



**BİR FÜZENİN OTOPİLOTU İÇİN DOĞRUSAL OLMAYAN KAYAN
SEKTÖR KONTROLCÜ TASARIMI**

Gökçe DEDE

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EYLÜL 2019

Gökçe DEDE tarafından hazırlanan “BİR FÜZENİN OTOPİLOTU İÇİN DOĞRUSAL OLMAYAN KAYAN SEKTÖR KONTROLCÜ TASARIMI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Metin Uymaz SALAMCI

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. Mehmet Arif ADLI

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Doç. Dr. Arif ANKARALI

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 20/09/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Gökçe DEDE

20/09/2019

BİR FÜZENİN OTOPİLOTU İÇİN DOĞRUSAL OLMAYAN KAYAN SEKTÖR
KONTROLCÜ TASARIMI
(Yüksek Lisans Tezi)

Gökçe DEDE

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Eylül 2019

ÖZET

Füzenin uçuşu sırasında çevresel etkiler veya füzenin dinamiğinden dolayı oluşan bozucu etkiler oto-pilota beklenmeyen sinyaller yollayabilmektedir. Oluşan bu istenmeyen etkilerin uçuş esnasında kontrol altında tutulabilmesi için günümüze kadar gelen süreçte Kayan Kipli Kontrolcü (KKK), Durum Bağımlı Doğrusal Olmayan Kontrolcü (DBDOK), Durum Bağımlı Riccati Denklemi (DBRD) tabanlı Kontrolcü, Kayan Sektör Kontrolcü (KSK) gibi çeşitli yöntemler kullanılmıştır. Kayan Sektör Kontrolcüler (KSK), Kayan Kipli Kontrolcülerdeki (KKK) çıkırtı probleminin çözümü için yapılan çalışmalarda ortaya çıkmıştır ve Kayan Sektör Kontrolcü metodunun kontrol sinyallerinin Kayan Kipli Kontrolcülerdekine göre daha yumuşak olduğu yapılan çalışmalar ile gösterilmiştir. Bu tez çalışmasında Durum Bağımlı Riccati Denklemi (DBRD) ve Kayan Sektör (KS) kontrolcülerini içeren yeni bir Anahtarlama Kontrolcü (AK) metodu geliştirilmiştir. Bu yeni yöntem ile Kayan Sektörün oluşturulması ve tasarlanan Anahtarlama Kontrolcü ile doğrusal olmayan sistem yörüngelerinin yönlendirildiği gösterilmiştir. Çalışmada yeni yöntem ile tasarlanan sektör, Kayan Sektör Kontrolcü tasarım yöntemindeki aksine tek parça olarak oluşturulmuştur. Önerilen yeni yöntemin performansı ve gürbüzlüğü farklı senaryolar ile bilgisayar tabanlı benzetimler ile gösterilmiş ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Bilim Kodu : 91418
Anahtar Kelimeler : Kayan Sektör, Gürbüz Kontrol, Anahtarlama Kontrolcü, Doğrusal Olmayan Sistemler, Füze Dinamiği
Sayfa Adedi : 103
Danışman : Prof. Dr. Metin Uymaz SALAMCI

NONLINEAR SLIDING SECTOR CONTROLLER FOR MISSILE AUTOPILOT DESIGN

(M. Sc. Thesis)

Gökçe DEDE

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

September 2019

ABSTRACT

During the flight of the missile, disruptive effects which arise from environmental factors and/or missile dynamics may send unexpected signals to auto-pilot systems. In order to keep these undesired effects under control during the flight of the missile, various techniques such as Sliding Mode Controller (SMC), State Dependent Nonlinear Controller, State Dependent Riccati Equation based controllers have been used up to now. Sliding Sector Controllers were discovered while researches carried on to eliminate chattering phenomenon of Sliding Mode Controllers and by the help of these studies, it has been showed that created signals by Sliding Sector Controller's method are smoother than that of Sliding Mode Controller's. In this thesis study, a novel Switched Controller Method which comprises State Dependent Riccati Equation and Sliding Sector Controller was developed. With the help of the proposed method together with the generation of the Sliding Sector, it has been shown that nonlinear system trajectories have been directed by Switching Controller. In this study, the sector designed with a new method is constituted as a single part, in contrast to the parts in Sliding Sector Controller design method. Performance and robustness of the proposed method was tested by computer-based simulations with different scenarios and successful results were obtained.

Science Code : 91418
Key Words : Sliding Sector, Robust Control, Switching Control, Nonlinear Systems, Missile Dynamic
Page Number : 103
Supervisor : Prof. Dr. Metin Uymaz SALAMCI

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca maddi, manevi desteğini esirgemeyen, değerli yardım ve katkılarıyla bana yol gösteren ve zorluklar karşısında beni cesaretlendiren, değerli hocam Prof. Dr. Metin Uymaz SALAMCI' ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmamı yaptığım her anda, takıldığım her noktada yardımını esirgemediğim çalışmam boyunca beni motive ederek cesaretlendiren ve sahip olduğu kıymetli bilgileri her an benimle paylaşan Ahmet Çağrı ARICAN' a teşekkür ederim. Çalışmalarım sırasında benden desteğini esirgemeyip tecrübeleri ile beni yönlendiren Sinan ÖZCAN'a ve Engin Hasan ÇOPUR'a teşekkürü bir borç bilirim. Her koşulda yanımda olan akademik çalışmalarımın ve iş yaşantımın yoğunluğuna rağmen desteğini eksik etmeden beni motive eden eşim Eda ÇİFTÇİ DEDE'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Bugünlere gelmemi sağlayan ve hayatımın her evresinde beni cesaretlendiren, bana tüm güçleri ile maddi manevi destek olan, annem Semra DEDE'ye, babam Fikret DEDE'ye, ablam Defne DEDE'ye ve teyzem Selma GÜRLE'ye yardımları ve gösterdikleri sabır için teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ	1
2. KAYAN SEKTÖR VE DURUM BAĞIMLI RİCCATİ DENKLEMİ TABANLI KONTROLCÜLER İÇEREN ANAHTARLAMALI KONTROLCÜ	9
2.1. Doğrusal Sistemler için Kayan Sektör Kontrolcü Tasarım Yöntemi	9
2.2. Doğrusal Olmayan Sistemler için DBRD ile Kayan Sektör Kontrolcü Tasarım Yöntemi	15
2.3. Doğrusal Olmayan Sistemler için Kayan Sektör ve Durum Bağımlı Riccati Denklemleri Tabanlı Kontrolcüler İçeren Anahtarlama Kontrolcü Tasarım Yöntemi	21
3. DOĞRUSAL OLMAYAN FÜZE DİNAMİĞİ İÇİN KAYAN SEKTÖR, DURUM BAĞIMLI RİCCATİ DENKLEMİ VE ANAHTARLAMALI KONTROLCÜ TASARIMLARI	35
3.1. Doğrusal Olmayan Füze Dinamiği	35
3.2. Nonlineer Füze Dinamiği İçin DBRD Kontrolcü, Kayan Sektör Kontrolcü, Kayan Sektör ve Durum Bağımlı Riccati Denklemi (DBRD) Tabanlı Kontrolcüler İçeren Anahtarlama Kontrolcü Tasarımları ve Durum Denklemleri	39
3.2.1. Doğrusal olmayan füze dinamiği için DBRD kontrolcü tasarımı	41
3.2.2. Doğrusal olmayan füze dinamiği için KSK kontrolcü tasarımı	44

Sayfa

3.2.3. Doğrusal olmayan füze dinamiği için anahtarlama kontrolcü tasarımı .	48
4. BENZETİM SONUÇLARI	53
4.1. Doğrusal Olmayan Füze Dinamiği İçin DBRD Kontrolcü Uygulaması ve Benzetim Sonuçları	53
4.1.1. Gürültü ve parametre belirsizliği olmadan yapılan DBRD kontrolcü uygulaması ve benzetim sonuçları	53
4.1.2. Kütle değişimi varken yapılan DBRD kontrolcü uygulaması ve benzetim sonuçları	56
4.1.3. DBRD kontrolcü ile regülatör uygulaması ve benzetim sonuçları	60
4.2. Doğrusal Olmayan Füze Dinamiği İçin Kayan Sektör Kontrolcü Uygulaması ve Benzetim Sonuçları	64
4.2.1. Gürültü ve parametre belirsizliği olmadan yapılan kayan sektör kontrolcü uygulaması ve benzetim sonuçları	64
4.2.2. Bir derecelik bozucu etki altında yapılan kayan sektör kontrolcü uygulaması ve benzetim sonuçları	67
4.2.3. Kütle değişimi varken yapılan kayan sektör kontrolcü uygulaması ve benzetim sonuçları	70
4.2.4. Kayan sektör kontrolcü ile regülatör uygulaması ve benzetim sonuçları	75
4.3. Doğrusal Olmayan Füze Dinamiği İçin Kayan Sektör Ve Durum Bağımlı Riccati Denklemi Tabanlı Kontrolcüler İçeren Anahtarlama Kontrolcü Uygulaması ve Benzetim Sonuçları	80
4.3.1. Gürültü ve parametre belirsizliği olmadan yapılan kayan sektör ve durum bağımlı riccati denklemi tabanlı kontrolcüler içeren anahtarlama kontrolcü uygulaması ve benzetim sonuçları	80
4.3.2. Bozucu etki altında yapılan kayan sektör ve durum bağımlı riccati denklemi tabanlı kontrolcüler içeren anahtarlama kontrolcü uygulaması ve benzetim sonuçları	83
4.3.3. Kütle değişimi varken yapılan kayan sektör ve durum bağımlı riccati denklemi tabanlı kontrolcüler içeren anahtarlama kontrolcü uygulaması ve benzetim sonuçları	87
4.3.4. Kayan sektör ve durum bağımlı riccati denklemi tabanlı kontrolcüler içeren anahtarlama kontrolcü ile regülatör uygulaması ve benzetim sonuçları	91

	Sayfa
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	97
KAYNAKALAR	99
ÖZGEÇMİŞ	103

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.1 Maliyet fonksiyonlarının karşılaştırılması	98

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Kayan sektör	11
Şekil 2.2. Histerisis-Ölü bölge fonksiyonu	14
Şekil 2.3. Dinamik denklemi içeren blok	26
Şekil 2.4. İntegratör bloğu	26
Şekil 2.5. DBRD kontrolcü bloğu	27
Şekil 2.6. KSK kontrolcü bloğu	27
Şekil 2.7. AK kontrolcü bloğu	28
Şekil 2.8. DBRD faz diyagramı	29
Şekil 2.9. KSK faz diyagramı	30
Şekil 2.10. AK faz diyagramı	30
Şekil 2.11. 0-0.15 sn aralığında DBRD kontrol sinyali	31
Şekil 2.12. 0-0.15 sn aralığında KSK kontrol sinyali	32
Şekil 2.13. 0.06-0.15 sn aralığında KSK kontrol sinyali	32
Şekil 2.14. 0-0.15 sn aralığında AK kontrol sinyali	33
Şekil 2.15. 0.05-0.15 sn aralığında AK kontrol sinyali	33
Şekil 3.1. Füze dinamikleri	35
Şekil 3.2. DBRD kontrolcü için sistem plant bloğu	41
Şekil 3.3. İntegratör bloğu	42
Şekil 3.4. Kontrol bloğu	42
Şekil 3.5. İvme takibi izleme bloğu	43
Şekil 3.6. İstenilen ivme bloğu	43
Şekil 3.7. İstenilen ivme grafiği	44
Şekil 3.8. KSK için sistem plant bloğu	44

Şekil	Sayfa
Şekil 3.9. İntegratör bloğu	45
Şekil 3.10. Kontrol bloğu	45
Şekil 3.11. Kayan sektör	47
Şekil 3.12. İvme takibi izleme bloğu	47
Şekil 3.13. İstenilen ivme bloğu	48
Şekil 3.14. İstenilen ivme grafiği	48
Şekil 3.15. AK için sistem plant bloğu	49
Şekil 3.16. İntegratör bloğu	50
Şekil 3.17. Kontrol bloğu	50
Şekil 3.18. Kayan sektör bloğu	51
Şekil 4.1. DBRD Kontrolcü için gürültü ve parametre değişimi olmadan füze hücum açısı değişimi	54
Şekil 4.2. DBRD Kontrolcü için gürültü ve parametre değişimi olmadan füze yunuslama hızı değişimi	54
Şekil 4.3. DBRD kontrolcü için gürültü ve parametre değişimi olmadan füze ivme takibi	55
Şekil 4.4. DBRD kontrolcü için gürültü ve parametre değişimi olmadan kontrolcü çabası	55
Şekil 4.5. DBRD kontrolcü için gürültü ve parametre değişimi olmadan maliyet konksiyonu	56
Şekil 4.6. Kütle değişimi “	57
Şekil 4.7. DBRD kontrolcü için parametre değişimi esnasında füze hücum açısı değişimi	57
Şekil 4.8. DBRD kontrolcü için parametre değişimi esnasında füze yunuslama hızı değişimi	58
Şekil 4.9. DBRD kontrolcü için parametre değişimi esnasında füze ivme takibi	58
Şekil 4.10. DBRD kontrolcü için parametre değişimi esnasında olmadan kontrolcü çabası	59

Şekil	Sayfa
Şekil 4.11. DBRD kontrolcü için parametre değişimi esnasında maliyet fonksiyonu ..	59
Şekil 4.12. DBRD kontrolcü regülatör uygulaması esnasında füze hücum açısı değişimi	60
Şekil 4.13. DBRD kontrolcü regülatör uygulaması esnasında füze yunuslama hızı değişimi	61
Şekil 4.14. DBRD kontrolcü regülatör uygulaması esnasında füze ivme takibi	61
Şekil 4.15. DBRD kontrolcü regülatör uygulaması esnasında kontrol çabası-1	62
Şekil 4.16. DBRD kontrolcü regülatör uygulaması esnasında kontrol çabası-2	62
Şekil 4.17. DBRD kontrolcü regülatör uygulaması esnasında kontrol çabası-3	63
Şekil 4.18. DBRD kontrolcü için regülatör uygulaması esnasında maliyet fonksiyonu	63
Şekil 4.19. Gürültü ve parametre değişimi olmadan füze hücum açısı değişimi	64
Şekil 4.20. Gürültü ve parametre değişimi olmadan füze yunuslama hızı değişimi	65
Şekil 4.21. Gürültü ve parametre değişimi olmadan füze ivme takibi	65
Şekil 4.22. Gürültü ve parametre değişimi olmadan kontrolcü çabası	66
Şekil 4.23. Gürültü ve parametre değişimi olmadan kayan sektör	66
Şekil 4.24. Gürültü ve parametre değişimi olmadan KSK’de maliyet fonksiyonu	67
Şekil 4.25. Bir derecelik bozucu etki altında füze hücum açısı değişimi	68
Şekil 4.26. Bir derecelik bozucu etki altında füze yunuslama hızı değişimi	68
Şekil 4.27. Bir derecelik bozucu etki altında füze ivme takibi	69
Şekil 4.28. Bir derecelik bozucu etki altında kontrolcü çabası	69
Şekil 4.29. Bir derecelik bozucu etki altında kayan sektör	70
Şekil 4.30. Bir derecelik bozucu etki altında KSK’de maliyet fonksiyonu	70
Şekil 4.31. Füzenin kütle değişimi	71
Şekil 4.32. Kütle değişimi varken füze hücum açısı değişimi	72
Şekil 4.33. Kütle değişimi varken füze yunuslama hızı değişimi	72
Şekil 4.34. Kütle değişimi varken füze ivme takibi	73

Şekil	Sayfa
Şekil 4.35. Kütle değişimi varken kontrolcü çabası	73
Şekil 4.36. Kütle değişimi varken kayan sektör	74
Şekil 4.37. Kütle değişimi varken kayan sektörde maliyet fonksiyonu	74
Şekil 4.38. KSK ile regülatör uygulamasında füze hücum açısı değişimi	75
Şekil 4.39. KSK ile regülatör uygulamasında füze yunuslama hızı değişimi	76
Şekil 4.40. KSK ile regülatör uygulamasında ivme takibi	76
Şekil 4.41. KSK ile regülatör uygulamasında kontrolcü çabası-1	77
Şekil 4.42. KSK ile regülatör uygulamasında kontrolcü çabası-2	77
Şekil 4.43. KSK ile regülatör uygulamasında kontrolcü çabası-3	78
Şekil 4.44. KSK ile regülatör uygulamasında kayan sektör-1	78
Şekil 4.45. KSK ile regülatör uygulamasında kayan sektör-2	79
Şekil 4.46. KSK ile regülatör uygulamasında maliyet fonksiyonu	79
Şekil 4.47. AK için gürültü ve parametre değişimi olmadan füze hücum açısı değişimi	80
Şekil 4.48. AK için gürültü ve parametre değişimi olmadan füze yunuslama hızı değişimi	81
Şekil 4.49. AK için gürültü ve parametre değişimi olmadan füze ivme takibi	81
Şekil 4.50. AK için gürültü ve parametre değişimi olmadan kontrolcü çabası	82
Şekil 4.51. AK için gürültü ve parametre değişimi olmadan sektör ve kayma yüzeyi ..	82
Şekil 4.52. AK için gürültü ve parametre değişimi olmadan maliyet fonksiyonu	83
Şekil 4.53. AK için bozucu etki altında füze hücum açısı değişimi	84
Şekil 4.54. AK için bozucu etki altında füze yunuslama hızı değişimi	84
Şekil 4.55. AK için bozucu etki altında füze ivme takibi	85
Şekil 4.56. AK için bozucu etki altında kontrolcü çabası	85
Şekil 4.57. AK için bozucu etki altında sektör ve kayma yüzeyi	86
Şekil 4.58. AK için bozucu etki altında maliyet fonksiyonu	86

Şekil	Sayfa
Şekil 4.59. Füzenin kütle değişimi	87
Şekil 4.60. AK için kütle değişimi varken füze hücum açısı değişimi	88
Şekil 4.61. AK için kütle değişimi varken füze yunuslama hızı değişimi	88
Şekil 4.62. AK için kütle değişimi varken füze ivme takibi	89
Şekil 4.63. AK için kütle değişimi varken kontrolcü çabası	89
Şekil 4.64. AK için kütle değişimi varken sektör ve kayma yüzeyi	90
Şekil 4.65. AK için kütle değişimi varken maliyet fonksiyonu	90
Şekil 4.66. AK ile regülatör uygulamasında füze hücum açısı değişimi	91
Şekil 4.67. AK ile regülatör uygulamasında füze yunuslama hızı değişimi	92
Şekil 4.68. AK ile regülatör uygulamasında füze ivme takibi	92
Şekil 4.69. AK ile regülatör uygulamasında kontrolcü çabası-1	93
Şekil 4.70. AK ile regülatör uygulamasında kontrolcü çabası-2	93
Şekil 4.71. AK ile regülatör uygulamasında kontrolcü çabası-3	94
Şekil 4.72. AK ile regülatör uygulamasında sektör ve kayma yüzeyi-1	94
Şekil 4.73. AK ile regülatör uygulamasında sektör ve kayma yüzeyi-2	95
Şekil 4.74. AK ile regülatör uygulamasında maliyet fonksiyonu	95

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
$\mathbf{x}$	Durum değişkenleri vektörü
t	Zaman
q	Yunuslama hızı
u	Kontrol girdisi
α	Hücum açısı
η_z	Normal ivme
F	Normal kuvvet
f	Radyan-derece dönüşüm katsayısı
g	Yer çekim ivmesi
W	Ağırlık
V	Hız
Q	Dinamik basınç
S	Referans yüzey
D	Referans çap
M	Yunuslama momenti
I_{yy}	Yunuslama eylemsizlik momenti
C_m	Yunuslama momenti aerodinamik katsayısı
C_z	Normal kuvvet aerodinamik katsayısı
η_z^*	İstenilen normal ivme
δ	Kanatçık sapma açısı
ζ_e	Eyleyici sönüm oranı
δ_k	Kanatçık sapması komutu
ω_e	Eyleyici bant genişliği
e	Hata fonksiyonu
$A(\mathbf{x})$	Sistem matrisi
$B(\mathbf{x})$	Kontrol matrisi
$V(t)$	Lyapunov aday fonksiyonu

Simgeler**Açıklamalar**

P	Simetrik pozitif tanımlı bir matris
R	Simetrik pozitif tanımlı bir matris
Q	Simetrik pozitif veya pozitif yarı tanımlı bir matris
s(x)	Kayma yüzeyi
C	Kayma yüzeyi eğim matrisi
$\mathcal{S}_i$	İç sektör
$\mathcal{S}_o$	Dış sektör
$\Delta(x, t)$	Pozitif yarı tanımlı simetrik bir matris

Kısaltmalar**Açıklamalar**

AKKK	Ayrık Kayan Kipli Kontrolcü
CRD	Cebirsel Riccati Denklemleri
DBDRD	Durum Bağımlı Diferansiyel Ricatti Denklemi
DBRD	Durum Bağımlı Ricatti Denklemi
DGB	Darbe Genişlik Modülasyonu
DOT	Dinamik Olayla Tetiklenen
DOZD	Doğrusal Olmayan Zamanla Değişen
DKS	Değişmeyen Kayan Sektör
DYK	Değişken Yapılı Kontrolcü
İDA	İnsansız Deniz Aracı
İMD	İndirgenmiş Mertebeli Dinamikler
KKK	Kayan Kipli Kontrolcü
KKS	Küresel Konumlama Sistemi
KS	Kayan Sektör
KSK	Kayan Sektör Kontrolcü
SDRE	State Dependent Ricatti Equation
SS	Sliding Sector
VÇMD	Vektör Çarpımı Model Dönüşümünün

1. GİRİŞ

Füze dinamiğini kontrol etme çabaları için günümüze kadar gelen süreçte çok çeşitli yöntemler kullanılmıştır. Füze uçuşu esnasında çevresel etkiler veya füzenin dinamiğinden kaynaklanan etkenlerden dolayı oluşan bozucu etkiler oto-pilota beklenmeyen sinyaller yollayabilmekte ve kontrol edilmesi gereken hücum açısı, yunuslama hızı gibi parametreleri istenilen kriterlerin dışına çıkarmaktadır [1]. Bu etkiler sonucunda ise hedef istenilen hassasiyetle tutturulamamaktadır.

Kazanç ayarlamalı kontrol (Gain Scheduling Control), entegre edilmiş Kayan Kipli Kontrol (KKK), çok kanallı doğrusal parametre değişimi gibi yöntemler füze kontrolcülerini olarak denenmiştir [2-4]. Füzelerden istenilen hassasiyet artışı araştırmacıları bu konuda daha çok çalışmaya sevk etmiştir. Literatürde füze kontrolü ile ilgili yapılan çalışmalar kısa bir özet şeklinde aşağıda verilmektedir.

Faruqi ve Vu yayınladıkları raporda füze otopilotu için uzay durum formunda matematiksel bir model oluşturmuşlardır. Çalışmada kullanılan füze dinamiği doğrusal olmayan bir yapıya sahiptir. Doğrusal olmayan füze dinamiğini yaptıkları simülasyon için bölgesel olarak doğrusallaştırmışlardır [5].

Çimen yaptığı çalışmada Durum Bağımlı Doğrusal Olmayan Kontrolcü (DBDOK) ile altı serbestlik derecesine sahip bir füze için kontrolcü tasarlamıştır. Bu tasarımda kontrolcü üç farklı döngüden oluşmaktadır. Her bir döngü füze dinamiklerinin farklı bileşenlerini kontrol etmektedir [6].

Durum Bağımlı Riccati Denklemi yöntemi son yıllarda doğrusal olmayan dinamik sistemlerin kontrolü için tercih edilen bir yöntem olmuştur. Durum Bağımlı Riccati Denklemi ile ilgili yapılan çalışmaların bir kısmı aşağıda verilmektedir.

Mracek ve Cloutier, oto pilot tasarlamak için çalışmalarında DBRD yöntemini kullanmışlardır. Bu çalışmalarının sonucunda tasarlanmış olan oto pilotun parametre değişimine karşı gürbüz davrandığı ve yüksek manevralar esnasında referans takibini iyi bir şekilde gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir. Bu çalışma esnasında kullanılan yöntem

DBRD H2 olarak adlandırılmaktadır. DBRD H2 yöntemi, doğrusal H2 yöntemi ile aynı yapıda olup tek farkı iki Riccati denkleminin durum bağımlı olmasıdır [7].

Çimen, McCaffrey, Harrison ve Banks, durum bağımlı Riccati denklemi filtresinin teorisinin benzetim tabanlı uygulaması üzerine çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada doğrusal kalman filtresi, genişletilmiş kalman filtresi ve DBRD filtre arasındaki farklar ve benzerlikler incelenmiş ardından doğrusal olmayan optimal kontrol problemlerinin çözümlerinde DBRD algoritmasının etkili olduğu gösterilmiştir [8].

Çimen tarafından 2008 yılında yapılan çalışmada, DBRD doğrusal olmayan regülatör teorisi ile doğrusal olmayan optimal kontrol problemlerinin çözümü anlatılmıştır. Ayrıca DBRD kontrol yönteminin teorisi ve tasarımının sağladığı avantajlar, çözümlerin varlığı, kararlılık analizleri de incelenmiştir [9].

Guo, Wu ve Chen, yaptıkları çalışmada insansız bir helikopterin kararsız olan iç dinamiklerini, çarpma ve dönme dinamiklerini iki zamanlı doğrusal olmayan bir model halinde oluşturarak çok zaman ölçekli bir DBRD kontrolcü tasarlamışlardır [10].

Babaei ve Salamcı, belirsiz doğrusal olmayan sistemlerin kararlılığı için kontrolcü tasarımı konusunda çalışma yaparak yeni bir yaklaşım ortaya koymuşlardır. Yaptıkları bu çalışmada, DBRD yöntemini kullanan durum geri beslemeli kontrolcü vasıtasıyla oluşturulan kararlı bir doğrusal olmayan referans model kullanarak model referans uyarlamalı kontrolcü tasarımı yapmışlardır. Uygulamayı kanser tedavisi üstüne yapmışlardır. Bu çalışma ile hedeflenen şey, kanser tedavisinde optimal kemoterapi ilaç kullanımını belirlemek için tümör hücresinin büyüme matematik modelini kullanmaktır [11].

Füze dinamiği kontrolü ile ilgili çalışmalar farklı doğrusal olmayan kontrol tekniklerinin uygulamalarını içermektedir. Bu kapsamda, Shamma ve Cloutier yaptıkları çalışmada füzenin boylamsal eksenini için oto pilota kazanç planlı bir kontrolcü tasarlamışlardır. Çalıştıkları yöntemde füze dinamiğini ayarlamak için füze dinamiğini doğrusallaştırmamışlardır. Doğrusallaştırma yerine füzenin dinamik modelini durum dönüştürme yöntemiyle neredeyse doğrusal parametre değişkenleri formuna getirmişlerdir [12].

Salamcı ve Özgören yaptıkları çalışmada doğrusal olmayan sistemler için optimal kayma yüzeyli KKK tasarlamışlardır. Doğrusal olmayan sistemler tekrarlı zamanla değişen doğrusal sistemler olarak incelenmiş ve her bir zamanla değişen doğrusal sistem olarak ele alınan sistem için kayma yüzeyleri tasarlanmıştır. Tasarlanan kontrolcüyü doğrusal olmayan bir füze dinamiğinin normal ivme takibini yapmak için simülasyonda kullanmışlardır. Elde ettikleri sonuçlar metodun etkili olduğunu, optimal kayma yüzeyi seçmenin ve maliyet fonksiyonun azaltılmasının önemli olduğu doğrusal olmayan sistemlerde KKK tasarımı için kullanılabilirliğini göstermiştir [13].

Powly ve Bhat çalışmalarında kayan sektör kullanarak ayırık zamanlı değişken yapılı kontrolcü tasarlamışlar ve kontrolcüyü havadan havaya bir füzenin yatay ivmelenmesini kontrol etmek için uyarlamışlardır. Tasarımda anahtarlama yüzeyini oluştururken İndirgenmiş Mertebeli Dinamikler (İMD) esas alınarak yapılmıştır. Optimal anahtarlama yüzeyleri doğrusal kuadratik düzenleyiciler ile tasarlanmış böylece İMD istenilen karakterde olması sağlanmıştır [14].

Zhao ve arkadaşları arayıcısı olmayan at-unut füzelerde daha hassas olabilmek için yeni bir strateji önermişlerdir. Yöntemde öncelikle füzenin pozisyonu dikkatlice belirlenmektedir. Bunun için füzenin gerçek konumu ile tahmin edilen konumu arasındaki çizginin yatay açısı, Küresel Konumlama Sistemi (KKS) yerleştirme teorisi kullanılarak bulunur. Daha sonra elde edilen yatay açısı ile sonlu zamanlı yakınsama yaklaşımı kullanılarak kullanılır [15].

Doğrusal kontrol birçok sistemin kontrolünde yaygın olarak kullanılmasına rağmen sistemlerin gerçek yapısı böyle değildir. Doğada bulunan sistemlerin büyük bir kısmı doğrusal olmayan bir yapıya sahiptir. Araştırmacılar doğrusal olmayan dinamiğe sahip sistemler için kontrolcü tasarlarırken tasarımda kolaylık sağlamasından dolayı doğrusal kontrol yöntemlerini tercih etmiştir. Bu şekilde bir tasarım yapabilmek için doğrusal olmayan dinamiğe sahip sistemi belli noktalarda doğrusallaştırarak sistemin sanki doğrusal dinamik modelini elde etmişlerdir. Bu işlem sonucunda ele alınan sistemin gerçek davranışından uzaklaştığı görüldü. Araştırmacılar, ele alınan sistemin davranışının gerçek davranışından farklı olmaması ve model ile gerçek sistem arasındaki belirsizliklerin ortadan kalkması için doğrusal olmayan kontrol yöntemleri ile ilgilenmeye ve tercih

etmeye başladılar. Günümüzde ise doğrusal olmayan kontrol yöntemleri bir çok çalışmada tercih edilip kullanılmaktadır [16-18,45].

Chingoza ve Nyandoro yaptığı çalışmada önerdikleri uyarlamalı kayan geri adımlamalı kontrol yasası ile bir kuadropterin davranışlarını kontrol etmeye çalışmışlardır. Çalışma ile Kayan Kipli Kontrolcü (KKK)'de belirsizliklerin üst sınırı hakkında bilgi sahibi olma ihtiyacını ortadan kaldırmak için uyarlamalı bir kayma kazancı tahmincisi, kaymalı geri adımlamalı kontrolcü ile birleştirilmiştir. Önerilen kontrolcü sabit bir rotayı ve sinyali istenilen gibi takip etse de gereğinden fazla kontrol çabası üretmesinin bir dezavantaj olduğu belirtilmiştir [19].

Guo ve Chen yaptıkları bir çalışmada, aktüatör arızası ve bozucu etkisi olan bir uzay aracı davranış dengeleme sistemi için hataya dayanıklı kontrol sorununu incelemiştir. Bu sorun için gürbüz bir KKK sunan araştırmacılar önce özgün bir doğrusal olmayan kompozit gözlemci tasarlamış, daha sonra bu gözlemciden gelen bilgiler ile KKK'yü birleştirip yöntemlerini ortaya koymuşlardır. Simülasyon sonuçları ile önerdikleri metodun aktüatör hatası ve dış etki olmasına rağmen iyi sonuçlar verdiği anlaşılmıştır [20].

Hsu yaptığı çalışmada belirsiz dinamik sistemler için doğrusal olmayan sektör girdileri ile gürbüz bir kontrolcü önermiş ve bunu Değişken Yapılı Kontrolcü sistemiyle birleştirilerek kullanılmıştır. Yapılan çalışmalar sonunda bu yöntem diğer yöntemler ile karşılaştırılmış ve önerilen yöntemin sektör belirsizlikleri içeren doğrusal olmayan girdili sistemlerde daha etkili sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir [21].

Arıcan ve arkadaşları yapmış oldukları bir çalışmada doğrusal olmayan sistemler için Durum Bağımlı Riccati Denklemi (DBRD) tabanlı optimal kontrolcü tasarlamışlardır. Tasarlanan kontrolcü ile kuadratik performans indeksini en aza indirmek ve her bir örnekleme zamanında doğrusal olmayan dinamiği kontrol altında tutabilmek hedeflenmiştir. Oluşturulan kontrol yöntemi hem deneysel hem de pratik olarak 3 eksenli bir helikopter modeli üstünde farklı frekanslarda denenmiştir. Denemeler sonunda düşük çalışma frekanslarının daha az hesaplama gerektirdiği fakat yüksek çalışma frekanslarının daha çok hesaplama ile birlikte daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir [22].

Chu ve Li, yaptıkları çalışmada sensör doygunluğuna ve ölü bölge giriş doğrusalsızlığına maruz kalan ayırık zamanlı Lipschitz doğrusal olmayan ağa bağlı kontrol sistemleri için gürbüz, kırılğan olmayan gözlemci tabanlı Dinamik Olayla Tetiklenen (DOT) KKK sorununu ele almıştır. Bu sorun için önerdikleri yöntemde öncelikle veri iletimi sayısını azaltmak için sensör doygunluk sınırlarıyla birlikte geliştirilmiş bir DOT şema tasarlamışlardır. Daha sonra öngörülen bir bozulma zayıflama seviyesi ile yeni bir asimptotik stabilite durumu oluşturulur ve olayla tetiklenen parametreyi, gözlemci kazancını ve kayma modu parametresini eşzamanlı olarak elde etmek için karşılık gelen ortak tasarım yöntemi türetilir. Son olarak, gözlemci tabanlı olayla tetiklenen bir KKK kanunu, ölü bölge girdi doğrusalsızlığından kaynaklanan etkileri yok etmek ve gözlemci sistemi yörüngelerinin sonlu bir sürede denge noktasına yakın bir bölgeye zorlanmasını sağlamak için sentezlenmiş ve yöntemin etkili oluşu tek kolu esnek eklemli bir robot sistem modeli üstünde denenmiştir [23].

Kim ve Lee yaptıkları çalışmada, bozucu etki ve durum gözlemcilerinin etkisi altındaki bir İnsansız Deniz Aracı (İDA)'nın su jeti nozul açısını kontrol etmek için KKK önermişlerdir. İDA'nın hidrolik sistem doğrusal olmayan dinamiğe ve bozucu etkilere maruz kaldığı için kontrolcünün geri besleme döngüsüne durum ve bozucu gözlemcisi eklenerek performans arttırılmıştır [24].

Mollae ve arkadaşları, KKK'de uyumsuz belirsizlikler ve çitirtı probleminin önemli sorunlar olduğuna değinip bunları ortadan kaldırmak için sanal girdilere sahip birden çok kayma yüzeyi oluşturmayı önermişlerdir. Bunun için, tasarlanan sinirsel gözlemcilere dayanarak iki yeni yöntem önermişlerdir. Biri KKK ile tasarlanmış olup bir diğeri dinamik KKK'dür. Önerdikleri bu yöntemler ile yaptıkları simülasyondan aldıkları sonuçlar yöntemin etkili çalıştığını göstermektedir [25].

Günümüzde değışken yapıli kontrolcüler, füze, uydu, robotik gibi birçok sistemde tercih edilmekte ve kullanılmaktadır [26-28].

Değişken Yapılı Kontrolcülerde (DYK), seçilen sistemlerin durum değışkenlerinin geri beslenmesinin yanında tasarlanan kontrolcü yapısı da çalışma esnasında değışiklik göstermektedir. DYK'lerin özel bir uygulaması olan Kayan Kipli Kontrolcü (KKK) dış bozucu etkilere ve belirsizliklere karşı duyarsız oluşu ile gösterdiği gürbüz yapısı

sayesinde diğer yöntemlerden üstünlük göstermektedir. KKK bu avantajlarının yanında belirlenen kayma yüzeylerine geldiğinde ortaya çıkan çitirtı problemini gidermek için birçok araştırmacı çalışma yapmıştır [21,29,30]. Füze dinamiği gibi yüksek frekansta kontrol sinyali üretme ihtiyacı olan sistemlerde bu çitirtı mekanik parçalarda yorulma, fazla enerji tüketimi gibi sorunlar ortaya çıkarmaktadır. DYK'in içinde KKK son derece popülerdir. Fakat bu yöntemdeki çitirtı problemi araştırmacıları farklı yöntemler veya çözümler üretmeye yönlendirmiştir. Bu sorunu ortadan kaldırmak için Kayan Sektör Kontrolcü (KSK) yöntemi geliştirilmiş ve sistemin kayma yüzeyi yerine belirlenen bir bölgede tutularak çitirtı probleminin ortadan kaldırılması hedeflenmiştir. Bu çalışmalardan birinde araştırmacılar çitirtı yaratmayan ayrık zamanlı bir DYK'ı KKK yerine kullanmışlar ve ters sarkaç sisteminde bunun deneysel çalışmalarını yapmışlardır [31].

Değişken yapılı kontrolcü tasarımı, etkin bir çözüm sağlayan Kayan Sektör Kontrolcü yöntemi ile ilgili literatürde birçok farklı çalışma bulunmaktadır. Kayan Sektör Kontrolcü yöntemi hakkındaki çalışmalardan bazıları aşağıda anlatılmıştır.

Pan vd., bir teknik notta Doğrusal Olmayan Zamanla Değişen (DOZD) bir sisteme, ileri integrasyon ile Durum Bağımlı Diferansiyel Ricatti Denklemi (DBDRD) kullanarak nonlineer zamanla değişen bir kayan sektör ve Kayan Sektör Kontrolcü (KSK) tasarladığını bildirmiştir [29]. Bu çalışmada kullanılan kontrolcü belirli bir zamanda sistem durumlarının DOZD kayan sektöre girmesini ve bu esnada Lyapunov fonksiyonunun azaldığını doğrulamıştır. Önerilen kontrolcü dış bozucular ve belirsizliklere rağmen kararlıdır.

Yapılan başka bir çalışmada değişmeyen bir kayan sektör tanımlanmıştır. Bu kayan sektörün içinde bulunan ya da önerilen kontrolcünün etkisiyle bu sektöre girmiş olan başlangıç koşullarının sektörün dışına çıkmadığını bildirmişlerdir. Yaptıkları simülasyonlardan aldıkları sonuçlar önerdikleri değişken yapılı kontrolcünün kuadratik olarak kararlı olduğunu ve çitirtı problemi olmadan çalıştığını göstermektedir [32].

Pan vd. yaptıkları başka çalışmalarda ise kararsız alt sistemler sahip olan hibrid bir sisteme DYK uygulamış ve sistem tanımlanan bölgeye girdiğinde hiçbir kontrolcü çabası olmadan Lyapunov aday fonksiyonunun azaldığı gözlemlenmiştir [33,34].

Iwata vd. yaptığı çalışmada tek girdili, tam durum bilgileri olan bir sistem için DYK tasarlamıştır. Girdi sinyalleri sadece Açık/Kapalı komutları olacak şekilde kısıtlanan bu sistem için Darbe Genişlik Modülasyonu (DGM) tipinde ayırık zamanlı DYK tasarlanmış ve bu kontrolcü ile sistem durumlarının tasarlanan sektörün içine girmesi sağlanmıştır. Dördüncü dereceden bir sistem üstünde denen bu yöntemde yapılan simülasyonlar uzun örneklem periyoduna sahip sistem karşısında küçük darbe genliğine sahip girdilerle etkili bir çözüm sağladığını göstermiştir [35].

Yu ve Yu tarafından yapılan çalışmada Ayırık Kayan Kipli Kontrolcü (AKKK) yöntemi için Değişmeyen Kayan Sektör (DKS) önerilmiştir. İkinci dereceden AKKK için birinci dereceden DKS tasarlanmıştır. Daha yüksek dereceden AKKK'lar içinse tekrarlayan bir yapıda iç içe geçmiş birinci dereceden DKS kullanılmıştır [30]. Bu yöntemin etkili yanlarından bahsedilirken halen geliştirilmesi gereken yönleri olduğuna da değinilmiştir.

Furuta ve Pan çalışmalarında tasarladıkları Kayan Sektör (KS)'ü hem ayırık zamanlı sistemlerde hem de sürekli zamanlı sistemlerde kullanabileceklerini göstermişlerdir. Yapılan bu çalışmada sistemin kararlı ya da kararsız olması yöntemin etkinliğini etkilemediğini yaptıkları simülasyonlar ile kanıtlamışlardır [36].

Furuta vd. yaptıkları çalışmada darbe yanıtlarını içeren datalardan oluşan sürekli zamanlı doğrusal olan sistem için DYK tasarlamışlardır. Bu tasarım için PR Kayan Sektör önermişlerdir. Bu yöntem ile tasarlanan DYK'nün kuadratik kararlı olduğu kanıtlanmıştır [37]. Çalışma esnasında sistemin parametrelerini Markov Parametre tanımlama algoritmasından faydalanılmıştır.

Xu Vd. çalışmalarında klasik KS yerine değiştirilmiş KKK önermişlerdir. Yapılan bu çalışmada doğrusal olmayan çok girdili bir sistem için sürekli anahtarlama yapan değiştirilmiş KKK kullanılmıştır. Tasarımda geleneksel kayan yüzeyler yerine sistem uygun KS'ler seti seçilmiştir [38]. Daha sonra bu yöntemi iki bağlantılı robot üstünde deneyerek daha yumuşak sinyal ürettiğini kanıtlamışlardır.

Pan ve Furuta çalışmalarında ayırık zamanlı sistemler için optimal ve gürbüz DYK tasarlamışlardır. DYK'nün gürbüzlüğünü vurgulayan kayan kipli hareket ayırık zamanlı DYK'lerde, sonlu anahtarlama hızından dolayı, bulunmamaktadır. Bu yapılan tasarımla

kararlı kapalı sistemlerin sistem durumları sektörün içine getirilebilir hale gelmiştir [39]. Çalışma sarkaç sisteminde denenmiştir.

Korondi ve arkadaşları yaptıkları çalışmada KKK'de ortaya çıkan çırtırtı problemini azaltmak için kayan yüzey sektörü önermişlerdir. Vektör Çarpımı Model Dönüşümünün (VÇMD) sektörleri ayrıştırma konusunda etkili olacağını öneren araştırmacılar doğrusal sistemler için manifold tasarımı ile sektör içeren KKK'yü harmanlayarak bir tasarım yapmışlardır. Burada sektörleri VÇMD kullanarak yapmışlardır [40]. Yapılan uygulama sonucunda ise bu yöntemin anahtarlama kontrol için etkili olduğunu gözlemlemişlerdir.

Özcan ve arkadaşları doğrusal olmayan sistemler için DBRD tabanlı KSK önermiştir. Bu yöntemde her zaman aralığındaki sistem durumlarını elde etmek için Cebirsel Riccati Denklemleri (CRD) çözülmüş ve doğrusal olmayan sektörler oluşturulmuştur. Daha sonra bu metod doğrusal olmayan bir ters sarkaç sistemine uygulanmıştır. Alınan sonuçlarda önerilen metodun KKK'de ortaya çıkan çırtırtı problemini yok ettiği gözlemlenmiştir [41].

KSK'ler en başta sürekli ve ayrık zamanlı tek girişli doğrusal sistemler için sistematik tanımlanmış olsa da ilerleyen zamanlarda doğrusal olmayan tek girişli sistemler için yeniden ele alınmıştır [29,42].

Bu tez çalışmasında, DBRD ve KSK yöntemleri birleştirilerek yeni bir Anahtarlama Kontrol (AK) yöntemi önerilmektedir. Önerilen AK yöntemi, doğrusal olmayan dinamik sistem yörüngelerinin önce KSK ile kararlı bir kayan sektör içerisine yönlendirilmesini, ardından kayan sektör içerisinde DBRD yöntemi ile kontrolünü öngörmektedir. Önerilen AK yönteminin kararlılık analizi ispat edilmiş ve ardından bir füzenin ivme otopilot tasarımı için uygulanması benzetimler ile gösterilmiştir. Önerilen yöntemin avantajları ve ileriye yönelik yapılacak çalışmalar irdelenmiştir.

2. KAYAN SEKTÖR VE DURUM BAĞIMLI RİCCATİ DENKLEMİ TABANLI KONTROLCÜLER İÇEREN ANAHTARLAMALI KONTROLCÜ

Doğrusal olmayan dinamik sistemlerin kararlılığını sağlamak ve parametre belirsizlikleri ya da dış bozucular karşısında gerekli ve yeterli gürbüzlüğü sağlamak amacıyla yapılan bu tez çalışmasında öncelikle Kayan Sektör Kontrolcü (KSK) yöntemi kullanılmıştır. KSK'nin Kayan Kipli Kontrol (KKK)'den en önemli ve büyük farkı sistem durumlarını kayma yüzeyine taşımak yerine sistem durumlarını önceden belirlenmiş kararlı bölgenin içine getirmesi ve bu bölgede kalmaya zorlamasıdır. Bu şekilde belirlenen bölgeye gelen sistem durumları kontrol çabası olmaksızın denge noktasına doğru gider. Böylelikle, KSK'de, KKK'de büyük bir sorun olarak karşımıza çıkan çıtırı engellenmiş olur [41].

KSK tasarım yöntemi doğrusal sistemler için literatürde yer aldığı gibi 2.1 bölümünde özetlenmektedir. Bölüm 2.2'de ise, KSK yönteminin doğrusal olmayan sistemlere uyarlanması ile ilgili Sinan ÖZCAN'ın doktora tezinde [43] ele aldığı yöntem bölüm 2.3'te önerilen yeni yönteme temel oluşturması bakımından özetlenmektedir. Bölüm 2.3'te ise bu tez çalışmasında geliştirilen Kayan Sektör ve Durum Bağımlı Riccati Denklemi (DBRD) tabanlı kontrolcülerini içeren yeni bir anahtarlama kontrolcü tasarımı önerilmektedir.

2.1. Doğrusal Sistemler için Kayan Sektör Kontrolcü Tasarım Yöntemi

Aşağıda gösterilmiş doğrusal ve zamanla değişmeyen bir sistem ele alındığında,

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2.1)$$

Bu eşitlikte $x \in R^n$, $u \in R^1$, $A \in R^{n \times n}$, $B \in R^{n \times 1}$ olarak tanımlanmış ve (A, B) matrislerinin kontrol edilebilir olduğu varsayılmıştır. Lyapunov aday fonksiyonu ise sistemin P-normunun karesi alınarak,

$$V = \|x\|_P^2 = x^T P x > 0, \forall x \in R^n, x \neq 0 \quad (2.2)$$

şeklinde elde edilir ve " $P \in R^{n \times n}$ " simetrik pozitif tanımlı matris olarak belirlenmelidir. Lyapunov aday fonksiyonunun türevi alındığında

$$\dot{V}(t) = x^T(A^T P + PA)x \leq -x^T R x \quad (2.3)$$

ifadesi elde edilir. Burada $R \in R^{n \times n}$, $C \in R^{l \times n}$, $l \geq 1$ olup $R = C^T C$ pozitif yarı tanımlı simetrik matris ve (C, A) matrisleri gözlenebilir olmalıdır. Durum alt uzayı iki alt kümeye ayrılabilir. $x \in R^n$ bu alt kümelerden biri olup,

$$\dot{V}(t) > -x^T R x \quad (2.4)$$

eşitsizliğini sağlamaktadır. Durum uzayının diğer alt kümesi ise,

$$\dot{V}(t) \leq -x^T R x \quad (2.5)$$

eşitsizliğini sağlamaktadır.

Tanım 1 Kayan Sektör Eş.2.5'te verilen eşitliği sağlayan " R^n "in bir alt kümesi olup aşağıdaki eşitlik ile ifade edilebilir [42],

$$\mathcal{S} = \{x | x^T(A^T P + PA)x \leq -x^T R x, x \in R^n\} \quad (2.6)$$

Burada $P \in R^{n \times n}$ pozitif tanımlı simetrik matris, $R \in R^{n \times n}$ pozitif yarı tanımlı simetrik matris olup $C \in R^{l \times n}$, $l \geq 1$, $R = C^T C$ sağlanmalı ve (C, A) gözlemlenebilir olmalıdır.

Tanım 2 [42] Eş. 2.6'da verilmiş olan eşitlik aşağıdaki gibi yazılabilir,

$$\mathcal{S} = \{x | |s(x)| \leq \delta(x), x \in R^n\} \quad (2.7)$$

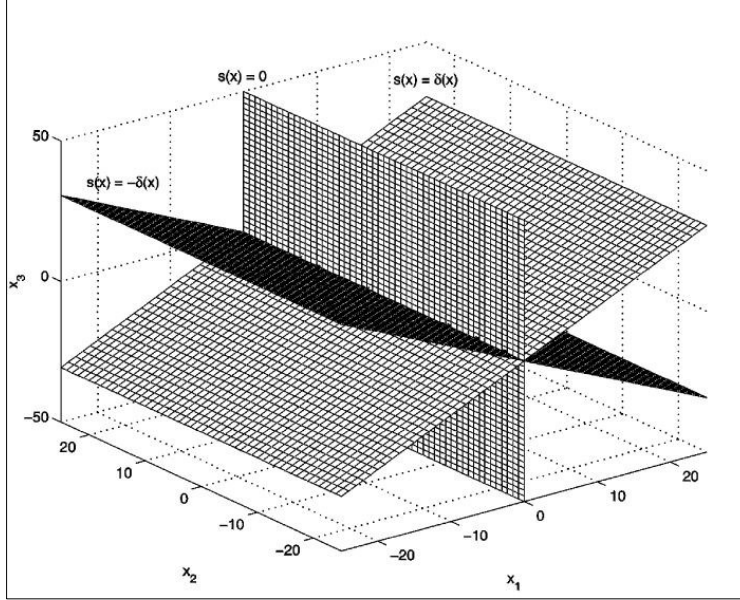
Eşitlikte $s(x)$ kayma yüzeyini ifade etmekte olup,

$$s(x) = Sx, S \in R^{1 \times n} \quad (2.8)$$

şeklinde tanımlanır. S ise kayma yüzeyi katsayı vektörünü (bir anlamda kayma yüzeyinin eğimini) ifade etmektedir. Eş. 2.7'de yer alan $\delta(x)$ ise kuadratik fonksiyondur ve aşağıdaki gibi ifade edilir,

$$\delta(x) = \sqrt{x^T \Delta x} \quad (2.9)$$

Bu denklemde $\Delta \in R^{n \times n}$ olup pozitif yarı tanımlı simetrik bir matristir.



Şekil 2.1. Kayan sektör [42]

Teorem 1 [42] Sistemin durum değişkenleri kayan sektör içine girdiğinde kontrol çabası sarf etmeksizin denge noktasına kararlı bir şekilde giderken Eş. 2.2’de verilmiş olan Lyapunov fonksiyonunun türevi,

$$\dot{V}(t) = \frac{d}{dt}(x^T P x) = s^2(x) - \delta^2(x) - x^T(t) R x(t) \leq -x^T(t) R x(t), \forall x(t) \in \mathcal{S} \quad (2.10)$$

şeklinde sağlanır. Bu denklem için gerekli olan pozitif tanımlı simetrik P matrisi aşağıdaki Cebirsel Riccati denkleminin çözümünden elde edilir.

$$A^T P + P A - P B B^T P = -Q \quad (2.11)$$

Kayma yüzeyi eğimi S ile $\Delta \geq 0$ matrisleri ise,

$$S = B^T P \quad (2.12)$$

$$\Delta = Q - R \quad (2.13)$$

denklemleri ile hesaplanır.

İspat [42] Eş.2.2’de verilen Lyapunov fonksiyonu kayan sektör içerisindeyken küresel ve kuadratik kararlılık için,

$$\dot{V}(t) = \frac{d}{dt} (x^T P x) \leq -x^T(t) R x(t) \quad (2.14)$$

eşitsizliğini sağlamak zorundadır. Burada,

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= x^T (\dot{P} + P A + A^T P) x + 2x^T P B u \\ &= x^T (\dot{P} + \dot{P} + P B B^T P - Q) x + 2x^T P B u \\ &= 2x^T \dot{P} x + x^T P B B^T P x - x^T Q x + 2x^T P B u \\ &= 2x^T \dot{P} x + s^T s - x^T \Delta x - x^T R x + 2x^T P B u \\ &= 2x^T \dot{P} x + s^2(x) - \delta^2(x) - x^T R x + 2x^T P B u \end{aligned}$$

Kayan sektör içinde kontrolcü çabası sarf edilmediğinden ve $\dot{P} = 0$ olduğundan,

$$\dot{V}(t) = \frac{d}{dt} (x^T P x) = s^2(x) - \delta^2(x) - x^T R x \leq -x^T R x, \quad \forall x(t) \in \mathcal{S}$$

olur. Böylece Eş. 2.10 sağlanmış olur. ■

Eğer durum değişkenleri sektörün dışındaki bölgede ise kontrolcü çabası ile sektörün içine çekilir. Sektörün içine çekilme istenilen sistemin durum değişkenleri, sektörün sınırındayken meydana gelebilecek olan çırtırtı problemine karşı kontrolcü tasarımı esnasında kayan sektör tekrar iki alt kümeye bölünür.

Tanım 3 Kayan sektörün alt kümeleri,

$$\mathcal{S}_i = \{x \mid |s(x)| \leq \alpha \delta(x), \quad x \in R^n \quad (2.15)$$

$$\mathcal{S}_o = \{x \mid \alpha \delta(x) < |s(x)| \leq \delta(x), \quad x \in R^n \quad (2.16)$$

şeklinde tanımlanabilir. Bu tanımlamalarda $\mathcal{S}_i$ iç sektör, $\mathcal{S}_o$ dış sektör olarak adlandırılır. α katsayısı ise sektörün sınırlarını belirleyen gerçek pozitif bir sayı olup $0 < \alpha < 1$ aralığında seçilmelidir. Seçilen α değeri sektör alt kümelerinin sınırlarını belirler. Bu değer kontrolcünün iç sektör ve dış sektörde farklılık göstermesinden dolayı kontrol çabasını artırır veya azaltır.

Küçük α değerlerinde iç sektör küçüleceği için kontrolcü çabası artar. α değerinin büyük olması halinde ise iç sektör büyür ve kontrol çabası azalır.

Teorem 2 [42] Sistemin durum değişkenlerini sektörün dış bölgesinde iken sektörün iç bölgesine getiren, sistem dış sektör ile iç sektör arasındaki bölgede iken ya da dış sektör sınırında iken durum değişkenlerini tekrar içeriye doğru getiren kontrol sinyali aşağıdaki ifade ile hesaplanır,

$$u = -\sigma(s(x), \delta(x))[(SB)^{-1}(SAx + Ks(x))] \quad (2.17)$$

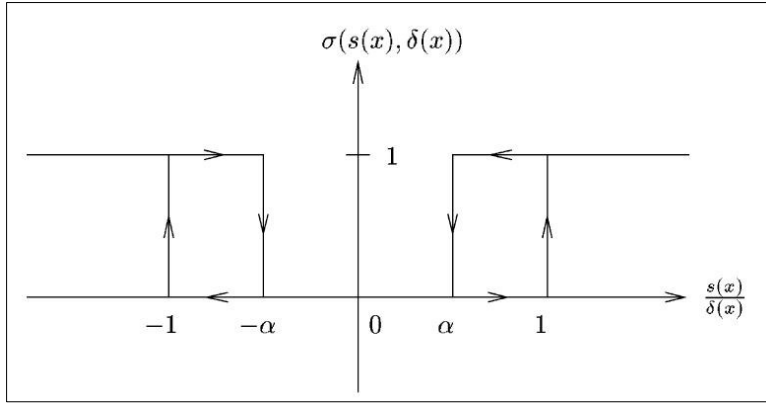
Tasarım sırasında $\Delta = rQ$, $R = (1 - r)Q$, $(0 < r < 1)$, $(0 < \alpha < 1)$ şartlarının sağlanması gerekmektedir. Seçilen r değerinin büyüklüğüne göre sektör genişler ve sistem daha geniş bir bölge içerisinde tutulur. Eğer r değeri küçülürse sektörde küçülür ve sistemi, tasarlanan sektör içerisinde tutmak için daha fazla kontrolcü çabası gerekir. Kontrol sisteminin kuadratik olarak kararlı olması için Eş.2.17’de verilmiş olan pozitif skaler K katsayısı aşağıdaki eşitsizliği sağlayacak şekilde seçilmelidir.

$$K > \left(\frac{SB}{2}, K_0\right)_{max} \quad (2.18)$$

Sistemi kontrol edebilmek için $\det|SB| \neq 0$ olmalıdır. Eş. 2.18 ile verilen eşitsizlikteki K_0 ilk değer olup aşağıdaki eşitsizliği sağlamalıdır.

$$2K_0\alpha^2rQ + S^TSA + A^TS^TS > 0 \quad (2.19)$$

Bu ifadede yer alan $\sigma(s(x), \delta(x))$ fonksiyonu, kayma yüzeyi $s(x)$ ve kuadratik fonksiyon $\delta(x)$ ’e bağlı olarak değişir. Ayrıca sistemi, sektör sınırlarında belirleyip sınır üzerinde sistemin yönüne göre kontrol sinyalini aktifleştiren ya da engelleyen bir histerisis-ölü bölge fonksiyonudur ve aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Histerisis-Ölü bölge fonksiyonu [42]

Bu fonksiyon,

$$\sigma(s(x), \delta(x)) = \begin{cases} 0 & x \in \mathcal{S}_i \\ \text{değişiklik olmaz} & x \in \mathcal{S}_o \\ 1 & x \in \bar{\mathcal{S}} \end{cases} \quad (2.20)$$

bağıntısı ile tanımlanabilir.

İspat [42]: Sistemin ilk durum koşulları kayan sektörün dış bölgesinde olduğunu kabul edelim. Bu durumda tasarlanan kontrolcü;

$$u = -(SB)^{-1}(SAx + Ks(x)) \quad (2.21)$$

şeklinde tanımlanır.

Eş.2.21’de verilmiş olan kontrolcü sinyali sisteme uygulanmış olsun. Bu durumda Kayma Yüzeyinin türevi,

$$\dot{s}(x) = S\dot{x} = S[Ax + Bu] = SAx + SBu = -Kx \quad (2.22)$$

olur. Böylece

$$\frac{d}{dt}s^2(x) = 2\dot{s}(x)s(x) = -2Ks^2(x) < 0 \quad (2.23)$$

$K > 0$ koşulu ile kayma yüzeyine erişim sağlanmış olur. Bu Kayma Yüzeyinin mutlak değerinin azalacağını ve sistem durumlarının iç sektörün içine gireceğini, yeterince büyük

seçilmiş K değerleri için iç sektörde iken $\delta(x)$ 'in azalma hızı $|s(x)|$ 'den yavaş ise sınırlı bir süre boyunca hareket edeceğini anlatır. Sistem durumların Kayan Sektörün dışından iç sektörün içine Eş. 2.21'de verilmiş olan kontrolcü ile yönlendiğinde;

$$\begin{aligned}
 \dot{V}(t) &= s^2(x) - \delta^2(x) - x^T(t)Rx(t) + 2x^T(t)PBu(t) \\
 &= s^2(x) - \delta^2(x) - x^T(t)Rx(t) + 2s(x)u(t) \\
 &= -(2(SB)^{-1}K - 1)s^2(x) - 2s(x)(SB)^{-1}SAx(t) - \delta^2(x) - x^T(t)Rx(t) \\
 &\leq -(2(SB)^{-1}K - 1)\alpha^2\delta^2(x) - 2x^T(t)S^T(SB)^{-1}SAx(t) - \delta^2(x) \\
 &\quad - x^T(t)Rx(t) \\
 &< -2(SB)^{-1}K\alpha^2\delta^2(x) - 2x^T(t)S^T(SB)^{-1}SAx(t) - x^T(t)Rx(t) \\
 &= (SB)^{-1}x^T(t)(K\alpha^2rQ + S^TSA + A^TS^TS)x(t) - x^T(t)Rx(t) < x^T(t)Rx(t), \\
 \forall x \in \mathcal{S}_i, \sigma(s(x), \delta(x)) &= 1
 \end{aligned} \tag{2.24}$$

Burada $SB = B^TPB > 0$ 'dır. Sistem değişkenleri iç sektörün içine girdiğinde ve bu bölgede kaldığı sürece kontrol girdisi olmayacaktır. Bu durumda $|s(x)| \leq \delta(x)$ ve Lyapunov aday fonksiyonun türevi;

$$\dot{V}(t) = s^2(x) - \delta^2(x) - x^T(t)Rx(t) \leq -x^T(t)Rx(t), \forall x \in \mathcal{S}, \sigma(s(x), \delta(x)) = 0$$

şeklini alır ve böylece sektör içine erişim sağlanmış olur. ■

2.2. Doğrusal Olmayan Sistemler için DBRD ile Kayan Sektör Kontrolcü Tasarım Yöntemi

Doğrusal olmayan sistemler için kayan sektör tasarım yöntemlerinden birisi de Durum Bağımlı Riccati Denklemi (DBRD) yöntemini kullanmaktır. DBRD yönteminin esası, doğrusal olmayan sistemi verilen bir zaman içinde elde edilen durum değişkenleri ile değerlendirerek doğrusal sistem elde etmeye dayanır. DBRD yöntemi ile ilgili ayrıntılı teorik alt yapı referanslarda [13,29,33,41,42,44,46] verilmektedir. Bu bölümde özetlenen yaklaşım, Sinan Özcan'ın tezinde [43] kullandığı yaklaşım olup, KSK tasarımının doğrusal olmayan sistemlere uygulanmasında etkin bir şekilde kullanılabilmektedir. Doğrusal olmayan dinamik sistemler için aşağıdaki gibi tanımlanan denklemler ele alınmış olsun;

$$\dot{x}(t) = f(x, t) + g(x, t)[u(t) + d(x, t)] \quad (2.25)$$

şeklinde doğrusal olmayan bir sistem eğer $f(x, t)$ fonksiyonu $\forall t \in R^+$ için türevlenebilir ise ve bu sistemde her zaman aralığı için küçük değişiklikler gösteriyorsa,

$$\dot{x}(t) = A(x, t)x(t) + B(x, t)[u(t) + d(x, t)] \quad (2.26)$$

biçiminde durum bağımlı doğrusal zamanla değişen sistem olarak ifade edilebilir [13,29].

$f(x, t) = A(x, t) \in R^{n \times n}$, $g(x, t) = B(x, t) \in R^{n \times 1}$ ve $u(t) \in R^1$ olarak tanımlanmış olup $d(x, t)$ belirsizlik ve bozucu fonksiyondur. Bozucu fonksiyon,

$$\|d(x, t)\| \leq F(x, t) \quad (2.27)$$

Eşitsizliği ile ifade edilmiş olup pozitif $F(x, t)$ skalar fonksiyonu ile sınırlandırılmıştır. Eş.2.26'de bahsedilen durum bağımlı doğrusal zamanla değişen sistemin Lyapunov aday fonksiyonu aşağıdaki gibi seçilirse,

$$L(t) = x^T(t)P(x, t)x(t) > 0 \quad (2.28)$$

kontrol edilecek olan sistem durumları sektör iç bölgesine girdiği zaman kontrol çabası sarf etmeksizin,

$$\frac{d}{dt}(L(t)) = \frac{d}{dt}(x^T(t)P(x, t)x(t)) < -x^T(t)R(x, t)x(t) \quad (2.29)$$

eşitsizliğini $\forall x \in R^n$ ve $\forall t \in R^+$ için sağlayarak kararlı hale getiren doğrusal olmayan zamanla değişen kayan sektör ifadesi aşağıda verildiği gibidir [29].

$$\mathcal{S}(x, t) = \{x \mid |s(x, t)| \leq \delta(x, t), x \in R^n, t \in R^+\} \quad (2.30)$$

$R(x, t) \in R^{n \times n}$ matrisi pozitif yarı tanımlı simetrik bir matristir. Burada kararlılığın sağlanabilmesi için,

$$P(x, t)A(x, t) + A^T(x, t)P(x, t) - P(x, t)B(x, t)B^T(x, t)P(x, t) = -\bar{Q}(x, t) \quad (2.31)$$

Denklemleri ile verilen DBRD'nin çözümünden $\forall x \in R^n$ ve $\forall t \in R^+$ için mutlak pozitif tanımlı simetrik bir $P(x, t) \in R^{n \times n}$ matrisi bulunmalıdır. Lyapunov fonksiyonu ise,

$$\begin{aligned} \dot{L}(t) &= x^T(t) \left(A^T(x, t)P(x, t) + P(x, t)A(x, t) + \dot{P}(x, t) \right) x(t) < 0 \\ &= x^T(t) \left(P(x, t)B(x, t)B^T(x, t)P(x, t) - Q(x, t) + \dot{P}(x, t) \right) x(t) < 0 \\ &= x^T(t) \left(P(x, t)B(x, t)B^T(x, t)P(x, t) - Q(x, t) \right) x(t) < 0 \end{aligned} \quad (2.32)$$

Şeklinde türevlenebilir ise kararlılığı sağlayabilmek amacıyla seçilen $\bar{Q}(x, t)$ ağırlık matrisinin,

$$\bar{Q}(x, t) = Q(x, t) - \dot{P}(x, t) \quad (2.33)$$

şartını sağlaması gerekir. $P(x, t)$ matrisi hesaplandıktan sonra durum bağımlı zamanla değişen kayma yüzeyi,

$$s(x, t) = S(x, t)x(t) \quad (2.34)$$

eşitliği ile hesaplanır. Zamanla değişen yüzey eğimlerinden dolayı, kayma yüzeyi de her zaman aralığında değişim göstermektedir. Durum bağımlı zamanla değişen eğim vektörü $S(x, t)$ DBRD çözümünden bulunan $P(x, t)$ matrisi kullanılarak aşağıdaki eşitlikle hesaplanır,

$$S(x, t) = B^T(x, t)P(x, t) \quad (2.35)$$

Bu sayede sistem kayma yüzeyi üzerine geldiğinde $s(x, t) = B^T(x, t)P(x, t)x(t) = 0$ olacaktır ve,

$$\begin{aligned} \dot{L}(t) &= x^T(t) \left(A^T(x, t)P(x, t) + P(x, t)A(x, t) + \dot{P}(x, t) \right) x(t) + 2x^T(t)P(x, t)B(x, t)u(t) \\ &< -x^T(t)R(x, t)x(t) \\ &= x^T(t) \left(P(x, t)B(x, t)B^T(x, t)P(x, t) - \bar{Q}(x, t) \right) x(t) + 2x^T(t)P(x, t)B(x, t)u(t) \\ &< -x^T(t)R(x, t)x(t) \end{aligned}$$

eşitsizliklerinde $B^T(x, t)P(x, t)x(t) = 0$ yerine yazılırsa,

$$B^T(x, t)P(x, t)x(t) = 0$$

$$\dot{L}(t) = -x^T(t)\bar{Q}(x, t)x(t) < -x^T(t)\bar{Q}(x, t)x(t) \quad (2.36)$$

eşitsizliği elde edilir.

$$R(x, t) = (1 - r)\bar{Q}(x, t) \quad (2.37)$$

r katsayısı $0 < r < 1$ olacak şekilde seçilirse kararlılık sağlanır. $\delta(x, t)$ kuadratik fonksiyonu aşağıdaki denklem ile hesaplanır,

$$\delta(x, t) = \sqrt{(x^T(t)\Delta(x, t)x(t))} \quad (2.38)$$

Bu denklemdeki $\Delta(x, t)$ matrisi pozitif yarı tanımlı simetrik bir matris olup aşağıdaki denklem ile bulunur,

$$\Delta(x, t) = r\bar{Q}(x, t) \quad (2.39)$$

Eş. 2.30'da verilen kayan sektörün sınırlarında meydana gelebilecek çırtırtı problemini yok etmek için bu sektör aşağıdaki gibi iki alt kümeye bölünebilir [37].

$$\mathcal{S}_i(x, t) = \{x \mid |s(x, t)| \leq \alpha\delta(x, t), \ x \in R^n\} \quad (2.40)$$

$$\mathcal{S}_o(x, t) = \{x \mid \alpha\delta(x, t) < |s(x, t)| \leq \delta(x, t), \ x \in R^n\} \quad (2.41)$$

Bu denklemlerdeki α katsayısı $0 < \alpha < 1$ aralığında seçilerek iç ve dış olmak üzere ayrılmış sektörlerin boyutlarını belirler. Kayan sektörün tasarlanmasının ardından sistemi sektörün sınırlarının içine yönlendirecek olan kontrolcü aşağıdaki ifade ile belirlenir,

$$u(t) = -\sigma(s(x, t), \delta(x, t))[(S(x, t)B(x, t))^{-1}(S(x, t)A(x, t)x(t) + K(x, t)s(x, t) + \dot{S}(t)x(t))] \quad (2.42)$$

Bu denklemde $K(x, t)$ pozitif skalar bir fonksiyon olup,

$$K(x, t) > \left(\frac{S(x, t)B(x, t)}{2}, K_0(x, t) \right)_{max} \quad (2.43)$$

ifadesi ile hesaplanır. $K_0(x, t)$ pozitif skalar fonksiyonu,

$$\begin{aligned} \dot{L}(t) = & x^T(t) \{ -\bar{Q}(x, t) + P(x, t)B(x, t)B^T(x, t)P(x, t) \} x(t) \\ & - 2x^T P(x, t)B(x, t)(S(x, t)B(x, t))^{-1} (S(x, t)A(x, t)x(t) + \dot{S}(x, t)x(t) \\ & + K(x, t)s(x, t)) \end{aligned}$$

$s(x, t) = B^T(x, t)P(x, t)x(t)$ ve $s^T(x, t) = x^T(t)P(x, t)B(x, t)$ yerlerine yazılırsa,

$$\begin{aligned} \dot{L}(t) = & s^2(x, t) - x^T(t)\bar{Q}(x, t)x(t) \\ & + 2s(x, t) [- (S(x, t)B(x, t))^{-1} (S(x, t)A(x, t)x(t) + \dot{S}(x, t)x(t) \\ & + K(x, t)s(x, t))] \end{aligned}$$

$\Delta(x, t) = \bar{Q}(x, t) - R(x, t) > 0$ yerine yazılırsa,

$$\begin{aligned} \dot{L}(t) = & s^2(x, t) - x^T(t)\Delta(x, t)x(t) - x^T(t)R(x, t)x(t) \\ & - 2s(x, t) [(S(x, t)B(x, t))^{-1} (S(x, t)A(x, t)x(t) + \dot{S}(x, t)x(t) \\ & + K(x, t)s(x, t))] \\ = & - [2(S(x, t)B(x, t))^{-1}K(x, t) - 1] s^2(x, t) \\ & - 2s(x, t)(S(x, t)B(x, t))^{-1} [S(x, t)A(x, t) + \dot{S}(x, t)] x(t) - \delta^2(x, t) \\ & - x^T R(x, t)x(t) \\ \leq & - [2(S(x, t)B(x, t))^{-1}K(x, t) - 1] \alpha^2 \delta^2(x, t) \\ & - 2x^T(t)S^T(x, t)(S(x, t)B(x, t))^{-1} [S(x, t)A(x, t) + \dot{S}(x, t)] x(t) \\ & - \delta^2(x, t) - x^T R(x, t)x(t) \\ < & - 2(S(x, t)B(x, t))^{-1}K(x, t)\alpha^2 \delta^2(x, t) \\ & - 2x^T(t)S^T(x, t)(S(x, t)B(x, t))^{-1} [S(x, t)A(x, t) + \dot{S}(x, t)] x(t) \\ & - x^T R(x, t)x(t) \\ = & -(S(x, t)B(x, t))^{-1}x^T(t) [2K(x, t)\alpha^2 r \bar{Q}(x, t) + S^T(x, t)S(x, t)A(x, t) + \\ & S^T(x, t)\dot{S}(x, t) + A^T(x, t)S^T(x, t)S(x, t)] x(t) - x^T R(x, t)x(t) < \\ & - x^T R(x, t)x(t), \forall x \in \mathcal{S}_i \end{aligned} \quad (2.44)$$

şartını sağlayacak şekilde,

$$\begin{aligned} & 2K_0(x, t)\alpha^2 r \bar{Q}(x, t) + S^T(x, t)S(x, t)A(x, t) + S^T(x, t)\dot{S}(x, t) + \\ & A^T(x, t)S^T(x, t)S(x, t) > 0 \end{aligned} \quad (2.45)$$

ifadesi ile belirlenir. Sistem sektörün dış bölgesinde iken Eş.2.38’de verilen kontrolcünün etkisi ile Eş. 2.44’te belirtilen şekilde sektörün iç bölgesine doğru yönlendirilmektedir. Tasarımı yapılan kontrolcünün Eş.2.26’da bahsi geçen $d(x,t)$ bozucu ve belirsizlik fonksiyonunun etkisine karşı gürbüz olması için,

$$u(t) = -\sigma(s(x,t), \delta(x,t)) \left\{ (S(x,t)B(x,t))^{-1} [S(x,t)A(x,t)x(t) + \dot{S}(t)x(t)] + \left[(S(x,t)B(x,t))^{-1} K(x,t)|s(x,t)| + k(x,t) \right] \text{sign}(s(x,t)) \right\} \quad (2.46)$$

ifadesi ile sisteme girmelidir. Değişken Yapılı Kontrol kuralını sağlayacak $k(x,t)$ pozitif skalar fonksiyonu,

$$s(x,t)\dot{s}(x,t) < \eta|s(x,t)| \quad (2.47)$$

$$s(x,t)[S(x,t)A(x,t)x(t) + \dot{S}(x,t)x(t) + S(x,t)B(x,t)u(t) + S(x,t)B(x,t)d(x,t)] < -\eta|s(x,t)| \quad (2.48)$$

$u(t)$ yerine yazılırsa

$$-K(x,t)s^2(x) + F(x,t) - k(x,t)|s(x,t)| < -\eta|s(x,t)| \quad (2.49)$$

bu denklemden,

$$k(x,t) > F(x,t)\|x(t)\| + \eta \quad (2.50)$$

şartını sağlayacak şekilde seçilmelidir.

Uyarı 1: Doğrusal ve doğrusal olmayan dinamik sistemlerin KSK tasarımı için Bölüm 2.1 ve 2.2’de ifade edilen yöntemler, sistem yörüngelerinin Kayan Sektör içerisine girdikten sonra herhangi bir kontrol çabası uygulanmaması esasına dayanmaktadır.

Uyarı 2: Kayan Sektör içerisinde kontrol girişinin olmaması, sistem kararlılığı ile ilgili herhangi bir olumsuzluk oluşturmamaktadır.

Uyarı 3: Kayan Sektör içerisinde kontrol girişi uygulanmamış olsada sistem yörüngeleri denge noktasına yakın olduğundan kontrol girişi büyüklüğü sınırlıdır.

Bir sonraki bölümde, bu tezin ana katkısı olarak sayılabilecek yeni bir kontrol yöntemi önerilmektedir. Yöntem, Kayan Sektör Kontrol kullanılarak sistem yörüngelerinin kayan sektör içerisine yönlendirilmesi, kayan sektör içerisinde ise Durum Bağımlı Riccati Denklemi tabanlı kontrol kullanılması esasına dayanmaktadır. Böylelikle yeni bir Anahtarlama Kontrol yapısı oluşturulmaktadır.

2.3. Doğrusal Olmayan Sistemler için Kayan Sektör ve Durum Bağımlı Riccati Denklemi Tabanlı Kontrolcüler İçeren Anahtarlama Kontrolcü Tasarım Yöntemi

Önerilen bu yeni yöntemde KSK yöntemine benzer bir yöntem kullanılmakla beraber sektör ikiye ayrılmayıp sadece dış sektör oluşturulmaktadır. Kayma yüzeyi önceden tasarlanan sektörün dışında iken KSK anlatılmış olan kontrolcü kullanılacak olup, kayma yüzeyi önceden tasarlanan sektörün içerisine girdiği zaman DBRD kontrolcü kullanılmaktadır. Kayan Sektör, denge noktasına yakın bölgede tanımlandığı için sistem yörüngeleri kayan sektör içerisinde kaldığında sınırlı büyüklükte kontrol çabası ile sistemi kontrol edebilme beklentisi oluşturmaktadır. Nitekim Bölüm 2.2'deki yöntemde, sistem yörüngeleri kayan sektör içinde kaldığında kontrol çabası uygulanmamaktadır.

Bu bölümde önerilen yöntem ile her ne kadar sektör içerisinde kontrol çabası uygulanmaya devam edilse de kontrol süreci boyunca sürekli kontrol girişinin uygulanmadığı bir yapı elde edilmiştir.

Aşağıdaki gibi doğrusal olmayan bir sistem ele alınmış olsun,

$$\dot{x}(t) = f(x, t) + g(x, t)u(t) \quad (2.51)$$

Eğer $f(x, t)$ fonksiyonu $\forall t \in R^+$ için türevlenebilir ise ve bu sistemde her zaman aralığı için küçük değişiklikler gösteriyorsa,

$$\dot{x}(t) = A(x, t)x(t) + B(x, t)u(t) \quad (2.52)$$

biçiminde durum bağımlı doğrusal zamanla değişen sistem olarak ifade edilebilir [8,24].

$f(x, t) = A(x, t) \in R^{n \times n}$, $g(x, t) = B(x, t) \in R^{n \times 1}$ ve $u(t) \in R^1$ olarak tanımlanmıştır.

Lyapunov aday fonksiyonu aşağıdaki gibi seçilirse,

$$L(t) = x^T(t)P(x, t)x(t) > 0 \quad (2.53)$$

kontrol edilecek olan sistem durumları sektör iç bölgesine girdiği zaman

$$\frac{d}{dt}(L(t)) = \frac{d}{dt}(x^T(t)P(x, t)x(t)) < -x^T(t)R(x, t)x(t) \quad (2.54)$$

eşitsizliğini $\forall x \in R^n$ ve $\forall t \in R^+$ için sağlayarak kararlı hale getiren doğrusal olmayan zamanla değişen kayan sektör ifadesi aşağıda verildiği gibidir [29].

$$S(x, t) = \{x \mid |s(x, t)| \leq \delta(x, t), x \in R^n, t \in R^+\} \quad (2.55)$$

$R(x, t) \in R^{n \times n}$ matrisi pozitif yarı tanımlı simetrik bir matristir. Burada kararlılığın sağlanabilmesi için,

$$\begin{aligned} &P(x, t)A(x, t) + A^T(x, t)P(x, t) - P(x, t)B(x, t)R^{-1}(x, t)B^T(x, t)P(x, t) + Q(x, t) \\ &= 0 \end{aligned} \quad (2.56)$$

Denklemleri ile verilen DBRD'nin çözümünden $\forall x \in R^n$ ve $\forall t \in R^+$ için mutlak pozitif tanımlı simetrik bir $P(x, t) \in R^{n \times n}$ matrisi bulunmalıdır [46]. Sistem değişkenleri sektör içerisine girdiği zaman, denge noktalarına yönlendiren kontrolcü,

$$u(t) = -R^{-1}(x, t)B^T(x, t)P(x, t)x(t) \quad (2.57)$$

şeklinde ifade edilir. Aşağıdaki teorem, bu tez çalışması kapsamında önerilen anahtarlama kontrolcü ile ilgili ana sonucu vermektedir.

Teorem 3: Eş. (2.48)'de verilen doğrusal olmayan sisteme aşağıdaki gibi anahtarlama kontrolcü uygulanmış olsun.

$$\begin{aligned} u(t) = & -\sigma(s(x, t), \delta(x, t)) \left[(S(x, t)B(x, t))^{-1} (S(x, t)A(x, t)x(t) + Ks(x, t) + \dot{S}(t)x(t)) \right] + \\ & (-\sigma_b(s(x, t), \delta(x, t)) [R(x)^{-1}B(x)^T P(x)x(t)]) \end{aligned} \quad (2.58)$$

Burada;

$$\sigma(s(x, t), \delta(x, t)) = \begin{cases} |s(x, t)| \leq |\delta(x, t)| & 0 \\ |s(x, t)| > |\delta(x, t)| & 1 \end{cases} \quad (2.59)$$

$$\sigma_b(s(x, t), \delta(x, t)) = \begin{cases} |s(x, t)| \leq |\delta(x, t)| & Z \\ |s(x, t)| > |\delta(x, t)| & 0 \end{cases} \quad (2.60)$$

$$0 < Z < 1 \quad (2.61)$$

Bu durumda sistem yörüngeleri KSK ile kayan sektör içerisine yönlendirilerek kayan sektör içinde DBRD tabanlı kontrolcü ile (Eş. 2.57) ile kontrol edilir ve sistem kararlılığı sağlanmış olur.

İspat: Eş. 2.58’de verilen kontrolcü Kayan Sektör;

$$u_{ks}(t) = -\sigma(s(x, t), \delta(x, t)) \left[(S(x, t)B(x, t))^{-1} (S(x, t)A(x, t)x(t) + Ks(x, t) + \dot{S}(t)x(t)) \right] \quad (2.62)$$

ve Durum Bağımlı Riccati Denklemi;

$$u_{DBRD}(t) = -\sigma_b(s(x, t), \delta(x, t)) [R(x)^{-1}B(x)^T P(x)x(t)] \quad (2.63)$$

olmak üzere iki ayrı kontrolcü yapısından oluşmakta ve anahtarlama yapılmaktadır.

Sistem değişkenlerinin Kayan Sektör dışında olması halinde Eş. 2.62’deki Kayan Sektör kısmı anahtatlanmaktadır. Eş. 2.62 ile verilen Kayan Sektör Kontrolcüsü Bölüm 2.2’de Eş. 2.42 ile verilen kontrolcü ile aynı olup, bu kontrolcünün sistem yörüngelerini kayan sektör içerisine yönlendirdiği, seçilen Lyapunov denkleminin türevini negatif tanımlı yaptığı Eş. 2.44 ile gösterilmiştir. Böylelikle $u_{ks}(t)$ ile sistem yörüngelerinin kayan sektör içerisine yönlendirildiği garanti altına alınmaktadır.

Sistem değişkenleri sektörün içerisinde iken Eş. 2.63’deki DBRD kontrolcü anahtatlanmaktadır. Bu esnada Lyapunov fonksiyonu ise

$$\begin{aligned} \dot{L}(t) &= \dot{x}^T(t)P(x, t)x(t) + x^T(t)\dot{P}(x, t)x(t) + x^T(t)P(x, t)\dot{x}(t) < -x^T(t)R(x, t)x(t) \\ &= x^T(t)A^T(x, t)P(x, t)x(t) + u^T(t)B^T(x, t)P(x, t)x(t) + x^T(t)\dot{P}(x, t)x(t) + \\ &+ x^T(t)P(x, t)A(x, t)x(t) + x^T(t)P(x, t)B(x, t)u(t) < -x^T(t)R(x, t)x(t) \end{aligned}$$

$$= x^T(t) [A^T(x, t)P(x, t) + P(x, t)A(x, t) + \dot{P}(x, t) - 2P(x, t)B(x, t)R^{-1}(x, t)B^T(x, t)P(x, t)]x(t) < -x^T(t)R(x, t)x(t)$$

Eş. 2.56 kullanılarak;

$$= x^T(t) [P(x, t)B(x, t)R^{-1}(x, t)B^T(x, t)P(x, t) - Q(x, t) + \dot{P}(x, t) - 2P(x, t)B(x, t)R^{-1}(x, t)B^T(x, t)P(x, t)]x(t) < -x^T(t)R(x, t)x(t)$$

$$= x^T(t) [-Q(x, t) + \dot{P}(x, t) - P(x, t)B(x, t)R^{-1}(x, t)B^T(x, t)P(x, t)]x(t) < -x^T(t)R(x, t)x(t)$$

$$= x^T(t) [-Q(x, t) + \dot{P}(x, t) + R(x, t) - P(x, t)B(x, t)R^{-1}(x, t)B^T(x, t)P(x, t)]x(t) < 0$$

$\bar{Q}(x, t) = Q(x, t) - \dot{P}(x, t)$ kullanılarak;

$$= x^T(t) [R(x, t) - \bar{Q}(x, t) - P(x, t)B(x, t)R^{-1}(x, t)B^T(x, t)P(x, t)]x(t) < 0$$

Eş. 2.37 ve Eş. 2.39 kullanılarak;

$$= x^T(t) [-\Delta(x, t) - P(x, t)B(x, t)R^{-1}(x, t)B^T(x, t)P(x, t)]x(t) < 0 \quad (2.64)$$

şartı sağlanmış olur. ■

Eş. 2.56'daki Riccati denkleminde $P(x, t)$ matrisi hesaplandıktan sonra durum bağımlı zamanla değişen kayma yüzeyi,

$$s(x, t) = S(x, t)x(t) \quad (2.65)$$

eşitliği ile hesaplanır. Zamanla değişen yüzey eğimlerinden dolayı, kayma yüzeyi de her zaman aralığında değişim göstermektedir. Durum bağımlı zamanla değişen eğim vektörü $S(x, t)$ DBRD çözümünden bulunan $P(x, t)$ matrisi kullanılarak aşağıdaki eşitlikle hesaplanır,

$$S(x, t) = B^T(x, t)P(x, t) \quad (2.66)$$

$$R(x, t) = (1 - r)\bar{Q}(x, t) \quad (2.67)$$

r katsayısı $0 < r < 1$ olacak şekilde seçilirse kararlılık sağlanır. $\delta(x, t)$ kuadratik fonksiyonu aşağıdaki denklem ile hesaplanır,

$$\delta(x, t) = \sqrt{(x^T(t)\Delta(x, t)x(t))} \quad (2.68)$$

Bu denklemdeki $\Delta(x, t)$ matrisi pozitif yarı tanımlı simetrik olup aşağıdaki denklem ile bulunur,

$$\Delta(x, t) = r\bar{Q}(x, t) \quad (2.69)$$

Kayan sektörün tasarlanmasının ardından sistemi sektörün içinde iken denge noktalarına yönlendirecek olan kontrolcü Eş. 2.58 verilen ifade ile belirlenir,

Kontrolcüde anahtarlamaı sağlayan değişkenler $-\sigma(s(x, t), \delta(x, t))$ ve $(-\sigma_b(s(x, t), \delta(x, t)))$ 'dir. Sistem değişkenleri sektör dışında iken $-\sigma(s(x, t), \delta(x, t)) = 1$, $(-\sigma_b(s(x, t), \delta(x, t))) = 0$, sektör içinde iken $-\sigma(s(x, t), \delta(x, t)) = 0$, $(-\sigma_b(s(x, t), \delta(x, t))) = Z$ olmalıdır. Burada Z , " $0 < Z < 1$ " olacak şekilde sistem cevaplarına uygun olarak seçilmektedir.

Teorem 3'te verilen anahtarlamaı kontrolcü yapısı aşağıda verilmiş olan doğrusal olmayan bir dinamik sisteme uygulanarak benzetim sonuçları verilmiştir.

$$\dot{x}_1 = 8x_1^2 + 2x_2 \quad (2.70)$$

$$\dot{x}_2 = x_1 + 3x_2^4 + (10 + x_1^2)u \quad (2.71)$$

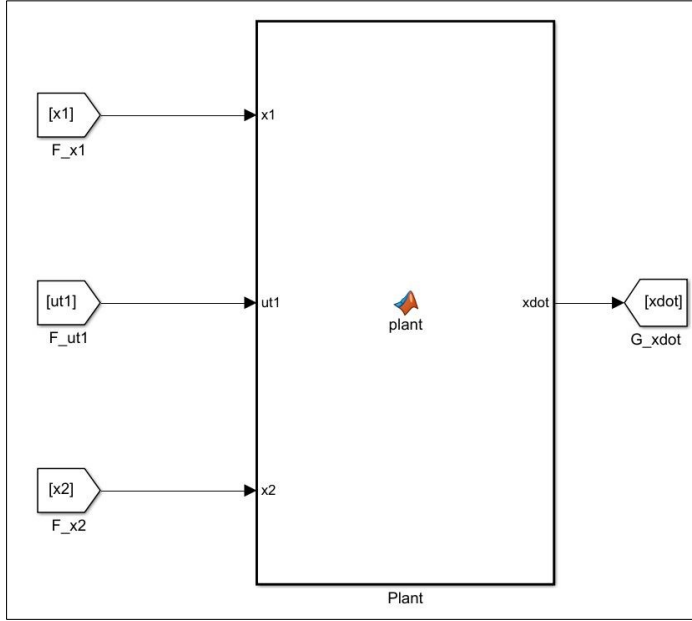
Eş. 2.70 ve 2.71'de verilmiş olan dinamik sistemleri Eş. 2.52'de gösterilen durum bağımlı doğrusal zamanla değişen bir sistem olarak ifade edecek olursak $A(x)$ ve $B(x)$ matrisleri aşağıdaki gibi olur;

$$A(x) = \begin{bmatrix} 8x_1 & 2 \\ 1 & 3x_2^3 \end{bmatrix} \quad (2.72)$$

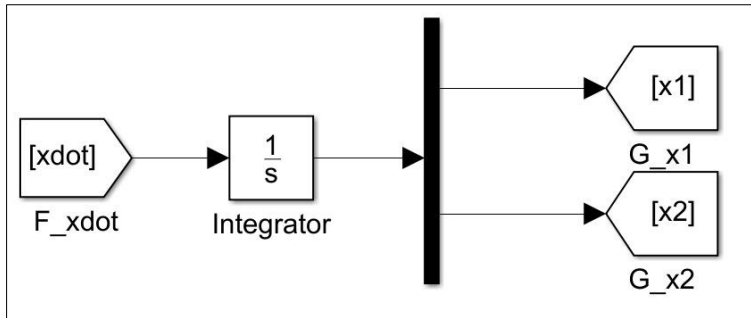
$$B(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ 10 + x_1^3 \end{bmatrix} \quad (2.73)$$

Bu doğrusal olmayan dinamik sisteme sırasıyla DBRD kontrolcü, KSK ve AK uygulanmıştır. Benzetim çalışmasının daha iyi anlaşılması amacıyla oluşturulmuş olan simulink modellerinin şekilleri aşağıda verilmiştir. Üç yöntem içinde ortak kullanılan

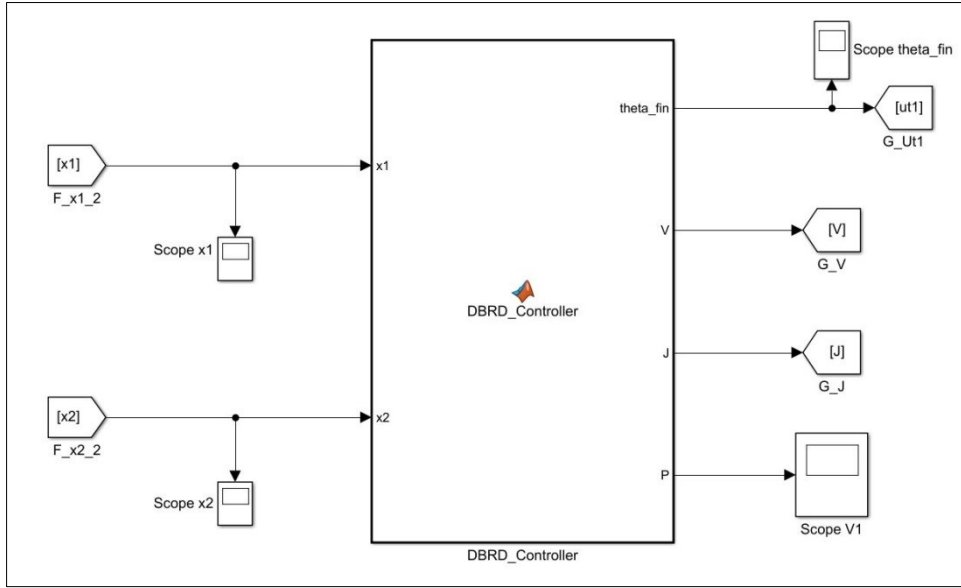
doğrusal olmayan dinamik sistemi içeren blok Şekil 2.3'te gösterilmiştir. Yine üç yöntem içinde ortak kullanılan integrator bloğu ise Şekil 2.4'te gösterilmiştir. Bu benzetim çalışmaları için kullanılan DBRD kontrolcü bloğu Şekil 2.5'te, KSK bloğu Şekil 2.6'da AK bloğu ise Şekil 2.7'de gösterilmiştir. Kontrolcü bloklarının içinde kullanılan algoritmalar sırasıyla Eş.2.57, Eş.2.46 ve Eş.2.58'de verilmiş olan kontrol algoritmalarıdır.



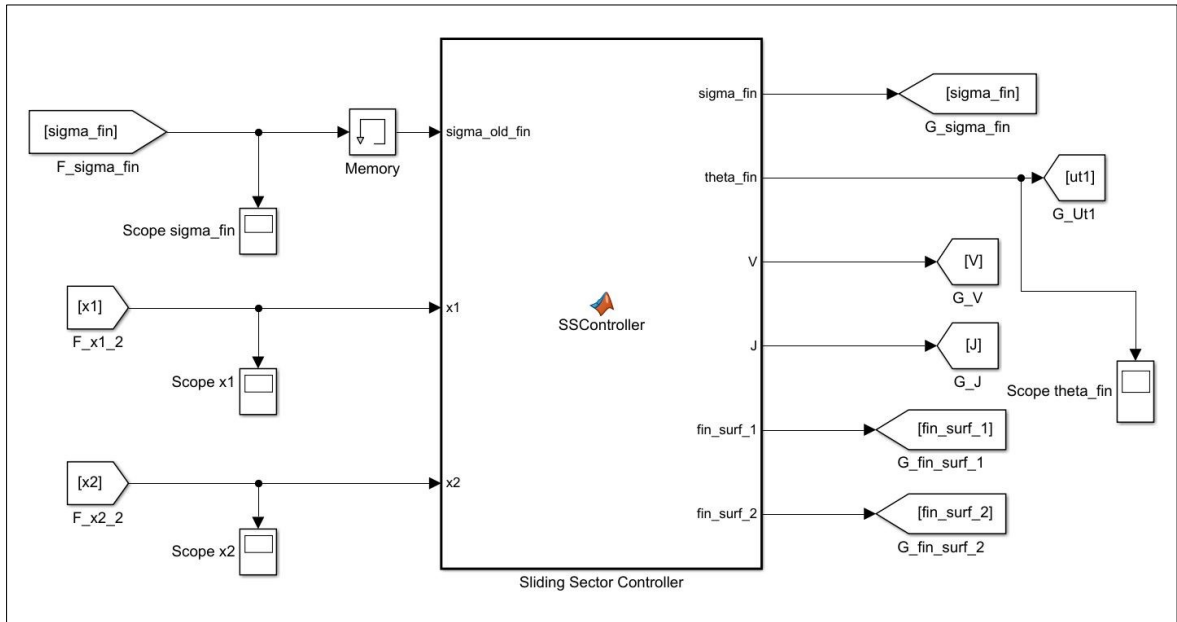
Şekil 2.3. Dinamik denklemleri içeren blok



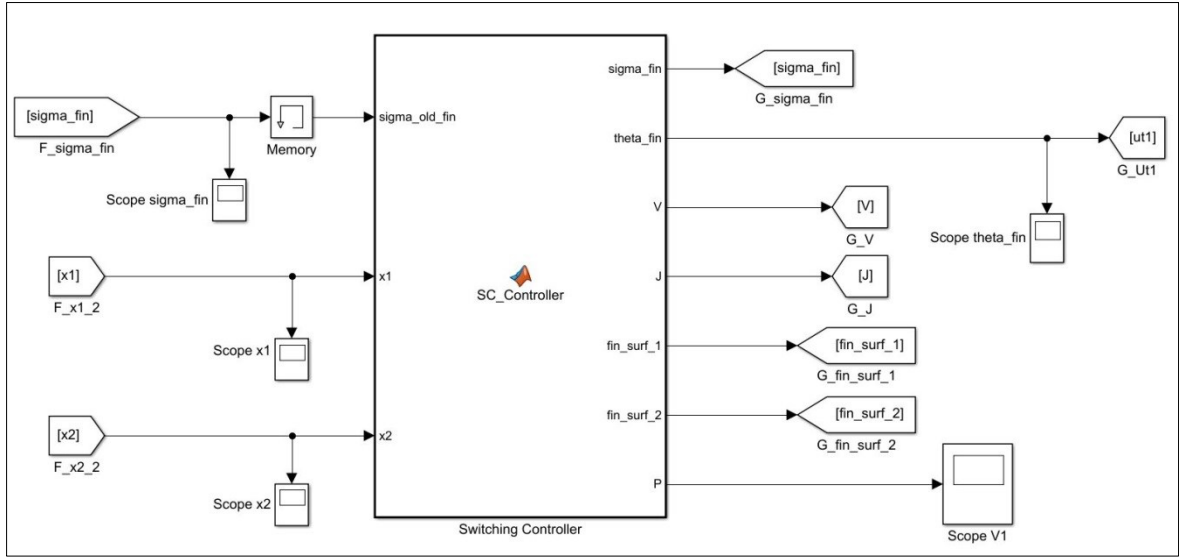
Şekil 2.4. İntegratör bloğu



Şekil 2.5. DBRD kontrolcü bloğu



Şekil 2.6. KSK kontrolcü bloğu



Şekil 2.7. AK kontrolcü bloğu

Benzetim modeli oluşturulduktan sonra üç model içinde örnekleme zamanı 0,01 sn olarak seçilmiştir. Burada yapılacak olan regülatör uygulaması için ilk değerler;

$$x = [2 \quad -2] \quad (2.74)$$

şeklinde olup $R = 0.1$ olarak seçilmiştir. Örneklerde kullanılan Q ağırlık matrisi ise aşağıda verilmiştir;

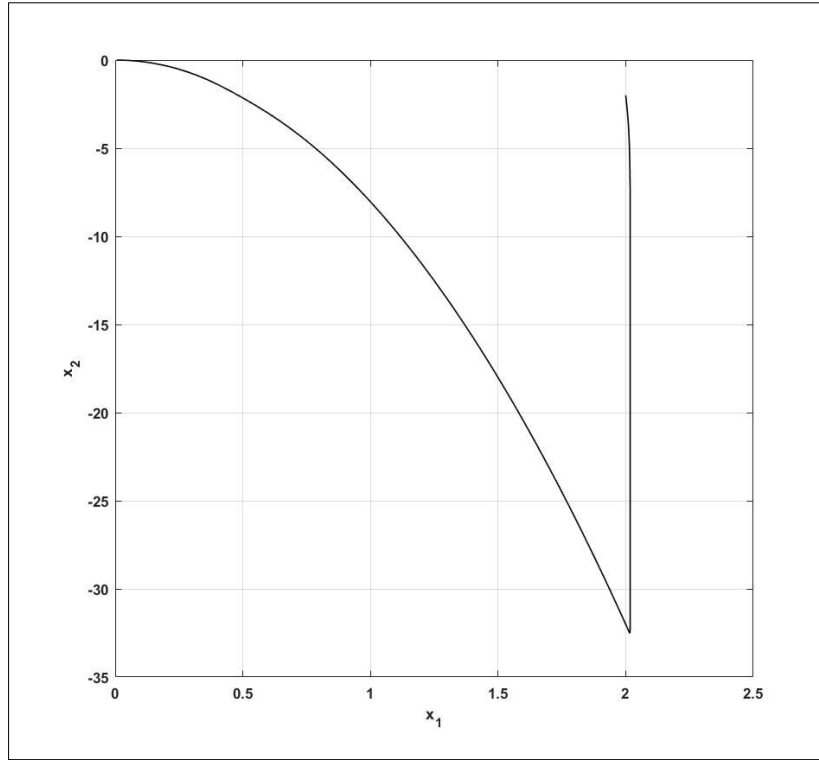
$$Q = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 15000 \end{bmatrix} \quad (2.75)$$

Modelde belirlenen katsayılardan sonra alınan sonuçlar ise aşağıda verilmektedir. Şekil 2.8'de DBRD kontrol tekniğinin doğrusal olmayan dinamik sisteme uygulanması sonucu elde edilen x_1 - x_2 faz diyagramı verilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere faz yörüngesi $[2 \quad -2]$ başlangıç koşuluyla başlayarak düzgün bir yol izleyerek denge noktası olan $[0 \ 0]$ noktasına erişmektedir.

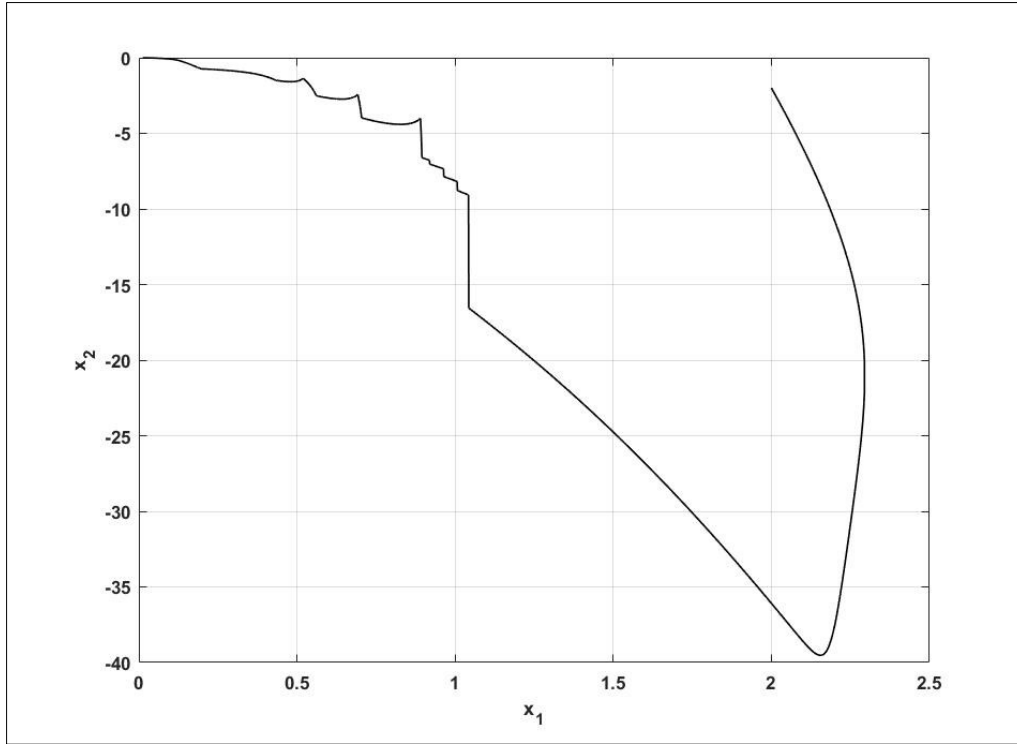
Şekil 2.9'da KSK kontrol tekniğinin doğrusal olmayan dinamik sisteme uygulanması sonucu elde edilen x_1 - x_2 faz diyagramı verilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere faz yörüngesi $[2 \quad -2]$ başlangıç koşuluyla başlayarak kayan sektör içerisine yönlendirilmekte

ve ardından kayan sektör kontrolcü ile sektör içerisinde tutulmaktadır. Sektör içerisindeki davranış biçimi düşük frekanslı çırtırtı özelliğini göstermektedir.

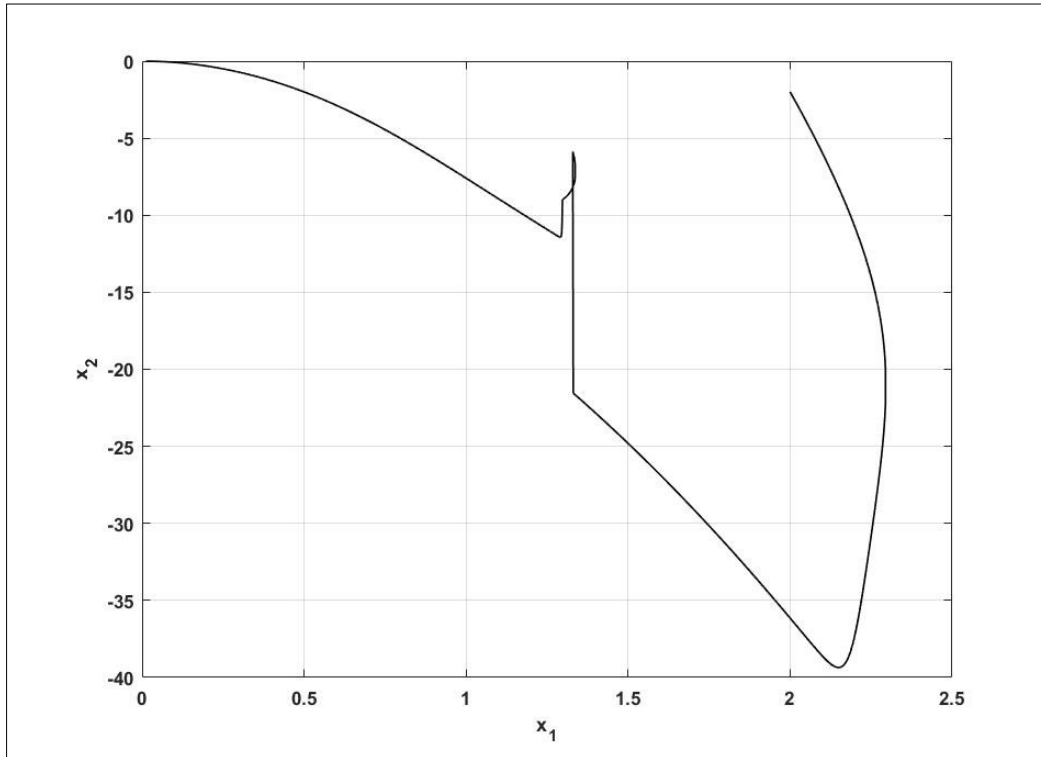
Şekil 2.10'da ise bu tezde önerilen AK kontrol tekniğinin doğrusal olmayan dinamik sisteme uygulanması sonucu elde edilen x_1 - x_2 faz diyagramı verilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere faz yörüngesi $[2 \ -2]$ başlangıç koşuluyla başlayarak kayan sektör içerisine yönlendirilmekte ve ardından DBRD ile kayan sektör içerisinde tutulmaktadır. KSK'nın aksine önerilen yöntemde sektör içerisindeki davranış biçimi düzgün bir yörüngedir.



Şekil 2.8. DBRD faz diyagramı



Şekil 2.9. KSK faz diyagramı

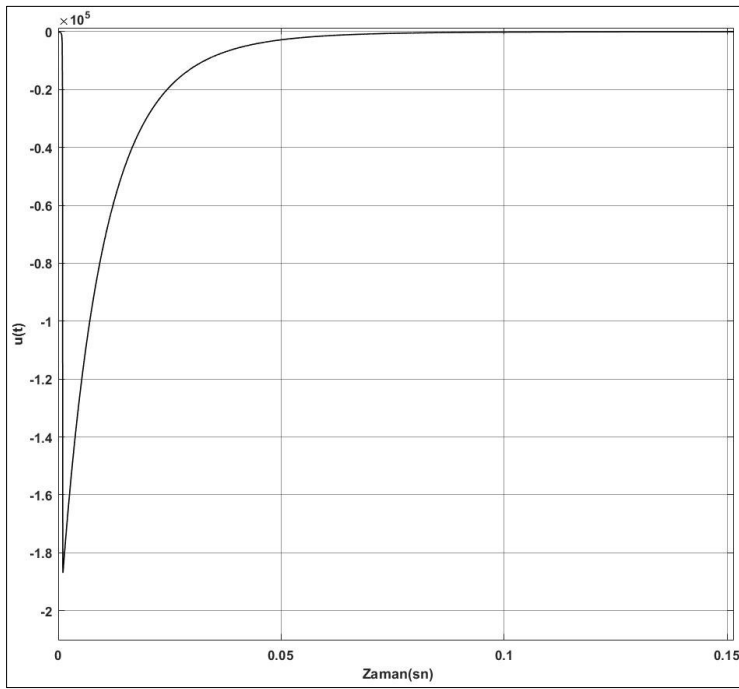


Şekil 2.10. AK faz diyagramı

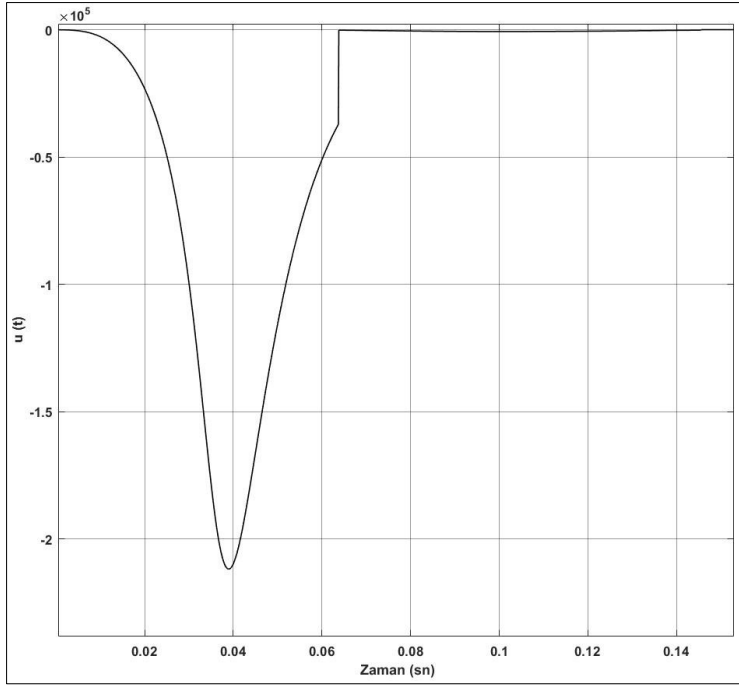
Şekil 2.11’de DBRD kontrol tekniğinin doğrusal olmayan dinamik sisteme uygulanması esnasında elde edilen kontrol sinyali verilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere düzgün bir kontrol sinyali elde edilmektedir.

Şekil 2.12 ve Şekil 2.13’te KSK kontrol tekniğinin doğrusal olmayan dinamik sisteme uygulanması sonucu elde edilen kontrol sinyali verilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere sistem yörüngeleri kayan sektör dışına çıktığında kontrol sinyali uygulanmaktadır.

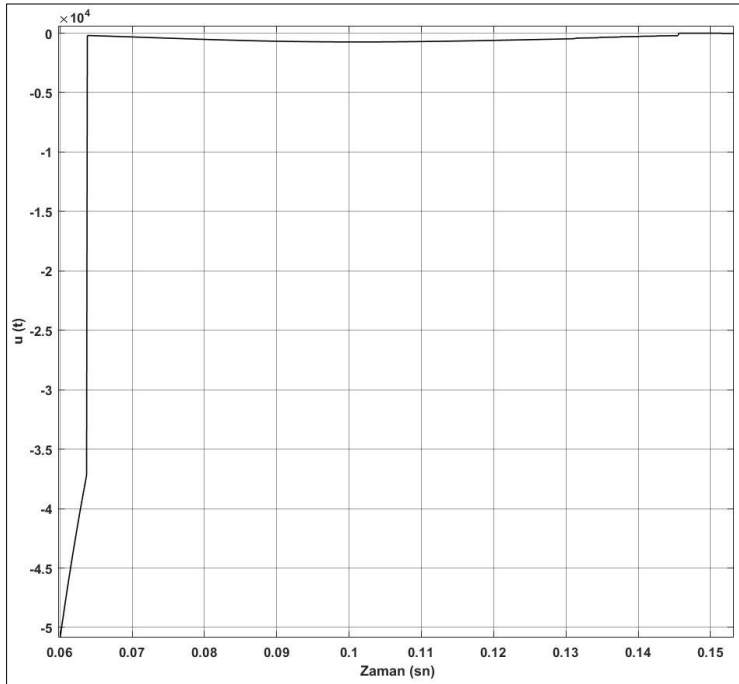
Şekil 2.14 ve Şekil 2.15’te ise bu tezde önerilen AK kontrol tekniğinin doğrusal olmayan dinamik sisteme uygulanması sonucu elde edilen kontrol sinyali verilmektedir. Şekilden görüldüğü kontrol sinyali yörüngeler kayan sektörün içerisine girdikten sonra KSK’nın aksine DBRD kontrolcüye benzer davranış göstererek düzgün bir sinyal oluşturmaktadır.



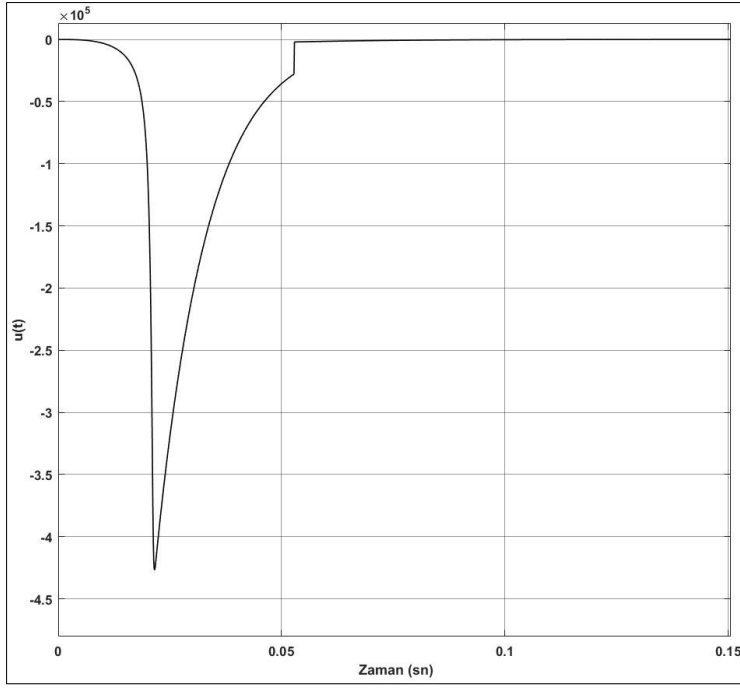
Şekil 2.11. 0-0.15 sn aralığında DBRD kontrol sinyali



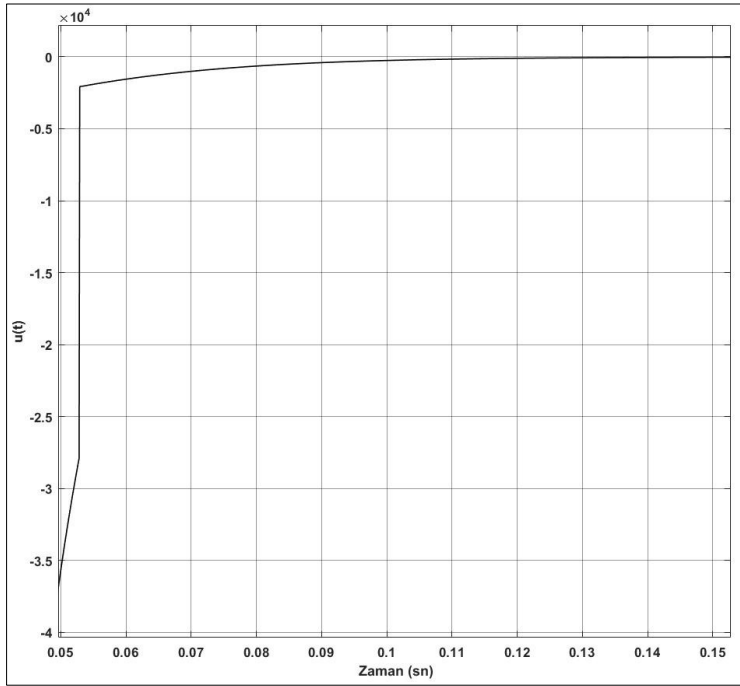
Şekil 2.12. 0-0.15 sn aralığında KSK kontrol sinyali



Şekil 2.13. 0.06-0.15 sn aralığında KSK kontrol sinyali



Şekil 2.14. 0-0.15 sn aralığında AK kontrol sinyali



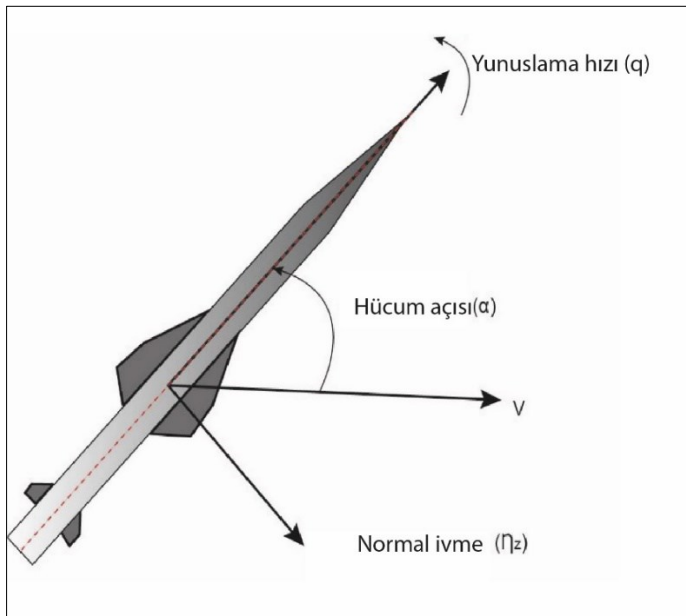
Şekil 2.15. 0.05-0.15 sn aralığında AK kontrol sinyali

3. DOĞRUSAL OLMAYAN FÜZE DİNAMİĞİ İÇİN KAYAN SEKTÖR, DURUM BAĞIMLI RİCCATİ DENKLEMİ VE ANAHTARLAMALI KONTROLCÜ TASARIMLARI

Bu bölümde doğrusal olmayan hareket denklemlerine sahip jenerik bir füze için ivme otopilot tasarımı ele alınmaktadır. Tez kapsamında önerilen Anahtarlamaalı Kontrolcü yapısının karşılaştırılması ise hem Kayan Sektör hem de Durum Bağımlı Riccati Denklemi Tabanlı Kontrolcüler ile yapılmaktadır. Bölüm 3.1 'de doğrusal olmayan Füze Dinamiği ele alınmakta ve ivme otopilot tasarımı için sistem denklemleri yeniden düzenlenmektedir. Bölüm 3.2'de ise Kayan Sektör, Durum Bağımlı Riccati Denklemi Tabanlı Optimal Kontrolcü ve tez kapsamında önerilen Anahtarlamaalı Kontrolcü tasarımları sunulmaktadır.

3.1. Doğrusal Olmayan Füze Dinamiği

Aşağıda verilen doğrusal olmayan füze dinamiği denklemleri daha önce birçok çalışmada farklı yazarlar tarafından kullanılmıştır [12,13]. Bu denklemler doğrusal olmayan bir dinamiğe sahip 20000 ft yükseklikte, 3 Mach hızda ilerlemekte olan füzenin yunuslama hareketini göstermektedir. Fakat bu denklemler herhangi bir gerçek füze modelini yansıtmamakta olup jenerik bir modeldir. Şekil 3.1'de gösterilmiş olan jenerik bir füzeye ait doğrusal olmayan dinamik denklemler Eş. 3.1 ve Eş. 3.2 ile ifade edilebilir [13];



Şekil 3.1. Füze dinamikleri

$$\dot{\alpha} = f \frac{g \cos(\alpha/f)}{WV} F + q \quad (3.1)$$

$$\dot{q} = f \frac{M}{I_{yy}} \quad (3.2)$$

Burada;

$\alpha =$ Hücüm açısı, derece

$q =$ Yunuslama hızı, derece/s

$F = C_z QS =$ Normal Kuvvet, lb

$f =$ Radyan – Derece dönüşüm katsayısı, $(180/\pi)$

$g =$ Yer çekim ivmesi, $(32,2 \text{ ft/s}^2)$

$W =$ Ağırlık, (450 lb)

$V =$ Hız, $(3109,3 \text{ ft/s})$

$Q =$ Dinamik basınç, $(6132,8 \text{ lb/ft}^2)$

$S =$ Referans yüzey, $(0,44 \text{ ft}^2)$

$D =$ Referans çap, $(0,75 \text{ ft})$

$M = C_m QSD =$ Yunuslama momenti, $\text{ft} - \text{lb}$

$I_{yy} =$ Yunuslama eylemsizlik momenti, $(182,5 \text{ slug} - \text{ft}^2)$

$C_m =$ Yunuslama momenti aerodinamik katsayısı

$C_z =$ Normal Kuvvet aerodinamik katsayısı

Diğer yandan ivme otopilotu için ivme denklemi;

$$\eta_z = \frac{F}{W} \quad (3.3)$$

Burada;

$\eta_z = \text{Füzenin normal ivmesi}$

$\eta_z^* = \text{İstenilen normal ivme}$

Normal kuvvet ve yunuslama momenti aerodinamik katsayıları $\alpha = \pm 20$ derece için yaklaşık olarak aşağıdaki gibidir [8].

$$C_z = 0,000103\alpha^3 - 0,00945\alpha|\alpha| - 0,170\alpha - 0,034\delta \quad (3.4)$$

$$C_m = 0,000215\alpha^3 - 0,0195\alpha|\alpha| + 0,051\alpha - 0,206\delta \quad (3.5)$$

Burada,

$\delta = \text{Kanatçık sapması, derece}$

Denklemler tekrar düzenlenirse,

$$\dot{\alpha} = a_{11}(\alpha)\alpha + b_1(\alpha)\delta \quad (3.6)$$

$$\dot{q} = a_{21}(\alpha)\alpha + b_2\delta \quad (3.7)$$

şeklini alır ve,

$$a_{11}(\alpha) = \{0,000366354\alpha^2 - 0,03361214|\alpha| - 0,6046628\} \cos(\alpha/f) \quad (3.8)$$

$$a_{21}(\alpha) = 0,136606374\alpha^2 - 12,38988|\alpha| + 32,404303 \quad (3.9)$$

$$b_1(\alpha) = -0,1209326 \cos(\alpha/f) \quad (3.10)$$

$$b_2 = -130,887968 \quad (3.11)$$

Bu bilgiler ışığında Eş.3.6 ve Eş.3.7'yi aşağıdaki gibi yazabiliriz,

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (3.12)$$

burada $u = \delta$ olup,

$$x = \begin{bmatrix} \alpha \\ q \end{bmatrix}, \quad f(x) = \begin{bmatrix} a_{11}(\alpha)\alpha + q \\ a_{21}(\alpha)\alpha \end{bmatrix}, \quad g(x) = \begin{bmatrix} b_1(\alpha) \\ b_2 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Buradaki amaç füze dinamiğini önceden belirlenen rotanın dışına çıktığında tekrar istenilen rotaya döndürmektir.

Eş. 3.3 ile verilen normal ivme denklemi aerodinamik katsayılar cinsinden ifade edilecek olursa, $F = C_z QS$ eşitliğini ve Eş.3.4'ü kullanarak,

$$\eta_z = a_{31}(\alpha)\alpha + b_3 \delta \quad (3.14)$$

şeklinde yazılabilir. Burada,

$$a_{31}(\alpha) = 0,0006176411\alpha^2 - 0,056667072|\alpha| - 1,019407644$$

$$b_3 = -0,203881528$$

Uygulamalarda kanatçık sapması ikinci derece filtrenin çıktısı olarak alınır. Daha sonra bu çıktı füze dinamiği ile birleştirilir ve,

$$\delta(s) = \frac{\omega_e^2}{s^2 + \zeta_e \omega_e s + \omega_e^2} \delta_k(s)$$

şeklini alır. Bu denklemde,

ζ_e =sönüm oranı

δ_k = kanatçık sapması komutu, derece

ω_e = eyleyici bant genişliği, rad/s

Fakat bu tez çalışmasında kanatçık sapması yapılan modeli basitleştirmek adına kontrol girdisi olarak kullanılmaktadır.

İvmenin integrali sistemin çıktısı olarak kullanılacak olup çalışmada bundan sonra normal hız olarak adlandırılacaktır. Böylece çıktının türevi genişletilmiş durum değişkeni (augmented state) olarak kullanılabilir. Bu sayede kanatçık sapmasının yüksek dereceli türevlerinin ortaya çıkması engellenmiş olur ve kanatçık sapması sistem girdisi olarak alınır. Bu nedenle sistemin çıktısı ve normal ivme takip hatası aşağıdaki şekilde ifade edilir,

$$y = \int \eta_z dt, \quad e = \int (\eta_z - \eta_z^*) dt \quad (3.15)$$

Eş. 3.15'in türevi alınır,

$$\dot{e} = \eta_z - \eta_z^* = a_{31}(\alpha)\alpha + b_3 \delta - \eta_z^* \quad (3.16)$$

şeklini alır. Bu eşitliği, Eş.3.6 ve Eş.3.7 ile birleştirirsek,

$$\begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{q} \\ \dot{e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}(\alpha) & 1 & 0 \\ a_{21}(\alpha) & 0 & 0 \\ a_{31}(\alpha) & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ q \\ e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1(\alpha) \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} \delta + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\eta_z^* \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

denklemini elde edilir. Görüldüğü üzere, füze hareket denklemleri durum değişkenlerine bağlı sistem matrislerinden oluşmaktadır.

3.2. Nonlinear Füze Dinamiği İçin DBRD Kontrolcü, Kayan Sektör Kontrolcü, Kayan Sektör ve Durum Bağımlı Riccati Denklemi (DBRD) Tabanlı Kontrolcüler İçeren Anahtarlama Kontrolcü Tasarımları ve Durum Denklemleri

DBRD kontrolcü ve DBRD tabanlı kayan sektör kontrolcü teorisinin füze dinamiği üstündeki etkilerini göstermek ve parametre belirsizliği ile gürültüye karşı olan etkilerini gözlemlemek ayrıca bu tezde önerilen Kayan Sektör ve Durum Bağımlı Riccati Denklemi (DBRD) Tabanlı Kontrolcüler İçeren Anahtarlama Kontrolcünün sonuçlarını gözlemlemek için model oluşturulmuş ve sonuçlar incelenmiştir. Bu çalışmada kullanılan füze dinamiği daha önce başka çalışmalarda kullanılan jenerik bir model olduğu için hareket denklemleri değiştirilmeden alınmıştır [12]. Bahsi geçen füze dinamiği 3 Mach hızında, 20000 ft yükseklikte ve seyir safhasında hareket etmekte olan bir füzenin dinamiğini ifade etmektedir.

Bu çalışmada ele alınan füze dinamiğine ait durum değişkenleri şunlardır;

$$x_1(t) = \alpha, \text{ Füzenin hücum açısı} \quad (3.18)$$

$$x_2(t) = q, \text{ Füzenin yunuslama açısı} \quad (3.19)$$

$$x_3(t) = \eta_z, \text{ Füzenin normal ivmesi} \quad (3.20)$$

Durum değişkenlerine göre sistemin durum denklemleri ise aşağıdaki gibi ifade edilmiştir,

$$\dot{x}_1 = f \frac{g\left(\cos\left(\frac{x_1}{f}\right)\right)}{wv} F + q \quad (3.21)$$

$$\dot{x}_2 = f \frac{M}{I_{yy}} \quad (3.22)$$

$$\dot{x}_3 = \dot{e} = \eta_z - \eta_z^* \quad (3.23)$$

Bu denklemler Durum Bağımlı katsayılar matrisi formatında şu şekilde yazılabilir;

$$\dot{x}(t) = A(x)x + B(x)u \quad (3.24)$$

Burada $A(x)$ ve $B(x)$ matrislerinin Eş.3.18-3.24'ün yardımlarıyla hesaplanması gerekir. Eş.3.24'te yer alan u (kontrol girdisi) füzenin kanatçıklarına uygulanacak derece cinsinden sapmadır.

Gerekli hesaplamalardan sonra elde edilen $A(x)$ ve $B(x)$ matrisleri aşağıdaki gibi elde edilmiştir;

$$A = \begin{bmatrix} a_{11}(x) & 1 & 0 \\ a_{21}(x) & 0 & 0 \\ a_{31}(x) & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

$$B = \begin{bmatrix} b_1(x) \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

$A(x)$ ve $B(x)$ matrislerini oluşturan matris elemanları ise;

$$a_{11}(x) = \frac{fgq\cos(\frac{x_1}{f})}{wv} [0.000103x_1^2 - 0.00945|x_1| - 0.170] \quad (3.27)$$

$$a_{21}(x) = \frac{fqsd}{I_{yy}} [0.00215x_1^2 - 0.0195|x_1| + 0.051] \quad (3.28)$$

$$a_{31}(x) = \frac{qs[0.000103x_1^2 - 0.00945195|x_1| - 0.170]}{w} \quad (3.29)$$

$$b_1(x) = \frac{f\cos(x_1/f)qSg(-0.034)}{wv} \quad (3.30)$$

$$b_2 = \frac{fqsd(-0.206)}{I_{yy}} \quad (3.31)$$

$$b_3 = \frac{(-0.20310874)qs}{w} \quad (3.32)$$

şeklinde hesaplanmıştır.

Belirsizlikler ve dış gürültü etkisi altında füze dinamiğinin kontrolünü DBRD kontrolcü ve DBRD tabanlı KSK ile sağlamak ve önerilen yeni yöntemin sonuçlarını gözlemlemek için kontrolcüler dinamik sisteme uygulanmış ve benzetim sonuçları elde edilmiştir. Her bir tasarım yöntemi aşağıdaki bölümlerde ayrıntılı olarak incelenmiştir.

3.2.1. Doğrusal olmayan füze dinamiği için DBRD kontrolcü tasarımı

DBRD ile yapılacak kontrolcü benzetimi için aşağıdaki algoritma kullanılacaktır;

$$u_{DBRD}(t) = -[R(x)^{-1}B(x)^T P(x)x(t)] \quad (3.33)$$

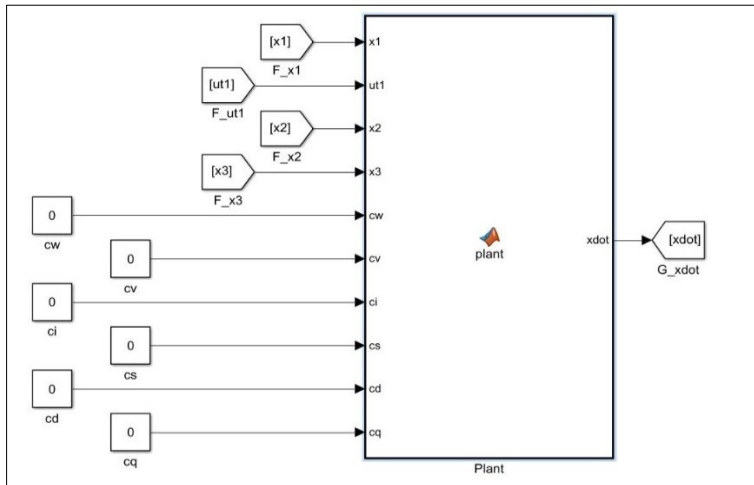
Burada $P(x)$ aşağıda verilen Durum Bağımlı Riccati denkleminin çözümünden elde edilmektedir;

$$P(x,t)A(x,t) + A^T(x,t)P(x,t) - P(x,t)B(x,t)B^T(x,t)P(x,t) + Q(x,t) = 0 \quad (3.34)$$

Tasarlanan algoritma da Q ağırlık matrisi ve sabit R katsayısı için aşağıdaki değerler seçilmiştir;

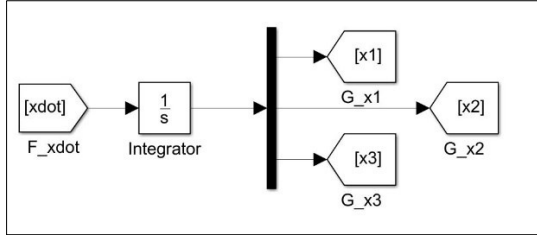
$$Q = \begin{bmatrix} 50 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3750 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2500 \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

$$R = 1 \quad (3.36)$$



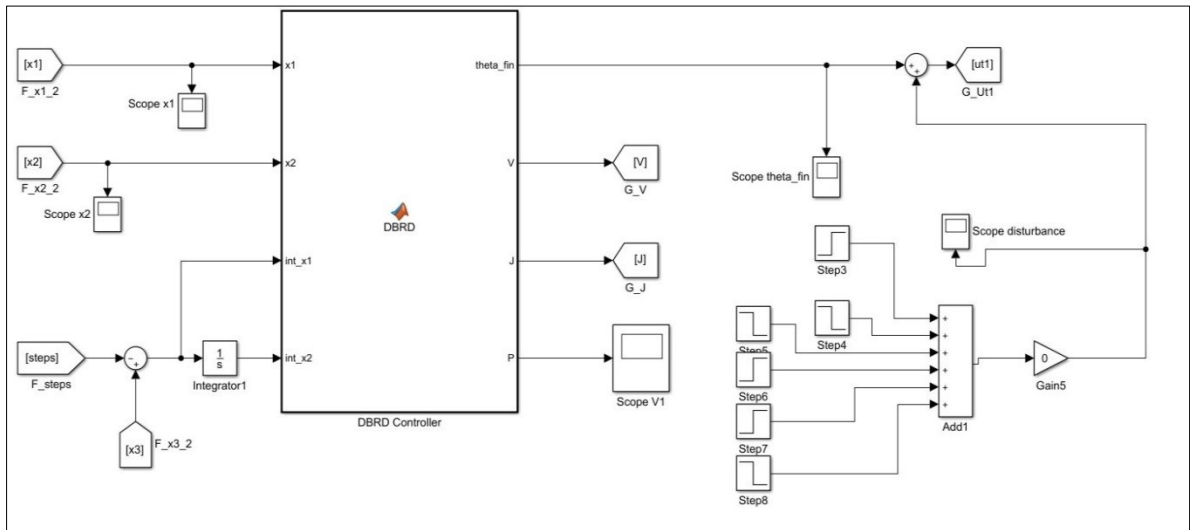
Şekil 3.2. DBRD kontrolcü için sistem plant bloğu

Yukarıda Şekil 3.2’de verilen blokta doğrusal olmayan füze dinamik denklemleri yer almaktadır. Bu bloğun girdileri x_1, x_2, x_3 ve u (kontrol) girişleri olup çıktı olarak $\dot{x}$ matrisi yer almaktadır. Bloкта görülen $c_w, c_v, c_i, c_s, c_d, c_q$ girdileri benzetim esnasında parametre belirsizliği vererek simülasyonu çalıştırmak için konulmuş olup başlangıçta “0” olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.3. İntegratör bloğu

Şekil 3.2’den çıkan $\dot{x}$ matrisi Şekil 3.3’teki integratör bloğuna x_1, x_2, x_3 olmak üzere girerek elemanlarına ayrılmaktadır. İntegratörde ilk değerler (regülatör simülasyonu hariç) $[0 \ 0 \ 0]$ alınmıştır.



Şekil 3.4. Kontrol bloğu

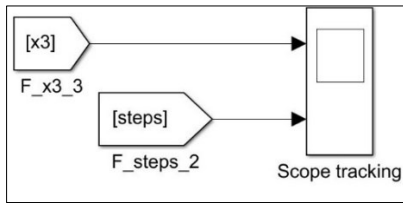
Şekil 3.4’de DBRD simülasyonunda kullanılan kontrol bloğu gösterilmektedir. Bu bloğun girdisi integratör bloğundan çıkan x_1, x_2, x_3 değerleridir. Çıktıları ise maliyet fonksiyonu (J), blokta theta_fin olarak gösterilmiş olan kontrolcü ($u(t)$), $P(x)$ ve Lyapunov fonksiyonudur (V). Burada $u(t)$ Eş. 3.33’te verilmiş denklem ile hesaplanmaktadır. $P(x)$ ise

Eş. 3.34'ün çözümünden elde edilmektedir. Lyapunov ve maliyet fonksiyonları ise aşağıda verilmiş olan eşitlikler ile hesaplanmıştır.

$$V = x^T(t)P(x)x(t) \quad (3.37)$$

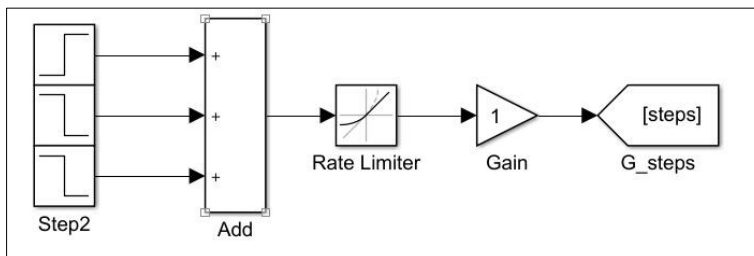
$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (x^T(t)Q(x)x(t) + u^T(t)R(x)u(t))dt \quad (3.38)$$

Bu bloğun sağ tarafında yer alan step girdileri doğrusal olmayan dinamik sisteme gürültü besleyebilmek için modellenmiştir. Bloğun bu bölümünün birden çok girdinin toplamı şeklinde modellenmesi istenilen zamanlarda impuls girdisi gibi davranabilmesini sağlamaktır.



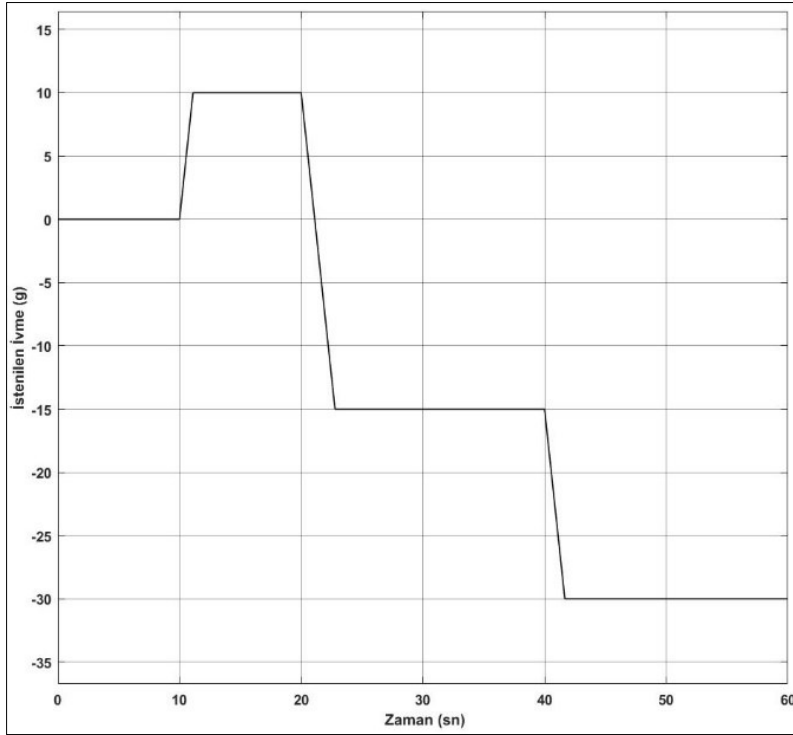
Şekil 3.5. İvme takibi izleme bloğu

Şekil 3.5'te verilen blokta ivme otopilotunun davranışını gözlemlemek için oluşturulmuş olup blokta “steps” olarak gözüken istenilen ivme aşağıda verilen Şekil 3.5 ile modellenmiştir;



Şekil 3.6. İstenilen ivme bloğu

Şekil 3.6'da verilen blokta ivmenin 10. sn'de 0 g'den 10 g'ye çıkması, 20.sn'de 10g'den -15 g'ye inmesi, 40 sn'de ise -15 g'den -30 g'ye inmesi istenmiş ve buna göre modellenmiştir. İstenilen ivmenin grafiği aşağıda görsel olarak verilmiştir.

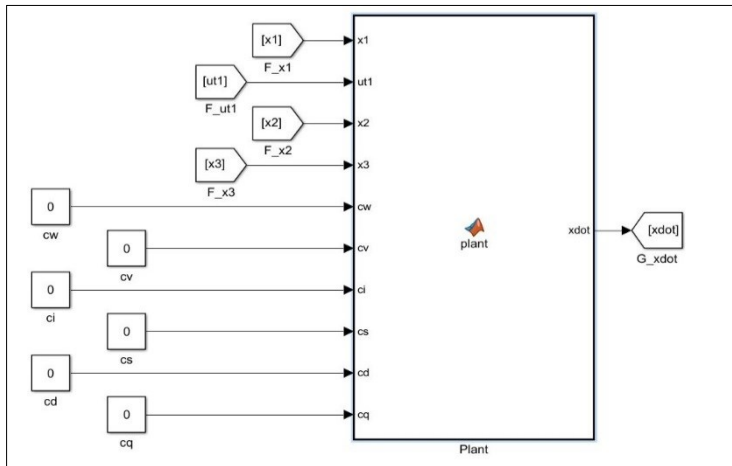


Şekil 3.7. İstenilen ivme grafiği

3.2.2. Doğrusal olmayan füze dinamiği için KSK kontrolcü tasarımı

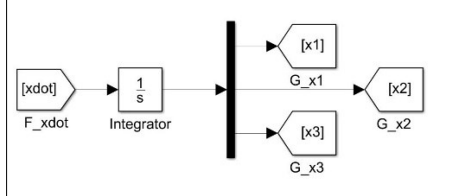
KSK ile yapılacak olan kontrolcü tasarımı için aşağıdaki denklem kullanılacaktır;

$$u(t) = -\sigma(s(x,t), \delta(x,t)) \left[(S(x,t)B(x,t))^{-1} (S(x,t)A(x,t)x(t) + K(x,t)s(x,t) + \dot{S}(t)x(t)) \right] \quad (3.39)$$



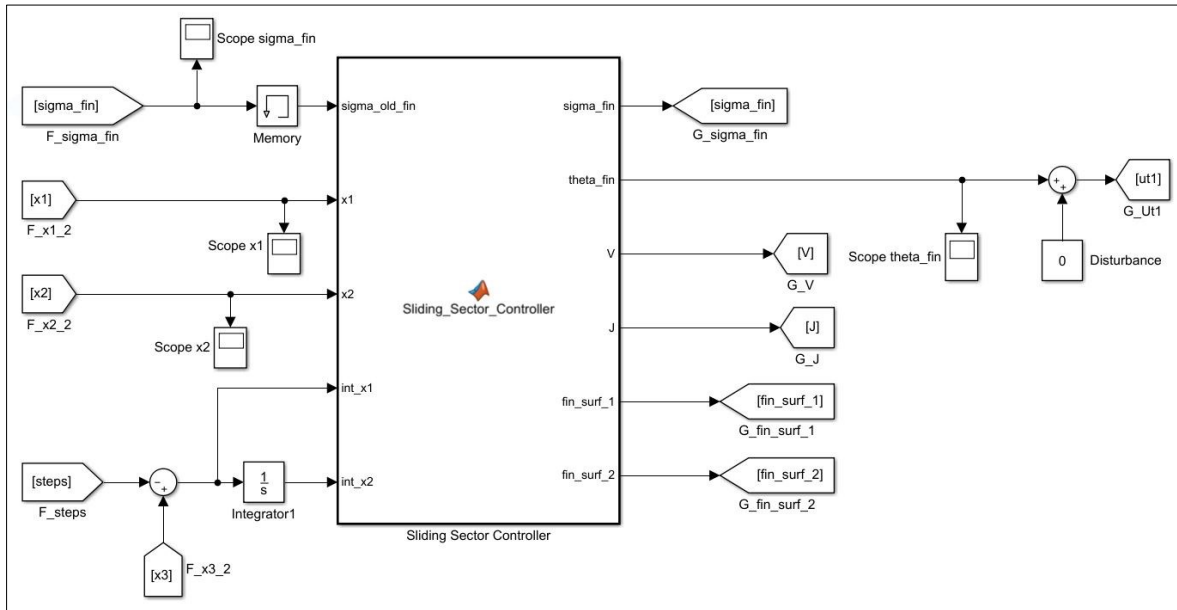
Şekil 3.8. KSK için sistem plant bloğu

Yukarıdaki blokta doğrusal olmayan füze dinamik denklemleri yer almakta olup kontrolcü ve dinamik sistemin değişkenleri bu bloğun giriş elemanlarını oluşturmaktadır. $\dot{x}$ matrisi ise bu bloğu çıktısı olarak tanımlanmıştır.”0” olarak verilmiş olan sabitler parametre belirsizliği etkisinde sistem incelenmek istediğinde kullanılmak üzere oluşturulmuştur.



Şekil 3.9. İntegratör bloğu

Benzetim çalışmasının sistem bloğundan çıkan $\dot{x}$ matrisi Şekil 3.9’da gösterilmiş olan integratör bloğuna girerek elemanlarına ayrılmaktadır. Regülatör benzetim çalışması hariç diğer benzetimlerde ilk değerler $[0 \ 0 \ 0]$ olarak seçilmiştir.



Şekil 3.10. Kontrol bloğu

Şekil 3.10’da gösterilen KSK Kontrolcü bloğuna integratör bloğundan çıkan x_1, x_2, x_3 beslenir. Eş. 3.39’da verilmiş olan kontrolcü algoritması bu bloğun içinde yer alır ve bloğun bir çıktısıdır. Bloğun diğer çıktıları Lyapunov fonksiyonu, maliyet fonksiyonu, sigma, kayma yüzeyi ve kayan sektördür. Lyapunov fonksiyonu Eş. 3.37, maliyet

fonksiyonu Eş. 3.38 ile hesaplanmaktadır. Bu bloğun içinde yer alan Q ağırlık matrisi ve sabit R katsayısı için aşağıdaki değerler seçilmiştir;

$$Q = \begin{bmatrix} 50 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3750 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2500 \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

$$R = 1 \quad (3.41)$$

Kontrolcü algoritmasında yer alan $\sigma(s(x, t), \delta(x, t))$ (sigma) kayma yüzeyinin sektörün iç bölgesinde mi dış bölgesinde mi olduğunu anlamayı sağlayan elemandır ve kayma yüzeyi ile kayan sektörün her bir adımdaki durumlarını karşılaştırarak çalışır. $s(x, t)$ kayma yüzeyini ifade etmekte olup;

$$s(x, t) = S(x, t)x(t) = B^T(x, t)P(x, t) \quad (3.42)$$

İfadesi ile hesaplanır. Buradaki $P(x, t)$ elemanı aşağıda verilen denklemin çözümünden elde edilmektedir;

$$P(x, t)A(x, t) + A^T(x, t)P(x, t) - P(x, t)B(x, t)B^T(x, t)P(x, t) + Q(x, t) = \dot{P}(x, t) \quad (3.43)$$

Buradaki denklem geri farklar yöntemi kullanılarak çözülmüştür. Denklem herhangi bir başlangıç koşulunda $P(x(t_0), t_0) = P^T(x(t_0), t_0) > 0$ üzerinden yakınsar ya da yakınsaması beklenir.

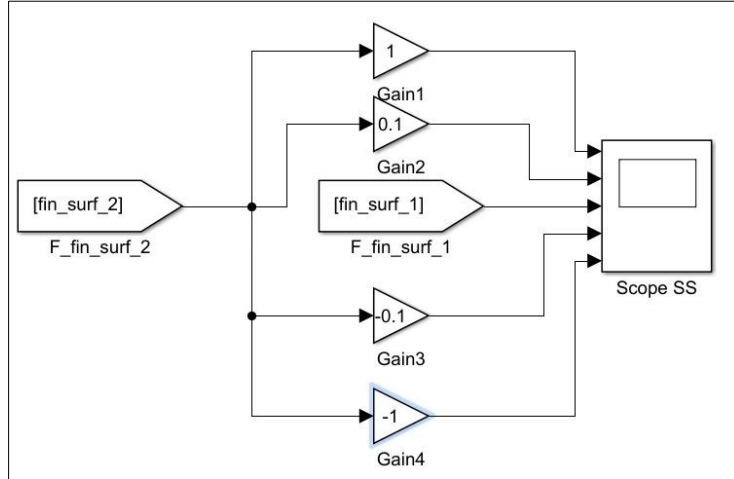
$\delta(x, t)$ ifadesi kayan sektörü temsil etmekte olup;

$$\delta(x, t) = \sqrt{(x^T(t)\Delta(x, t)x(t))} \quad (3.44)$$

$$\Delta(x, t) = r\bar{Q}(x, t) \quad (3.45)$$

$$\bar{Q}(x, t) = Q(x, t) - \dot{P}(x, t) \quad (3.46)$$

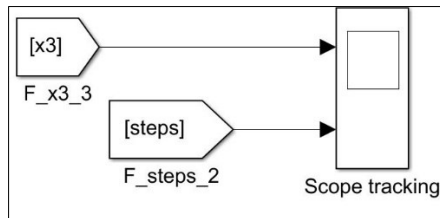
ifadesi ile hesaplanır. Burada $0 < r < 1$ olacak şekilde seçilmelidir. Benzetim çalışmasında $r = 0.1$ olarak seçilmiştir. $\dot{S}(t)$ 'nin ilk değeri “0” alınmış olup her bir adımda tekrar hesaplatılmıştır. Eş. 2.43 ve Eş. 2.45 kullanılarak bulunan $K(x, t)$ 'nin bu benzetim çalışmaları için değeri “20”dir.



Şekil 3.11. Kayan sektör

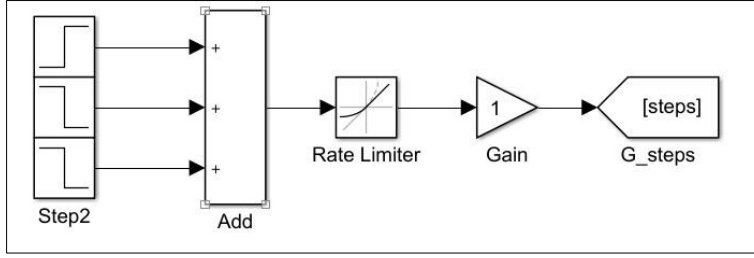
Şekil 3.11’de gösterilmiş olan blok $s(x, t)$ ve $\delta(x, t)$ ’yi kullanarak doğrusal olmayan dinamik sistem için oluşturulan zamanla değişen kayma yüzeyi ve kayan sektörleri göstermektedir. Kayan sektörü iç ve dış sektör olmak üzere ikiye ayırmak için seçilmiş olan α değeri bu çalışmada “0.1” olarak seçilmiştir.

Kontrol bloğunun sağ tarafında yer alan sabit değer girdisi istenildiği zaman kontrolcüye dışarıdan gürültü besleyebilmek için eklenmiştir.



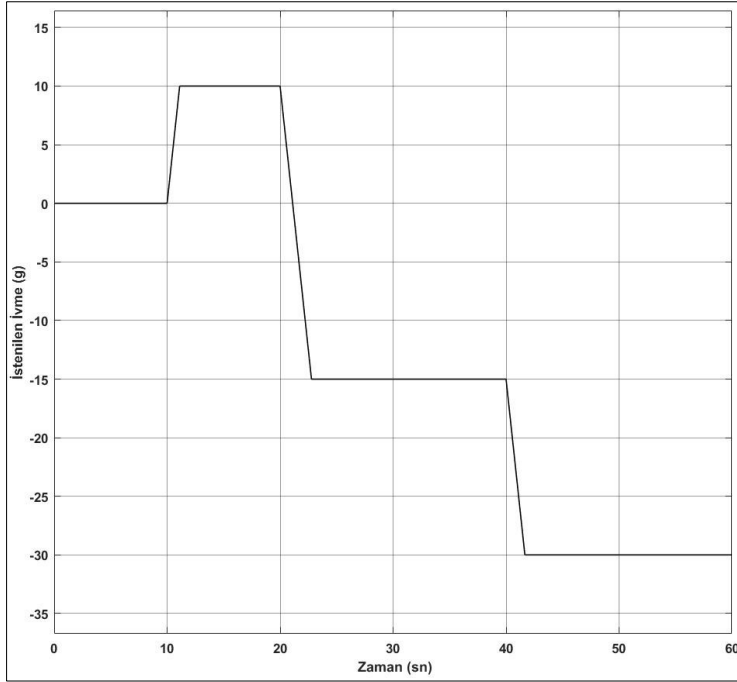
Şekil 3.12. İvme takibi izleme bloğu

Şekil 3.12’de verilen blokta ivme otopilotunun davranışını gözlemlemek için oluşturulmuş olup blokta “steps” olarak gözüken istenilen ivme aşağıdaki gibi modellenmiştir;



Şekil 3.13. İstenilen ivme bloğu

Şekil 3.13’de verilen blokta ivmenin 10. sn’de 0 g’den 10 g’ye çıkması, 20.sn’de 10g’den -15 g’ye inmesi, 40 sn’de ise -15 g’den -30 g’ye inmesi istenmiş ve buna göre modellenmiştir. İstenilen ivmenin grafiği aşağıda görsel olarak verilmiştir.



Şekil 3.14. İstenilen ivme grafiği

3.2.3. Doğrusal olmayan füze dinamiği için anahtarlama kontrolcü tasarımı

AK ile yapılacak kontrolcü benzetimi için aşağıdaki algoritma kullanılmaktadır;

$$u_{AK}(t) = -\sigma(s(x, t), \delta(x, t)) \left[\left(S(x, t)B(x, t) \right)^{-1} \left(S(x, t)A(x, t)x(t) + Ks(x, t) + \dot{S}(t)x(t) \right) \right] + (-\sigma_b(s(x, t), \delta(x, t)) [R(x)^{-1}B(x)^T P(x)x(t)]) \quad (3.47)$$

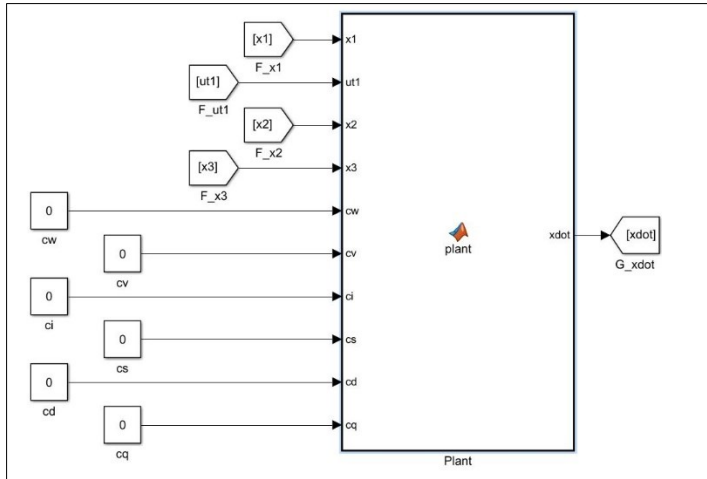
Yukarıda eş. 3.47 ile verilmiş olan kontrolcüde $\sigma(s(x, t), \delta(x, t))$ ve $\sigma_b(s(x, t), \delta(x, t))$ her adımda kayan sektör ve kayma yüzeyinin birbirine göre durumlarını kontrol ederek anahtarlamayı sağlamaktadır. Bu kontrolcü ilk kısmı kayan sektörün dışında olan dinamik sistemin durum değişkenlerini sektörün içine çekmekte olup KSK yapısındadır.

$$u_{ks}(t) = -\sigma(s(x, t), \delta(x, t)) \left[(S(x, t)B(x, t))^{-1} (S(x, t)A(x, t)x(t) + Ks(x, t) + \dot{S}(t)x(t)) \right] \quad (3.48)$$

İkinci kısmı ise kayan sektör içine giren dinamik sistemin durum değişkenlerini denge noktalarına yönlendirmekte olup DBRD yapısındadır.

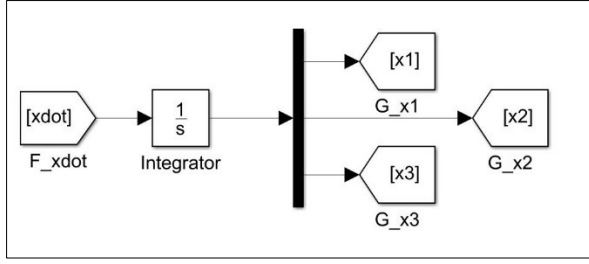
$$u_{DBRD}(t) = -\sigma_b(s(x, t), \delta(x, t)) [R(x)^{-1} B(x)^T P(x)x(t)] \quad (3.49)$$

Bu kontrol algoritmalarının hesaplanmasında kullanılan parametreler Bölüm 3.2.2 ve Bölüm 3.2.1’de anlatılmıştır.



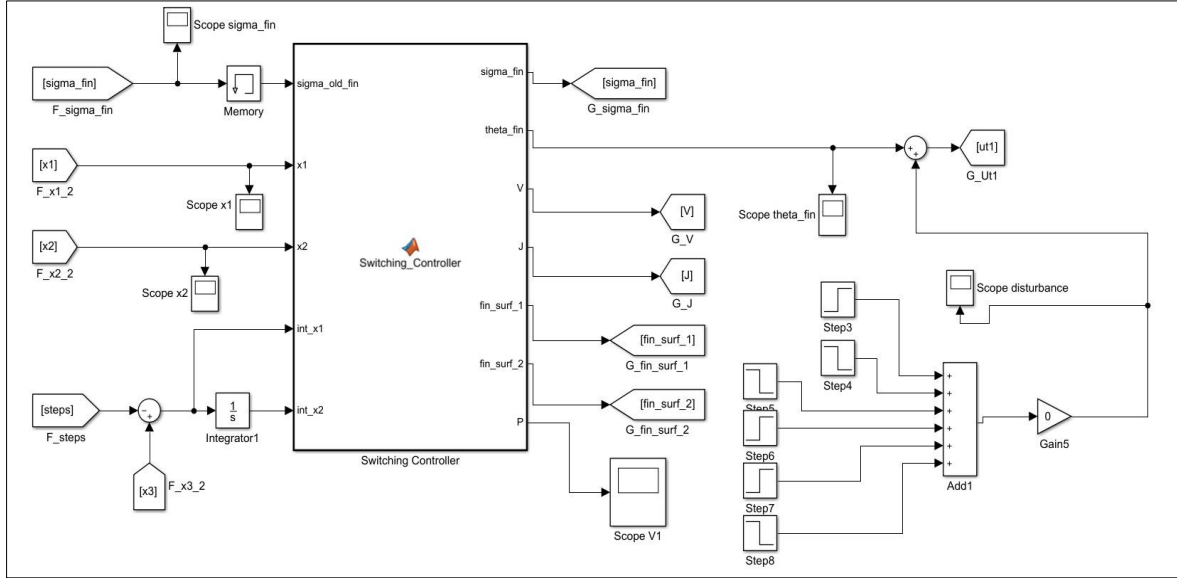
Şekil 3.15. AK için sistem plant bloğu

Yukarıdaki Şekil 3.15’te verilmiş olan blokta doğrusal olmayan füze dinamik denklemleri yer almakta olup kontrolcü ve dinamik sistemin değişkenleri bu bloğun giriş elemanlarını oluşturmaktadır. $\dot{x}$ matrisi ise bu bloğun çıktısı olarak tanımlanmıştır. Bloğun sol tarafında verilmiş olan sabit girdiler parametre belirsizliği etkisinde sistem incelenmek istediğinde kullanılmak üzere oluşturulmuştur.



Şekil 3.16. İntegratör bloğu

Şekil 3.15'in çıktısı olan $\dot{x}$ matrisi Şekil 3.16'daki integratör bloğundan geçerek kontrol bloğuna gönderilir. Regülatör benzetim çalışması hariç diğer benzetimlerde ilk değerler $[0 \ 0 \ 0]$ olarak seçilmiştir.

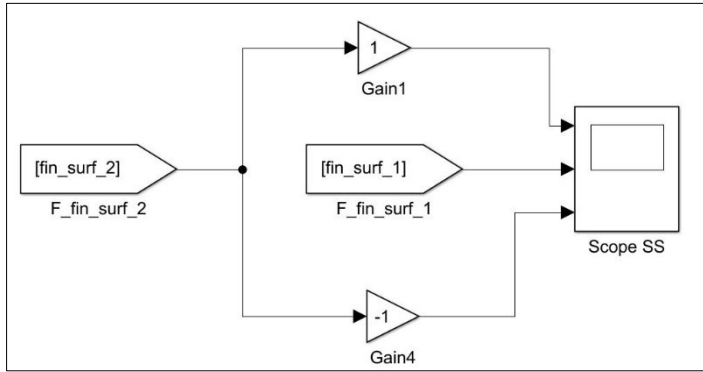


Şekil 3.17. Kontrol bloğu

Şekil 3.17'de AK simülasyonunda kullanılan kontrol bloğu verilmiştir. Bu bloğun girdisi integratör bloğundan çıkan x_1, x_2, x_3 değerleridir. Çıktıları ise maliyet fonksiyonu, blokta θ_{fin} olarak belirtilmiş olan kontrolcü ($u(t)$), $P(x)$ ve Lyapunov fonksiyonudur. Burada $u(t)$ Eş. 3.47'de verilmiş denklem ile hesaplanmaktadır. Lyapunov fonksiyonu Eş. 3.37, maliyet fonksiyonu Eş. 3.38 ile hesaplanmaktadır. $P(x)$ ise Eş. 3.34'ün çözümünden elde edilmektedir. Ayrıca bloğa istenildiği zaman impuls girdisi şeklinde girdi tanımlayabilmek için step girdileri eklenmiştir. $\sigma_b(s(x, t), \delta(x, t))$ için seçilen Z değeri 0.5 alınmıştır. Q ağırlık matrisi ve sabit R katsayısı için aşağıdaki değerler seçilmiştir;

$$Q = \begin{bmatrix} 50 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3750 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2500 \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

$$R = 1 \quad (3.51)$$



Şekil 3.18. Kayan sektör bloğu

Şekil 3.18’de gösterilmiş olan blok $s(x, t)$ ve $\delta(x, t)$ ’yi kullanarak doğrusal olmayan dinamik sistem için oluşturulan zamanla değişen kayma yüzeyi ve kayan sektörleri göstermektedir. AK’de KSK’dan farklı olarak sektör iç ve dış olarak ikiye bölünmemektedir. Burada önemli olan kayma yüzeyinin kayan sektöre göre konumudur.

AK algoritmasında; Şekil 3.12’de verilen ivme takip izleme bloğu, Şekil 3.13’te verilen istenilen ivme bloğu ve Şekil 3.14’te verilen istenilen ivme grafiği kullanılmıştır.

4. BENZETİM SONUÇLARI

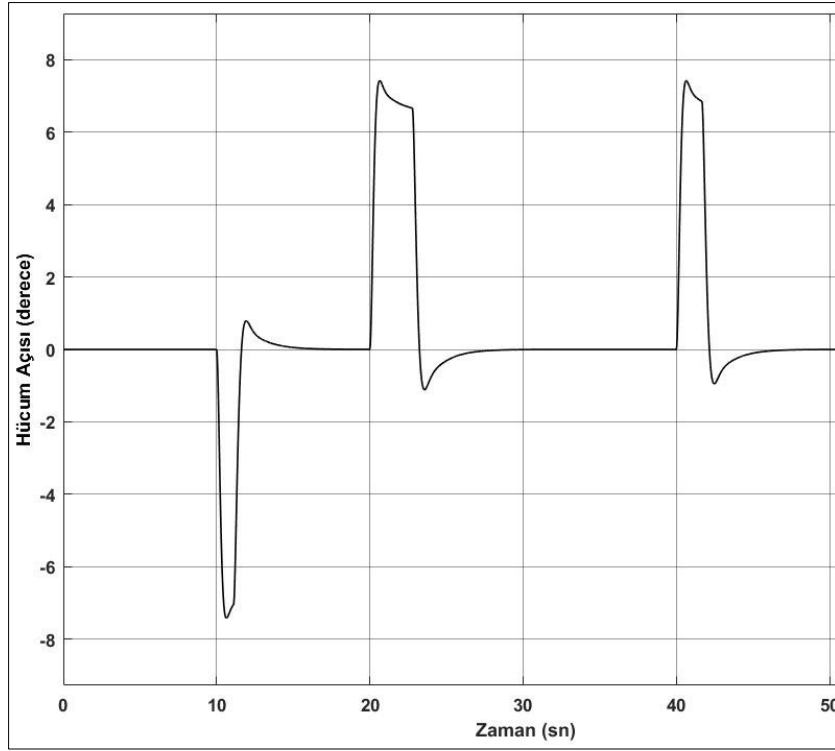
Bu bölümde Durum Bağımlı Riccati Denklemi Kontrolcüsü, Bölüm 2.2’de anlatılan doğrusal olmayan sistemler için Kayan Sektör Kontrolcü ve Bölüm 2.3 ‘te anlatılan doğrusal olmayan sistemler için Kayan Sektör ve Durum Bağımlı Riccati Denklemi Tabanlı Kontrolcüler içeren Anahtarlama Kontrolcü tasarımları yapılmış ve bu kontrolcüler Bölüm 3’te anlatılan doğrusal olmayan füze dinamiğine uygulanarak benzetim çalışmaları yapılmıştır. Benzetim çalışmalarında her bir kontrolcü öncelikle hiçbir gürültü ve belirsizlik olmadan çalıştırılmış ardından sırasıyla gürültü varken, parametre belirsizliği varken, farklı başlangıç koşullarında çalıştırılmış ve sonuçlar aşağıda verilmiştir.

4.1. Doğrusal Olmayan Füze Dinamiği İçin DBRD Kontrolcü Uygulaması ve Benzetim Sonuçları

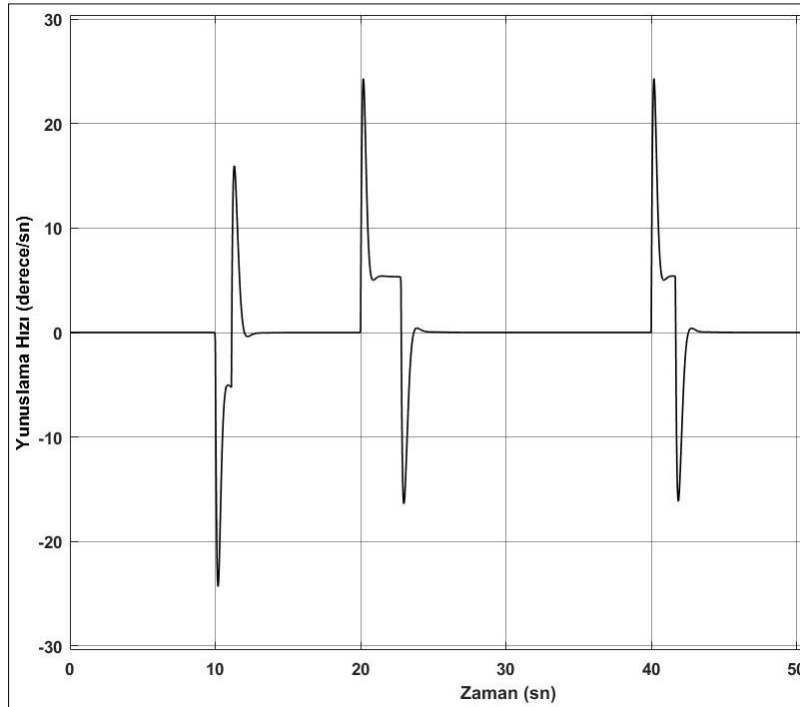
4.1.1. Gürültü ve parametre belirsizliği olmadan yapılan DBRD kontrolcü uygulaması ve benzetim sonuçları

DBRD kontrolcünün doğrusal olmayan bir füze dinamiği üzerinde etkilerini görmek için programda model oluşturulmuş ve DBRD kontrolcü kullanılarak simülasyon yürütülmüştür. İlk yürütümde hiçbir dış etki olmadan kontrolcünün etkisi gözlemlenmiştir. İvme takibi için $t = 10\text{ s}$, $t = 20\text{ s}$ ve $t = 40\text{ s}$ ’lerinde basamak girdisi verilmiştir. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de kontrolcünün dinamik denklemin durum değişkenleri üzerindeki etkileri gösterilmektedir.

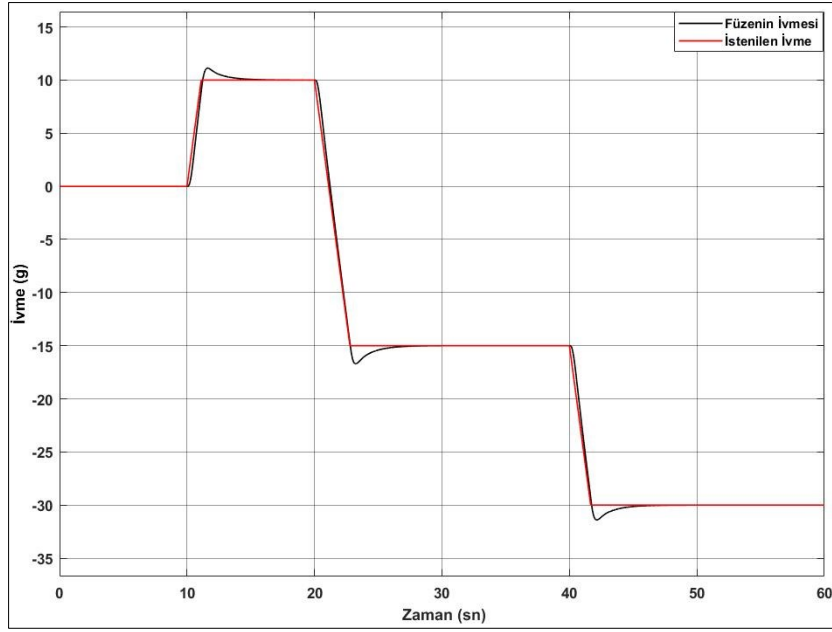
Hücum açısı, ivme takibi için verilen basamak girdilerinin uygulandığı anlardan itibaren basamak girdileri ile zıt yönlü olarak aşma yaptığı Şekil 4.1’de görülmektedir. Her bir basamak girişinden yaklaşık 7 sn sonra dengeye ulaştığı grafik üzerinden anlaşılmaktadır. Yunuslama hızı da kontrolcü karşısında aynı salınımı yapmakla birlikte yaklaşık 3,5 sn sonra dengeye ulaştığı Şekil 4.2’den anlaşılmaktadır.



Şekil 4.1. DBRD Kontrolcü için gürültü ve parametre değişimi olmadan füze hücum açısı değişimi

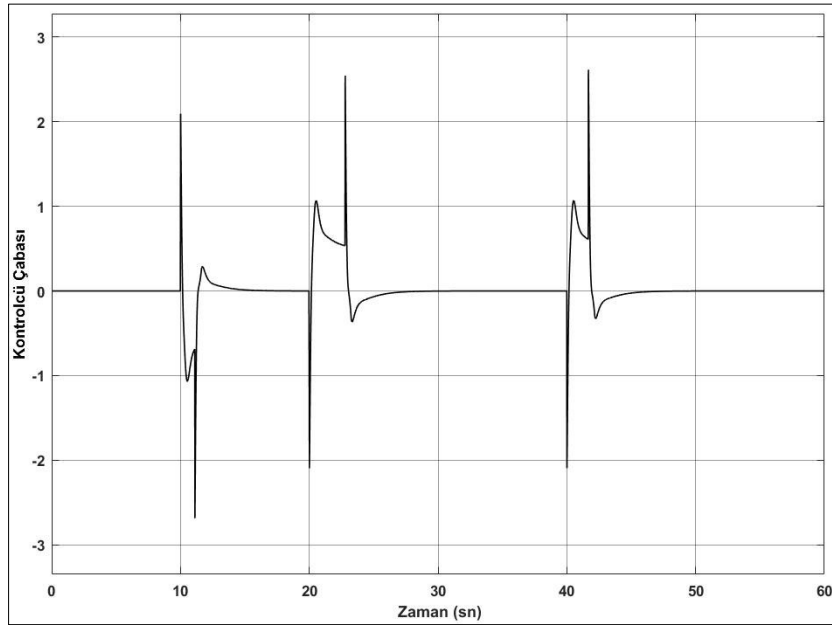


Şekil 4.2. DBRD Kontrolcü için gürültü ve parametre değişimi olmadan füze yunuslama hızı değişimi

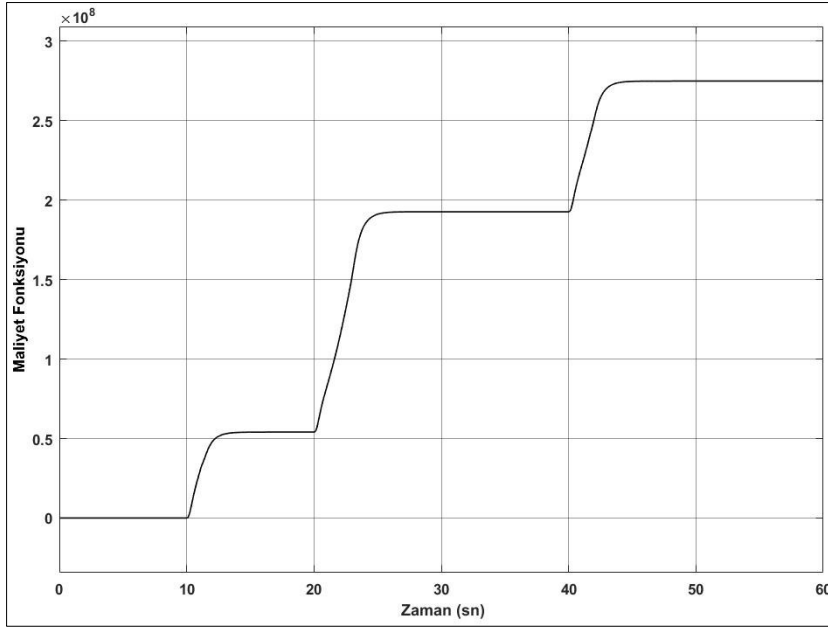


Şekil 4.3. DBRD kontrolcü için gürültü ve parametre değişimi olmadan füze ivme takibi

Şekil 4.3'te doğrusal olmayan dinamik sistemin ivme takibi görülmektedir. Agresif bir şekilde tasarlanmış olan istenilen ivmeler DBRD kontrolcünün etkisiyle küçük bir salınımdan ardından yaklaşık 6 sn sonra yakalanmaktadır. Takip esnasında oluşan aşma miktarı 1 g civarındadır.



Şekil 4.4. DBRD kontrolcü için gürültü ve parametre değişimi olmadan kontrolcü çabası

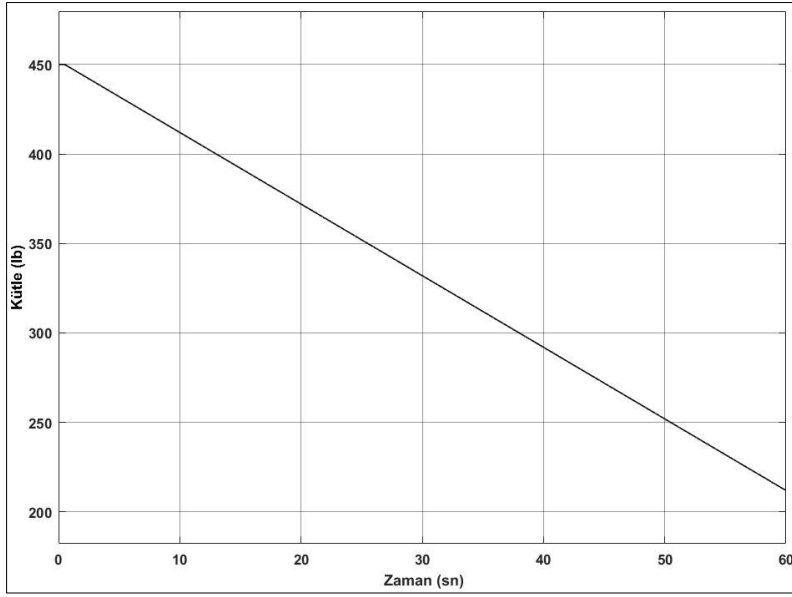


Şekil 4.5. DBRD kontrolcü için gürültü ve parametre değişimi olmadan maliyet konksiyonu

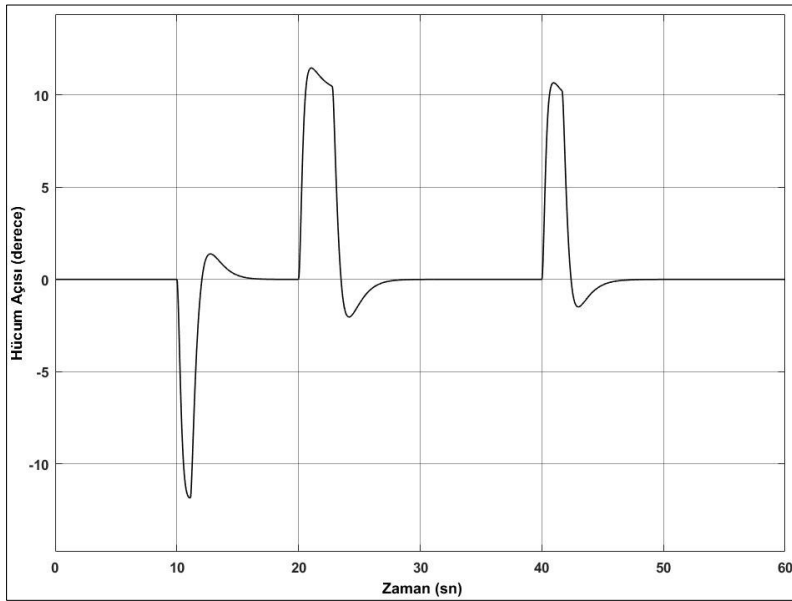
Şekil 4.4'te kontrolcünün ivme takibi ve durum değişkenlerini dengeye çekme esnasında gösterdiği çabaları gösteren grafik görülmektedir. Değişkenleri istenilen değerlere çektikten sonra kontrol çabası sıfırlanmaktadır. Şekil 4.5'te is maliyet fonksiyonu grafiği verilmiştir. Eş. 3.38 ile verilen maliyet fonksiyonun son değeri $2,748 \times 10^8$ 'dir.

4.1.2. Kütle değişimi varken yapılan DBRD kontrolcü uygulaması ve benzetim sonuçları

Bu simülasyon füzenin uçuşu sırasında yakıtın yanmasına bağlı olarak sistemde kütle azalması olduğu varsayılarak modellenmiştir. Şekil 4.6'da kütle değişimi gösterilmiştir. Benzetim çalışmasında kütlenin 450 lb'den 212 lb'ye düştüğü varsayılmıştır. Burada kontrolcüye bozan direkt bir etki olmamakla birlikte sistemde kütle değişiminin dinamiğe olan etkileri bulunmakta ve bu etkilere karşı kontrolcünün cevabı gözlemlenmektedir.



Şekil 4.6. Kütleye göre zamanla değişen bir grafik

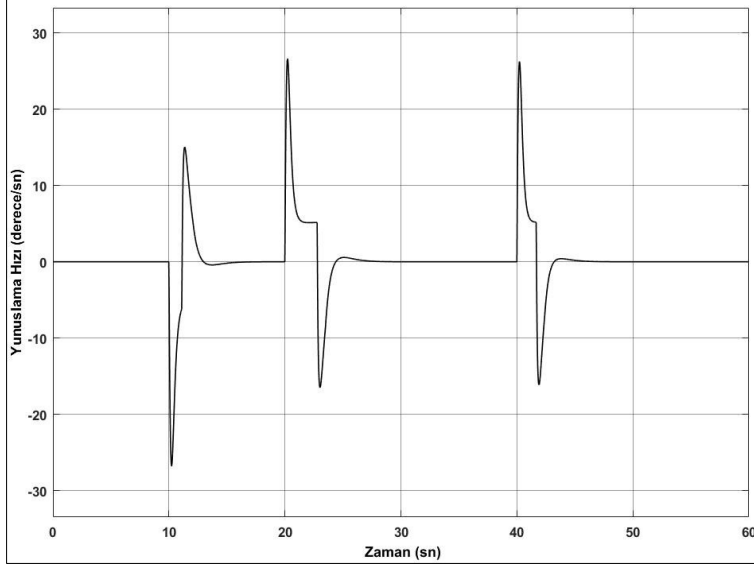


Şekil 4.7. DBRD kontrolcü için parametre değişimi esnasında füze hücum açısı değişimi

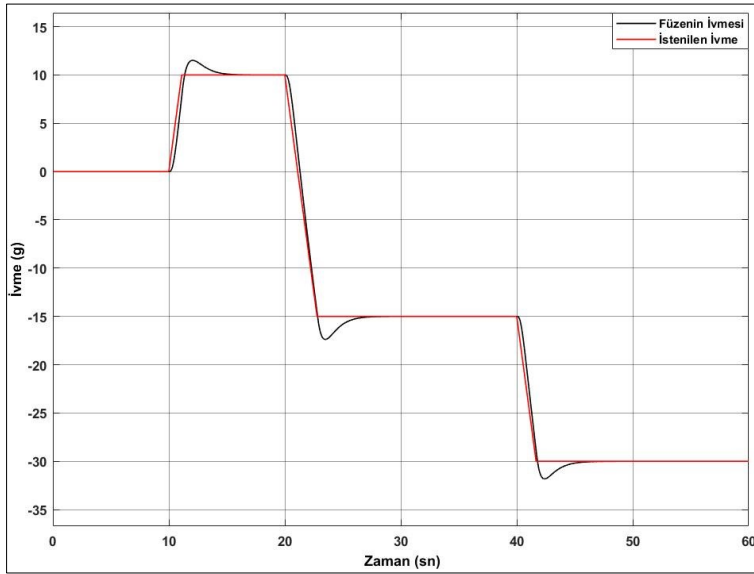
Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de kontrolcünün sistem durumları üzerinde etkisi gözlenmektedir. Şekil 4.9'da ise ivme takibinin başarılı bir şekilde yapıldığı anlaşılmaktadır.

Hücum açısı, ivme takibi için verilen basamak girdilerinin uygulandığı anlardan itibaren basamak girdileri ile zıt yönlü olarak aşma yaptığı Şekil 4.7'de görülmektedir. Her bir basamak girişinden yaklaşık 7,5 sn sonra dengeye ulaştığı grafik üzerinden

anlaşılmaktadır. Yunuslama hızı kontrolcü etkisindeyken salınım yapmakta, yaklaşık 6,5 sn sonra ise dengeye ulaştığı Şekil 4.8'den anlaşılmaktadır.

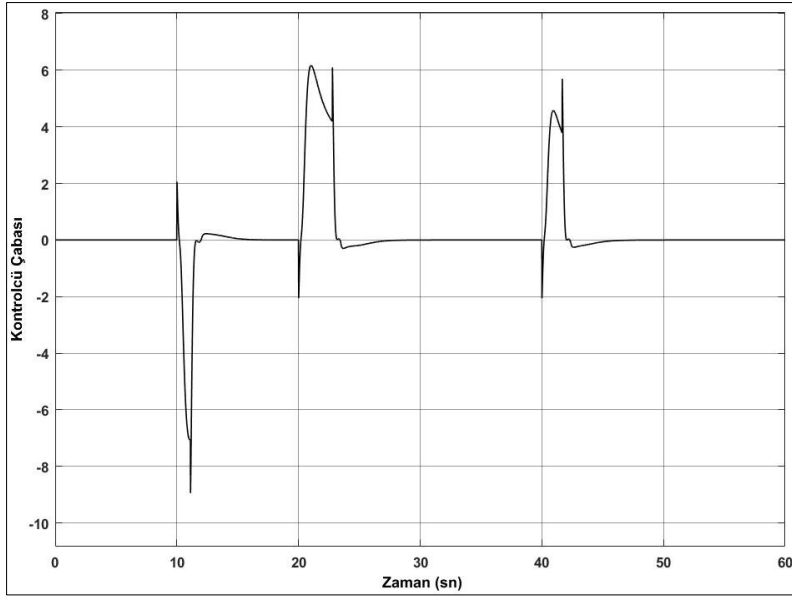


Şekil 4.8. DBRD kontrolcü için parametre değişimi esnasında füze yunuslama hızı değişimi

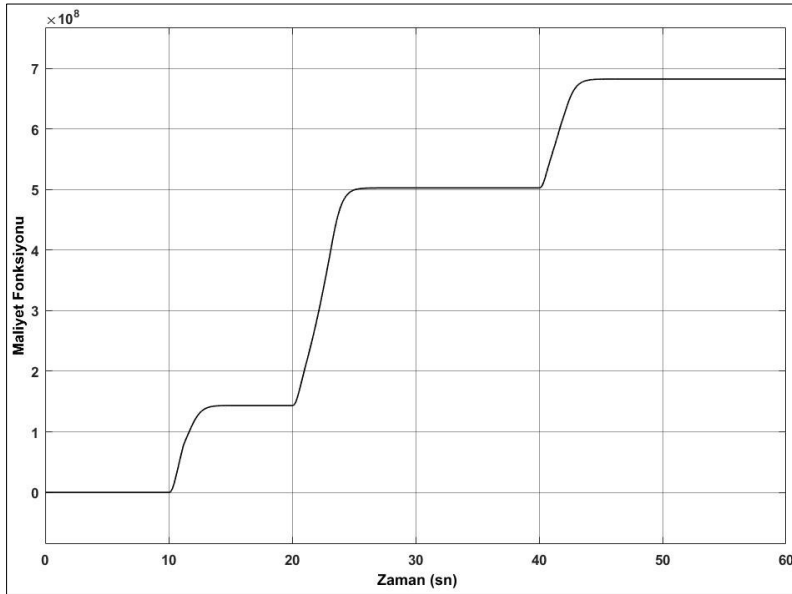


Şekil 4.9. DBRD kontrolcü için parametre değişimi esnasında füze ivme takibi

Şekil 4.9'da doğrusal olmayan dinamik sistemin ivme takibi görülmektedir. Tasarlanmış olan istenilen ivme rotası DBRD kontrolcü etkisiyle salınımın hareketinin ardından istenilen değerlere gelmektedir. Takip esnasında oluşan aşım miktarı 1,7 g civarındadır.



Şekil 4.10. DBRD kontrolcü için parametre değişimi esnasında olmadan kontrolcü çabası



Şekil 4.11. DBRD kontrolcü için parametre değişimi esnasında maliyet fonksiyonu

Şekil 4.10’da DBRD kontrolcünün kütle değişimi varken, ivme takibi ve durum değişkenlerini dengeye çekme esnasında gösterdiği çabaları gösteren grafik görülmektedir. Değişkenleri istenilen değerlere çektikten sonra kontrol çabası sıfırlanmaktadır. Şekil 4.11’de is maliyet fonksiyonu grafiği verilmiştir. Eş. 3.38 ile verilen maliyet fonksiyonun son değeri $6,824 \times 10^8$ ’dir.

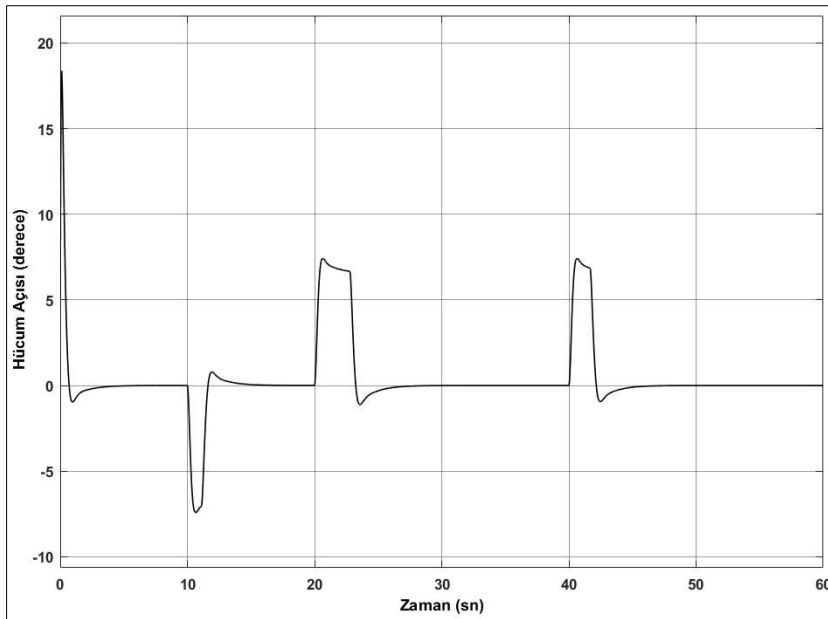
4.1.3. DBRD kontrolcü ile regülatör uygulaması ve benzetim sonuçları

Bu çalışmada sistem değişkenlerinin başlangıç koşulları “0” dan farklı bir değer verilerek sisteme etki eden herhangi bir bozucu etki veya parametre değişimi yokken kontrolcünün sistem dinamikleri üzerindeki etkilerinin gözlemlenmesi amaçlanmıştır.

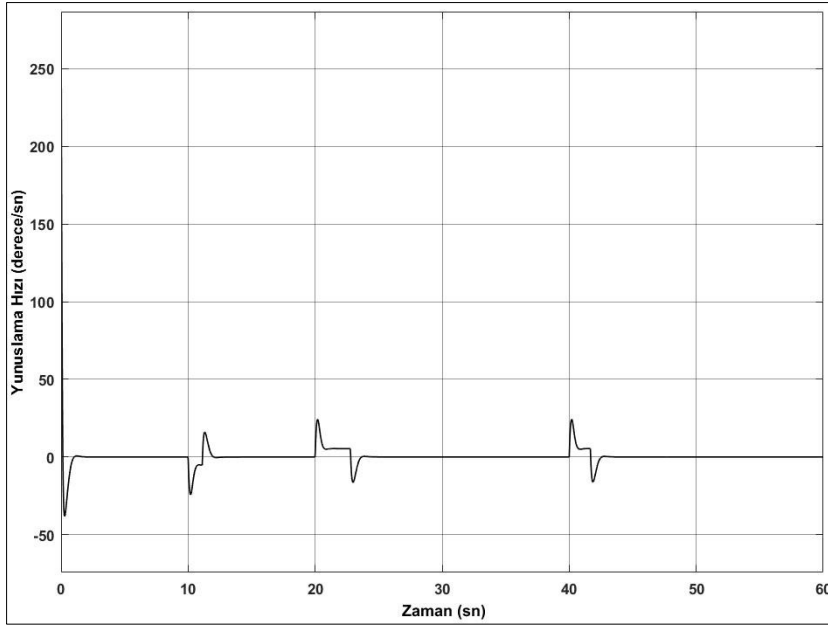
$$x = [5 \quad 1 \quad 10] \quad (4.1)$$

Benzetim için alınan başlangıç değerleri Eş. 4.1’de verilmiştir.

Hücum açısı, ivme takibi için verilen basamak girdilerinin uygulandığı anlardan itibaren basamak girdileri ile zıt yönlü olarak aşma yaptığı Şekil 4.12’de görülmektedir. Ayrıca hücum açısının 5 dereceden 18 dereceye 0,1 sn’de çıktığı ve toplamda 6 sn’de dengeye ulaştığı grafikte gösterilmektedir. Her bir basamak girişinden yaklaşık 7 sn sonra hücum açısının dengeye ulaştığı grafik üzerinden anlaşılmaktadır. Yunuslama hızıda kontrolcü karşısında aynı salınımı yapmakla birlikte yaklaşık 3,5 sn sonra dengeye ulaştığı Şekil 4.13’ten anlaşılmaktadır. Yunuslama hızı başlangıç değeri 1 derece/sn’den 250 derece/sn’ye 0.01sn’de ulaşmış fakat toplamda 2 sn sonra denge durumuna gelmiştir.

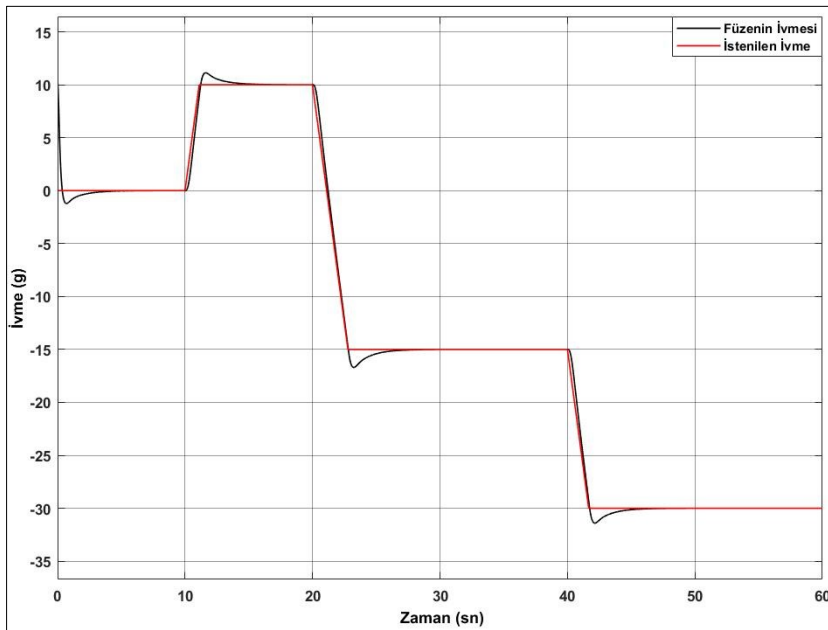


Şekil 4.12. DBRD kontrolcü regülatör uygulaması esnasında füze hücum açısı değişimi



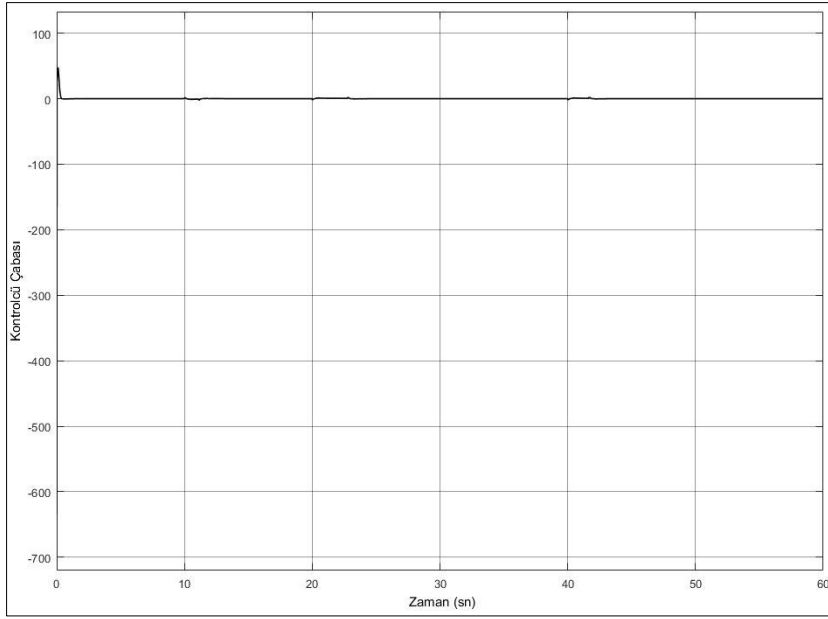
Şekil 4.13. DBRD kontrolcü regülatör uygulaması esnasında füze yunuslama hızı değişimi

Şekil 4.9’da doğrusal olmayan dinamik sistem üzerinde yapılan ivme takibi görülmektedir. Tasarlanmış olan istenilen ivme rotası DBRD kontrolcü etkisiyle salınımın hareketinin ardından istenilen değerlere gelmektedir. Takip esnasında oluşan aşma miktarı 1,6 g civarındadır. Başlangıç değeri olarak verilen 10 g’lik ivme 10,3 g’ye çıktıktan sonra toplamda 8 sn sonra denge değerine erişmiştir.

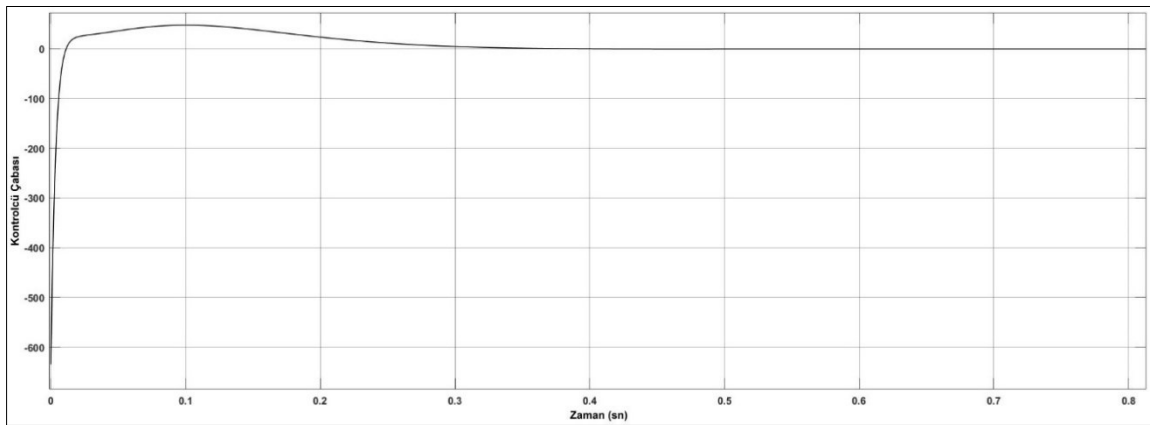


Şekil 4.14. DBRD kontrolcü regülatör uygulaması esnasında füze ivme takibi

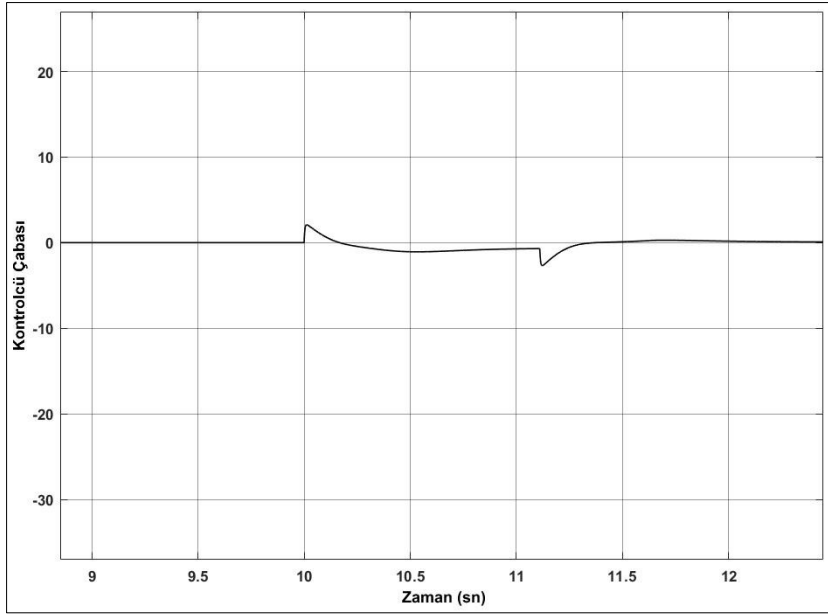
Kontrolcü çabasının grafiklerinin daha net anlaşılabilmesi adına Şekil 4.15, 4.16 ve 4.17 olmak üzere üç parçada verilmiştir. Şekil 4.16'dan başlangıç değerinin “0” dan farklı alındığı için gereken düzeltmenin yaklaşık olarak 0.4 sn’de yapıldığı gözlemlenmektedir. Şekil 4.17’de kontrol çabasının basamak girdileri zamanında tekrarlayan salınımlarından bir tanesi gösterilmiştir. Gözlemlenen aşma yaklaşık 2 derecedir.



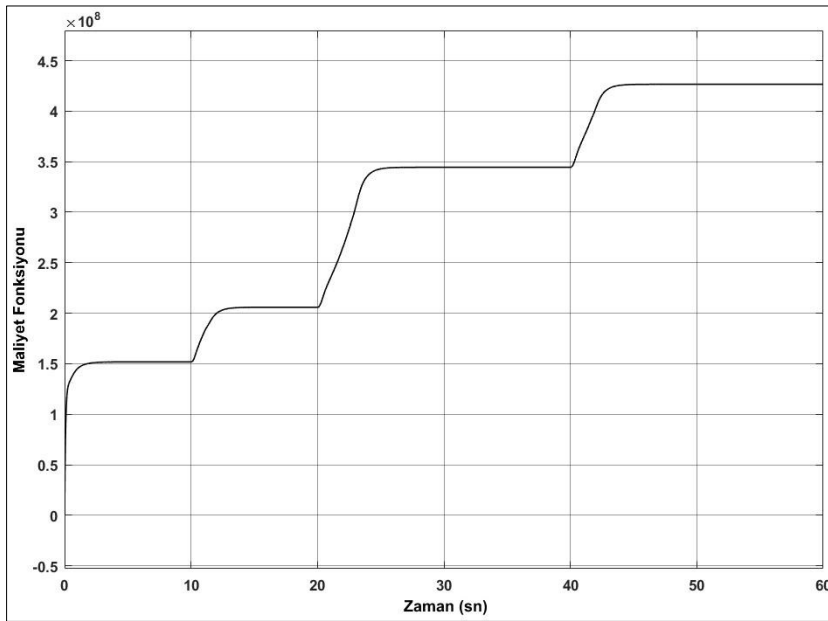
Şekil 4.15. DBRD kontrolcü regülatör uygulaması esnasında kontrol çabası-1



Şekil 4.16. DBRD kontrolcü regülatör uygulaması esnasında kontrol çabası-2



Şekil 4.17. DBRD kontrolcü regülatör uygulaması esnasında kontrol çabası-3



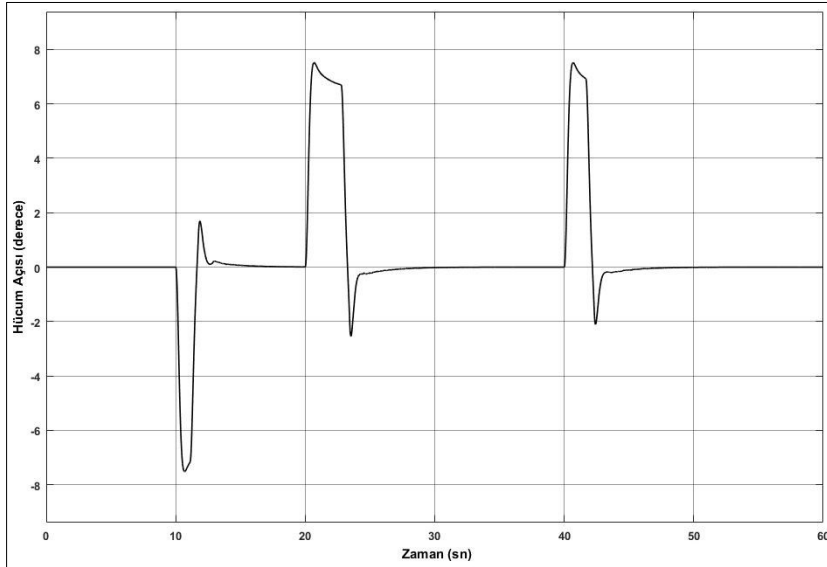
Şekil 4.18. DBRD kontrolcü için regülatör uygulaması esnasında maliyet fonksiyonu

Şekil 4.18’de is maliyet fonksiyonu grafiği verilmiştir. Eş. 3.38 ile verilen Maliyet fonksiyonun son değeri $4,266 \times 10^8$ ’dir.

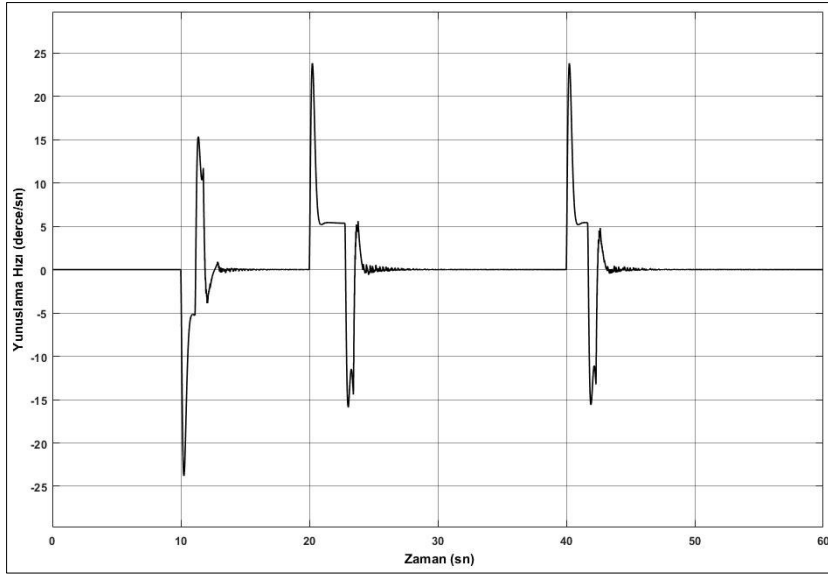
4.2. Doğrusal Olmayan Füze Dinamiği İçin Kayan Sektör Kontrolcü Uygulaması ve Benzetim Sonuçları

4.2.1. Gürültü ve parametre belirsizliği olmadan yapılan kayan sektör kontrolcü uygulaması ve benzetim sonuçları

Programda model oluşturulduktan sonra hiçbir etki olmadan kontrolcünün etkisi gözlemlenmiştir. İvme takibi için $t = 10\text{ s}$, $t = 20\text{ s}$ ve $t = 40\text{ s}$ 'lerinde basamak girdisi verilmiş ve ivmenin bu belirlenen değerlere gelmesi sağlanmıştır. Şekil 4.19 ve Şekil 4.20'den kontrolcünün durum değişkenlerini dengeye çektiğini görülmektedir. Hücum açısı, ivme takibi için verilen basamak girdilerinin uygulandığı anlardan itibaren basamak girdileri ile zıt yönlü olarak aşma yaptığı Şekil 4.19'da görülmektedir. Her bir basamak girişinden yaklaşık 8 sn sonra dengeye ulaştığı grafik üzerinden anlaşılmaktadır. Yunuslama hızıda kontrolcü karşısında aynı salınımı yapmakla birlikte yaklaşık 9 sn sonra dengeye ulaştığı Şekil 4.20'den anlaşılmaktadır.

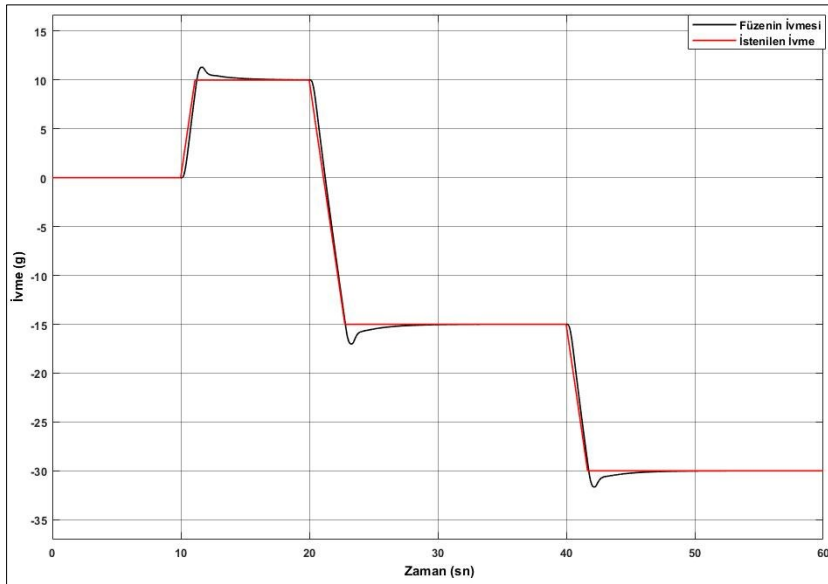


Şekil 4.19. Gürültü ve parametre değişimi olmadan füze hücum açısı değişimi

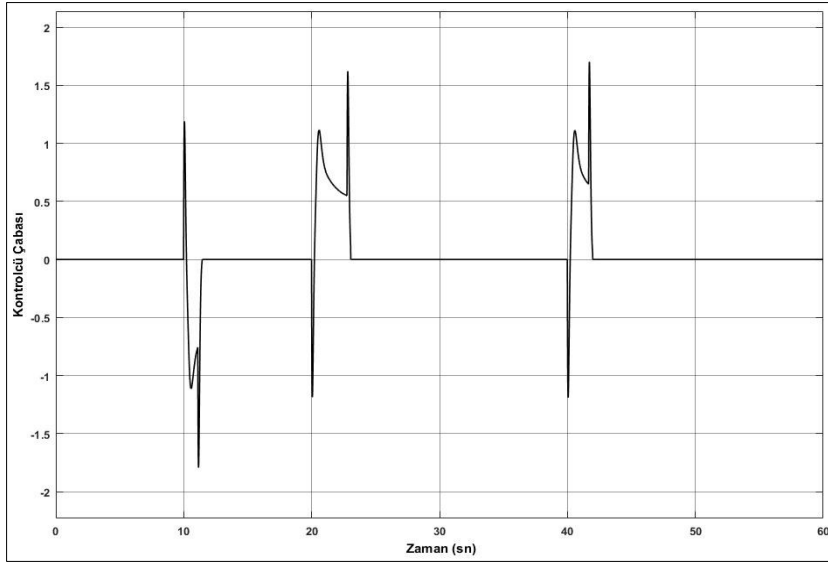


Şekil 4.20. Gürültü ve parametre değişimi olmadan füze yunuslama hızı değişimi

Şekil 4.20’de doğrusal olmayan dinamik sistemin ivme takibi görülmektedir. Benzetim için tasarlanmış olan istenilen ivmeler KSK’nün etkisiyle küçük bir salınımın ardından yaklaşık 6 sn sonra yakalanmaktadır. Takip esnasında oluşan aşma miktarı 1,6 g civarındadır.



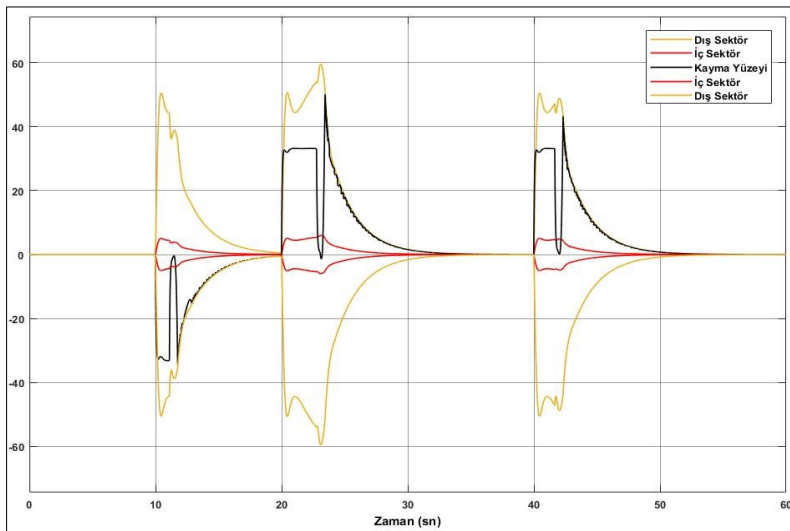
Şekil 4.21. Gürültü ve parametre değişimi olmadan füze ivme takibi



Şekil 4.22. Gürültü ve parametre değişimi olmadan kontrolcü çabası

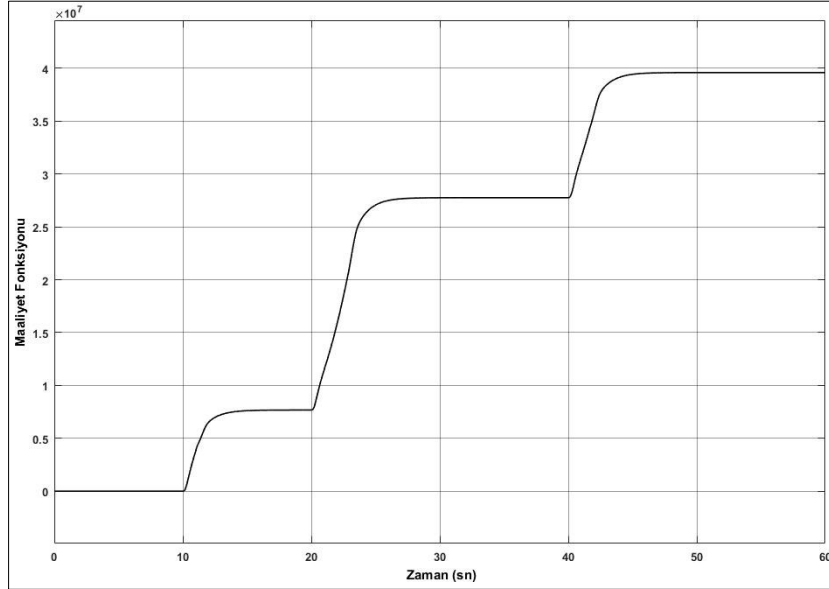
Şekil 4.22’de kontrolcünün ivme takibi ve durum değişkenlerini dengeye çekme esnasında gösterdiği çabaları gösteren grafik görülmektedir. Değişkenleri istenilen değerlere çektikten sonra kontrol çabası sıfırlanmaktadır.

Şekil 4.22 ve Şekil 4.23 birlikte incelendiğinde kontrolcünün, sistemin kayma yüzeyinin belirlenen sektörün dışına çıktığında devreye girerek tekrar içeri sokma çabası gösterdiğini görmekteyiz. İç sektörün içine giren sistemde ise herhangi bir kontrol çabası olmamaktadır.



Şekil 4.23. Gürültü ve parametre değişimi olmadan kayan sektör

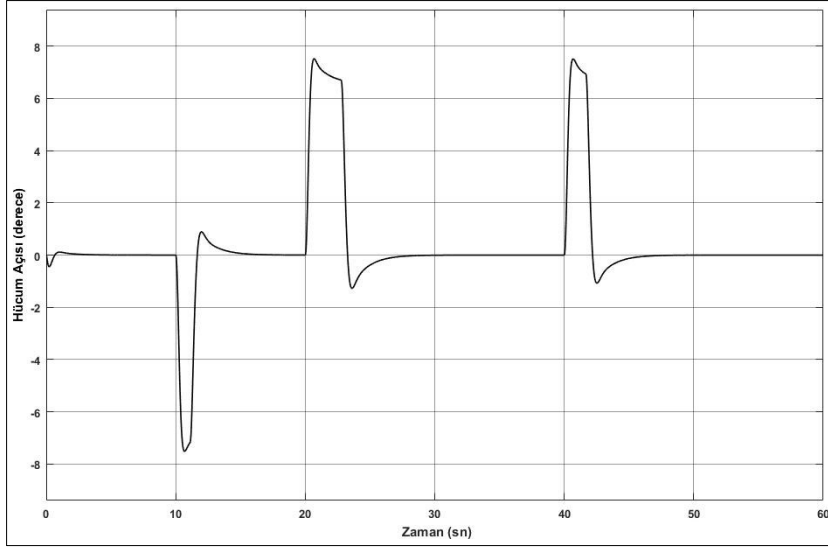
Şekil 4.24'te is maliyet fonksiyonu grafiği verilmiştir. Eş. 3.38 ile verilen Maliyet fonksiyonun son değeri $3,959 \times 10^7$ 'dir.



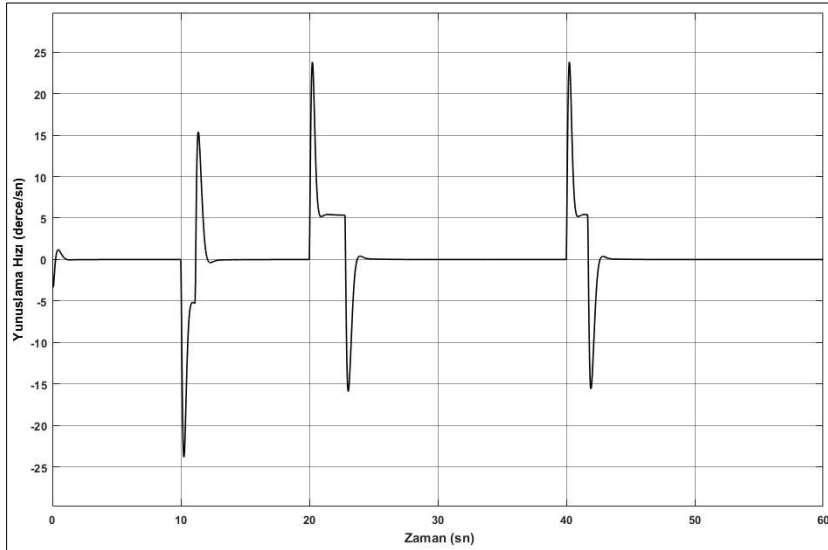
Şekil 4.24. Gürültü ve parametre değişimi olmadan KSK'de maliyet fonksiyonu

4.2.2. Bir derecelik bozucu etki altında yapılan kayan sektör kontrolcü uygulaması ve benzetim sonuçları

Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'da kontrolcü sabit bir bozucu etki altında iken bile sistem durumlarının istenilen referans değerlere getirebildiğini göstermektedir. Hücum açısı, ivme takibi için verilen basamak girdilerinin uygulandığı anlardan itibaren basamak girdileri ile zıt yönlü olarak aşma yaptığı Şekil 4.19'da görülmektedir. Her bir basamak girişinden yaklaşık 8 sn sonra dengeye ulaştığı grafik üzerinden anlaşılmaktadır. Yunuslama hızıda kontrolcü karşısında aynı salınımı yapmakla birlikte yaklaşık 4,5 sn sonra dengeye ulaştığı Şekil 4.20'den anlaşılmaktadır. İki şekilde de başlangıçtaki salınım bozucu etkinin kontrolcüye direkt etki etmesinden kaynaklanmaktadır. Bozucu etki tüm simülasyonun başlangıcından itibaren etki etmeye başladığı için bu etkiyi bertaraf etme çabasını göstermektedir.

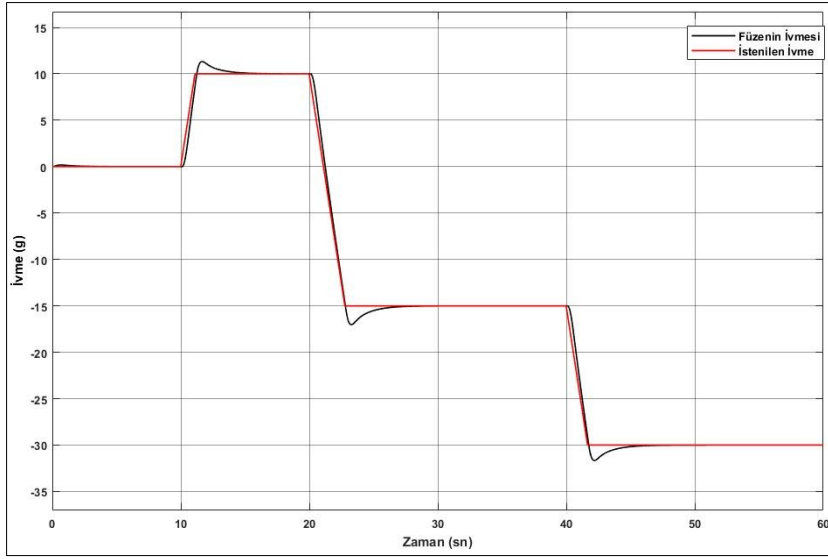


Şekil 4.25. Bir derecelik bozucu etki altında füze hücum açısı değişimi



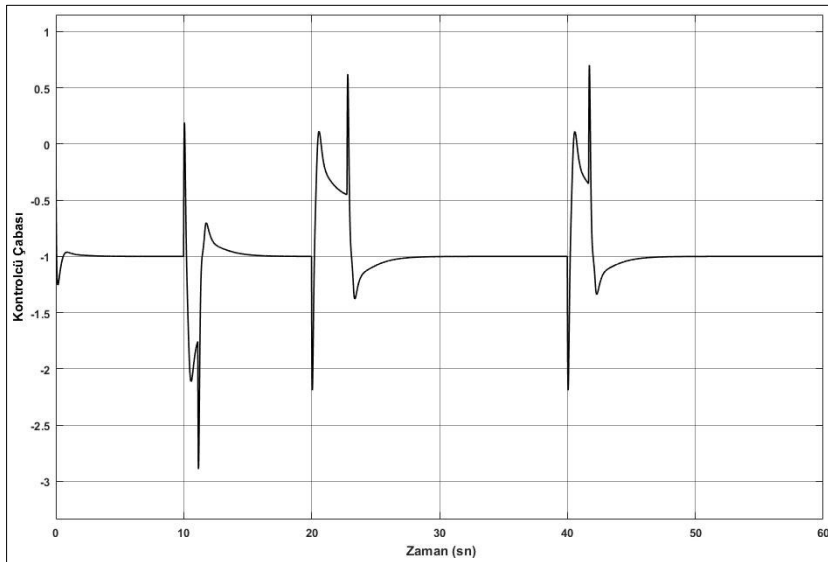
Şekil 4.26. Bir derecelik bozucu etki altında füze yunuslama hızı değişimi

Şekil 4.27'de doğrusal olmayan dinamik sistemin ivme takibi görülmektedir. Benzetim için tasarlanmış olan istenilen ivmeler KSK'nün etkisiyle küçük bir salınımın ardından yaklaşık 6 sn sonra yakalanmaktadır. Takip esnasında oluşan aşma miktarı 1,7 g civarındadır.

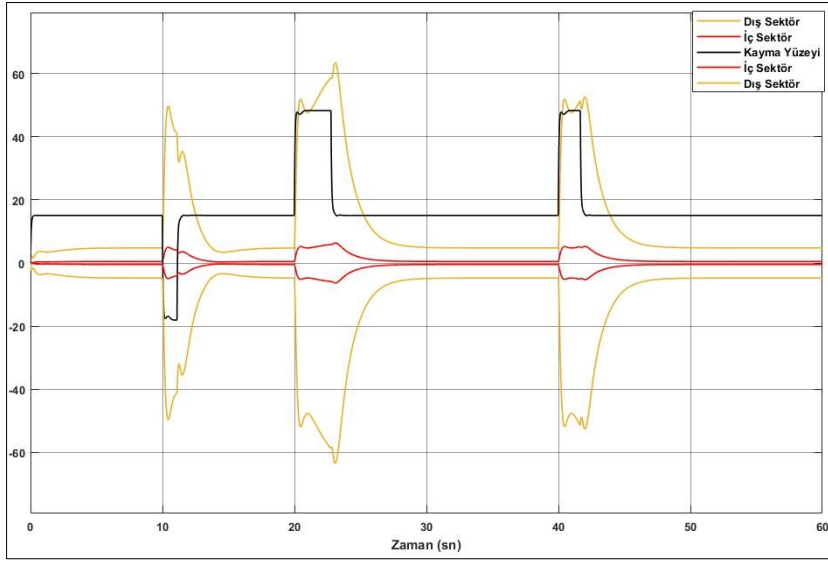


Şekil 4.27. Bir derecelik bozucu etki altında füze ivme takibi

Şekil 4.28'e bakıldığında kontrolcü çabası KSK için normal bir seyir izlemekte bazı zaman aralıklarında çaba sarf etmemektedir. Fakat Şekil 4.29'a bakıldığında kayma yüzeyinin neredeyse sürekli sektörlerin dışında olduğu görülüyor. Bunu sebebi tasarlanan modelde bozucu etkinin direkt olarak kontrolcüye beslenmesidir. Bu sistemin etkili çalışmasını engellememektedir.

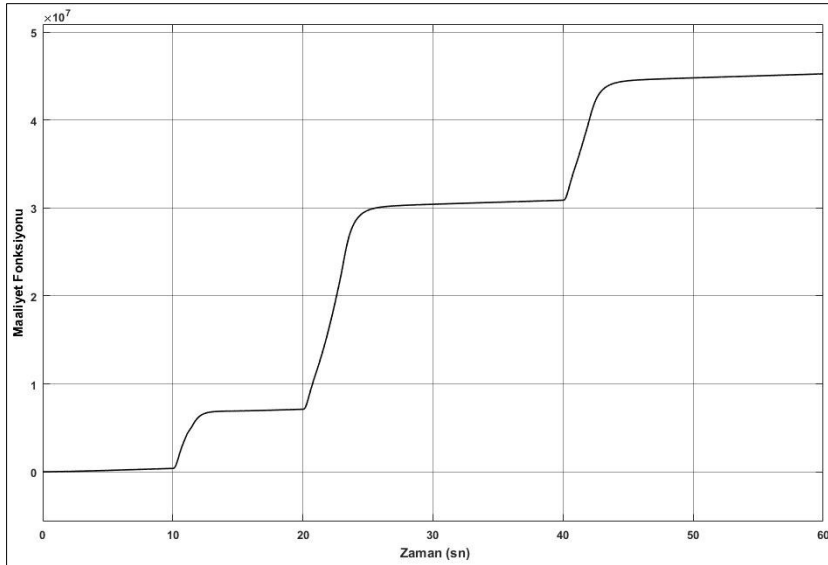


Şekil 4.28. Bir derecelik bozucu etki altında kontrolcü çabası



Şekil 4.29. Bir derecelik bozucu etki altında kayan sektör

Şekil 4.30'da ise maliyet fonksiyonu grafiği verilmiştir. Eş. 3.38 ile verilen maliyet fonksiyonunun son değeri $4,525 \times 10^7$ 'dir.

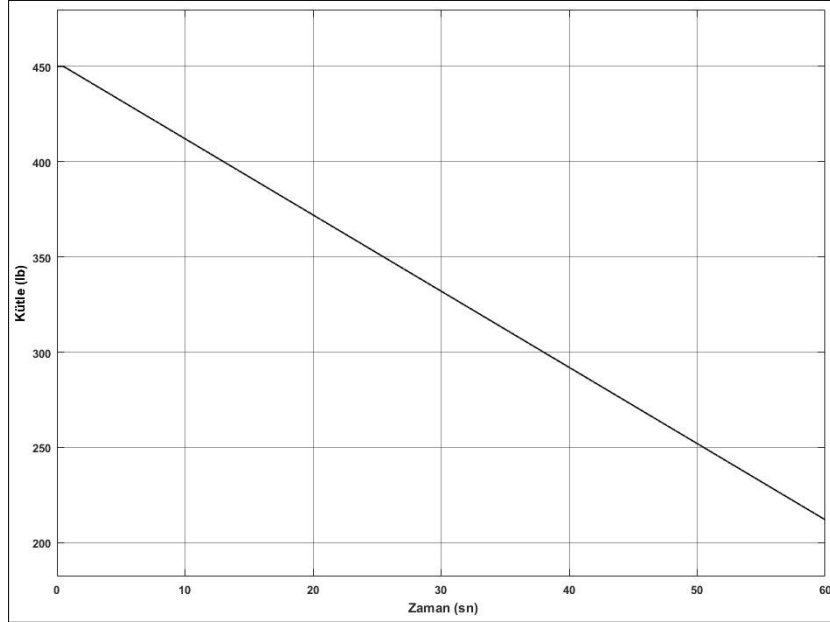


Şekil 4.30. Bir derecelik bozucu etki altında KSK'de maliyet fonksiyonu

4.2.3. Kütle değişimi varken yapılan kayan sektör kontrolcü uygulaması ve benzetim sonuçları

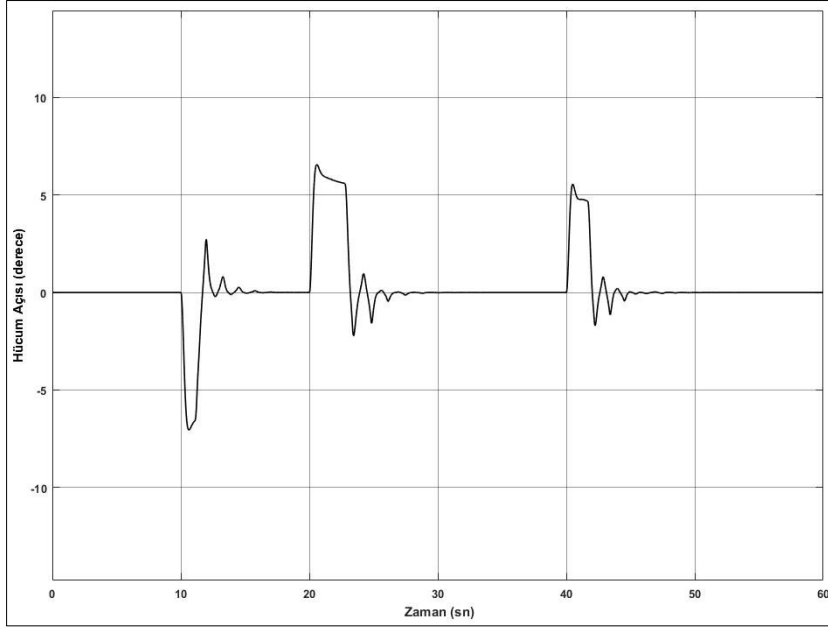
Bu simülasyonda bozucu etki kaldırılıp yerine sistemin kütlesine değişim eklenmiştir. Şekil 4.31'de kütle değişimi gösterilmiştir. Benzetim çalışmasında kütlenin 450 lb'den 212

lb'ye düştüğü varsayılmıştır. Burada kontrolcüyü bozan direkt bir etki olmamakla birlikte sistemde kütle değişiminin dinamiğe olan etkileri bulunmakta ve bu etkilere karşı kontrolcünün cevabı gözlemlenmektedir.

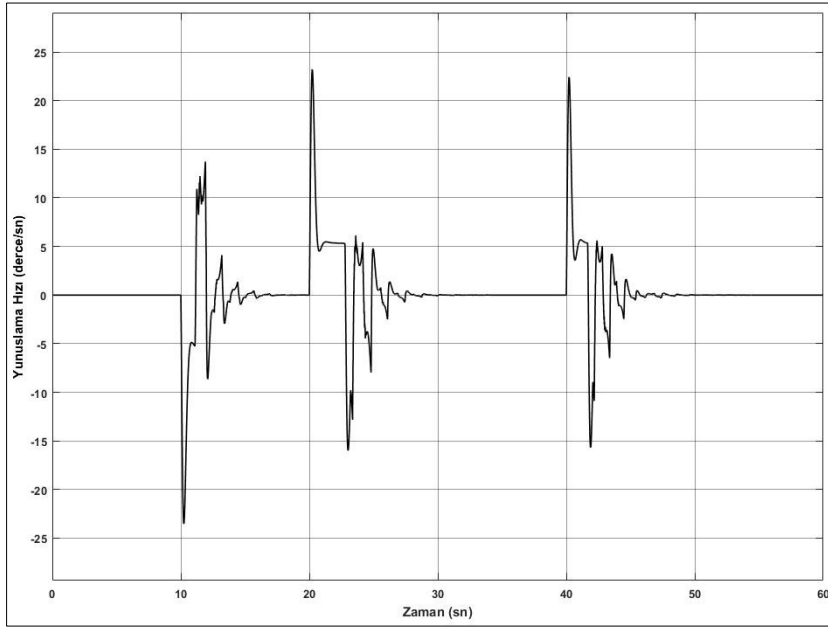


şekil 4.31. Füzenin kütle değişimi

şekil 4.31 ve şekil 4.32’de kontrolcünün sistem durumlarının istenilen referans değerlere getirebildiğini göstermektedir. Hücüm açısı, ivme takibi için verilen basamak girdilerinin uygulandığı anlardan itibaren basamak girdileri ile zıt yönlü olarak aşma yaptığı şekil 4.31’de görölmektedir. Her bir basamak girişinden yaklaşık 8 sn sonra salınım hareketi yaparak dengeye ulaştığı grafik üzerinden anlaşılmaktadır. Yunuslama hızıda kontrolcü karşısında salınım yapmakta ve yaklaşık 9 sn sonra dengeye ulaştığı şekil 4.32’den anlaşılmaktadır.

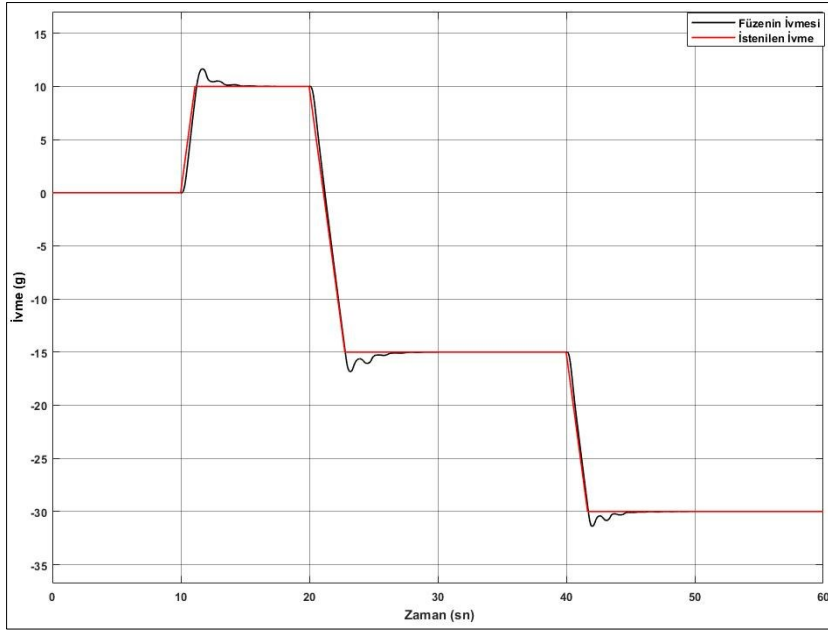


Şekil 4.32. Kütlesi değişimi varken füze hücum açısı değişimi



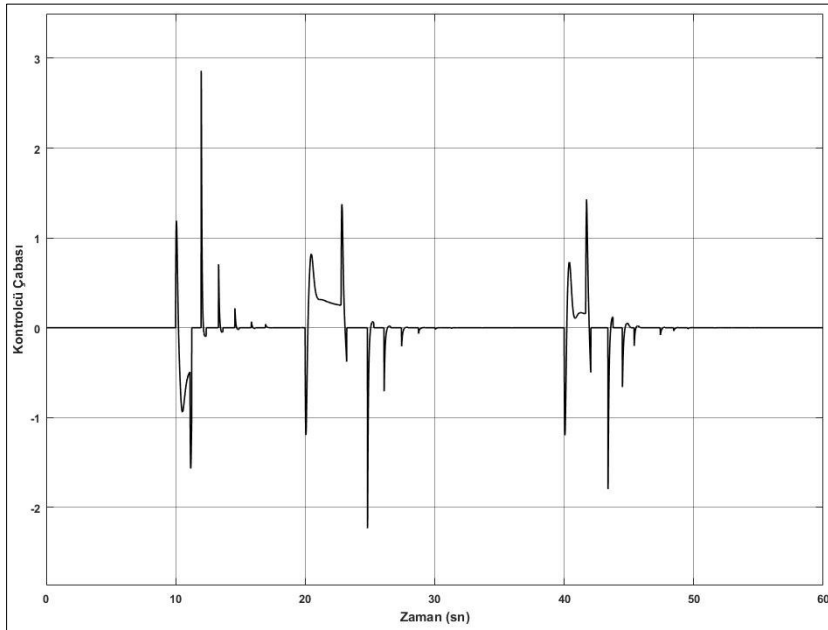
Şekil 4.33. Kütlesi değişimi varken füze yunuslama hızı değişimi

Şekil 4.34'de doğrusal olmayan dinamik sistemin ivme takibi görülmektedir. Benzetim için tasarlanmış olan istenilen ivmeler KSK'nün etkisiyle küçük bir salınımın ardından yaklaşık 6 sn sonra yakalanmaktadır. Takip esnasında oluşan aşma miktarı 1,6 g civarındadır.

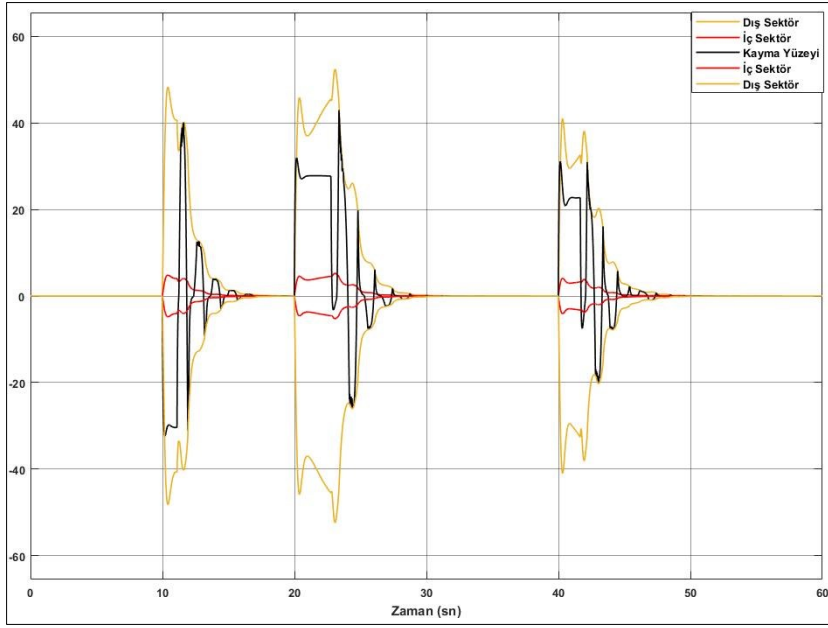


Şekil 4.34. Kütlesi değişirken füze ivme takibi

Şekil 4.35 ve Şekil 4.36 birlikte incelendiğinde kontrolcünün, sistemin kayma yüzeyinin belirlenen sektörün dışına çıktığında devreye girerek tekrar içeri sokma çabası gösterdiğini görmekteyiz. İç sektörün içine giren sistemde ise herhangi bir kontrol çabası olmamaktadır.

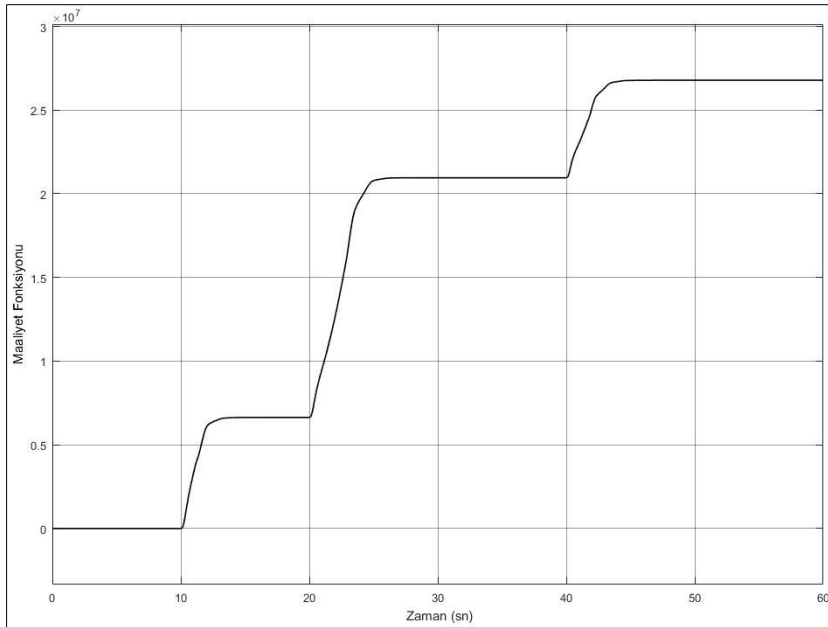


Şekil 4.35. Kütlesi değişirken kontrolcü çabası



Şekil 4.36. Kütlesi değişimi varken kayan sektör

Şekil 4.37'de ise maliyet fonksiyonu grafiği verilmiştir. Eş. 3.38 ile verilen maliyet fonksiyonunun son değeri $2,678 \times 10^7$ 'dir.



Şekil 4.37. Kütlesi değişimi varken kayan sektörde maliyet fonksiyonu

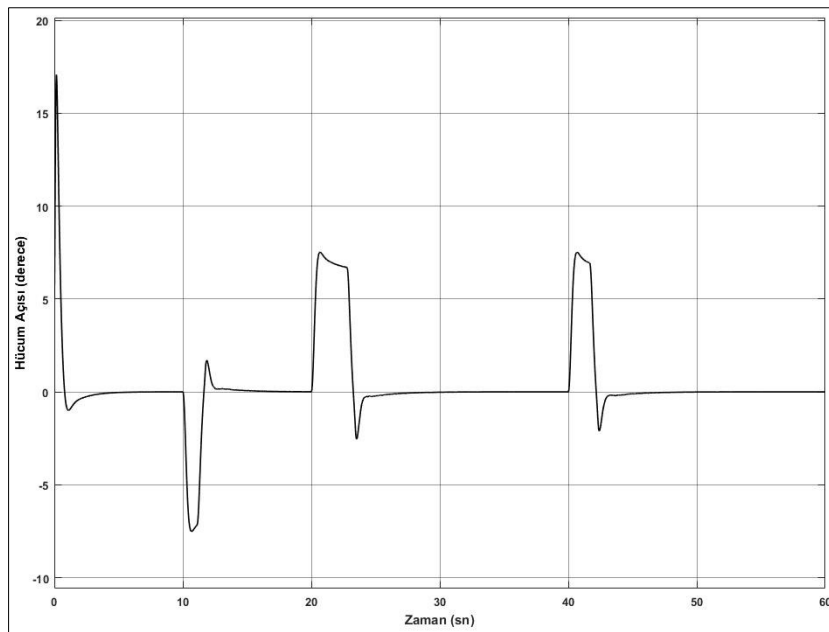
4.2.4. Kayan sektör kontrolcü ile regülatör uygulaması ve benzetim sonuçları

Bu çalışmada sistem değişkenlerinin başlangıç koşulları “0” dan farklı bir değer verilerek sisteme etki eden herhangi bir bozucu etki veya parametre değişimi yokken kontrolcünün etkilerinin gözlemlenmesi amaçlanmıştır.

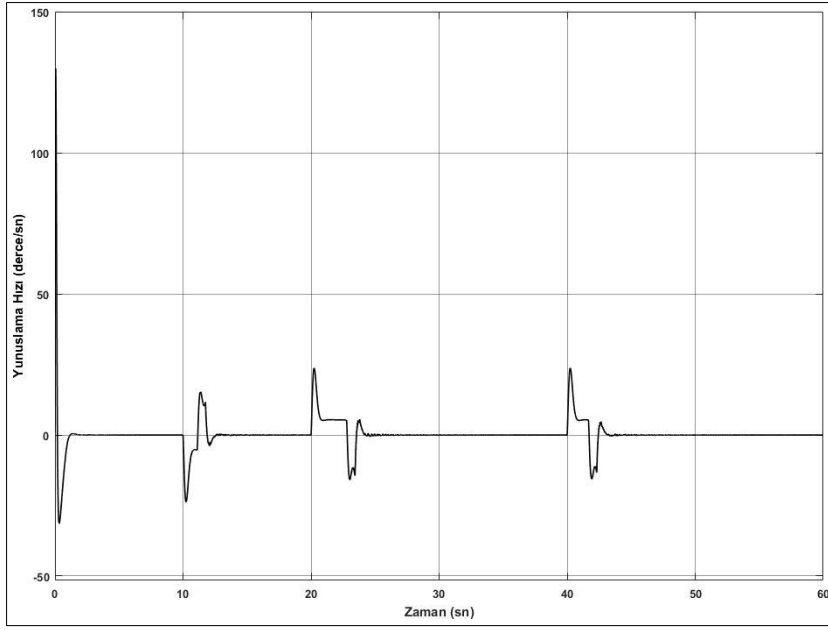
$$x = [5 \quad 1 \quad 10] \quad (4.2)$$

Modelde ele alınan başlangıç değerleri Eş. 4.2’de verilmiştir.

Hücum açısı, ivme takibi için verilen basamak girdilerinin uygulandığı anlardan itibaren basamak girdileri ile zıt yönlü olarak aşma yaptığı Şekil 4.38’de görülmektedir. Ayrıca hücum açısının 5 dereceden 17 dereceye 0,15 sn’de çıktığı ve toplamda 6,5 sn’de dengeye ulaştığı grafikte gösterilmektedir. Her bir basamak girişinden yaklaşık 8 sn sonra hücum açısının dengeye ulaştığı grafik üzerinden anlaşılmaktadır. Yunuslama hızıda kontrolcü karşısında aynı salınımı yapmakla birlikte yaklaşık 6 sn sonra dengeye ulaştığı Şekil 4.39’dan anlaşılmaktadır. Yunuslama hızı başlangıç değeri 1 derece/sn’den 130 derece/sn’ye 0.06sn’de ulaşmış fakat toplamda 2,5 sn sonra denge durumuna gelmiştir.

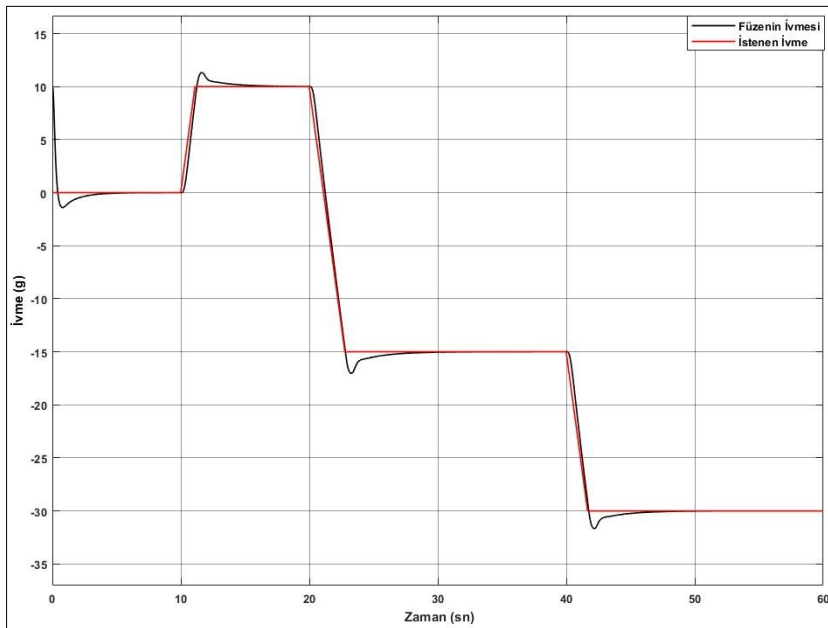


Şekil 4.38. KSK ile regülatör uygulamasında füze hücum açısı değişimi



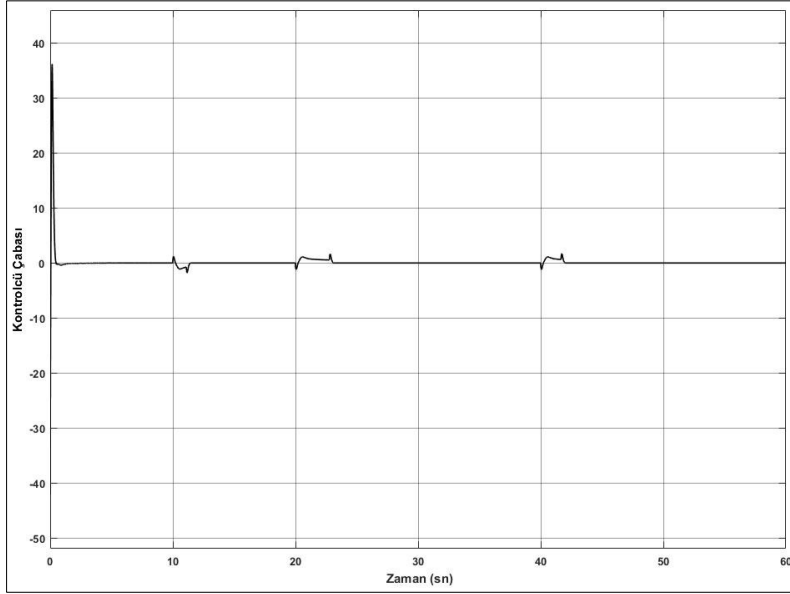
Şekil 4.39. KSK ile regülatör uygulamasında füze yunuslama hızı değişimi

Şekil 4.40'da doğrusal olmayan dinamik sistem üzerinde yapılan ivme takibi görülmektedir. Tasarlanmış olan istenilen ivme rotası KSK etkisiyle salınımın hareketinin ardından istenilen değerlere gelmektedir. Takip esnasında oluşan aşma miktarı 1,6 g civarındadır. Başlangıç değeri olarak verilen 10 g'lık ivme küçük bir artış gösterdikten sonra toplamda 4,5 sn sonra denge değerine erişmiştir.

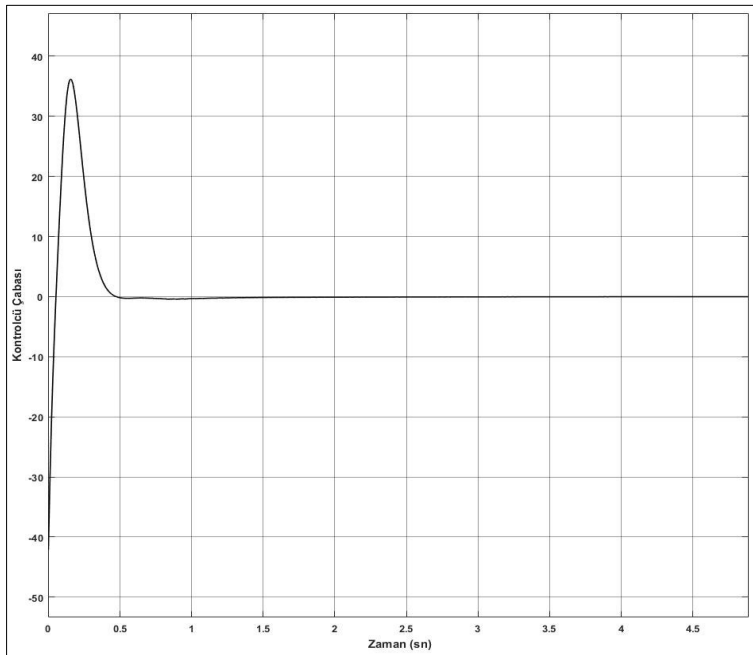


Şekil 4.40. KSK ile regülatör uygulamasında ivme takibi

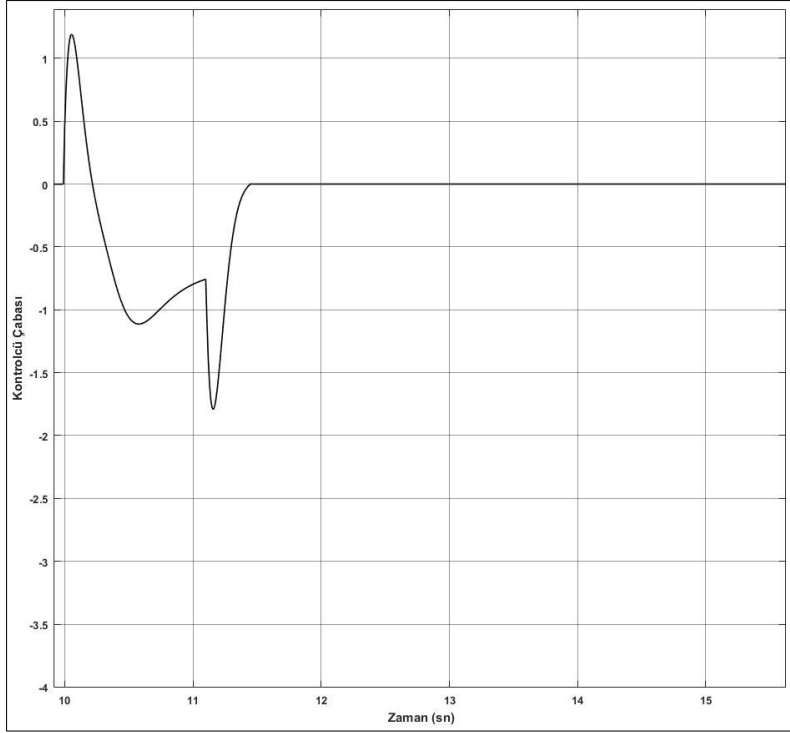
Kontrolcü çabasının grafiklerinin daha net anlaşılabilmesi adına Şekil 4.41, 4.42 ve 4.43 olmak üzere üç parçada verilmiştir. Şekil 4.42'den başlangıç değerinin “0” dan farklı alındığı için gereken düzeltmenin yaklaşık olarak 4,5 sn’de yapıldığı gözlemlenmektedir. Şekil 4. 43’te kontrol çabasının basamak girdileri zamanında tekrarlayan salınımlarından bir tanesi gösterilmiştir. Gözlemlenen aşma yaklaşık 1,2 derecedir.



Şekil 4.41. KSK ile regülatör uygulamasında kontrolcü çabası-1

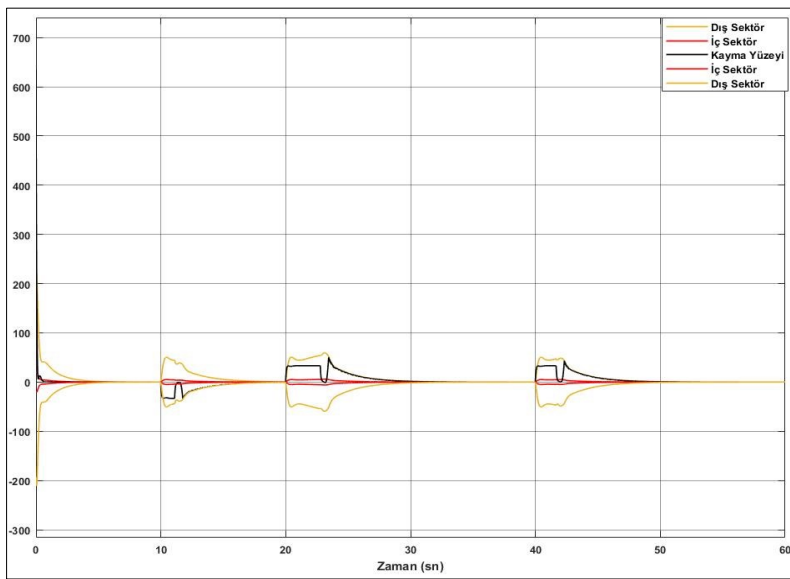


Şekil 4.42. KSK ile regülatör uygulamasında kontrolcü çabası-2

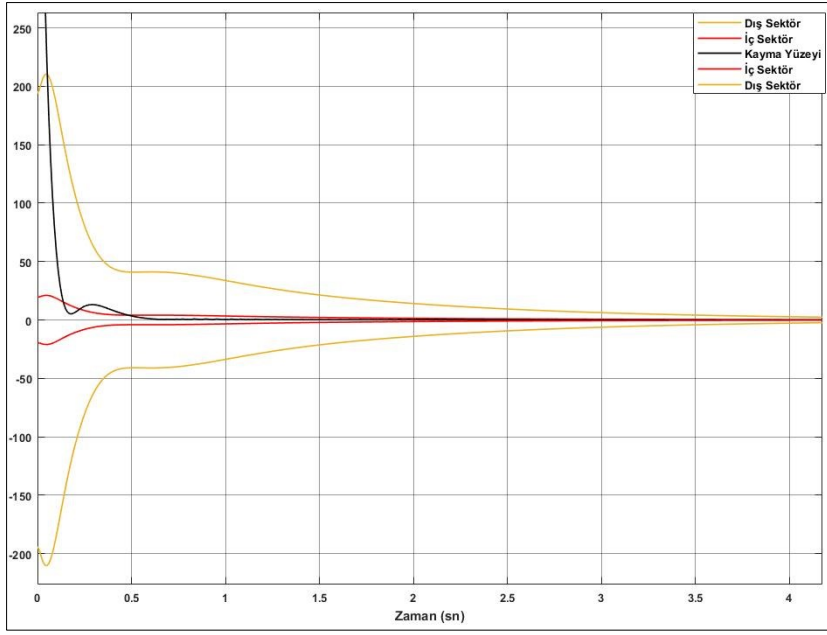


Şekil 4.43. KSK ile regülatör uygulamasında kontrolcü çabası-3

Şekil 4.45, Şekil 4.46, kontrolcü çabalarının grafikleriyle karşılaştırıldığında kontrolcünün, sistemin kayma yüzeyinin belirlenen sektörün dışına çıktığında devreye girerek tekrar içeri sokma çabasında olduğu görülmektedir. İç sektörün içine giren sistemde ise herhangi bir kontrol çabası olmamaktadır.

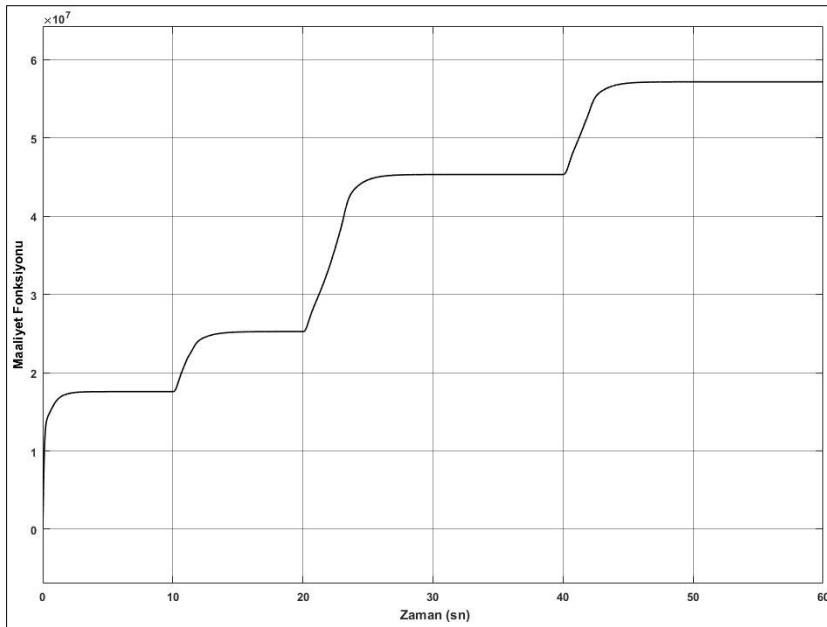


Şekil 4.44. KSK ile regülatör uygulamasında kayan sektör-1



Şekil 4.45. KSK ile regülatör uygulamasında kayan sektör-2

Şekil 4.46’da ise maliyet fonksiyonu grafiği verilmiştir. Eş. 3.38 ile verilen maliyet fonksiyonun son değeri $5,718 \times 10^7$ ’dir.

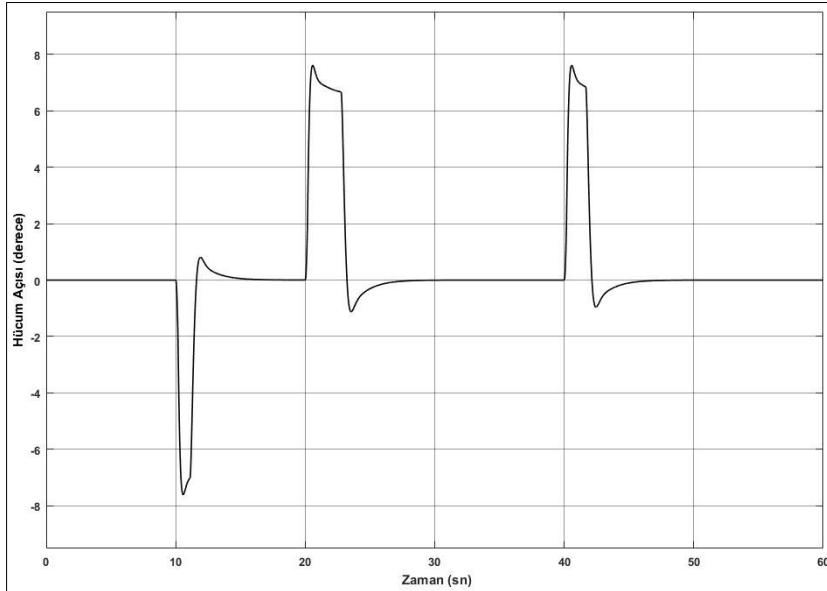


Şekil 4.46. KSK ile regülatör uygulamasında maliyet fonksiyonu

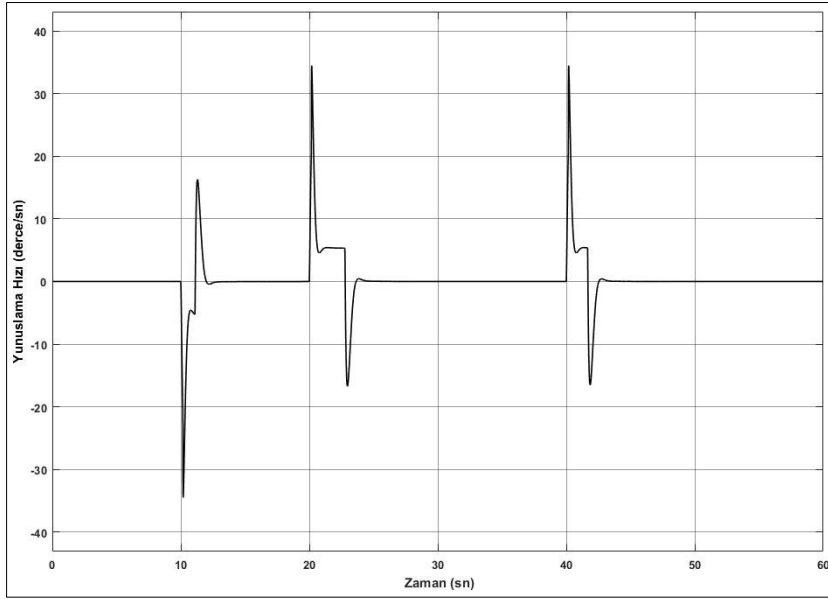
4.3. Doğrusal Olmayan Füze Dinamiği İçin Kayan Sektör Ve Durum Bağımlı Riccati Denklemi Tabanlı Kontrolcüler İçeren Anahtarlama Kontrolcü Uygulaması ve Benzetim Sonuçları

4.3.1. Gürültü ve parametre belirsizliği olmadan yapılan kayan sektör ve durum bağımlı riccati denklemi tabanlı kontrolcüler içeren anahtarlama kontrolcü uygulaması ve benzetim sonuçları

Oluşturulan modelde bir KSK'de olduğu gibi hiçbir etki olmadan kontrolcünün etkisinin gözlemlenmesi hedeflenmiş ve ivme takibi için $t = 10\text{ s}$, $t = 20\text{ s}$ ve $t = 40\text{ s}$ 'lerinde basamak girdisi verilmiştir. Kontrolcünün etkisiyle ivmenin belirlenen değerlere gelmesi sağlanmıştır. Şekil 3.45 ve Şekil 3.46'dan Kayan Sektör Ve Durum Bağımlı Riccati Denklemi Tabanlı Kontrolcüler İçeren Anahtarlama Kontrolcü durum değişkenlerini referans değere çekme konusunda başarılı sonuç verdiği görülmektedir. Hücum açısı, ivme takibi için verilen basamak girdilerinin uygulandığı anlardan itibaren basamak girdileri ile zıt yönlü olarak aşma yaptığı Şekil 4.47'de görülmektedir. Her bir basamak girişinden yaklaşık 8 sn sonra dengeye ulaştığı grafik üzerinden anlaşılmaktadır. Yunuslama hızı da kontrolcü karşısında salınım yapmakla birlikte yaklaşık 5 sn sonra dengeye ulaştığı Şekil 4.48'den anlaşılmaktadır.

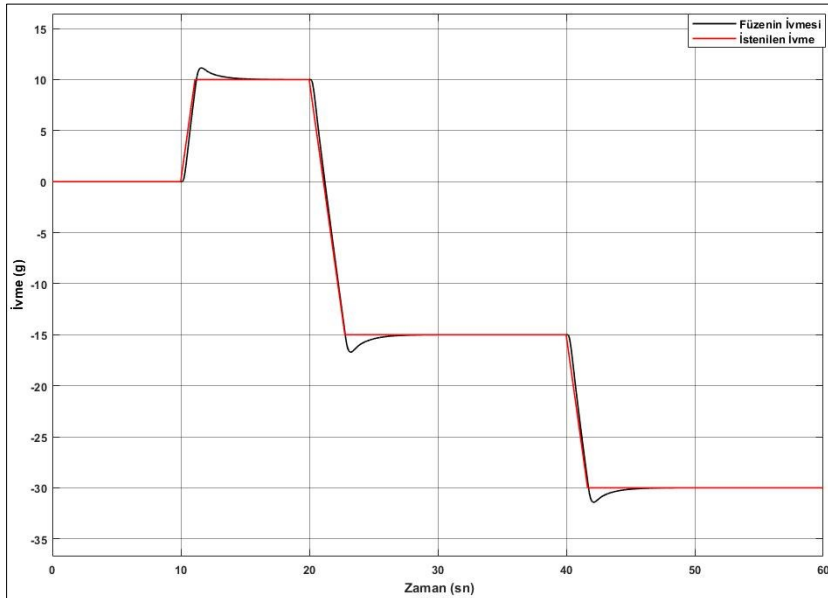


Şekil 4.47. AK için gürültü ve parametre değişimi olmadan füze hücum açısı değişimi



Şekil 4.48. AK için gürültü ve parametre değişimi olmadan füze yunuslama hızı değişimi

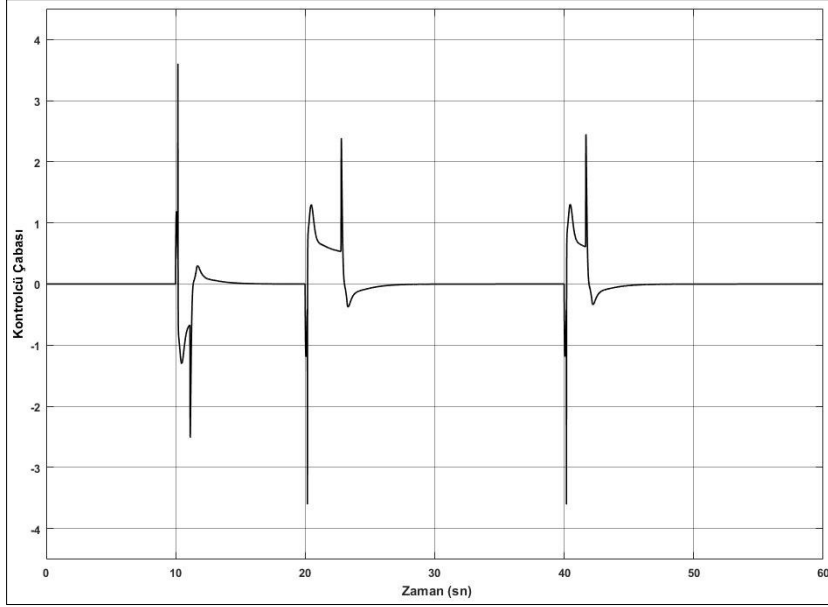
Şekil 4.49'da doğrusal olmayan dinamik sistemin AK ile ivme takibi görülmektedir. Benzetim için tasarlanmış olan istenilen ivmeler AK'nün etkisiyle küçük bir salınımın ardından yaklaşık 8 sn sonra yakalanmaktadır. Takip esnasında oluşan aşma miktarı 1,4 g civarındadır.



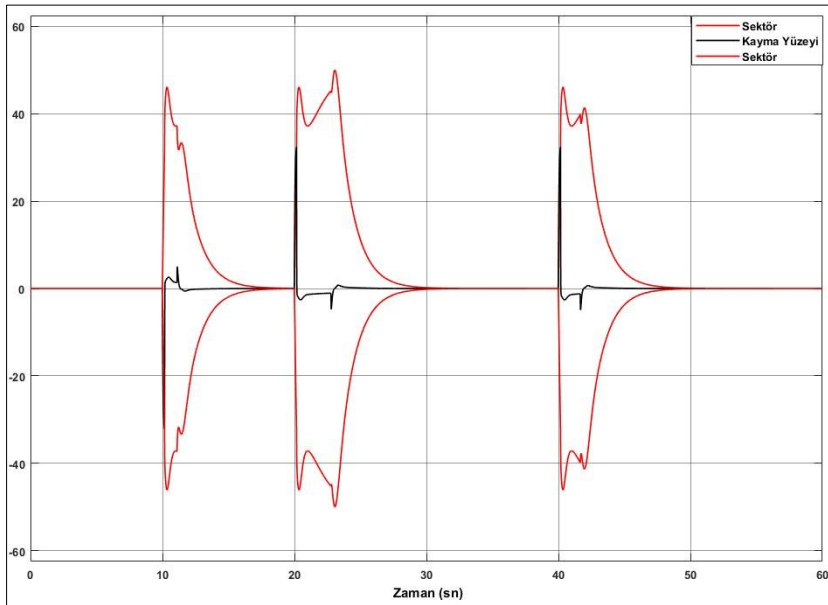
Şekil 4.49. AK için gürültü ve parametre değişimi olmadan füze ivme takibi

Şekil 4.50'de kontrolcünün ivme takibi ve durum değişkenlerini dengeye çekme esnasında gösterdiği çabaları gösteren grafik görülmektedir. Değişkenleri istenilen değerlere

çektikten sonra kontrol çabası sıfırlanmaktadır. Şekil 4.50 ve Şekil 4.51 birlikte incelendiğinde kontrolcünün, sistemin kayma yüzeyini belirlenen sektörün dışına çıktığında AK kontrolcünün KSK anahtarlama devreye girerek kısa bir sürede sektör içine getirdiğini burada da DBRD anahtarlama ile dengeye getirildiği görülmektedir.

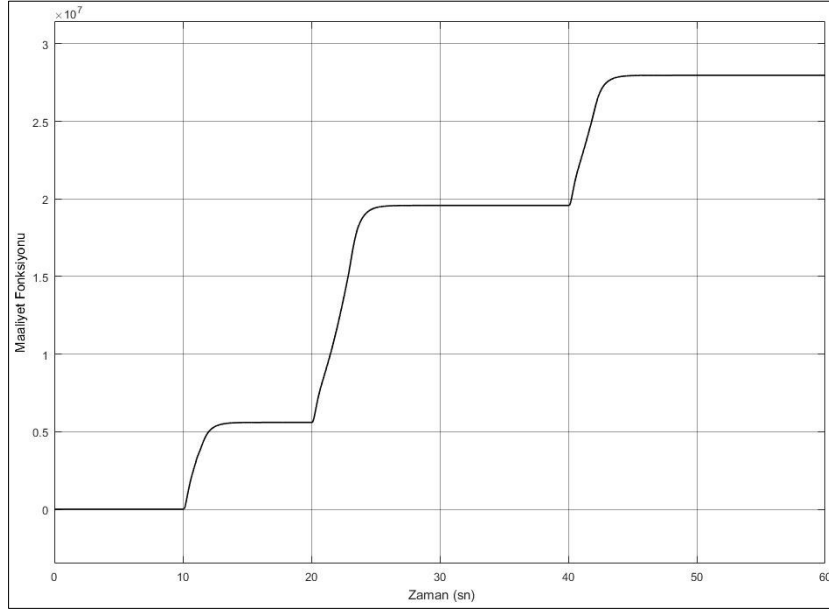


Şekil 4.50. AK için gürültü ve parametre değişimi olmadan kontrolcü çabası



Şekil 4.51. AK için gürültü ve parametre değişimi olmadan sektör ve kayma yüzeyi

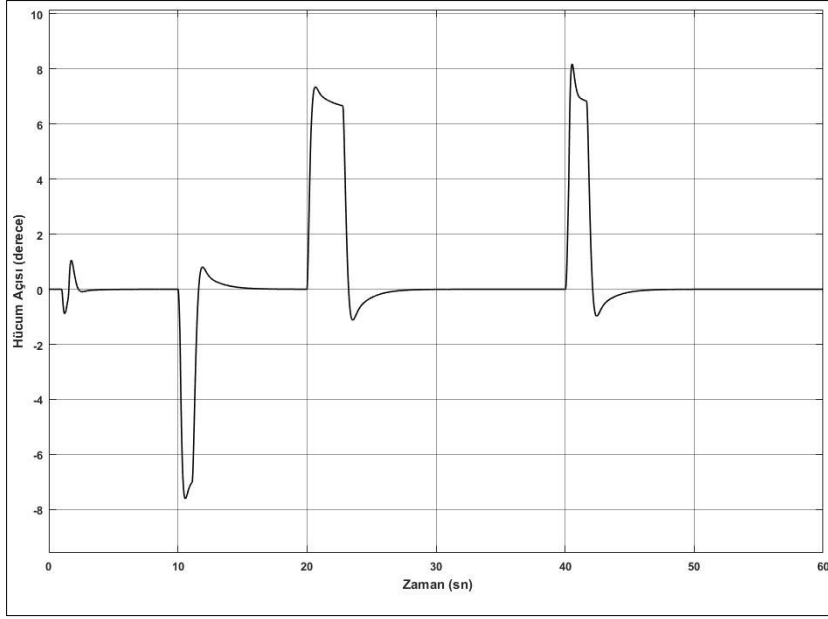
Şekil 4.52’de ise maliyet fonksiyonu grafiği verilmiştir. Eş. 3.38 ile verilen maliyet fonksiyonun son değeri $2,797 \times 10^7$ ’dir.



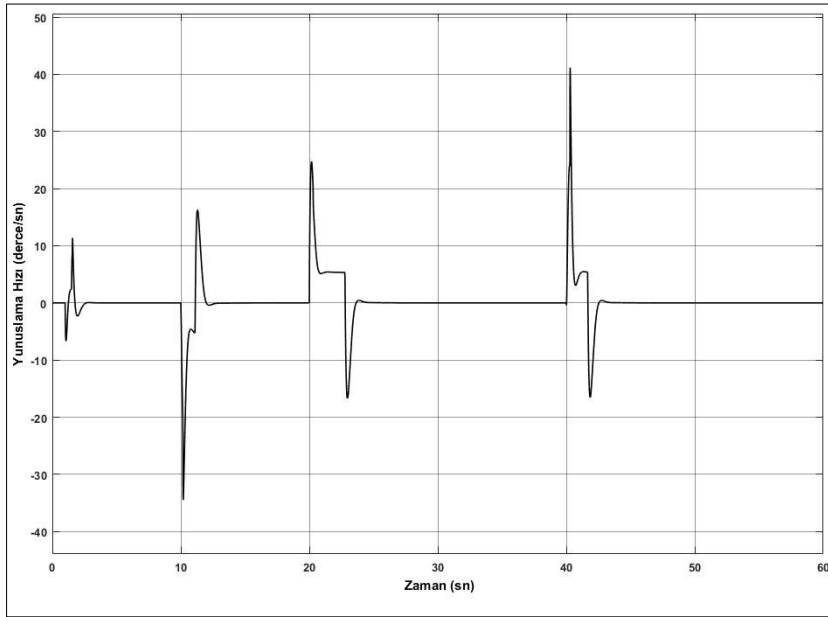
Şekil 4.52. AK için gürültü ve parametre değişimi olmadan maliyet fonksiyonu

4.3.2. Bozucu etki altında yapılan kayan sektör ve durum bağımlı riccati denklemi tabanlı kontrolcüler içeren anahtarlama kontrolcü uygulaması ve benzetim sonuçları

Bu benzetimde sisteme $t=1$ 'de 0.5 sn boyunca 2 derecelik, $t=20$ 'de 0.3 sn boyunca -3 derecelik ve $t=40$ 'ta 0.3 sn boyunca 1 derecelik bozucu etkiler uygulanmıştır. Hücum açısı, ivme takibi için verilen basamak girdilerinin uygulandığı anlardan itibaren basamak girdileri ile zıt yönlü olarak aşma yaptığı Şekil 4.52’de görülmektedir. Her bir basamak girişinden yaklaşık 8 sn sonra dengeye ulaştığı grafik üzerinden anlaşılmaktadır. Yunuslama hızıda kontrolcü karşısında aynı salınımı yapmakla birlikte yaklaşık 6 sn sonra dengeye ulaştığı Şekil 4.53’ten anlaşılmaktadır. İki şekilde de başlangıçtaki salınım bozucu etkinin kontrolcüye direkt etki etmesinden kaynaklanmaktadır.

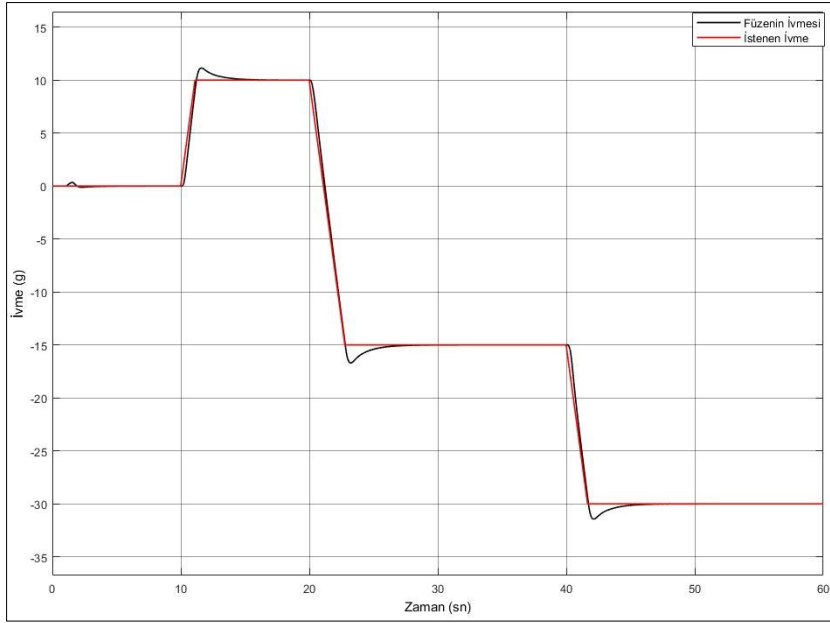


Şekil 4.53. AK için bozucu etki altında füze hücum açısı değişimi



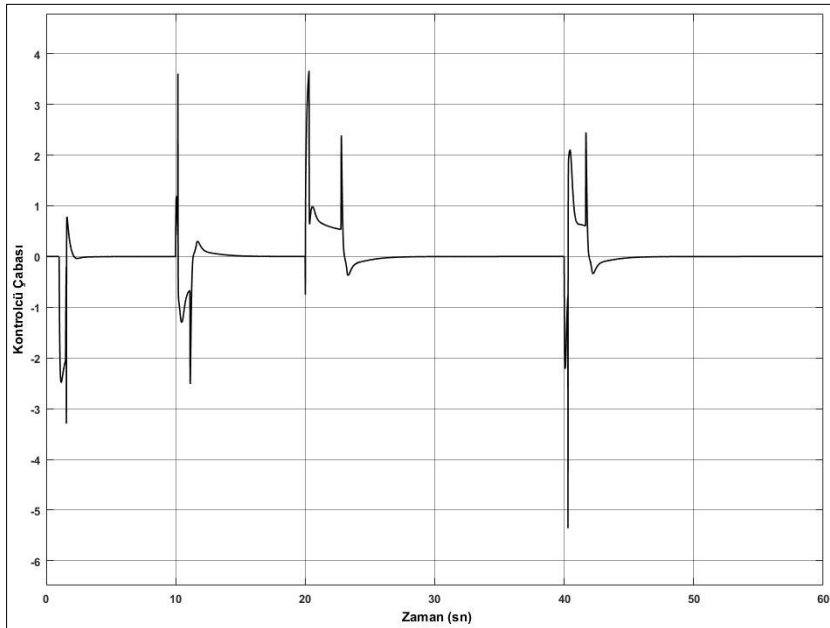
Şekil 4.54. AK için bozucu etki altında füze yunuslama hızı değişimi

Şekil 4.55'te doğrusal olmayan dinamik sistemin ivme takibi görülmektedir. Benzetim için tasarlanmış olan istenilen ivmeler AK'nün etkisiyle küçük bir salınımın ardından yaklaşık 7,5 sn sonra yakalanmaktadır. Takip esnasında oluşan aşma miktarı 1,4 g civarındadır.

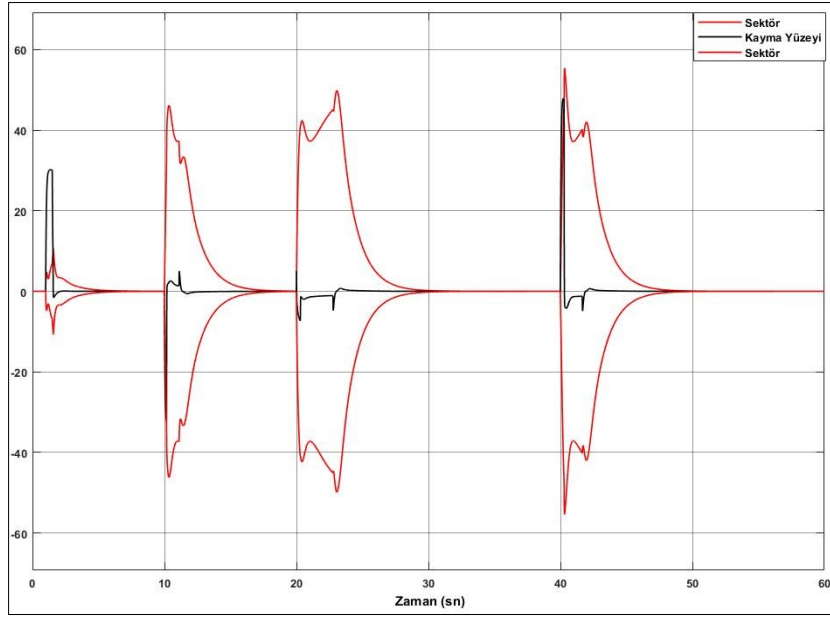


Şekil 4.55. AK için bozucu etki altında füze ivme takibi

Şekil 4.56'ya bakıldığında kontrolcü çabası AK için normal bir seyir izlemekte bazı zaman aralıklarında çaba sarf etmemektedir. Şekil 4.57'den kontrolcünün kayma yüzeyini her sektör dışına çıktığında AK kontrolcünün KSK anahtarlama devreye girerek kısa bir sürede sektör içine getirildiğini burada da DBRD anahtarlama ile dengeye getirildiği görülmektedir.

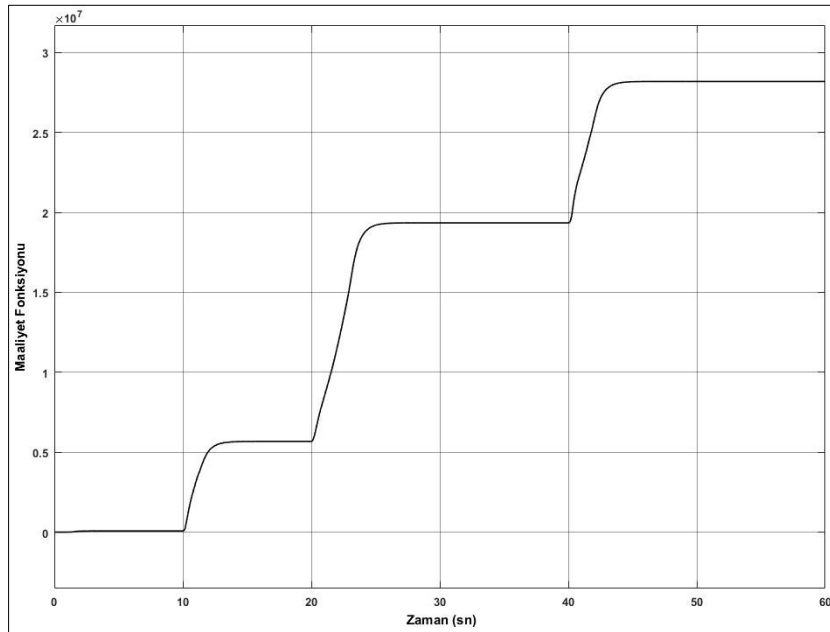


Şekil 4.56. AK için bozucu etki altında kontrolcü çabası



Şekil 4.57. AK için bozucu etki altında sektör ve kayma yüzeyi

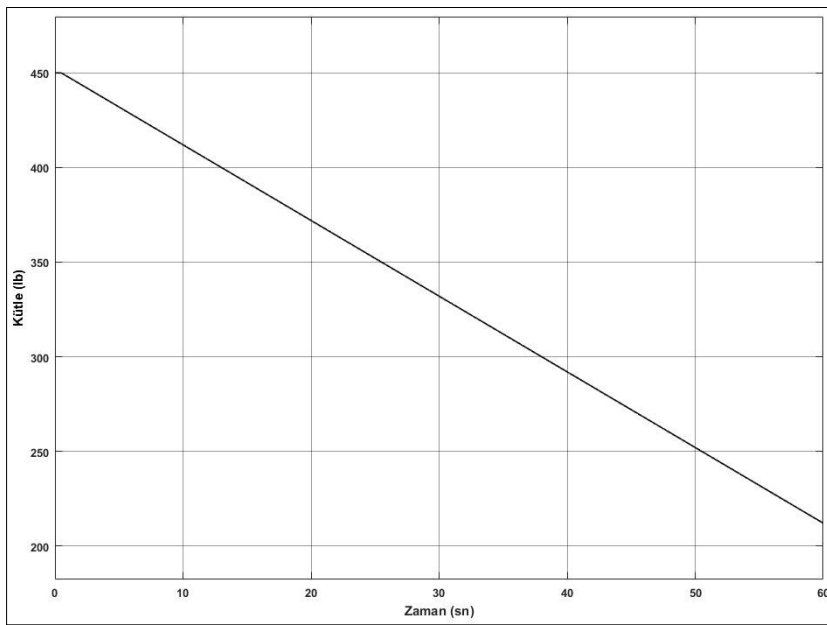
Şekil 4.58’de ise maliyet fonksiyonu grafiği verilmiştir. Eş. 3.38 ile verilen maliyet fonksiyonun son değeri $2,819 \times 10^7$ ’dir.



Şekil 4.58. AK için bozucu etki altında maliyet fonksiyonu

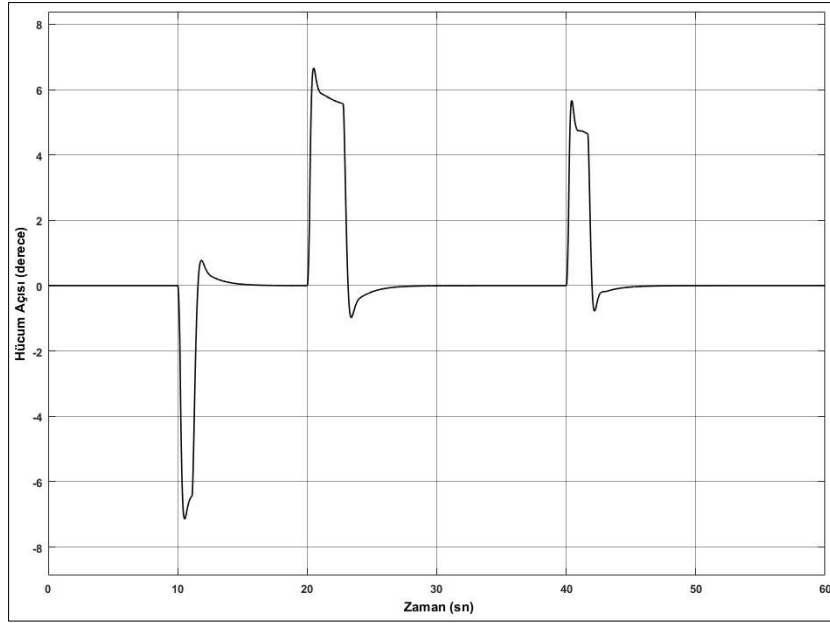
4.3.3. Kütle değişimi varken yapılan kayan sektör ve durum bağımlı riccati denklemi tabanlı kontrolcüler içeren anahtarlama kontrolcü uygulaması ve benzetim sonuçları

Bu simülasyonda bozucu etki eklenmeyip sistem parametrelerinden kütlenin değişimi eklenmiştir. Şekil 4.59’da kütle değişimi gösterilmiştir. Benzetim çalışmasında kütlenin 450 lb’den 212 lb’ye düştüğü varsayılmıştır. Burada kontrolcüyü bozan direkt bir etki olmamakla birlikte sistemde kütle değişiminin dinamiğe olan etkileri bulunmakta ve bu etkilere karşı kontrolcünün cevabı gözlemlenmektedir.

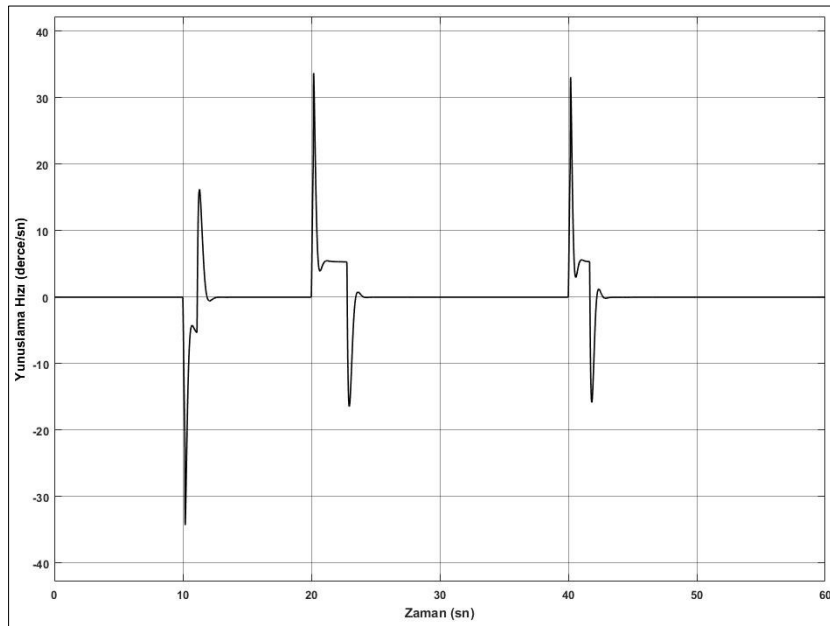


Şekil 4.59. Füzenin kütle değişimi

Şekil 4.60 ve Şekil 4.61’de kontrolcünün sistem durumlarının istenilen referans değerlere getirebildiğini göstermektedir. Hücüm açısı, ivme takibi için verilen basamak girdilerinin uygulandığı anlardan itibaren basamak girdileri ile zıt yönlü olarak aşma yaptığı Şekil 4.60’da görülmektedir. Her bir basamak girişinden yaklaşık 8 sn sonra salınım hareketi yaparak dengeye ulaştığı grafik üzerinden anlaşılmaktadır. Yunuslama hızıda kontrolcü karşısında salınım yapmakta ve yaklaşık 4 sn sonra dengeye ulaştığı Şekil 4.61’den anlaşılmaktadır.

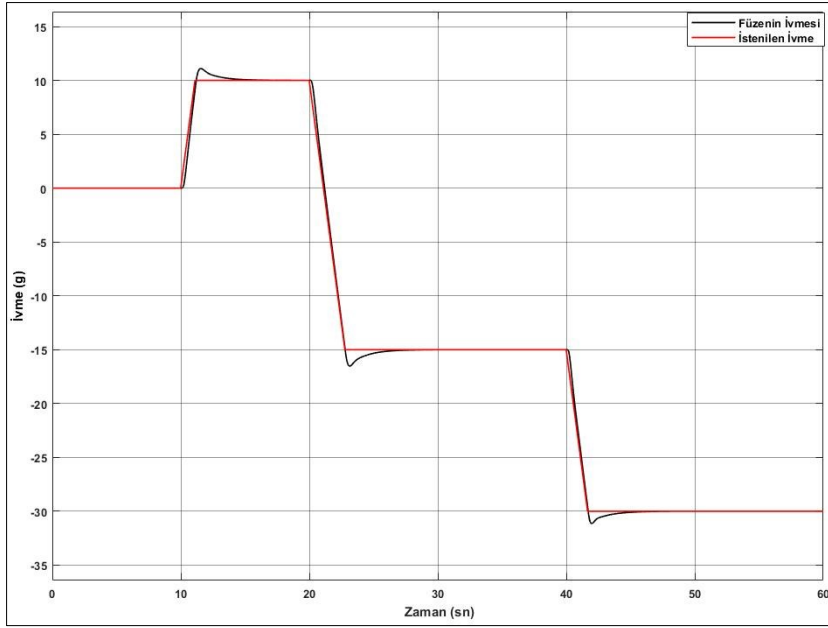


Şekil 4.60. AK için kütle değişimi varken füze hücum açısı değişimi



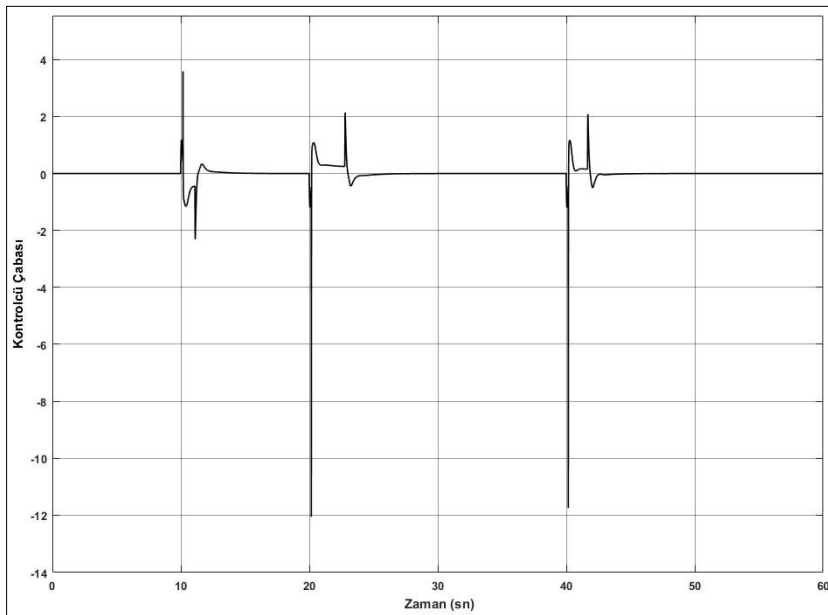
Şekil 4.61. AK için kütle değişimi varken füze yunuslama hızı değişimi

Şekil 4.62'de doğrusal olmayan dinamik sistemin ivme takibi görülmektedir. Benzetim için tasarlanmış olan istenilen ivmeler AK'nün etkisiyle küçük bir salınımın ardından yaklaşık 8 sn sonra yakalanmaktadır. Takip esnasında oluşan aşma miktarı 1,2 g civarındadır.

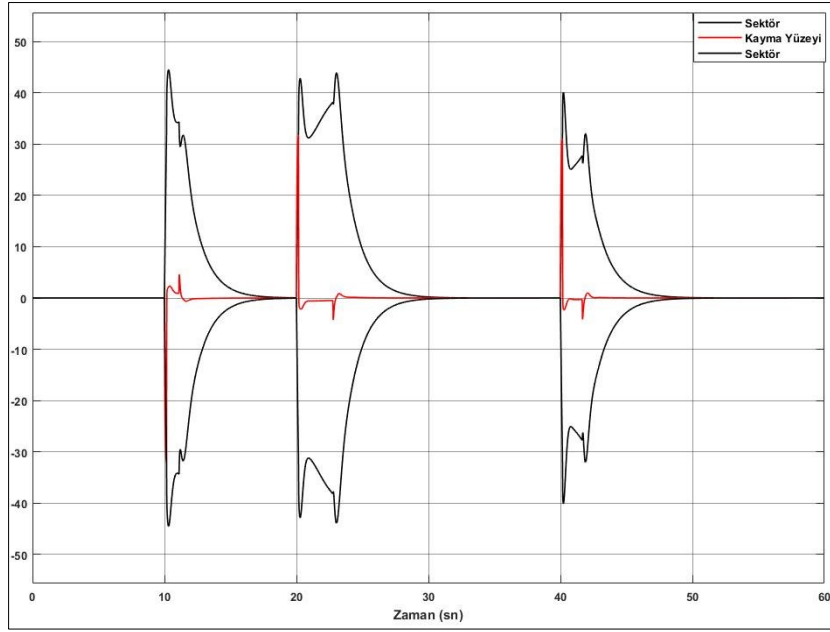


Şekil 4.62. AK için kütle değişimi varken füze ivme takibi

Şekil 4.63'e bakıldığında kontrolcü çabası AK için normal bir seyir izlemekte bazı zaman aralıklarında çaba sarf etmemektedir. Şekil 4.63 ve 4.64'ten kontrolcünün kayma yüzeyini her sektör dışına çıktığında AK kontrolcünün KSK anahtarlama devreye girerek kısa bir sürede sektör içine getirildiğini burada da DBRD anahtarlama ile dengeye getirildiği görülmektedir.

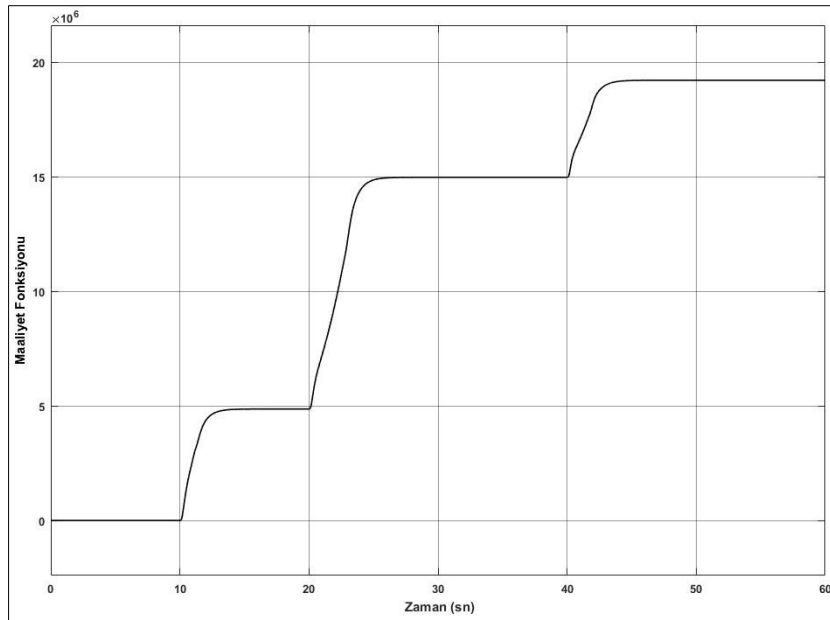


Şekil 4.63. AK için kütle değişimi varken kontrolcü çabası



Şekil 4.64. AK için kütle değişimi varken sektör ve kayma yüzeyi

Şekil 4.65'te ise maliyet fonksiyonu grafiği verilmiştir. Eş. 3.38 ile verilen maliyet fonksiyonun son değeri $1,921 \times 10^7$ 'dir.



Şekil 4.65. AK için kütle değişimi varken maliyet fonksiyonu

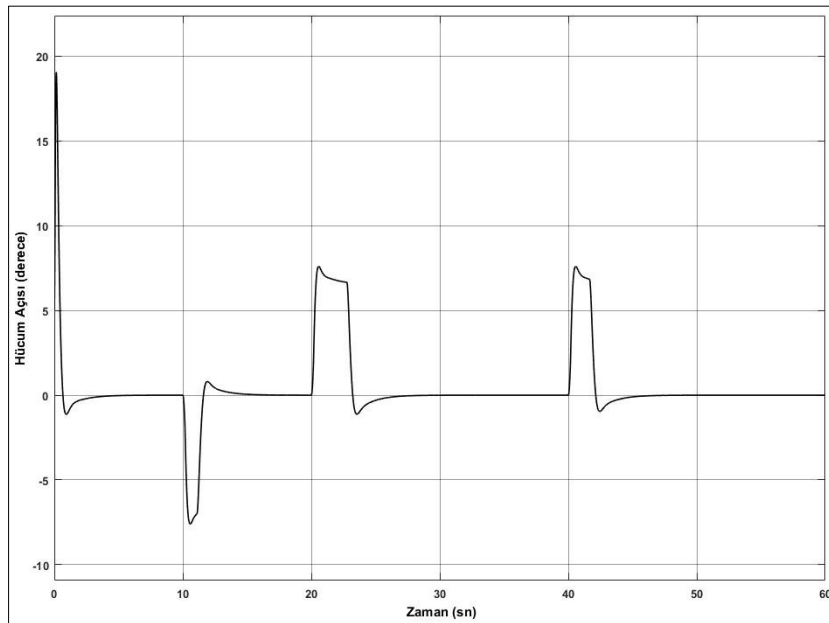
4.3.4. Kayan sektör ve durum bağımlı riccati denklemi tabanlı kontrolcüler içeren anahtarlama kontrolcü ile regülatör uygulaması ve benzetim sonuçları

Bu çalışmada sistem değişkenlerinin başlangıç koşulları “0” dan farklı bir değer verilerek sisteme etki eden herhangi bir bozucu etki veya parametre değişimi yokken kontrolcünün etkilerinin gözlemlenmesi amaçlanmıştır.

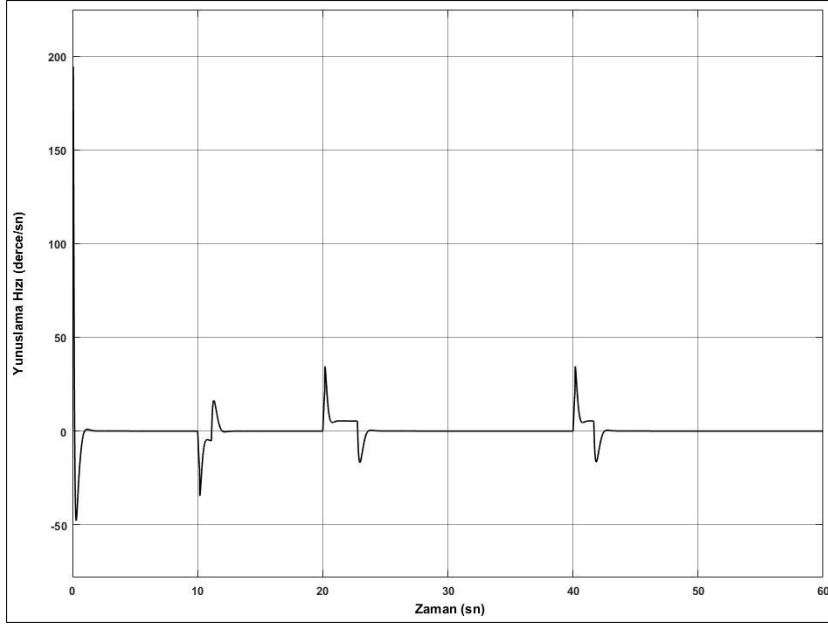
$$x = [5 \quad 1 \quad 10] \quad (4.3)$$

Modelde ele alınan başlangıç değerleri Eş. 4.2’de verilmiştir.

Hücum açısı, ivme takibi için verilen basamak girdilerinin uygulandığı anlardan itibaren basamak girdileri ile zıt yönlü olarak aşma yaptığı Şekil 4.66’da görülmektedir. Ayrıca hücum açısının 5 dereceden 19 dereceye 0,15 sn’de çıktığı ve toplamda 7 sn’de dengeye ulaştığı grafikte gösterilmektedir. Her bir basamak girişinden yaklaşık 8 sn sonra hücum açısının dengeye ulaştığı grafik üzerinden anlaşılmaktadır. Yunuslama hızında kontrolcü karşısında aynı salınımı yapmakla birlikte yaklaşık 4 sn sonra dengeye ulaştığı Şekil 4.67’den anlaşılmaktadır. Yunuslama hızı başlangıç değeri 1 derece/sn’den 194 derece/sn’ye 0.06 sn’de ulaşmış fakat toplamda 3 sn sonra denge durumuna gelmiştir.

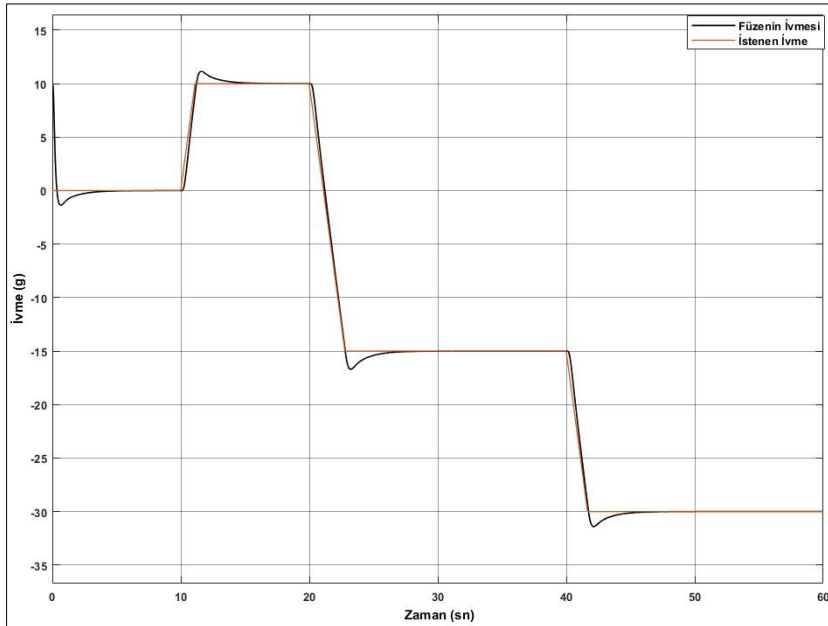


Şekil 4.66. AK ile regülatör uygulamasında füze hücum açısı değişimi



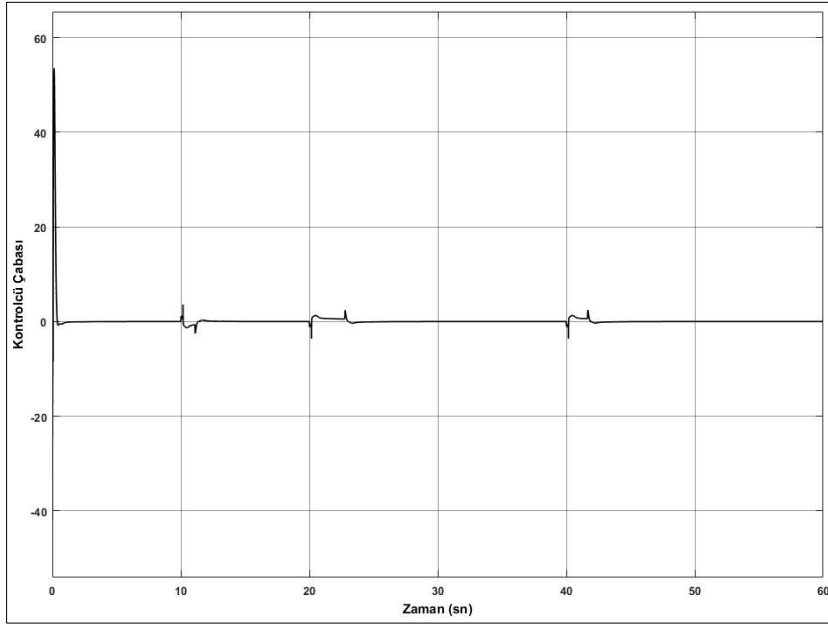
Şekil 4.67. AK ile regülatör uygulamasında füze yunuslama hızı değişimi

Şekil 4.68'de doğrusal olmayan dinamik sistem üzerinde yapılan ivme takibi görülmektedir. Tasarlanmış olan istenilen ivme rotası AK etkisiyle salınımın hareketinin ardından istenilen değerlere gelmektedir. Takip esnasında oluşan aşma miktarı 1,4 g civarındadır. Başlangıç değeri olarak verilen 10 g'lık ivme küçük bir artış gösterdikten sonra toplamda 6 sn sonra denge değerine erişmiştir.

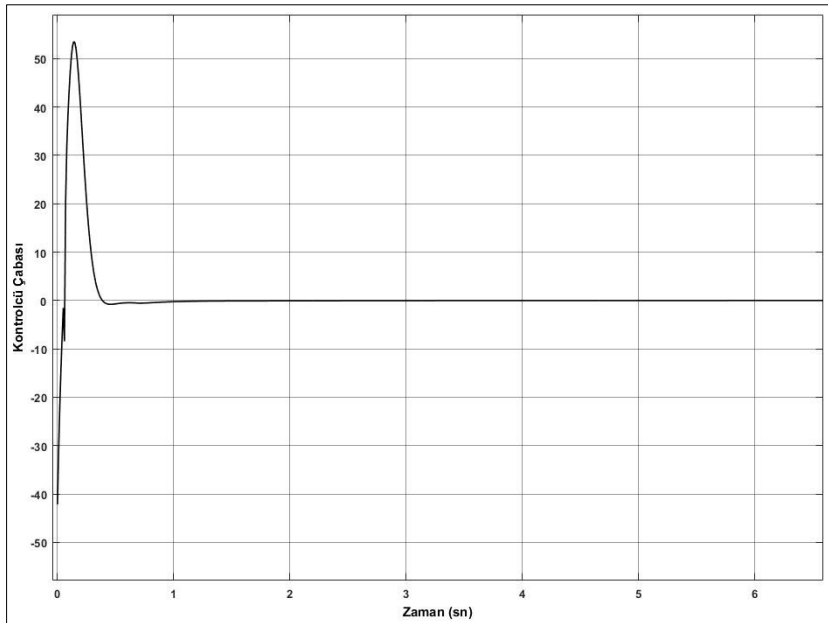


Şekil 4.68. AK ile regülatör uygulamasında füze ivme takibi

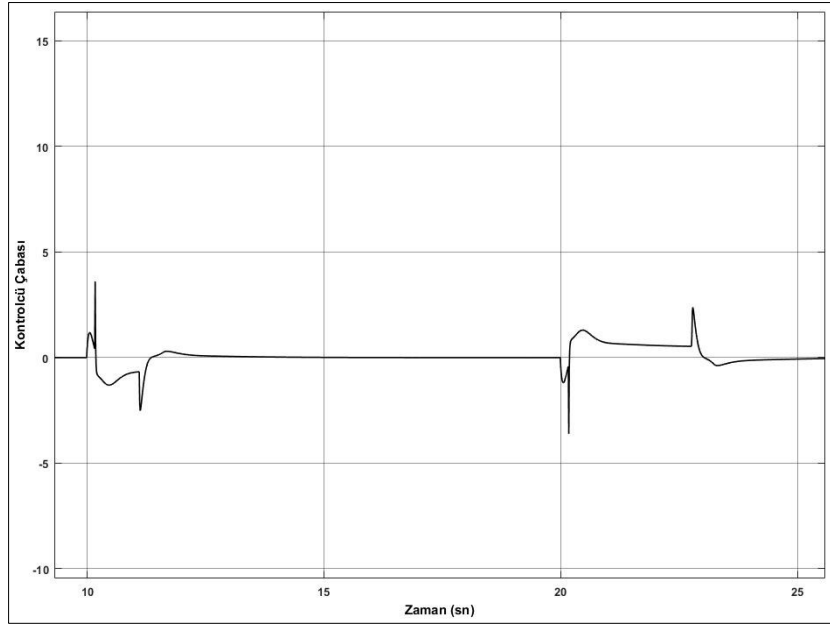
Kontrolcü çabasının grafiklerinin daha net anlaşılabilmesi adına Şekil 4.69, 4.70 ve 4.71 olmak üzere üç parçada verilmiştir. Şekil 4.69'dan başlangıç değerinin “0” dan farklı alındığı için gereken düzeltmenin yaklaşık olarak 1,5 sn’de yapıldığı gözlemlenmektedir. Şekil 4. 71’de kontrol çabasının basamak girdileri zamanında tekrarlayan salınımlarından bir tanesi gösterilmiştir. Gözlemlenen aşma miktarı yaklaşık 3 derecedir.



Şekil 4.69. AK ile regülatör uygulamasında kontrolcü çabası-1

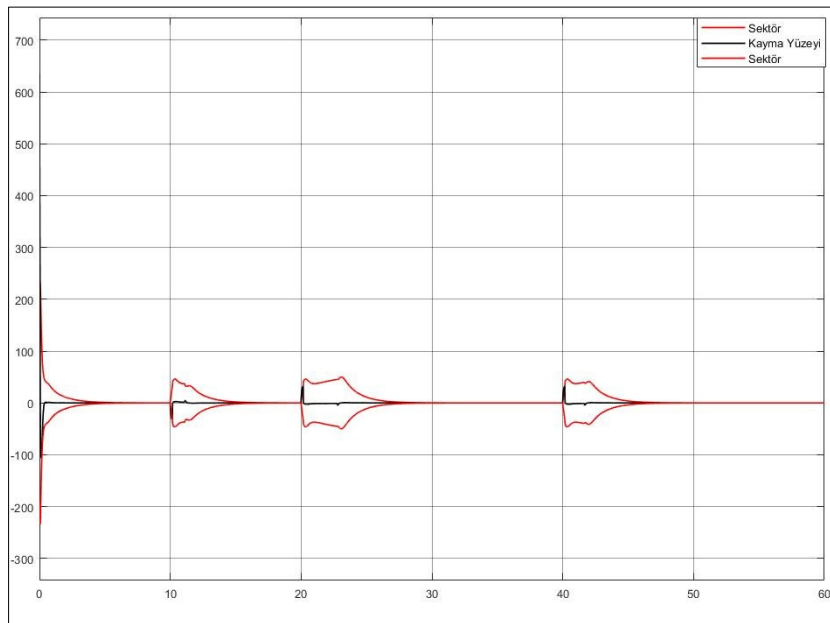


Şekil 4.70. AK ile regülatör uygulamasında kontrolcü çabası-2

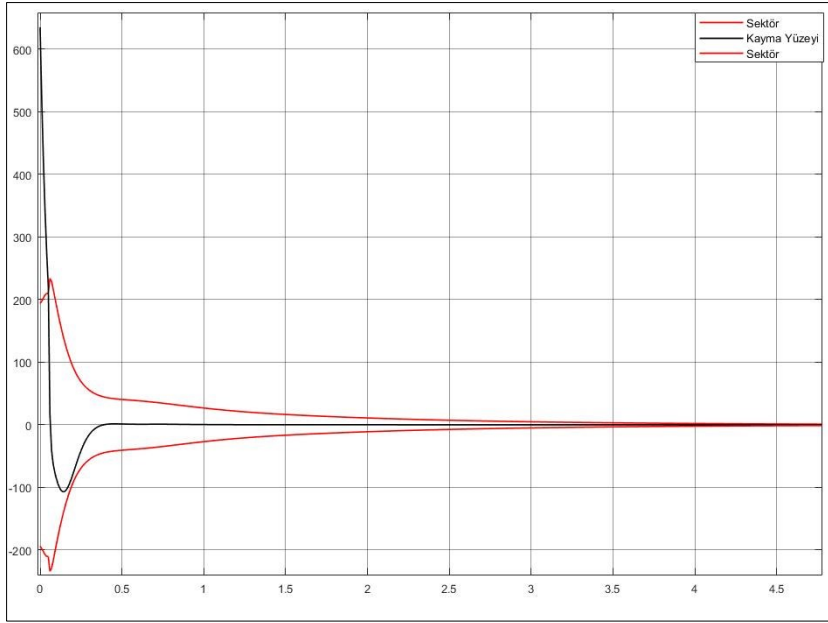


Şekil 4.71. AK ile regülatör uygulamasında kontrolcü çabası-3

Şekil 4.72 ve Şekil 4.73 kontrolcü çabalarının grafikleriyle karşılaştırıldığında kontrolcünün, sistemin kayma yüzeyinin belirlenen sektörün dışına çıktığında AK kontrolcünün KSK anahtarlama devreye girerek kısa bir sürede sektörün içine yöneldiğini, sektörün içinde de DBRD anahtarlama ile dengeye getirildiği görülmektedir.

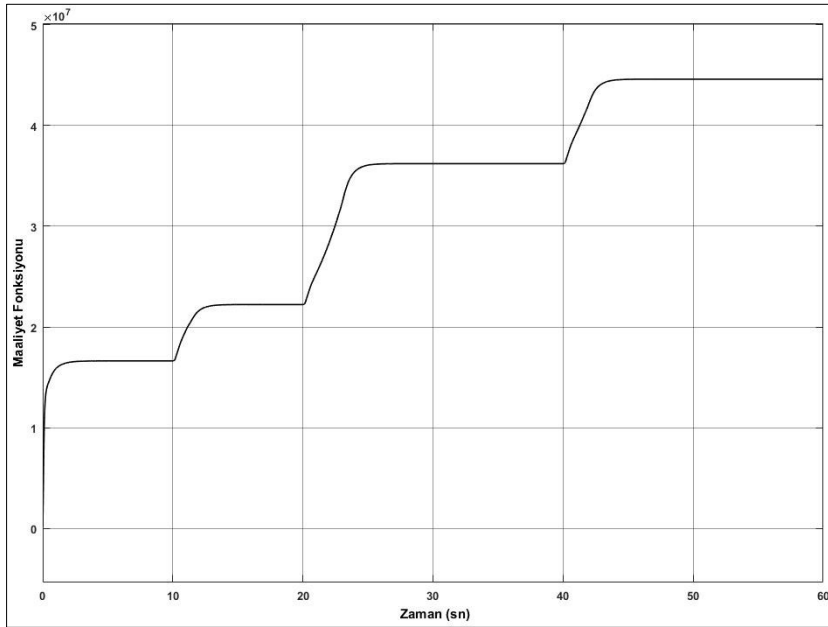


Şekil 4.72. AK ile regülatör uygulamasında sektör ve kayma yüzeyi-1



Şekil 4.73. AK ile regülatör uygulamasında sektör ve kayma yüzeyi-2

Şekil 4.74'te ise maliyet fonksiyonu grafiği verilmiştir. Eş. 3.38 ile verilen maliyet fonksiyonun son değeri $4,46 \times 10^7$ 'dir.



Şekil 4.74. AK ile regülatör uygulamasında maliyet fonksiyonu

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışmada doğrusal olmayan bir füze dinamiği ele alınmış, sistem durumlarını referans değere göre istenilen değerde tutmak ve ivme takibi yaptırmak için DBRD kontrolcü, DBRD tabanlı KSK ile bu tez çalışması kapsamında önerilen Kayan Sektör ve Durum Bağımlı Riccati Denklemi Tabanlı Kontrolcüler İçeren Anahtarlama Kontrolcü modelleri oluşturularak benzetim çalışmaları yapılmıştır.

Doğrusal olmayan füze dinamiğine uygulanmış olan KSK sistemde sürekli kontrolcü sinyali üretmek yerine sistem durumlarının tasarlanan sektörün dışına çıktığı durumlarda kontrolcü sinyali oluşturmaktadır. Böylece sürekli bir kontrolcü çabası ortaya çıkmamaktadır. Kontrolcü çabasının azalmasıyla birlikte daha az enerji sağlanarak sistem durumları istenilen yere getirilebilmektedir. Sistem durumları tasarlanan kararlı bölgenin içine çekildiği zaman kararlılığın dış bozucu etkiler ve parametre değişikliklerinden etkilenmeyip tasarlanan bu kararlı bölgede kaldığı gözlemlenerek kontrolcünün gürbüz olduğu anlaşılmaktadır. Bu sayede yaratılan kontrol çabası azaltılabildiği ve KKK yönteminde var olan çırtının önlenildiği gösterilmiştir. Çırtının önlenmesinin en önemli sebebi durum değişkenlerinin kararlı bir düzlem üstüne getirilmesi yerine kararlı bir bölge içine getirilmesidir.

Füze dinamiğine uygulanmış olan AK ise KSK'nün aksine sistemde kontrolcü sinyalini sektörün içinde de dışında da üretmektedir. Kontrolcünün bu çalışma prensibinden dolayı önerilen yeni yöntemde KSK'nın iki parçalı sektör yapısı yerine tek parçalı bir sektör tasarlanmıştır. AK, kayma yüzeyi sektörün dışındayken KSK tabanlı bir kontrolcü sinyali üreterek yörüngeleri sektörün içine yönlendirirken, kayma yüzeyi sektörün içine girdiği andan itibaren DBRD tabanlı bir kontrolcü sinyali üretmeye başlamaktadır. AK'nın KSK'ya göre en büyük avantajlarından biri sektör içinde kontrolcü sinyali oluşturarak sistem dinamiklerinden dolayı oluşacak hataları baskılamak ve artmasını engellemektir.

Tüm benzetim sonuçları üç farklı kontrolcü için karşılaştırıldığında birbirine yakın sonuçlar çıkmakla birlikte AK maliyet fonksiyonu konusunda diğerlerinden daha iyi sonuçlar vermektedir. Çizelge 5.1'de DBRD kontrolcü, KSK ve AK'nün maliyet

fonksiyonları karşılaştırılmış ve AK'nün ortalama olarak DBRD kontrolcünden %90, KSK'den %27 daha düşük maliyetli olduğu gözlemlenmiştir.

Çizelge 5.1. Maliyet fonksiyonlarının karşılaştırılması

	DBRD	KSK	AK
Bozucu etki yokken	$2,75 \times 10^8$	$3,96 \times 10^7$	$2,8 \times 10^7$
Kütle değişimi varken	$6,82 \times 10^8$	$2,68 \times 10^7$	$1,92 \times 10^7$
Regülatör uygulaması	$4,27 \times 10^8$	$5,72 \times 10^7$	$4,46 \times 10^7$

Çalışmada uygulanan kontrolcüler tek girişli bir model üzerinde incelenmiştir. İleride yapılacak çalışmalarda bu yöntemle tasarlanan bir kontrolcünün çok girişli sistemle üzerinde uygulanabilirliği benzetim çalışmaları ile denenebilir. Benzetim çalışmalarının ardından deneysel çalışmalar yapılması düşünülebilir. Ayrıca önerilen bu AK'de sektör içinde kullanılan kontrolcü modeli değiştirilerek daha iyi sonuç veren bir kontrolcü araştırılabilir.

KAYNAKALAR

1. Özkan, B. (2017). Değişken kayma yüzeyli kayan kipli denetim yönteminin elektromekanik bir kanat tahrik sistemine uygulanması. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32(3),987–998.
2. Wu, F., Packard, A., & Balas, G. (2002). Systematic gain-scheduling control design: a missile autopilot example. *Asian Journal of Control*, 4(3), 341-347.
3. Idan, M., Shima, T., & Golan, O. M. (2007). Integrated sliding mode autopilot-guidance for dual-control missiles. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 30(4), 1081-1089.
4. Pellanda, P. C., Apkarian, P., & Tuan, H. D. (2002). Missile autopilot design via a multi-channel LFT/LPV control method. *International Journal of Robust and Nonlinear Control: IFAC-Affiliated Journal*, 12(1), 1-20.
5. Faruqi, F. A., Vu, T. L. (2002). *Mathematical Models For A Missile Autopilot Design* (No. DSTO-TN-0449). Defence Science and Technology Organisation Canberra (Australia).
6. Çimen, T. (2011). A generic approach to missile autopilot design using state-dependent nonlinear control. *Proceedings of the 18th World Congress the IFAC*, Milano. 44(1), 9587-9600.
7. Mracek, C. P., & Cloutier, J. R. (1996). Missile longitudinal autopilot design using the state-dependent Riccati equation method. *Proceedings of the International Conference on Nonlinear Problems in Aviation and Aerospace*, 387-396.
8. Çimen T., McCaffrey, D., Harrison, R. F., & Banks, S. P. (2007). *Asymptotically Optimal Nonlinear Filtering*. 17th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace 40(7), 756-761.
9. Çimen, T. (2008). *State-Dependent Riccati equation (SDRE) control: A survey*. Proceedings of the 17th World Congress the IFAC, Seoul 41(2), 3761-3775.
10. Guo, R., Wu, A., & Chen, J. (2010, March). *Multi-timescale SDRE control for an unmanned helicopter*. 2nd International Conference on Advanced Computer Control IEEE. 1, 516-520.
11. Babaei, N., & Salamci, M. U. (2014). *State Dependent Riccati Equation Based Model Reference Adaptive Stabilization Of Nonlinear Systems With Application To Cancer Treatment*. Proceedings of the 19th World Congress the IFAC 47(3), Cape Town 1296-1301.
12. Shamma, J. S., & Cloutier, J. R. (1993). Gain-scheduled missile autopilot design using linear parameter varying transformations. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 16(2), 256-263.

13. Salamci, M. U., Ozgören, M. K., Banks, S. P. (2000). Sliding mode control with optimal sliding surfaces for missile autopilot design. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 23(4), 719-727.
14. Powly, A. A., & Bhat, M. S. (2004). Missile autopilot design using discrete-time variable structure controller with sliding sector. *Journal of guidance, control, and dynamics*, 27(4), 634-646.
15. Zhao, J., Yang, S., & Xiong, F. (2019). Cooperative Guidance Of Seeker-Less Missile Considering Localization Error. *Chinese Journal of Aeronautics*, 32 (8), 1933-1945
16. Çimen, T., & Banks, S. P. (2004). Nonlinear optimal tracking control with application to super-tankers for autopilot design. *Automatica*, 40(11), 1845-1863.
17. Banks, S. P., Salamci, M. U., & McCaffrey, D. (2000). Non-local stabilization of nonlinear systems using switching manifolds. *International Journal of Systems Science*, 31(2), 243-254.
18. Tomas-Rodriguez, M., Banks, S. P., & Salamci, M. U. (2006). Sliding Mode Control for Nonlinear Systems: An Iterative Approach. *Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision and Control*, Manchester 4963-4968.
19. Chingozha, T., & Nyandoro, O. (2014). *Adaptive Sliding Backstepping Control Of Quadrotor UAV Attitude*. Proceedings of the 19th World Congress the IFAC 47(3), Cape Town 11043-11048.
20. Guo, B., & Chen, Y. (2019). Adaptive Fast Sliding Mode Fault Tolerant Control Integrated With Disturbance Observer For Spacecraft Attitude Stabilization System. *ISA transactions*.
21. Hsu, K. C. (1998). Variable structure control design for uncertain dynamic systems with sector nonlinearities. *Automatica*, 34(4), 505-508.
22. Arıcan, A. Ç., Ozcan, S., Kocagil, B. M., Güzey, Ü. M., & Salamci, M. U. (2017, Ekim). Suboptimal control of a 3 dof helicopter with state dependent riccati equations. *XXVI International Conference on Information, Communication and Automation Technologies (ICAT)*, 1-6.
23. Chu, X., & Li, M. (2019). H_∞ non-fragile observer-based dynamic event-triggered sliding mode control for nonlinear networked systems with sensor saturation and dead-zone input. *ISA transactions*.
24. Kim, H., & Lee, J. (2019). Robust sliding mode control for a USV water-jet system. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 11(2), 851-857.
25. Karami-Mollaei, A., Tirandaz, H., & Barambones, O. (2019). Neural dynamic sliding mode control of nonlinear systems with both matched and mismatched uncertainties. *Journal of the Franklin Institute*, 356(8), 4577-4600.

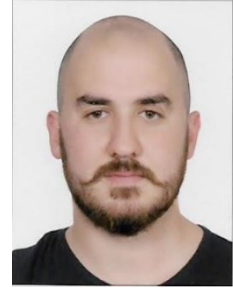
26. Bilgin, N. (2007). *Esnek sistemlerin kayan kipli denetimi ve bir uydu modeline uygulanması*. Yüksek Lisan Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-140.
27. Xu, B., Zhou, D. (2014). Guidance law design via variable structure control with finite time sliding sector. *Proceedings of the 19th World Congress the IFAC* 47(3), Cape Town 47(3), 469-474.
28. Muraca, P., Pugliese, P. (1997). A variable-structure regulator for robotic systems. *Automatica*, 33(7), 1423-1426.
29. Pan, Y., Kumar, K. D., Liu, G., Furuta, K. (2009). Design of variable structure control system with nonlinear time-varying sliding sector. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 54(8), 1981-1986.
30. Yu, X., Yu, S. (2000). *Invariant sliding sectors for discrete sliding mode control*. Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. IEEE. No. 00CH37187) 3, 2605-2606.
31. Pan, Y., Furuta, K., Suzuki, S., Hatakeyama, S. (2000). Design of variable structure controller-from sliding mode to sliding sector. *Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control IEEE. Cat. No. 00CH37187* 2, 1685-1690.
32. Pan, Y., Furuta, K., Hatakeyama, S. (1999). Invariant sliding sector for variable structure control. *Proceedings of the 38th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No. 99CH36304) IEEE. 5, 5152-5157*.
33. Pan, Y. (2005). Stabilization of hybrid system with unstabilizable subsystems. In 2005 *International Conference on Machine Learning and Cybernetics. IEEE. 2, 1053-1058*.
34. Pan, Y., Furuta, K. (2006). Variable structure control with sliding sector for hybrid systems. *International Workshop on Variable Structure Systems, 2006. VSS'06. IEEE. 286-291*.
35. Iwata, T., Yamakita, M., Furuta, K. (2000). PWM-type discrete VSS controller for on/off actuator systems. In *Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No. 00CH37187) IEEE. 5, 5131-5136*.
36. Furuta, K., Pan, Y. (1995). A new approach to design a sliding sector for VSS controller. In *Proceedings of 1995 American Control Conference-ACC'95, IEEE. 2, 1304-1308*.
37. Furuta, K., Hatakeyama, S., Pan, Y. (1999). VS controller design for continuous system from sampled data. In *Proceedings of the 1999 American Control Conference (Cat. No. 99CH36251) IEEE. 2, 1032-1036*.
38. Xu, J. X., Lee, T. H., He, C. (1996). Modified sliding mode controller for a class of nonlinear multi-input systems. In *Proceedings. 1996 IEEE International Workshop on Variable Structure Systems.-VSS'96- IEEE. 55-60*.

39. Pan, Y., Furuta, K. (1993). VSS controller design for discrete-time systems. *In Proceedings of IECON'93-19th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics IEEE*. 1950-1955.
40. Korondi, P., Hashimoto, H., & Sziebig, G. (2008). Sliding sector design for nonlinear systems. *IFAC Proceedings Volumes*, 41(2), 3556-3561.
41. Ozcan, S., Salamci, M. U., & Birinci, B. E. (2013, June). State dependent sliding sectors for nonlinear systems with nonlinear sliding surfaces. *American Control Conference IEEE*. 5754-5759
42. Furuta, K., & Pan, Y. (2000). Variable structure control with sliding sector. *Automatica*, 36(2), 211-228.
43. Özcan S.(2018) *İnsansız Hava Araçları için Kayan Sektör Denetleyici Tasarımı ve Deneyisel Olarak Uygulanması*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 78-99.
44. Suzuki, S., Pan, Y., Furuta, K., & Hatakeyama, S. (2004). VS-Control with time-varying sliding sector—design and application to pendulum—. *Asian Journal of Control*, 6(3), 307-316.
45. Gökbilen B.(2006), *Doğrusal Olmayan Sistemlerin Zamanla Değişen Doğrusal Yüzey Kullanılarak Kayan Kipli Kontrolü ve Uygulamaları*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 32-98.
46. Arıcan A.Ç.(2017) *Durum Bağımlı Riccati Denklemi Tabanlı Optimal Kontrolcü Tasarımı ve Üç Serbestlik Dereceli Helikopter Uygulaması*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 13-27.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı :DEDE, Gökçe
 Uyuğu :T.C.
 Doğum tarihi ve yeri :19.08.1987, Akşehir
 Medeni hali :Evli
 Telefon :0 (555) 6248826
 e-mail :gokcedede@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi/Makine Mühendisliği	Devam Ediyor
Lisans	Gazi Üniversitesi/Makine Mühendisliği	2013
Lise	Kuleli Askerî Lisesi	2005

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2014-Halen	Roketsan A.Ş.	Makine Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Dede,G. , Salamci,M.U., Arican, A.Ç. and Özcan,S. (2019), *Sliding Sector Controller For Missile Autopilot* 233rd International Institute of Engineers and Researchers,International Conference on Robotics, Aeronautics, Mechanics and Mechatronics , Istanbul,Turkey.

Hobiler

Sinema, Basketbol, Tiyatro, Edebiyat



GAZİ GELECEKTİR..