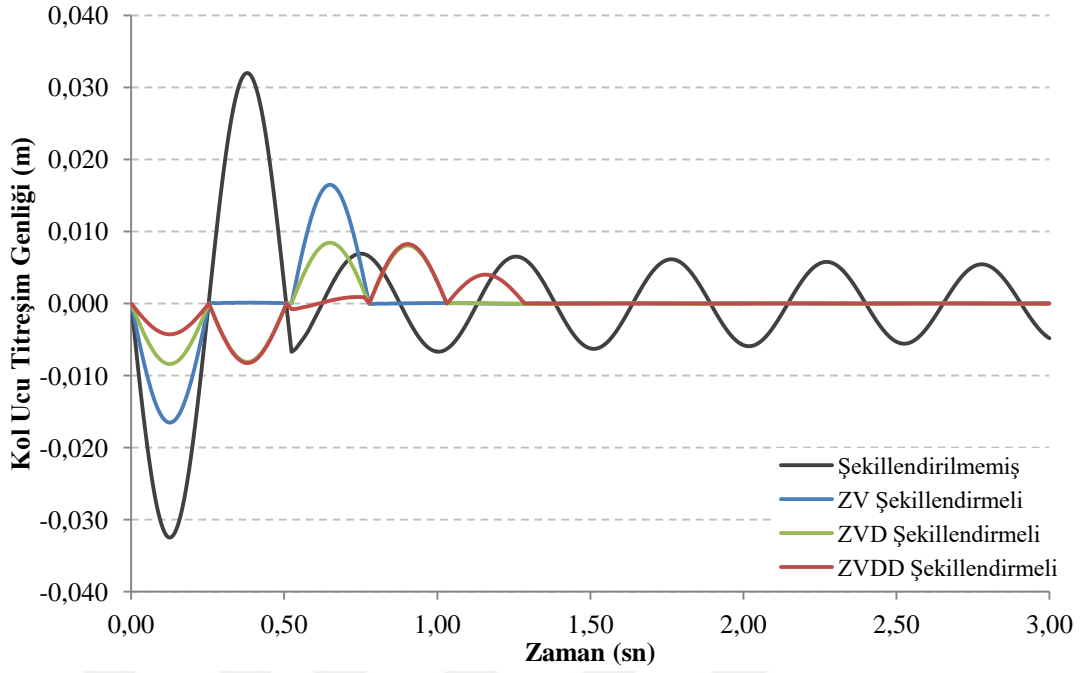


Şekil 3.7. Esnek kol ucunun x eksenine göre yer değişimi (0,030 kg kol ucu kütlesiyle 30° dönme hareketi için)



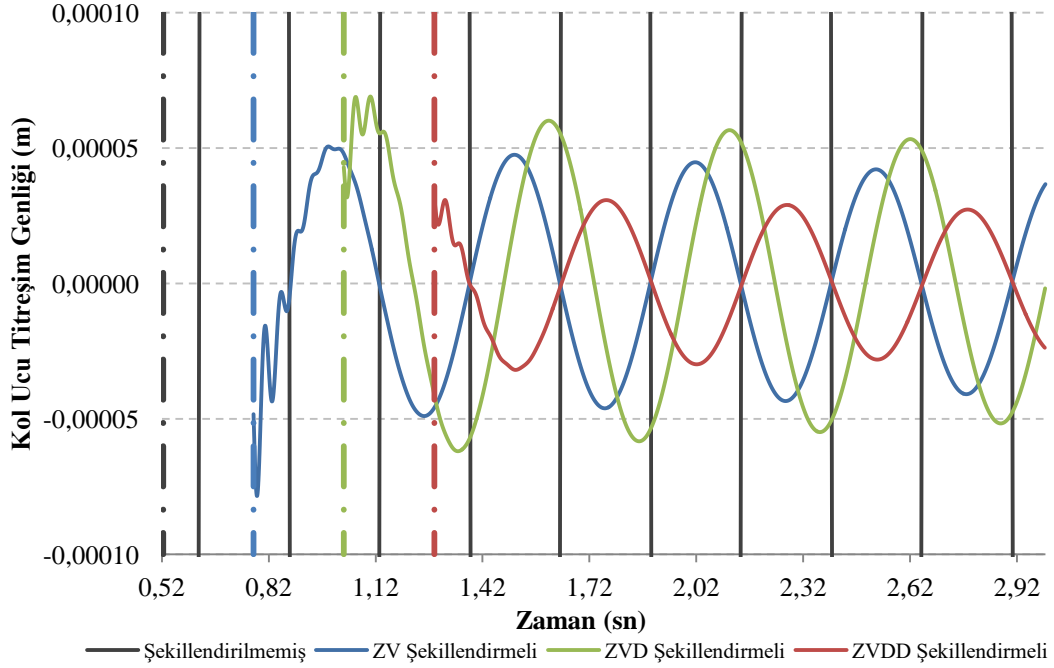
Şekil 3.8. Esnek kol ucunun y eksenine göre yer değişimi (0,030 kg kol ucu kütlesiyle 30° dönme hareketi için)

Esnek kol ucunda oluşan titreşim genlikleri zamana bağlı olarak Şekil 3.9'da verilmiştir. Bu grafik, hareketin başlangıç anından analiz süresinin sonuna kadar kol ucunun sapması (konum hatası) olarak da değerlendirilebilir.



Şekil 3.9. Esnek kol ucunda oluşan titreşimler (0,030 kg kol ucu kütlesiyle 30° dönme hareketi için)

Şekil 3.10'da ise dönme hareketi tamamlandıktan sonra kolun uç noktasında meydana gelen artık titreşimler görülmektedir. Bu grafik, Şekil 3.9'da verilen grafiğin sadece artık titreşimlerin gözlemlendiği zaman aralığını kapsar.



Şekil 3.10. Esnek kol ucunda hareket tamamlandıktan sonra oluşan artık titreşimler (0,030 kg kol ucu kütlesiyle 30° dönme hareketi için)

Komutla aynı renkteki eksen çizgisi, ilgili komut için dönme hareketinin tamamlanıp artık titreşimin başladığı anı gösterir. Grafik, şekillendirilmiş komutların artık titreşimlerinin görünmesi için daha büyük ölçekte çizilmiştir. Şekillendirilmemiş komut sonucunda oluşan artık titreşimlerin tepe noktaları, grafiğin alt ve üst sınırlarının dışında kaldıkları için görünmemektedirler.

Tablo 3.6’da 0,030 kg uç kütleli esnek kolun 30° dönme hareketi sonucunda oluşan artık titreşimlerin sayısal değerleri verilmiştir. Artık titreşim genliği, hareket sonrası oluşan en büyük genliği ifade eder. Şekillendirilmiş her komutun artık titreşim genliğinin şekillendirilmemiş temel komutun artık titreşim genliğine yüzde oranı da ikinci sütunda verilmiştir.

Tablo 3.6.Uç kütleli 0,030 kg olduğu durumda 30° dönme hareketi sonucu oluşan artık titreşim değerleri

Komut	Artık Titreşim Genliği (m)	Artık Titreşim Oranı
Şekillendirilmemiş	$6,90 \times 10^{-3}$	-
ZV	$5,05 \times 10^{-5}$	%0,73
ZVD	$6,90 \times 10^{-5}$	%1,00
ZVDD	$4,73 \times 10^{-5}$	%0,69

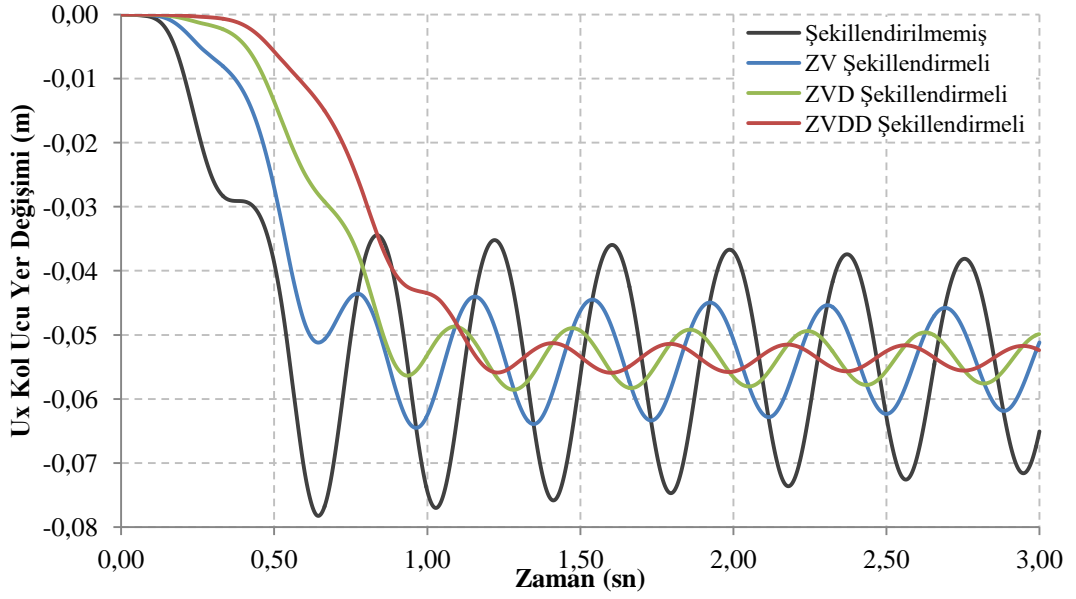
Tablodan görüldüğü gibi şekillendirilmiş komutlar kullanıldıktan sonra meydana gelen artık titreşimlerin genlikleri, şekillendirilmemiş komutla oluşan titreşimlerin genliklerinin %1’inden daha küçüktür. Buna göre modelleme hatası olmayan bir sistemde her üç giriş şekillendirmeli komut da artık titreşimleri engellemekte oldukça etkili sonuç vermişlerdir.

3.4.1.3. Uç kütleli 0,015 kg olduğu durumda 30° dönme hareketi sonuçları

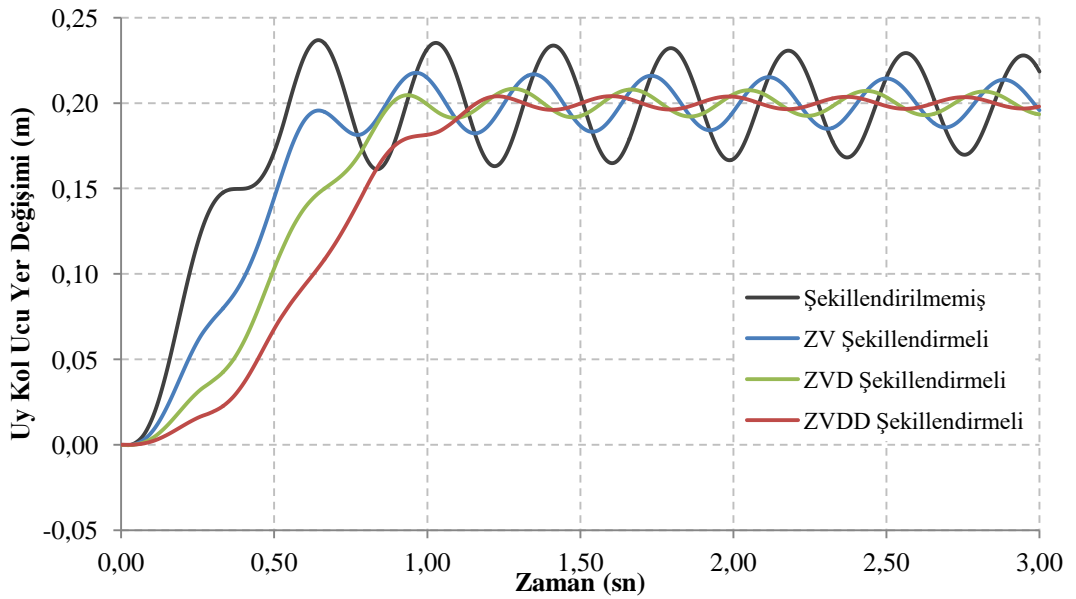
Bu bölümde, giriş şekillendiricilerin modelleme hatalarına karşı duyarlılıkları, kol ucu kütleli modellenenden daha az olduğu durumda 30° dönme hareketi için analiz edilmiştir. Bu amaçla 0,030 kg uç kütleli esnek kol için oluşturulan giriş şekillendiricili komutlar kullanılarak 0,015 kg kol ucu kütleli esnek kolun kontrol edilmesi sonucunda oluşan artık titreşimler incelenmiştir.

Deneysel olarak kullanılan 0,015 kg uç kütleli esnek kolun birinci mod frekansı 2,60 Hz ve sönüm oranı 0,0093 olarak belirlenmiştir.

Öncelikle, Tablo 3.4'te verilen şekillendirilmemiş temel komut kullanılarak 0,015 kg uç kütleli esnek kol ile 30° dönme hareketi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, 0,015 kg uç kütleli bu kolla aynı dönme hareketi, Tablo 3.5'te verilen ve 0,030 kg uç kütleli referans modele göre oluşturulmuş olan şekillendirilmiş komutlarla tekrar edilmiştir.

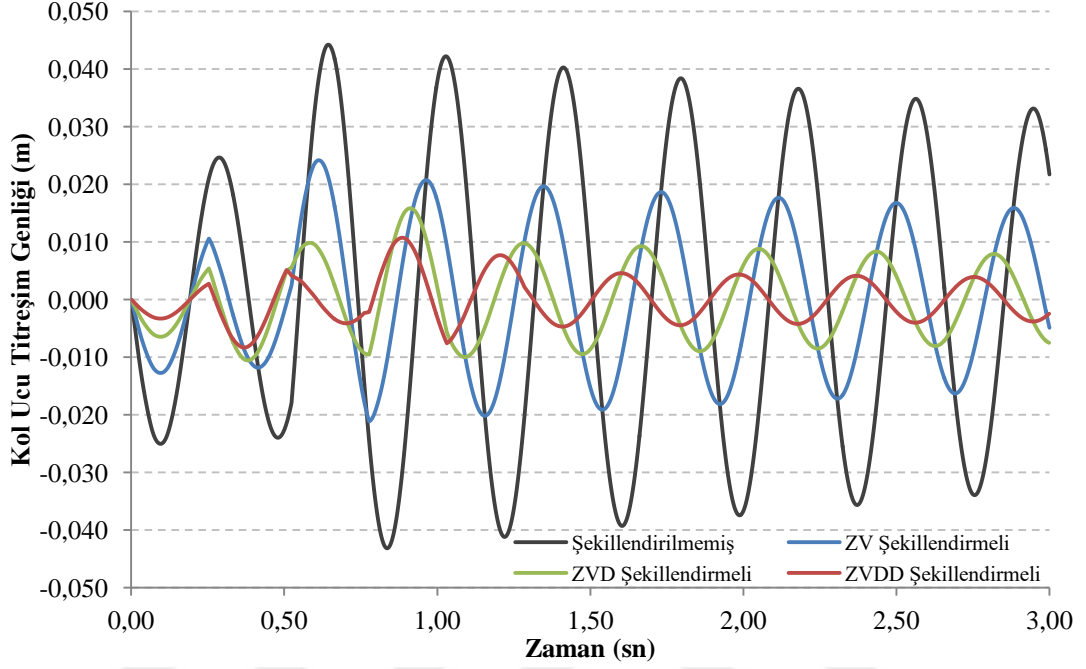


Şekil 3.11. Esnek kol ucunun x eksenine göre yer değişimi (0,015 kg kol ucu kütlesiyle 30° dönme hareketi için)

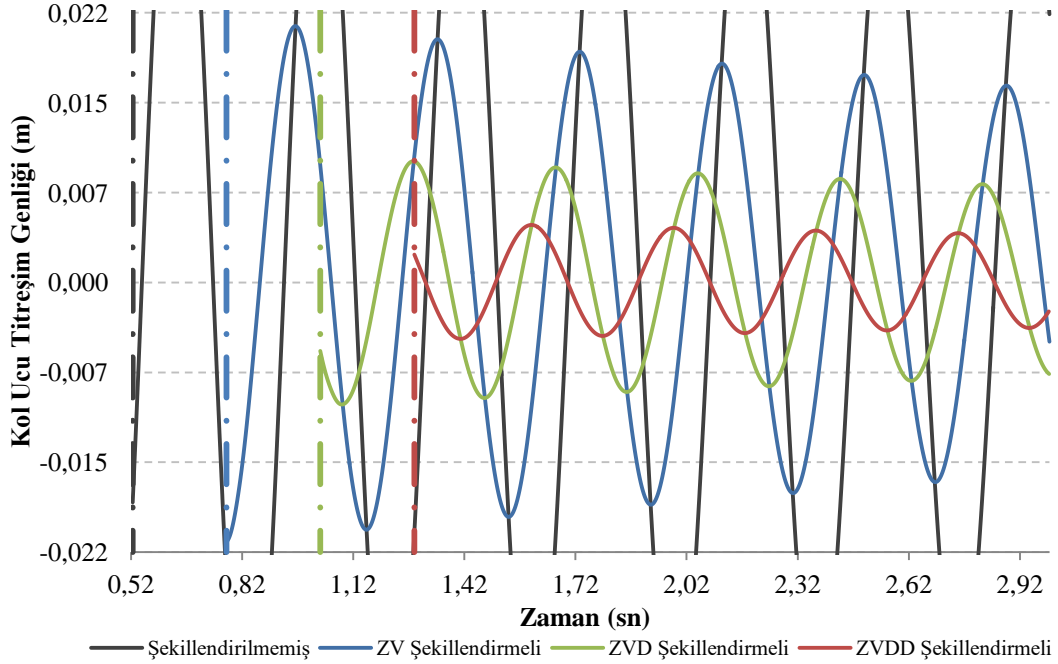


Şekil 3.12. Esnek kol ucunun y eksenine göre yer değişimi (0,015 kg kol ucu kütlesiyle 30° dönme hareketi için)

Esnek kol uç noktasının, x ve y eksenlerine göre yer değişimleri, tüm komutlar için karşılaştırmalı olarak sırasıyla Şekil 3.11 ve Şekil 3.12’de görülmektedir. Kol ucunda oluşan titreşim genlikleri ise Şekil 3.13’te verilmiştir.



Şekil 3.13. Esnek kol ucunda oluşan titreşimler (0,015 kg kol ucu kütlesiyle 30° dönme hareketi için)



Şekil 3.14. Esnek kol ucunda hareket tamamlandıktan sonra oluşan artık titreşimler (0,015 kg kol ucu kütlesiyle 30° dönme hareketi için)

Dönme hareketi tamamlandıktan sonra kolun uç noktasında meydana gelen artık titreşimler Şekil 3.14'te görülmektedir. Bu grafik, Şekil 3.13'te verilen grafiğin sadece artık titreşimlerin gözlemlendiği zaman aralığını kapsar.

Grafikteki komutla aynı renge sahip her eksen çizgisi, ilgili komut için dönme hareketinin tamamlanıp artık titreşimin başladığı anı gösterir. Şekillendirilmemiş komut sonucunda oluşan artık titreşimlerin tepe noktaları, grafiğin alt ve üst sınırlarının dışında kaldıkları için görünmemektedirler.

Tablo 3.7'de 0,015 kg uç kütleli esnek kolun 30° dönme hareketi sonucunda oluşan artık titreşimlerin sayısal değerleri verilmiştir. Artık titreşim genliği, hareket sonrası oluşan en büyük genliği ifade eder. Şekillendirilmiş her komutun artık titreşim genliğinin şekillendirilmemiş temel komutun artık titreşim genliğine yüzde oranı da ikinci sütunda verilmiştir.

Tablo 3.7. Uç kütleli 0,015 kg olduğu durumda 30° dönme hareketi sonucu oluşan artık titreşim değerleri

Komut	Artık Titreşim Genliği (m)	Artık Titreşim Oranı
Şekillendirilmemiş	$4,42 \times 10^{-2}$	-
ZV	$2,07 \times 10^{-2}$	%46,89
ZVD	$9,74 \times 10^{-3}$	%22,04
ZVDD	$4,57 \times 10^{-3}$	%10,34

Yapılan deneyler ile modellenenden %50 daha az uç kütlesi taşıyan bir esnek kolun aynı komutlarla kontrolü sonucunda oluşan artık titreşimler incelenmiştir. Tabloda verilen değerlerden görülebileceği gibi gürbüz olmayan ZV şekillendirici, model hatalarına karşı gürbüz olan ZVD ve ZVDD şekillendiricilerden daha duyarlıdır. Gürbüz şekillendiricilerin türev mertebeleri arttıkça modelleme hatalarına karşı duyarlılıklarının azaldığı da sonuçlardan anlaşılmaktadır.

3.4.1.4. Uç kütleli 0,045 kg olduğu durumda 30° dönme hareketi sonuçları

Bu bölümde, giriş şekillendiricilerin modelleme hatalarına karşı duyarlılıkları, kol ucu kütleli 0,045 kg olduğu durumda 30° dönme hareketi için analiz edilmiştir.

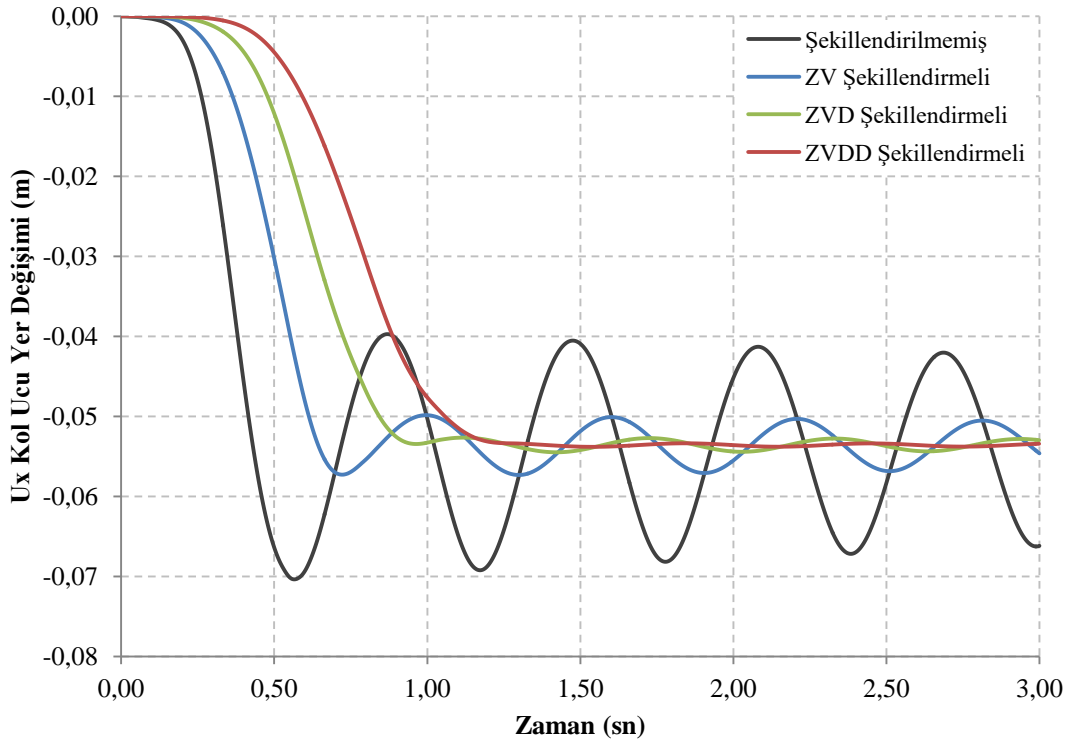
Bu amaçla 0,030 kg uç kütleli esnek kol için oluşturulan giriş şekillendiricili komutlar kullanılarak 0,045 kg kol ucu kütleli esnek kolun kontrol edilmesi sonucunda oluşan artık titreşimler incelenmiştir.

Deneyleerde kullanılan 0,045 kg uç kütleli esnek kolun birinci mod frekansı 1,65 Hz ve sönüm oranı 0,0119 olarak belirlenmiştir.

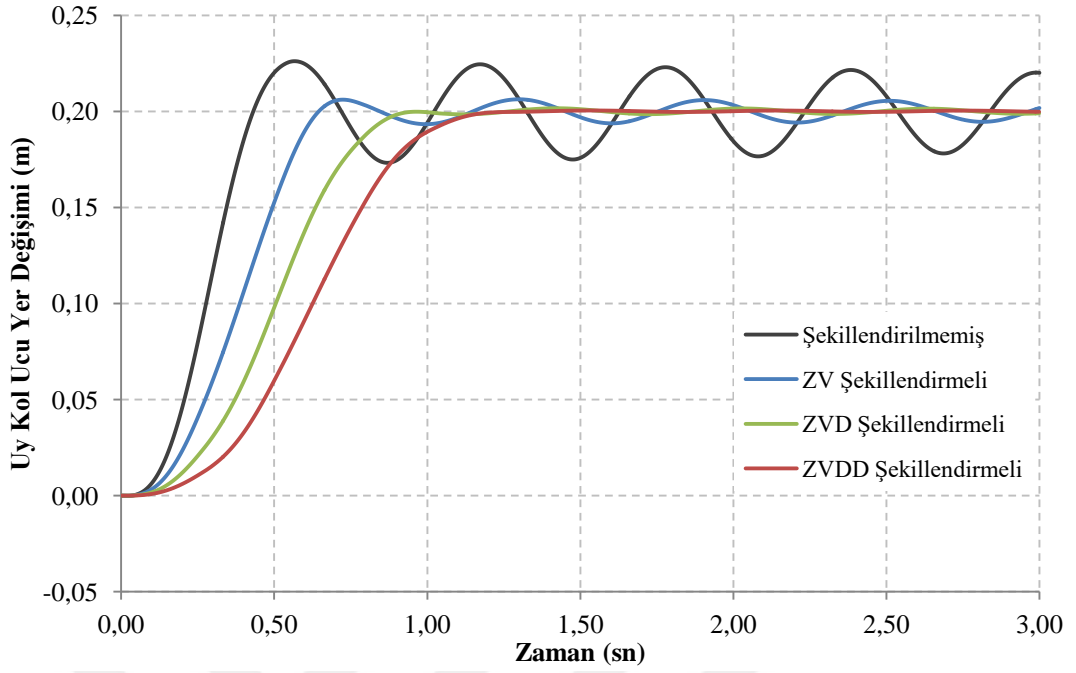
Öncelikle, Tablo 3.4'te verilen şekillendirilmemiş temel komut kullanılarak 0,045 kg uç kütleli esnek kol ile 30° dönme hareketi gerçekleştirilmiştir.

Daha sonra, yine 0,045 kg uç kütleli kolla aynı dönme hareketi, Tablo 3.5'te verilen ve 0,030 kg uç kütleli referans model için oluşturulmuş şekillendiricili komutlarla tekrar edilmiştir.

Kullanılan komutlar için esnek kolun uç noktasının x ve y eksenlerine göre yer değişimleri, sırasıyla Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'da karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Grafikler, kol ucunun başlangıç konumuna göre yer değişimini hareketin başlangıç anından analiz süresinin sonuna kadar göstermektedir.

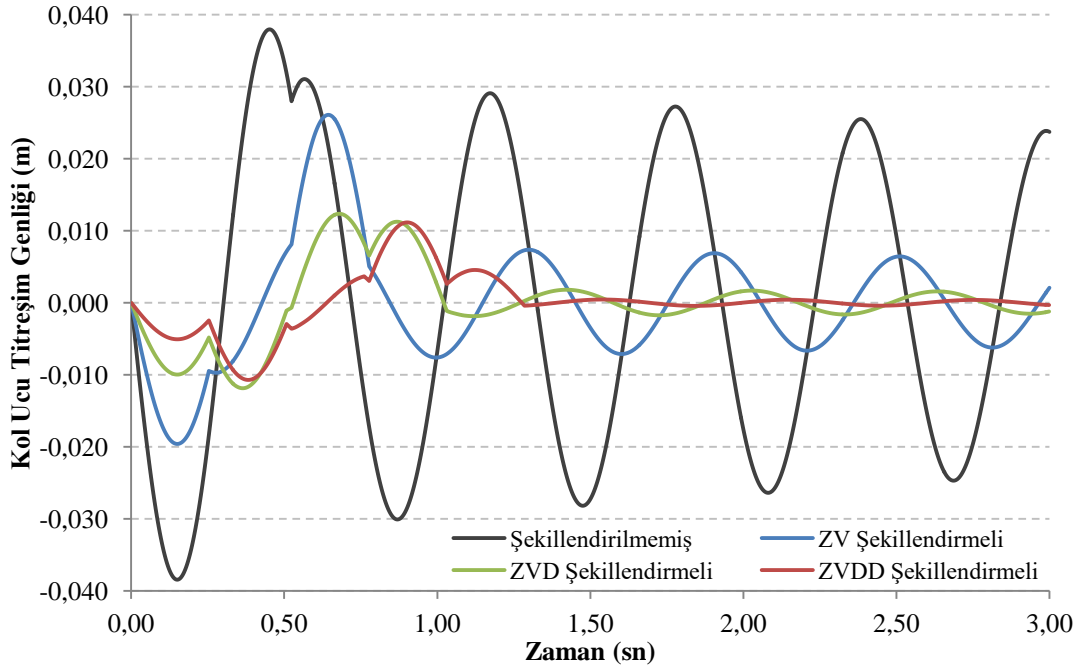


Şekil 3.15. Esnek kol ucunun x eksenine göre yer değişimi (0,045 kg kol ucu kütleliyle 30° dönme hareketi için)



Şekil 3.16. Esnek kol ucunun y eksenine göre yer değişimi (0,045 kg kol ucu kütlesiyle 30° dönme hareketi için)

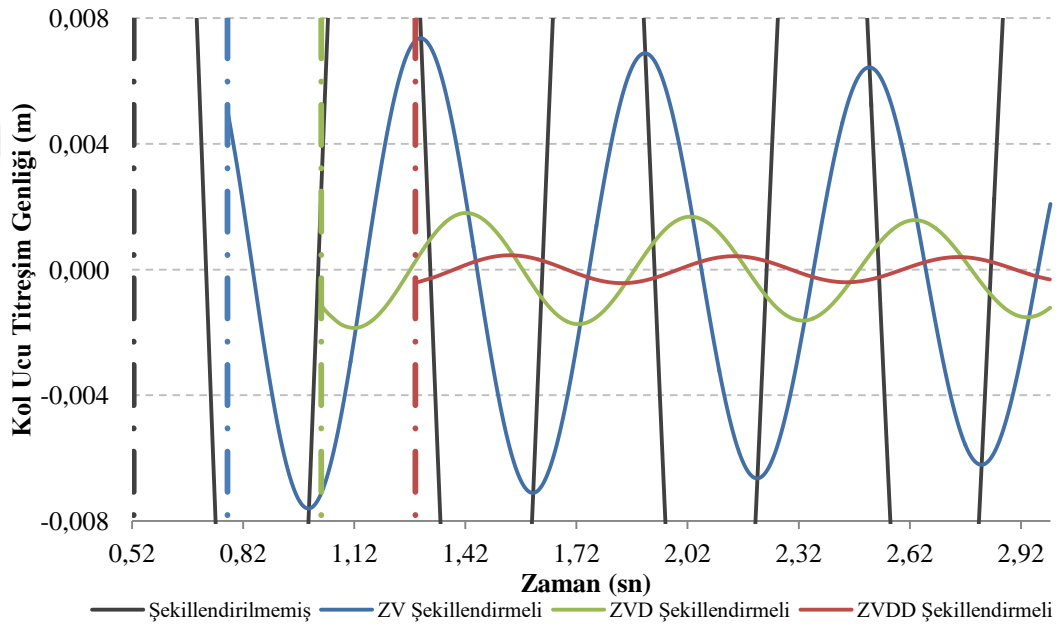
Esnek kol ucunda oluşan titreşimlerin genliklerini gösteren grafik Şekil 3.17'de verilmiştir. Bu grafik, hareketin başlangıç anından analiz süresinin sonuna kadar kol ucunun sapması (konum hatası) olarak da değerlendirilebilir.



Şekil 3.17. Esnek kol ucunda oluşan titreşimler (0,045 kg kol ucu kütlesiyle 30° dönme hareketi için)

Şekil 3.18’de ise dönme hareketi tamamlandıktan sonra kolun uç noktasında meydana gelen artık titreşimler görülmektedir.

Komutla aynı renkteki eksen çizgisi, ilgili komut için dönme hareketinin tamamlanıp artık titreşimin başladığı anı gösterir. Grafik, şekillendirilmiş komutların artık titreşimlerinin görünmesi için daha büyük ölçekte çizilmiştir. Şekillendirilmemiş komut sonucunda oluşan artık titreşimlerin tepe noktaları, grafiğin alt ve üst sınırlarının dışında kalmaktadır.



Şekil 3.18. Esnek kol ucunda hareket tamamlandıktan sonra oluşan artık titreşimler (0,045 kg kol ucu kütlesiyle 30° dönme hareketi için)

Tablo 3.8’de 0,045 kg uç kütleli esnek kolun 30° dönme hareketi sonucunda oluşan artık titreşim genliklerine ait değerler verilmiştir.

Tablo 3.8. Uç kütleli 0,045 kg olduğu durumda 30° dönme hareketi sonucu oluşan artık titreşim değerleri

Komut	Artık Titreşim Genliği (m)	Artık Titreşim Oranı
Şekillendirilmemiş	$3,11 \times 10^{-2}$	-
ZV	$7,36 \times 10^{-3}$	%23,70
ZVD	$1,80 \times 10^{-3}$	%5,80
ZVDD	$4,50 \times 10^{-4}$	%1,45

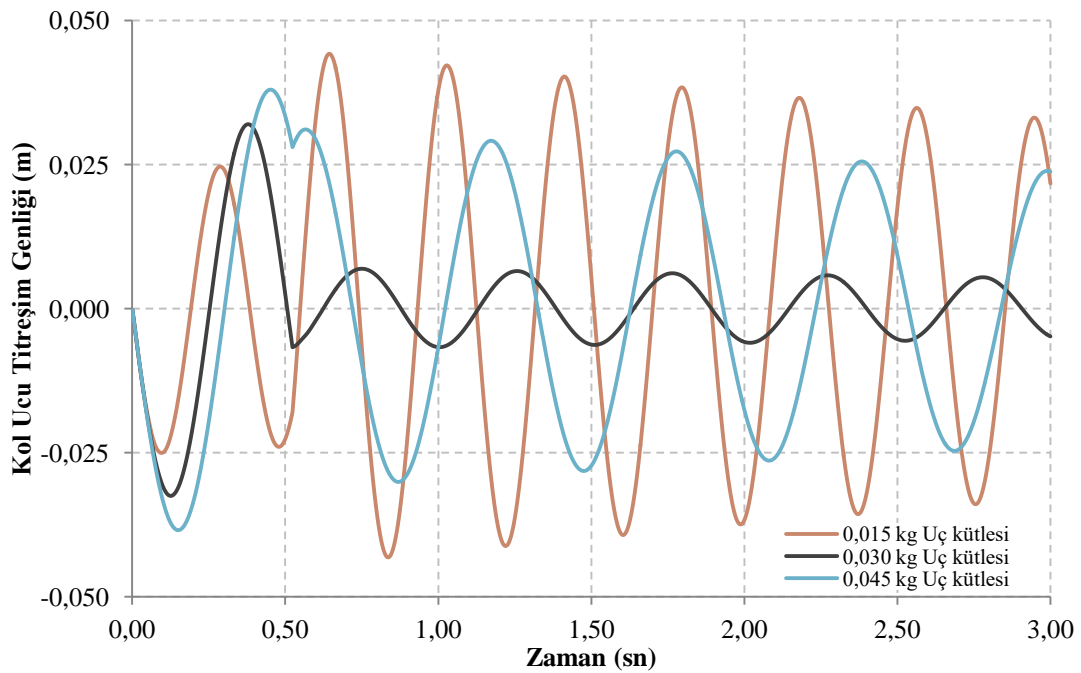
Verilen genlik değerleri, her komut için hareket sonrasında oluşan en büyük genlikli artık titreşime aittir.

Bu bölümdeki deneyler ile modellenenden %50 daha fazla uç kütlesi taşıyan esnek bir kolun aynı komutlarla kontrolü sonucunda oluşan artık titreşimler incelenmiştir. 0,015 kg uç kütleli deneylerde olduğu gibi ZV şekillendirmeli komutun, model hatalarına karşı ZVD ve ZVDD şekillendirmeli komutlara göre daha duyarlı olduğu görülmüştür. Diğer yandan şekillendirilmiş komutlar, uç kütesinin modellenenden fazla olduğu durumda, az olduğu duruma kıyasla titreşimleri azaltmakta daha iyi sonuçlar vermiştir.

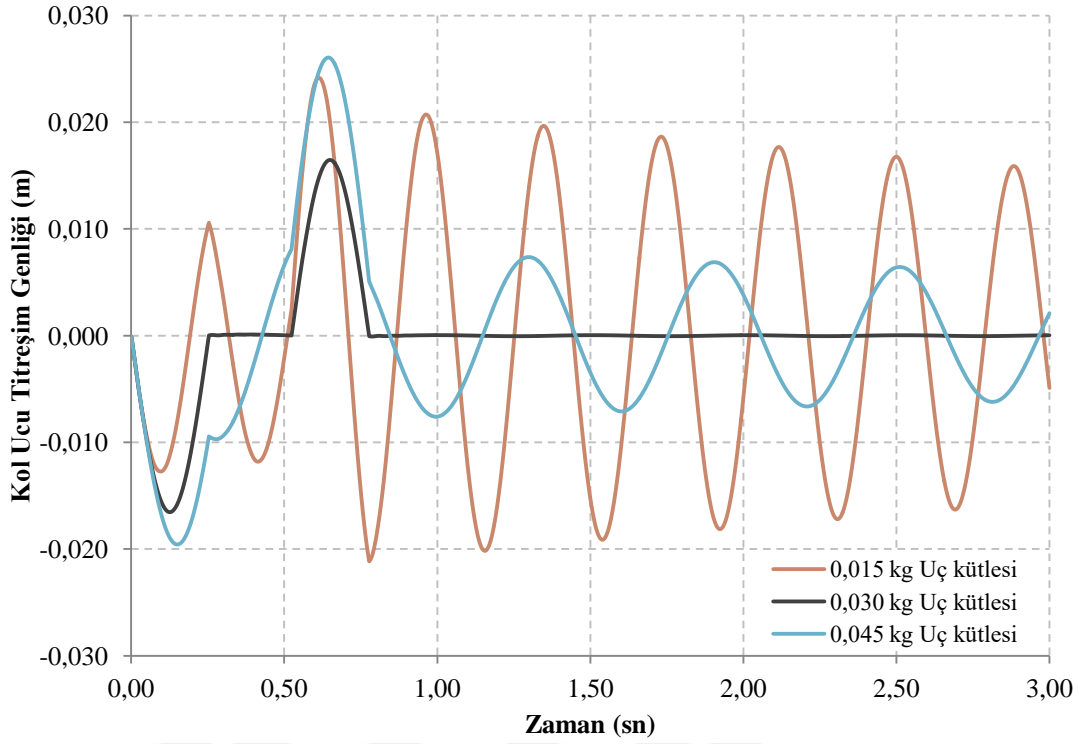
3.4.1.5. Farklı uç kütleler için 30° dönme komutundan dolayı oluşan titreşimlerin karşılaştırılması

Bu bölümde, 30° dönme komutları için uç kütlelerinin esnek kolda meydana gelen titreşimlere olan etkisi, karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

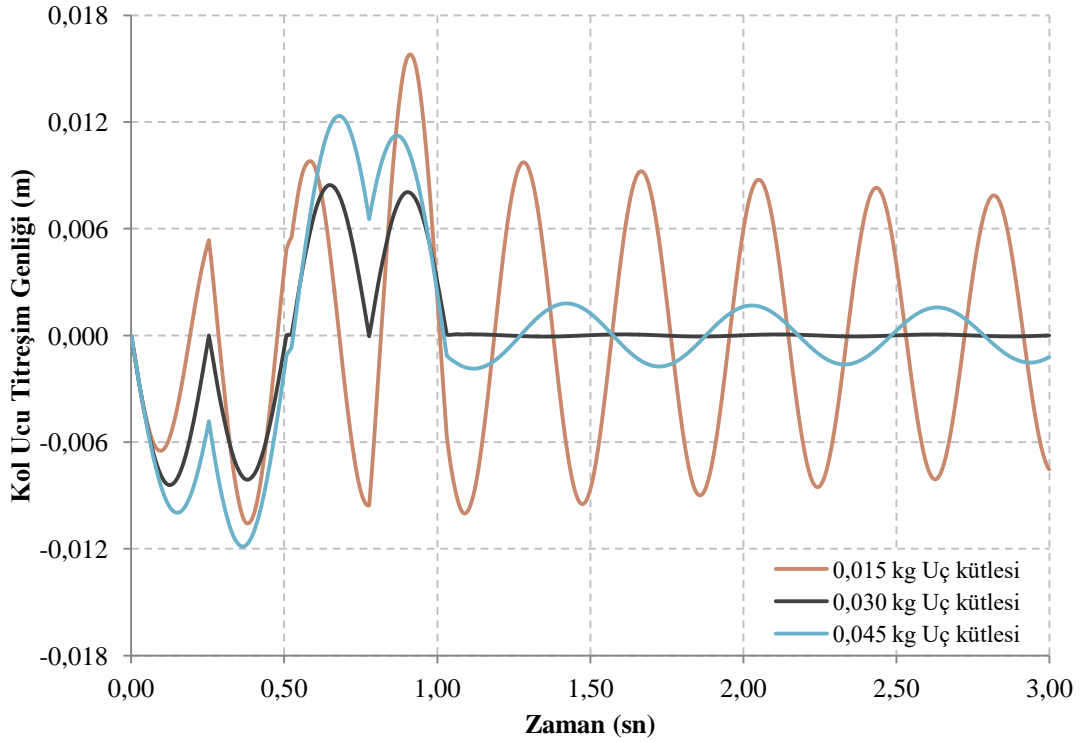
Sırasıyla şekillendirilmemiş, ZV, ZVD ve ZVDD şekillendirmeli 30° dönme komutları sonucunda farklı uç kütleli esnek kolların uçlarında oluşan titreşimlerin grafikleri, Şekil 3.19 - Şekil 3.22'de her komut için ayrı ayrı görülmektedir.



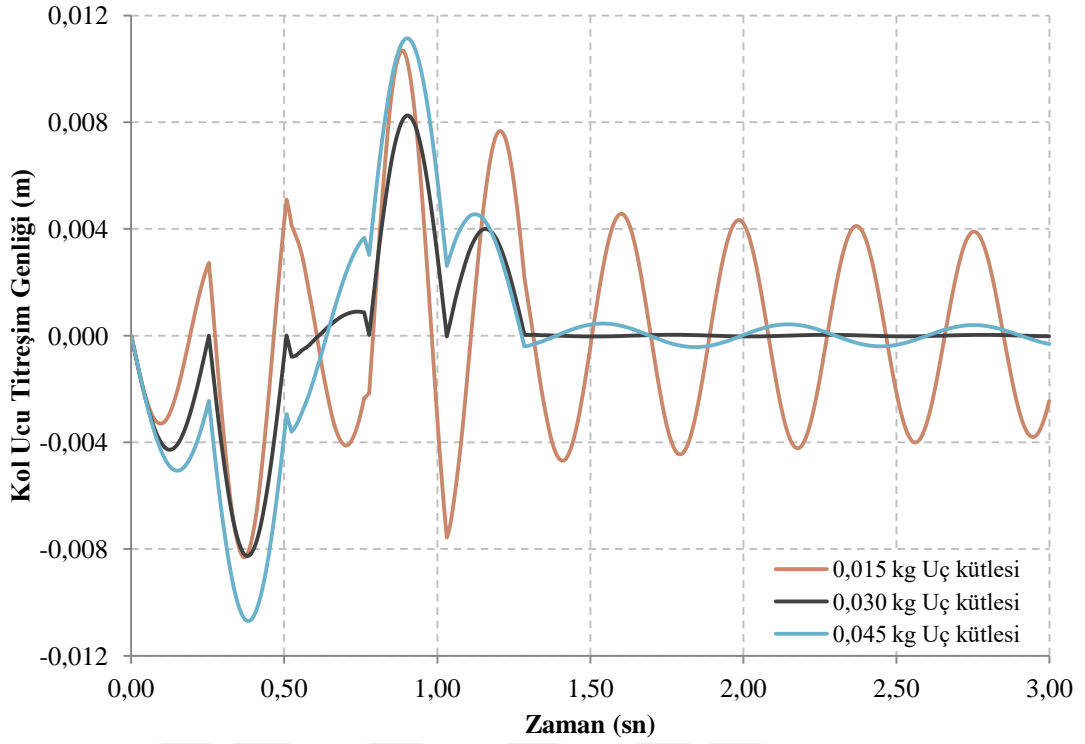
Şekil 3.19. Şekillendirilmemiş 30° dönme hareketi komutu sonucunda farklı uç kütleli esnek kolların uçlarında oluşan titreşimlerin karşılaştırılması



Şekil 3.20. ZV Şekillendirmeli 30° dönme hareketi komutu sonucunda farklı uç kütleli esnek kolların uçlarında oluşan titreşimlerin karşılaştırması



Şekil 3.21. ZVD Şekillendirmeli 30° dönme hareketi komutu sonucunda farklı uç kütleli esnek kolların uçlarında oluşan titreşimlerin karşılaştırması



Şekil 3.22. ZVDD Şekillendirmeli 30° dönme hareketi komutu sonucunda farklı uç kütleli esnek kolların uçlarında oluşan titreşimlerin karşılaştırması

Şekil 3.19’da verilen 30° dönme için şekillendirilmemiş temel komut grafiğinde hareket başlangıcından 0,5236 sn sonraki durma anına kadar geçen süre boyunca kol ucu sapmalarının, uç kütle ataletiyle orantılı olarak oluştuğu görülmektedir. Buna göre en küçük uç sapması 0,015 kg ve en büyük sapma ise 0,045 kg uç kütleli kolda meydana gelmiştir. 0,030 kg uç kütleli kolun uç sapması da bu ikisi arasında oluşmuştur. Hareket sonrasında oluşan artık titreşim genlikleri ise uç kütle ataletinin esnek kolun doğal frekans gibi sistem dinamiği üzerindeki etkileri ve durma anına bağlı olarak değişiklik göstermiştir.

Şekil 3.20 - Şekil 3.22’de 0,015 kg ve 0,045 kg uç kütleli esnek kolların uçlarında meydana gelen sapmalarda ve durduktan sonraki artık titreşim genliklerinde görülen farklılıkların sebepleri ise uç kütle ataletinin sistem dinamiği üstündeki etkileriyle beraber şekillendirilmiş komutların hareket süresince dönme hızında gerçekleştirdikleri değişimlerdir.

Uç kütle farklılıklarının olduğu durumlarda, ZVDD şekillendirmeli komutların artık titreşimlerin kontrolünde diğer komutlara kıyasla daha iyi sonuç verdikleri de grafiklerde açıkça görülmektedir.

3.4.2. Kolun 60° dönme hareketi sonucunda oluşan titreşimlerin incelenmesi

Bu bölümde, 60° dönme hareketi yapan ve farklı uç kütlelerine sahip esnek bağlı robot kollarında meydana gelen titreşimlerin giriş şekillendirme yöntemleriyle kontrolünü incelemek amacıyla yapılan deneyler sunulmuştur.

3.4.2.1. Kolun 60° dönme hareketi deneylerinde kullanılan komutlar

Seçilen esnek kol modelinin 1 rad/s hızla 60° dönmesini sağlamak için oluşturulan temel konum değiştirme komutu Tablo 3.9'da verilmiştir.

Tablo 3.9. Şekillendirilmemiş temel komut (60° dönme hareketi için)

Adım	Zaman (sn)	Komut	
		radyan	derece
1.	0,0	0,0	0,0
2.	1,0472	1,0472	60,00
3.	3,0	1,0472	60,00

Buna göre şekillendirilmemiş temel komut ile kontrol edilen esnek kol, 1,0472 sn'de 60° dönme hareketini tamamlayarak durma konumuna ulaşır ve üçüncü adımda belirtilen analiz süresi sonuna kadar da bu konumu korur.

Temel komutun Tablo 3.3'te verilen ZV, ZVD ve ZVDD şekillendiricilerle konvolüsyonu sonucunda 60° dönme hareketi için elde edilen şekillendirilmiş konum kontrol komutları, Tablo 3.10'da verilmiştir.

Tablo 3.10. Şekillendirilmiş konum kontrol komutları (60° dönme hareketi için)

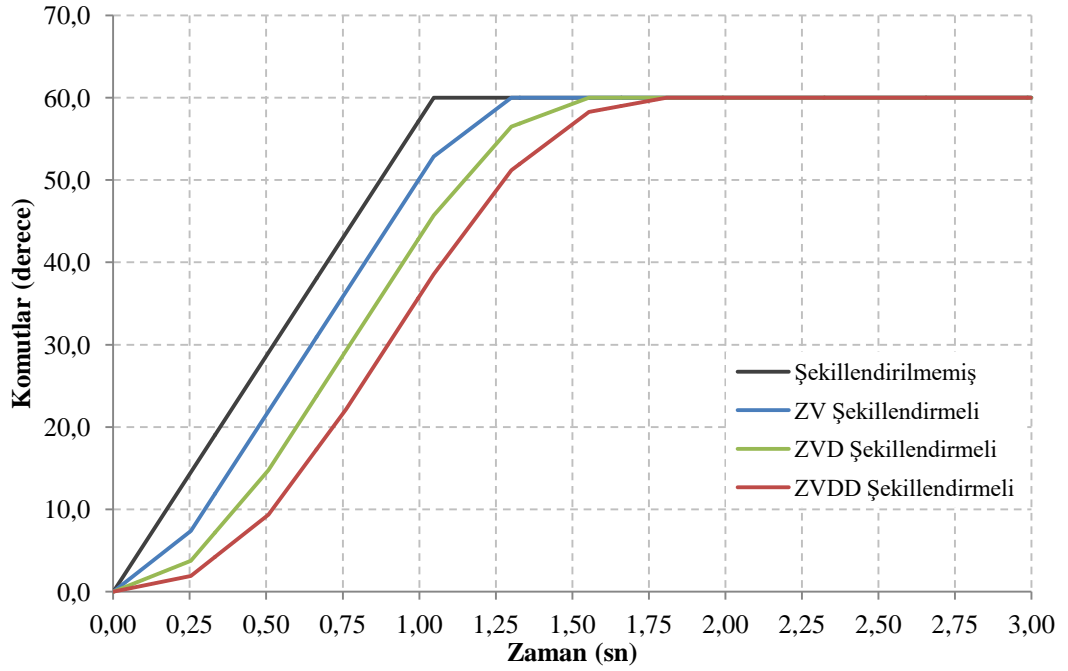
Adım	Zaman (sn)	Komut	
		radyan	derece
ZV Şekillendirmeli Komut			
1.	0,0	0,0	0,0
2.	0,2536	0,1289	7,39
3.	1,0472	0,9225	52,86

Tablo 3.10.(Devam) Şekillendirilmiş konum kontrol komutları (60° dönme hareketi için)

4.	1,3008	1,0472	60,00
5.	3,0	1,0472	60,00
ZVD Şekillendirmeli Komut			
1.	0,0	0,0	0,0
2.	0,2536	0,0655	3,76
3.	0,5072	0,2579	14,77
4.	1,0472	0,7978	45,71
5.	1,3008	0,9859	56,49
6.	1,5544	1,0472	60,00
7.	3,0	1,0472	60,00
ZVDD Şekillendirmeli Komut			
1.	0,0	0,0	0,0
2.	0,2536	0,0333	1,91
3.	0,5072	0,1633	9,36
4.	0,7608	0,3868	22,16
5.	1,0472	0,6731	38,57
6.	1,3008	0,8934	51,19
7.	1,5544	1,0171	58,27
8.	1,8080	1,0472	60,00
9.	3,0	1,0472	60,00

Şekil 3.23'te sırasıyla Tablo 3.9 ve Tablo 3.10'da 60° dönme hareketi için verilen şekillendirilmemiş temel komut ile şekillendirilmiş komutların karşılaştırmalı grafikleri görülmektedirler.

Tablo 3.9, Tablo 3.10 ve Şekil 3.23'ten görüldüğü gibi temel komutla kontrol edilen esnek kol, 60° dönme hareketini 1,0472 sn'de tamamlar. Aynı dönme hareketi, ZV, ZVD ve ZVDD şekillendirmeli komutlarla da sırasıyla 1,3008 sn, 1,5544 sn ve 1,8080 sn'de tamamlanır. Komutlar arasındaki 0,2536 sn'lik süre farkı 0,030 kg uç kütleli esnek kolun doğal salınım periyodunun yarısına eşittir.



Şekil 3.23. Kol eklemine verilen şekillendirilmemiş temel komut ve diğer şekillendirilmiş komutlar (60° dönme hareketi için)

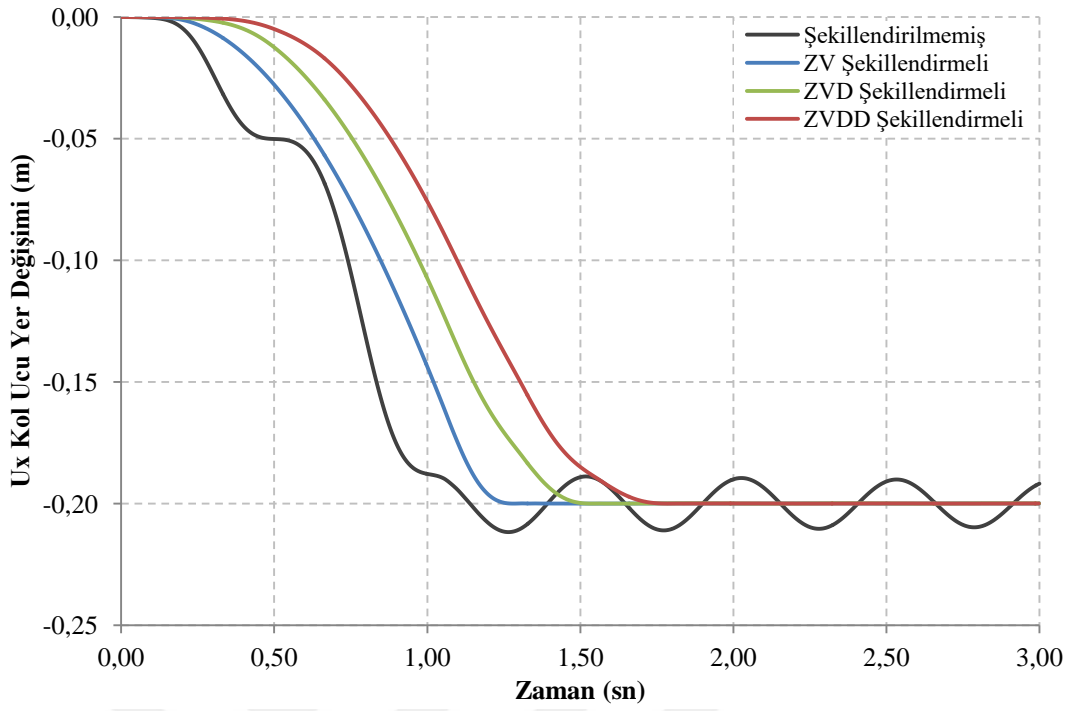
60° dönme hareketi için şekillendirilmiş komutların modelleme hatası olmayan şartlarda titreşim önleme özellikleri 0,030 kg uç kütleli esnek kolun kontrol edildiği deneylerle incelenmiştir. Komutların modelleme hatalarına karşı duyarlılıklarını incelemek için ise deneyler, 0,015 kg ve 0,045 kg uç kütleli kollarla gerçekleştirilmiştir.

3.4.2.2. Uç kütleinin 0,030 kg olduğu durumda 60° dönme hareketi sonuçları

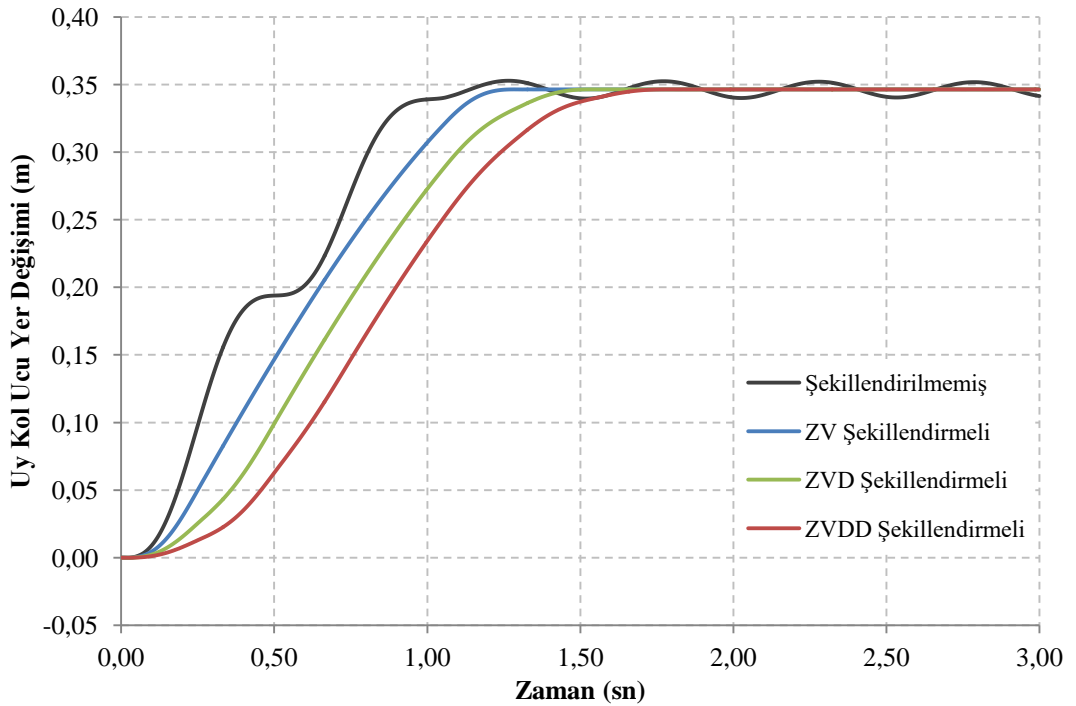
Bu bölümde, modelleme hatası bulunmayan şartlarda giriş şekillendirmeli komutlarla gerçekleştirilen 60° dönme hareketi deneylerinin sonuçları paylaşılmıştır.

0,030 kg uç kütleli esnek kol ile 60° dönme hareketi deneyleri, önce Tablo 3.9’da verilen şekillendirilmemiş temel komutla ve sonra da Tablo 3.10’da verilen şekillendirilmiş komutlarla gerçekleştirilmiştir.

Esnek kol uç noktasının x ve y eksenlerine göre yer değişimleri, sırasıyla Şekil 3.24 ve Şekil 3.25’de karşılaştırmalı olarak tüm komutlar için verilmiştir. Grafikler, kol ucunun başlangıç konumuna göre yer değişimini, hareketin başlangıç anından analiz süresinin sonuna kadar göstermektedir.

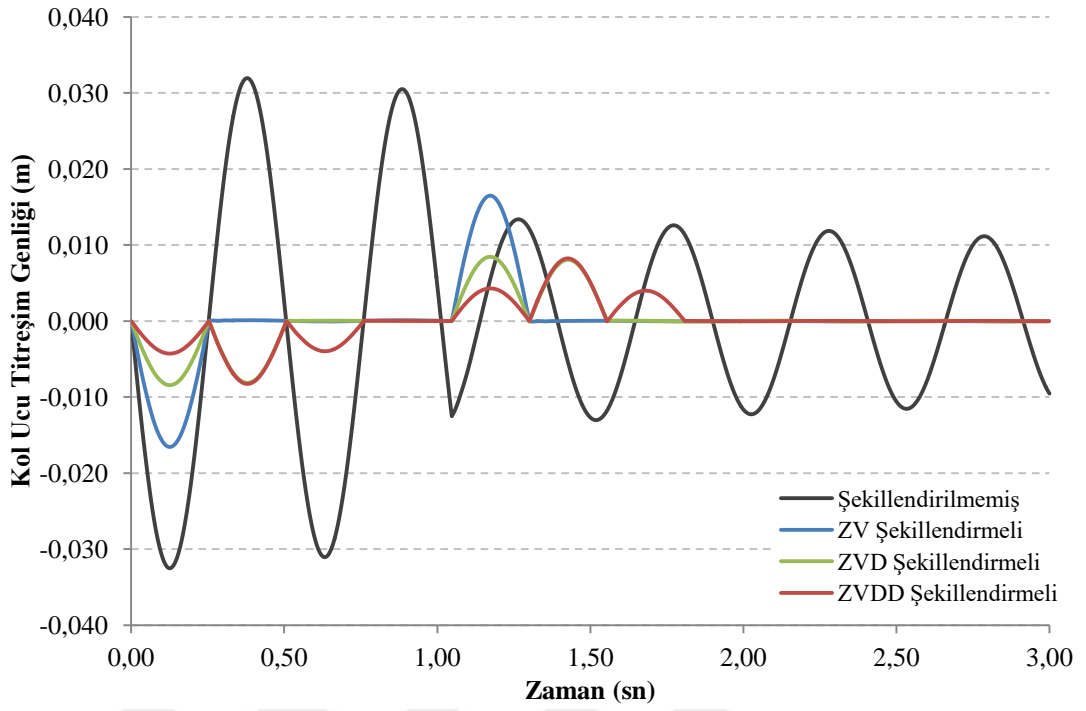


Şekil 3.24. Esnek kol ucunun x eksenine göre yer değişimi (0,030 kg kol ucu kütlesiyle 60° dönme hareketi için)



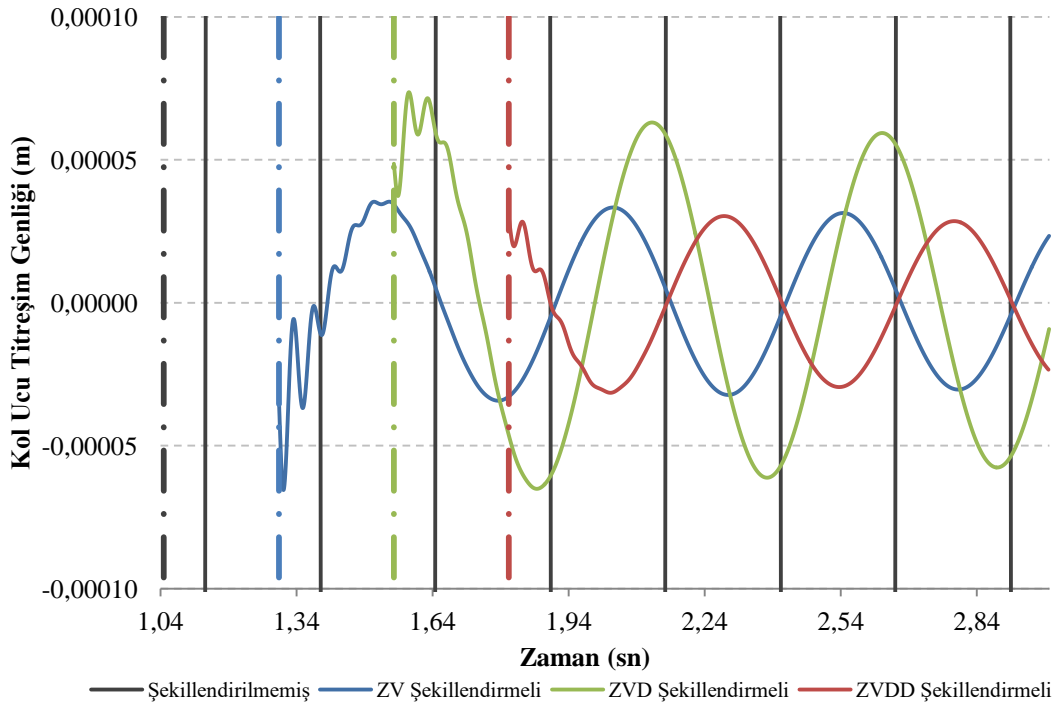
Şekil 3.25. Esnek kol ucunun y eksenine göre yer değişimi (0,030 kg kol ucu kütlesiyle 60° dönme hareketi için)

Kol ucunda oluşan titreşim genlikleri zamana bağlı olarak Şekil 3.26'da verilmiştir.



Şekil 3.26. Esnek kol ucunda oluşan titreşimler (0,030 kg kol ucu kütlesiyle 60° dönme hareketi için)

Dönme hareketi tamamlandıktan sonra kolun uç noktasında meydana gelen artık titreşimler Şekil 3.27’de görülmektedir.



Şekil 3.27. Esnek kol ucunda hareket tamamlandıktan sonra oluşan artık titreşimler (0,030 kg kol ucu kütlesiyle 60° dönme hareketi için)

Tablo 3.11’de 0,030 kg uç kütleli esnek kolun 60° dönme hareketi sonucunda oluşan artık titreşimlerin sayısal değerleri verilmiştir. Şekillendirilmiş her komutun artık titreşim genliğinin şekillendirilmemiş temel komutun artık titreşim genliğine yüzde oranı da ikinci sütunda verilmiştir.

Tablo 3.11. Uç kütleli 0,030 kg olduğu durumda 60° dönme hareketi sonucu oluşan artık titreşim değerleri

Komut	Artık Titreşim Genliği (m)	Artık Titreşim Oranı
Şekillendirilmemiş	$1,34 \times 10^{-2}$	-
ZV	$3,53 \times 10^{-5}$	%0,26
ZVD	$7,37 \times 10^{-5}$	%0,55
ZVDD	$4,65 \times 10^{-5}$	%0,35

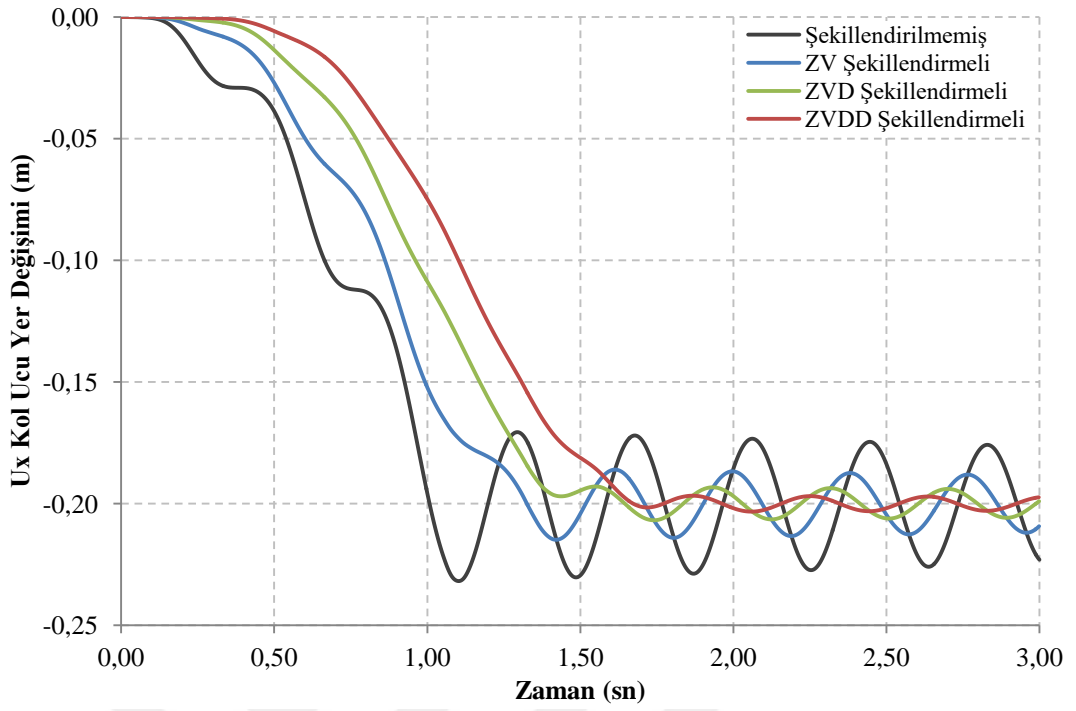
Tablodaki değerlerden görülebileceği gibi modellendikleri sistemin kontrolü için kullanılan şekillendirilmiş komutlarla meydana gelen artık titreşimlerin genlikleri, şekillendirilmemiş komutla oluşan titreşim genliklerinin %1’inden daha küçüktür. Alınan sonuçlar, beklendiği gibi daha önce Bölüm 3.4.1.2’de aynı esnek kolla yapılan 30° dönme deneyinden alınan sonuçlarla örtüşmektedir. Bu da aynı giriş şekillendiricilerin farklı komutların şekillendirilmesinde kolayca kullanılabilceğini göstermektedir.

3.4.2.3. Uç kütleli 0,015 kg olduğu durumda 60° dönme hareketi sonuçları

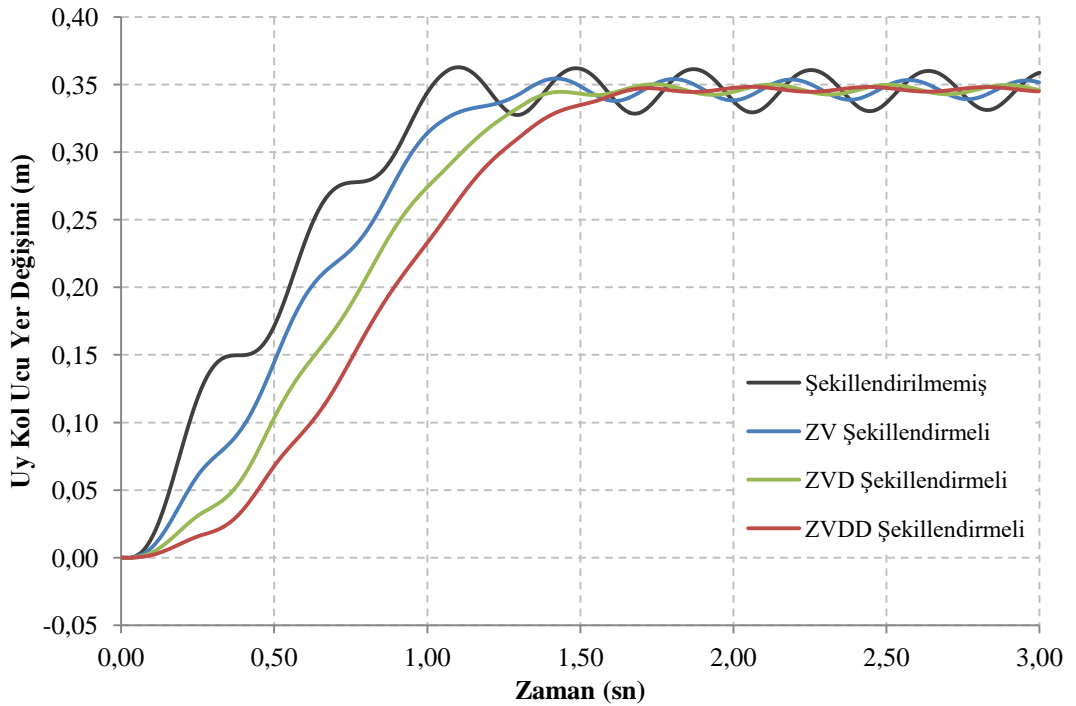
Bu bölümde, giriş şekillendiricilerin modelleme hatalarına karşı duyarlılıkları, kol ucu kütleli modellenenden daha az olduğu durumda 60° dönme hareketi için analiz edilmiştir.

Deneyler, Bölüm 3.4.1.3’te olduğu gibi birinci mod frekansı 2,60 Hz ve sönüm oranı 0,0093 olan 0,015 kg uç kütleli esnek kolla yapılmıştır. 60° dönme hareketi, önce Tablo 3.9’da verilen şekillendirilmemiş temel komut ve sonra da Tablo 3.10’da verilen şekillendirilmiş komutlarla gerçekleştirilmiştir.

Kullanılan komutlar için esnek kolun uç noktasının x ve y eksenlerine göre yer değişimleri, sırasıyla Şekil 3.28 ve Şekil 3.29’da karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

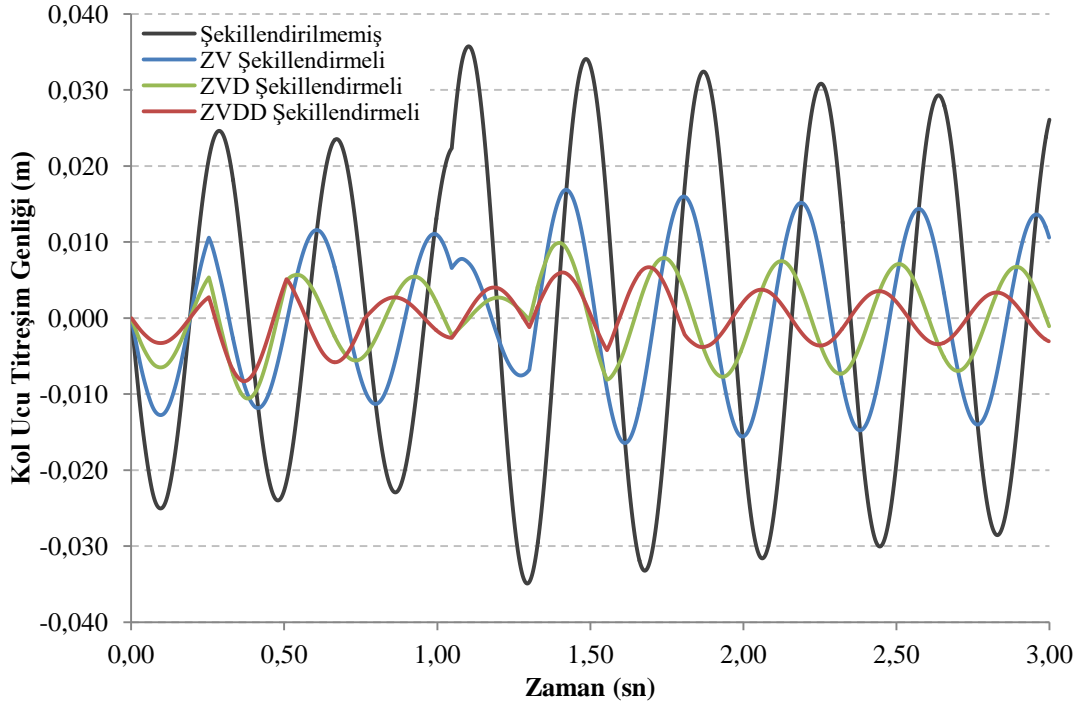


Şekil 3.28. Esnek kol ucunun x eksenine göre yer değişimi (0,015 kg kol ucu kütlesiyle 60° dönme hareketi için)



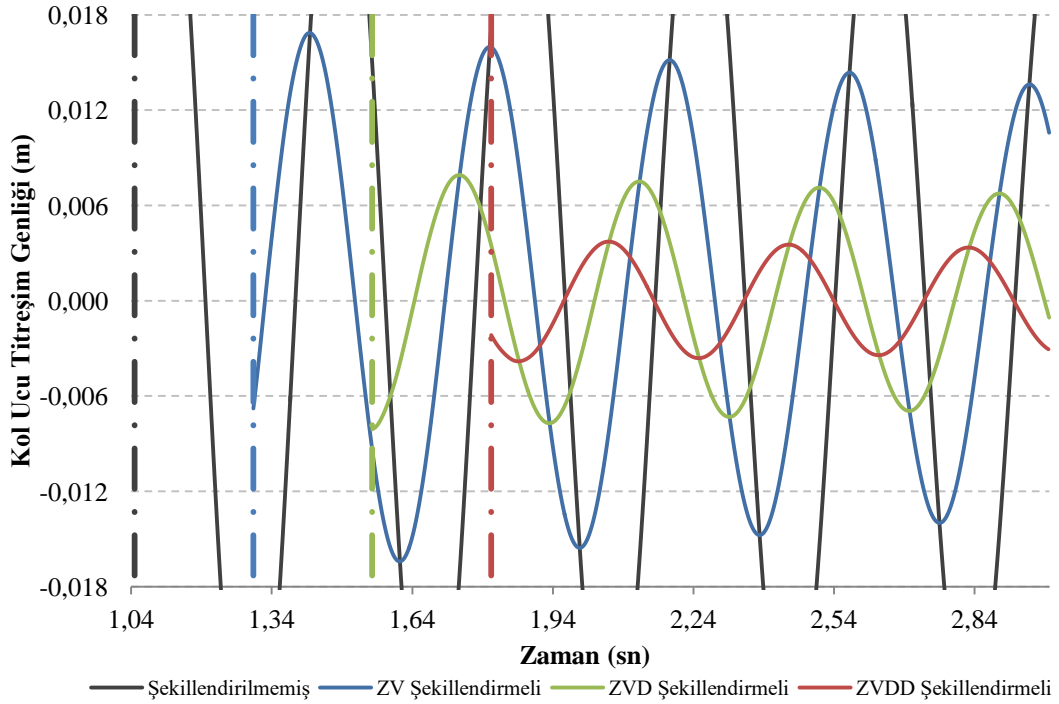
Şekil 3.29. Esnek kol ucunun y eksenine göre yer değişimi (0,015 kg kol ucu kütlesiyle 60° dönme hareketi için)

Kol ucunda oluşan titreşim genlikleri zamana bağlı olarak Şekil 3.30'da verilmiştir.



Şekil 3.30. Esnek kol ucunda oluşan titreşimler (0,015 kg kol ucu kütlesiyle 60° dönme hareketi için)

Şekil 3.31’de dönme hareketi tamamlandıktan sonra kolun uç noktasında meydana gelen artık titreşimler görülmektedir.



Şekil 3.31. Esnek kol ucunda hareket tamamlandıktan sonra oluşan artık titreşimler (0,015 kg kol ucu kütlesiyle 60° dönme hareketi için)

Şekillendirilmemiş komut sonucunda oluşan artık titreşimlerin tepe noktaları, grafiğin alt ve üst sınırlarının dışında kalmaktadır. Komut rengindeki eksen çizgileri, ilgili komut için dönme hareketinin tamamlanıp artık titreşimin başladığı anı gösterir.

Tablo 3.12’de 0,015 kg uç kütleli esnek kolun 60° dönme hareketi sonucunda oluşan artık titreşimlerin sayısal değerleri verilmiştir. İlk sütundaki değerler, ilgili komutla hareket sonrası oluşan en büyük artık titreşim genliğine aittir. İkinci sütunda ise şekillendirilmiş komutların artık titreşim genliklerinin şekillendirilmemiş temel komutun artık titreşim genliğine yüzde oranları görülmektedir.

Tablo 3.12. Uç kütleli 0,015 kg olduğu durumda 60° dönme hareketi sonucu oluşan artık titreşim değerleri

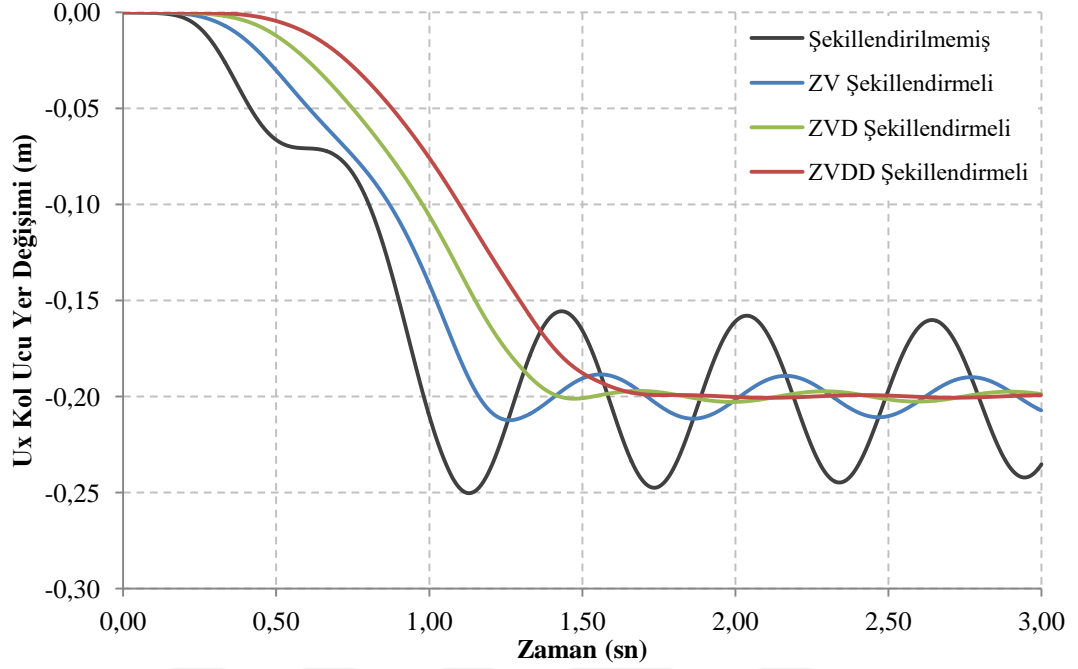
Komut	Artık Titreşim Genliği (m)	Artık Titreşim Oranı
Şekillendirilmemiş	$3,57 \times 10^{-2}$	-
ZV	$1,69 \times 10^{-2}$	%47,20
ZVD	$7,92 \times 10^{-3}$	%22,16
ZVDD	$3,72 \times 10^{-3}$	%10,41

Yapılan deneyler ile modellenenden %50 daha az uç kütlesi taşıyan bir esnek kolun aynı komutlarla kontrolü sonucunda oluşan artık titreşimler incelenmiştir. Şekillendirilmiş komutlar, modelleme hatası sebebiyle titreşimleri engellemekte modelleme hatası olmayan durumdaki kadar etkili olamamışlardır. Buna rağmen şekillendirici gürbüzlüğü arttıkça titreşim genlikleri azalmaktadır. Elde edilen artık titreşim oranları, aynı kolla 30° dönme komutları kullanılarak yapılan deneyler için Tablo 3.7’de verilen oranlarla örtüşmektedirler.

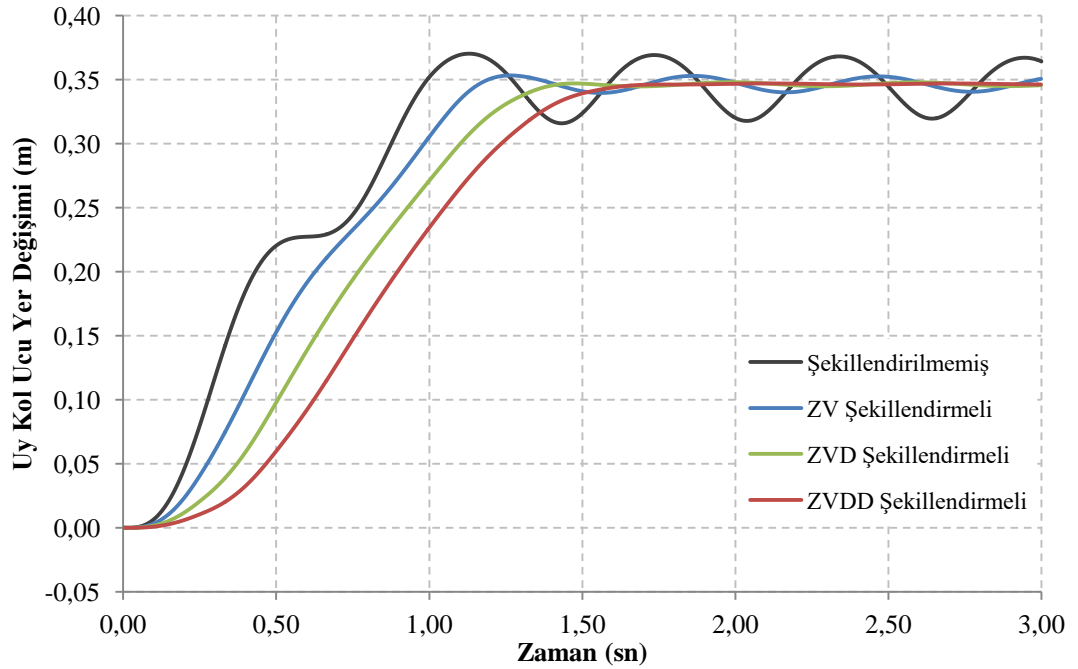
3.4.2.4. Uç kütleli 0,045 kg olduğu durumda 60° dönme hareketi sonuçları

Bu bölümde, giriş şekillendiricilerin modelleme hatalarına karşı duyarlılıkları, kol ucu kütleli modellenenden daha fazla olduğu durumda 60° dönme hareketi için analiz edilmiştir. Deneyler, Bölüm 3.4.1.4’te olduğu gibi birinci mod frekansı 1,65 Hz ve sönüm oranı 0,0119 olan 0,045 kg uç kütleli esnek kol ile yapılmıştır. 60° dönme hareketi, Tablo 3.9’da verilen şekillendirilmemiş temel komut ve Tablo 3.10’da verilen şekillendirilmiş komutlarla gerçekleştirilmiştir.

Kullanılan tüm komutlar için esnek kolun uç noktasının x ve y eksenlerine göre yer değişimleri, sırasıyla Şekil 3.32 ve Şekil 3.33'te karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

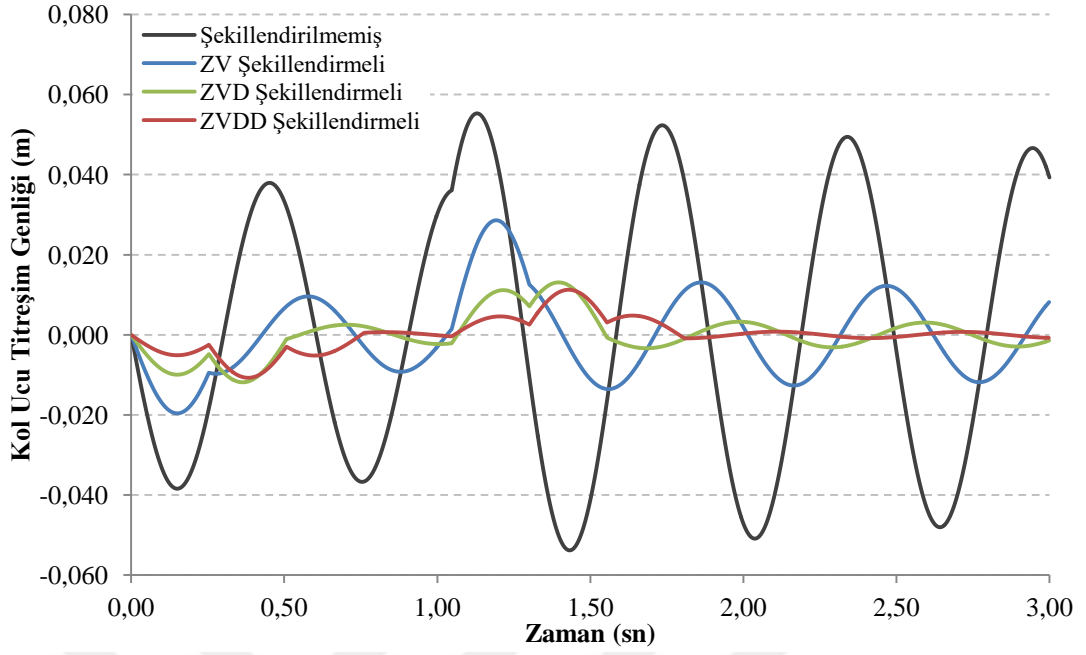


Şekil 3.32. Esnek kol ucunun x eksenine göre yer değişimi (0,045 kg kol ucu kütlesiyle 60° dönme hareketi için)



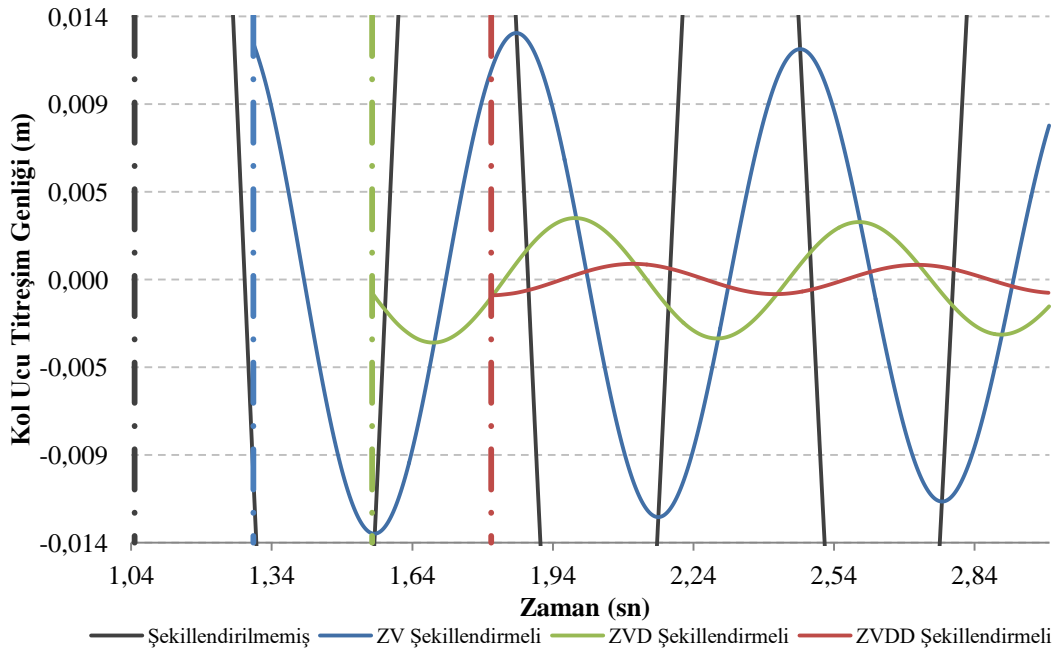
Şekil 3.33. Esnek kol ucunun y eksenine göre yer değişimi (0,045 kg kol ucu kütlesiyle 60° dönme hareketi için)

Kol ucunda oluşan titreşim genlikleri zamana bağlı olarak Şekil 3.34'te verilmiştir.



Şekil 3.34. Esnek kol ucunda oluşan titreşimler (0,045 kg kol ucu kütlesiyle 60° dönme hareketi için)

Şekil 3.35’de dönme hareketi tamamlandıktan sonra kolun uç noktasında meydana gelen artık titreşimler görülmektedir.



Şekil 3.35. Esnek kol ucunda hareket tamamlandıktan sonra oluşan artık titreşimler (0,045 kg kol ucu kütlesiyle 60° dönme hareketi için)

Grafikteki komutla aynı renge sahip her eksen çizgisi, ilgili komut için dönme hareketinin tamamlanıp artık titreşimin başladığı anı gösterir.

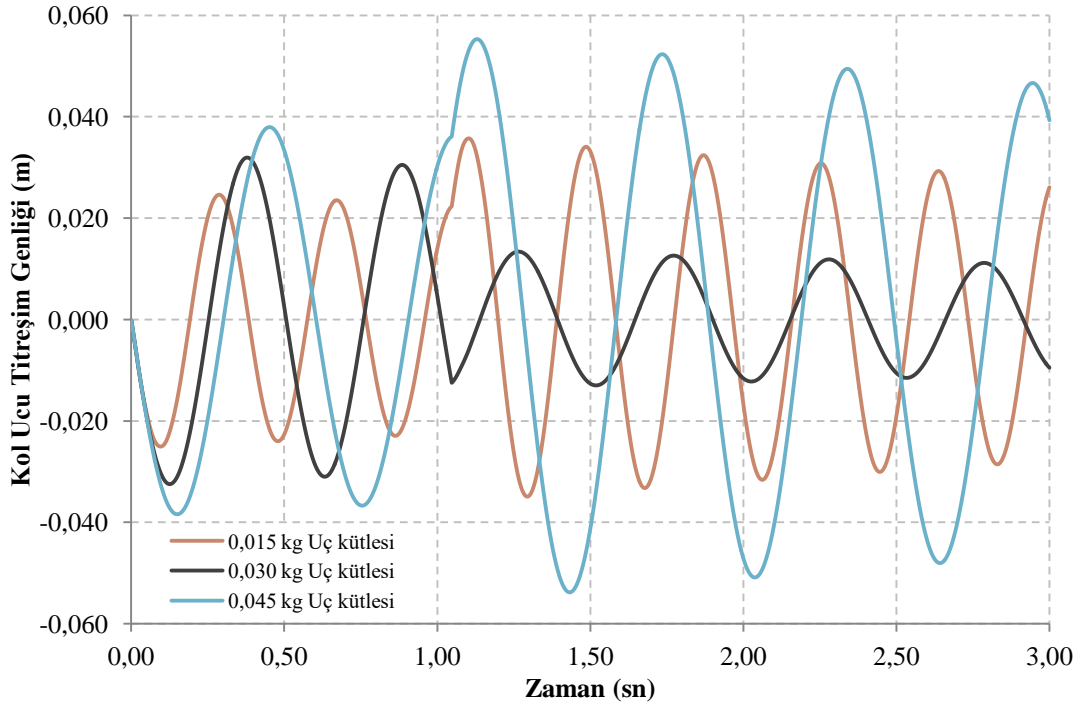
Tablo 3.13. Uç kütleinin 0,045 kg olduğu durumda 60° dönme hareketi sonucu oluşan artık titreşim değerleri

Komut	Artık Titreşim Genliği (m)	Artık Titreşim Oranı
Şekillendirilmemiş	$5,53 \times 10^{-2}$	-
ZV	$1,39 \times 10^{-2}$	%25,16
ZVD	$3,25 \times 10^{-3}$	%5,87
ZVDD	$8,20 \times 10^{-4}$	%1,48

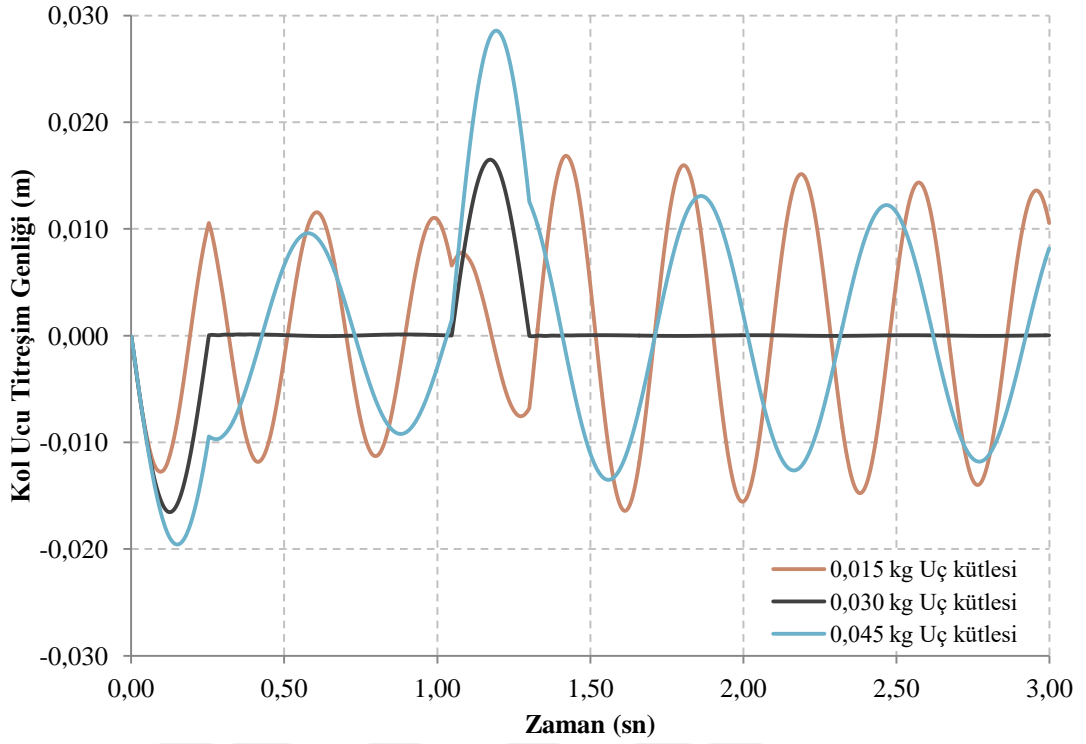
Tablo 3.13'te verilen 0,045 kg uç kütleli esnek kolun 60° dönme hareketi sonucunda oluşan artık titreşim oranları, aynı kolla 30° dönme komutları kullanılarak yapılan deneyler için Tablo 3.8'de verilen oranlarla örtüşmektedirler.

3.4.2.5. Farklı uç kütleler için 60° dönme komutundan dolayı oluşan titreşimlerin karşılaştırılması

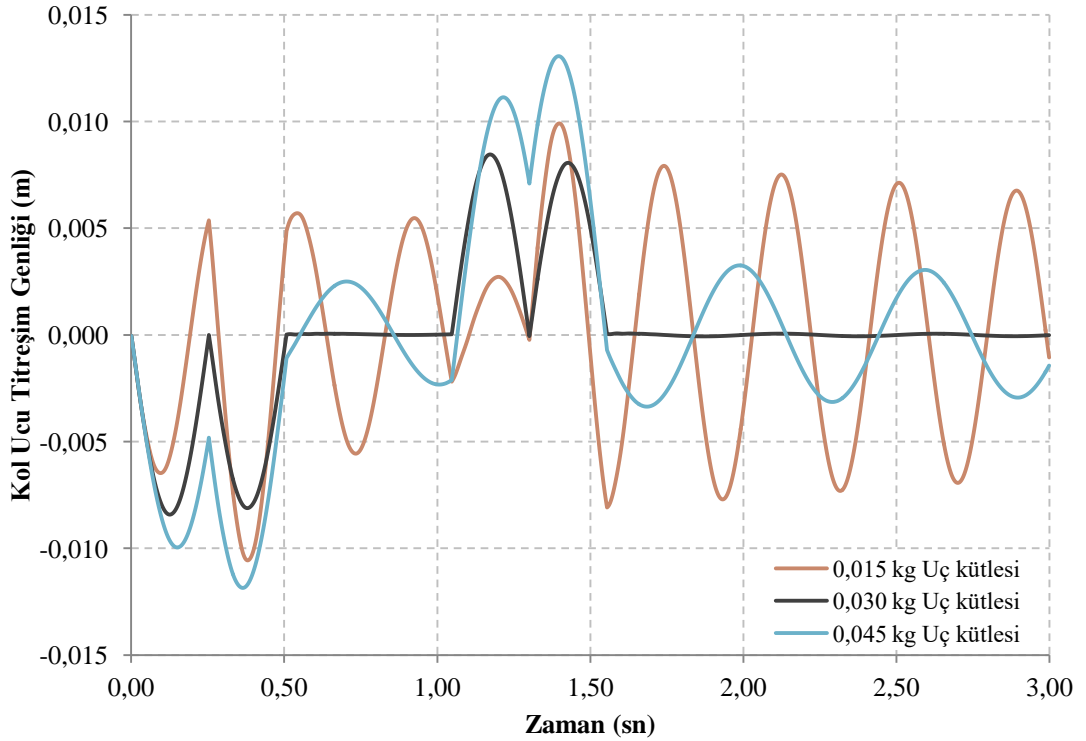
Şekillendirilmemiş, ZV, ZVD ve ZVDD şekillendirmeli 60° dönme komutları için uç kütleinin esnek kolda meydana gelen titreşimlere etkileri, Şekil 3.36 - Şekil 3.39'da karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



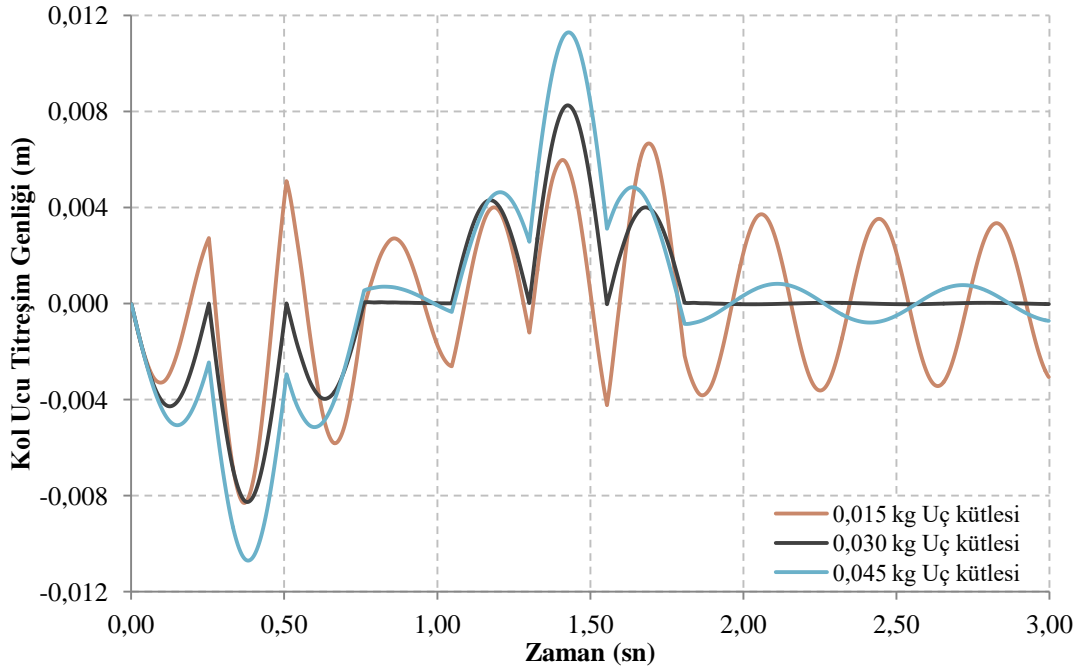
Şekil 3.36. Şekillendirilmemiş 60° dönme hareketi komutu sonucunda farklı uç kütleli esnek kolların uçlarında oluşan titreşimlerin karşılaştırılması



Şekil 3.37. ZV Şekillendirmeli 60° dönme hareketi komutu sonucunda farklı uç kütleli esnek kolların uçlarında oluşan titreşimlerin karşılaştırması



Şekil 3.38. ZVD Şekillendirmeli 60° dönme hareketi komutu sonucunda farklı uç kütleli esnek kolların uçlarında oluşan titreşimlerin karşılaştırması



Şekil 3.39. ZVDD Şekillendirmeli 60° dönme hareketi komutu sonucunda farklı uç kütleli esnek kolların uçlarında oluşan titreşimlerin karşılaştırması

Şekil 3.36'da görüldüğü gibi şekillendirilmemiş temel komutla 60° dönme hareketinin devam ettiği 1,0472 sn süresince kol ucu sapmaları, uç kütle ataletiyle orantılı olarak gerçekleşmekte, hareket tamamlandıktan sonra ise değişiklik göstermektedirler.

Bu durum ve Şekil 3.37 - Şekil 3.39'daki şekillendirmeli komutların grafiklerinde görülen uç sapması ve artık titreşimlerde görülen değişimler için Bölüm 3.4.1.5'te 30° dönme komutlarının sonuçlarıyla ilgili yapılan değerlendirmeler geçerliliklerini korumaktadırlar.

3.4.3. Kolun 90° dönme hareketi sonucunda oluşan titreşimlerin incelenmesi

Bu bölümde, 90° dönme hareketi yapan ve farklı uç kütlelerine sahip esnek bağlı robot kollarında meydana gelen titreşimlerin giriş şekillendirme yöntemleriyle kontrolünün incelendiği deneyler sunulmuştur.

3.4.3.1. Kolun 90° dönme hareketi deneylerinde kullanılan komutlar

Seçilen esnek kol modelinin 1 rad/s hızla 90° dönmesini sağlayan temel konum değiştirme komutu Tablo 3.14'te verilmiştir.

Tablo 3.14. Şekillendirilmemiş temel komut (90° dönme hareketi için)

Adım	Zaman (sn)	Komut	
		radyan	derece
1.	0,0	0,0	0,0
2.	1,5708	1,5708	90,00
3.	4,0	1,5708	90,00

90° dönme hareketi, önceki 30° ve 60° dönme hareketlerinden daha uzun sürede tamamlandığından bu bölümdeki deneylerin analiz süreleri 4 sn olarak belirlenmiştir. Şekillendirilmemiş temel komut ile kontrol edilen esnek kol, tablodan görüldüğü gibi 1,5708 sn'de 90° dönme hareketini tamamlayarak durma konumuna ulaşır. Kol, üçüncü adımda belirtilen analiz süresi sonuna kadar bu konumu korur.

Tablo 3.15'te 90° dönme hareketi için şekillendirilmiş konum kontrol komutları görülmektedir. Bu komutlar, temel komutun Tablo 3.3'te verilen giriş şekillendiricilerle konvolüsyonu neticesinde elde edilmiştir.

Tablo 3.15. Şekillendirilmiş konum kontrol komutları (90° dönme hareketi için)

Adım	Zaman (sn)	Komut	
		radyan	derece
ZV Şekillendirmeli Komut			
1.	0,0	0,0	0,0
2.	0,2536	0,1289	7,39
3.	1,5708	1,4461	82,86
4.	1,8244	1,5708	90,00
5.	4,0	1,5708	90,00
ZVD Şekillendirmeli Komut			
1.	0,0	0,0	0,0
2.	0,2536	0,0655	3,76
3.	0,5072	0,2579	14,77
4.	1,5708	1,3214	75,71

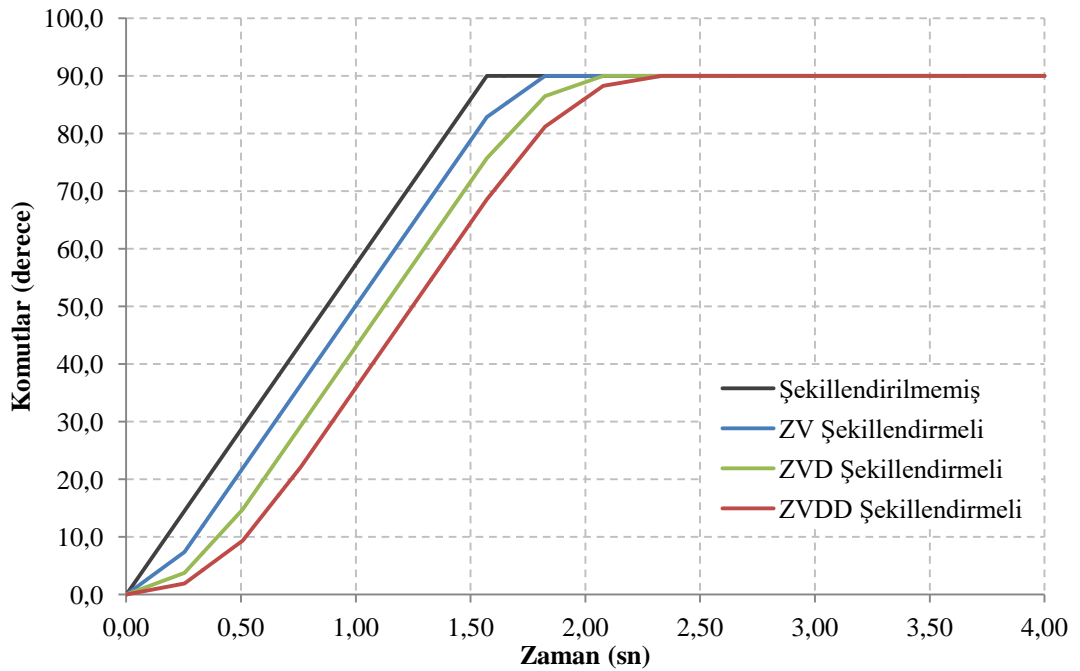
Tablo 3.15.(Devam) Şekillendirilmiş konum kontrol komutları (90° dönme hareketi için)

5.	1,8244	1,5095	86,49
6.	2,0780	1,5708	90,00
7.	4,0	1,5708	90,00

ZVDD Şekillendirmeli Komut

1.	0,0	0,0	0,0
2.	0,2536	0,0333	1,91
3.	0,5072	0,1633	9,36
4.	0,7608	0,3868	22,16
5.	1,5708	1,1967	68,57
6.	1,8244	1,4170	81,19
7.	2,0780	1,5407	88,27
8.	2,3316	1,5708	90,00
9.	4,0	1,5708	90,00

Şekil 3.40'ta 90° dönme hareketi için Tablo 3.14 ve Tablo 3.15'te verilen tüm komutların karşılaştırmalı grafikleri görülmektedir.



Şekil 3.40. Kol eklemine verilen şekillendirilmemiş temel komut ve diğer şekillendirilmiş komutlar (90° dönme hareketi için)

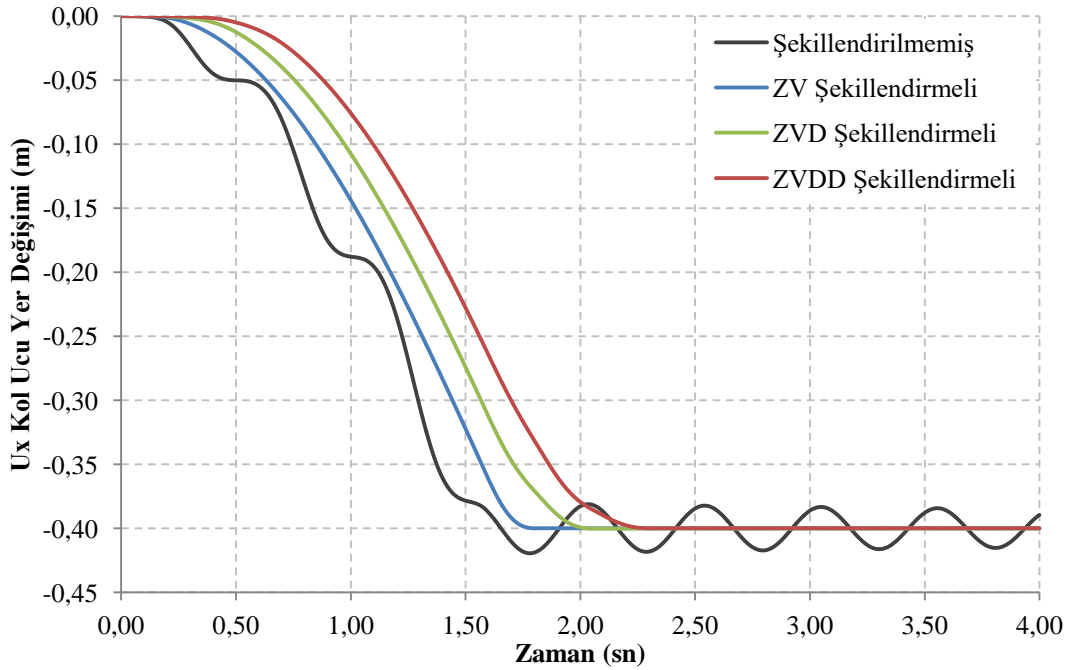
Önceki 30° ve 60° deneylerinde olduğu gibi 90° dönme hareketi için şekillendirilmiş komutların modelleme hatası olmayan şartlarda titreşim önleme özellikleri, 0,030 kg uç kütleli esnek kolun kontrol edildiği deneylerle incelenmiştir. Komutların gürbüzlüklerinin incelendiği deneyler ise 0,015 kg ve 0,045 kg uç kütleli esnek kollarla gerçekleştirilmiştir.

3.4.3.2. Uç kütlelerinin 0,030 kg olduğu durumda 90° dönme hareketi sonuçları

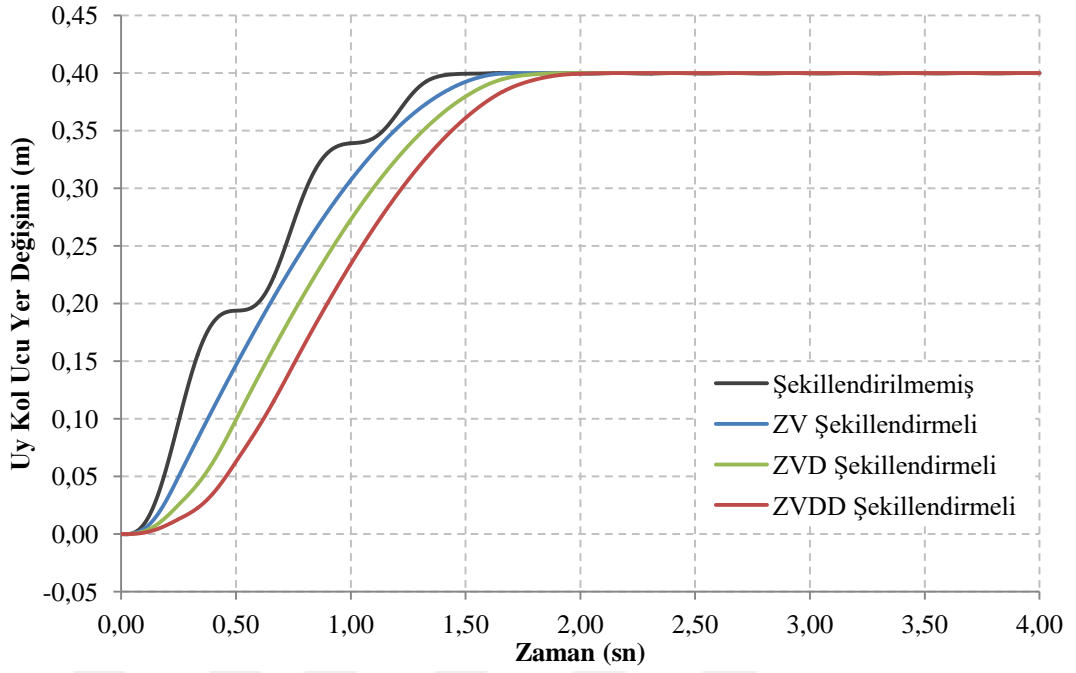
Bu bölümde, şekillendirilmiş komutlarla modelleme hatası bulunmayan şartlarda gerçekleştirilen 90° dönme hareketi deneylerinin sonuçları paylaşılmıştır.

0,030 kg uç kütleli esnek kol ile 90° dönme hareketi deneyleri, önce Tablo 3.14'te verilen şekillendirilmemiş temel komutla ve sonra da Tablo 3.15'te verilen şekillendirilmiş komutlarla gerçekleştirilmiştir.

Kullanılan tüm komutlar için esnek kolun uç noktasının x ve y eksenlerine göre yer değişimleri, sırasıyla Şekil 3.41 ve Şekil 3.42'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Grafikler, kol ucunun başlangıç konumuna göre yer değişimini, hareketin başlangıç anından analiz süresi sonuna kadar göstermektedir.

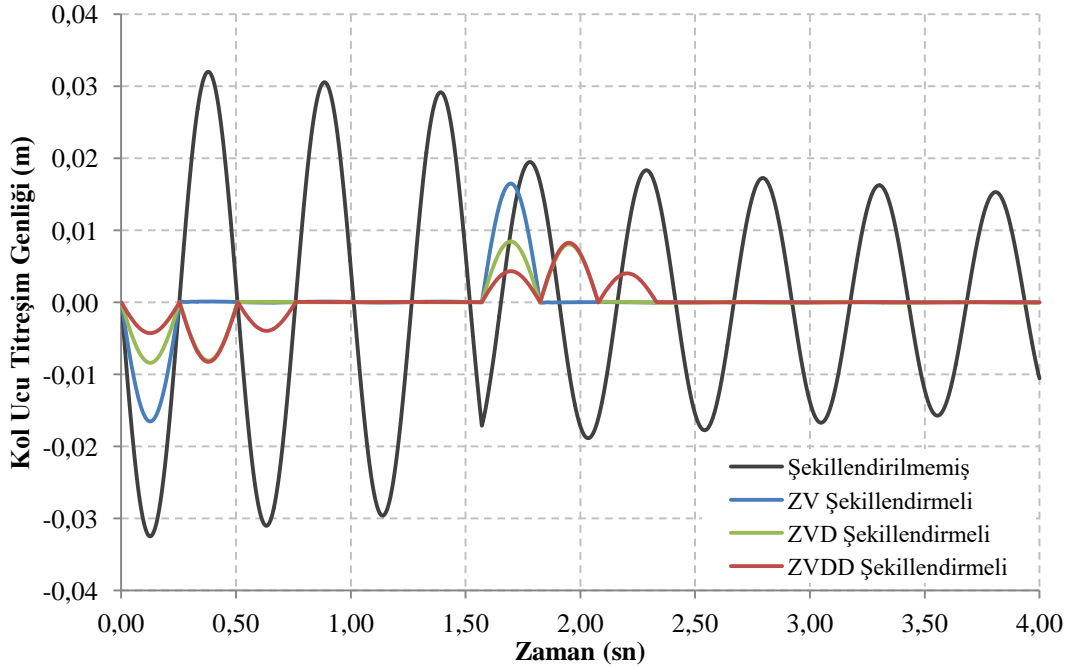


Şekil 3.41. Esnek kol ucunun x eksenine göre yer değişimi (0,030 kg kol ucu kütleliyle 90° dönme hareketi için)



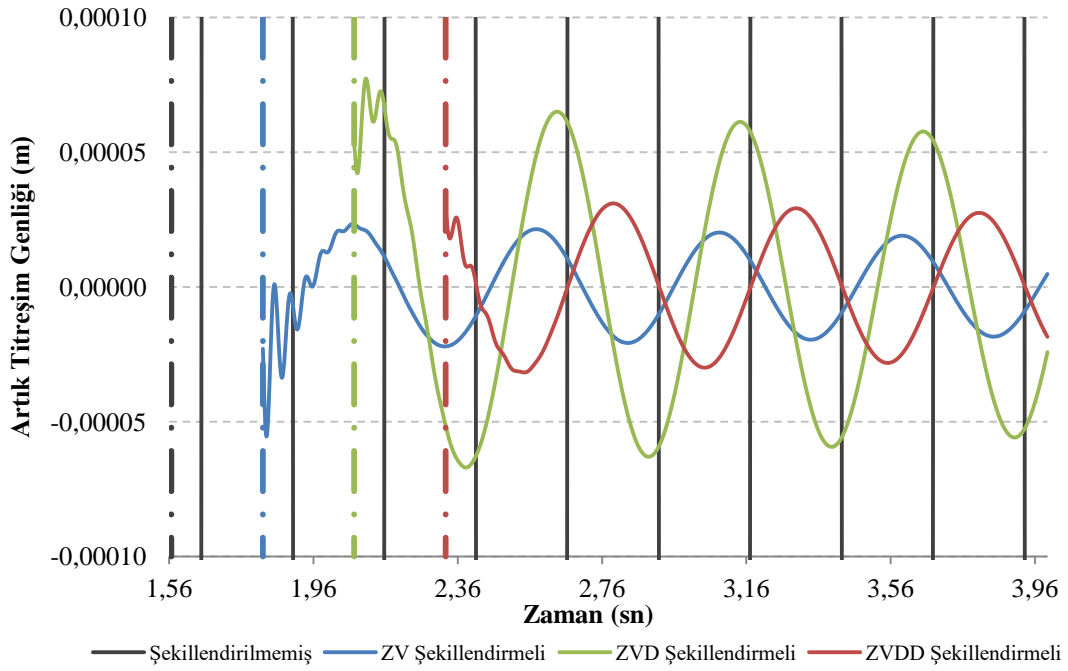
Şekil 3.42. Esnek kol ucunun y eksenine göre yer değişimi (0,030 kg kol ucu kütlesiyle 90° dönme hareketi için)

Kol ucunda oluşan titreşim genlikleri zamana bağlı olarak Şekil 3.43'te verilmiştir.



Şekil 3.43. Esnek kol ucunda oluşan titreşimler (0,030 kg kol ucu kütlesiyle 90° dönme hareketi için)

Şekil 3.44'te dönme hareketi tamamlandıktan sonra kolun uç noktasında meydana gelen artık titreşimler görülmektedir.



Şekil 3.44. Esnek kol ucunda hareket tamamlandıktan sonra oluşan artık titreşimler (0,030 kg kol ucu kütlesiyle 90° dönme hareketi için)

Her komut için aynı renkteki eksen çizgileri, esnek kol eklemının dönme hareketini tamamlayıp durduğu ve artık titreşimlerin başladığı anı gösterir. Şekillendirilmemiş komuta ait artık titreşimlerin tepe noktaları, grafiğin alt ve üst sınırlarının dışında kaldıkları için görünmemektedirler.

Tablo 3.16’da 0,030 kg uç kütleli esnek kolun 90° dönme hareketi sonucunda oluşan artık titreşimlerin sayısal değerleri verilmiştir. Şekillendirilmiş her komutun artık titreşim genliğinin, şekillendirilmemiş temel komutun artık titreşim genliğine yüzde oranı da ikinci sütunda verilmiştir.

Tablo 3.16. Uç kütleinin 0,030 kg olduğu durumda 90° dönme hareketi sonucu oluşan artık titreşim değerleri

Komut	Artık Titreşim Genliği (m)	Artık Titreşim Oranı
Şekillendirilmemiş	$1,95 \times 10^{-2}$	-
ZV	$3,88 \times 10^{-5}$	%0,20
ZVD	$7,72 \times 10^{-5}$	%0,40
ZVDD	$4,61 \times 10^{-5}$	%0,24

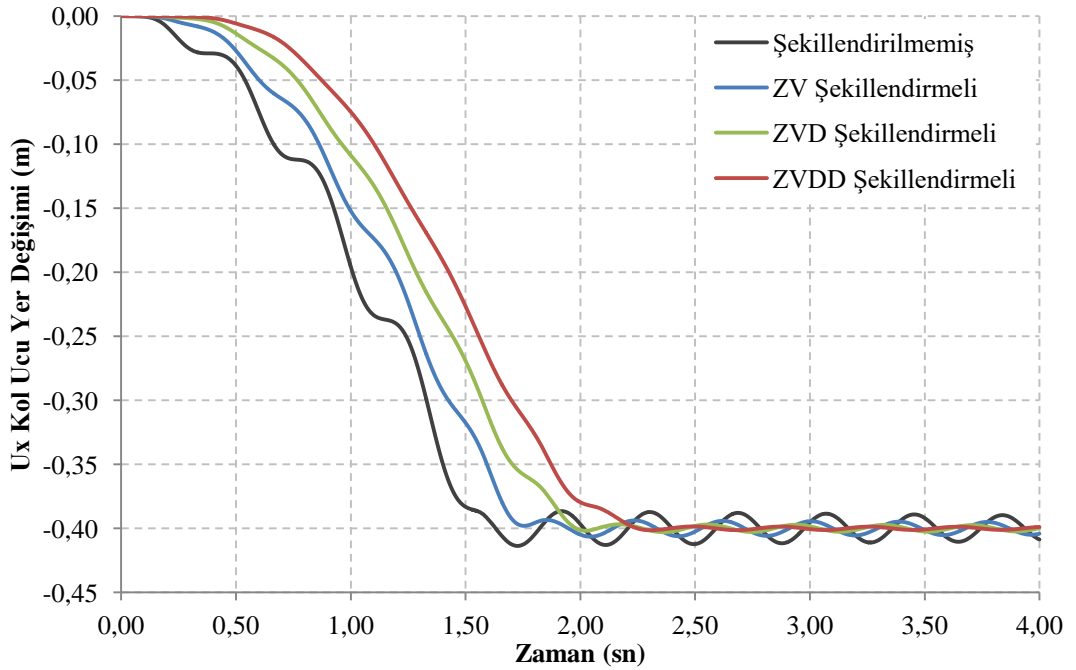
Bölüm 3.4.1.2 ve 3.4.2.2’de paylaşılan modelleme hatası olmayan durumun incelendiği deneylerle de tespit edildiği gibi modellendikleri sistemin kontrolü için kullanılan her üç şekillendirilmiş komut da artık titreşimleri engellemekte oldukça etkili olmuşlardır.

3.4.3.3. Uç kütlelerinin 0,015 kg olduğu durumda 90° dönme hareketi sonuçları

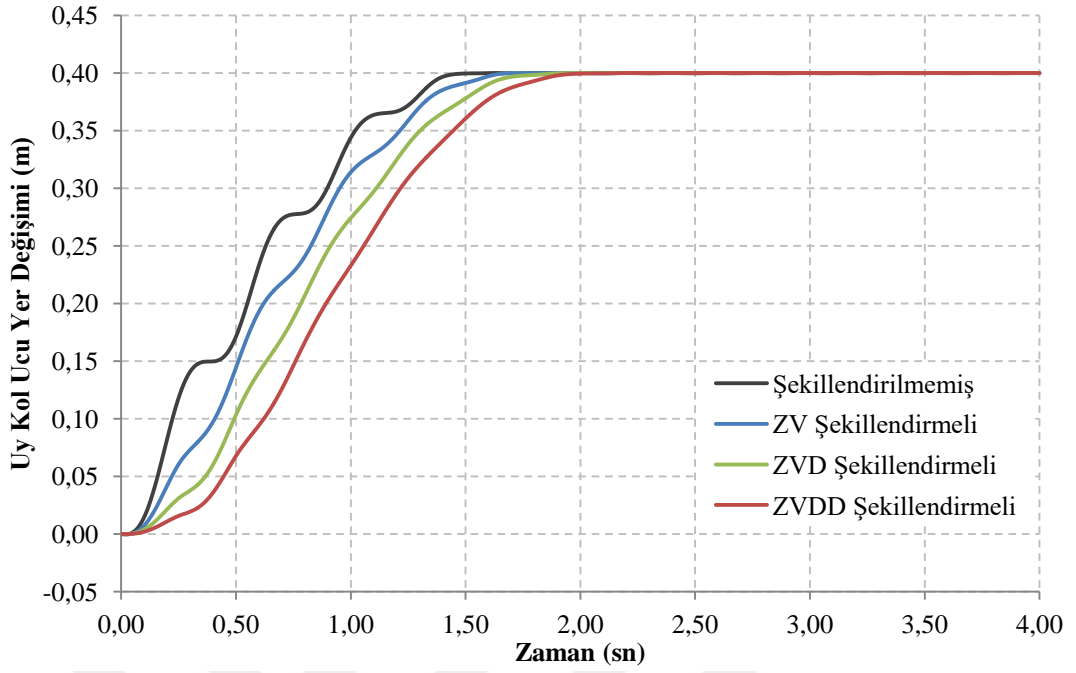
Bu bölümde, giriş şekillendiricilerin modelleme hatalarına karşı duyarlılıkları, kol ucu kütlelerinin modellenenden daha az olduğu durumda 90° dönme hareketi için analiz edilmiştir.

Deneyler, Bölüm 3.4.1.3’te 30° ve Bölüm 3.4.2.3’te 60° dönme hareketi için yapılan deneylerdeki gibi birinci mod frekansı 2,60 Hz ve sönüm oranı 0,0093 olan 0,015 kg uç kütleli esnek kolla yapılmıştır. 90° dönme hareketi, önce Tablo 3.14’te verilen şekillendirilmemiş temel komut ve sonra da Tablo 3.15’te verilen şekillendirilmiş komutlarla tamamlanmıştır.

Kullanılan tüm komutlar için esnek kolun uç noktasının x ve y eksenlerine göre yer değişimleri, sırasıyla Şekil 3.45 ve Şekil 3.46’da karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

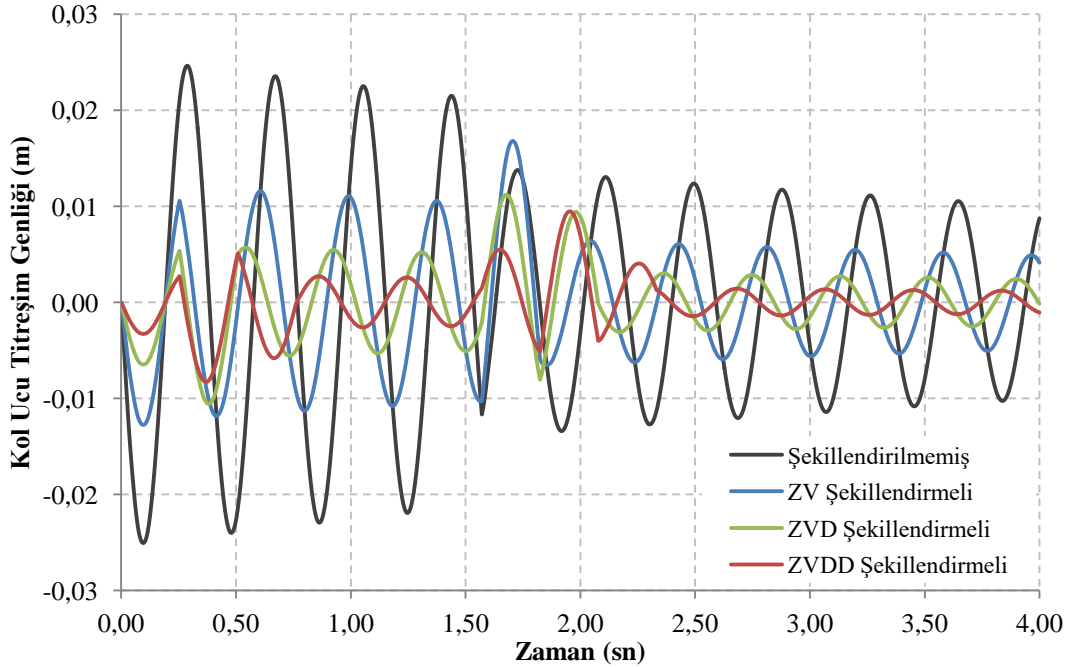


Şekil 3.45. Esnek kol ucunun x eksenine göre yer değişimi (0,015 kg kol ucu kütleli 90° dönme hareketi için)



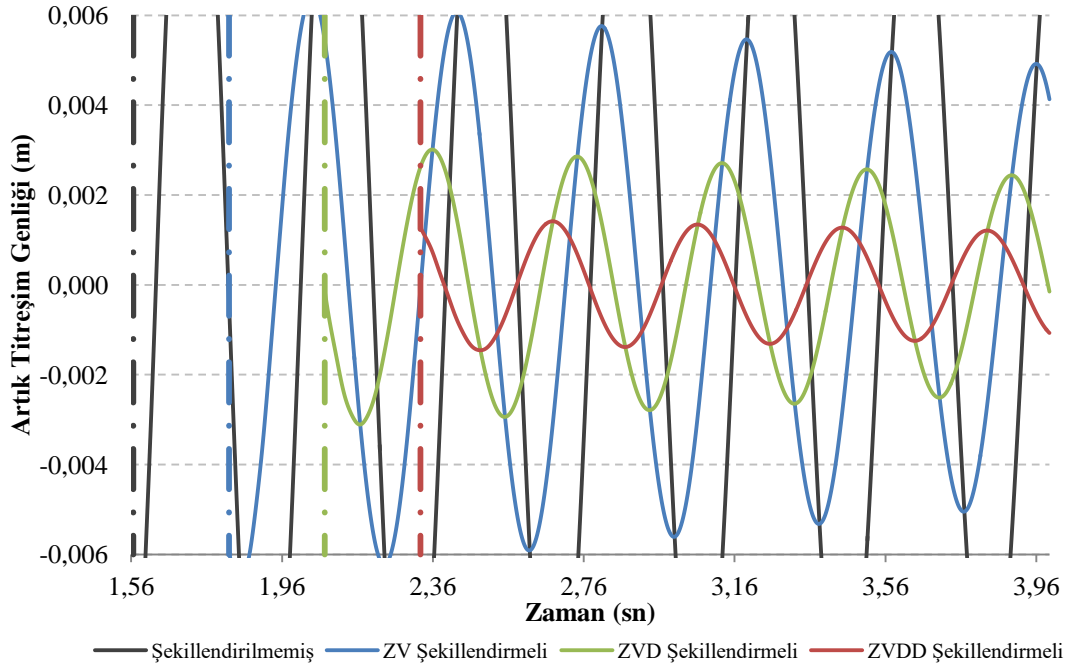
Şekil 3.46. Esnek kol ucunun y eksenine göre yer değişimi (0,015 kg kol ucu kütlesiyle 90° dönme hareketi için)

Kol ucunda oluşan titreşim genlikleri, zamana bağlı olarak Şekil 3.47'de verilmiştir.



Şekil 3.47. Esnek kol ucunda oluşan titreşimler (0,015 kg kol ucu kütlesiyle 90° dönme hareketi için)

Şekil 3.48'de dönme hareketi tamamlandıktan sonra kolun uç noktasında meydana gelen artık titreşimler görülmektedir.



Şekil 3.48. Esnek kol ucunda hareket tamamlandıktan sonra oluşan artık titreşimler (0,015 kg kol ucu kütlesiyle 90° dönme hareketi için)

Komut rengindeki eksen çizgileri, ilgili komut için dönme hareketinin tamamlanıp artık titreşimin başladığı anı gösterir. Şekillendirilmemiş komuta ait artık titreşimlerin tepe noktaları, grafiğin alt ve üst sınırlarının dışında kaldıkları için görünmemektedirler.

Tablo 3.17. Uç kütlenin 0,015 kg olduğu durumda 90° dönme hareketi sonucu oluşan artık titreşim değerleri

Komut	Artık Titreşim Genliği (m)	Artık Titreşim Oranı
Şekillendirilmemiş	$1,38 \times 10^{-2}$	-
ZV	$6,40 \times 10^{-3}$	%46,44
ZVD	$3,01 \times 10^{-3}$	%21,84
ZVDD	$1,50 \times 10^{-3}$	%10,89

Tablo 3.17’de 0,015 kg uç kütleli esnek kolun 90° dönme hareketi sonucunda oluşan artık titreşimlerin sayısal değerleri verilmiştir. Artık titreşim oranları, aynı kolun Tablo 3.7’de 30° ve Tablo 3.12’de 60° dönme hareketi için verilen sonuçlarla örtüşmektedir.

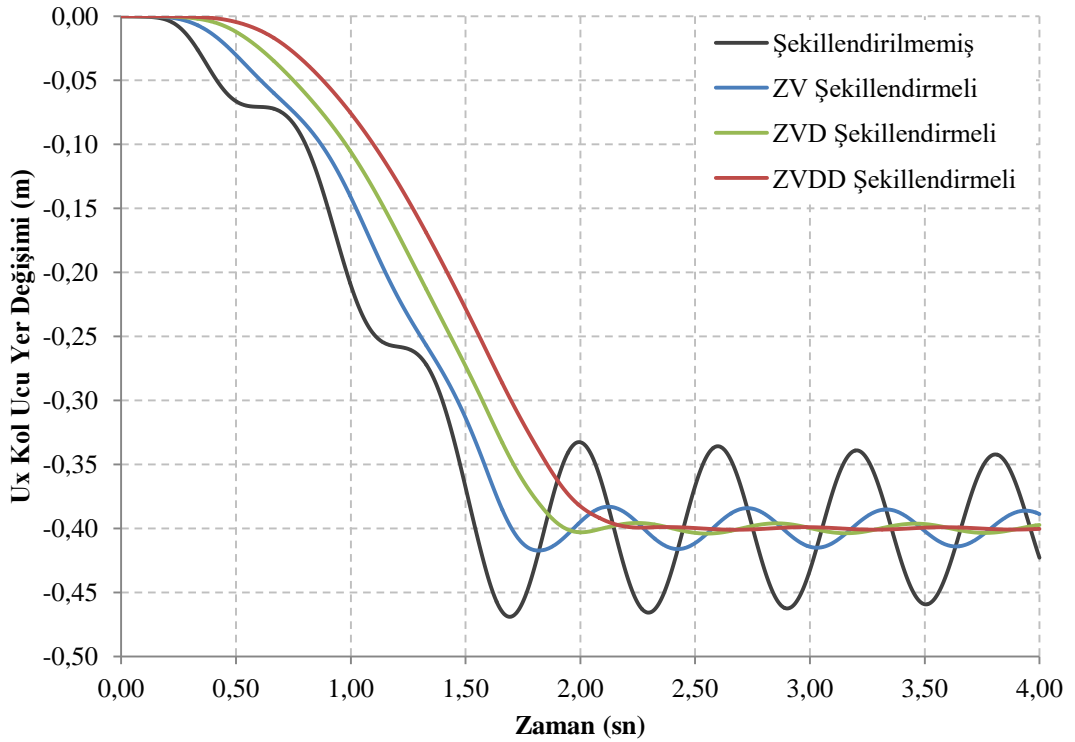
3.4.3.4. Uç kütlesinin 0,045 kg olduğu durumda 90° dönme hareketi sonuçları

Bu bölümde, giriş şekillendiricilerin modelleme hatalarına karşı duyarlılıkları, kol ucu kütlesinin modellenenden daha fazla olduğu durumda 90° dönme hareketi için analiz edilmiştir.

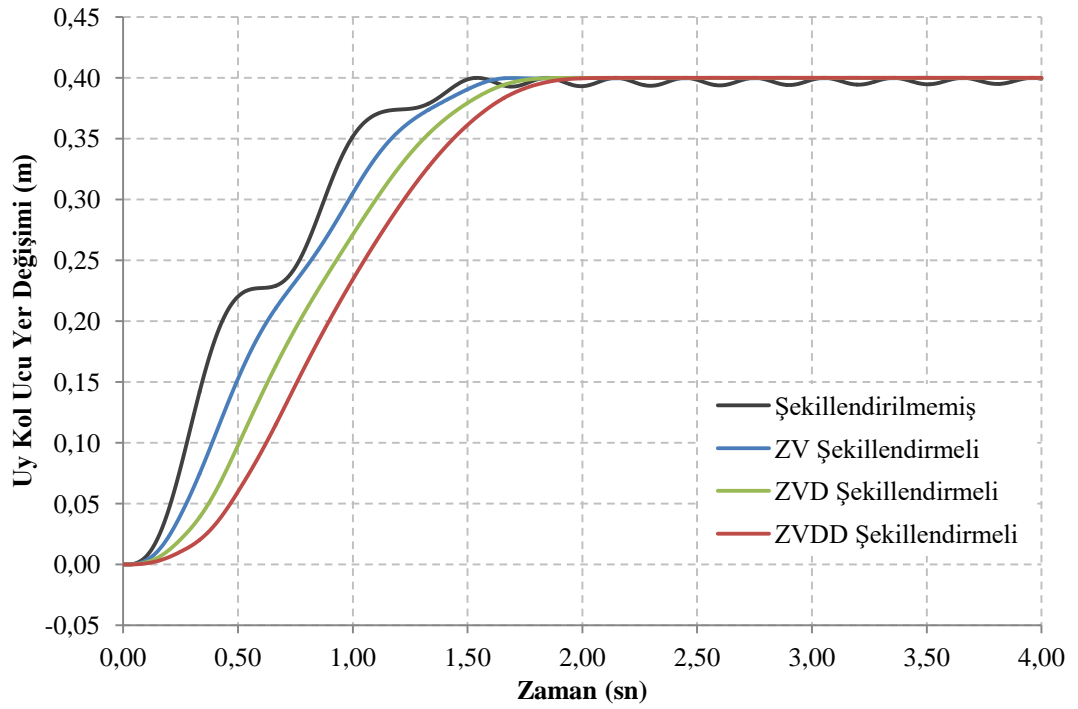
Deneyle, Bölüm 3.4.1.4'te 30° ve Bölüm 3.4.2.4'te 60° dönme hareketi için yapılan deneyledeki gibi birinci mod frekansı 1,65 Hz ve sönüm oranı 0,0119 olan 0,045 kg uç kütleli esnek kol ile gerçekleştirilmiştir.

90° dönme hareketi, önce Tablo 3.14'te verilen şekillendirilmemiş temel komut ile gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, aynı dönme hareketi Tablo 3.15'te verilen ZV, ZVD ve ZVDD şekillendirmeli komutlarla tekrar edilmiştir.

Kullanılan tüm komutlar için esnek kolun uç noktasının x ve y eksenlerine göre yer değişimleri, sırasıyla Şekil 3.49 ve Şekil 3.50'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Grafikler, kol ucunun başlangıç konumuna göre yer değişimini hareketin başlangıç anından analiz süresinin sonuna kadar göstermektedir.

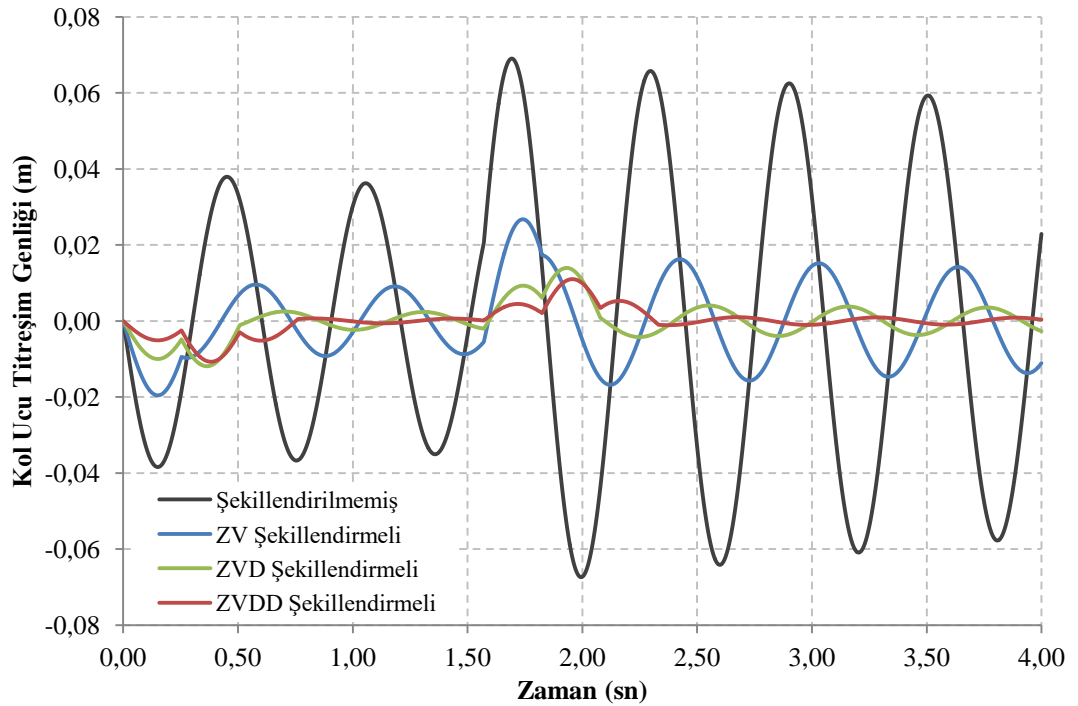


Şekil 3.49. Esnek kol ucunun x eksenine göre yer değişimi (0,045 kg kol ucu kütlesiyle 90° dönme hareketi için)

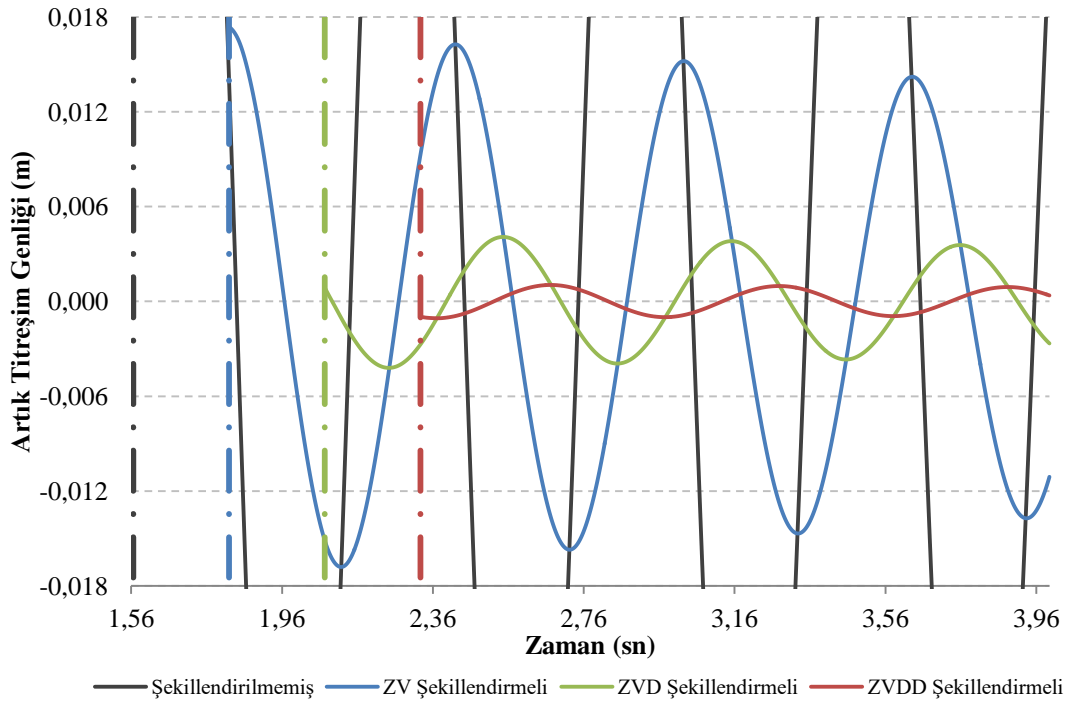


Şekil 3.50. Esnek kol ucunun y eksenine göre yer değişimi (0,045 kg kol ucu kütlesiyle 90° dönme hareketi için)

Kol ucunda oluşan titreşim genlikleri zamana bağlı olarak Şekil 3.51'de, dönme tamamlandıktan sonra kalan artık titreşimler ise Şekil 3.52'de görülmektedir.



Şekil 3.51. Esnek kol ucunda oluşan titreşimler (0,045 kg kol ucu kütlesiyle 90° dönme hareketi için)



Şekil 3.52. Esnek kol ucunda hareket tamamlandıktan sonra oluşan artık titreşimler (0,045 kg kol ucu kütlesiyle 90° dönme hareketi için)

Tablo 3.18. Uç kütlenin 0,045 kg olduğu durumda 90° dönme hareketi sonucu oluşan artık titreşim değerleri

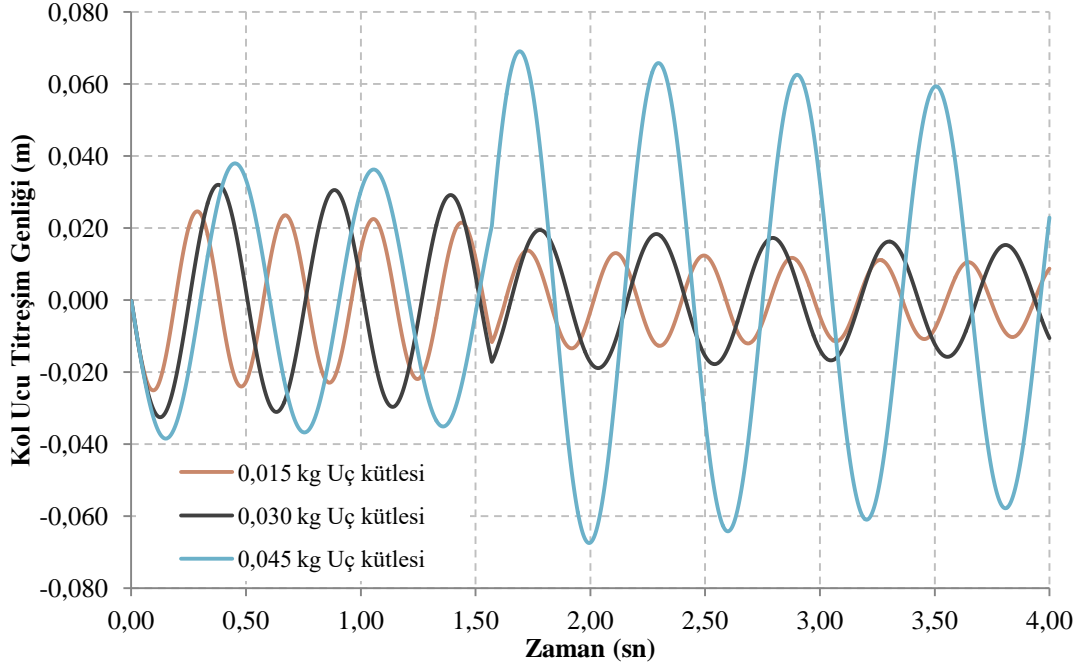
Komut	Artık Titreşim Genliği (m)	Artık Titreşim Oranı
Şekillendirilmemiş	$6,91 \times 10^{-2}$	-
ZV	$1,74 \times 10^{-2}$	%25,21
ZVD	$4,07 \times 10^{-3}$	%5,89
ZVDD	$1,03 \times 10^{-3}$	%1,49

Tablo 3.18’de 0,045 kg uç kütleli esnek kolun 90° dönme hareketi sonucunda oluşan artık titreşimlerin sayısal değerleri verilmiştir. Artık titreşim oranları, aynı kolun Tablo 3.8’de 30° ve Tablo 3.13’te 60° dönme hareketi için verilen sonuçlarla örtüşmektedirler.

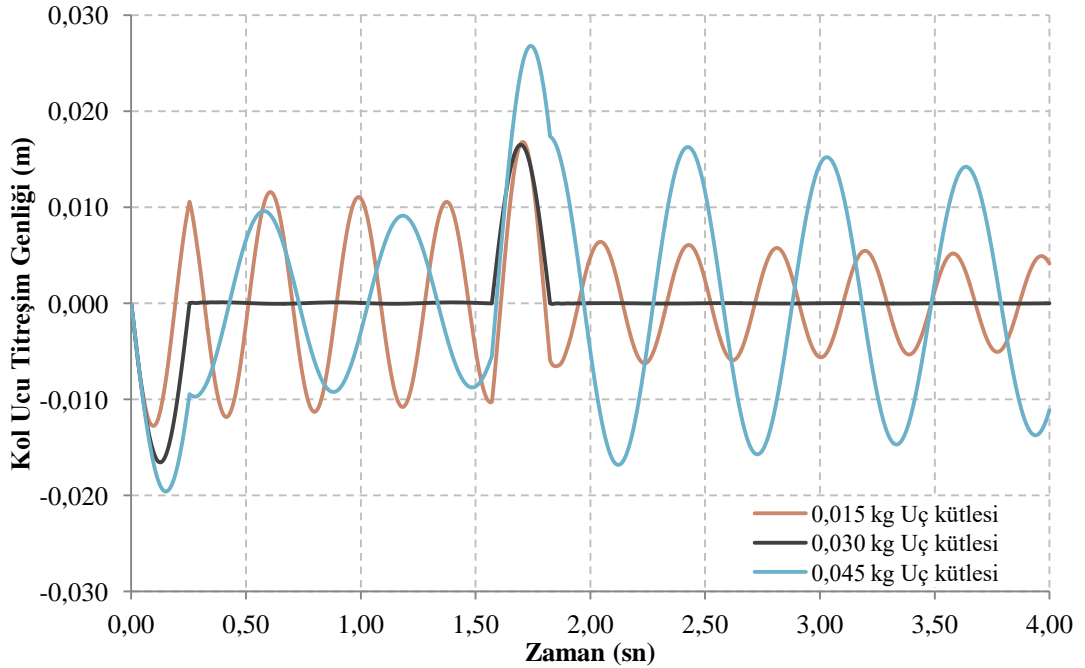
3.4.3.5. Farklı uç kütleler için 90° dönme komutundan dolayı oluşan titreşimlerin karşılaştırılması

Bu bölümde, 90° dönme komutları için uç kütlenin esnek kolda meydana gelen titreşimlere olan etkisi, karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

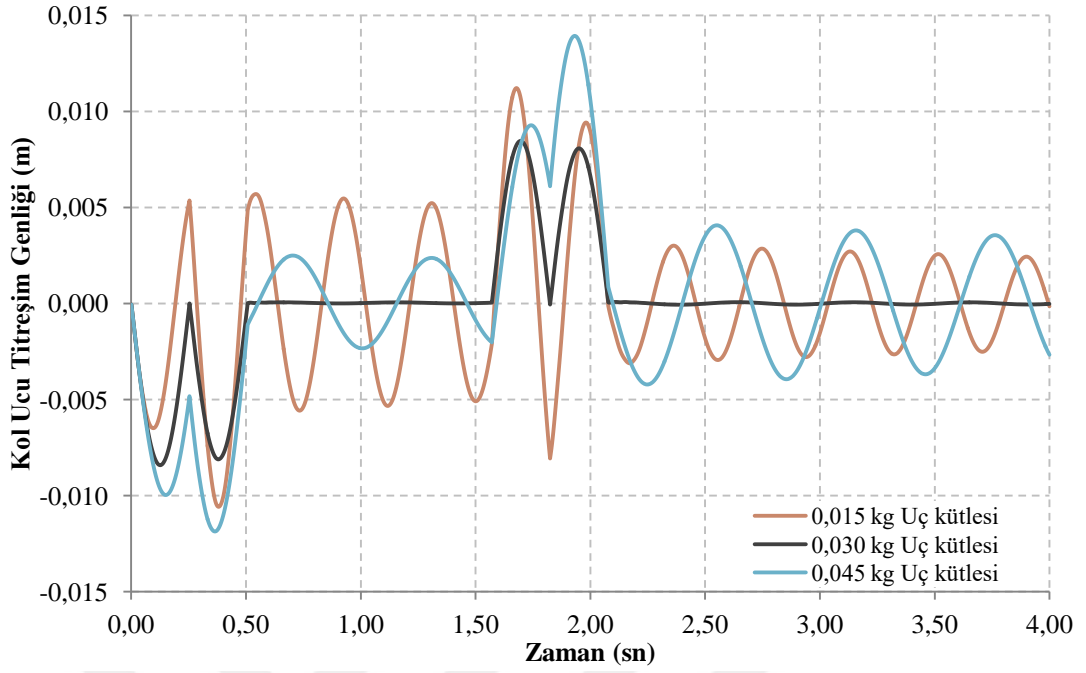
Şekil 3.53'te değişik uç kütleli esnek kolların şekillendirilmemiş komutla kontrolü sonucunda meydana gelen titreşimler, karşılaştırmalı olarak görülmektedir. Aynı grafikler, şekillendirilmiş komutlar için Şekil 3.54 - Şekil 3.56'da verilmiştir.



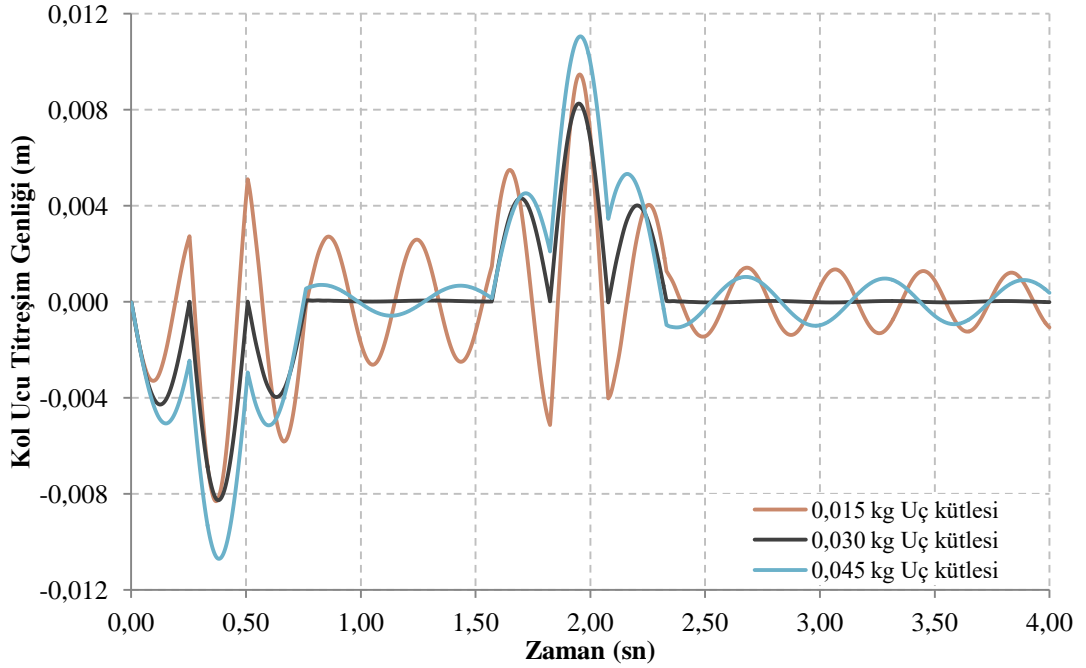
Şekil 3.53. Şekillendirilmemiş 90° dönme hareketi komutu sonucunda farklı uç kütleli esnek kolların uçlarında oluşan titreşimlerin karşılaştırması



Şekil 3.54. ZV Şekillendirmeli 90° dönme hareketi komutu sonucunda farklı uç kütleli esnek kolların uçlarında oluşan titreşimlerin karşılaştırması



Şekil 3.55. ZVD Şekillendirmeli 90° dönme hareketi komutu sonucunda farklı uç kütleli esnek kolların uçlarında oluşan titreşimlerin karşılaştırması



Şekil 3.56. ZVDD Şekillendirmeli 90° dönme hareketi komutu sonucunda farklı uç kütleli esnek kolların uçlarında oluşan titreşimlerin karşılaştırması

Şekil 3.53'te görüldüğü gibi 90° dönme için şekillendirilmemiş komut grafiğinde hareketin devam ettiği ilk 1,5708 sn boyunca kol ucu sapmaları, uç kütle ataletiyle orantılı olarak gerçekleşmekte, hareket sonrasında ise değişiklik göstermektedirler.

Bu durum ve Şekil 3.54 - Şekil 3.56'daki grafiklerde görülen uç sapması ile artık titreşimlerde görülen değişimler için Bölüm 3.4.1.5'te 30° dönme komutlarının sonuçlarıyla ilgili yapılan açıklamalar geçerliliklerini korumaktadırlar.

3.4.4. Deney sonuçlarının genel değerlendirmesi

Bölüm 3.4'te benzetim ortamında yapılan deneylerle esnek bağlı bir robot kolunda dönme hareketi sonucunda meydana gelen artık titreşimlerin giriş şekillendirme yöntemleriyle kontrolü incelenmiş ve alınan sonuçlar analiz edilmiştir.

Daha önce her deney için ayrı tablolarda verilmiş olan artık titreşim genlikleri ve oranlarına ilişkin değerler, sonuçların takip edilmesini kolaylaştırmak amacıyla aşağıdaki Tablo 3.19'da karşılaştırmalı olarak bir arada sunulmuştur.

Tablo 3.19. Artık titreşim değerlerinin, komut ve uç kütlelerine göre karşılaştırmaları

Komut	Artık Titreşim Genliği (mm)			Artık Titreşim Oranı (%)		
	0,030 kg	0,015 kg	0,045 kg	0,030 kg	0,015 kg	0,045 kg
Şekillendirilmemiş Komut						
30°	6,90	44,19	31,06	-	-	-
60°	13,41	35,74	55,33	-	-	-
90°	19,45	13,78	69,06	-	-	-
ZV Şekillendirmeli Komut						
30°	0,0505	20,72	7,36	%0,73	%46,89	%23,70
60°	0,0353	16,87	13,92	%0,26	%47,20	%25,16
90°	0,0388	6,40	17,41	%0,20	%46,44	%25,21
ZVD Şekillendirmeli Komut						
30°	0,0690	9,74	1,80	%1,00	%22,04	%5,80
60°	0,0737	7,92	3,25	%0,55	%22,16	%5,87
90°	0,0772	3,01	4,07	%0,40	%21,84	%5,89
ZVDD Şekillendirmeli Komut						
30°	0,0473	4,57	0,45	%0,69	%10,34	%1,45
60°	0,0465	3,72	0,82	%0,35	%10,41	%1,48
90°	0,0461	1,50	1,03	%0,24	%10,89	%1,49

Tablodaki artık titreşim genlikleri, ilgili komutla dönme hareketi tamamlandıktan sonra oluşan en büyük artık titreşim genliğini ifade ederler. Genlik değerleri, anlaşılabilirliği kolaylaştırmak amacıyla bu tabloda milimetre cinsinden verilmiştir. Artık titreşim oranları ise aynı dönme hareketi için şekillendirilmiş her bir komutun artık titreşim genliğinin, şekillendirilmemiş temel komutun artık titreşim genliğine yüzde oranıdır. Bu bölüm boyunca metin içerisinde verilen tüm genlik değerleri Tablo 3.19’da bulunmaktadır.

Sadece birinci mod göz önünde bulundurularak, 0,030 kg uç kütleli referans esnek kol modelinin titreşim kontrolüne uygun ZV, ZVD ve ZVDD giriş şekillendirici dürtülerinin genlik ve zamanları hesaplanmıştır. Esnek kolun 1 rad/sn sabit açısal hız ile 30°, 60° ve 90° dönme hareketi yapıp durmasını sağlamak üzere üç değişik temel komut oluşturulmuştur. Bu temel komutlar, hesaplanan giriş şekillendirici dürtüleri ile konvolüsyon işlemi yardımıyla şekillendirilerek her dönme açısı için üç ayrı şekillendirilmiş komut oluşturulmuştur.

Modelleme hatası olmayan şartlarda giriş şekillendirme ile kontrol yöntemlerinin titreşim önleme performansı, 0,030 kg uç kütleli esnek kolla yapılan dönme deneyleriyle incelenmiştir.

0,030 kg uç kütleli kolla şekillendirilmemiş temel komut kullanılarak gerçekleştirilen 30° dönme hareketi tamamlandıktan sonra meydana gelen en büyük artık titreşim genliği, 6,90 mm olarak belirlenmiştir. Aynı kol ile aynı dönme hareketi, ZV giriş şekillendirmeli komutla gerçekleştirildiği zaman, kalan artık titreşimin genliği ise 0,0505 mm’dir. Buna göre ZV şekillendirmeli komutla kontrol edilen esnek kolda meydana gelen artık titreşimin genliği, şekillendirilmemiş komutla meydana gelen titreşimin %0,73’ü seviyesinde gerçekleşmiştir. Yine aynı koşullarda ZVD ve ZVDD giriş şekillendirmeli komutlar kullanıldığında meydana gelen artık titreşimlerin genlikleri ise sırasıyla 0,0690 mm ve 0,0473 mm olmuştur. Bu değerler, oransal olarak şekillendirilmemiş komutla meydana gelen artık titreşim genliğinin sırasıyla %1,0 ve %0,69’una denk gelirler.

Diğer açılar için 0,030 kg uç kütleli kolla yapılan deneylerden de benzer sonuçlar alınmıştır. Şekillendirilmemiş komutla gerçekleştirilen 60° dönme hareketi sonucunda meydana gelen artık titreşim genliği, 13,41 mm olurken ZV

şekillendirmeli komut ile 0,0353 mm seviyesine kadar azalmıştır. ZVD ve ZVDD şekillendirmeli komutlarla da sırasıyla 0,0737 mm ve 0,0465 mm genlik değerleri elde edilmiştir. Bu değerler de yine öncekiler gibi şekillendirilmemiş komut sonucunda kalan artık titreşimlerin %1'inden daha az seviyededirler. 90° dönme hareketi için yapılan deneylerden elde edilen sonuçların da öncekilerle örtüştükleri Tablo 3.19'da görülebilir.

Alınan tüm bu sonuçlar, şekillendirilmiş komutların modelleme hatası olmayan şartlarda, her üç dönme açısı için de şekillendirilmemiş temel komutlarla meydana gelen artık titreşim genliklerini en az %99 oranında azaltarak neredeyse tamamen yok ettiklerini göstermektedir.

Her üç açı için şekillendirilmiş komutlarla meydana gelen artık titreşim genlik oranlarının örtüştükleri göz önüne alınarak, aynı giriş şekillendiricilerin hiçbir değişikliğe tabi tutulmadan, farklı komutları şekillendirmek için kullanılabilirdikleri ve artık titreşimleri önleme etkinliklerini korudukları da görülmüştür.

Esnek kol ucunda modelleme hatası olmayan şartlarda dahi bir miktar artık titreşimin kalması ise genel olarak iki sebepten kaynaklanmaktadır. Bunların ilki ve en önemlisi, üst mod frekanslarında oluşan titreşimlerdir. Daha önce belirtildiği gibi deneylerde kullanılan giriş şekillendirici dürtüleri, sadece birinci mod frekansına göre hesaplandıklarından daha yüksek mod frekanslarında meydana gelen titreşimler yok edilememiştir. İkinci sebep ise benzetim ortamında, sonlu elemanlar yöntemiyle geçici durum analizi hesaplamaları için kullanılan adım büyüklüğü ve işlemler esnasında yapılan sayısal yuvarlamalardır.

Diğer taraftan, 0,030 kg uç kütleli kolun şekillendirilmiş komutlarla kontrolü sonucunda oluşan artık titreşimlerin genlikleri arasındaki farklar, göz ardı edilebilecek kadar küçüktür. Bu sebeple doğal frekansı ve sönüm oranı hatasız olarak belirlenebilen ve çalışma anında değişiklik göstermeyen bir sistemin kontrolünün ZV şekillendirmeli komutlarla yapılması, hareketin en kısa zamanda tamamlanabilmesi bakımından avantaj sağlar.

ZV şekillendirmeli komut, temel komutun kontrol süresini sistemin doğal salınım periyodunun yarısı kadar uzatırken ZVD şekillendirmeli komut, bir periyot ve ZVDD

şekillendirmeli komut da bir buçuk periyot kadar uzatır. Deneylerde kullanılan komutların tamamlanma zamanları, önceki tablolardan derlenerek Tablo 3.20’de sunulmuştur.

Tablo 3.20. Kontrol komutlarının tamamlanma zamanları

Komut Türü	Tamamlanma Zamanı (sn)		
	30°	60°	90°
Şekillendirilmemiş	0,5236	1,0472	1,5708
ZV	0,7772	1,3008	1,8244
ZVD	1,0308	1,5544	2,0780
ZVDD	1,2844	1,8080	2,3316

Daha önce ifade edildiği gibi 0,030 kg uç kütleli esnek kolun ilk doğal frekansı 1,9715 Hz ve buna bağlı olarak salınım periyodunun yarısı da 0,2536 sn’dir. Şekillendirilmiş tüm komutlar, bu esnek kola göre oluşturulduklarından her dönme açısı için tamamlanma zamanları arasındaki farkların da bu süreye eşit olduğu tabloda görülmektedir.

Örnek olarak 60° dönme hareketi, şekillendirilmemiş komutla 1,0472 sn’de tamamlanırken, ZV şekillendirmeli komut ile 0,2536 sn gecikmeyle 1,3008 sn’de tamamlanır. ZVD şekillendirmeli komut ile de ZV şekillendirilmeliden 0,2536 sn gecikmeyle 1,5544 sn’de tamamlanır. Şekillendirilmemiş komuta göre ise bu gecikme süresi, 0,5072 sn olarak bir tam periyoda eşittir.

Giriş şekillendirme ile kontrol yöntemlerinin uç kütle farklılıklarından dolayı meydana gelen modelleme hatalarına karşı duyarlılıkları da 0,015 kg ve 0,045 kg uç kütleli esnek kollarla yapılan dönme deneyleriyle incelenmiştir.

0,015 kg uç kütleli kol, 0,030 kg uç kütleli esnek kol modeline göre oluşturulan şekillendirilmiş komutlarla kontrol edilerek, uç kütleli modelden %50 oranında az olduğu durumda bu komutların titreşimleri önleme performansları değerlendirilmiştir. 0,045 kg uç kütleli kolun yine aynı komutlarla kontrol edilmesiyle de uç kütleli modelden %50 oranında fazla olduğu durum incelenmiştir.

0,015 kg uç kütleli kol ile şekillendirilmemiş temel komut kullanılarak 30° dönme hareketi yapıldıktan sonra oluşan en büyük artık titreşim genliği, 44,19 mm'dir. Aynı şartlarda, ZV giriş şekillendirmeli komut kullanıldığında artık titreşimin genliği 20,72 mm olmuştur. ZVD ve ZVDD giriş şekillendirmeli komutlar kullanıldığında meydana gelen artık titreşimlerin genlikleri ise sırasıyla 9,74 mm ve 4,57 mm olarak gerçekleşmiştir.

0,045 kg uç kütleli kolun yine 30° dönme hareketi için şekillendirilmemiş komutla kontrolü sonucunda artık titreşim genliği 31,06 mm olmuştur. Artık titreşim genlikleri, ZV ile 7,36 mm, ZVD ile 1,80 mm ve ZVDD şekillendirmeli komutla kontrol sonucunda da 0,45 mm olarak elde edilmiştir.

Bu esnek kolların 60° ve 90° dönme hareketleri sonucunda oluşan artık titreşim genliklerinin değerleri oluşan dinamik etkilere göre farklılık gösterse de oransal olarak 30° dönme sonuçları ile örtüşükleri görülmektedir.

Örneğin 0,015 kg uç kütleli kolun her üç dönme açısı için ayrı ayrı ZVD şekillendirmeli komutla kontrolü sonucunda meydana gelen artık titreşim genlikleri, oransal olarak şekillendirilmemiş komutla meydana gelenlerin yaklaşık %22'si seviyesinde gerçekleşmiştir. Benzer olarak, 0,045 kg uç kütleli kol ZVDD şekillendirmeli komut kullanılarak kontrol edildiğinde her üç açı için de meydana gelen artık titreşimler oransal olarak şekillendirilmemiş komutun yaklaşık %1,5'ine kadar azalmıştır. Bu sonuçlara istinaden, modelleme hataları olan şartlarda da belirli bir sistem için aynı giriş şekillendiricilerle oluşturulan farklı komutların artık titreşimleri azaltma etkinliklerinin oransal olarak korunduğu tespit edilmiştir.

Deneyler neticesinde, gürbüz olmayan ZV şekillendirmeli komutların modelleme hatalarına karşı çok duyarlı oldukları ve bu şartlarda artık titreşimleri azaltma performanslarının düşük olduğu görülmüştür. ZVD ve ZVDD şekillendirmeli komutlar ise beklendiği gibi türev mertebeleriyle doğru orantılı olarak artan gürbüzlükleri sayesinde, artık titreşimleri gidermekte daha başarılı olmuşlardır. Bu bağlamda, hem 0,015 kg hem de 0,045 kg uç kütleli kollarla yapılan tüm dönme deneylerinde, en düşük artık titreşim genlikleri, ZVDD şekillendirmeli komutlarla kontrol neticesinde elde edilmiştir.

Bu sonuçlar, doğal frekansı ve sönüm oranı doğru olarak belirlenemeyen veya çalışma anında değişen bir sistemde meydana gelen artık titreşimlerin kontrolü için ZVD ve ZVDD gibi gürbüz şekillendirmeli komutların daha başarılı neticeler verdiğiine işaret etmektedir.

Kontrol komutlarının oluşturulmasında hangi gürbüz şekillendiricinin seçileceği de kabul edilebilir artık titreşim genliği ve kontrol süresine göre belirlenebilir. Örneğin ZVDD şekillendirmeli komutlar, ZVD komutlardan daha az artık titreşim üretmelerine karşın kontrol sürelerinin sistem salınım periyodunun yarısı kadar daha uzun olduğu tercih esnasında göz önünde bulundurulmalıdır.

Özet olarak, ZV, ZVD ve ZVDD giriş şekillendiricilerin artık titreşimleri yok etme performansları değişik şartlar altında yapılan deneylerle incelenmiş, alınan sonuçlar detaylı olarak sunulmuştur. Bir giriş şekillendiricinin, parametrelerinde hiçbir değişiklik yapılmadan aynı sistemin kontrolü için farklı kontrol komutlarının şekillendirilmesinde kullanılabildiği gösterilmiştir. Son olarak, giriş şekillendirme yöntemlerinin modelleme hatalarına karşı duyarlılıkları incelenmiş ve hedeflenen kontrol şartlarını sağlamaya uygun şekillendiricinin seçimi hususunda yapılan değerlendirmeler paylaşılmıştır.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Giriş şekillendirme yönteminde kontrol komutlarının oluşturulması için sadece sistemin doğal frekans ve sönüm oranı parametrelerinin bilinmesi yeterlidir. Bu özellik, geri beslemeli kontrol yöntemlerine kıyasla giriş şekillendirme yöntemine iki önemli avantaj sağlar. Bunların ilki, geri beslemeli kontrolün aksine bu yöntemde algılayıcı kullanımına gerek olmamasıdır. Böylece, daha basit ve ekonomik bir sistem tasarımı gerçekleştirilebilir. Diğer önemli avantaj ise kontrol sürecinin geri beslemeli yöntemlere kıyasla daha hızlı ve kısa sürede tamamlanabilmesidir. Giriş şekillendirme yönteminde kontrol süreci, en baştan artık titreşim oluşmasını önleyecek özellikteki şekillendirilmiş komutlarla gerçekleştirilir. Oysa geri beslemeli yöntemlerde, bir komut sonucunda oluşan artık titreşimler, algılayıcılardan toplanan verilere göre oluşturulan ek komutlarla giderilmeye çalışılır. Bu da kontrol sürecinin uzamasına sebep verir.

Modelleme hataları nedeniyle sistemin doğal frekans ve sönüm oranı değerlerinin tam olarak belirlenemediği durumlarda artık titreşimleri önleme veriminin azalması ise giriş şekillendirme yöntemi için bir dezavantaj olarak değerlendirilebilir. Bu gibi durumlarda kendinden gürbüz şekillendiriciler kullanılabileceği gibi sistemin doğal frekansının algılayıcılardan alınan verilerle belirlenerek giriş şekillendirici parametrelerinin buna göre hesaplandığı, uyarlamalı giriş şekillendirme yöntemleri ile de artık titreşimleri önleme performansını arttırmak mümkündür.

Giriş şekillendirme ile kontrol yöntemleri, daha önce Bölüm 1.6'da robot kolları ve çeşitli sistemler için verilen örneklerin yanı sıra pek çok değişik alanda kullanım yeri bulmuşlardır. Bunların en başında vinç sistemleri gelmektedir. Kule vinçler [58,80], gezer köprülü vinçler [81], pergel vinçler [82], sepetli vinçler [67], teleskopik yükleyiciler [83] ile yapılan uygulamalar bunlara örnek verilebilir. Helikopterlerin taşıdıkları asılı yüklerin salınımını kontrol etmek için de benzer çalışmalar yapılmıştır [84,85]. Asansörlerin kontrolünde giriş şekillendirme yöntemleri kullanılarak yolculuk konforu ve hızının artırılabilceği gösterilmiştir [86].

CNC takım tezgâhları ve koordinat ölçüm makineleri gibi yüksek hız ve hassasiyet gerektiren sistemlerde başarılı sonuçlar alınmıştır [87-90]. Sabit disk sürücü [91] ve atomik kuvvet mikroskobu [92] gibi çok daha yüksek hassasiyet gerektiren sistemler için de kullanım örnekleri vardır.

Su altındaki yakıt çubuklarının taşınmaları esnasında meydana gelen titreşimleri azaltmak için deneysel çalışmalar mevcuttur [73,93]. Bir kap içindeki sıvıların taşınma sırasında çalkalanmalarını önlemek üzere de vinç ve robot kolu ile kontrol çalışmaları yapılmıştır [94,95]. Bunlarla beraber, uzay araçları ve sistemlerinin titreşim kontrolü de giriş şekillendirme yöntemlerinin en önemli uygulama alanlarından biri olmuştur [44,96].

Bu çalışmada, giriş şekillendirmeye kontrol yöntemlerinin açık çevrim çalışma şartları altında, esnek bağlı robot kollarında meydana gelen artık titreşimleri yok etme hususunda başarılı sonuçlar verdikleri, benzetim ortamında yapılan deneyler ile gösterilmiştir. Giriş şekillendirmenin başarısı uygulanacağı sistemin önceden gerçeğe en yakın şekilde modellenebilmesi ve komutların buna göre oluşturulmasına bağlıdır. ZV şekillendiriciler, yapılan deneylerden de görülebildiği gibi modelleme hatalarına karşı çok duyarlıdır. Buna karşın ZVD, ZVDD gibi gürbüz türevsel şekillendiricilerin modelleme hatalarına karşı duyarlılıklarının daha az olduğu ve türev mertebeleri arttıkça gürbüzlüklerinin de arttığı gözlemlenmiştir.

Çalışma kapsamında deneylerin bilgisayar ortamında gerçekleştirilebilmesi için Ansys Mechanical APDL platformundan yararlanılmıştır. Çok amaçlı ve kapsamlı bir benzetim ortamı sağlayan bu platformun verimli ve doğru şekilde kullanılabilmesi için ise ciddi bir uzmanlık ve bilgi birikimine ihtiyaç duyulmaktadır. Geleneksel yollardan ara yüz kullanarak modelleme yapmak, deney koşullarını oluşturmak ve buna bağlı olarak elde edilen analiz sonuçlarını uygun biçimde raporlamak zahmetli ve çok zaman alıcı olabilmektedir.

Giriş şekillendirme yöntemlerinin esnek bağlı bir robot kolunda oluşan titreşimlerin kontrolünde kullanılması konusunda çalışmak için amaca özel parametrik programlar geliştirmek suretiyle bahsi geçen zorlukların aşılması hedeflenmiştir. Parametrik yapılı bu programlar sayesinde, analizlerin değişik model ve çalışma şartları için

kolay, hızlı ve efektif şekilde yapılmasını sağlayacak benzetim tabanlı bir deney ortamının oluşturulması amacına ulaşıldığı değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada, ZV sıfır titreşim giriş şekillendirici ile sırasıyla bir ve ikinci mertebeden türevsel ZVD ve ZVDD gürbüz giriş şekillendiriciler incelenmiştir. İleriki çalışmalarda, EI ve SI giriş şekillendiricilerin de benzetim ortamında hesaplanarak analizlerinin gerçekleştirilebileceği programların geliştirilmesi için çalışılabilir. Giriş şekillendirmeyele kontrol deneylerinin iki veya daha çok eklemler bir robot kolu ile yapılmasına olanak sağlayacak benzetim programlarının geliştirilmesi de faydalı olacaktır.



KAYNAKLAR

- [1] Singhose W., Command Shaping for Flexible Systems: A Review of the First 50 Years, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2009, **10**(4), 153-168.
- [2] Gürleyük S. S., *Dinamik Sistemler, Kontrol ve Giriş Şekillendirici Denetim Matlab Örnekli*, Palme Yayınevi, Ankara, 2015.
- [3] De Luca A., Book W. J., Robots with Flexible Elements, Editörler: Siciliano, B., Khatib, O., *Springer Handbook of Robotics*, 2nd ed., Springer International Publishing, Cham, 243-282, 2016.
- [4] Smith O. J. M., Posicast Control of Damped Oscillatory Systems, *Proceedings of the IRE*, 1957, **45**(9), 1249-1255.
- [5] Smith O. J. M., *Feedback Control Systems*, McGraw-Hill, New York, 1958.
- [6] Tallman G. H., Smith O. J. M., Analog Study of Dead-Beat Posicast Control, *IRE Transactions on Automatic Control*, 1958, **4**(1), 14-21.
- [7] So H. C., Thaler G. J., A Modified Posicast Method of Control with Applications to Higher-Order Systems, *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part II: Applications and Industry*, 1960, **79**(5), 320-326.
- [8] Cook G., An Application of Half-Cycle Posicast, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1966, **11**(3), 556-559.
- [9] Shields V. C., Cook G., Application of an Approximate Time Delay to a Posicast Control System, *International Journal of Control*, 1971, **14**(4), 649-657.
- [10] Singhose W., Seering W., *Command Generation for Dynamic Systems*, William Singhose, Atlanta, 2011.
- [11] Singer N. C., Residual Vibration Reduction in Computer Controlled Machines, Doktora Tezi, Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Mechanical Engineering, Cambridge, 1989.
- [12] Singer N. C., Seering W. P., Preshaping Command Inputs to Reduce System Vibration, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1990, **112**(1), 76-82.

- [13] Tzes A. P., Yurkovich S., Adaptive Precompensators for Flexible-Link Manipulator Control, *28th IEEE Conference on Decision and Control*, Tampa, FL, USA, 13-15 Aralık 1989.
- [14] Yurkovich S., Tzes A. P., Hillsley K. L., Controlling Coupled Flexible Links Rotating in the Horizontal Plane, *American Control Conference*, San Diego, CA, USA, 23-25 Mayıs 1990.
- [15] Khorrami F., Jain S., Tzes A., Experiments on Rigid Body Based Controllers with Input Preshaping for a Two-Link Flexible Manipulator, *American Control Conference*, Chicago, IL, USA, 24-26 Haziran 1992.
- [16] Singhose W. E., Seering W. P., Singer N. C., Shaping Inputs to Reduce Vibration: A Vector Diagram Approach, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Cincinnati, OH, USA, 13-18 Mayıs 1990.
- [17] Singhose W. E., Porter L. J., Singer N. C., Vibration Reduction Using Multi-Hump Extra-Insensitive Input Shapers, *American Control Conference*, Seattle, WA, USA, 21-23 Haziran 1995.
- [18] Singer N. C., Seering W. P., An Extension of Command Shaping Methods for Controlling Residual Vibration Using Frequency Sampling, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Nice, France, 12-14 Mayıs 1992.
- [19] Singhose W. E., Seering W. P., Singer N. C., Input Shaping for Vibration Reduction with Specified Insensitivity to Modeling Errors, *Japan-USA Symposium on Flexible Automation*, 1996, **1**, 307-313.
- [20] Pao L. Y., Chang T. N., Hou E., Input Shaper Designs for Minimizing the Expected Level of Residual Vibration in Flexible Structures, *American Control Conference*, Albuquerque, NM, USA, 4-6 Haziran 1997.
- [21] Kumar R., Singh T., Design of Input Shapers Using Modal Cost for Multi-Mode Systems, *Automatica*, 2010, **46**(3), 598-604.
- [22] Shan J., Liu H.-T., Sun D., Modified Input Shaping for a Rotating Single-Link Flexible Manipulator, *Journal of Sound and Vibration*, 2005, **285**(1), 187-207.
- [23] Vaughan J., Yano A., Singhose W., Comparison of Robust Input Shapers, *Journal of Sound and Vibration*, 2008, **315**(4), 797-815.
- [24] Conker C., Yavuz H., Bilgic H. H., A Review of Command Shaping Techniques for Elimination of Residual Vibrations in Flexible-Joint Manipulators, *Journal of Vibroengineering*, 2016, **18**(5), 2947-2958.
- [25] Tzes A., Yurkovich S., An Adaptive Input Shaping Control Scheme for Vibration Suppression in Slewing Flexible Structures, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1993, **1**(2), 114-121.

- [26] Khorrami F., Jain S., Tzes A., Experimental Results on Adaptive Nonlinear Control and Input Preshaping for Multi-Link Flexible Manipulators, *Automatica*, 1995, **31**(1), 83-97.
- [27] Bodson M., An Adaptive Algorithm for the Tuning of Two Input Shaping Methods, *Automatica*, 1998, **34**(6), 771-776.
- [28] Park J., Chang P.-H., Park H.-S., Lee E., Design of Learning Input Shaping Technique for Residual Vibration Suppression in an Industrial Robot, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2006, **11**(1), 55-65.
- [29] Cutforth C. F., Pao L. Y., Adaptive Input Shaping for Maneuvering Flexible Structures, *Automatica*, 2004, **40**(4), 685-693.
- [30] Pereira E., Trapero J. R., Díaz I. M., Feliu V., Adaptive Input Shaping for Manoeuvring Flexible Structures Using an Algebraic Identification Technique, *Automatica*, 2009, **45**(4), 1046-1051.
- [31] Magee D. P., Book W. J., Optimal Filtering to Minimize the Elastic Behavior in Serial Link Manipulators, *American Control Conference*, Philadelphia, PA, USA, 26 Haziran 1998.
- [32] Rhim S., Book W. J., Adaptive Command Shaping Using Adaptive Filter Approach in Time Domain, *American Control Conference*, San Diego, CA, USA, 2-4 Haziran 1999.
- [33] Kapucu S., Alici G., Bayseç S., Residual Swing/Vibration Reduction Using a Hybrid Input Shaping Method, *Mechanism and Machine Theory*, 2001, **36**(3), 311-326.
- [34] Conord T., Singh T., Robust Input Shaper Design Using Linear Matrix Inequalities, *IEEE International Conference on Control Applications*, Munich, Germany, 4-6 Ekim 2006.
- [35] Dharne A. G., Jayasuriya S., Robust Adaptive Control of Residual Vibration in Point-to-Point Motion of Flexible Bodies, *Journal of Vibration and Control*, 2007, **13**(7), 951-968.
- [36] Yuan D., Chang T., Model Reference Input Shaper Design With Applications to a High-Speed Robotic Workcell With Variable Loads, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, **55**(2), 842-851.
- [37] Vyhlídal T., Kučera V., Hromčík M., Input Shapers with Uniformly Distributed Delays, *IFAC Proceedings Volumes*, 2012, **45**(14), 91-96.
- [38] Vyhlídal T., Kučera V., Hromčík M., Design, Analysis and Implementation of Smoothed Input Shapers with Distributed Delays, Editörler: Witrant, E., Fridman, E., Sename, O., Dugard, L., *Recent Results on Time-Delay Systems: Analysis and Control*, Springer International Publishing, Cham, 229-248, 2016.

- [39] Cole M. O. T., Wongratanaphisan T., A Direct Method of Adaptive FIR Input Shaping for Motion Control With Zero Residual Vibration, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2013, **18**(1), 316-327.
- [40] Rew K.-H., Ha C.-W., Kim K.-S., An Impulse-Time Perturbation Approach for Enhancing the Robustness of Extra-Insensitive Input Shapers, *Automatica*, 2013, **49**(11), 3425-3431.
- [41] Han J., Zhu Z., He Y., Qi J., A Novel Input Shaping Method Based on System Output, *Journal of Sound and Vibration*, 2015, **335**, 338-349.
- [42] Grazioso S., Gironimo G. D., Singhose W., Siciliano B., Input Predictive Shaping for Vibration Control of Flexible Systems, *IEEE Conference on Control Technology and Applications*, Mauna Lani, HI, USA, 27-30 August 2017.
- [43] Chatlatanagulchai W., Moonmangmee I., Chantrapornchai C., Robust Input Shaping Using Backstepping Model Matching Control, *American Control Conference*, Seattle, WA, USA, 24-26 May 2017.
- [44] Jia S., Shan J., Vibration Control of Gyroelastic Spacecraft Using Input Shaping and Angular Momentum Devices, *Acta Astronautica*, 2019, **159**, 397-409.
- [45] Hyde J. M., Seering W. P., Using Input Command Pre-Shaping to Suppress Multiple Mode Vibration, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Sacramento, CA, USA, 9-11 Nisan 1991.
- [46] Singh T., Heppler G. R., Shaped Input Control of a System With Multiple Modes, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1993, **115**(3), 341-347.
- [47] Singhose W., Crain E., Seering W., Convolved and Simultaneous Two-Mode Input Shapers, *IEE Proceedings - Control Theory and Applications*, 1997, **144**(6), 515-520.
- [48] Sung Y.-G., Singhose W. E., Robustness Analysis of Input Shaping Commands for Two-Mode Flexible Systems, *IET Control Theory and Applications*, 2009, **3**(6), 722-730.
- [49] Pao L. Y., Singhose W. E., Unity-Magnitude Input Shapers and Their Relation to Time-Optimal Control, *IFAC Proceedings Volumes*, 1996, **29**(1), 385-390.
- [50] Singhose W., Biediger E. O., Chen Y.-H., Mills B., Reference Command Shaping Using Specified-Negative-Amplitude Input Shapers for Vibration Reduction, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2004, **126**(1), 210-214.
- [51] Singhose W., Singer N., Seering W., Comparison of Command Shaping Methods for Reducing Residual Vibration, *Third European Control Conference*, Rome, Italy, 5-8 Eylül 1995.

- [52] Bodson M., Experimental Comparison of Two Input Shaping Methods for the Control of Resonant Systems, *IFAC Proceedings Volumes*, 1996, **29**(1), 5369-5374.
- [53] Singer N., Singhose W., Seering W., Comparison of Filtering Methods for Reducing Residual Vibration, *European Journal of Control*, 1999, **5**(2-4), 208-218.
- [54] Book W. J., Rhim S., Meckl P. H., Singer N., Singhose W., Seering W., Discussion on: 'Comparison of Filtering Methods for Reducing Residual Vibration' by N. Singer, W. Singhose and W. Seering, *European Journal of Control*, 1999, **5**(2-4), 219-221.
- [55] Vaughan J., Yano A., Singhose W., Performance Comparison of Robust Negative Input Shapers, *American Control Conference*, Seattle, WA, USA, 11-13 Haziran 2008.
- [56] Conker Ç., Yavuz H., Kapucu S., Baltacıoğlu M. K., Arat H. T., Burgaç A., Comparison of Robust Input Shapers for Elimination of Residual Vibrations, *Applied Mechanics and Materials*, 2014, **490-491**, 997-1002.
- [57] Fujioka D., Singhose W., Performance Comparison of Input-Shaped Model Reference Control on an Uncertain Flexible System, *IFAC-PapersOnLine*, 2015, **48**(12), 129-134.
- [58] Schlagenhaut F., Singhose W., Comparison of Sway Reduction Controllers for Construction Cranes, *IEEE 14th International Conference on Control and Automation*, Anchorage, AK, USA, 12-15 Haziran 2018.
- [59] Kwon D.-S., Hwang D.-H., Babcock S. M., Burks B. L., Input Shaping Filter Methods for the Control of Structurally Flexible, Long-Reach Manipulators, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Diego, CA, USA, 8-13 Mayıs 1994.
- [60] Grosser K. E., Singhose W. E., Command Generation for Reducing Perceived Lag in Flexible Telerobotic Arms, *JSME International Journal Series C*, 2000, **43**(3), 755-761.
- [61] Kapucu S., Alıcı G., Bayseç S., Esnek Eklemlili ve Tek Uzunlu Bir Manipülâtörün Artık Titreşimlerinin Azaltılması, *10. Ulusal Makine Teorisi Sempozyumu*, Konya, 12-14 Eylül 2001.
- [62] Mohamed Z., Tokhi M. O., Command Shaping Techniques for Vibration Control of a Flexible Robot Manipulator, *Mechatronics*, 2004, **14**(1), 69-90.
- [63] Alıcı G., Kapucu S., Bayseç S., A Robust Motion Design Technique for Flexible-Jointed Manipulation Systems, *Robotica*, 2005, **24**(1), 95-103.
- [64] Chang T., Jaroonsiriphan P., Bernhardt M., Ludden P., Web-Based Command Shaping of Cobra 600 Robot with a Swinging Load, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2006, **2**(1), 59-69.

- [65] Feliu V., Pereira E., Díaz I. M., Roncero P., Feedforward Control of Multimode Single-Link Flexible Manipulators Based on an Optimal Mechanical Design, *Robotics and Autonomous Systems*, 2006, **54**(8), 651-666, Morphology, Control and Passive Dynamics.
- [66] Freese M., Fukushima E. F., Hirose S., Singhose W., Endpoint Vibration Control of a Mobile Mine-Detecting Robotic Manipulator, *American Control Conference*, New York, NY, USA, 9-13 Temmuz 2007.
- [67] Hongxia J., Wanli L., Singhose W., Using Two-Mode Input Shaping to Repress the Residual Vibration of Cherry Pickers, *Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, Shangshai, China, 6-7 Ocak 2011.
- [68] Hayta Ü., Kapucu S., Esnek Uzunlu Manipülörlerin Artık Titreşiminin Yok Edilmesinde Girdi Şekillendirme Yönteminin Kullanılması, *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı - TOK'12*, Niğde, 11-13 Ekim 2012.
- [69] Luo B., Huang H., Shan J., Nishimura H., Active Vibration Control of Flexible Manipulator Using Auto Disturbance Rejection and Input Shaping, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2013, **228**(10), 1909-1922.
- [70] Gürleyük S. S., Peng K. C. C., Singhose W., El Hareketini Takip Eden Vinç Sisteminin Giriş Şekillendirici Denetimi, *Karaelmas Science and Engineering Journal*, 2013, **3**(2), 43-47.
- [71] Shin H., Rhim S., Modeling and Control of Lateral Vibration of an Axially Translating Flexible Link, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2015, **29**(1), 191-198.
- [72] Nguyen Q. C., Ngo H. Q. T., Input Shaping Control to Reduce Residual Vibration of a Flexible Beam, *Journal of Computer Science and Cybernetics*, 2016, **32**(1), 75-90.
- [73] Shah U. H., Hong K., Choi S., Open-Loop Vibration Control of an Underwater System: Application to Refueling Machine, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2017, **22**(4), 1622-1632.
- [74] Mar R., Goyal A., Nguyen V., Yang T., Singhose W., Combined Input Shaping and Feedback Control for Double-Pendulum Systems, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, **85**, 267-277.
- [75] Newman D., Vaughan J., Concurrent Design of Linear Control with Input Shaping for a Two-Link Flexible Manipulator Arm, *IFAC-PapersOnLine*, 2018, **51**(14), 66-71, 14th IFAC Workshop on Time Delay Systems TDS 2018.
- [76] Sahoo P. P., Singhose W., Effects of Input Shaping on Impact Loads During Collisions Involving Flexible Robots, *14th International Conference on Control and Automation*, Anchorage, AK, USA, 12-15 Haziran 2018.

- [77] Akyüz İ. H., Esnek Eklemlı ve Esnek Bağlı Robot Kolu Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2011, 301625.
- [78] Kelly S. G., *Fundamentals of Mechanical Vibrations*, 2nd ed., McGraw-Hill, Singapore, 2000.
- [79] ANSYS Inc., *Ansys® Mechanical APDL, Release 2019 R2, Help System, Element Reference*, Canonsburg, PA, USA, 2019.
- [80] Vaughan J., Kim D., Singhose W., Control of Tower Cranes With Double-Pendulum Payload Dynamics, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2010, **18**(6), 1345-1358.
- [81] Sorensen K. L., Singhose W., Dickerson S., A Controller Enabling Precise Positioning and Sway Reduction in Bridge and Gantry Cranes, *Control Engineering Practice*, 2007, **15**(7), 825-837.
- [82] Huang J., Maleki E., Singhose W., Dynamics and swing control of mobile boom cranes subject to wind disturbances, *IET Control Theory Applications*, 2013, **7**(9), 1187-1195.
- [83] Park J.-Y., Chang P.-H., Vibration Control of a Telescopic Handler Using Time Delay Control and Commandless Input Shaping Technique, *Control Engineering Practice*, 2004, **12**(6), 769-780.
- [84] Bisgaard M., Cour-Harbo A., Bendtsen J., Input Shaping for Helicopter Slung Load Swing Reduction, *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*, Honolulu, Hawaii, USA, 18-21 Ağustos 2008.
- [85] Potter J., Singhose W., Costelloy M., Reducing Swing of Model Helicopter Sling Load Using Input Shaping, *IEEE 9th International Conference on Control and Automation*, Santiago, Chile, 19-21 Aralık 2011.
- [86] Fortgang J., Patrangenaru V., Singhose W., Scheduling of Input Shaping and Transient Vibration Absorbers for High-Rise Elevators, *American Control Conference*, Minneapolis, MN, USA, 14-16 Haziran 2006.
- [87] Khoshdarregi M. R., Tappe S., Altintas Y., Integrated Five-Axis Trajectory Shaping and Contour Error Compensation for High-Speed CNC Machine Tools, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2014, **19**(6), 1859-1871.
- [88] Tsai M.-S., Huang Y.-C., Lin M.-T., Wu S.-K., Integration of Input Shaping Technique with Interpolation for Vibration Suppression of Servo-Feed Drive System, *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 2017, **40**(4), 284-295.
- [89] Singhose W. E., Searing W. P., Singer N. C., Improving Repeatability of Coordinate Measuring Machines with Shaped Command Signals, *Precision Engineering*, 1996, **18**(2-3), 138-146.

- [90] Jones S. D., Ulsoy A. G., An Approach to Control Input Shaping With Application to Coordinate Measuring Machines, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1999, **121**(2), 242-247.
- [91] Boettcher U., Fetzer D., Li H., Callafon R. A., Talke F. E., Reference Signal Shaping for Closed-Loop Systems with Application to Seeking in Hard Disk Drives, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2012, **20**(2), 335-345.
- [92] Schitter G., Thurner P. J., Hansma P. K., Design and Input-Shaping Control of a Novel Scanner for High-Speed Atomic Force Microscopy, *Mechatronics*, 2008, **18**(5-6), 282-288.
- [93] Shah U. H., Hong K. S., Input Shaping Control of a Nuclear Power Plant's Fuel Transport System, *Nonlinear Dynamics*, 2014, **77**(4), 1737-1748.
- [94] Pridgen B., Bai K., Singhose W., Slosh Suppression by Robust Input Shaping, *49th IEEE Conference on Decision and Control*, Atlanta, GA, USA, 15-17 Aralık 2010.
- [95] Aribowo W., Yamashita T., Terashima K., Kitagawa H., Input Shaping Control to Suppress Sloshing on Liquid Container Transfer Using Multi-Joint Robot Arm, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Taipei, Taiwan, 18-22 Ekim 2010.
- [96] Singhose W. E., Banerjee A. K., Seering W. P., Slewing Flexible Spacecraft with Deflection-Limiting Input Shaping, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1997, **20**(2), 291-298.



EKLER

Ek-A

Bu bölümde, tez kapsamında geliştirilmiş parametrik Ansys Mechanical APDL programlarının kaynak kodları ve kullanımlarına ilişkin bilgiler verilmiştir.

- Algoritma A.1: Esnek bağlı robot kolu için modal analiz programı
- Algoritma A.2: Esnek bağlı robot kolu için serbest salınım analizi programı
- Algoritma A.3: Esnek bağlı robot kolunun giriş şekillendirme ile kontrolü için deney ve analiz programı

Algoritma A.1.

Bölüm 3.1'de esnek bağlı robot kolunun modal analizi ve mod şekillerinin belirlenmesi için kullanılan program.

```
! Esnek Bağlı Robot Kolu için Modal Analiz Programı
! Programın çalışması, Ansys Mechanical APDL 2019 R2 Student sürümü
! üzerinde kontrol edilmiştir.

FINISH
/CLEAR

! ***** AÇIKLAMALAR ***** !!

! 1) Bu programı "EsnekKol_Modal_Analiz.inp" isminde metin dosyası
! olarak boş bir dizinin içine kaydediniz.
! 2) Dosyayı bir metin işlem prgramı ile açınız. (Not Defteri vb.)
! 3) Aşağıda "KULLANICI GİRİŞLERİ" bölümünde verilen değişkenlere,
! deneye uygun değerleri girip kaydediniz.
! 4) Ansys Mechanical APDL programını başlatınız.
! 5) "File Menu / Change Directory" komutu ile dosyayı kaydettiğiniz
! dizini seçiniz.
! 6) "File Menu / Read Input from" komutu ile
! "EsnekKol_Modal_Analiz.inp" dosyasını seçip analizi başlatınız.
! 7) Deney sonuçları aşağıda açıklanan çıktı dosyalarına otomatik
! olarak kaydedilirler.
! 8) Deney sonuçları ANSYS APDL grafik arabiriminde General PostProc
! ve diğer araçlarla da analiz edilebilir.
! 9) Yeni bir deney için 2 ila 6. adımları tekrar ediniz.
!
! Deney Sonuçları Çıktı Dosyaları : Elde edilen tüm sonuçlar
! aşağıdaki dosyalara kaydedilir.
!
! DeneyDosyasiAdı-Modal.txt : Hesaplanan modal frekans değerleri
! DeneyDosyasiAdı00#.png : Mod şekli grafikleri

! ***** KULLANICI GİRİŞLERİ ***** !!

! Çalışma dosyalarının kaydedildiği alt dizin adı.
kgcalismaDizini = 'mAnalizler'
```

```

kgDeneyNo = 1 ! Deney numarası. (Dosya adının başına yazılır)

! Deney parametreleri

kgModSay = 5 ! Modal Frekans sayısı
kgElmsay = 21 ! Esnek Kol mesh eleman sayısı.

! Esnek Kol Ölçü ve Malzeme Değerleri
kgEkL=0.4 ! Esnek Kol Boyu L (m) - (x eksenini yönünde)
kgEkH=0.02 ! Esnek Kol Yüksekliği H (m) - (y eksenini yönünde)
kgEkW=0.001 ! Esnek Kol Kalınlığı W (m) - (z eksenini yönünde)

kgEx = 6.9e10 ! Esnek Kol malzemesi için Elastisite Modülü. (Pa)
kgPrxy = 0.33 ! Esnek Kol malzemesi için Poisson's oranı.
kgDens = 2710 ! Esnek Kol malzemesi için yoğunluk değeri. (kg/m3)

kgM = 0.00397 ! Esnek kol uç kütlesi (kg)

! Analiz Başlığı
*DIM, kgTitle, STRING, 72
kgTitle(1) = 'Esnek Kol Modal Analizi' ! Analiz Konu Başlığı

!! _____ KULLANICI GİRİŞLERİ SONU _____ !!

dvModSay = kgModSay
Pi=acos(-1)

/INQUIRE, anaDizin, DIRECTORY ! Geçerli dizinin adı.
/MKDIR, kgcalismaDizini ! Çalışma dizini yoksa oluşturulur.
/CWD, %anaDizin(1)%\%kgcalismaDizini% ! Çalışma dizinine geçiliyor.

*DIM, DeneyAdi, STRING, 32
DeneyAdi(1) = 'MA%kgDeneyNo%-m%kgM%e%kgElmsay%z' ! Deney dosya adı.
DeneyAdiUzn = 'db'
/directory, DeneyAdiVarmi, DeneyAdi(1), DeneyAdiUzn,
*get, Dosyalarisay, parm, DeneyAdiVarmi, dim, 3

! Dosya adı önceden kullanılmışsa deney numarasına "_sira#" eklenir
AdDongusu=1
*DOWHILE, AdDongusu
*IF, Dosyalarisay, EQ, 0, THEN
/FILNAME, DeneyAdi(1), 1
AdDongusu=0
*ELSE
*SET, DeneyAdi
*DIM, DeneyAdi, STRING, 32
DeneyAdi(1) = 'MA%kgDeneyNo%_%AdDongusu%-m%kgM%e%kgElmsay%z'
*DEL, DeneyAdiVarmi
*DEL, Dosyalarisay
/directory, DeneyAdiVarmi, DeneyAdi(1), DeneyAdiUzn,
*get, Dosyalarisay, parm, DeneyAdiVarmi, dim, 3
AdDongusu=AdDongusu+1
*ENDIF

*ENDDO

*DIM, outJobName, STRING, 32
/INQUIRE, outJobName, jobname ! Geçerli çalışma dosyası adı

```

```

/TITLE,%kgTitle(1)%

!! ***** MODAL ANALİZ: MODELLEME ***** !!

/PREP7

!** Modelleme için değişken parametreler tanımlanıyor
dvEkL=kgEkL
dvEkH=kgEkH
dvEkW=kgEkW
dvEx = kgEx
dvPrxy = kgPrxy
dvDens = kgDens
dvElmsay = kgElmsay
dvM = kgM

!** Esnek kol modeli oluşturuluyor

ET,1, BEAM188
keyopt,1,1,1
keyopt,1,3,2

SECTYPE, 1, BEAM, RECT, beam1, 0
SECOFFSET, CENT
SECDATA,dvEkW,dvEkH,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0

MP,ex,1,dvEx
MP,prxy,1,dvPrxy
MP,density,1,dvDens

K,1,0,0,0,
K,2,dvEkL,0,0,
LSTR,1,2

LESIZE,1, , , dvElmsay, ,1, , ,1,
LMESH,1

!** Esnek kol ucundaki kütle oluşturuluyor.

ET,2, MASS21
keyopt,1,3,2

*IF,dvM,GT,0, THEN
type,2
real,2
R,2, , dvM, , , ,
en,dvElmsay+1,2
*ENDIF

!** Elemanların Serbestlik koşulları belirleniyor

D,1,all,0
D,2,UZ,0, , dvElmsay+1,1, ROTX

FINISH

!! ** MODAL ANALİZ: ÇÖZÜM ** !!

/SOLU

```

```

! ** Analiz Ayarları

ANTYPE, 2

MODEOPT, LANB, dvModSay, 0, 0, , OFF
EQSLV, SPAR
MXPAND, 0, , , 0
LUMPM, 0
PSTRES, 0

SOLVE

FINISH

!! ** MODAL ANALİZ: SONUÇLAR ** !!

/POST26

*DEL, MFREQ
*DEL, WN

*DIM, MFREQ, , dvModSay
*DIM, WN, , dvModSay

*DO, i, 1, dvModSay
    *GET, MFREQ(i), MODE, i, FREQ
    WN(i) = MFREQ(i) * 2 * Pi
*ENDDO

*CFOPEN, '%outJobName(1) %-Modal', txt, , APPEND

*VWRITE, dvModSay
Düzlem içinde oluşan titreşimlerin mod frekansları (1-%I)
*VWRITE
Frekans (Hz) | Frekans (rad/s)

*VWRITE, MFREQ(1), WN(1)
%F | %F

*CFCLOSE

FINISH

/POST1

! Grafik ayarları

! Pencere ayarları
/PLOPTS, INFO, 0
/PLOPTS, LEG1, 0
/PLOPTS, FRAME, 0
/PLOPTS, TITLE, 0
/PLOPTS, DATE, 0

! Renkler ayarlanıyor
/COLOR, GRBAK, BLAC
/COLOR, GRID, DGRA
/COLOR, AXLAB, WHIT
/COLOR, AXES, DGRA

```



```

/COLOR, AXNU, WHIT
/COLOR, CURVE, WHIT, 1
/COLOR, CURVE, BLUE, 2
/COLOR, CURVE, RED, 3
/COLOR, CURVE, CBLU, 4
/COLOR, CURVE, MRED, 5
/COLOR, CURVE, GREE, 6
/COLOR, CURVE, ORAN, 7
/COLOR, CURVE, MAGE, 8
/COLOR, CURVE, YGRE, 9
/COLOR, CURVE, BLUE, 10

! Beyaz arka plan
/RGB, INDEX, 100, 100, 100, 0
/RGB, INDEX, 80, 80, 80, 13
/RGB, INDEX, 60, 60, 60, 14
/RGB, INDEX, 0, 0, 0, 15

! Grafikler png dosyalarına kaydediliyor

/SHOW, PNG, , 0
PNGR, COMP, 0, -1
PNGR, ORIENT, HORIZ
PNGR, COLOR, 2
PNGR, TMOD, 1
/GFILE, 800,

!** Grafikler oluşturuluyor, ekrana veya dosyaya yazılıyor

*DO, i, 1, dvModSay

SET, , , , , i
PLDISP, 1

*ENDDO

/SHOW, CLOSE
/DEVICE, VECTOR, 0

! Grafik ayarları varsayılanına döndürülüyor.

/PLOPTS, INFO, 3
/PLOPTS, LEG1, 1
/PLOPTS, FRAME, 1
/PLOPTS, TITLE, 1
/PLOPTS, DATE, 1

/RGB, INDEX, 0, 0, 0, 0
/RGB, INDEX, 60, 60, 60, 13
/RGB, INDEX, 80, 80, 80, 14
/RGB, INDEX, 100, 100, 100, 15
/COLOR, DEFAULT

SAVE

!* Program Sonu

```

Algoritma A.2.

Bölüm 3.2’de, esnek bağlı robot kolunun serbest salınım deneyini yapmak için kullanılan Ansys Mechanical APDL programı.

```
! Esnek Bağlı Robot Kolu için Serbest Salınım Analizi Programı
! Programın çalışması, Ansys Mechanical APDL 2019 R2 Student sürümü
! üzerinde kontrol edilmiştir.

FINISH
/CLEAR

! ***** AÇIKLAMALAR ***** !!

! 1) Bu programı "EsnekKol_Serbest_Salinim.inp" isminde metin
! dosyası olarak boş bir dizinin içine kaydediniz.
! 2) Dosyayı bir metin işlem prgramı ile açınız. (Not Defteri vb.)
! 3) Aşağıda "KULLANICI GİRİŞLERİ" bölümünde verilen değişkenlere,
! deneye uygun değerleri girip kaydediniz.
! 4) Ansys Mechanical APDL programını başlatınız.
! 5) "File Menu / Change Directory" komutu ile dosyayı kaydettiğiniz
! dizini seçiniz.
! 6) "File Menu / Read Input from" komutu ile
! "EsnekKol_Serbest_Salinim.inp" dosyasını seçip analizi
! başlatınız.
! 7) Deney sonuçları aşağıda açıklanan çıktı dosyalarına otomatik
! olarak kaydedilirler.
! 8) Deney sonuçları ANSYS APDL grafik ara yüzde General PostProc,
! TimeHist Postpro ve diğer araçlarla da analiz edilebilir.
! 9) Yeni bir deney için 2 ila 6. adımları tekrar ediniz.
!
! Deney Sonuçları Çıktı Dosyaları : Elde edilen tüm sonuçlar
! aşağıdaki dosyalara kaydedilir.
!
! DeneyDosyasiAdı-Sonuclar.csv : Kol uç noktasının zamana bağlı
! konum değerleri
! DeneyDosyasiAdı000.png : Kolun uç noktasının serbest salınım
! grafiği
! DeneyDosyasiAdı-parm.txt : Deney esnasında oluşturulan tüm program
! parametreleri

!! ***** KULLANICI GİRİŞLERİ ***** !!

! Çalışma Dizini ve Deney Numarası

kgcalismaDizini = 'SerbestSalinim'
kgDeneyNo = '1'

! Analiz Ayarları
kgModSay = 5 ! Modal frekans sayısı
kgDeltim = 1.0E-03 ! Transient analiz için Time Step Size (saniye)
kgAnSure = 32 ! Transient analiz toplam süresi (saniye)
kgElmsay = 21 ! Esnek Kol mesh eleman sayısı

kgM = 3.97E-03 ! Esnek kol uç kütleli (kg)
```

```

kgBetad = 0.000709579 ! Beta sönüm katsayısı (2*Zeta/Wn)

! Esnek Kol Ölçü ve Malzeme Değerleri
kgEkL=0.4 ! Esnek Kol Boyu L (m) - (x eksenini yönünde)
kgEkH=0.02 ! Esnek Kol Yüksekliği H (m) - (y eksenini yönünde)
kgEkW=0.001 ! Esnek Kol Kalınlığı W (m) - (z eksenini yönünde)

kgEx = 6.9e10 ! Esnek Kol malzemesi için Elastisite Modülü. (Pa)
kgPrxy = 0.33 ! Esnek Kol malzemesi için Poisson's oranı.
kgDens = 2710 ! Esnek Kol malzemesi için yoğunluk değeri. (kg/m3)

!! _____ KULLANICI GİRİŞLERİ SONU _____ !!

/INQUIRE, anaDizin, DIRECTORY ! Geçerli dizinin adı.
/MKDIR, kgcalismaDizini ! Çalışma dizini yoksa oluşturulur.
/CWD, %anaDizin(1)%\%kgcalismaDizini% ! Çalışma dizinine geçiliyor.

*DIM, DeneyAdi, STRING, 32
DeneyAdi(1) = 'D%kgDeneyNo%-a%kgAnSure%m%kgM%z' ! Deney dosya adı.
DeneyAdiUzn = 'db'
/directory, DeneyAdiVarmi, DeneyAdi(1), DeneyAdiUzn,
*get, Dosyalarisay, parm, DeneyAdiVarmi, dim, 3

! Dosya adı önceden kullanılmışsa deney numarasına "_sira#" eklenir
AdDongusu=1
*DOWHILE, AdDongusu
*IF, Dosyalarisay, EQ, 0, THEN
  /FILENAME, DeneyAdi(1), 1
  AdDongusu=0
*ELSE
  *SET, DeneyAdi
  *DIM, DeneyAdi, STRING, 32
  DeneyAdi(1) = 'D%kgDeneyNo%_%AdDongusu%-a%kgAnSure%m%kgM%z'
  *DEL, DeneyAdiVarmi
  *DEL, Dosyalarisay
  /directory, DeneyAdiVarmi, DeneyAdi(1), DeneyAdiUzn,
  *get, Dosyalarisay, parm, DeneyAdiVarmi, dim, 3
  AdDongusu=AdDongusu+1
*ENDIF

*ENDDO

*DIM, kgTitle, STRING, 72
kgTitle(1) = 'Esnek Kol Serbest Salinim Analizi'
/TITLE, %kgTitle(1)%
/INQUIRE, outJobName, jobname

!! ** TRANSIENT ANALİZ: MODELLEME ** !!

/PREP7

dvEkL=kgEkL
dvEkH=kgEkH
dvEkW=kgEkW
dvEx = kgEx
dvPrxy = kgPrxy
dvDens = kgDens
dvElmsay = kgElmsay
dvM = kgM

```

```

!** Esnek kol modeli oluşturuluyor
ET,1,BEAM188
keyopt,1,1,1
keyopt,1,3,2

SECTYPE, 1, BEAM, RECT, beam1, 0
SECOFFSET, CENT
SECDATA,dvEkW,dvEkH,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0

MP,ex,1,dvEx
MP,prxy,1,dvPrxy
MP,density,1,dvDens

K,1,0,0,0,
K,2,dvEkL,0,0,
LSTR,1,2

LESIZE,1, , , dvElmsay, ,1, , ,1,
LMESH,1

!** Esnek kol ucundaki kütle oluşturuluyor.
ET,2,MASS21
keyopt,1,3,2

type,2
real,2
R,2, , , dvM, , , ,
en,dvElmsay+1,2

!** Elemanların Serbestlik koşulları belirleniyor
D,1,all,0
D,2,UZ,0, , , dvElmsay+1,1,ROTX

FINISH

/PBC,ALL, ,1
GPLOT
/replot

!! ** TRANSIENT ANALİZ: ÇÖZÜM ** !!

/SOLU

dvDeltim = kgDeltim
dvAnSure = kgAnSure

!** Analiz Ayarları
ANTYPE,TRANS

! Step 1
kbc,1
trnopt,full

BETAD,kgBetad

timint,off
outres,all,all

F,2,FY,-0.491

```

```

DELTIM,0.1,0.00000000,0.00000000,
TIME,0.5

SOLVE

! Step 2
FDELE,2,ALL
DELTIM,dvDeltim,0.00000000,0.00000000,
timint,on
TIME,dvAnSure

SOLVE

FINISH

!! ** TRANSIENT ANALİZ: SONUÇLAR ** !!

/POST26

/UI,COLL,1
NUMVAR,200
SOLU,191,NCMIT
STORE,MERGE
FILLDATA,191,,,,1,1
REALVAR,191,191
FILLDATA,192,,,,0,0
FILLDATA,193,,,,1,0
FILLDATA,194,,,,-1,0
FILLDATA,195,,,,1,1
VARNAME,195,NSET
!*
NSOL,2,2,U,Y,UY_2,
STORE,MERGE
XVAR,1
PLVAR,2,
NSOL,3,2,U,X,UX_3,
STORE,MERGE

! Grafik ayarları
/GRID,1
/GTHK,GRID,1
/GTHK,CURVE,1
/GROPT,CGRID,0

/AXLAB,X,'Zaman (s) '

! Pencere ayarları
/PLOPTS,INFO,0
/PLOPTS,LEG1,0
/PLOPTS,FRAME,0
/PLOPTS,TITLE,0
/PLOPTS,DATE,0
!*

! Renkler ayarlanıyor
/COLOR,GRBAK,BLAC
/COLOR,GRID,DGRA
/COLOR,AXLAB,WHIT
/COLOR,AXES,DGRA
/COLOR,AXNU,WHIT

```

```

/COLOR, CURVE, WHIT, 1
/COLOR, CURVE, BLUE, 2
/COLOR, CURVE, RED, 3
/COLOR, CURVE, CBLU, 4
/COLOR, CURVE, MRED, 5
/COLOR, CURVE, GREE, 6
/COLOR, CURVE, ORAN, 7
/COLOR, CURVE, MAGE, 8
/COLOR, CURVE, YGRE, 9
/COLOR, CURVE, BLUE, 10

/RGB, INDEX, 100, 100, 100, 0
/RGB, INDEX, 80, 80, 80, 13
/RGB, INDEX, 60, 60, 60, 14
/RGB, INDEX, 0, 0, 0, 15

! Grafikler png dosyasına yönlendiriliyor
/SHOW, PNG, , 0
PNGR, COMP, 0, -1
PNGR, ORIENT, HORIZ
PNGR, COLOR, 2
PNGR, TMOD, 1
/GFILE, 800,

XVAR, 1
/AXLAB, Y, 'U(y) Uc Yer Degisimi (m)' !
PLVAR, 2,

/SHOW, CLOSE
/DEVICE, VECTOR, 0

! Grafikler varsayılan ayarlara döndürülüyor.

/GRID, 1
/GTHK, CURVE, 2
/AXLAB, X,
/AXLAB, Y,
/PLOPTS, INFO, 3
/PLOPTS, LEG1, 1
/PLOPTS, FRAME, 1
/PLOPTS, TITLE, 1
/PLOPTS, DATE, 1
/RGB, INDEX, 0, 0, 0, 0
/RGB, INDEX, 60, 60, 60, 13
/RGB, INDEX, 80, 80, 80, 14
/RGB, INDEX, 100, 100, 100, 15

/COLOR, DEFAULT

PLVAR, 2,

! Sonuçlar csv dosyasına kaydediliyor
*get, SonucSayisi, active, , set, nset

*SET, bTumSonuclar
*DIM, bTumSonuclar, ARRAY, SonucSayisi, 22
VGET, bTumSonuclar(1,1), 1 !time
VGET, bTumSonuclar(1,2), 2 !u_y

*CFOPEN, %outJobName(1)%-Sonuclar, 'csv'

```

```
*VWRITE, 'Zaman', 'Uy (m) '  
%C, %C  
*VWRITE, bTumSonuclar (1, 1), bTumSonuclar (1, 2)  
%G, %G  
  
*CFCLOS  
  
! Program parametreleri kaydediliyor  
PARSAV, ALL, %outJobName (1) %-parm, txt  
SAVE  
  
!* Program Sonu
```



Algoritma A.3.

Esnek bağı robot kolunda dönme hareketi sonucunda meydana gelen titreşimlerin giriş şekillendirmeye kontrolüne ilişkin deneyler için geliştirilmiş Ansys Mechanical APDL programı. Bölüm 3.4'te verilen deneyler bu program kullanılarak benzetim ortamında gerçekleştirilmiştir.

```
! Esnek Bağlı Robot Kolunun Giriş Şekillendirme ile Kontrolü için
! Deney ve Analiz Programı
! Programın çalışması, Ansys Mechanical APDL 2019 R2 Student sürümü
! üzerinde kontrol edilmiştir.
```

```
FINISH
/CLEAR
```

```
!! ***** AÇIKLAMALAR ***** !!
```

```
! 1) Bu programı "EsnekKol_GS_Analizi.inp" isminde metin dosyası
!      olarak boş bir dizinin içine kaydediniz.
! 2) Dosyayı bir metin işlem prgramı ile açınız. (Not Defteri vb.)
! 3) Aşağıda "KULLANICI GİRİŞLERİ" bölümünde verilen değişkenlere,
!      deneye uygun değerleri girip kaydediniz.
! 4) Ansys Mechanical APDL programını başlatınız.
! 5) "File Menu / Change Directory" komutu ile dosyayı kaydettiğiniz
!      dizini seçiniz.
! 6) "File Menu / Read Input from" komutu ile
!      "EsnekKol_GS_Analizi.inp" dosyasını seçip analizi başlatınız.
! 7) Deney sonuçları aşağıda açıklanan çıktı dosyalarına otomatik
!      olarak kaydedilirler.
! 8) Deney sonuçları ANSYS APDL grafik ara yüzde General PostProc,
!      TimeHist Postpro ve diğer araçlarla da analiz edilebilir.
! 9) Yeni bir deney için 2 ila 6. adımları tekrar ediniz.
!
! Deney Sonuçları Çıktı Dosyaları : Elde edilen tüm sonuçlar
! aşağıdaki dosyalara kaydedilir.
!
! DeneyDosyasiAdı-Sonuclar.csv : Deney sonucunda elde edilen zamana
! bağlı tüm sayısal değerler
! DeneyDosyasiAdı00#.png : Sonuçlara ilişkin grafikler #:0-9
! DeneyDosyasiAdı-GS_Komutlari.txt : Model sistem için hesaplanan
! şekillendirilmiş komutlar
! DeneyDosyasiAdı-Parametreler-Mod#.txt : Model sistem modal analiz
! sonuçları ve giriş şekillendirici değerleri
! DeneyDosyasiAdı-parm.txt : Deney esnasında oluşturulan tüm program
! parametreleri.
! 0TopluDeneySonuclari.txt : Çalışma dizininde yapılmış tüm
! deneylerin sonuç özetleri.
```

```
!! ***** KULLANICI GİRİŞLERİ ***** !!
```

```
! Çalışma dosyalarının kaydedildiği alt dizin adı.
kgcalismaDizini = 'deneyler'
kgDeneyNo = 1 ! Deney numarası. (Dosya adının başına yazılır)
```

```
! Analiz Ayarları
```



```
! Hesaplanan mod sayısı (GŞ dürtüleri sadece 1.mod için hesaplanır)
kgModSay = 1
kgDeltim = 5.0E-04 ! Transient analiz için Time Step Size (saniye)
kgDeltimMin = 1.0E-04! Minimum step size (saniye)
kgDeltimMax = 5.0E-04! Maksimum step size (saniye)
kgAnSure = 3 ! Transient analiz toplam süresi (saniye)
! Deneyde kullanılacak giriş şekillendirici türü
! Seçenekler: GSY, ZV, ZVD, ZVD2, ZVD3, ... ZVD9
! Şekillendirilmemiş komut için 'GSY' girilir.
! ZVDD için ZVD2, ZVDDD için ZVD3 yazılır .... en fazla ZVD9
kgAnTuru = 'ZV'
```

```
kgElmsay = 21 ! Esnek kol mesh eleman sayısı
```

```
kgAnMT=1 ! =0 : Sadece modal analiz yapılır,
! >=1: Tüm dönme analizi (Modal+Transient) yapılır.
```

```
! Konum Kontrolü
```

```
kgDurmaAcisiDrc = 30 ! Kolun dönmesi istenen açı (0-90 Derece)
kgMaksDonmeHizi = 1 ! Kolun maksimum dönme hızı (rad/s)
```

```
! Uç Kütlesi
```

```
kgM = 0.030 ! Model esnek kol uç kütlesi (kg)
! (GŞ'ler bu uç kütleli kol için hesaplanır)
kgMdeney = 0.045 ! Deney esnek kol uç kütlesi (kg)
! Hesaplanan GŞ'ler ile bu uç kütleli kol kontrol edilir.
! (Modelleme hatası istenmiyorsa "kgM" ile aynı değer girilir)
```

```
! Uç Kütlesi için zeta sönüm oranı. (Sadece birinci mod için)
```

```
kgZetaM1 = 0.010621325 ! Model esnek kolun sönüm oranı.
kgZetaM1d = 0.01190112 ! Deney esnek kolun sönüm oranı.
! (Modelleme hatası istenmiyorsa "kgZetaM1" ile aynı değer girilir)
```

```
kgAlfaliHesap = 0 ! Alphas kullanılsın mı? 0 hayır, 1 evet
```

```
! Esnek Kol Ölçü ve Malzeme Değerleri
```

```
kgEkL=0.4 ! Esnek kol Boyu L (m) - (x eksen yönünde)
kgEkH=0.02 ! Esnek kol Yüksekliği H (m) - (y eksen yönünde)
kgEkW=0.001 ! Esnek kol Kalınlığı W (m) - (z eksen yönünde)
```

```
kgEx = 6.9e10 ! Esnek kol malzemesi için Elastisite Modülü. (Pa)
```

```
kgPrxy = 0.33 ! Esnek kol malzemesi için Poisson's oranı.
```

```
kgDens = 2710 ! Esnek kol malzemesi için yoğunluk değeri. (kg/m3)
```

```
!! _____ KULLANICI GİRİŞLERİ SONU _____ !!
```

```
/INQUIRE, anaDizin, DIRECTORY ! Geçerli dizinin adı.
```

```
/MKDIR, kgcalismaDizini ! Çalışma dizini yoksa oluşturulur.
```

```
/CWD, %anaDizin(1)%\%kgcalismaDizini% ! Çalışma dizinine geçiliyor.
```

```
! Deney dosya adı.
```

```
*DIM, DeneyAdi, STRING, 32
```

```
DeneyAdi(1) = 'D%kgDeneyNo%- %kgAnTuru%-
```

```
a%kgAnSure%d%kgDurmaAcisiDrc%m%kgMdeney%w%kgMaksDonmeHizi%z'
```

```
DeneyAdiUzn = 'db'
```

```
/directory, DeneyAdiVarmi, DeneyAdi(1), DeneyAdiUzn,
```

```
*get, Dosyalarisay, parm, DeneyAdiVarmi, dim, 3
```

```

! Dosya adı önceden kullanılmışsa deney numarasına "_sira#" eklenir
AdDongusu=1
*DOWHILE, AdDongusu
  *IF, DosyalarıSay, EQ, 0, THEN
    /FILENAME, DeneyAdi (1), 1
    AdDongusu=0
  *ELSE
    *SET, DeneyAdi
    *DIM, DeneyAdi, STRING, 32
    DeneyAdi (1) = 'D%kgDeneyNo%_AdDongusu%-kgAnTuru%-
a%kgAnSure%d%kgDurmaAcisiDrc%m%kgMdeney%w%kgMaksDonmeHizi%z'
    *DEL, DeneyAdiVarmi
    *DEL, DosyalarıSay
    /directory, DeneyAdiVarmi, DeneyAdi (1), DeneyAdiUzn,
    *get, DosyalarıSay, parm, DeneyAdiVarmi, dim, 3
    AdDongusu=AdDongusu+1
  *ENDIF

*ENDDO

*DIM, cdBaslik, STRING, 72
cdBaslik (1) = 'Esnek Kol, GS:%kgAnTuru%, D:%kgDurmaAcisiDrc%drc,
W:%kgMaksDonmeHizi%rad/s, M:%kgMdeney%kg, AS:%kgAnSure%s'
! Analiz Konu Başlığı. (Maks. 72 karakter)
/TITLE, %cdBaslik (1)%

/INQUIRE, outJobName, jobname

!! ***** MODAL ANALİZ: MODELLEME ***** !!

/PREP7

!** Modelleme için değişken parametreler tanımlanıyor.

dvEkL=kgEkL
dvEkH=kgEkH
dvEkW=kgEkW
dvEx = kgEx
dvPrxy = kgPrxy
dvDens = kgDens
dvElmsay = kgElmsay
dvM = kgM

!** Esnek kol modeli oluşturuluyor.

ET, 1, BEAM188
keyopt, 1, 1, 1
keyopt, 1, 3, 2

SECTYPE, 1, BEAM, RECT, beam1, 0
SECOFFSET, CENT
SECDATA, dvEkW, dvEkH, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0

MP, ex, 1, dvEx
MP, prxy, 1, dvPrxy
MP, density, 1, dvDens

K, 1, 0, 0, 0,
K, 2, dvEkL, 0, 0,

```

```

LSTR,1,2

LESIZE,1, , ,dvElmsay, ,1, , ,1,
LMESH,1

! ** Uç kütle oluşturuluyor.

ET,2,MASS21
keyopt,1,3,2

type,2
real,2
R,2,,dvM,,,,
en,dvElmsay+1,2

! ** Elemanların serbestlik koşulları belirleniyor.

D,1,all,0
D,2,UZ,0,,dvElmsay+1,1,ROTX

FINISH

/PBC,ALL, ,1
GPROT
/replot

!! ***** MODAL ANALİZ: ÇÖZÜM ***** !!

/SOLU

! ** Modal Analiz Parametreleri

dvModSay = kgModSay

! ** Analiz Ayarları

ANTYPE,2

MODOPT,LANB,dvModSay,0,0, ,OFF
EQSLV,SPAR
MXPAND,0, , ,0
LUMPM,0
PSTRES,0

SOLVE

FINISH

!! ** MODAL ANALİZ: SONUÇLAR ve GİRİŞ ŞEKİLLENDİRİCİ HESAPLARI ** !!

/POST26

! ** Şekillendiriciler için Temel Parametreler

dvDeltim = kgDeltim
dvDeltimMin = kgDeltimMin
dvDeltimMax = kgDeltimMax
dvAnSure = kgAnSure

```

```

Pi=acos(-1)
GS_t1 = 0 ! İlk dürtü zamanı: t1 = 0

dvDurmaAcisiRad = kgDurmaAcisiDrc*Pi/180 ! Kol durma açısı (radyan)
dvMaksDonmeHizi = kgMaksDonmeHizi

*DIM, MFREQ,, dvModSay      ! Modal frekans değerleri f (Hz)
*DIM, WN,, dvModSay        ! Doğal frekans değerleri Wn (rad/s)
*DIM, Zeta,, dvModSay      ! Zeta sönüm oranı değerleri
*DIM, WD,, dvModSay        ! Sönümlü frekans değerleri Wd (rad/s)
*DIM, Ka,, dvModSay        ! K kat sayısı
*DIM, BASLIK, CHAR, dvModSay ! Çıktı dosyası için mod ibaresi

! Tüm modlar için temel GŞ parametreleri hesaplanıyor.
*DO, i, 1, dvModSay
  *GET, MFREQ(i), MODE, i, FREQ
  WN(i) = MFREQ(i)*2*Pi
  Zeta(i) = kgZetaM1
  WD(i) = WN(i)*((1-Zeta(i)**2)**0.5)
  Ka(i) = EXP((-Zeta(i)*Pi)/((1-Zeta(i)**2)**0.5))
  BASLIK(i) = 'Mod %i%: '
*ENDDO

! ** Şekillendirmesiz Dönme Hareketi

hvGSy_t2=dvDurmaAcisiRad/dvMaksDonmeHizi

*DIM, aTablo_GSy, TABLE, 3, 1, 1, TIME
aTablo_GSy(1,0)=0, hvGSy_t2, dvAnSure
aTablo_GSy(1,1)=0, dvDurmaAcisiRad, dvDurmaAcisiRad

! ** ZV, ZVD Serisi Şekillendirici Hesapları

*SET, Pascal
*DIM, Pascal,, 10, 11, 1
Pascal(1,1)=1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1
Pascal(1,2)=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10
Pascal(2,3)=1, 3, 6, 10, 15, 21, 28, 36, 45
Pascal(3,4)=1, 4, 10, 20, 35, 56, 84, 120
Pascal(4,5)=1, 5, 15, 35, 70, 126, 210
Pascal(5,6)=1, 6, 21, 56, 126, 252
Pascal(6,7)=1, 7, 28, 84, 210
Pascal(7,8)=1, 8, 36, 120
Pascal(8,9)=1, 9, 45
Pascal(9,10)=1, 10
Pascal(10,11)=1

*SET, ZVsAn
*DIM, ZVsAn,, 10, 11, dvModSay

*DO, k, 1, dvModSay

  myK = Ka(k)

  *DO, i, 1, 10

    Klust = i
    Kpayda = 1/((1+myK)**Klust)

```

```

        *DO, j, 1, 11

            Kust = j-1
            Kpay = myK**Kust
            Kppcarp = Kpay*Kpayda
            ZVsAn(i, j, k) = Pascal(i, j) * Kppcarp

        *ENDDO

    *ENDDO

*ENDDO

*SET, ZVsAnTran
*DIM, ZVsAnTran, , 11, 10, dvModSay

*DO, i, 1, dvModSay
    *MFUN, ZVsAnTran(1, 1, i), TRAN, ZVsAn(1, 1, i)
*ENDDO

*SET, ZVsT
*DIM, ZVsT, , 11, dvModSay

*DO, i, 1, dvModSay
    tcarp = Pi/WD(i)
    ZVsT(1, i) = 0, tcarp, 2*tcarp, 3*tcarp, 4*tcarp, 5*tcarp,
6*tcarp, 7*tcarp, 8*tcarp, 9*tcarp, 10*tcarp

*ENDDO

*SET, ZVsKod
*DIM, ZVsKod, CHAR, 10, 2
ZVsKod(1, 1) = '1', '2', '3', '4', '5', '6', '7', '8',
'9', '10'
ZVsKod(1, 2) =
'ZV', 'ZVD', 'ZVD2', 'ZVD3', 'ZVD4', 'ZVD5', 'ZVD6', 'ZVD7', 'ZVD8', 'ZVD9'
dvAnTuru = kgAnTuru
KullanGSno=0

! ** ZV şekillendiriciler ile temel komut konvolüsyonu
! Sonuçların yazdırılacağı çıktı dosyası hazırlanıyor

*CFOPEN, %outJobName(1) %-GS_Komutlari, txt

    *VWRITE,
    (/, '** Temel Komut :', '/', '          tn      |
Kn', '/', 37('-'))

    *VWRITE, SEQU, aTablo_GSy(1, 0), aTablo_GSy(1, 1)
    (F3.0, ' ', F12.9, ' | ', F12.9)

    *VWRITE
    (37('-'))

*VWRITE
(/, '** Sekillendirici Uygulanmış Komutlar :', '/')

! Konvolüsyon işlemleri

```

```

*DIM, aKomutZmn, , 2, 1
aKomutZmn(1) = 0, hvGSy_t2
*DIM, aKomutAci, , 2, 1
aKomutAci(1) = 0, dvDurmaAcisiRad

*DO, i, 1, 10

    iDurtuSay = (2*(i+1))+1
    *SET, aTABLO_%ZVsKod(i,2)%
    *DIM, aTABLO_%ZVsKod(i,2)%, TABLE, iDurtuSay, 1, 1, TIME
    *SET, aDurtuZmn
    *DIM, aDurtuZmn, ARRAY, iDurtuSay, 2, 1

    SDSay = i+1
    kSatirSay = 1

    *DO, j, 1, 2
        *DO, k, 1, SDSay
            aDurtuZmn(kSatirSay) = aKomutZmn(j) + ZVsT(k,1)
            kSatirSay = kSatirSay+1
        *ENDDO
    *ENDDO

    aDurtuZmn(kSatirSay) = dvAnSure
    *SET, SiraliDizi
    *MOPER, SiraliDizi, aDurtuZmn, SORT, aDurtuZmn(1,1)

    *DO, m, 1, SDSay
        SekA1 = 0
        SekA2 = ZVsAnTran(m,i)*dvDurmaAcisiRad
        SekT1 = aKomutZmn(1,1) + ZVsT(m,1)
        SekT2 = aKomutZmn(2,1) + ZVsT(m,1)

        *DO, n, 1, kSatirSay
            *IF, aDurtuZmn(n,1), LE, SekT1, THEN
                aDurtuZmn(n,2) = aDurtuZmn(n,2) + (SekA1)
            *ELSEIF, aDurtuZmn(n,1), GT, SekT1, and, aDurtuZmn(n,1), LT, SekT2
                aDurtuZmn(n,2) = aDurtuZmn(n,2) + ((aDurtuZmn(n,1) -
                SekT1) / (SekT2 - SekT1) * SekA2)
            *ELSE
                aDurtuZmn(n,2) = aDurtuZmn(n,2) + (SekA2)
            *ENDIF

        *ENDDO

    *ENDDO

    *MFUN, aTABLO_%ZVsKod(i,2)%(1,0), COPY, aDurtuZmn(1)
    *MFUN, aTABLO_%ZVsKod(i,2)%(1,1), COPY, aDurtuZmn(1,2)

! Şekillendirilmiş Komut Tabloları çıktı dosyasına yazdırılıyor.

*VLEN, 1
*VWRITE, ZVsKod(i,2)
(/, a5, '          tn      |          Kn', /, 37('-'))

*VWRITE, SEQU, aTABLO_%ZVsKod(i,2)%(1,0), aTABLO_%ZVsKod(i,2)%(1,1)
(F3.0, ' ', F12.9, ' ' | ' ', F12.9)

```

```

*VWRITE
  (37 ('-'))

*IF, dvAnTuru, EQ, ZVsKod (i, 2), THEN
  KullanGSno=i
*ENDIF

*ENDDO

*CFCLOS

! ** Modal Analiz Sonuçları ve GS Katsayıları Çıktı Dosyalarına
Yazılıyor

*DO, k, 1, dvModSay

  *CFOPEN, %outJobName (1) %-Parametreler-Mod%k%, txt

  *VWRITE
    (/ , '** Tum Modlar icin Hesaplanan Temel Sekillendirici
Parametreleri: ', /)

  *VWRITE
    ('          Frekans (Hz)          Wn (rad/s)          zeta
Wd (rad/s)          K', /, 89 ('-'))

  *VWRITE, BASLIK (1), MFREQ (1), WN (1), Zeta (1), WD (1), Ka (1)
    (A8, F15.9, '          ', F15.9, '          ', F12.9, '          ', F15.9, '          ', F12.9)

  *VWRITE, k
    (89 ('-'), /, /, '** ZV Serisi Sekillendiricilerin ', F2.0, ' Mod icin
Zaman-Genlik (t-A) degerleri: ', /)

  *DO, i, 1, 10

    *VLEN, 1
    *VWRITE, ZVsKod (i, 2)
      (/ , a5, '          tn          |          An', /, 37 ('-'))

    *VLEN, i+1
    *VWRITE, SEQU, ZVsT (1, k), ZVsAnTran (1, i, k)
      (F3.0, '          ', F12.9, '          |          ', F12.9)

    *VWRITE
      (37 ('-'))

  *ENDDO

*CFCLOS
*ENDDO

FINISH

!! ** DENEY SİSTEMİ İÇİN MODEL DEĞİŞİKLİKLERİ ** !!

! Önceki bölümde modellenen sistemin modal analizi yapıldı.
! Frekans ve diğer parametreler hesaplanarak ve buna uygun
! GŞ'ler oluşturuldu.
! Bu bölümde, deneyde kullanılacak olan modellenenden farklı
! uç kütleli esnek kol oluşturuluyor.

```

```

/PREP7

! ** Değiştirilmiş sistem için değişken parametreler tanımlanıyor

dvMdeney = kgMdeney
R,2,,dvMdeney,,,,

FINISH

!! ** DEĞİŞTİRİLMİŞ DENEY SİSTEMİNİN MODAL ANALİZİ: ÇÖZÜM ** !!

/SOLU

! ** Modal analiz için gerekli parametreler ve ayarlar

dvModSay = kgModSay

ANTYPE,2

MODOPT,LANB,dvModSay,0,0,,OFF
EQSLV,SPAR
MXPAND,0,,0
LUMPM,0
PSTRES,0

SOLVE

FINISH

!! ** DEĞİŞTİRİLMİŞ DENEY SİSTEMİNİN MODAL ANALİZİ: SONUÇLAR ** !!

/POST26

*DIM,MASdeney,,dvModSay,5
*DO,i,1,dvModSay

    *GET,MASdeney(i,1),MODE,i,FREQ
    MASdeney(i,2) = MASdeney(i,1)*2*Pi ! WN_deny(Mod i)
    MASdeney(i,3) = kgZetaM1d ! Zeta_deny
    MASdeney(i,4) = MASdeney(i,2)*((1-MASdeney(i,3)**2)**0.5)
! WD_deny(Mod i)
    MASdeney(i,5) = EXP((-MASdeney(i,3)*Pi)/((1-
MASdeney(i,3)**2)**0.5)) ! Ka_deny(Mod i)

*ENDDO

FINISH

!! ***** TRANSİENT ANALİZ: MODELLEME ***** !!

/PREP7

DDELE,1,ALL

*GET,NodeCnt,NODE,0,COUNT
NodeNr = NodeCnt+1
N,NodeNr,0,0,0

```



```
local,12,0,0,,0,,0,,0,,0,,0.
csys,0
```

```
ET,3,TARGE170
type,3
real,3
mat,3
keyopt,3,2,1
keyopt,3,4,111111
tshap,pilo
en,dvElmsay+2,NodeNr
tshap
en,dvElmsay+3,NodeNr,1
csys,12
nrotat,NodeNr
csys,0
```

```
ET,4,MPC184
keyopt,4,1,6
keyopt,4,4,1
sectype,4,joint, revo, TESTREVO
secjoin,,12,12
mat,4
real,4
type,4
secnum,4
en,dvElmsay+4,,NodeNr
```

```
FINISH
```

```
!! ** TRANSIENT ANALİZ: ÇÖZÜM ** !!
```

```
/SOLU
```

```
! Model sistem mod 1 için Beta sönüm katsayısı değişkeni
hvBetad = 2*Zeta(1)/WN(1)
```

```
!** Analiz Ayarları
```

```
ANTYPE,TRANS
```

```
nlgeom,on
kbc,1
eqslv,sparse,,,,,1
cntr,print,1
trnopt,full,,,,,hht
```

```
*IF,kgAlfaliHesap,GT,0,THEN
```

```
hvBetaddeney = MASdeney(1,3)/MASdeney(1,2) ! Deneş sis. beta değeri
```

```
hvAlfaddeney = MASdeney(1,3)*MASdeney(1,2) ! Deneş sis. alfa değeri
```

```
BETAD,hvBetaddeney
```

```
ALPHAD,hvAlfaddeney
```

```
*ELSE
```

```
hvBetaddeney = 2*MASdeney(1,3)/MASdeney(1,2)! Deneş sis. beta değeri
```

```
BETAD,hvBetaddeney
```

```
*ENDIF
```

```
AUTOTS,on
```

```
DELTIM,dvDeltim,dvDeltimMin,dvDeltimMax,
```

```

tintp,0.1
timint,on

outres,all,all

! ** Transient analiz adımlar ve Çözüm

*SET,TA_Yukler
*GET,TSatirSay,PARM,aTABLO_%dvAnTuru%,DIM,x
*DIM,TA_Yukler,TABLE,TSatirSay,1,1,TIME
*mfun,TA_Yukler(0,0),copy,aTABLO_%dvAnTuru%(0,0)

*SET,TA_Zamanlar
DZamanSay = TSatirSay - 1
*DIM,TA_Zamanlar,,DZamanSay,2
*MFUN,TA_Zamanlar(1,1),COPY,TA_Yukler(2,0)

dj,dvElmsay+4,rotz,%TA_Yukler%

*IF,kgAnMT,GT,0,THEN ! Transient analiz yapılınsın mı?

*DO,i,1,DZamanSay

    hv_StepZamani = TA_Zamanlar(i,1)
    TIME,hv_StepZamani
    SOLVE

*ENDDO

FINISH

!! ***** TRANSIENT ANALİZ: SONUÇLAR ***** !!

/POST26

hvKolUcuX0=dvEkL ! Esnek kol boyu
hvKolUcuY0=0 ! Kol ucu başlangıç y koordinatı

hvTheta1=dvDurmaAcisiRad
hvKolUcuY1=dvEkL*SIN(hvTheta1)
hvKolUcuX1=dvEkL*COS(hvTheta1)

/UI,COLL,1
NUMVAR,200
SOLU,191,NCMIT
STORE,MERGE
FILLDATA,191,,,,1,1
REALVAR,191,191
FILLDATA,192,,,,0,0
FILLDATA,193,,,,1,0
FILLDATA,194,,,,-1,0
FILLDATA,195,,,,1,1
VARNAM,195,NSET

NSOL,2,2,U,Y, UY_2,
STORE,MERGE

NSOL,3,2,U,X, UX_3,
STORE,MERGE

```

```

NSOL,4,1,ROT,Z, ROTZ_4,
STORE,MERGE

NSOL,5,1,OMG,Z, OMGZ_5,
STORE,MERGE

NSOL,6,1,DMG,Z, DMGZ_6,
STORE,MERGE

*get,SonucSayisi,active,,set,nset

*SET,bTumSonuclar
*DIM,bTumSonuclar,ARRAY,SonucSayisi,22
VGET,bTumSonuclar(1,1),1 !time
VGET,bTumSonuclar(1,2),2 !u_y = global y2
VGET,bTumSonuclar(1,3),3 !u_x

*VOPER,bTumSonuclar(1,4),bTumSonuclar(1,3),ADD,hvKolUcuX0, , ,
!global x2 = x0+u_x
*VOPER,bTumSonuclar(1,5),bTumSonuclar(1,2),DIV,bTumSonuclar(1,4)
! y2/x2

*DO,i,1,SonucSayisi

*IF,bTumSonuclar(i,4),LT,0,THEN
    bTumSonuclar(i,6)=PI+(atan(bTumSonuclar(i,5)))
    ! Theta2 = pi+atan(y2/x2)
    bTumSonuclar(i,8)=2 ! kol ucu 2.bölgede
*ELSE
    bTumSonuclar(i,6)=atan(bTumSonuclar(i,5)) ! Theta2 = atan(y2/x2)
    bTumSonuclar(i,8)=1 ! kol ucu 1.bölgede
*ENDIF

*ENDDO

*VOPER,bTumSonuclar(1,7),bTumSonuclar(1,6),SUB,hvTheta1, , ,
! ThetaFark = Theta2-Theta1
*VFUN,bTumSonuclar(1,9),SIN,bTumSonuclar(1,7), , , ,
! Sin(ThetaFark)
*VFUN,bTumSonuclar(1,10),PWR,bTumSonuclar(1,2),2, , , ! y2^2
*VFUN,bTumSonuclar(1,11),PWR,bTumSonuclar(1,4),2, , , ! x2^2
*VOPER,bTumSonuclar(1,12),bTumSonuclar(1,10),ADD,bTumSonuclar(1,11),
, , ! y2^2 + x2^2
*VFUN,bTumSonuclar(1,13),SQRT,bTumSonuclar(1,12), , , ,
! h2 = SQRT(y2^2 + x2^2)
*VOPER,bTumSonuclar(1,14),bTumSonuclar(1,9),MULT,bTumSonuclar(1,13),
, , ! Tg = Sin(ThetaFark) * h2

VGET,bTumSonuclar(1,15),4
! RotZ = Kol eklemine seçili andaki dönme açısı
*VOPER,bTumSonuclar(1,16),bTumSonuclar(1,6),SUB,bTumSonuclar(1,15),
, , ! ThetaFarkAdim = Theta2-RotZ
*VFUN,bTumSonuclar(1,17),SIN,bTumSonuclar(1,16), , , ,
! Sin(ThetaFarkAdim)
*VOPER,bTumSonuclar(1,18),bTumSonuclar(1,17),MULT,bTumSonuclar(1,13)
, , , ! YTg = Sin(ThetaFarkAdim) * h2

```

```

VPUT, bTumSonuclar(1,4), 7,,, 'x2'
VPUT, bTumSonuclar(1,7), 12,,, 'Theta fark'
VPUT, bTumSonuclar(1,14), 10,,, 'Tg(t)'
VPUT, bTumSonuclar(1,18), 11,,, 'YTg(t)'

! Analiz başından sonuna yörünge takibi

*GET, bMaksYTgD, VARI, 11, EXTREM, VMAX, ,
*GET, bMaksYTgT, VARI, 11, EXTREM, TMAX, ,
*GET, bMinYTgD, VARI, 11, EXTREM, VMIN, ,
*GET, bMinYTgT, VARI, 11, EXTREM, TMIN, ,

! Durduktan sonra artık titreşim genliği

*GET, aMaksTgD, VARI, 10, EXTREM, VMAX, ,
*GET, aMaksTgT, VARI, 10, EXTREM, TMAX, ,
aMaksTgP=(aMaksTgD/hvKolUcuY1)*100

*GET, aMaksUy2D, VARI, 2, REAL, aMaksTgT, ,
aMaksUy2P=((aMaksUy2D-hvKolUcuY1)/hvKolUcuY1)*100

*GET, aMaksThetaFD, VARI, 12, REAL, aMaksTgT, ,
aMaksThetaFP=(aMaksThetaFD/hvTheta1)*100

VGET, bTumSonuclar(1,19), 5 !   OMGZ
VGET, bTumSonuclar(1,20), 6 !   DMGZ

*VITRP, bTumSonuclar(1,21), TA_Yukler(1,1), bTumSonuclar(1,1)
*VITRP, bTumSonuclar(1,22), aTablo_GSy(1,1), bTumSonuclar(1,1)

VPUT, bTumSonuclar(1,21), 8,,, '%dvAnTuru %_Komut'
VPUT, bTumSonuclar(1,22), 9,,, 'Temel Komut'

! Aşağıdaki değerler kontrol edilmek istediğinde
! açıklama satırı ünlemi kaldırılarak aktif hale getirilebilirler.
! Böylece ilgili değer TimeHist penceresinde gösterilebilir.

! VPUT, bTumSonuclar(1,5), 13,,, 'y2/x2'
! VPUT, bTumSonuclar(1,6), 14,,, 'Theta 2'
! VPUT, bTumSonuclar(1,8), 15,,, 'Bolge Kosulu'
! VPUT, bTumSonuclar(1,9), 16,,, 'sin(ThetaFark)'
! VPUT, bTumSonuclar(1,10), 17,,, 'y2^2'
! VPUT, bTumSonuclar(1,11), 18,,, 'x2^2'
! VPUT, bTumSonuclar(1,12), 19,,, 'y2^2+x2^2'
! VPUT, bTumSonuclar(1,13), 20,,, 'h2'

! Seçilen veriler csv dosyasına yazdırılıyor.

*CFOPEN, %outJobName(1)%-Sonuclar, 'csv'

*VWRITE, 'Zaman', 'Uy (m)', 'Ux (m)', 'x2 (m)', 'GSli Komut', 'Temel
Komut', 'Dönme Açısı (rad)', 'Açısal Hız (rad/s)', 'Açısal İvme
(rad/s^2)', 'Tg(t)', 'YTg(t)', 'Theta2'
%C, %C, %C, %C, %C, %C, %C, %C, %C, %C, %C, %C
*VWRITE, bTumSonuclar(1,1), bTumSonuclar(1,2), bTumSonuclar(1,3), bTumSo
nuclar(1,4), bTumSonuclar(1,21), bTumSonuclar(1,22), bTumSonuclar(1,15)
, bTumSonuclar(1,19), bTumSonuclar(1,20), bTumSonuclar(1,14), bTumSonucl
ar(1,18), bTumSonuclar(1,6)
%G, %G, %G, %G, %G, %G, %G, %G, %G, %G, %G, %G

```

***CFCLOS**

XVAR, 1
PLVAR, 2,

!* BİLGİLENDİRME

!* TimeHist Postpro Variable isimleri ve açıklamaları

! 2, UY_2 ! Node 2 (Kol ucu) y eksenindeki değişim
! 3, UX_3 ! Node 2 (Kol ucu) x eksenindeki değişim
! 4, ROTZ_4 ! Node 1 (Kol eklemi) için dönme açısı
! 5, OMGZ_5 ! Node 1 (Kol eklemi) için açısal hız
! 6, DMGZ_6 ! Node 1 (Kol eklemi) için dönme ivmesi
! 7, x2 ! Node 2 (Kol ucu) x koordinatı
! 8, GŞ'li Komut
! 9, Temel Komut
! 10, Tg(t)
! 11, YTg(t)
! 12, Theta fark

!* Dizi değerleri açıklamaları

! bTumSonuclar(1,1) ! time
! bTumSonuclar(1,2) ! u_y = global y2
! bTumSonuclar(1,3) ! u_x
! bTumSonuclar(1,4) ! global x2 = x0+u_x
! bTumSonuclar(1,5) ! y2/x2
! bTumSonuclar(1,6) ! Theta2
! bTumSonuclar(1,7) ! ThetaFark = Theta2-Theta1
! bTumSonuclar(1,8) ! x2 0'dan büyük mü küçük mü kontrol değişkeni
! bTumSonuclar(1,9) ! Sin(ThetaFark)
! bTumSonuclar(1,10) ! y2^2
! bTumSonuclar(1,11) ! x2^2
! bTumSonuclar(1,12) ! y2^2 + x2^2
! bTumSonuclar(1,13) ! h2 = SQRT(y2^2 + x2^2)
! bTumSonuclar(1,14) ! Tg = Sin(ThetaFark) * h2
! bTumSonuclar(1,15) ! RotZ =Kol ekleminin seçili andaki dönme açısı
! bTumSonuclar(1,16) ! ThetaFarkAdim = Theta2-RotZ
! bTumSonuclar(1,17) ! Sin(ThetaFarkAdim)
! bTumSonuclar(1,18) ! YTg = Sin(ThetaFarkAdim) * h2
! bTumSonuclar(1,19) ! OMGZ
! bTumSonuclar(1,20) ! DMGZ
! bTumSonuclar(1,21) ! Şekillendirilmiş Komut Yük Tablosu
! bTumSonuclar(1,22) ! Şekillendirilmemiş Temel Komut Yük Tablosu

!* Grafik Dosyaları Oluşturuluyor

/GRID, 1
/GTHK, GRID, 1
/GTHK, CURVE, 2
/GROPT, CGRID, 0

/AXLAB, X, 'Zaman (s)'

! Pencere ayarları
/PLOPTS, INFO, 0
/PLOPTS, LEG1, 0
/PLOPTS, FRAME, 0

```

/PLOPTS, TITLE, 0
/PLOPTS, DATE, 0

! Renk ayarları
/COLOR, GRBAK, BLAC
/COLOR, GRID, DGRA
/COLOR, AXLAB, WHIT
/COLOR, AXES, DGRA
/COLOR, AXNU, WHIT
/COLOR, CURVE, WHIT, 1
/COLOR, CURVE, BLUE, 2
/COLOR, CURVE, RED, 3
/COLOR, CURVE, CBLU, 4
/COLOR, CURVE, MRED, 5
/COLOR, CURVE, GREE, 6
/COLOR, CURVE, ORAN, 7
/COLOR, CURVE, MAGE, 8
/COLOR, CURVE, YGRE, 9
/COLOR, CURVE, BLUE, 10

/RGB, INDEX, 100, 100, 100, 0
/RGB, INDEX, 80, 80, 80, 13
/RGB, INDEX, 60, 60, 60, 14
/RGB, INDEX, 0, 0, 0, 15

! Grafikler png dosyasına yönlendiriliyor

/SHOW, PNG, , 0
PNGR, COMP, 0, -1
PNGR, ORIENT, HORIZ
PNGR, COLOR, 2
PNGR, TMOD, 1
/GFILE, 800,

XVAR, 1

/GTHK, CURVE, 2

/AXLAB, Y, 'U(y) Uc Yer Degisimi (m) '
PLVAR, 2,

/AXLAB, Y, 'U(x) Uc Yer Degisimi (m) '
PLVAR, 3,

/AXLAB, Y, 'R(z) Donme Acisi (rad) '
PLVAR, 4,

/AXLAB, Y, 'W(z) Acisal Hiz (rad/s) '
PLVAR, 5,

/AXLAB, Y, 'A(z) Acisal Ivme (rad/s^2) '
PLVAR, 6,

/AXLAB, Y, 'Artik Titresim Genligi (m) '
PLVAR, 10,

/AXLAB, Y, 'Titresim Genligi (m) '
PLVAR, 11,

/AXLAB, Y, '%dvAnTuru% Sek. Komut (rad) '

```

```

PLVAR, 8,

/AXLAB, Y, 'Temel Komut (rad)'
PLVAR, 9,

/AXLAB, Y, 'Komutlar (rad)'
PLVAR, 9, 8,

/SHOW, CLOSE
/DEVICE, VECTOR, 0

! Grafikler varsayılan ayarlara döndürülüyor.
/GRID, 1
/GTHK, CURVE, 2
/AXLAB, X,
/AXLAB, Y,
/PLOPTS, INFO, 3
/PLOPTS, LEG1, 1
/PLOPTS, FRAME, 1
/PLOPTS, TITLE, 1
/PLOPTS, DATE, 1
/RGB, INDEX, 0, 0, 0, 0
/RGB, INDEX, 60, 60, 60, 13
/RGB, INDEX, 80, 80, 80, 14
/RGB, INDEX, 100, 100, 100, 15
/COLOR, DEFAULT

!* Analiz Bbilgileri ve genel sonuçlar çıktı dosyasına yazılıyor.

*CFOPEN, %outJobName(1) %-AnalizBilgileri, txt

*VWRITE, cdBaslik(1), outJobName(1)
Analiz Adı : %C %/Dosya Adı : %C %/

*VWRITE
** Analiz Değerleri%/
*VWRITE, dvAnTuru, dvDurmaAcisiRad, kgDurmaAcisiDrc
Uygulanan GŞ : %C %/Durma Açısı : %G rad = %G°
*VWRITE, dvMaksDonmeHizi, dvAnSure
Maks. Dönme Hızı : %G rad/s %/Analiz Süresi : %G s%/
*VWRITE, dvElmsay
S. Eleman Sayısı : %G (Esnek kol FEM eleman sayısı)
*VWRITE, dvDeltim
Adım Süresi : %F s (Transient analiz için Time Step Size)
*VWRITE, kgZetaM1
Sönüm Oranı : %F (Model sisteminin sönüm oranı)
*VWRITE, kgZetaM1d
Sönüm Oranı Dny : %F (Deney sisteminin sönüm oranı)
*VWRITE, hvBetad
Beta : %F (Modelin sönümlenme oranı için Rijitlik Matrisi Çarpanı
= 2*zeta/Wn)
*IF, kgAlfaliHesap, GT, 0, THEN
*VWRITE, hvAlfaddeney
Alfa Deney S. : %F (Deney sistemi Alfa değeri =
zeta_deney*Wn_deney)
*VWRITE, hvBetaddeney
Beta Deney S. : %F (Deney sistemi Beta değeri =
zeta_deney/Wn_deney)
*ELSE
*VWRITE, hvBetaddeney

```

```

Beta Deney S. : %F (Deney sistemi Beta değeri =
2*zeta_deney/Wn_deney)
*ENDIF

*VWRITE
%/** Esnek Kol Bilgileri%/
*VWRITE, dvEkL, dvEkH, dvEkW
L Kol Boyu : %F m %/H Kol Yüksekliği : %F m %/W Kol Kalınlığı :
%F m%/

*VWRITE, dvEx, dvPrxy, dvDens
Elastisite Mdl. : %G Pa %/Poisson's oranı : %G %/Yoğunluk : %G
kg/m3

*VWRITE
%/** Kol Ucu Ağırlığı%/
*VWRITE, dvM
Modelleme : %F kg (GŞ'nin hesaplandığı kol ucu noktasal ağırlığı)
*VWRITE, dvMdeney
Deney : %F kg (Hesaplanan GŞ uygulandığında kolun ucundaki
noktasal deney ağırlığı)

*IF, dvM, EQ, 0, THEN
hvMoran=0
*ELSE
hvMoran=dvMdeney/dvM
*ENDIF

*VWRITE, hvMoran
Oran : %F (Normalize Ağırlık = Deney A. / Model A.)

*VWRITE
%/** Modal Frekanslar%/
*VWRITE
('Model Sistem : ', $)
*VWRITE, SEQU, MFREQ(1)
('Mod ', F2.0, ':', F15.9, ' ', $)
*VWRITE
(/, 'Deney Sistemi : ', $)
*VWRITE, SEQU, MASdeney(1, 1)
('Mod ', F2.0, ':', F15.9, ' ', $)
*VWRITE
(/, 'Normalize Frek. : ', $)
*SET, NORMFREQ
*DIM, NORMFREQ, , dvModSay
*VOPER, NORMFREQ(1), MASdeney(1, 1), DIV, MFREQ(1), , ,
*VWRITE, SEQU, NORMFREQ(1)
('Mod ', F2.0, ':', F15.2, ' ', $)

*VWRITE
%/%/** Kol Ucu Oturma Yeri%/
*VWRITE, hvKolUcuY1, hvKolUcuX1
y Global Koord. : %F m %/x Global Koord. : %F m

*VWRITE
%/** En Büyük Artık Titreşim Genliği Tg(t) (Hareket tamamlandıktan
sonra) %/
*VWRITE, aMaksTgT, aMaksTgD, aMaksTgP, aMaksUy2P, aMaksThetafP
Oluşma zamanı : %F s %/Genlik Değeri : %F m %/Aşım Oranı :
%%5.2F (Tg/y1) | %%5.2F (Uy2-y1)/y1 | %%5.2F (Thetaf/Theta1)

```



```

*VWRITE
%/** Hareket Esnasında ve Sonrasında Oluşan Titreşim Genlikleri
YTg (t) %/
*VWRITE,bMaksYTgT,bMaksYTgD
Pozitif Yönde En Büyük Titreşim%/%/Oluşma zamanı : %F s %/Genlik
Değeri : %F m
*VWRITE,bMinYTgT,bMinYTgD
%/Negatif Yönde En Büyük Titreşim%/%/Oluşma zamanı : %F s %/Genlik
Değeri : %F m

*VWRITE
(/, '** Sistem Modeli Mod Frekansı ve İlişkili Değerler',/)

*VWRITE
('          Frekans (Hz)          Wn (rad/s)          zeta          Wd
(rad/s)          K',/,89('-'))
*VLEN,1
*VWRITE,BASLIK(1),MFREQ(1),WN(1),Zeta(1),WD(1),Ka(1)
(A8,F15.9,' ',F15.9,' ',F12.9,' ',F15.9,' ',F12.9,/,89('-'))

*IF,KullanGSno,NE,0,THEN

*VWRITE,dvAnTuru
%/** Mod 1 için %C Şekillendirici Dürtü Değerleri

*VLEN,1
*VWRITE,dvAnTuru
(/,a5,'          tn          |          An',/,37('-'))

*VLEN,KullanGSno+1
*VWRITE,SEQU,ZVsT(1,1),ZVsAnTran(1,KullanGSno,1)
(F3.0,' ',F12.9,'          |          ',F12.9)

*VWRITE
(37('-'))

*ENDIF

*IF,dvAnTuru,EQ,'GSy',THEN

KonvBaslik='%dvAnTuru%'

*VWRITE
%/** Komut Bilgileri%/

*VWRITE
Kullanılan Komut: Şekillendirilmemiş Temel Komut

*ELSE

KonvBaslik='TK-%dvAnTuru%'

*VWRITE
%/** Temel Komut Değerleri%/

*VWRITE,
('TK          tn (s)          |          Kn (rad)',/,37('-'))

*VWRITE,SEQU,aTABLO_GSy(1,0),aTABLO_GSy(1,1)

```

```

(F3.0, ' ', F12.9, ' | ', F12.9)

*VWRITE
(37 ('-'))

*VWRITE
%/** Analizde Kullanılan Konvolüsyonlu Komut Bilgileri*/

*VWRITE, dvAnTuru
Kullanılan Komut: %C GŞ ile Şekillendirilmiş Komut
*ENDIF

*VLEN, 1
*VWRITE, KonvBaslik
(/, a7, ' tn (s) | Kn (rad) ', /, 37 ('-'))

*VWRITE, SEQU, aTABLO_ %dvAnTuru% (1, 0), aTABLO_ %dvAnTuru% (1, 1)
(F3.0, ' ', F12.9, ' | ', F12.9)

*VWRITE
(37 ('-'))

*CFCLOS

!* Toplu sonuç dosyası yazılıyor.

*SET, DosyaAdiTDS
*DIM, DosyaAdiTDS, STRING, 32
DosyaAdiTDS (1) = '0TopluDeneySonuclari'
DosyaUznTDS = 'txt'

*DEL, DosyaVarmiTDS
*DEL, DosyaSayTDS
/directory, DosyaVarmiTDS, DosyaAdiTDS (1), DosyaUznTDS,
*get, DosyaSayTDS, parm, DosyaVarmiTDS, dim, 3

*CFOPEN, DosyaAdiTDS (1), DosyaUznTDS, , APPEND

*IF, DosyaSayTDS, EQ, 0, THEN
*VWRITE
Deney Adı, Ağırlık Model, Ağırlık Deney, Normal Ağırlık, Frekans
Mdl., Frekans Dny., Normal Frek., Tg (t), YTg (t)
*ENDIF

! Deney Adı, Ağırlık Model, Ağırlık Deney, Normal Ağırlık,
! Frekans Mdl., Frekans Dny., Normal Frek., Tg (t), YTg (t), %Ty (t),
! %Uy2, %Thetaf
*VWRITE, outJobName (1), dvM, dvMdeney, hvMoran, MFREQ (1), MASdeney (1, 1), NO
RMFREQ (1), aMaksTgD, bMaksYTgD
%C, %F, %F, %F, %F, %F, %F, %F, %F

*CFCLOS
*ENDIF ! kgAnMT, Transient analiz kontrolü sonu.

/PLOPTS, DATE, 0
PARSAV, ALL, %outJobName (1) %-parm, txt
SAVE

!* Program Sonu

```

ÖZGEÇMİŞ

Ortaokul ve lise eğitimini İstek Vakfı Özel Belde Deneme Lisesinde tamamladıktan sonra sırasıyla Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği ve Anadolu Üniversitesi İşletme bölümlerinden mezun olmuştur. Öğrencilik yıllarından itibaren bilişim sektöründe çalışmıştır.

