

**ANA MUHAREBE TANKI ATIŞ SİSTEMİNİN
MODELLENMESİ VE DENETİMİ**

**MODELLING AND CONTROL OF FIRE SYSTEM
FOR MAIN BATTLE TANK**

RAMAZAN ARIK

Hacettepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetmeliğinin

ELEKTRİK ve ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

Anabilim Dalı İçin Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak Hazırlanmıştır.

2005

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü'ne

Bu çalışma jürimiz tarafından ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Başkan :.....
Prof.Dr. Alper URAZ

Üye (Danışman) :.....
Prof.Dr. Hüseyin DEMİRCİOĞLU

Üye :.....
Prof.Dr. Turhan ÇİFTÇİBAŞI

Üye :.....
Yrd.Doç.Dr. Yakup ÖZKAZANÇ

Üye :.....
Yrd.Doç.Dr. Derya ALTUNAY

ONAY

Bu tez// 2005 tarihinde Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen yukarıdaki
jüri üyeleri tarafından kabul edilmiştir.

.....// 2005

Prof.Dr. Ahmet R. ÖZDURAL
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

ANA MUHAREBE TANKI ATIŞ SİSTEMİNİN MODELLENMESİ VE DENETİMİ

Ramazan Arık

ÖZ

Bu çalışmada Ana Muharebe Tankı (AMT) silah sisteminin modellenmesi ve denetimi benzetim yoluyla incelenmiştir. Tank silah sistemi, yan ve yükseliş olmak üzere iki ekseninde modellenmiştir. Kararlı ve 3. dereceden matematiksel modeller elde edilmiştir. Elde edilen doğrusal modellere, doğrusal olmayan etkiler eklenerek modelin gerçeğe yakın olması sağlanmıştır.

Elde edilen tank silah sistemi modeli kullanılarak çeşitli denetim yöntemleriyle benzetim çalışmaları yapılmış ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Benzetim çalışmalarında OTT (Oransal-Türevsel-Tümlevsel) denetleçler ve SÜGÖNDE (Sürekli Zaman Genelleştirilmiş Öngörü Denetimi) yöntemi kullanılmıştır. Hareket halindeki araca yoldan gelen bozucu etkilerin silaha iletimini engellemek için ileribeslemeli denetim çalışmaları yapılmıştır. Sadece geribeslemeli (OTT veya SÜGÖNDE) denetimin ve hem geribeslemeli hem de ileri beslemeli denetimin olduğu benzetim çalışmaları yapılmış ve sonuçları karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Tank silah sistemleri, OTT denetim, SÜGÖNDE, ileri beslemeli denetim, öngörülü denetim, sistem tanıyımı.

Danışman: Prof.Dr. Hüseyin DEMİRCİOĞLU, Hacettepe Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

MODELLING AND CONTROL OF FIRE SYSTEM FOR MAIN BATTLE TANK

Ramazan Arık

ABSTRACT

In this study, modelling and control of MBT's (Main Battle Tank) gun systems has been examined using simulation. Tank gun system has been modelled in 2-axis as traverse and elevation. The models obtained are stable and third order. Nonlinear effects have been coupled into the linear model obtained to emulate a real system.

The obtained tank gun system model has been controlled with some control techniques and their results have been compared. In simulation studies, PID (Proportional-Integral-Derivative) controllers and CGPC (Continuous time Generalized Predictive Control) have been used. The feedforward control studies have been done for rejection of disturbance from terrain. Firstly, only the feedback control techniques (PID or CGPC) have been used. Then, feedforward control is used with feedback control and the results have been compared.

Keywords: tank gun systems, PID control, CGPC, feedforward control, predictive control, system identification.

Advisor: Prof.Dr. Hüseyin DEMİRCİOĞLU, Hacettepe University, Department of Electrical and Electronics Engineering

TEŞEKKÜR

- Bu çalıőmanın sağlıklı bir biçimde yşrştşlebilmesi için yol gşsteren ve çalıőmalar sırasında karőılaőılan sorunların şzşmşnde yardımcı olan tez danıőmanım Prof. Dr. Hşseyin Demircioğlu'na,
- Çalışma sırasında desteğini esirgemeyen ve çeşitli sorunların şzşmşnde yardımcı olan arkadaőlarım Sibel Turhan ve Alper Erdener'e,

içtenlikle teőekkřr ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZ	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. TANK SİLAH SİSTEMİNİN MODELLENMESİ	4
2.1. Giriş	4
2.2. Yükseliş Ekseni	4
2.2.1. Yükseliş Ekseni Doğrusal Modelinin Elde Edilmesi	5
2.2.2. Yükseliş Ekseninde Doğrusal Olmayan Etkiler ve Bu Etkilerin Modele Katılması	11
2.3. Yan Ekseni	15
2.3.1. Yan Ekseni Doğrusal Modelinin Elde Edilmesi	17
2.3.2. Yan Eksende Doğrusal Olmayan Etkiler ve Bunların Modele Katılması	21
3. ÇALIŞMADA KULLANILAN DENETİM YÖNTEMLERİ	25
3.1. Giriş	25
3.2. OTT Denetim	25
3.2.1. OTT Denetim Temel Algoritma	26
3.2.2. Temel Algoritma Üzerindeki Bazı Düzeltmeler	27
3.3. Çalışmada Kullanılan OTT Denetim Yöntemleri	30
3.3.1. Ziegler-Nichols Basamak Tepkisi Yöntemi	31
3.3.2. Ziegler-Nichols Sıklık Tepkisi Yöntemi	33
3.3.3. Genlik ve Evre Payı Ayarlayıcıları	37
3.3.4. Baskın Kutup Tasarımı	39
3.3.5. Kutup Yerleştirme Tasarımı	42
3.4. SZYEKK ile Model Parametrelerinin Kestirimi	44
3.5. İleri Beslemeli Denetim	45
3.6. Sürekli Zaman Genelleştirilmiş Öngörü Denetim (SÜGÖNDE)	46
4. BENZETİM SONUÇLARI	52
4.1. Giriş	52
4.2. OTT Denetim Benzetim Sonuçları	52
4.2.1. Ziegler-Nichols Basamak Tepkisi Yöntemi Benzetim Sonuçları	53
4.2.2. Ziegler-Nichols Sıklık Tepkisi Yöntemi Benzetim Sonuçları	54
4.2.3. Genlik ve Evre Payı Ayarlayıcıları İçin Benzetim Sonuçları	56
4.2.4. Baskın Kutup Tasarımı İçin Benzetim Sonuçları	58
4.2.5. Kutup Yerleştirme Tasarımı İçin Benzetim Sonuçları	60
4.2.6. Bozucu Hız İle İlgili Benzetim Sonuçları	66
4.2.7. İleri Beslemeli Denetim Benzetim Sonuçları	70
4.3. SÜGÖNDE Benzetim Sonuçları	73
5. SONUÇ	80
KAYNAKLAR	82
Ek – 1: İngilizce-Türkçe Terimler Sözlüğü	83

SİMGELER VE KISALTMALAR

SZYEEKK	Sürekli Zaman Yineli En Küçük Kareler (Continuous-Time Recursive Least Square, CRLS)
OTT	Oransal-Tümlevsel-Türevsel (Proportional-İntegral-Derivative, PID)
SÜGÖNDE	Sürekli Zaman Genelleştirilmiş Öngörü Denetim (Continuous-Time Generalized Predictive Control, CGPC)
AMT	Ana Muharebe Tankı
MBT	Main Battle Tank (Ana Muharebe Tankı, MBT)
CGPC	Continuous-Time Generalized Predictive Control (Sürekli Zaman Genelleştirilmiş Öngörü Denetim, SÜGÖNDE)
PID	Proportional-İntegral-Derivative (Oransal-Tümlevsel-Türevsel, OTT)
RLS	Recursive Least Square (Yineli En Küçük Kareler)
BDGZ	Birinci Dereceden Gecikme Zamanlı
u	Sistem girişi veya denetim sinyali
e	Denetim hatası
y	Süreç veya model çıkışı
r	İstenilen çıkış
T	Sistem zaman sabiti
L	Sistem gecikme zamanı
φ^T	Veri vektörü
θ	Parametre vektörü
ω_o	Doğal sıklık
ζ	Sönüm oranı
K_u	Kritik kazanç
ω_u	Kritik sıklık
K	OTT oransal kazancı veya sistem durgun durum kazancı
T_i	OTT tümlev zamanı
T_d	OTT türev zamanı
T_t	Düzeltilme zaman sabiti
b	İstenilen çıkış ağırlıklandırma çarpanı
N	Uysallaştırma çarpanı
N_u	Denetim derecesi

N_y	Öngörme derecesi
λ	Denetim ağırlıklandırma çarpanı
J	Maliyet işlevi
T_f	Öngörü ufku

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Ana muharebe tankı yükseliş ekseni yapısı	5
Şekil 2.2 Yükseliş ekseni blok şeması	5
Şekil 2.3 Yükseliş ekseni blok şema-1	6
Şekil 2.4 Yükseliş ekseni blok şema-2	7
Şekil 2.5 Bozucu hızın silaha etkisi	8
Şekil 2.6 Yükseliş ekseni hız isteği basamak tepkisi.....	10
Şekil 2.7 Yükseliş ekseni bozucu etki basamak tepkisi.....	10
Şekil 2.8 Motor ile silah arasındaki oran	11
Şekil 2.9 Uygulanan dönü kuvveti-silah hızı ilişkisi	13
Şekil 2.10 Yükseliş ekseni doğrusal olmayan sistem - blok şema	14
Şekil 2.11 Doğrusal olmayan modele uygulanan giriş gerilimi	14
Şekil 2.12 Doğrusal olmayan modelin uygulanan giriş gerilimine tepkisi (silah hızı)...	14
Şekil 2.13 Doğrusal olmayan modelin uygulanan giriş gerilimine tepkisi (silahın açısı)15	
Şekil 2.14 Ana muharebe tankı yan eksen yapısı (üstten görünüş).....	16
Şekil 2.15 Yan eksen blok şeması	16
Şekil 2.16 Yan eksen blok şeması-1	17
Şekil 2.17 Yan eksen blok şeması-2	18
Şekil 2.18 Yan eksen hız isteği basamak tepkisi	20
Şekil 2.19 Yan eksen bozucu etki basamak tepkisi	21
Şekil 2.20 Motor ile kule arasındaki oran	21
Şekil 2.21 Yan eksen doğrusal olmayan model – blok şema	23
Şekil 2.22 Doğrusal olmayan modele uygulanan giriş gerilimi	23
Şekil 2.23 Doğrusal olmayan modelin giriş gerilimine tepkisi (silah hızı)	23
Şekil 3.1 OTT denetleç yapısı	27
Şekil 3.2 Basit geribeslemeli denetim kapalı döngü yapısı	27
Şekil 3.3 Tümlensel yığılım önlemeli OTT denetleç	29
Şekil 3.4 Basamak tepkisi ve süreç modeli parametreleri.....	31
Şekil 3.5 Alanlardan model parametrelerinin bulunması.....	33
Şekil 3.6 Nyquist eğrisi	34
Şekil 3.7 Oransal geribeslemeli kapalı döngü sistem yapısı	34
Şekil 3.8 Röleli geribesleme döngüsü.....	34
Şekil 3.9 Histeresisli rölenin giriş-çıkış özelliği	36

Şekil 3.10 Karmaşık düzlemde tanım işlevi ve Nyquist eğrisi	36
Şekil 3.11 Verilen bir noktanın karmaşık düzlemde yerinin değiştirilmesi	37
Şekil 3.12 Basit geribesleme döngüsünün kutup ve sıfırlarının yerleşim şekli	39
Şekil 3.13 İleri beslemeli denetim yapısı	46
Şekil 3.14 SÜGÖNDE kapalı döngü yapısı	51
Şekil 4.1 Yükseliş eksenini için Z-N basamak tepkisi yöntemi	53
Şekil 4.2 Yan eksen için Z-N basamak tepkisi yöntemi	54
Şekil 4.3 Yükseliş Eksenini için Z-N sıklık tepkisi yöntemi	55
Şekil 4.4 Yan eksen için Z-N sıklık tepkisi yöntemi	56
Şekil 4.5 Yükseliş eksenini için genlik-evre payı ayarlayıcısı	57
Şekil 4.6 Yan eksen için genlik-evre payı ayarlayıcısı	58
Şekil 4.7 Yükseliş eksenini için baskın kutup tasarımı yöntemi	59
Şekil 4.8 Yan eksen için baskın kutup tasarımı yöntemi	60
Şekil 4.9 Kullanılan giriş – çıkış sinyalleri	61
Şekil 4.10 Kesitirilen sistem modeli parametreleri (yükseliş eksenini)	62
Şekil 4.11 Kesitirilen sistem modeli parametreleri (yan eksen)	62
Şekil 4.12 Yükseliş eksenini basamak tepkileri	63
Şekil 4.13 Yan eksen basamak tepkileri	63
Şekil 4.14 Yükseliş eksenini sıklık tepkileri	64
Şekil 4.15 Yan eksen sıklık tepkileri	64
Şekil 4.16 Yükseliş eksenini için kutup yerleştirme yöntemi	65
Şekil 4.17 Yan eksen için kutup yerleştirme yöntemi	66
Şekil 4.18 Yükseliş eksenini bozucu etki	67
Şekil 4.19 Yan eksen bozucu etki	67
Şekil 4.20 Yükseliş eksenini için kutup yerleştirme tasarımının bozucu hıza tepkisi	68
Şekil 4.21 Yan eksen için kutup yerleştirme tasarımının bozucu hıza tepkisi	69
Şekil 4.22 Yükseliş eksenini-kutup yerleştirme tasarımının bozucu hıza tepkisi	69
Şekil 4.23 Yan eksen-kutup yerleştirme tasarımının bozucu hıza tepkisi	70
Şekil 4.24 Yükseliş eksenini için ileri beslemeli denetim (hız isteği yok)	71
Şekil 4.25 Yan eksen için ileri beslemeli denetim (hız isteği yok)	72
Şekil 4.26 Yükseliş eksenini için ileri beslemeli denetim (hız isteği var)	72
Şekil 4.27 Yan eksen için ileri beslemeli denetim (hız isteği var)	73
Şekil 4.28 Yükseliş eksenini için SÜGÖNDE denetimi	75
Şekil 4.29 Yan eksen için SÜGÖNDE denetimi	76
Şekil 4.30 Yükseliş eksenini için SÜGÖNDE'nin bozucu hıza tepkisi (hız isteği yok)	76

Şekil 4.31 Yan eksen için SÜGÖNDE'nin bozucu hıza tepkisi (hız isteği yok).....	77
Şekil 4.32 Yükseliş eksenini için ileri beslemeli denetim (hız isteği yok).....	77
Şekil 4.33 Yan eksen için ileri beslemeli denetim (hız isteği yok)	78
Şekil 4.34 Yükseliş eksenini için ileri beslemeli denetim (hız isteği var)	78
Şekil 4.35 Yan eksen için ileri beslemeli denetim (hız isteği var)	79

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1 Tankın yükseliş eksenine ait parametreler	10
Çizelge 2.2 Yan eksen parametreleri	20
Çizelge 3.1 Ziegler-Nichols basamak tepkisi yöntemine göre OTT parametreleri.....	33
Çizelge 3.2 Ziegler-Nichols sıklık tepkisi yöntemine göre OTT parametreleri.....	37
Çizelge 4.1 Ziegler-Nichols basamak tepkisi yöntemi benzetim sonuçları	53
Çizelge 4.2 Ziegler-Nichols sıklık tepkisi yöntemi benzetim sonuçları	55
Çizelge 4.3 Genlik-evre payı ayarlayıcısı için benzetim sonuçları	57
Çizelge 4.4 Baskın kutup tasarımı için benzetim sonuçları	59
Çizelge 4.5 Kullanılan süzgeç çokterimlileri ve elde edilen 2.derece sistem modelleri	62
Çizelge 4.6 Kutup yerleştirme tasarımında benzetim çalışması sonuçları	65
Çizelge 4.7 SÜGÖNDE tasarım parametreleri.....	74
Çizelge 4.8 SÜGÖNDE denetim parametreleri	75

1. GİRİŞ

Ana muharebe tankları kara savaşlarının vazgeçilmez silahlarıdır. Ana muharebe tanklarında silahın başarımı, duran veya hareketli bir araçtan duran veya hareketli bir hedefin ilk atışta vuruş ihtimalinin yüksek olması ile ölçülür. Bu başarım, iyi bir atış denetim sistemi ile elde edilebilir. Atış denetim sisteminin en önemli kısmını silah denetim sistemi oluşturmaktadır. Silah denetim sisteminin başarısı denetimde kullanılan denetlecin seçimi ve iyi ayarlanmasına bağlıdır. Kullanılan denetleçten yüksek başarım ancak silahın iyi modellenebilmesi ile elde edilir.

OTT (Oransal-Tümlevsel-Türevsel) denetleci denetim uygulamalarında en yaygın olarak kullanılan denetleçtir. Endüstride birçok alanda OTT denetleçler kullanılmaktadır (Aström ve Hagglund, 1994). OTT denetimin tercih edilmesi, kolay anlaşılır olması ve kullanımının kolay olmasından kaynaklanmaktadır. OTT denetim yaygın olarak kullanılmasına ve kolay anlaşılabilir olmasına rağmen, endüstrideki kullanımında genelde iyi ayarlanamamakta ve dolayısıyla gösterebileceği başarımın altında bir başarımla çalıştırılmaktadır (Aström ve Hagglund, 1994). OTT denetleçler genelde kullanıcı tarafından elle ayarlanmaktadır. Kullanıcının OTT denetim ve denetlenecek süreç hakkında yeterli bilgi ve deneyime sahip olmaması, denetim başarımının olabildiğinden daha düşük olmasına neden olur.

SÜGÖNDE (Sürekli Zaman Genelleştirilmiş Öngörü Denetim) yöntemi 1990'ların başlarında Demircioğlu ve Gawthrop (1991) tarafından geliştirilmiştir. SÜGÖNDE yöntemi, GÖNDE (Genelleştirilmiş Öngörü Denetim)'nin sürekli zamanda eşdeğeri sayılabilecek bir denetim yöntemidir. SÜGÖNDE, denetlenen sistem çıkışını öngörmeye dayanan bir denetim yöntemidir. Denetlenecek sistemin çıkışı belli bir zaman aralığında, sistemin geçmiş çıkış ve giriş sinyallerine bağlı olarak öngörülür. Öngörülen sistem çıkışı ile bilindiği varsayılan gelecekteki istenilen sistem çıkışı arasındaki fark en küçük olacak şekilde öngörülen giriş sinyali bulunur ve bu sinyalin o anki değeri denetlenecek sisteme uygulanır.

Bir sisteme etki eden bozucu etkiler ölçülebiliyorsa, bu bozucu etkilerin yok edilmesinde en etkili yöntem ileri beslemeli denetimdir (Purdy, 1991). Tank silah sistemlerinde özellikle hareket halinde iken büyük bozucu etkiler olmaktadır. Tanklarda silah üzerindeki bozucu etkiler tank gövdesine ve kulesine yerleştirilen jiroskoplar ile ölçülmektedir.

Tank silah sistemi denetiminin benzetim yöntemiyle ele alındığı bu çalışmada aşağıdaki adımlar izlenmiştir.

Tank silah sisteminin modellenmesi: Bu çalışmada önce tank silah sisteminin yan ve yükseliş olmak üzere iki ekseninde modellenmesi yapılmıştır. Modellemede, eksenlerin birbirlerine olan etkisi ihmal edilebilecek seviyede olduğu için eksenler ayrı olarak düşünülmüştür (Purdy, 1991). Sistemin, kullanıcı tarafından verilen isteklere ve bozucu etkilere tepkisini gösteren doğrusal modeller elde edildikten sonra sistemdeki doğrusal olmayan etkiler incelenmiştir. Doğrusal olmayan etkiler modele eklenip sistemin doğrusal olmayan modeli elde edilerek modelin gerçeğe yakın olması sağlanmıştır.

Denetim yöntemlerinin incelenmesi: Bu çalışmada önce çeşitli OTT denetim yöntemleri araştırılıp incelenmiş ve bu yöntemlerden 5 tanesi seçilmiştir. Seçilen yöntemlerin yaygın olarak kullanılan ve en uygun yöntemler olmasına dikkat edilmiştir. Daha sonra, gelişmiş denetim yöntemlerinden SÜGÖNDE yöntemi araştırılmış ve yöntemin tank silah sistemine uygulanabilirliği incelenmiştir. Son olarak, geribeslemeli denetime ek olarak ileribeslemeli denetimin kullanımı incelenmiştir.

Yöntemlerin benzetim çalışmalarının yapılması, verilerin toplanması ve karşılaştırılması: Seçilen OTT denetim yöntemlerinin tankın yan ve yükseliş eksenleri için benzetim çalışmaları yapılmıştır. Kullanıcı tarafından verilen hız isteklerine denetim yöntemlerinin verdiği tepkiler incelenmiştir. SÜGÖNDE yöntemi ile karşılaştırmak için OTT denetim yöntemlerinden hızlı, aşmasız ve salınımsız tepkiyi veren en iyi denetim yöntemi seçilmiştir. Daha sonra, SÜGÖNDE yöntemi ile tankın yan ve yükseliş eksenleri için benzetim çalışmaları yapılmıştır. SÜGÖNDE yöntemi kullanılarak kullanıcı tarafından verilen hız isteklerine sistemin verdiği tepkiler incelenmiştir. Toplanan veriler karşılaştırılarak seçilen OTT denetim yöntemi ile SÜGÖNDE yönteminin başarımı karşılaştırılmıştır. Ayrıca, bu iki yöntemin bozucu etkilere tepkisi de benzetim yoluyla incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Son olarak, bu iki denetim yöntemiyle birlikte ileribeslemeli denetim uygulanmıştır. İleribeslemeli denetimin uygulandığı ve uygulanmadığı durumlarda toplanan verilerle ileribeslemeli denetimin başarımı incelenmiştir.

Bu çalışma dört ana bölümden oluşmaktadır. İlk bölüm giriş bölümüdür. Bölüm 2'de tank silah sisteminin yan ve yükseliş eksenlerinde modellenmesi ele

alınmıştır. Bölüm 3'te kullanılan denetim yöntemleri verildikten sonra Bölüm 4'te benzetim sonuçları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. 5. bölümde elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

2. TANK SİLAH SİSTEMİNİN MODELLENMESİ

2.1. Giriş

Silah denetim sistemlerinin amacı, hareketli veya duran bir araçtan hareketli veya duran bir hedefe yapılan ilk atışta vuruş ihtimalini artırmaktır. Bu amaca ulaşabilmek için silah denetim sisteminin silahın yapması gereken hareketleri belirlemesi ve uygulaması gerekmektedir. Ana muharebe tanklarında ilk atışta vuruş ihtimalinin yüksek olması için etkili bir silah denetim sistemi gerekmektedir. Etkili bir silah denetim sistemini tasarlayabilmek için silahın modeline ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bölümde, elektrik sürücülü ana muharebe tanklarına ait silah sistemlerinin modellenmesi işlenecektir.

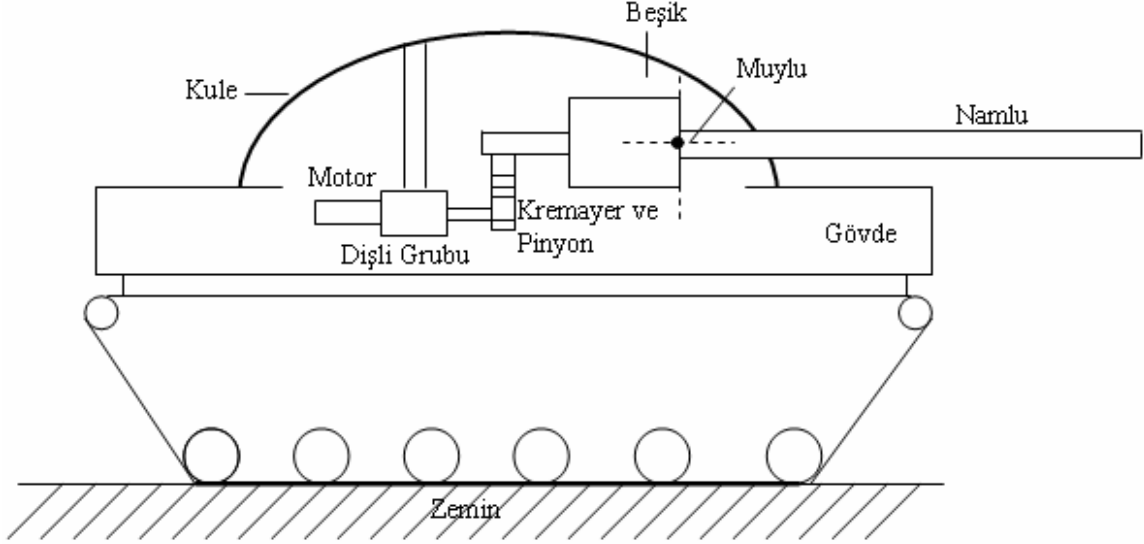
Silaha verilen komutlarla, sistemin verilen komutlara tepkisi arasındaki ilişki incelenecektir. Sistemin doğrusal bir modeli oluşturulduktan sonra doğrusal olmayan etkiler eklenerek modelin gerçek sisteme benzerliği sağlanacaktır. Ayrıca, modelde ana muharebe tankı gövdesi üzerinden silaha etki eden bozucu etkenler de dikkate alınmıştır. Modelleme ve benzetimler için MATLAB/Simulink ortamı kullanılmıştır.

Tank silah sistemi, yan ve yükseliş eksenleri olmak üzere iki ayrı eksenle modellenmiştir. Eksenlerin birbirlerine etkisi ihmal edilebilecek seviyede olduğu için bu çalışma kapsamında eksenler ayrı olarak düşünülmüştür (Purdy, 1998).

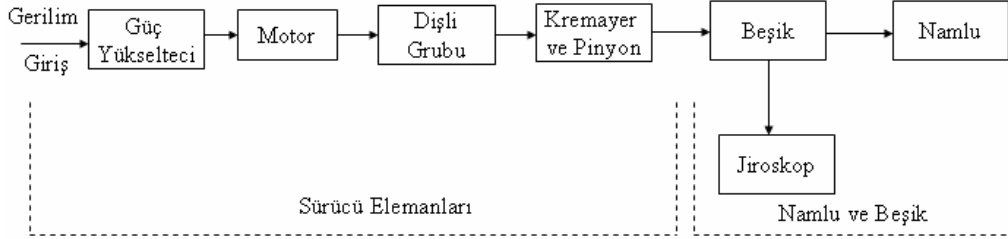
2.2. Yükseliş Ekseni

Bu bölümde, bir ana muharebe tankının yükseliş eksenine ait modelleme ve benzetimler bulunmaktadır. Yükseliş eksenine ait doğrusal bir model oluşturulduktan sonra doğrusal olmayan etkiler ve tank gövdesinden gelen bozucu etkiler modele eklenmiştir. Elektrik sürücülü bir tank sisteminin yükseliş eksenine ait yapı Şekil 2.1'de verilmiştir.

Tankın namlusu ve beşiği muyluya bağlı bulunmaktadır. Namlu ve beşik, yükseliş ekseninde muylu etrafında kuleye göre 20° yükseliş ve 10° alçalış alabilecek şekilde açısal hareket yapabilmektedir. Yükseliş eksen sürücüsü (motor ve dişli grubu) beşiğe Kremayer ve Pinyon yapısı ile bağlıdır. Yükseliş eksen sürücüsüne ait blok şema Şekil 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.1 Ana muharebe tankı yükseliş eksenini yapısı

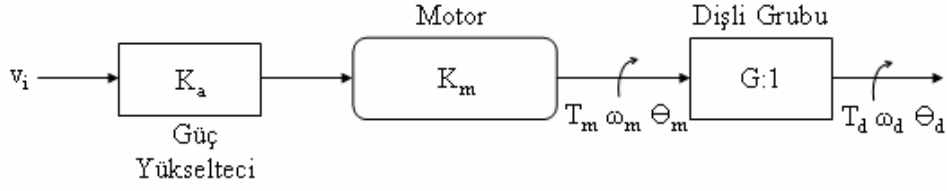


Şekil 2.2 Yükseliş eksenini blok şeması

Yükseliş eksenini girişi olarak güç yükselticine gerilim uygulanır. Güç yükseltici uygulanan gerilime orantılı olarak akım üretir ve motoru besler. Servo motor akıma orantılı olarak bir dönü hareketi oluşturur. Oluşturulan dönü hareketi dişli grubu ile Kremayer ve Pinyon yapısına iletilerek doğrusal bir harekete çevrilir. Oluşturulan doğrusal hareket beşiğe iletilerek namlunun muylu etrafında açısal hareket yapmasını sağlar. Silahın yükseliş eksenindeki hızı, muylu bölgesinde namluya bağlı bulunan bir jiroskop ile ölçülür. Tank hareket halinde iken yoldan gelen yükseliş eksenindeki bozucu açısal etkiler tank kulesine yerleştirilen bir jiroskop ile ölçülür.

2.2.1. Yükseliş Eksenini Doğrusal Modelinin Elde Edilmesi

Sistemin, verilen bir isteğe tepkisi ve yoldan gelen bozucu etkilere tepkisi aşağıda detaylı olarak incelenmiştir. Güç yükselticine verilen istekten dişli grubuna kadar olan kısım Şekil 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.3 Yükseliş eksenli blok şema-1

Verilen v_i giriş gerilimine orantılı olarak K_a kazancına sahip güç yükseltici tarafından akım üretilir. Servo motoru verilen akıma orantılı olarak dönü hareketi oluşturur. Servo motor kazancı K_m olarak alındığında üretilen dönü hareketine ait eşitlik Eş. 2.1'deki gibi elde edilir.

$$T_m = K_a K_m v_i \quad (2.1)$$

T_m : Servo motor tarafından üretilen dönü kuvveti (torque)

K_a : Güç yükseltici kazancı

K_m : Servo motor kazancı

v_i : Giriş gerilimi

Servo motor tarafından üretilen dönü hareketi dişli grubundan geçirilir. Dişli grubu oranı $G:1$ olarak verilmiştir. Buna göre dişli grubu çıkışındaki dönü kuvveti ve açısal hız ile motorun çıkışındaki dönü kuvveti ve açısal hız arasındaki bağıntılar Eş. 2.2, Eş. 2.3 ve Eş. 2.4'te verilmiştir.

$$\theta_m = G \theta_d \quad (2.2)$$

$$\omega_m = G \omega_d \quad (2.3)$$

$$T_d = G T_m = G K_a K_m v_i \quad (2.4)$$

T_d : Dişli grubu çıkışındaki dönü kuvveti

G : Dişli grubu oranı

θ_m : Servo motor açısal konumu

θ_d : Dişli grubu açısal konumu

ω_m : Servo motor açısal hızı

ω_d : Dişli grubu açısal hızı

Motorun dönü kütlesi (inertia) I_m olduğunda, dişli grubu çıkışına göre motorun dönü kütlesi

$$I_d = G^2 I_m \quad (2.5)$$

$$\theta_g = \frac{k_d X_{tp} R_p T_d}{s^4 I_d I_g + s^3 (c_d I_g + c_g I_d) + s^2 (k_d I_g R_p^2 + k_d I_d X_{tp}^2 + c_d c_g) + s (c_d k_d X_{tp}^2 + c_g k_d R_p^2)} + \frac{s^3 I_d c_g + s^2 (k_d I_d X_{tp}^2 + c_d c_g) + s (c_d k_d X_{tp}^2 + c_g k_d R_p^2)}{s^4 I_d I_g + s^3 (c_d I_g + c_g I_d) + s^2 (k_d I_g R_p^2 + k_d I_d X_{tp}^2 + c_d c_g) + s (c_d k_d X_{tp}^2 + c_g k_d R_p^2)} \theta_h \quad (2.13)$$

şeklinde elde edilir. T_d yerine, $T_d = GK_a K_m v_i$, $\dot{\theta}_g = \omega_g$ ve $\dot{\theta}_h = \omega_h$ olarak aldığımızda silahın açısız hızının giriş gerilimine ve bozucu açısız hıza bağılı eşitliği aşağıdaki gibi olur.

$$\omega_g = \frac{k_d X_{tp} R_p G K_a K_m}{s^3 I_d I_g + s^2 (c_d I_g + c_g I_d) + s (k_d I_g R_p^2 + k_d I_d X_{tp}^2 + c_d c_g) + (c_d k_d X_{tp}^2 + c_g k_d R_p^2)} v_i + \frac{s^2 I_d c_g + s (k_d I_d X_{tp}^2 + c_d c_g) + (c_d k_d X_{tp}^2 + c_g k_d R_p^2)}{s^3 I_d I_g + s^2 (c_d I_g + c_g I_d) + s (k_d I_g R_p^2 + k_d I_d X_{tp}^2 + c_d c_g) + (c_d k_d X_{tp}^2 + c_g k_d R_p^2)} \omega_h \quad (2.14)$$

ω_g : Silahın açısız hızı

ω_h : Bozucu açısız hız

v_i : Giriş gerilimi

Eş 2.14 silahın yükseliş eksenine ait doğrusal modeli oluşturmaktadır. Örnek bir tank yükseliş eksenine ait veriler Çizelge 2.1'de verilmektedir (Purdy, 1991). Bu çalışma kapsamındaki analizlerde bu parametreler kullanılacaktır. Eş. 2.14'te Çizelge 2.1'deki değerleri koyduğumuzda silahın doğrusal modeli aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\omega_g = \frac{98.2}{s^3 + 25.3 s^2 + 308.2 s + 1599.5} v_i + \frac{0.27(s^2 + 250.0 s + 5865.6)}{s^3 + 25.3 s^2 + 308.2 s + 1599.5} \omega_h \quad (2.15)$$

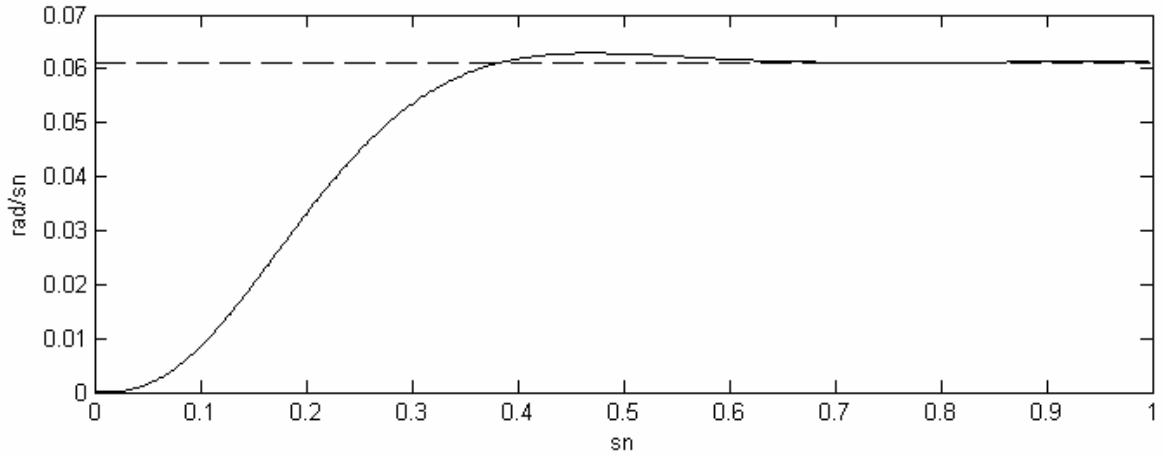
Yükseliş eksenini matematiksel modelinin kutupları $s_1 = -10.4288$ ve $s_{2,3} = -7.4220 \pm j9.9143$ şeklindedir. Modelin kutupları s-düzleminde sol yarı alanda olduğu için sistem kararlı bir yapıya sahiptir. Sistem modelinin giriş gerilimine bağılı kısmına ait sıfır bulunmamaktadır. Sistem matematiksel modelinin bozucu açısız hıza karşılık gelen kısmına ait sıfırlar $z_1 = -223.7927$ ve $z_2 = -26.2073$ 'dedir.

Sistemin doğrusal modelinin basamak tepkisine ait grafikler Şekil 2.6 ve Şekil 2.7'de verilmiştir. Giriş gerilimi olarak $v_i = 1$ V ve bozucu etken olarak $\omega_h = 1$ rad/sn

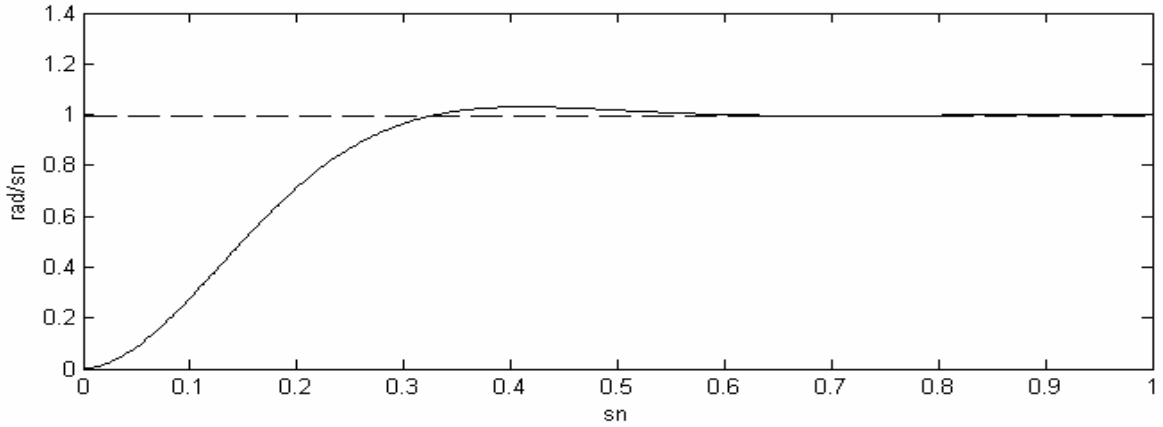
uygulanmıştır. Şekillerden görüldüğü üzere her iki tepkide de çok az aşma vardır ve yaklaşık 0.6 sn'de durgun durum değerlerine ulaşılmıştır.

Çizelge 2.1 Tankın yükseliş eksenine ait parametreler

$K_a K_m$ (Güç yükseltici ve motor kazancı)	6.0 Nm/v
X_{tp} (Kremayer ile muylu arasındaki uzaklık)	0.75 m
R_p (Pinyon dişli yarıçapı)	0.04 m
I_m (Motor dönü kütlesi)	0.01 kgm ²
I_g (Silah dönü kütlesi)	5500 kgm ²
c_g (Silah akışkan sürtünme katsayısı)	1500 Nms/rad
c_d (Sürücü akışkan sürtünme katsayısı)	100 Nms/rad
G (Dişli oranı)	20:1
k_d (Esneklik katsayısı)	6×10^5 Nm/rad



Şekil 2.6 Yükseliş eksenini hız isteği basamak tepkisi



Şekil 2.7 Yükseliş eksenini bozucu etki basamak tepkisi

2.2.2. Yükseliş Ekseninde Doğrusal Olmayan Etkiler ve Bu Etkilerin Modele Katılması

Bölüm 2.2.1'de elde edilen yükseliş eksenini doğrusal modelinin gerçeğe yakın olması için doğrusal olmayan etkilerin modele eklenmesi gerekir. Bu bölümde tank yükseliş eksenine ait doğrusal olmayan etkiler incelenecektir.

En Büyük İvme, En Büyük Hız ve Motor Doymu:

Silahın istenilen hıza ulaşması için motorun yeterli dönü kuvvetini sağlaması gerekmektedir. Tank sistemlerinde kullanılan elektrik motorlarının sağladığı en büyük dönü kuvveti 50-60 Nm civarındadır. Motorun sağlayabildiği dönü kuvveti sınırlandırıldığı için silahın ulaşabildiği en büyük hız ve ivme değerleri sınırlanmaktadır. Bu çalışmada kullanılan motorun gücü ve sağlayabildiği en büyük dönü kuvveti aşağıdaki gibi alınmıştır.

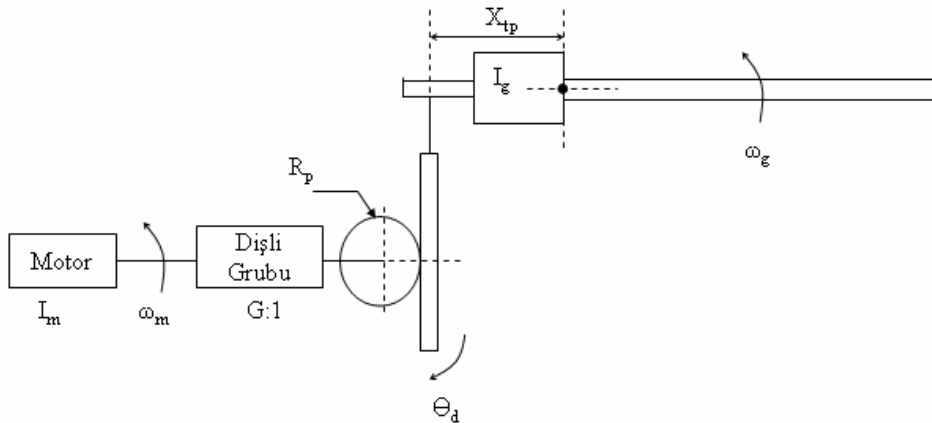
$$P = 20\text{kW}$$

$$T = 50\text{Nm}$$

Bu değerlere göre motorun ulaşabildiği en büyük açısal hız,

$$\omega_{m,max} = P/T = 20\text{kW} / 50\text{Nm} = 400\text{rad/s} = \sim 3820 \text{ tur/dk}$$

olur. (Bishop, 2002) Bu durumda silahın ulaşabildiği en büyük açısal hızı bulmak için, silahın hızı ile motorun hızı arasındaki oranı bulmak gerekmektedir. Silahın hızı ile motorun hızı arasındaki yaklaşık oranı bulmak için Şekil 2.8'deki basit modeli düşünelim.



Şekil 2.8 Motor ile silah arasındaki oran

Motor ile silah arasındaki oran

$$N = \frac{GX_{tp}}{R_p} = \frac{20 \cdot 0.75}{1 \cdot 0.04} = 375$$

olur. Buna göre

$$\omega_m = N\omega_g$$

ise

$$\omega_{g, \max} = \frac{\omega_{m, \max}}{N} = \frac{400}{375} = 1.07 \text{ rad/s}$$

şeklinde olur. Yukarıdaki modele göre motorun dönü kuvveti

$$T_m = \frac{\alpha_g(I_g + N^2I_m)}{N}$$

olur (Bishop, 2002). Eşitlikteki α_g silahın açısal ivmesini göstermektedir. Buna göre silahın ulaşabildiği en büyük ivme

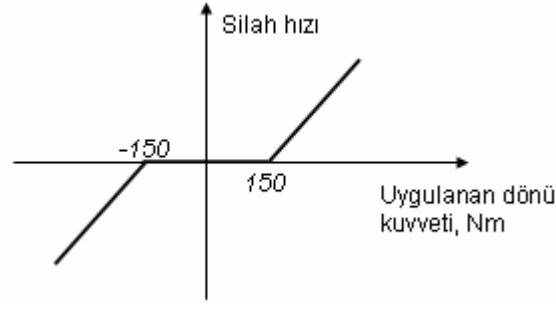
$$\alpha_{g, \max} = \frac{NT_m}{(I_g + N^2I_m)} = 2.72 \text{ rad/s}^2$$

olur. Motorun sağlayacağı dönü kuvveti güç yükseltecine uygulanan giriş gerilimi ile orantılı olacaktır. Güç yükseltecine giriş olarak uygulanan gerilim $-10V \leq v_i \leq 10V$ arasındadır. En büyük gerilim (10V) uygulandığında motor en büyük dönü kuvvetini sağlayacaktır. Buna göre motorun sağlayabildiği en büyük dönü kuvvetini ve dolayısıyla silahın hızını ve ivmesini sınırlamak için modelde giriş gerilimini sınırlamak gerekmektedir. Giriş gerilimi -10V ve 10V arasında bir değer alacak şekilde sınırlandırılacaktır: -10V'un altında bir değer geldiğinde giriş gerilimi -10V'a, 10V'un üzerinde bir gerilim uygulandığında 10V'a sınırlandırılacaktır.

Statik Sürtünme:

Yükseliş ekseninde silah muylu etrafında hareket etmektedir. Muylu ile silah arasında silahın hareketinden dolayı meydana gelen akışkan sürtünme haricinde statik bir sürtünme de bulunmaktadır. Silaha uygulanan dönü kuvveti bu sürtünmeyi yenmediği takdirde silahta herhangi bir hareket oluşmayacaktır. Silaha hareket verebilmek için statik sürtünmenin yenilmesi gerekir. Elde edilen sistem modelinin gerçeğe yakın olabilmesi için statik sürtünmenin modele eklenmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada $T_s = 150Nm$ 'lik statik sürtünme kullanılmıştır. Silaha uygulanan dönü kuvveti $150Nm$ 'yi aşmadığı takdirde silahta herhangi bir hareketlenme olmayacaktır. Statik sürtünmeden dolayı uygulanan dönü kuvvetinin silahı hareket ettiremediği ölü bölge Şekil 2.9'da verilmiştir.



Şekil 2.9 Uygulanan dönü kuvveti-silah hızı ilişkisi

Boşluk:

Sistemde kullanılan dişli gruplarında hareketteki yön değişimi sırasında dişliler arasındaki boşluktan dolayı verilen hareket bir süre diğer dişliye aktarılamamaktadır. Bu çalışmada motor ile pinyon dişlisi arasında bulunan dişli grubunda 0.5mrad'lık boşluk meydana geldiği kabul edilmiştir. Hareket yönü değişimi sırasında 0.5mrad'a kadar hareket diğer dişliye aktarılmayacak ve dolayısıyla bu esnada motorun ürettiği dönü hareketi silaha iletilmeyecektir.

En Küçük Hız:

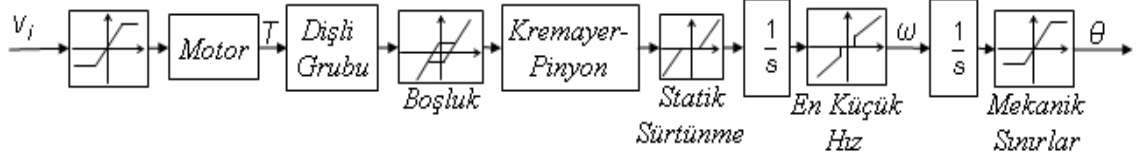
Silah yükseliş ekseninde belli bir hızın altında hareket ettirilememektedir. Silaha verilen en küçük yönlendirme hareketi en küçük hız olarak adlandırılmaktadır. Bu çalışmada silaha verilebilecek en küçük yönlendirme hareketinin 0.3 mrad/sn olduğu varsayılmıştır.

Mekanik Sınırlar:

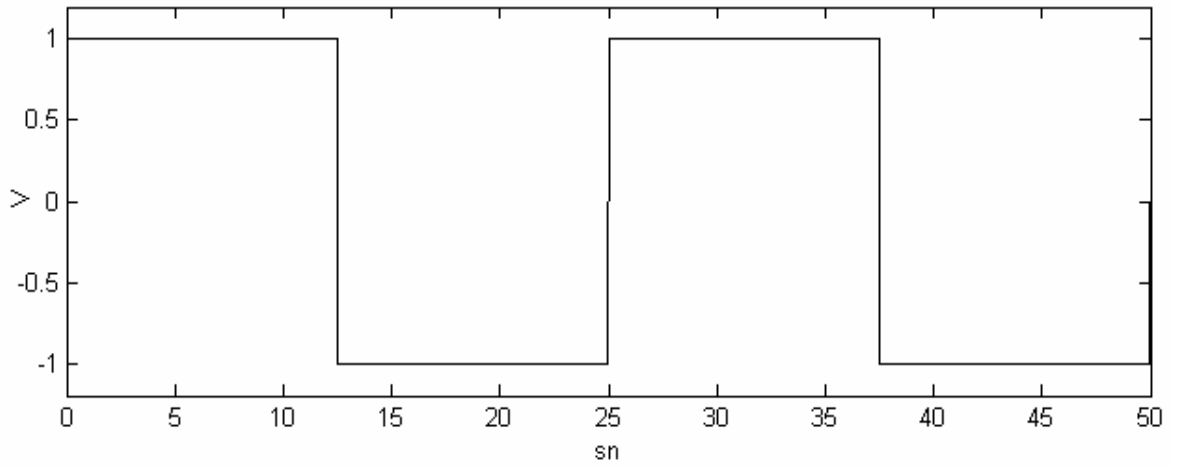
Yükseliş ekseninde tank silahının belirli açılara kadar yükseliş ve alçalış yapabileceği mekanik sınırlar bulunmaktadır. Silah, yere paralel konumuna göre 20° yükselip, 10° alçalabilmektedir. Silah bu açılara geldiğinde bu sınırların dışına çıkması için istek gelse bile mekanik sınırlardan dolayı bu istek gerçekleşmeyecektir. Bu çalışma kapsamında doğrusal olmayan bu etki, silahın sınırların dışına çıkması için istek geldiğinde bu isteğin dikkate alınmayıp silah hızının sıfır olarak kullanılması şeklinde, doğrusal modele uygulanmıştır. Silah bu sınırlara geldiğinde silah hızı sıfır olacak ve ancak aksi istikamette bir istek geldiğinde silah hareket ettirilebilecektir.

Doğrusal olmayan etkilerin yükseliş eksenine doğrusal modeline eklendiği blok şema Şekil 2.10'da verilmiştir. Doğrusal olmayan sistemin giriş gerilimine tepkisini gösteren grafikler aşağıda verilmiştir. Şekil 2.11'de doğrusal olmayan yükseliş

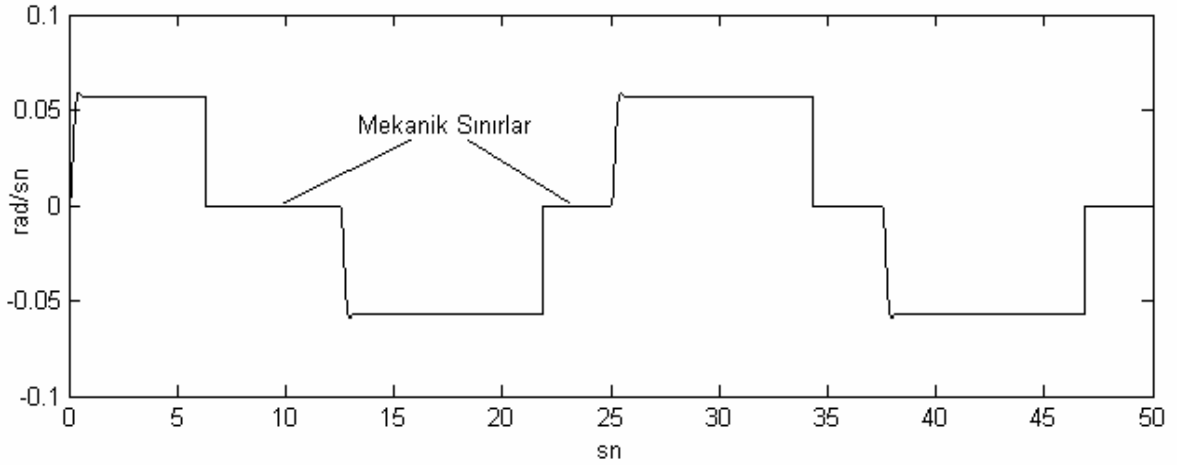
ekseni modeline uygulanan giriş gerilimi, Şekil 2.12 ve Şekil 2.13'te uygulanan giriş gerilimi altında silahın açılma hızını ve açılma konumunu gösteren grafikler bulunmaktadır.



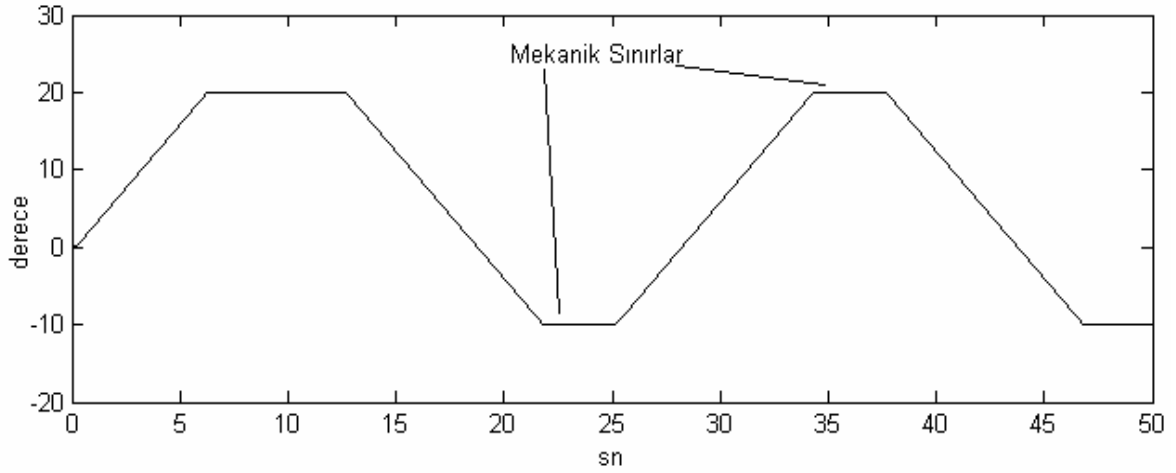
Şekil 2.10 Yükseliş eksenli doğrusal olmayan sistem - blok şema



Şekil 2.11 Doğrusal olmayan modele uygulanan giriş gerilimi



Şekil 2.12 Doğrusal olmayan modelin uygulanan giriş gerilimine tepkisi (silah hızı)



Şekil 2.13 Doğrusal olmayan modelin uygulanan giriş gerilimine tepkisi (silahın açısı)

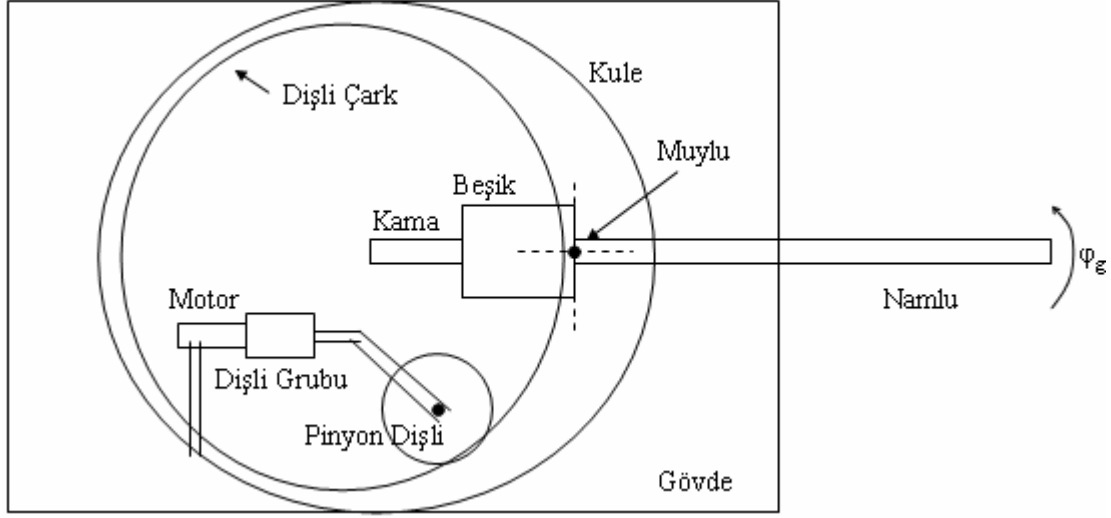
Doğrusal olmayan model tepkisine baktığımızda, statik sürtünmeden dolayı silah açısal hızı seviyesi doğrusal model tepkisine göre daha düşük seviyelerdedir. 1V'luk giriş geriliminde silah hızı doğrusal modelde 0.0614 rad/sn'lik hıza ulaşırken doğrusal olmayan modelde 0.0573 rad/sn'lik hıza ulaşmaktadır. Yükseliş ekseninde silahın mekanik sınırları olduğu için silah sınırlara dayandığı zaman aynı yönlü bir gerilim uygulansa bile silah açısal hızı sıfır olmaktadır. Ancak diğer yöne doğru bir gerilim uygulandığı zaman silah hareket etmektedir. Silahı diğer yöne doğru hareket ettirecek bir gerilim uygulandığı zaman boşluktan dolayı kısa bir süre silahta hareket olmamaktadır. Bu açılar küçük olduğu için yukarıdaki grafiklerde görülmemektedir.

2.3. Yan Eksen

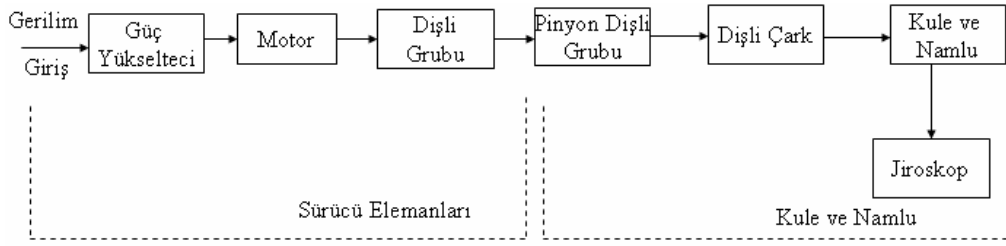
Bu bölümde, bir ana muharebe tankının yan eksenine ait modellemeler ve benzetimler bulunmaktadır. Tankın yan eksenine ait doğrusal bir model oluşturulduktan sonra doğrusal olmayan etkiler ve tank gövdesinden gelen bozucu etkiler modele eklenmiştir. Elektrik sürücülü bir tank sisteminin yan eksenine ait yapı Şekil 2.14'te verilmiştir.

Tankın namlusu yükseliş ekseninde kuleye göre açısal hareket yapmakta iken, yan eksende tank kulesi ile birlikte hareket etmektedir. Tank kulesi yan eksende gövdeye göre 360° hareket edebilmektedir. φ_g silahın yan eksende açısını göstermektedir. Yan eksen sürücüsüne (motor ve dişli grubu) ait hareketler pinyon dişli grubu ile dişli çarka iletilmektedir. Kule dişli çarktan aldığı hareketle yan

eksende hareket etmektedir. Namlu kule ile birlikte yan eksende hareket etmektedir. Yan eksen blok şeması Şekil 2.15'te verilmiştir.



Şekil 2.14 Ana muharebe tankı yan eksen yapısı (üstten görünüş)

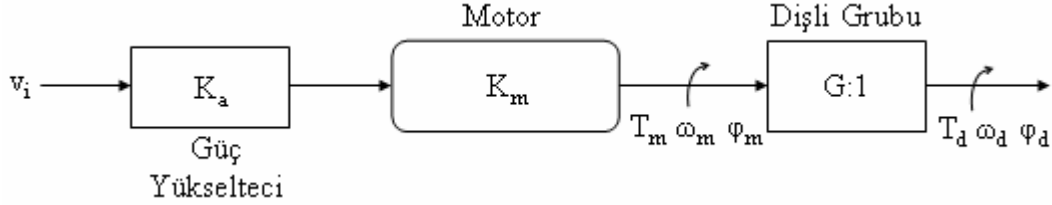


Şekil 2.15 Yan eksen blok şeması

Yan eksen girişi olarak güç yükselticine gerilim uygulanır. Güç yükseltici, uygulanan gerileme orantılı olarak akım üretir ve motoru besler. Servo motor akıma orantılı olarak dönü hareketi oluşturur. Oluşturulan dönü hareketi dişli grubu ile pinyon dişli grubuna iletilir. Pinyon dişli grubu hareketini dişli çarka ileterek kulenin yan eksende hareket etmesini sağlar. Namlu, kuleye mıyılıda bağlı bulunmakta ve yan eksende kule ile birlikte hareket etmektedir. Silahın yan eksendeki hareketi beşikte bulunan bir jiroskop ile ölçülür. Tank hareket halinde iken yoldan gelen yan eksendeki bozucu açısal etkiler tank gövdesine yerleştirilen bir jiroskop ile ölçülür.

2.3.1. Yan Eksen Doğrusal Modelinin Elde Edilmesi

Tankın yan eksenine verilen bir isteğe ve yoldan gelen bozucu etkilere tepkisi aşağıda detaylı olarak incelenmiştir. Uygulanan giriş geriliminin dişli grubuna iletiildiği kısmı içeren blok şema Şekil 2.16'da verilmiştir.



Şekil 2.16 Yan eksen blok şeması-1

Uygulanan v_i giriş gerilimine orantılı olarak K_a kazancına sahip güç yükseltici tarafından akım üretilir. Servo motoru verilen akıma orantılı olarak dönü hareketi oluşturur. Servo motorunun kazancı K_m olarak alındığında servo motoru tarafından üretilen dönü hareketine ait eşitlik Eş. 2.16'daki gibi olur.

$$T_m = K_a K_m v_i \quad (2.16)$$

T_m : Dönü kuvveti

K_a : Güç yükseltici kazancı

K_m : Servo motor kazancı

v_i : Giriş gerilimi

Servo motoru tarafından üretilen dönü hareketi dişli grubundan geçirilir. Dişli grubu oranı G olarak alındığında dişli grubu çıkışındaki dönü kuvveti ve açısal hız ile motorun çıkışındaki dönü kuvveti ve açısal hız arasındaki bağıntılar aşağıdaki gibi olur.

$$\varphi_m = G\varphi_d \quad (2.17)$$

$$\omega_m = G\omega_d \quad (2.18)$$

$$T_d = GT_m = GK_a K_m v_i \quad (2.19)$$

T_d : Dişli grubu çıkışındaki dönü kuvveti

G : Dişli grubu oranı

φ_m : Motor açısal konumu

φ_d : Dişli grubu çıkışı açısal konumu

ω_m : Motor açısal hızı

ω_d : Dişli grubu çıkışı açısal hızı

elde edilir. Bu eşitlikteki I_g kulenin dönü kütlesidir. Yukarıdaki eşitlikleri sıklık tanım alanında yazdığımızda

$$s^2 I_d \varphi_d = T_d - s c_d \varphi_d - T_1 \quad (2.24)$$

$$T_2 = N T_1 = k_g \left(\frac{\varphi_d}{N} + \varphi_h - \varphi_g \right) \quad (2.25)$$

$$s^2 I_g \varphi_g + s c_g (\varphi_g - \varphi_h) - k_g \left(\frac{\varphi_d}{N} + \varphi_h - \varphi_g \right) = 0 \quad (2.26)$$

şeklinde elde edilir. Eş.2.24 ve Eş. 2.25 kullanılarak yeniden düzenleme yapıldığında φ_d

$$\varphi_d = \frac{N^2 T_d + N k_g \varphi_g - N k_g \varphi_h}{s^2 N^2 I_d + s N^2 c_d + k_g} \quad (2.27)$$

şeklinde elde edilir. Elde edilen φ_d Eş. 2.26'da yerine yazıldığında ve yeniden düzenlendiğinde φ_g

$$\varphi_g = \frac{N k_g T_d}{s^4 N^2 I_g I_d + s^3 N^2 (c_d I_g + c_g I_d) + s^2 (k_g I_g + N^2 c_d c_g + N^2 I_d k_g) + s k_g (c_g + N^2 c_d)} + \frac{s^3 N^2 I_d c_g + s^2 N^2 (c_d c_g + k_g I_d) + s k_g (c_g + N^2 c_d)}{s^4 N^2 I_g I_d + s^3 N^2 (c_d I_g + c_g I_d) + s^2 (k_g I_g + N^2 c_d c_g + N^2 I_d k_g) + s k_g (c_g + N^2 c_d)} \theta_h \quad (2.28)$$

olarak elde edilir. Eş. 2.28'deki T_d yerine $T_d = G K_a K_m v_i$ ve $\dot{\varphi}_g = \omega_g$ olarak alındığında silahın açısız hızının giriş gerilimine ve bozucu açısız hıza bağlı eşitliği aşağıdaki gibi olur.

$$\omega_g = \frac{G K_a K_m N k_g}{s^3 N^2 I_g I_d + s^2 N^2 (c_d I_g + c_g I_d) + s (k_g I_g + N^2 c_d c_g + N^2 I_d k_g) + k_g (c_g + N^2 c_d)} v_i + \frac{s^2 N^2 I_d c_g + s N^2 (c_d c_g + k_g I_d) + k_g (c_g + N^2 c_d)}{s^3 N^2 I_g I_d + s^2 N^2 (c_d I_g + c_g I_d) + s (k_g I_g + N^2 c_d c_g + N^2 I_d k_g) + k_g (c_g + N^2 c_d)} \omega_h \quad (2.29)$$

ω_h : Bozucu açısız hız

ω_g : Kule açısız hız

Eş. 2.29, silahın yan eksenine ait doğrusal modeli oluşturmaktadır. Tankın yan eksenine ait parametreler Çizelge 2.2'de verilmiştir. Çizelge 2.2'deki değerleri Eş.

2.29'da yerine yazdığımızda yan eksen kule açışal hızının giriş gerilimi ve bozucu açışal hıza bağılı matematiksel modeli Eş. 2.30'daki gibi elde edilir.

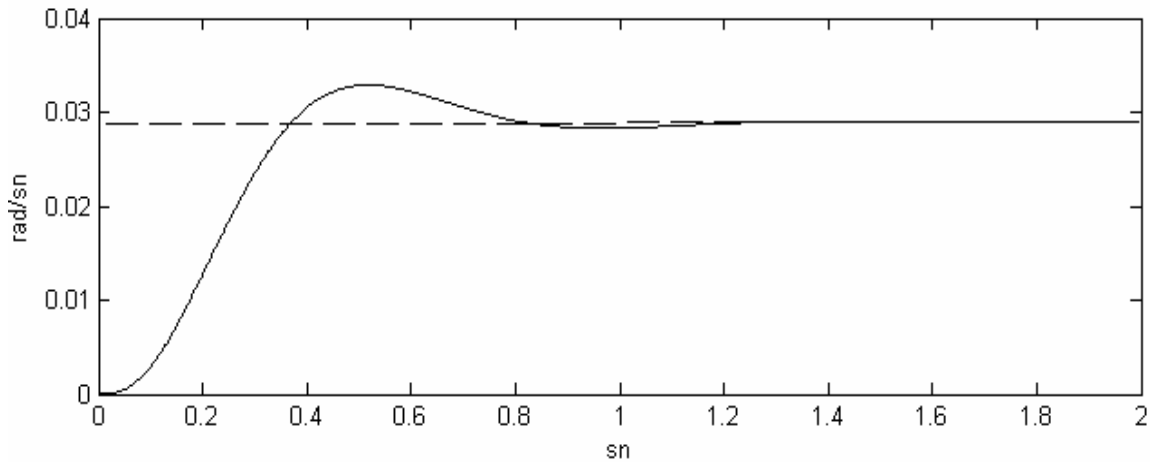
$$\omega_g = \frac{32.6}{s^3 + 25.3 s^2 + 206.2 s + 1127.7} v_i + \frac{0.26(s^2 + 191.7 s + 4322.9)}{s^3 + 25.3 s^2 + 206.2 s + 1127.7} \omega_h \quad (2.30)$$

Yan eksen doğrusal modelinin kutupları $s_1 = -17.04$ ve $s_{2,3} = -4.11 \pm 7.02i$ şeklinde elde edilmektedir. Modelin kökleri s -düzleminin sol yarı alanında olduğu için sistem kararlı bir yapıya sahiptir. Sistem modelinin giriş gerilimine bağılı kısmına ait sıfır bulunmamaktadır. Sistem modelinin bozucu açışal hıza bağılı kısmına ait sıfırlar $z_1 = -165.56$ ve $z_2 = -26.11$ 'de bulunmaktadır.

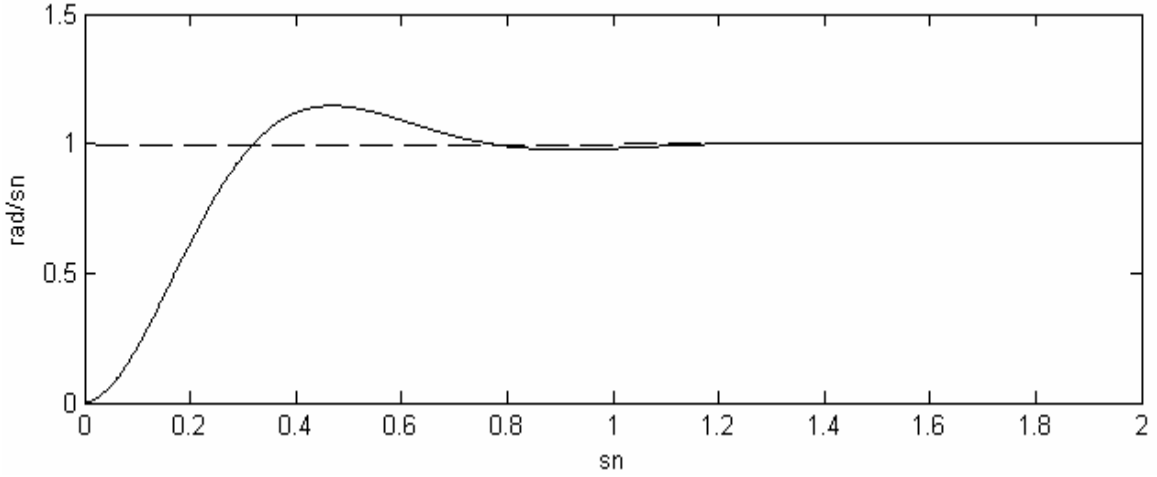
Çizelge 2.2 Yan eksen parametreleri

$K_a K_m$ (Güç yükseltici ve motor kazancı)	6.0 Nm/v
I_m (Motor dönü kütlesi)	0.01 kgm ²
I_g (Silah dönü kütlesi)	23000 kgm ²
c_g (Silah akışkan sürtünme katsayısı)	6000 Nms/rad
c_d (Sürücü akışkan sürtünme katsayısı)	100 Nms/rad
G (Dişli oranı)	20:1
N (Pinyon dişli-dişli çark oranı)	40:1
k_g (Esneklik katsayısı)	1×10^6 Nm/rad

Sistemin doğrusal modelinin basamak tepkisine ait grafikler Şekil 2.18 ve Şekil 2.19'da verilmiştir. Giriş gerilimi olarak $v_i = 1$ V ve bozucu etken olarak $\omega_h = 1$ rad/sn uygulanmıştır. Basamak tepkisinde yaklaşık %13 aşma meydana gelmiş ve yaklaşık 1.1 sn'de durgun durum değerlerine ulaşılmıştır.



Şekil 2.18 Yan eksen hız isteğı basamak tepkisi



Şekil 2.19 Yan eksen bozucu etki basamak tepkisi

2.3.2. Yan Eksende Doğrusal Olmayan Etkiler ve Bunların Modele Katılması

Bölüm 2.3.1’de elde edilen yan eksen doğrusal modelinin gerçeğe yakın olması için doğrusal olmayan etkilerin modele eklenmesi gerekmektedir. Aşağıdaki kısımda tankın yan eksenindeki doğrusal olmayan etkiler bulunmaktadır.

En Büyük İvme, En Büyük Hız ve Motor Doyumu:

Silahın istenilen hıza ulaşması için motorun yeterli dönü kuvvetini sağlaması gerekmektedir. Tank sistemlerinde kullanılan elektrik motorlarının sağladığı en büyük dönü kuvveti 50-60Nm civarındadır. Motorun sağlayabildiği dönü kuvveti sınırlandırıldığı için silahın ulaşabildiği en büyük hız ve ivme değerleri sınırlanmaktadır. Bu çalışmada kullanılan motorun gücü ve sağlayabildiği en büyük dönü kuvveti aşağıdaki gibi alınmıştır.

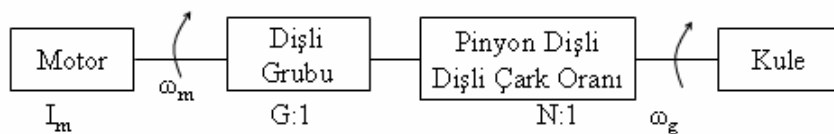
$$P = 20kW$$

$$T = 50Nm$$

Bu değerlere göre motorun ulaşabildiği en büyük açısal hız

$$\omega_{m,max} = P/T = 20kW / 50Nm = 400rad/s = \sim 3820 \text{ tur/dk}$$

olur. (Bishop, 2002) Bu durumda kulenin ulaşabildiği en büyük açısal hızı bulmak için, kulenin hızı ile motorun hızı arasındaki oranı bulmak gerekmektedir. Silahın hızı ile motorun hızı arasındaki yaklaşık oranı bulmak için Şekil 2.20’deki basit modeli düşünelim.



Şekil 2.20 Motor ile kule arasındaki oran

Yukarıdaki modele göre motor ile kule arasındaki oran $M = N \cdot G = 20 \cdot 40 = 800$ olur.

$$\omega_m = M\omega_g$$

$$\omega_{g, \max} = \frac{\omega_{m, \max}}{M} = \frac{400}{800} = 0.5 \text{ rad/s}$$

olur. Motorun dönü kuvveti

$$T_m = \alpha_g(I_g + M^2 I_m)/M$$

olur. (Bishop, 2002) Buna göre silahın ulaşabildiği en büyük ivme

$$\alpha_{g, \max} = \frac{NT_m}{(I_g + N^2 I_m)} = 1.36 \text{ rad/s}^2$$

olur. Motorun sağlayacağı dönü kuvveti güç yükselteciye uygulanan giriş gerilimi ile orantılı olacaktır. Güç yükselteciye giriş olarak uygulanan gerilim yükseliş ekseninde olduğu gibi $-10V \leq v_i \leq 10V$ arasında olacaktır.

Statik Sürtünme:

Yan ekseninde dişli çark ile kule arasında kulenin hareketinden dolayı meydana gelen akışkan sürtünme haricinde statik bir sürtünme de bulunmaktadır. Kuleye uygulanan dönü kuvveti bu sürtünmeyi yenmediği takdirde kulede herhangi bir hareket oluşmayacaktır. Elde edilen sistem modelinin gerçeğe yakın olabilmesi için sürtünmenin modele eklenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada statik sürtünme $T_s = 400\text{Nm}$ olarak kullanılmıştır. Kuleye uygulanan dönü kuvveti 400Nm 'yi aşmadığı takdirde kulede herhangi bir hareketlenme olmayacaktır.

Boşluk:

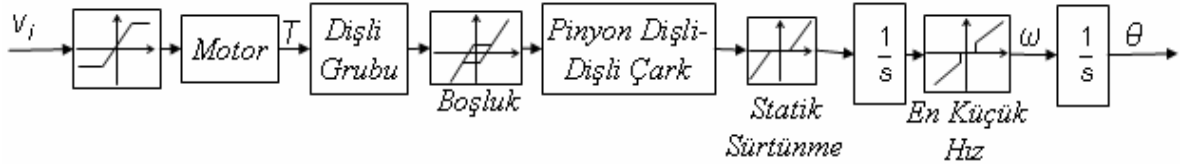
Sistemde kullanılan dişli gruplarında hareketteki yön değişimi sırasında dişliler arasındaki boşluktan dolayı verilen hareket bir süre diğer dişliye aktarılamamaktadır. Bu çalışmada motor ile pinyon dişlisi arasındaki dişli grubunda ve pinyon dişli ile dişli çark arasında boşluk meydana gelebilmektedir. Dişli gruplarındaki hareket yönü değişimi sırasında meydana gelen doğrusal olmayan bu etkinin modele uygulanması gerekmektedir. Bu çalışmada dişli gruplarında 0.5mrad 'lık boşluk meydana geldiği kabul edilmiştir.

En Küçük Hız:

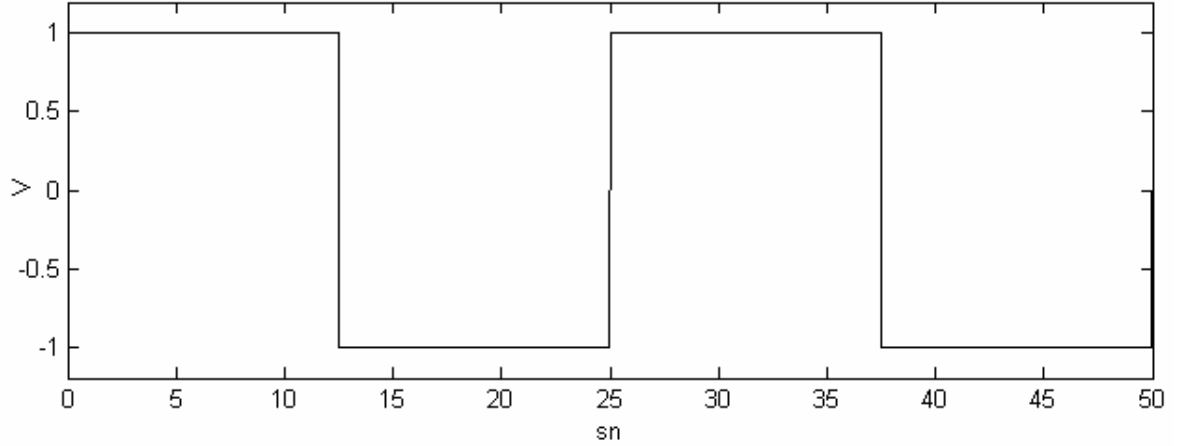
Kule yan ekseninde belli bir hızın altında hareket ettirilememektedir. Kuleye yan ekseninde verilen en küçük yönlendirme hareketi en küçük hız olarak

adlandırılmaktadır. Bu çalışmada kuleye verilebilecek en küçük yönlendirme hareketinin 0.5 mrad/s olduğu varsayılmıştır.

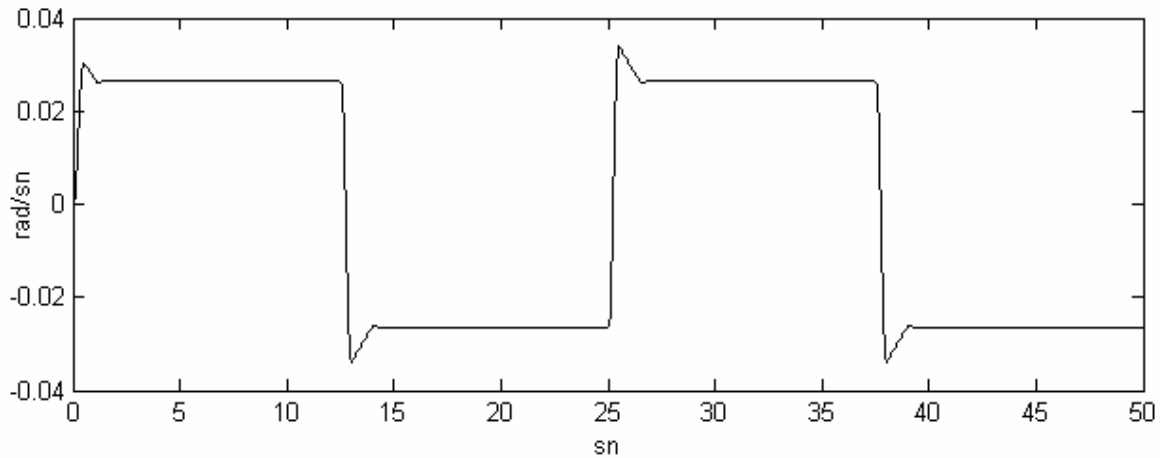
Doğrusal olmayan etkiler yan eksen doğrusal modeline eklendiği zaman elde edilen blok şema Şekil 2.21’de verilmiştir. Doğrusal olmayan sistemin giriş gerilimine tepkisini gösteren grafikler aşağıda verilmiştir. Şekil 2.22’de doğrusal olmayan yan eksen modeline uygulanan giriş gerilimi ve Şekil 2.23’te uygulanan giriş gerilimine silahın tepkisini gösteren grafikler bulunmaktadır.



Şekil 2.21 Yan eksen doğrusal olmayan model – blok şema



Şekil 2.22 Doğrusal olmayan modele uygulanan giriş gerilimi



Şekil 2.23 Doğrusal olmayan modelin giriş gerilimine tepkisi (silah hızı)

Doğrusal olmayan model tepkisine baktığımızda, statik sürtünmeden dolayı silah açısal hızı seviyesi doğrusal model tepkisine göre daha düşük seviyelerdedir. 1V'luk giriş geriliminde silah hızı doğrusal modelde 0.0289 rad/sn'lik hıza ulaşırken doğrusal olmayan olmayan modelde 0.0265 rad/sn'lik hıza ulaşmaktadır. Kuleyi diğer yöne doğru hareket ettirecek bir gerilim uygulandığı zaman boşluktan dolayı kısa bir süre silahta hareket olmamaktadır. Bu açılar küçük olduğu için aşağıdaki grafiklerde görülmemektedir.

3. ÇALIŞMADA KULLANILAN DENETİM YÖNTEMLERİ

3.1. Giriş

Silah denetim sistemleri ile hareketli veya duran bir tanktan, hareketli veya duran bir hedefin ilk atımda vuruş ihtimalini yükseltmek amaçlanır. Bu amaca ulaşabilmek için denetim sisteminin, tank silahının yan ve yükseliş eksenlerinde yapması gereken hareketlerini belirlemesi ve uygulaması gerekir. Denetim sisteminin iyi tasarlanabilmesi için tankın matematiksel modeline ihtiyaç duyulur. Tasarım için kullanılan sistem modeli gerçeğe ne kadar yakınsa tasarlanan denetim sisteminin başarımı da o kadar iyi olacaktır.

Tank silah denetim sistemlerinde, sistem başarımı silah kullanıcısının verdiği yönlenme isteklerinin doğru uygulanması ile ölçülür. Kullanıcının hedef izlemesi veya hedefe yönlenebilmesi için silaha yan ve yükseliş eksenlerinde verdiği hareket isteklerinin en kısa sürede doğru uygulanabilmesi gerekir. Hareketli bir tanka yoldan gelen bozucu etkiler tank gövdesi üzerinden silaha taşınır. Bozucu etkiler silahın hedeften sapmasına neden olur. Bu etkiler giderilmediği takdirde hedefin izlenebilmesi ve atım başarımı azalır. Tank atış denetim sisteminin dışarıdan gelen bozucu etkileri yok ederek silahın istenen hızda hareket etmesini sağlaması gerekir.

Bu bölümde, çalışmada kullanılan denetim yöntemleri ele alınacaktır. Bu çalışma kapsamında uyarlamalı denetim yöntemleri kullanılacaktır. Çeşitli otomatik OTT (Oransal-Türevsel-Tümlevsel) denetim yöntemleri ile SÜGÖNDE (Sürekli Zaman Genelleştirilmiş Öngörü Denetimi) yöntemi incelenecektir. Kullanılan denetim yöntemlerinin bazılarında sistemin 2. dereceden matematiksel modeline ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada, Sürekli Zaman Yineli En Küçük Kareler (SZYEKK) sistem tanıyımı yöntemi kullanılarak sistemin 2.dereceden modeli elde edilmiştir. Ayrıca, bozucu etkilerin yok edilmesinde etkili bir yöntem olan ileri beslemeli denetim de ele alınmıştır. Tank gövdesine ve kulesine yerleştirilen jiroskoplar ile yoldan gelen bozucu etkiler ölçülebilmektedir.

3.2. OTT Denetim

Bu bölümde, OTT denetimin temel algoritması ve temel algoritma üzerinde yapılan bazı değişiklikler kısaca incelenecektir. Endüstride bir çok sistem OTT denetleçler ile denetlenir. OTT denetleçlerin yaygın olarak kullanılmasının sebebi denetimin kolay uygulanabilmesinden kaynaklanmaktadır. OTT denetleçler, tümlevsel terim

sayesinde durgun durum hatalarının yok edilmesi ve türevsel terim sayesinde öngörme gibi önemli özelliklere sahiptir. Birçok uygulamada türevsel terim kullanılmayıp sadece OT (Oransal-Tümlevsel) denetim kullanılmaktadır.

3.2.1. OTT Denetim Temel Algoritma

OTT denetim oransal, tümlevsel ve türevsel olmak üzere üç terimden oluşmaktadır. OTT denetime ait temel algoritma

$$u(t) = K \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(l) dl + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (3.1)$$

şeklindedir. Bu eşitlikte e denetim hatasını göstermektedir. İstenilen çıkış r ve ölçülen çıkış y olarak alındığında, denetim hatası $e=r-y$ olur. Eşitlikteki u denetim değişkenini göstermektedir. Denetim değişkeni oransal, tümlevsel ve türevsel terimler olarak ayrıştırıldığında yukarıdaki eşitlik

$$u(t) = P(t) + I(t) + D(t) \quad (3.2)$$

şeklinde yazılabilir. Burada oransal terim

$$P(t) = Ke(t) \quad (3.3)$$

tümlevsel terim

$$I(t) = \frac{K}{T_i} \int_0^t e(l) dl \quad (3.4)$$

türevsel terim

$$D(t) = KT_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.5)$$

eşitlikleriyle verilir. Bu eşitliklerde denetim parametreleri K , T_i ve T_d sırasıyla oransal kazanç, tümlev zamanı ve türev zamanı olarak adlandırılır. Denetleç sadece oransal terimden oluşuyorsa denetim değişkeni

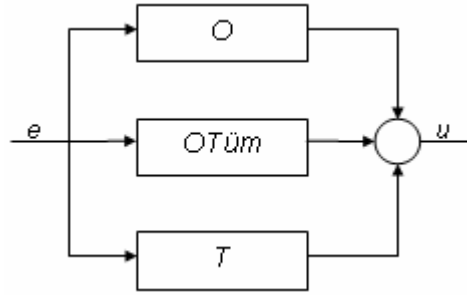
$$u(t) = Ke(t) \quad (3.6)$$

biçiminde olur. Bu durumda denetim değişkeni, denetim hatası e ile doğru orantılıdır. Ancak, sadece oransal terimin kullanıldığı denetimde her zaman durgun durum hatası oluşur (Aström ve Hagglund, 1994). Oransal denetimde oluşan durgun durum hatasının yok edilmesi için oransal terime ek olarak tümlevsel terim kullanılır. Bu durumda denetim değişkeni

$$u(t) = Ke(t) + \frac{K}{T_i} \int_0^e e(l)dl \quad (3.7)$$

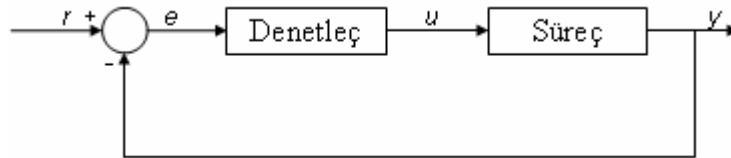
şeklinde olur. Tümlensel terim ile durgun durumda süreç çıkışının istenilen çıkışa eşit olması sağlanır (Aström ve Hagglund, 1994). Endüstrideki bir çok uygulamada bu yapı kullanılır.

Kapalı döngü sistemin kararlılığını artırmak için türevsel terim kullanılabilir. Denetim değişkenindeki bir değişikliğin süreç çıkışında etkisinin gözlenmesi, süreç dinamiklerine bağlı olarak belirli zaman alabilir. Türevsel terim, denetim hatalarının gelecek değerlerinin öngörüsünü yaparak denetimin öngörülmuş süreç çıkışıyla orantılı olmasını sağlar (Aström ve Hagglund, 1994). Temel OTT denetleç yapısı Şekil 3.1'de verilmiştir. Denetim hatası oransal, tümlensel ve türevsel terimlerden geçirilip toplandıktan sonra denetim değişkeni elde edilir. Elde edilen denetim değişkeni sisteme giriş olarak uygulanır.



Şekil 3.1 OTT denetleç yapısı

OTT denetim basit geribeslemeli bir denetleçtir. Denetlecin uygulanmasına ait yapı Şekil 3.2'deki gibidir.



Şekil 3.2 Basit geribeslemeli denetim kapalı döngü yapısı

3.2.2. Temel Algoritma Üzerindeki Bazı Düzeltmeler

Pratik uygulamalarda temel OTT denetleçler, bazı değişiklikler yapılarak kullanılır. Bu bölümde bu değişiklikler incelenecektir.

Türevsel Terimde Düzeltmeler

Temel OTT algoritmasında türevsel terim denetim hatasının türevi ile doğru orantılıdır. Denetim hatası, istenilen çıkış (r) ile süreç çıkışı (y) arasındaki farktır. Denetim uygulamalarında, istenilen çıkış genelde kare dalgadır. Bu durumda, istenilen çıkış değiştiği anda denetim hatasının türevi çok yüksek olup denetim sinyalinin doyuma gitmesine neden olmaktadır. Denetim sinyalindeki anlık büyük değişimler veya denetim sinyalinin çok yüksek değerlere ulaşması eyleyiciye de zarar verebilir. Bundan dolayı türevsel terim sadece süreç çıkışına uygulanır (Aström ve Haggund, 1994). Bu durumda türevsel terim

$$D(t) = -KT_d \frac{dy}{dt} \quad (3.8)$$

şeklinde olur. İstenilen çıkışın türevsel terim üzerindeki etkisi kaldırılarak, istenilen çıkıştaki anlık değişimlerin denetim sinyalini doyuma götürmesi engellenmiş olacaktır.

Süreç çıkışı (y) ölçümünde kullanılan algılayıcılardan dolayı elde edilen süreç çıkışı değerlerinde yüksek sıklıkta gürültüler olabilir. Yüksek sıklıktaki ölçme gürültüleri denetim uygulamalarında, türevsel terimli denetleçler kullanıldığı zaman sorunlara neden olmaktadır. Yüksek sıklıktaki gürültüler, türevleri alınınca sıklıklarıyla orantılı bir şekilde denetim sinyaline etki etmektedir (Aström ve Haggund, 1994). Bu durum türevsel terimin yüksek sıklıklardaki kazancı sınırlandırılarak aşılabilir. Bu da, türevsel terim

$$\frac{T_d}{N} \frac{dD}{dt} + D = -KT_d \frac{dy}{dt} \quad (3.9)$$

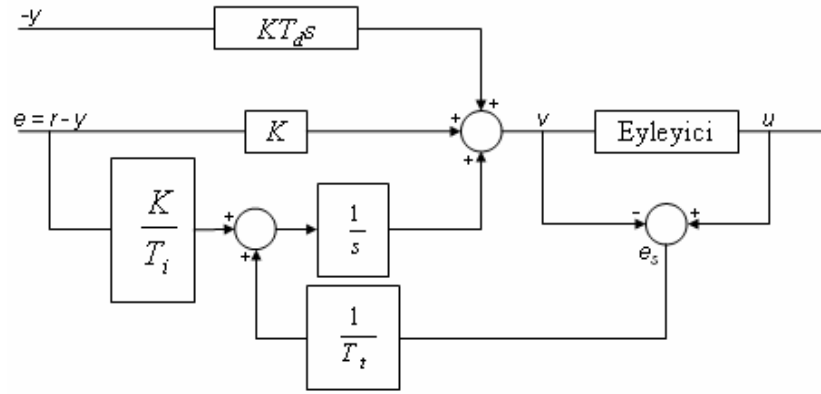
biçiminde alınarak sağlanır. Bu eşitlikten türevsel terim Laplace alanında

$$D(s) = -\frac{sKT_d}{1+s(T_d/N)} Y(s) \quad (3.10)$$

biçiminde elde edilir. Bu eşitlikteki N uysallaştırma çarpanı olarak adlandırılır ve genelde $3 \leq N \leq 10$ aralığında seçilen bir sayıdır (Aström ve Haggund, 1994). Eşitlikten görüldüğü gibi, türevsel terim sistem çıkışının T_d/N zaman sabitli birinci dereceden bir sistemle süzgeçlenmesidir. Bu durumda türevsel terim, düşük sıklıktaki sinyal bileşenleri için türev olarak davranır ve kazancı N ile sınırlandırıp yüksek sıklıktaki ölçme gürültülerinin denetim sinyalinin doyuma götürmesini engeller.

Tümlevsel Yığılım

Gerçek uygulamalarda denetim sinyalinin uygulandığı eyleyicilerin çalışmaları sınırlıdır. Bu çalışma kapsamında denetlenen tank silah sisteminde kullanılan servo motorların dönme hızı ya da üretebileceği dönü kuvveti sınırlıdır. Eyleyicinin sınıra dayanması durumunda süreç çıkışından bağımsız olarak denetim sinyali eyleyici sınırında kalacaktır. Bu da, geribeslemeli kapalı göngü yapının kırılması anlamına gelir. Bu durum tümlevsel terim içeren bir denetim yapısında oluşursa, tümlevsel terim çok yüksek değerlere ulaşır. Buna tümlevsel yığılım denir.



Şekil 3.3 Tümlevsel yığılım önlemeli OTT denetleç

Tümlevsel yığılımı önlemek için tümlevsel yığılımın olduğu durumda, tümlevsel terime gelen hata sinyalinin işareti değiştirilerek tümlevsel terimin büyümesi önlenmelidir. Eyleyici çıkışı ile denetleç çıkışı arasındaki fark, tümlev işleci girişine geribeslenir (Şekil 3.3). Doyum durumu oluşmadığında eyleyici çıkışı ile denetleç çıkışı arasındaki fark sıfır olacağı için denetimde bir etkisi olmayacaktır. Doyum durumu oluştuğunda, geribesleme sinyali, e_s hatasını sıfıra doğru çekmeye çalışacağından, denetim sinyalinin tam olarak doyum sınırında kalması için tümlev işlecinin çıkışı uygun bir değerde tutulacaktır. Böylece tümlevsel yığılım durumunun ortaya çıkması engellenmiş olur. Denetleç çıkışı üzerinde yapılan bu düzeltmenin oranı geribesleme kazancı $1/T_i$ tarafından belirlenir. T_i *düzeltilme zaman sabiti* olarak adlandırılır (Aström ve Hagglund, 1994).

İstenilen Çıkış Ağırlıklandırma Çarpanı

OTT denetleçler hata geribeslemeli denetleçlerdir. İstenilen çıkış ile süreç çıkışı arasındaki hata denetlece geribeslenir ve denetleç çıkışı sürece uygulanır (Şekil 3.2). Hata sinyali oluşturulurken istenilen çıkış bir ağırlıklandırma çarpanı ile çarpılarak elde edilebilir. Buna göre yeni OTT algoritması aşağıdaki gibi elde edilir.

$$u(t) = K \left[e_p(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(l) dl + T_d \frac{de_d(t)}{dt} \right] \quad (3.11)$$

Bu eşitlikte her terimdeki hata sinyali farklıdır. Oransal terimdeki hata

$$e_p = br - y \quad (3.12)$$

biçiminde alınır. Burada, b istenilen çıkış ağırlıklandırma çarpanı olarak adlandırılır. Türevsel terimde istenilen çıkış kullanılmayıp önceki bölümde belirtildiği gibi

$$e_d = -y \quad (3.13)$$

şeklinindedir. Tümlensel terimdeki hata ise durgun-durum hatalarından kaçınmak için gerçek denetim hatası

$$e = r - y \quad (3.14)$$

olarak alınır (Aström ve Haggund, 1994). İstenilen çıkış ağırlıklandırma çarpanı b sadece kapalı döngü sistemin sıfırlarının yerini değiştirir ve değeri 0 ile 1 arasındadır. Dolayısıyla b 'nin etkisi sadece istenilen çıkış değişikliklerinde görülür. b 'nin değeri küçüldükçe tepkilerdeki aşmalar azalır (Aström ve Haggund, 1994).

Temel OTT algoritmasında yukarıda bahsedilen düzeltmeler yapıldıktan sonra OTT algoritması aşağıdaki gibi elde edilir. Eş. 3.2'de verilen OTT denetlecinde oransal terim:

$$P(t) = K(br(t) - y(t)) \quad (3.15)$$

tümlensel terim:

$$I(t) = \frac{K}{T_i} \int_0^t e(l) dl + \frac{1}{T_t} \int_0^t e_s(l) dl \quad (3.16)$$

türevsel terim:

$$D(t) = -KT_d \frac{dy(t)}{dt} - \frac{T_d}{N} \frac{dD(t)}{dt} \quad (3.17)$$

şeklinde olur.

3.3. Çalışmada Kullanılan OTT Denetim Yöntemleri

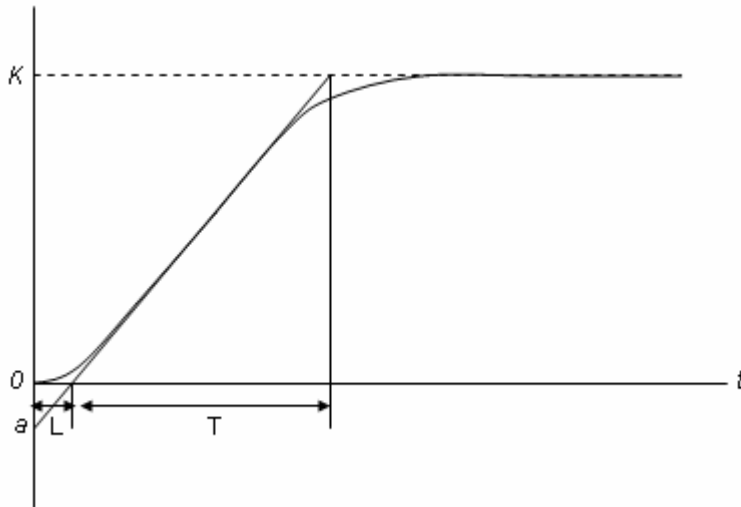
Bu bölümde, tank atış denetim sistemi benzetim çalışmalarında kullanılan OTT denetim yöntemleri kısaca tanıtılacak ve bilgisayarda gerçekleştirilirken dikkat edilmesi gereken bazı noktalara değinilecektir. Klasik Ziegler-Nichols basamak ve sıklık tepkisi yöntemleri (Ziegler-Nichols, 1942) incelendikten sonra daha gelişmiş

yöntemler olan baskın kutup tasarımı (Aström ve Hagglund, 1985) ile evre ve kazanç payına dayanan OTT ayarlayıcılar (Aström ve Hagglund, 1994) ele alınmıştır. Son olarak, kestirilen sürekli zaman sistem parametrelerine göre kutup yerleştirme yöntemi incelenmiştir.

3.3.1. Ziegler-Nichols Basamak Tepkisi Yöntemi

Bu yöntem Ziegler ve Nichols tarafından geliştirilen ilk OTT denetim yöntemidir (1942). Ziegler-Nichols basamak tepkisi yönteminde açık döngü sistemin basamak tepkisi kullanılır. Sistemin basamak tepkisinden Birinci Dereceden Gecikme Zamanlı (BDGZ) sistem modeline ait parametreler elde edilir. Elde edilen model parametreleri kullanılarak Ziegler-Nichols basamak tepkisi yöntemine ait denetleç parametreleri hesaplanır. Ziegler-Nichols basamak tepkisi yönteminde sistemin basamak tepkisi iki şekilde kullanılabilir. Birinci yöntemde, sistemin basamak tepkisinde eğimin en yüksek olduğu noktada basamak tepkisine bir teğet çizilir (Şekil 3.4). Çizilen teğetin çizilebilecek en büyük eğimli teğet olmasına dikkat edilmelidir. Çizilen teğetin koordinat eksenlerini kestiği noktalar (a ve L) Ziegler Nichols basamak tepkisi yönteminde denetleç parametrelerinin hesaplanmasında kullanılır. Şekil 3.4'teki grafikten, BDGZ sistem modeli elde edilebilir. Burada, K sistemin durgun durum kazancını, L zaman gecikmesini ve T zaman sabitini göstermektedir. Bu parametler kullanılarak sistemin BDGZ modeli aşağıdaki gibi elde edilir (Aström ve Hagglund, 1994).

$$G_P(s) = \frac{Ke^{-sL}}{sT + 1} \quad (3.18)$$



Şekil 3.4 Basamak tepkisi ve süreç modeli parametreleri

Doğrusal kararlı bir sisteme uygulanan basamak, dürtü, yokuş gibi giriş sinyallerine bu sistemin verdiği geçici tepkiden elde edilen sistem modellerine çok fazla güvenilme de elde edilen basit modeller OTT denetleçler için yeterli olmaktadır.

Basamak tepkisine çizilecek teğetin yerinin belirlenmesi ve teğetin çizilmesi zor olduğundan teğet yöntemiyle bulunan BDGZ sistem modeline çok fazla güvenilmez. Bu yöntem ölçme gürültülerine karşı aşırı duyarlı ve otomatik hale getirilmesi zor olduğu için gerçek uygulamalarda pek tercih edilmez. Bunun yerine Şekil 3.5'te gösterilen alan yöntemi kullanılır (Aström ve Hagglund, 1994).

Bu yöntemde, basamak tepkisinin altında ve üstünde kalan alanlardan yararlanılarak sistem modeli çıkarılır. Bu yöntemde önce basamak tepkisinin durgun durum kazancı (K) hesaplanır. Daha sonra, Şekil 3.5'te görülen büyük dikdörtgenin alanından eğrinin altında kalan alan çıkarılarak A_0 alanı hesaplanır. Bu alandan yararlanarak aşağıdaki eşitlikten

$$L + T = \frac{A_0}{K} \quad (3.19)$$

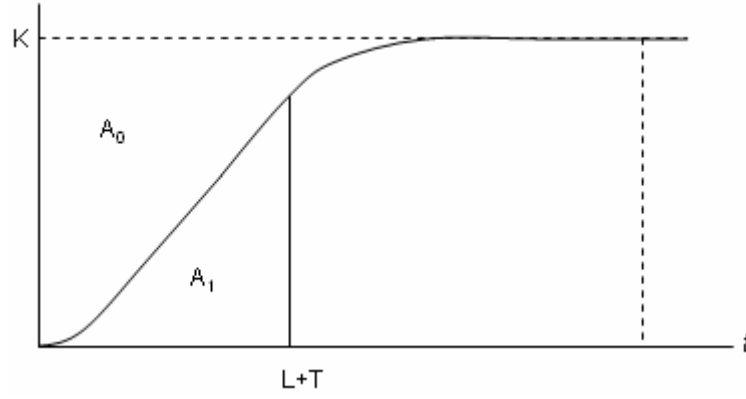
$L+T$ toplamı bulunur. Daha sonra $L+T$ anına kadar eğrinin altında kalan alan hesaplanarak A_1 alanı bulunur. A_1 alanından zaman sabiti T

$$T = \frac{A_1}{K} e \quad (3.20)$$

eşitliğiyle elde edilir. Burada e doğal logaritmik tabanı göstermektedir ($e = 2.718$). Eşitlikteki A_0 ve A_1 alanlarından L ve T bulunmuş olur. Daha sonra Ziegler-Nichols'ın önerdiği ayarlama eşitliklerinde kullanılan a parametresi

$$a = K \frac{L}{T} \quad (3.21)$$

şeklinde bulunur. Böylece ayarlama için gerekli sistem modeli elde edilmiş olur. Yukarıdaki yöntemlerle elde edilen parametreler (a ve L) kullanılarak Ziegler ve Nichols (1942) tarafından önerilen ve Çizelge 3.1'de verilen basit eşitliklerden yararlanılarak denetleç parametreleri bulunur. Ziegler ve Nichols, yapılan çok sayıda deneyin sonuçlarından, OTT parametrelerini bulmak için doğrudan a ve L 'ye bağlı bu basit eşitlikleri bulmuşlardır.



Şekil 3.5 Alanlardan model parametrelerinin bulunması

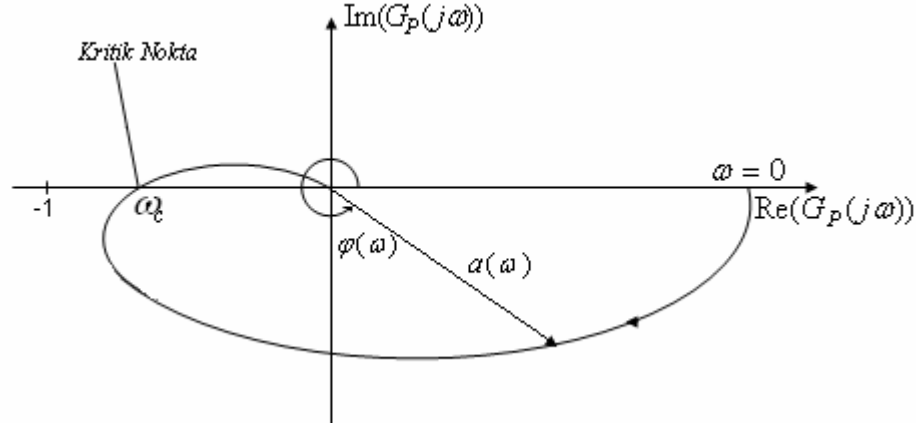
Çizelge 3.1 Ziegler-Nichols basamak tepkisi yöntemine göre OTT parametreleri

Denetleç	K	T_i	T_d
O	$1/a$	-	-
OTüm	$0.9/a$	$3L$	-
OTT	$1.2/a$	$2L$	$L/2$

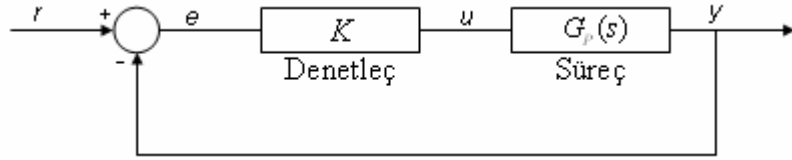
3.3.2. Ziegler-Nichols Sıklık Tepkisi Yöntemi

Bu yöntemde, süreç aktarım işlevine ait Nyquist eğrisi kullanılarak denetleç tasarlanmaktadır. Süreç aktarım işlevinin sıklık 0'dan sonsuza giderken karmaşık düzlemde oluşturduğu eğriye Nyquist eğrisi adı verilir. (Şekil 3.6) Nyquist eğrisi, sisteme değişik sıklıkta sinüsler uygulanarak elde edilir. Şekil 3.6'da Nyquist eğrisi üzerindeki $\varphi(\omega)$ ve $a(\omega)$, ω sıklığı için evre ve genliği göstermektedir. Nyquist eğrisinin eksi yönde gerçek eksenini kestiği noktaya kritik nokta denir. Ziegler-Nichols sıklık tepkisi yönteminde Nyquist eğrisi üzerindeki kritik nokta kullanılarak OTT denetleç parametreleri hesaplanır. Kritik nokta -180° evreye sahiptir. OTT denetleç parametrelerinin hesaplanması için kritik noktadaki kazanç ve sıklık değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu kazanç ve sıklık değerleri kritik kazanç (K_u) ve kritik sıklık (ω_u) olarak adlandırılır.

Kritik kazanç ve kritik sıklık değerlerinin bulunması için değişik yöntemler vardır. Yöntemlerden birisi, yüksek oransal geribesleme kazancında sistemin kararsız duruma geçmesi gerçeğine dayanır. Şekil 3.7'deki denetleçte sadece oransal terim bulunmaktadır. Oransal kazanç, sistem kararlılık sınırı gelene kadar sürekli artırılır. Sistemin kararlılık sınırına geldiği andaki kazanç değeri kritik kazanç (K_u) olur.



Şekil 3.6 Nyquist eğrisi

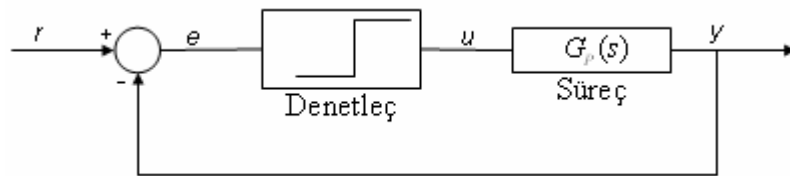


Şekil 3.7 Oransal geribeslemeli kapalı döngü sistem yapısı

Bir sistemin salınması için döngü kazancının 1 olması gerekir. Buna göre

$$K_u G_P(j\omega_u) = -1 \quad (3.22)$$

eşitliği yazılabilir. Bu eşitlikteki K_u kritik kazanç ve ω_u kritik sıklıktır. Böylece oransal geribeslemeli kapalı döngü sistemde, sistemi kararlılık sınırına getiren kazanç kritik kazanç K_u 'yu verirken, çıkışın salınımlarından da kritik sıklık ω_u hesaplanabilir. Sistemi kararlılık sınırında çalıştırmak pratikte pek tercih edilmediği için bu yöntem çok kullanılmamaktadır. Bunun yerine röleli geribesleme (Aström ve Hagglund, 1984) yöntemi kullanılır. Şekil 3.7'deki denetleç yerine röle konulup ve rölenin genliği uygun seçildiğinde sistemde sürekli olarak salınım meydana gelir. Bu durumda denetim değişkeni bir kare dalga, çıkış ise sinüse yakın bir sinyal halini alır. Giriş ile çıkış arasında 180° evre farkı vardır ve salınım genliği rölenin genliğine bağlıdır (Aström ve Hagglund, 1984).



Şekil 3.8 Röleli geribesleme döngüsü

Röle doğrusal olmayan bir eleman olduğu için, röleli geribesleme sistemi doğrusal olmayan bir denetim sistemidir. Bu tür doğrusal olmayan sistemlerde, doğrusal olmama derecesi rölede olduğu gibi küçükse, çeşitli doğrusallaştırma yöntemleriyle sistem doğrusallaştırılır ve bulunan doğrusal sistem üzerinde doğrusal sistem kuramları kullanılarak tasarım yapılır. Bu yöntemlerden birisi de Tanımlayan İşlev yöntemidir (Describing Function Analysis) (Atherton, 1982).

Tanımlayan işlev, doğrusal olmayan elemanın çıkışının Fourier serisi açılımından elde edilen temel bileşenin, sistem girişine oranı ile tanımlanır ve kazanç olarak algılanabilir. Röle için tanımlayan işlev

$$N(a) = \frac{4d}{\pi a} \quad (3.23)$$

şeklinde verilmektedir (Ogata, 1997). Burada a rölenin girişindeki sinyalin genliğini, d röle genliğini göstermektedir. $N(a)$ kazanç olarak kabul edilirse, salınım olması için kapalı döngü kazancın

$$N(a)G_P(j\omega) = -1 \quad (3.24)$$

olması gerekir. Kritik noktada, $\omega = \omega_u$,

$$\frac{4d}{\pi a} |G_P(j\omega)| = 1 \quad (3.25)$$

$$\angle G_P(j\omega_u) = -\pi \quad (3.26)$$

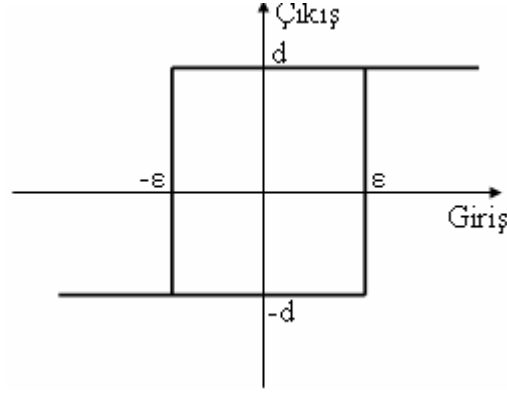
eşitlikleri elde edilir. Kritik kazanç

$$K_u = \frac{4d}{\pi a} \quad (3.27)$$

olur. Böylece Nyquist eğrisi üzerindeki kritik noktadaki kazanç bulunmuş olur. Kritik sıklığı bulmak için sistem çıkışının iki tepesi arasındaki süreyi bilmek yeterlidir. Histeresissiz bir rölede çok küçük gürültüler bile rölenin durumunu değiştirmesine neden olacağı için, gerçek uygulamalarda daha çok histeresizli röleler kullanılır. Bu tür rölelerde ancak histeresis genişliğinden büyük gürültüler röleyi etkileyebilir. Histeresizsiz rölede olduğu gibi, histeresizli rölede de tanımlayan işlev yöntemi kullanılabilir. Histeresizli rölenin tanımlayan işlevinin tersi

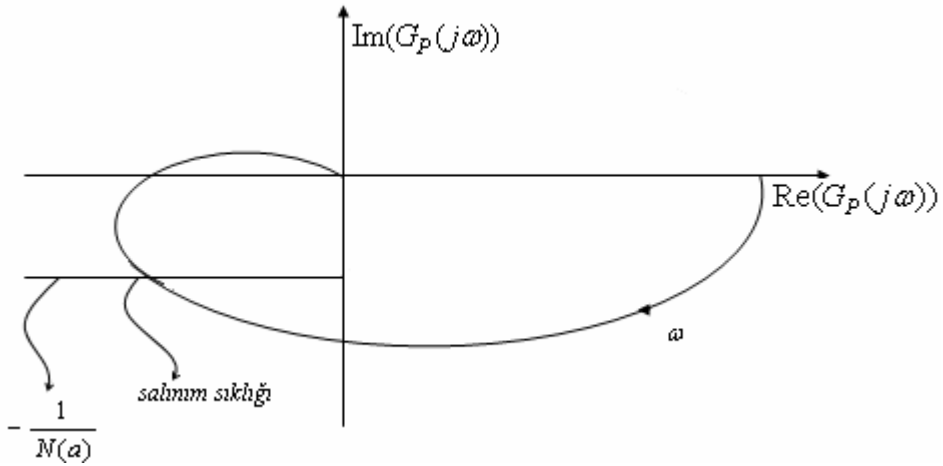
$$-\frac{1}{N(a)} = -\frac{\pi}{4d} \sqrt{a^2 - \varepsilon^2} - j \frac{\pi \varepsilon}{4d} \quad (3.28)$$

eşitliğiyle verilmektedir (Ogata, 1997). Burada d röle genliği, ε histeresis genişliğidir.



Şekil 3.9 Histeresisli rölenin giriş-çıkış özelliği

Eş. 3.28’de verilen işlev, karmaşık düzlemde gerçekte paralel bir doğruyu gösterir (Şekil 3.10). Bu doğrunun $G_P(j\omega)$ eğrisiyle kesiştiği noktanın sıklığı salınım sıklığıdır. Bu sıklıktaki $-1/N(a)$ işlevinin büyüklüğü de açık döngü sistemin o noktadaki kazancını vermektedir.



Şekil 3.10 Karmaşık düzlemde tanım işlevi ve Nyquist eğrisi

Elde edilen kritik sıklık ve kazanç kullanılarak Ziegler-Nichols (1942) tarafından önerilen basit eşitlikler ile OTT parametreleri bulunur. Çizelge 3.2’de Ziegler-Nichols sıklık tepkisinde denetleç parametrelerinin hesaplandığı basit eşitlikler verilmiştir.

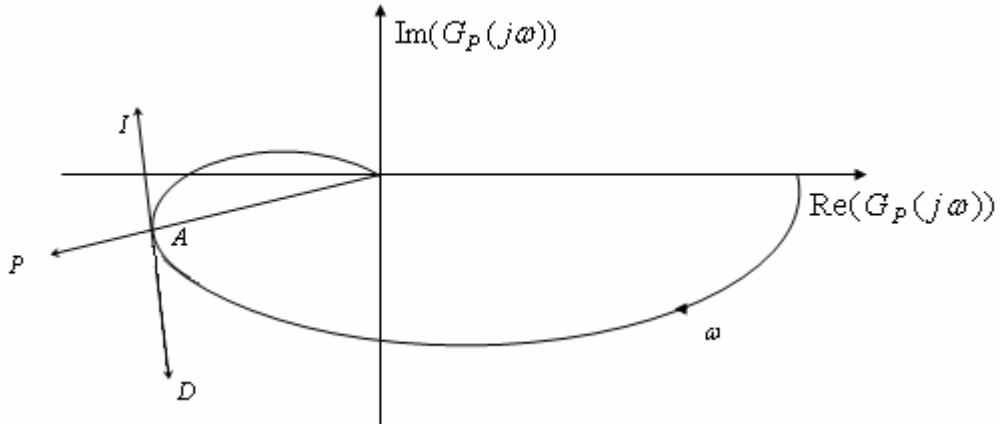
Çizelge 3.2 Ziegler-Nichols sıklık tepkisi yöntemine göre OTT parametreleri

Denetleç	K	T_i	T_d
O	$0.5K_u$	-	-
OTüm	$0.4K_u$	$0.8T_u$	-
OTT	$0.6K_u$	$0.5T_u$	$0.12T_u$

3.3.3. Genlik ve Evre Payı Ayarlayıcıları

Nyquist eğrisi üzerindeki noktalar denetleç yardımıyla karmaşık düzlemde bir başka yere taşınabilmektedir. Genlik ve evre payı ayarlayıcıları bu prensibe göre çalışmaktadır. Şekil 3.11'de görülen A noktası, oransal kazanç değiştirilerek P yönünde, tümlev zamanı değiştirilerek I yönünde, türev zamanı değiştirilerek D yönünde hareket ettirilebilir.

Noktaların karmaşık düzlemde hareket ettirilebileceği gerçeğinden yola çıkılarak, kullanıcıya genlik ve evre paylarını seçerek, noktanın gideceği yeri belirleme olanağı veren, genlik ve evre payı otomatik ayarlayıcıları geliştirilmiştir (Aström ve Hagglund, 1994).



Şekil 3.11 Verilen bir noktanın karmaşık düzlemde yerinin değiştirilmesi

Nyquist eğrisi üzerinde histeresisli röle yardımıyla bulunan bir A noktası

$$G_P(j\omega) = r_p e^{j(\pi + \varphi_p)} \quad (3.29)$$

alalım. A noktasını

$$B = r_s e^{j(\pi + \varphi_s)} \quad (3.29)$$

noktasına taşımak için gerekli olan denetlecin sıklık tepkisi

$$G_c(j\omega) = r_c e^{j\varphi_c} \quad (3.30)$$

şeklinde yazılabilir. Bu eşitliklerden

$$G_p(j\omega)G_c(j\omega) = r_s e^{j(\pi+\varphi_s)} \quad (3.31)$$

$$r_p r_c e^{j(\pi+\varphi_p+\varphi_c)} = r_s e^{j(\pi+\varphi_s)} \quad (3.32)$$

eşitlikleri elde edilir. Buna göre verilen noktanın istenilen yere gitmesi için denetlecin

$$r_c = \frac{r_s}{r_p} \quad (3.33)$$

$$\varphi_c = \varphi_s - \varphi_p \quad (3.34)$$

şeklinde seçilmesi gerekmektedir. Bu durumda, genlik payı tasarımı

$$\varphi_s = 0 \quad (3.35)$$

$$r_s = \frac{1}{A_m} \quad (3.36)$$

seçimine karşılık gelirken evre payı tasarımı da

$$\varphi_s = \varphi_m \quad (3.37)$$

$$r_s = 1 \quad (3.38)$$

seçimine karşılık gelir. A_m istenilen genlik payı ve φ_m 'de istenilen evre payıdır. OTT denetlecinin sıklık tepkisi yazılıp Eş. 3.30 ile eşitlendiğinde

$$G_c(j\omega) = K \left[1 + \frac{1}{j\omega T_i} + j\omega T_d \right] = r_c e^{j\varphi_c} \quad (3.39)$$

aşağıdaki eşitlik bulunur.

$$K + jK(\omega T_d - \frac{1}{\omega T_i}) = r_c \cos \varphi_c + jr_c \sin \varphi_c \quad (3.40)$$

Buradan da

$$K = r_c \cos \varphi_c \quad (3.41)$$

ya da

$$K = \frac{r_s \cos(\varphi_s - \varphi_p)}{r_p} \quad (3.42)$$

eşitliği bulunur. OTT denetlecinin oransal kazancını bu eşitlikten bulmak mümkündür. Tümler ve türev zamanları bulmak için Eş. 3.40'tan

$$K(\omega T_d - \frac{1}{\omega T_i}) = r_c \sin \varphi_c \quad (3.43)$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlikte Eş. 3.41 kullanılıp yeniden düzenlenirse

$$\omega T_d - \frac{1}{\omega T_i} = \tan(\varphi_s - \varphi_p) \quad (3.44)$$

eşitliği bulunur. Görüldüğü gibi T_i ve T_d için bir tane eşitlik vardır. Bu da sonsuz çözüm demektir. Bu yüzden T_i ve T_d arasında ikinci bir bağıntıya gereksinim vardır. Bu bağıntıyı

$$T_i = \frac{1}{\alpha} T_d \quad (3.45)$$

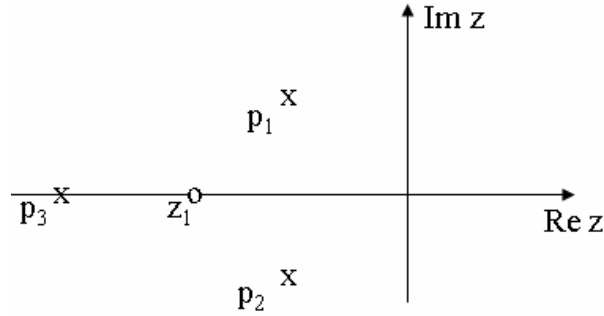
şeklinde seçmek mümkündür. Genelde $\alpha = 0.25$ alınır. Bu iki eşitlikten

$$T_d = \frac{1}{2\omega} \left[\tan(\varphi_s - \varphi_p) + \sqrt{4\alpha + \tan^2(\varphi_s - \varphi_p)} \right] \quad (3.46)$$

bulunur. T_d bulunduktan sonra Eş. 3.45'ten de T_i hesaplanır.

3.3.4. Baskın Kutup Tasarımı

Bu tasarım yöntemi, kapalı döngü sistemin baskın kutuplarının yerinin belirlenmesi temeline dayanmaktadır. Bir çok kapalı döngü sistemde, kutup-sıfır yerleşimi Şekil 3.12'de görüldüğü gibidir. Sistem tepkisi p_1 ve p_2 kutup çifti tarafından belirlendiği için bu kutuplar baskın kutup olarak adlandırılırlar. Baskın kutuplar dışındaki kutupların sistem tepkisi üzerinde etkisi azdır (Aström ve Hagglund, 1984).



Şekil 3.12 Basit geribesleme döngüsünün kutup ve sıfırlarının yerleşim şekli

Baskın kutup tasarımı yöntemi ile baskın kutupların istenilen yere atanabilmesi için gerekli denetleç parametrelerinin hesaplanması amaçlanmaktadır. Baskın kutup tasarımında tasarım parametreleri doğal sıklık ω_o ve sönüm oranı ζ 'dir. Buna göre kapalı döngü sistemin baskın kutupları $p_{1,2} = -\zeta\omega_o \pm j\omega_o\sqrt{1-\zeta^2}$ şeklinde olur. Bu tasarım parametreleri seçilirken kutupların baskın kutup tanımına uymaları için

sönüm oranı 0 ile 1 aralığında seçilmelidir. Sistemden hızlı bir tepki bekleniliyorsa doğal sıklık değerinin yüksek olması gerekmektedir. OTT ile denetlenen kapalı döngü sistemin baskın kutupları verilen tasarım parametrelerini sağlayacak şekilde, açık döngü sistemin Nyquist eğrisinden kestirildikten sonra uygun denetleç parametreleri hesaplanır. Ancak baskın kutupların atanacağı yerler seçilirken sistem dinamikleri gözönünde bulundurulmalıdır. Çünkü baskın kutupların atanacağı yerler sistem dinamikleri tarafından sınırlandırılır. OTT denetleç ile denetlenen sistem ikinci dereceden ise doğal sıklık ve sönüm oranı değerleri istenildiği gibi seçilebilir. Ancak daha yüksek dereceden sistemlerde yüksek dereceli dinamikler bu seçimi sınırlandırır. Yani, kapalı döngü sistemin kutup sayısı artacağından tasarım parametreleri seçilirken baskın kutupların baskınlığının etkilenmemesine dikkat edilmelidir (Aström ve Hagglund, 1984).

Kapalı döngü bir sistemde $G_c(s)$ denetleç aktarım işlevi ve $G_p(s)$ süreç aktarım işlevi olarak alındığında, kapalı döngü sistemin özdenklemini

$$1 + G_p(s)G_c(s) = 0 \quad (3.47)$$

şeklinde olur. Bu eşitlikte $G_c(s)G_p(s)=G(s)$ biçiminde tanımlandığında kapalı döngü sistemin özdenklemini

$$1 + G(s) = 0 \quad (3.48)$$

şeklinde elde edilir. Bu özdenklemin kökleri kapalı döngü sistemin kutuplarını verir. Bu köklerden sanal eksene en yakın olanlar kapalı döngü sistemin baskın kutuplarıdır. Kapalı döngü sistemin özdenklemini $s=j\omega$ etrafında Taylor serisine açılırsa

$$0 = 1 + G(-\sigma + j\omega) = 1 + G(j\omega) + j\sigma G'(j\omega) + \dots \dots \dots \quad (3.49)$$

eşitliği bulunur. Bu eşitlikteki $G'(j\omega)$, $G(j\omega)$ 'nin ω 'ya göre türevi alınmış halidir. Yukarıdaki eşitlikte yüksek dereceli terimlerin etkisi az olduğu için bu terimler ihmal edildiğinde

$$1 + G(j\omega) + j\sigma G'(j\omega) = 0 \quad (3.50)$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitliğin gerçeğe yakın olması için σ 'nın küçük değerler alması gerekir. Eş. 3.50'deki türevli terim Nyquist eğrisi üzerinde birbirine yakın iki nokta kullanılarak yaklaşıklandırılıp eşitlik yeniden düzenlenirse

$$\frac{G(j\omega_2) - G(j\omega_1)}{\omega_2 - \omega_1} = j \frac{1 + G(j\omega_2)}{\sigma} \quad (3.51)$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlikteki ω_2 sıklığı baskın kutup sıklığı olarak alınır. Baskın kutuplar $p_{1,2} = -\zeta\omega_o \pm j\omega_o\sqrt{1-\zeta^2}$ şeklinde ifade edildiğinde baskın kutup sıklığı ile doğal sıklık arasındaki ilişki $\omega_2 = \omega_o\sqrt{1-\zeta^2}$ şeklinde olur. Açık döngü aktarım işlevi $G(s) = G_c(s)G_p(s)$ şeklinde ifade edilebilir. Eş. 3.51'e göre ω_1 ve ω_2 sıklıklarındaki değerlerine bağlı olacak şekilde denetleç parametrelerini veren eşitlikler yazılabilir.

ω_1 ve ω_2 sıklıklarında süreç aktarım işlevi $G_p(s)$ 'nin aldığı değerler

$$G_p(j\omega_1) = a_1 + jb_1 \quad (3.52)$$

$$G_p(j\omega_2) = a_2 + jb_2 \quad (3.53)$$

şeklinde olsun. Bu eşitlikleri Eş. 3.51'de yerine yazdığımızda

$$\frac{G_c(j\omega_2)G_p(j\omega_2) - G_c(j\omega_1)G_p(j\omega_1)}{\omega_2 - \omega_1} = j \frac{1 + G_c(j\omega_2)G_p(j\omega_2)}{\sigma} \quad (3.54)$$

şeklinde elde edilir. Bu eşitlikteki $G_c(j\omega_k)$, ($k = 1, 2$), OTT denetleci için

$$G_c(j\omega_k) = K_c \left[1 + \frac{1}{j\omega_k T_i} + j\omega_k T_d \right] \quad (3.55)$$

şeklinindedir. Ayrıca baskın kutuplar $p_{1,2} = -\zeta\omega_o \pm j\omega_o\sqrt{1-\zeta^2} = -\sigma \pm j\omega_2$ olarak alındığı için σ

$$\sigma = \frac{\zeta\omega_2}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (3.56)$$

biçiminde yazılabilir. OTT denetimde tek çözüm elde etmek için T_i ve T_d arasında seçilen

$$T_d = \alpha T_i \quad (3.57)$$

şeklinde bir ilişkiye gereksinim vardır. Bu eşitlikte α genelde 0.25 alınır. Yukarıdaki eşitlikler kullanılarak denetleç parametreleri

$$T_i^2 \alpha (T_d \omega_2 - b_2 \omega_2 + b_1 \omega_1) + T_i (a_2 - a_1 + T_d b_2) - \left(\frac{b_2}{\omega_2} - \frac{b_1}{\omega_1} - \frac{T_d a_2}{\omega_2} \right) = 0 \quad (3.58)$$

$$K = \frac{\tau}{(a_2\omega_2 - a_1\omega_1 + \tau b_2\omega_2)\alpha T_i + (b_2 - b_1 - \tau a_2) + \left(\frac{a_1}{\omega_1} - \frac{a_2}{\omega_2} - \tau \frac{b_2}{\omega_2}\right) \frac{1}{T_i}} \quad (3.59)$$

şeklinde elde edilir. T_i bulunduktan sonra Eş. 3.57'den T_d hesaplanabilir. Bu eşitliklerde

$$\tau = \frac{\sqrt{1-\zeta^2} (\omega_2 - \omega_1)}{\zeta \omega_2} \quad (3.60)$$

şeklinde (Aström ve Hagglund, 1984).

Yukarıdaki eşitliklere bakıldığında, baskın kutup tasarımında denetleç parametrelerini ayarlamak için süreç aktarım işlevinin birbirine yakın iki sıklıkta değeri hesaplanır. Bu sıklıkların birisi kapalı döngü sistemin baskın kutup sıklığı olarak seçilir. Diğer tasarım parametresi olan sönüm oranı da seçildikten sonra denetleç parametreleri hesaplanır. Baskın kutup tasarımında süreç aktarım işlevinin iki sıklıktaki değeri iki farklı yolla hesaplanabilir. Birinci yolda, ω_2 sıklığı için seçilen uygun röleyle, $G_p(j\omega_2)$ 'nin değeri hesaplanır. Daha sonra ω_1 sıklığı ω_2 'ye yakın olacak şekilde seçilen ikinci bir röleyle $G_p(j\omega_1)$ hesaplanır. Bu elde edilen değerler, kullanıcı tarafından seçilen α , ζ değerleri ve yukarıda verilen eşitlikler kullanılarak denetleç parametreleri hesaplanır. Bu yol kullanıldığı zaman kullanıcı tasarım parametresi olan ω_1 ve ω_2 sıklıklarını doğrudan belirleyememektedir. Röle histeresisi ve genliğiyle oynayarak sıklıkları artırıp azaltabilmektedir. İkinci yolda ise, sistem girişine istenilen sıklıkta bir sinüs uygulanır ve sistem çıkışı gözlenir. Daha sonra giriş ve çıkıştan sistemin sıklık tepkisinin seçilen sıklıkta aldığı değer hesaplanır. Böylece tasarım parametreleri ω_1 ve ω_2 sıklıkları doğrudan kullanıcı tarafından seçilmiş olur.

3.3.5. Kutup Yerleştirme Tasarımı

Kutup yerleştirme tasarımı ile kapalı döngü sistemin kutuplarını istenilen yere atamak mümkündür. Eğer sistem birinci dereceden ise OTüm (Oransal-Tümlevsel) ile kapalı döngü sistemin iki kutubu istenilen yere atanabilir. OTT denetleçler ile ikinci dereceden bir sistemin kapalı döngü bütün kutupları istenildiği gibi seçilebilir. Bu çalışma kapsamında incelenen tank silah sistemi üçüncü dereceden bir sistem olduğu için OTT denetleç ile bütün kapalı döngü kutupları kutup yerleştirme tasarımı ile istenildiği gibi atanamaz. Bundan dolayı sistemin ikinci dereceden bir

modelinin elde edilmesi gerekmektedir. Sürekli Zaman Yineli En Küçük Kareler (SZYEKK) parametre kestirim yöntemi ile sistemin ikinci dereceden modeli elde edilebilir. Elde edilen ikinci dereceden modelin sistemin gerçek tepkisine olabildiğince yakın olmasına dikkat edilmelidir. Bu çalışma kapsamında ikinci dereceden bir sistemin kutup yerleştirme tasarımı ile denetimi yapılacağından bu bölümde sadece ikinci dereceden bir sistemin OTT ile denetimi incelenecektir.

Denetlenecek ikinci derece süreç aktarım işlevi

$$G_P(s) = \frac{b_0}{a_0 s^2 + a_1 s + 1} \quad (3.61)$$

şeklinde olsun. OTT denetlecin aktarım işlevi

$$G_C(s) = K \left[1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d \right] \quad (3.62)$$

biçimindedir ve ayarlanabilen üç parametresi (K , T_i , T_d) yardımıyla, üç tane kapalı döngü sistem kutubu istenilen yere atanabilir. İstenilen kapalı döngü sistem kutupları p_1 , p_2 ve p_3 olsun. Bu durumda istenilen kapalı döngü özdenklemini

$$(s + p_1)(s + p_2)(s + p_3) = 0 \quad (3.63)$$

şeklinde olur. Eş. 3.61 ve Eş. 3.62'de verilen süreç aktarım işlevi ve denetleç aktarım işlevi kullanılarak kapalı döngü sistemin özdenklemini elde edildiğinde

$$s^3 + s^2 \left[\frac{a_1 + b_0 K T_d}{a_0} \right] + s \left[\frac{1 + b_0 K}{a_0} \right] + \frac{b_0 K}{T_i a_0} = 0 \quad (3.64)$$

şeklinde elde edilir. Eş. 3.63 ve Eş. 3.64'te verilen iki özdenklemin katsayılarının eşitlenmesinden elde edilen üç eşitliğin çözümünden OTT denetleç parametreleri için

$$K = \frac{a_0(p_1 p_2 + p_1 p_3 + p_2 p_3) - 1}{b_0} \quad (3.65)$$

$$T_i = \frac{a_0(p_1 p_2 + p_1 p_3 + p_2 p_3) - 1}{a_0 p_1 p_2 p_3} \quad (3.66)$$

$$T_d = \frac{a_0(p_1 + p_2 + p_3) - a_1}{a_0(p_1 p_2 + p_1 p_3 + p_2 p_3) - 1} \quad (3.67)$$

eşitlikleri bulunur. Burada süreç parametreleri a_0 , a_1 ve b_0 'ın bilindiği varsayılmaktadır. Sistem modeline ait parametreler bilinmiyorsa ya da sistem

derecesi ikiden büyükse sistemin ikinci dereceden model parametrelerini kestirmek için bir parametre kestirim algoritması olan SZYEKK yöntemi kullanılabilir. Bu çalışma kapsamında bu yöntem kullanılmıştır.

3.4. SZYEKK ile Model Parametrelerinin Kestirimi

SZYEKK parametre kestirim yöntemi ile sistemin giriş ve çıkış sinyalleri kullanılarak sistem modeline ait parametreler elde edilebilir.

SZYEKK yönteminde sistem modeli

$$A(s)Y(s) = B(s)U(s) + E(s) \quad (3.68)$$

biçimindedir. Burada $Y(s)$ sistem çıkışı, $U(s)$ sistem girişidir. $E(s)$ ise sistemdeki gürültülerin, bozucuların ve sürecin modellenmemiş dinamiklerinin etkilerini temsil eden bir terim olarak alınmaktadır. Sistem çok terimliliği $A(s)$ ve $B(s)$ sırasıyla

$$A(s) = s^n + a_1s^{n-1} + \dots + a_n \quad (3.69)$$

$$B(s) = b_0s^m + b_1s^{m-1} + \dots + b_m \quad (3.70)$$

şeklindedir. Eş. 3.68'deki sistem modelini, parametreler bakımından doğrusal hale getirmek ve sistemdeki gürültülerin etkisini azaltmak için

$$Y(s) + \frac{A(s)Y(s)}{T(s)} = \frac{B(s)U(s)}{T(s)} + \frac{E(s)}{T(s)} + Y(s) \quad (3.71)$$

$$Y(s) = \frac{B(s)U(s)}{T(s)} + [T(s) - A(s)] \frac{Y(s)}{T(s)} + \frac{E(s)}{T(s)} \quad (3.72)$$

biçiminde yeni bir model olarak yazmak mümkündür (Demircioğlu, 1989). Burada $1/T(s)$, $der(T(s))=n$ olacak şekilde kullanıcı tarafından seçilen ve band genişliği sistemin band genişliğine yakın olan bir süzgeçtir. $T(s)$ 'nin seçimi kestirimin başarımında belirleyicidir. Eş. 3.72'den parametreler bakımından doğrusal model

$$Y(s) = \varphi^T(s)\theta + \varepsilon(s) \quad (3.73)$$

elde edilir. T süzgeci $T(s) = s^n + t_1s^{n-1} + \dots + t^n$ şeklindedir. Burada $\varepsilon(s) = E(s) / T(s)$ 'dir. θ parametre vektörünü, φ veri vektörünü gösterir ve aşağıda verilen eşitliklerle ifade edilirler.

$$\theta^T = [b_0 \quad b_1 \quad \dots \quad b_m \quad t_1 - a_1 \quad t_2 - a_2 \quad \dots \quad t_n - a_n] \quad (3.74)$$

$$\varphi^T(s) = \frac{1}{T(s)} \begin{bmatrix} s^m & s^{m-1} & \dots & 1 \end{bmatrix} U(s) \begin{bmatrix} s^{n-1} & s^{n-2} & \dots & 1 \end{bmatrix} Y(s) \quad (3.75)$$

Eş. 3.75'te görüldüğü gibi veri vektöründe süzgeçlenmemiş bilgi olmadığı için gürültünün etkisi azaltılmış olur (Demircioğlu, 1989). Parametreler bakımından doğrusal model elde edildikten sonra, SZYEKK algoritması kullanılarak model parametreleri kestirilebilir. SZYEKK algoritmasının eşitlikleri

$$S(t+h) = e^{-\beta h} S(t) + \int_t^{t+h} e^{-\beta(t+h-\tau)} \varphi(\tau) \varphi^T(\tau) d\tau \quad (3.76)$$

$$\hat{\theta}(t+h) = \hat{\theta}(t) + S^{-1}(t+h) + \int_t^{t+h} e^{-\beta(t+h-\tau)} \varphi(\tau) \left[y(\tau) - \varphi^T(\tau) \hat{\theta}(t) \right] d\tau \quad (3.77)$$

biçimindedir. Burada $S(t)$, t anındaki bilgi matrisini, $\hat{\theta}(t)$ t anındaki parametre kestirim vektörünü, $\beta > 0$ sabit unutma katsayısını, h örnekleme aralığını göstermektedir (Demircioğlu, 1989)

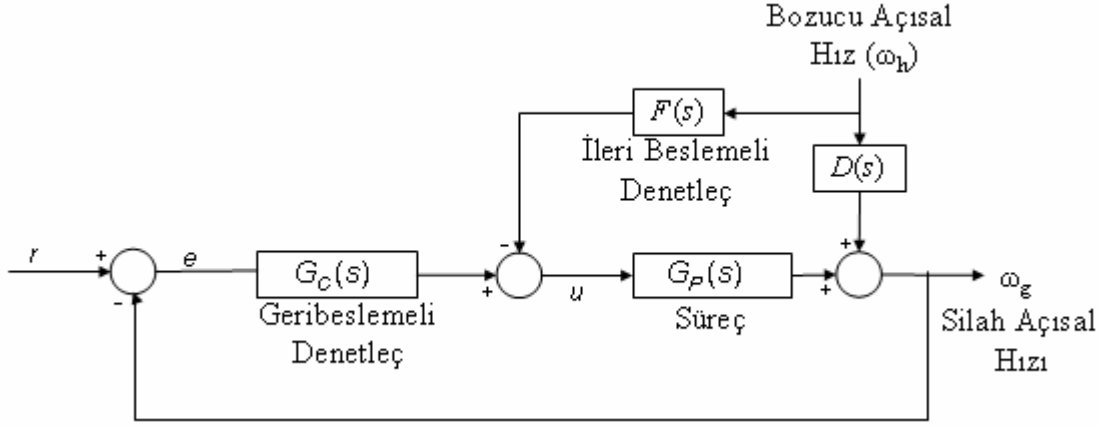
3.5. İleri Beslemeli Denetim

OTT denetim yöntemleri geribeslemeli denetim yöntemleridir. Eğer bir denetim sisteminde bozucu etkiler ölçülebiliyorsa, ölçülen bu sinyallerin denetim sisteminde kullanılması denetim başarımını artırır (Purdy, 1998). Hareket halindeki tanka, yoldan gelen bozucu etkilerin yok edilebilmesi için geribeslemeli denetim yöntemlerine ek olarak ileri beslemeli denetim de uygulanabilir. Tank gövdesine gelen bozucu etkiler, tank gövdesine yerleştirilen jirosjoplar ile ölçülebilmektedir. Bozucu etkiler ölçülebildiği için ileri beslemeli denetim uygulanabilir. İleri beslemeli denetimin özellikle hareket halindeki tanklarda silah denetim başarımını artırdığı benzetim çalışmalarında görülecektir.

İleri beslemeli denetimin sisteme nasıl uygulandığı Şekil 3.13'te verilmiştir. ω_h bozucu açısal hızı, ω_g silah açısal hızını, u denetlenen sisteme uygulanan denetim sinyalini, $D(s)$ bozucunun çıkışa etkisini belirleyen aktarım işlevi ve $F(s)$ ise ileri besleme denetlecidir. Şekil 3.13 incelendiğinde bozucu etkinin silah hızına etkisini yok etmek için ideal durumda ileri besleme denetlecinin Eş. 3.78'deki gibi olmalıdır.

$$F(s) = \frac{D(s)}{G_P(s)} \quad (3.78)$$

İleri besleme denetleci olarak, bozucu etkinin silaha etkisini belirleyen aktarım işlevinin ($D(s)$) süreç aktarım işlevine ($G_p(s)$) oranı alındığında bozucu etkinin silah hızına etkisi yok edilmiş olur (Purdy, 1998).



Şekil 3.13 İleri beslemeli denetim yapısı

3.6. Sürekli Zaman Genelleştirilmiş Öngörü Denetim (SÜGÖNDE)

Bu bölümde, Sürekli Zaman Genelleştirilmiş Öngörü Denetim (SÜGÖNDE) yöntemi incelenecektir. SÜGÖNDE yöntemi, GÖNDE (Genelleştirilmiş Öngörü Denetimi) yönteminden türetilmiş bir denetim yöntemidir. Bu yöntem, isminde de anlaşılacağı gibi sistem çıkışının gelecekteki değerlerinin belli bir zaman aralığında öngörülmesine dayanmaktadır. SÜGÖNDE için aşağıdaki sistem modelini ele alalım.

$$Y(s) = \frac{B(s)}{A(s)}U(s) + \frac{C(s)}{A(s)}V(s) \quad (3.79)$$

Bu eşitlikteki $A(s)$, $B(s)$ ve $C(s)$ Laplace tanım alanında tanımlanmış çokterimlilerdir. $Y(s)$, $U(s)$ ve $V(s)$ sırasıyla sistem çıkışı, sistem girişi ve sistemi etkileyen gürültüdür.

$C(s)$, tüm kökleri $j\omega$ -ekseninin sol tarafında olan bir tasarım çokterimlisidir. $C(s)$ 'in derecesi genelde $A(s)$ çokterimlisinin derecesine eşit veya bir eksik seçilir.

SÜGÖNDE denetim sinyali, aşağıda verilen maliyet işlevinin en küçük yapılması ile elde edilir.

$$J = \int_0^{T_f} [y^*(t+T) - w^*(t+T)]^2 dT + \lambda \int_0^{T_f} [u^*(t+T)]^2 dT \quad (3.80)$$

Bu eşitlikteki $y^*(t+T)$, $\omega^*(t+T)$ ve $u^*(t+T)$ sırasıyla öngörülen sistem çıkışı, istenilen çıkış ve giriştir. λ denetim ağırlıklandırma çarpanı olarak adlandırılır ve denetim sinyalinin etkinliğini belirleyen bir parametredir ve genellikle sıfır olarak alınır. T_f öngörü ufku olarak adlandırılır ve sistem çıkışının geçici tepkisini etkileyen bir parametredir. Küçük T_f değerleri için çıkış tepkisi daha hızlıdır.

Sistem çıkışı ve sistem çıkışının türevleri kullanılarak kırılmış Maclaurin dizisinden sistem çıkışının T kadar sonraki değeri

$$\hat{y}(t+T) = y(t) + \sum_{k=1}^{N_y} y_k(t) \frac{T^k}{k!} \quad (3.81)$$

şeklinde yazılabilir (Demircioğlu, 1991). Bu eşitlikte N_y öngörme derecesi olarak adlandırılır ve $y_k(t)$, $y(t)$ 'nin k . dereceden türevidir. Buna göre, sistem çıkışının T kadar sonraki değerinin öngörülebilmesi için sistem çıkışının türevlerinin bilinmesi gerekir. Türev alma işlemi, gürültülerin etkisini arttıracığından türev alma yerine çıkışın öykünlüğü (emulated) değerleri kullanılabilir (Demircioğlu, 1991).

Sistem modelinde çıkışın Laplace alanında k . dereceden türevi

$$Y_k(s) = s^k Y(s) = \frac{s^k B(s)}{A(s)} U(s) + \frac{s^k C(s)}{A(s)} V(s) \quad (3.82)$$

şeklinde yazılabilir. s^k ile çarpılmış gürültü aktarım işlevi uygun olmayan (improper) bir terim olduğu için iki parçaya ayrıştırılarak biri uygun (proper), diğeri uygun olmayan iki terim elde edilebilir.

$$\frac{s^k C(s)}{A(s)} = E_k(s) + \frac{F_k(s)}{A(s)} \quad (3.83)$$

Buna göre Eş. 3.82 yeniden yazıldığında

$$Y_k(s) = \frac{s^k B(s)}{A(s)} U(s) + E_k(s) V(s) + \frac{F_k(s)}{A(s)} V(s) = Y_k^*(s) + E_k^*(s) \quad (3.84)$$

şeklinde elde edilir. Bu eşitlikteki

$$Y_k^*(s) = \frac{s^k B(s)}{A(s)} U(s) + \frac{F_k(s)}{A(s)} V(s) \quad (3.85)$$

$$E_k^*(s) = E_k V(s) \quad (3.86)$$

şeklindedir. $Y_k^*(s)$ öykünülmüş çıkış ve $E_k^*(s)$ ise hatadır. $E_k^*(s)$ 'in hesaplanması mümkün değildir. Öykünülmüş çıkışta (Eş. 3.85) gürültü ($V(s)$) olduğundan ve bu gürültü ölçülemediğinden sistem modeli (Eş. 3.79) ve Eş. 3.85 kullanılarak öykünülmüş çıkış

$$Y_k^*(s) = \frac{E_k B}{C} U(s) + \frac{F_k}{C} Y(s) \quad (3.87)$$

şeklinde sistem giriş ve çıkışına bağlı olarak elde edilebilir. $E_k B/C$ uygun olmayan bir aktarım işlevi olduğundan

$$\frac{E_k B}{C} = H_k + \frac{G_k}{C} \quad (3.88)$$

şeklinde, bir uygun diğeri uygun olmayan iki aktarım işlevine ayrıştırılabilir. Bu durumda öykünülmüş çıkış

$$Y_k^*(s) = H_k U(s) + \frac{G_k}{C} U(s) + \frac{F_k}{C} Y(s) = H_k(s) U(s) + Y_k^0(s) \quad (3.89)$$

şeklinde olur. Bu eşitlikteki $Y_k^0(s)$

$$Y_k^0(s) = \frac{G_k}{C} U(s) + \frac{F_k}{C} Y(s) \quad (3.90)$$

şeklinde ve öykünülmüş çıkışın gerçekleştirilebilir kısmına karşılık gelmektedir. SÜGÖNDE yönteminde denetim sinyali türevlerinin üzerinde kısıtlama yapılır. Yani, $k > N_u$ için

$$u_k(t) = \frac{d^k u(t)}{dt^k} = 0 \quad (3.91)$$

olarak kabul edilir. N_u denetim derecesi olarak adlandırılır. Bu durumda öykünülmüş çıkış (Eş. 3.89), denetim derecesi gözönünde bulundurularak zaman alanında yeniden yazıldığında

$$y_k^*(t) = \mathbf{h}_k \mathbf{u} + y_k^0(t) \quad (3.92)$$

şeklinde elde edilir. Bu eşitlikteki \mathbf{h}_k satır vektörü, H_k çokterimlisinin katsayılarını; \mathbf{u} sütun vektörü ise giriş sinyallerinin türevini göstermektedir. \mathbf{u} sütun vektörü, denetim sinyali ve denetim sinyalinin N_u . dereceye kadar olan türevlerini içermektedir. Yani \mathbf{u} vektörü

$$\mathbf{u} = [u(t) \quad u_1(t) \quad \dots \quad u_{N_u}(t)]^T \quad (3.93)$$

şeklindedir. Elde edilen öykünülmüş çıkış (Eş. 3.92) kullanılarak sistemin T kadar sonraki çıkışı için Eş. 3.81 yeniden düzenlendiğinde

$$y^*(t+T) = T_{N_y} H u + T_{N_y} Y^0 \quad (3.94)$$

elde edilir. Bu eşitlikteki T_{N_y} , Y^0 ve H

$$T_{N_y} = \begin{bmatrix} 1 & T & \frac{T^2}{2!} & \dots & \frac{T^{N_y}}{N_y!} \end{bmatrix} \quad (3.95)$$

$$Y^0 = [y(t) \quad y_1^0(t) \quad \dots \quad y_{N_y}^0(t)]^T \quad (3.96)$$

$$H = \begin{bmatrix} h_0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ h_1 & h_0 & 0 & \dots & 0 \\ h_2 & h_1 & h_0 & \dots & \cdot \\ h_3 & h_2 & h_1 & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & h_0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ h_{N_y} & \cdot & \cdot & \dots & h_{N_y-N_u} \end{bmatrix} \quad (3.97)$$

şeklindedir. H matrisindeki h_k 'ler açık döngü sisteminin $(B(s)/A(s))$ Markov parametreleridir.

SÜGÖNDE yönteminde, istenilen çıkışın gelecekteki değerlerinin sabit olduğu ve şu anki değere eşit olduğu varsayılmaktadır. Bu durumda istenilen çıkışın gelecekteki değerleri

$$w^*(t+T) = T_{N_y} w \quad (3.98)$$

şeklinde yazılabilir. Bu eşitlikteki w

$$w = [w(t) \quad 0 \quad \dots \quad 0]^T \quad (3.99)$$

olarak ifade edilir. Denetim sinyalinin gelecekteki değerleri

$$u^*(t+T) = T_{N_u} u \quad (3.100)$$

biçimindedir. Bu eşitlikteki T_{N_u}

$$T_{N_u} = \begin{bmatrix} 1 & T & \frac{T^2}{2!} & \dots & \frac{T^{N_u}}{N_u!} \end{bmatrix} \quad (3.101)$$

şeklindedir. Elde edilen öngörölmüş sistem çıkışı (Eş. 3.94), sistem girişi (Eş. 3.100) ve istenilen sistem çıkışı (Eş. 3.98) maliyet işlevinde (3.80) yerine konulup maliyet işlevinin u 'ya göre en küçük yapılmasıyla

$$u = K(w - Y^0) \quad (3.102)$$

şeklinde bulunur. Bu eşitlikteki K

$$K = (H^T T_y H + \lambda T_u)^{-1} H^T T_y \quad (3.103)$$

şeklindedir. Bu eşitlikte geçen T_y ve T_u matrisleri

$$T_y = \int_0^{T_f} T_{N_y}^T T_{N_y} dT \quad (3.104)$$

$$T_u = \int_0^{T_f} T_{N_u}^T T_{N_u} dT \quad (3.105)$$

biçimindedir. Sisteme uygulanacak denetim sinyali

$$u(t) = k[w - Y^0] \quad (3.106)$$

şeklinde yazılabilir. Bu eşitlikteki k , Eş. 3.103'teki K matrisinin ilk satırıdır. Eş. 3.106'da verilen denetim sinyali Laplace alanında yazıldığında

$$U(s) = gW(s) - \frac{G_C(s)}{C(s)} U(s) - \frac{F_C(s)}{C(s)} Y(s) \quad (3.107)$$

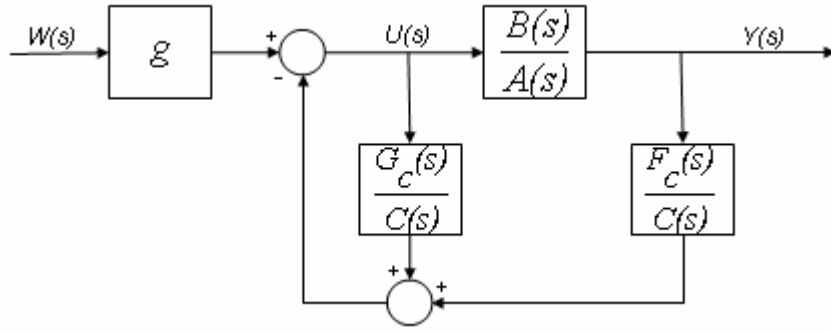
şeklinde elde edilir. Bu eşitlikteki g kazancı ile G_c ve F_c çokterimlileri

$$g = k[1 \ 0 \ \dots \ 0]^T \quad (3.108)$$

$$G_C(s) = \sum_{k=0}^{N_y} k_{k+1} G_k(s) \quad (3.109)$$

$$F_C(s) = \sum_{k=0}^{N_y} k_{k+1} F_k(s) \quad (3.110)$$

şeklindedir. k_k , k vektörünün k . elemanını göstermektedir. Eş. 3.107'de verilen SÜGÖNDE geribeslemeli denetim yapısı Şekil 3.14'teki gibidir (Demircioğlu, 1991)



Şekil 3.14 SÜGÖNDE kapalı döngü yapısı

4. BENZETİM SONUÇLARI

4.1. Giriş

Bu bölümde, tank silahının yan ve yükseliş eksenlerinin Bölüm 3'te anlatılan yöntemlerle denetimine ait benzetim sonuçları verilmektedir. Benzetim çalışmalarında, Bölüm 2'de elde edilen ve doğrusal olmayan etkilerin de dahil olduğu tankın yan ve yükseliş eksenini modelleri kullanılacaktır. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki bölümlerde her yöntem için ayrı ayrı verilecektir. Benzetim sonuçlarında denetim yönteminin başarımı, kullanıcı tarafından verilen hız isteklerinin doğru uygulanması ve bozucu etkilerin yok edilebilmesi ile ölçülür. Silahın istenilen hıza en kısa sürede (1 sn'den küçük) ve olabilecek en küçük aşma (overshoot) ile ulaşabilmesi hedeflenmektedir. Ayrıca, tank hareket halinde iken yoldan gelen bozucu etkilerin silaha etkisinin en az olması istenmektedir. Yoldan gelen bozucu etkiler, tank gövdesine yerleştirilen jiroskoplar ile ölçülür. Bozucu etkilerin yok edilebilmesi kararlılaştırma oranı (stabilisation ratio) ile ölçülür. Bozucu açısal hız ω_h ve silah hızı ω_g ile ifade edilirse kararlılaştırma oranı (KO) aşağıdaki gibi elde edilir:

$$KO = 20 \log \left(\frac{rms(\omega_h)}{rms(\omega_g)} \right) \text{ dB} \quad (4.1)$$

Kararlılaştırma oranı, Ana Muharebe Tankları (AMT)'nda tank gövdesinden gelen bozucu etkilerin yok edilebilmesi ile ilgili bir ölçüdür ve ideal durumda sonsuz olması beklenir. Yani, ideal durumda tank gövdesinden gelen bozucu etki ne olursa olsun silah hızının 0 olması beklenir. Bu durumda Eş. 4.1'e göre KO sonsuz olur (Purdy, 1998).

4.2. OTT Denetim Benzetim Sonuçları

Bu bölümde, tank silahının yan ve yükseliş eksenlerinin OTT ile denetimine ait benzetim sonuçları verilmektedir. Benzetim çalışmalarında, OTT denetim yöntemlerinin başarımları karşılaştırıldıktan sonra, en iyi sonucu veren yöntemde geribeslemeli denetime ek olarak ileri beslemeli denetim uygulanacaktır. Bu denetim yönteminde bozucu hızın etkisinin yok edilmesi incelenecektir. İleri beslemeli denetimin, özellikle bozucu etkilerin yok edilmesinde, sistem başarımını arttırdığı görülecektir.

Benzetim çalışmalarında aksi belirtilmedikçe istenilen çıkış ağırlıklandırma çarpanı $b=1$, uysallaştırma çarpanı $N=10$ alınmıştır. Örnekleme aralığı 0.01 sn seçilmiştir.

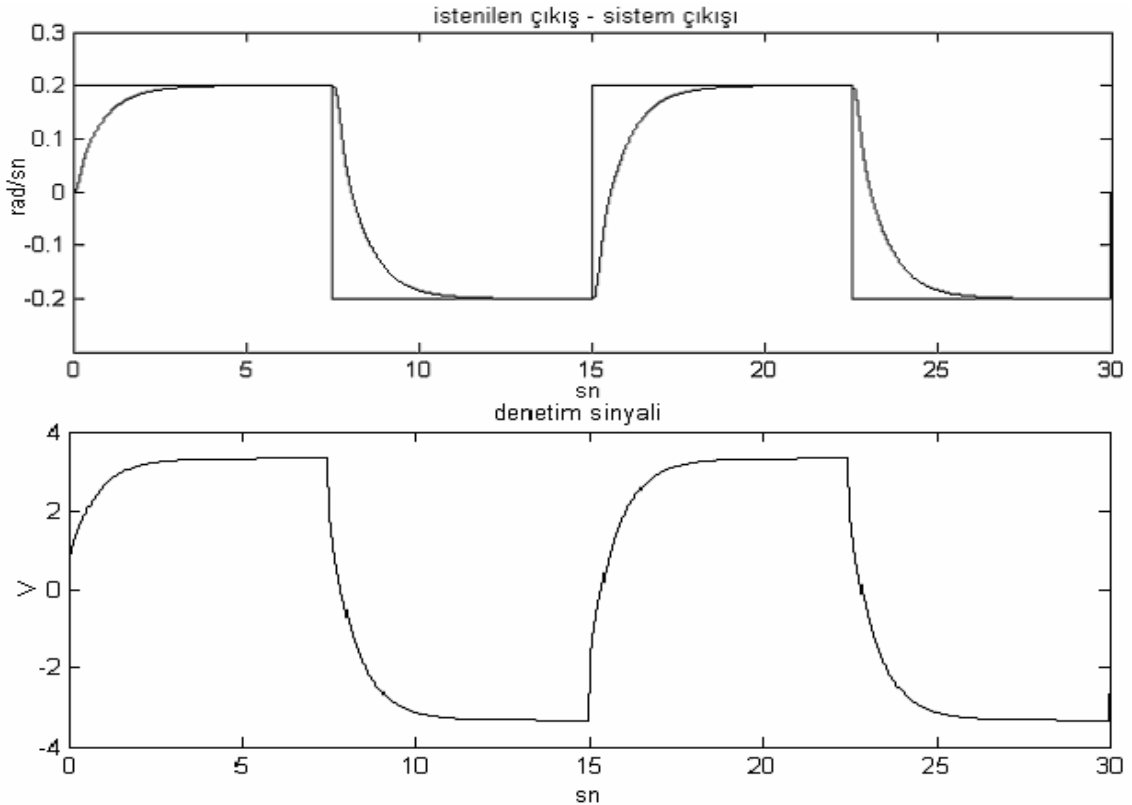
4.2.1. Ziegler-Nichols Basamak Tepkisi Yöntemi Benzetim Sonuçları

Tank silah sistemine, Ziegler-Nichols basamak tepkisi yöntemiyle ayarlanan OTT denetleci uygulandığında alınan sonuçlar bu bölümde verilecektir. Ayarlama aşamasında basamak tepkisi elde etmek için birim basamak giriş olarak uygulanmıştır.

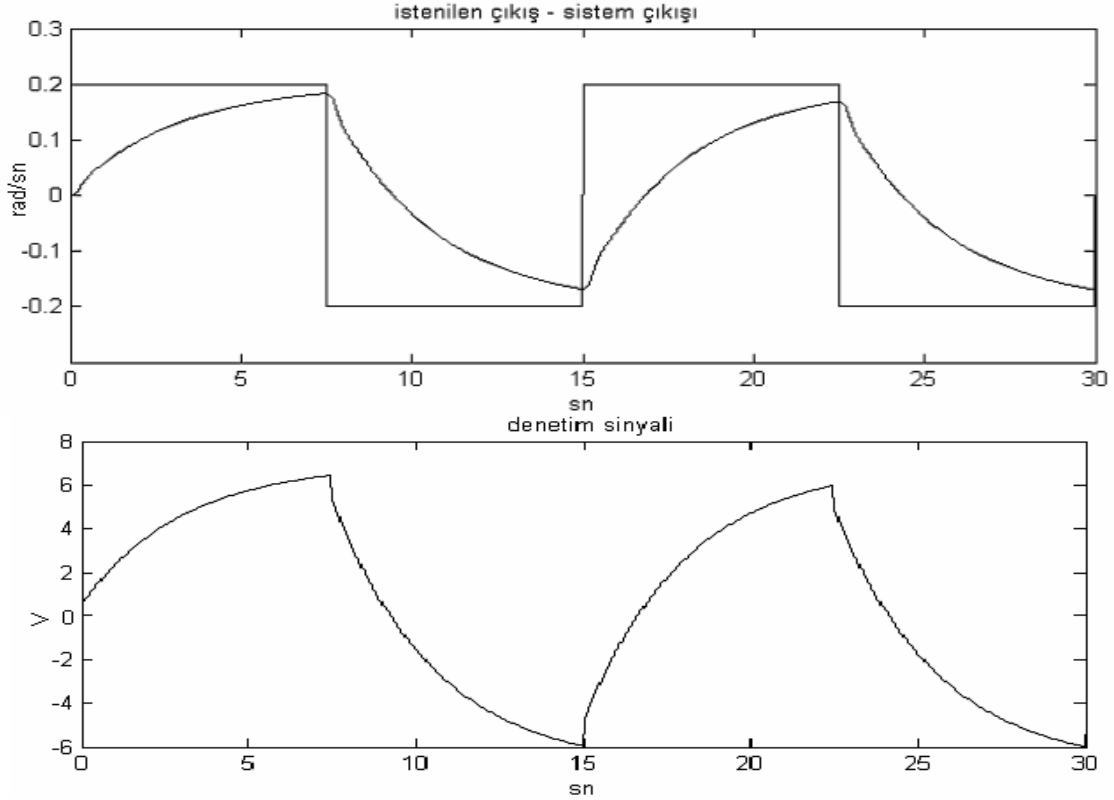
Tankın yan ve yükseliş eksenleri için BDGZ süreç modeli parametreleri ve OTT parametreleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. İstenilen çıkış ve denetim sinyali grafikleri Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Ziegler-Nichols basamak tepkisi yöntemi benzetim sonuçları

Eksen	BDGZ Süreç Modeli			OTT Parametreleri		
	a	T	L	K	T_i	T_d
Yükseliş	0.352	0.229	0.083	3.409	0.166	0.042
Yan	0.459	0.245	0.113	2.614	0.226	0.057



Şekil 4.1 Yükseliş eksenini için Z-N basamak tepkisi yöntemi



Şekil 4.2 Yan eksen için Z-N basamak tepkisi yöntemi

Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de Z-N basamak tepkisi yöntemi sonuçları görülmektedir. Şekillerden de görüleceği gibi Z-N basamak tepkisi yöntemi aşmasız bir tepki vermekte, ancak istenilen hıza çok geç ulaşılmaktadır. Tank atış denetim sistemleri için bu sürenin 1 sn'den daha küçük olması beklenmektedir. Tepkinin yavaş olması, Z-N basamak tepkisi yönteminde BDGZ süreç modeline göre elde edilen oransal kazancın küçük olmasından kaynaklanmaktadır. Tepkinin hızlı olması için oransal kazancın artırılması gerekmektedir. Z-N basamak tepkisi yönteminin, tank silahının denetiminde uygun olmadığı söylenebilir.

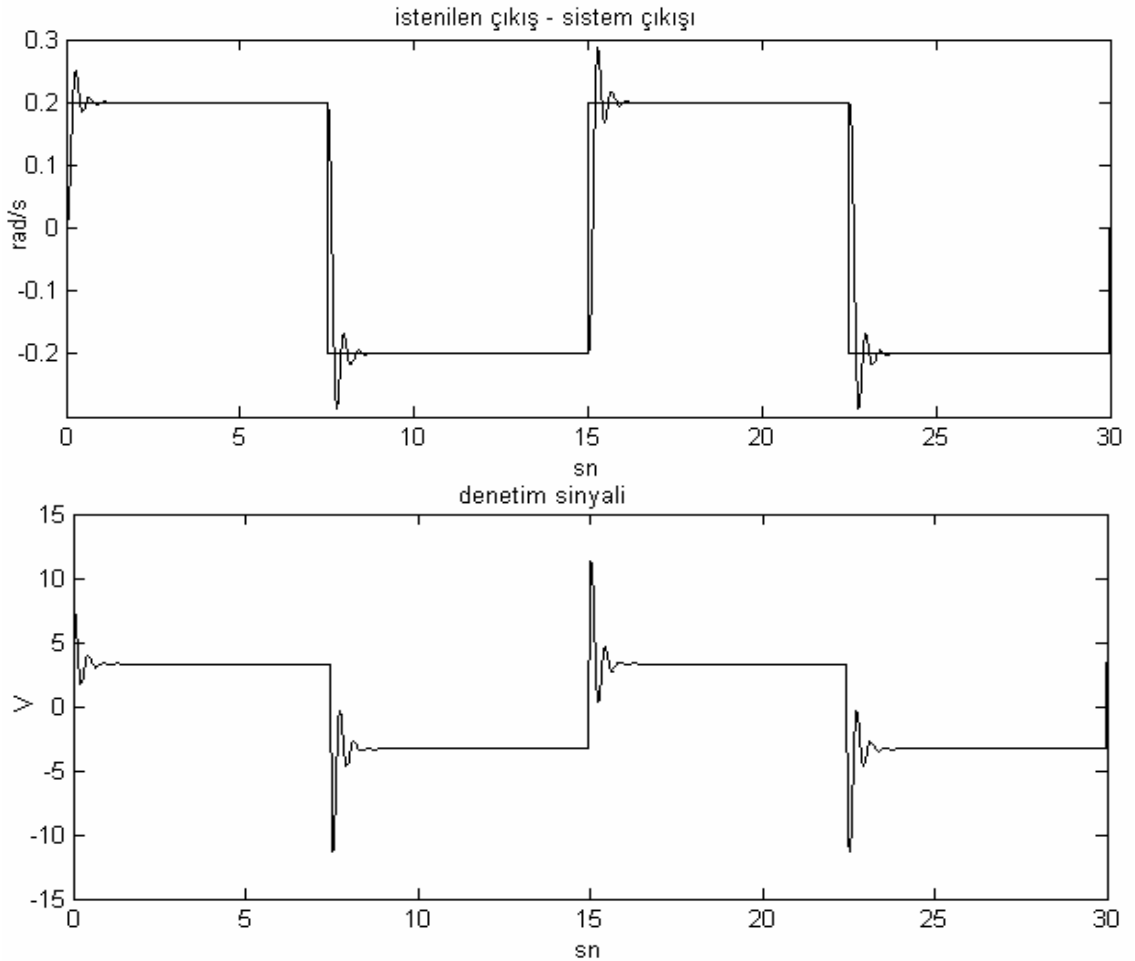
4.2.2. Ziegler-Nichols Sıklık Tepkisi Yöntemi Benzetim Sonuçları

Tank silah sistemine Ziegler-Nichols sıklık tepkisi yöntemiyle ayarlanan OTT deneteci uygulandığında alınan sonuçlar bu bölümde verilecektir. Ayarlama aşamasında kritik kazanç ve sıklığı bulmak için histeresiz röle kullanılmıştır. Röle genliği 1 alınmıştır. Röleli geribesleme döngüsünden elde edilen sıklık ve kazancın, kritik nokta sıklık ve kazancına olabildiğince yakın olmasını sağlamak için, röle histeresisi sıfıra yakın bir değer seçilmiştir. Benzetim çalışmalarında ortam gürültüsüz olduğu için röle histeresisini sıfıra yakın seçmenin bir sakıncası yoktur.

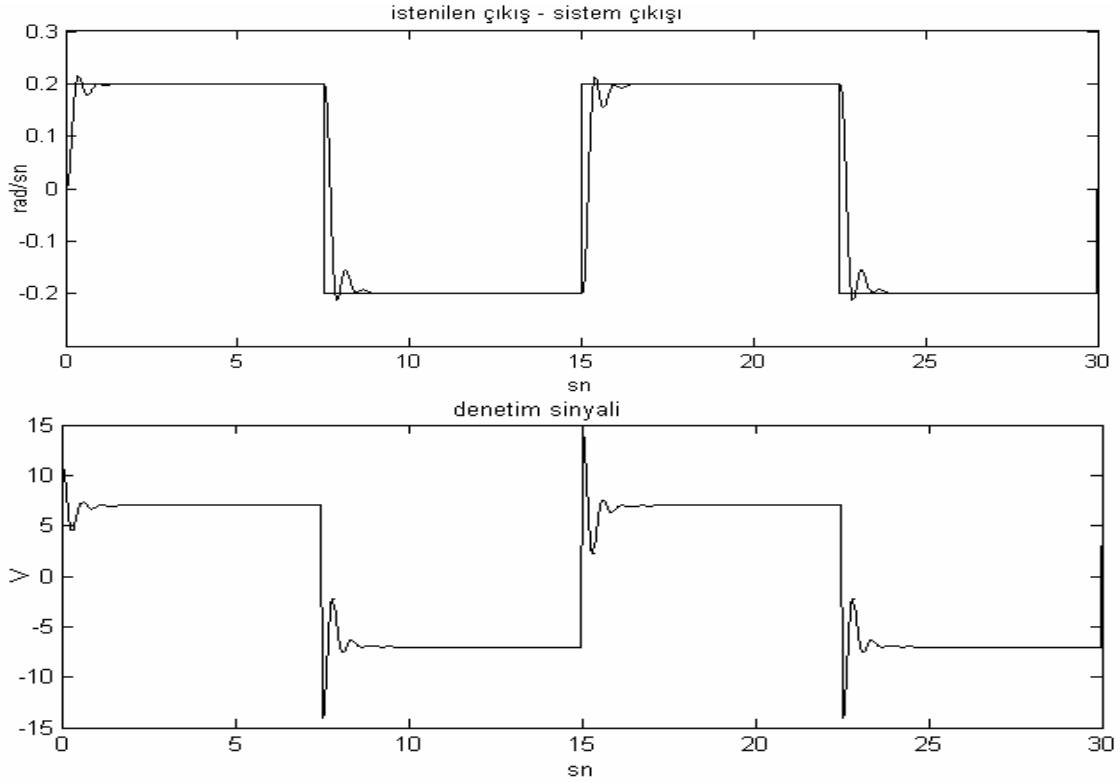
Tankın yan ve yükseliş eksenleri için kritik nokta ve OTT parametreleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. İstenilen çıkış ve denetim sinyali grafikleri Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’tedir.

Çizelge 4.2 Ziegler-Nichols sıklık tepkisi yöntemi benzetim sonuçları

Eksen	Kritik Nokta Parametreleri		OTT Parametreleri		
	K_u	T_u	K	T_i	T_d
Yükseliş	56.338	0.397	33.803	0.199	0.048
Yan	83.766	0.548	50.260	0.274	0.066



Şekil 4.3 Yükseliş Eksenini için Z-N sıklık tepkisi yöntemi



Şekil 4.4 Yan eksen için Z-N sıklık tepkisi yöntemi

Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te Z-N sıklık tepkisi yöntemi sonuçları görülmektedir. Çizelge 4.2'ten de görüldüğü gibi, Ziegler-Nichols basamak tepkisi yöntemine göre oransal kazançlar artmıştır. Bu daha hızlı fakat aşmalı ve salınımlı bir tepkiye neden olmuştur. Yükseliş ekseninde %25 ve yan eksende %8 aşma meydana gelmiştir. İstenilen hıza yükseliş ekseninde 2 sn'de, yan eksende 2.5 sn'de ulaşılmıştır. Tank silah denetimi için Z-N sıklık tepkisi yöntemi, Z-N basamak tepkisi yöntemine göre daha iyi sonuç vermektedir. Tank silah sistemlerinin denetiminde salınım istenmediği için aşma seviyeleri ve salınım dikkate alındığında Z-N sıklık yönteminin de uygun olmadığı görülmektedir.

4.2.3. Genlik ve Evre Payı Ayarlayıcıları İçin Benzetim Sonuçları

Bu bölümde genlik-evre payı ayarlayıcılarıyla elde edilen benzetim sonuçları verilmektedir. Ayarlama aşamasında Nyquist eğrisi üzerinde herhangi bir noktadaki kazanç ve sıklığı bulmak için histeresisli röle kullanılmıştır. Röle genliği 1, histeresis genişliği 0.02 alınmıştır.

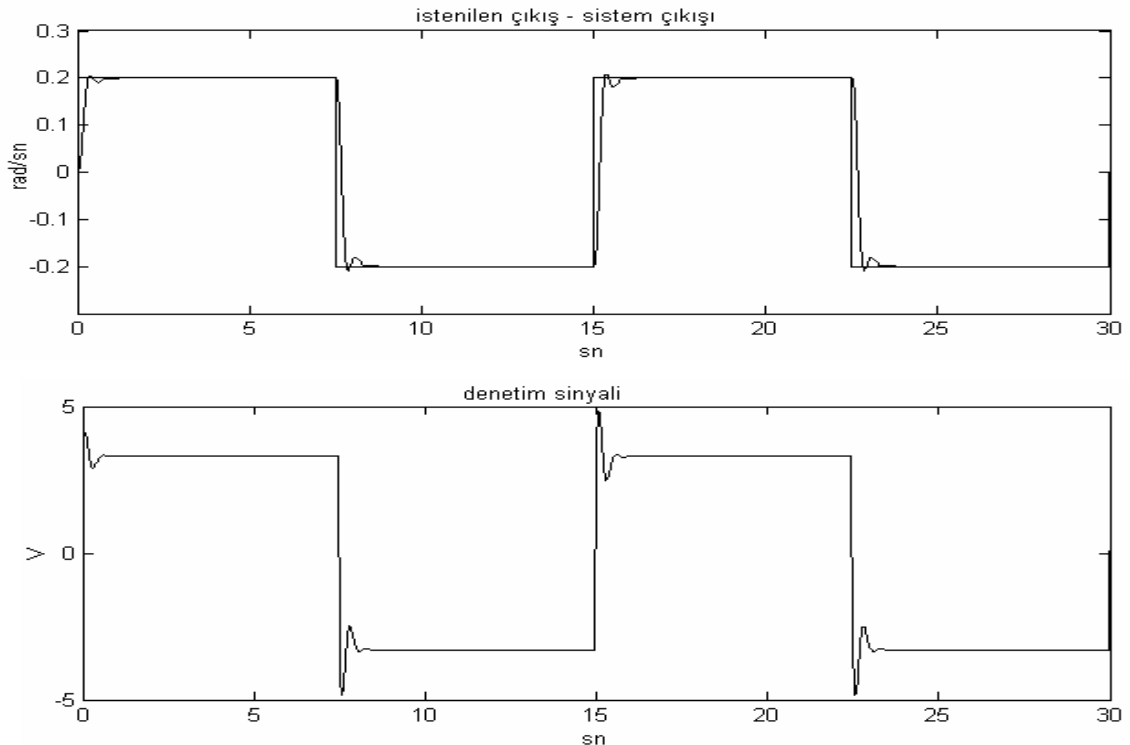
Genlik-evre payı ayarlayıcılarında seçilmesi gereken üç tane tasarım parametresi vardır. Bunlar genlik payı, evre payı ve tümlev ile türev zamanı arasındaki ilişkiyi veren sabit α 'dır. Yan ve yükseliş eksenleri için seçilen genlik ve evre payı

değerleri Çizelge 4.3'te verilmiştir. α ise 0.25 olarak alınmıştır. Tankın yan ve yükseliş eksenleri için Nyquist eğrisi üzerinde kestirilen noktaya ait parametreler ve OTT parametreleri Çizelge 4.3'te verilmiştir. İstenilen çıkış ve denetim sinyali grafikleri Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'dadır.

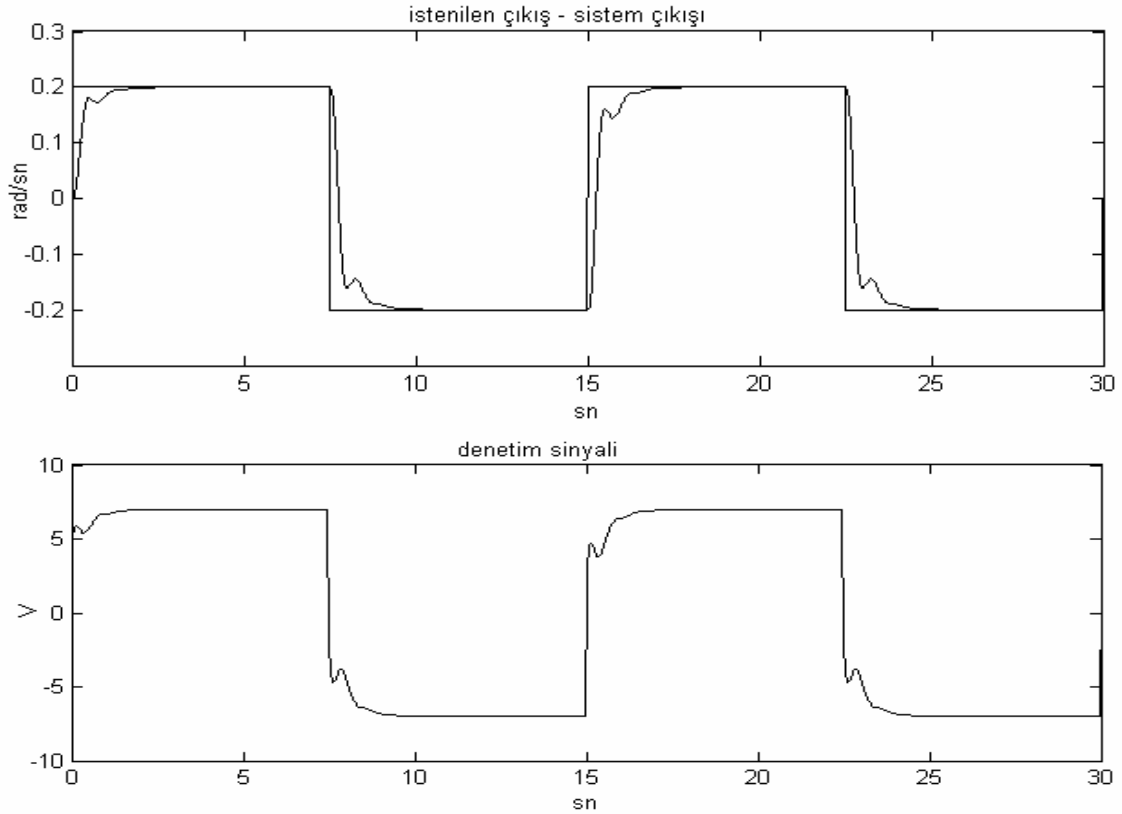
Çizelge 4.3 Genlik-evre payı ayarlayıcısı için benzetim sonuçları

Eksen	İstenilen Genlik ve Evre Payları		Nyquist Eğrisi Üzerinde Seçilen Noktaya Ait Parametreler		OTT Parametreleri		
	A_m	φ_m	φ_p	r_p	K	T_i	T_d
Yükseliş	2	45°	32.97°	0.029	16.98	0.193	0.048
Yan	2	45°	45.18°	0.022	22.62	0.229	0.057

Bu yöntemin amacı, yukarıda belirtilen üç tasarım parametresi yardımıyla, açık döngü sistemin kritik noktasını Nyquist eğrisi üzerinde istenilen yere taşımaktır. Kritik noktanın gideceği yer kullanıcı tarafından seçildiği için bu yöntemin başarımı beklendiği gibi, klasik Ziegler-Nichols yöntemlerine göre daha iyidir. Şekil 4.5 ve Şekil 4.6 incelendiğinde sistem çıkışı istenilen hıza yükseliş ekseninde 1.5 sn'de, yan ekseninde 3 sn'de ulaşmıştır. Aşmalar ve salınımlar Ziegler-Nichols sıklık tepkisi yöntemine göre daha küçük boyuttadır.



Şekil 4.5 Yükseliş eksenini için genlik-evre payı ayarlayıcısı



Şekil 4.6 Yan eksen için genlik-evre payı ayarlayıcısı

4.2.4. Baskın Kutup Tasarımı İçin Benzetim Sonuçları

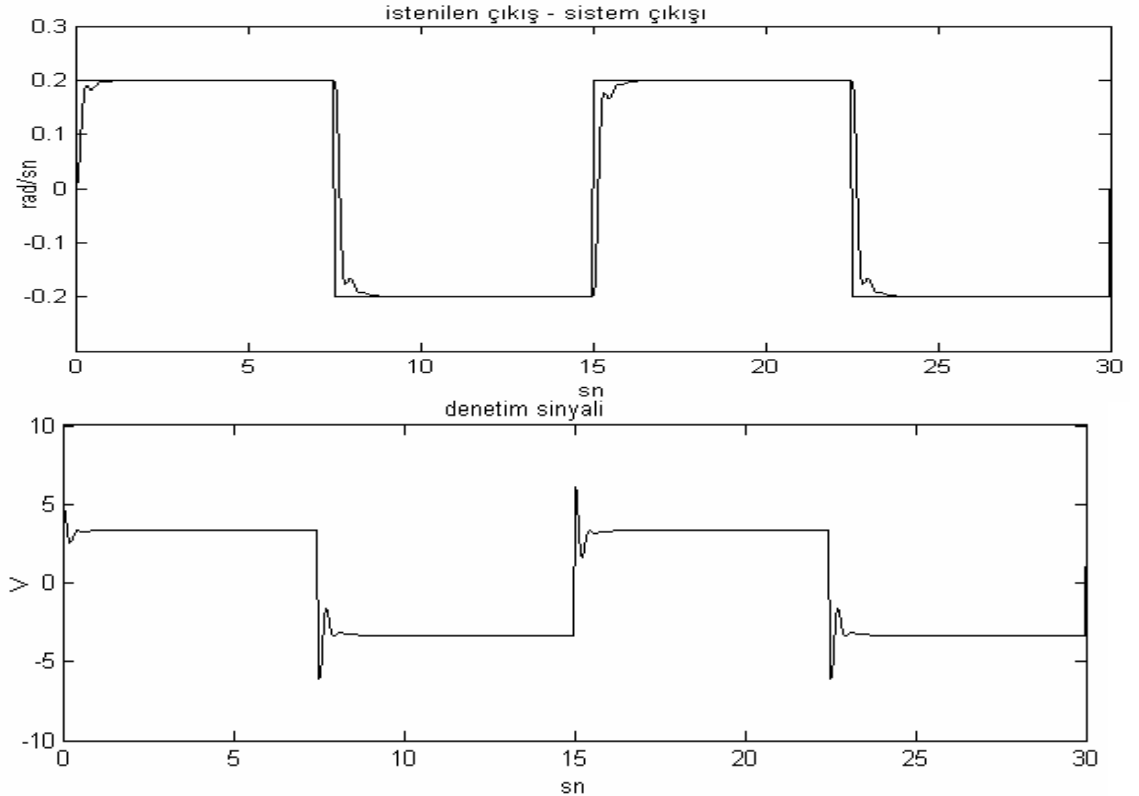
Bu bölümde, baskın kutup tasarımıyla bulunan denetleçlerin benzetim çalışmalarındaki başarımları incelenecektir. Baskın kutup tasarımında ayarlama için Nyquist eğrisi üzerinde birbirine yakın iki noktanın bilinmesi gerekir. Yani açık döngü sistemin iki farklı sıklık için sıklık tepkisinin değeri bilinmelidir. Bu iki değeri kestirmek için iki farklı yol vardır: Birinci yolda histeresis ve genlikleri arasındaki ilişki farklı iki röle kullanılarak, sistemin Nyquist eğrisi üzerinde iki farklı sıklıktaki değeri bulunmakta ve bu sıklıklar tasarım sıklıkları olarak kabul edilip denetleç parametreleri hesaplanmaktadır. Röle kullanılarak ayarlama yapmak için, sistemin röleli geribesleme döngüsünde kararlı salınımlar göstermesi şarttır. Bu yolun zayıf yönü sıklık değerlerinin doğrudan tasarımcı tarafından belirlenememesidir. Tasarımcı ancak röleleri değiştirerek tepki hızını dolaylı yoldan belirleyebilmektedir. Bir diğer yol ise, denetlenecek sistem doğrusal ve kararlı bir sistem olması durumunda, bu sistemin girişine istenilen tasarım sıklıklarında sinüsel sinyaller verip, sistem çıkışından sistemin sıklık tepkisinin aldığı değerlerin hesaplanmasıdır. Bu bölümde yapılan benzetim çalışmalarında ikinci yol kullanılmıştır.

Yan ve yükseliş eksenleri için seçilen tasarım parametreleri; ω_1 ve ω_2 (baskın kutupların sıklığı) sıklıkları, sönüm oranları (ζ) ve algoritmanın bulduğu denetleç parametreleri Çizelge 4.4'te verilmiştir. Tümler ve türev zamanları arasındaki ilişkiyi belirleyen bir diğer tasarım parametresi olan α , 0.25 olarak alınmıştır.

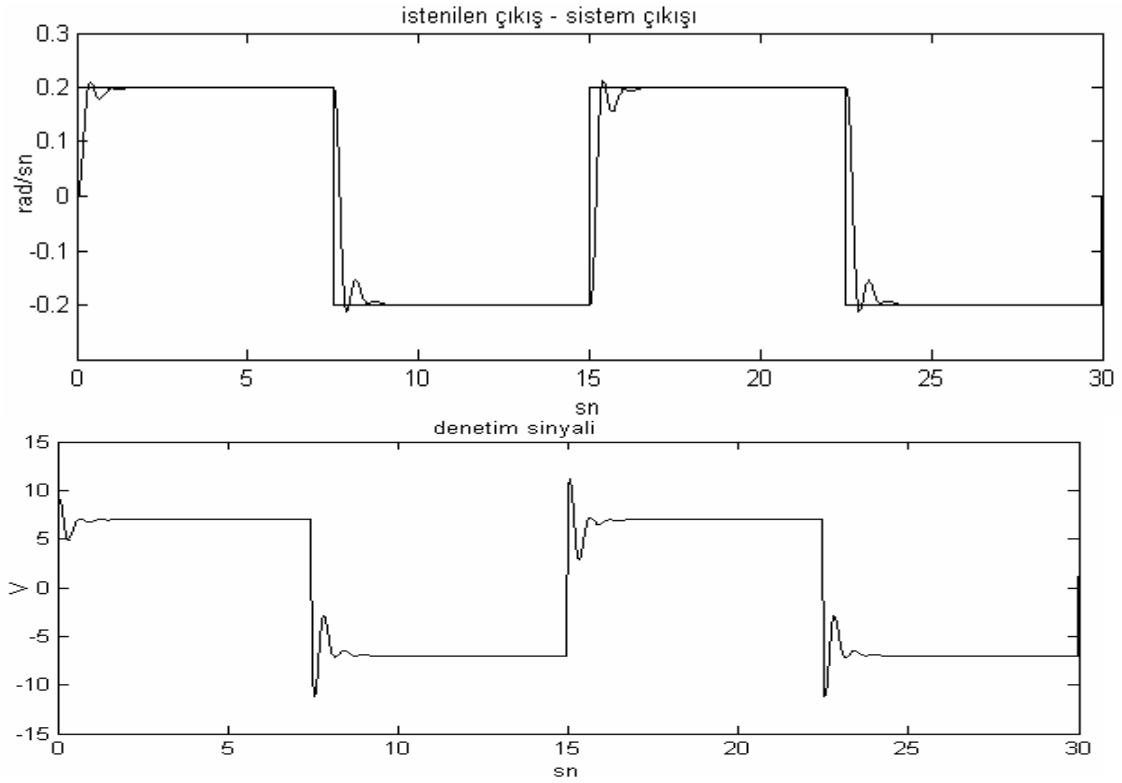
Çizelge 4.4 Baskın kutup tasarımı için benzetim sonuçları

Eksen	Tasarım Parametreleri			OTT Parametreleri		
	ω_2	ω_1	ζ	K	T_i	T_d
Yükseliş	20	19.5	0.70	21.766	0.265	0.066
Yan	15	14.5	0.75	41.132	0.265	0.066

Baskın kutup tasarımı yöntemiyle elde edilen denetim sonuçları Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de görülmektedir. Grafiklerden görüldüğü gibi istenilen hıza 2 sn'de ulaşılmıştır. Yükseliş ekseninde aşmasız, yan ekseninde çok düşük aşmalı (%3.5) ve salınımlı tepki elde edilmiştir.



Şekil 4.7 Yükseliş eksenini için baskın kutup tasarımı yöntemi

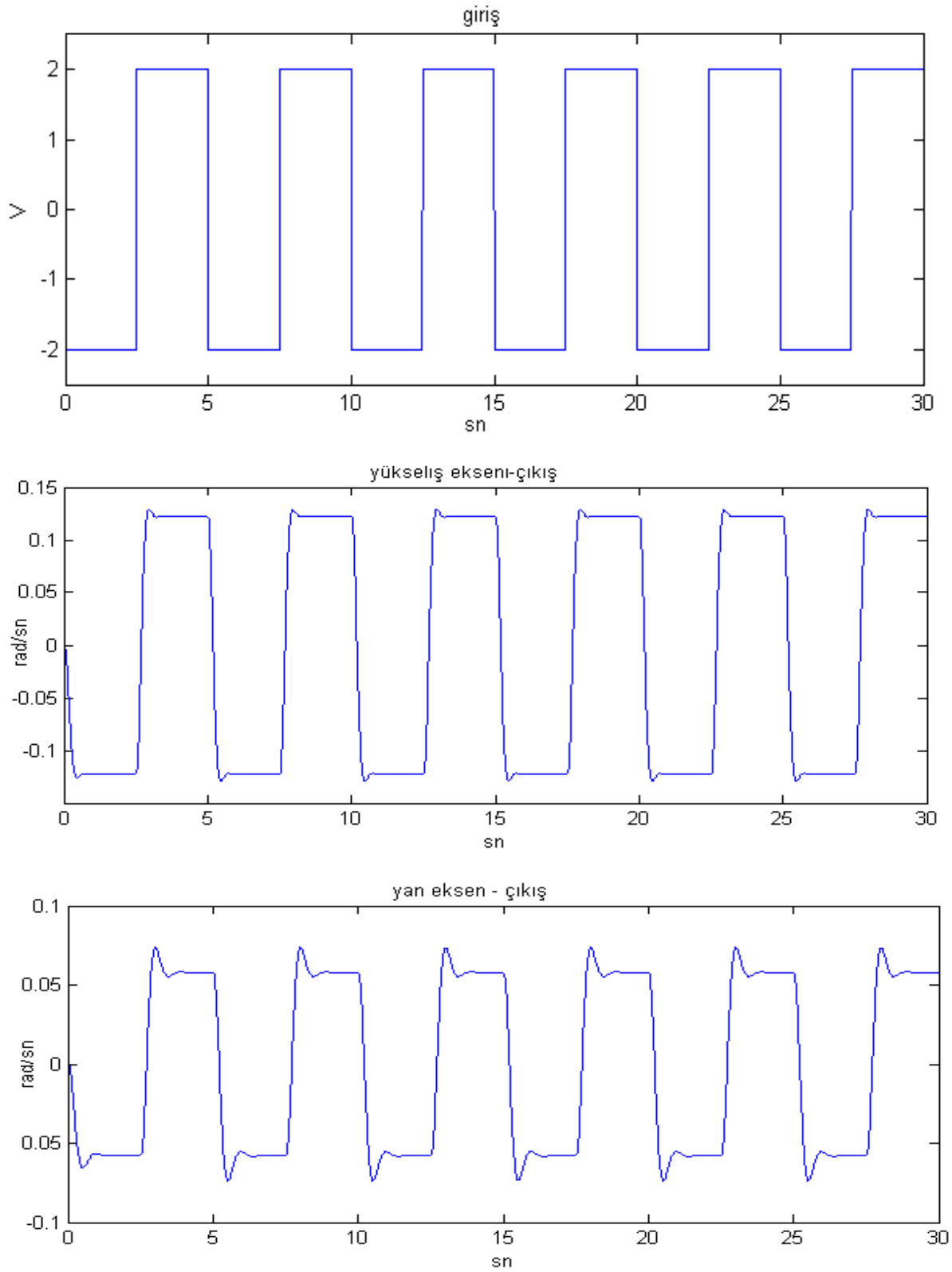


Şekil 4.8 Yan eksen için baskın kutup tasarımı yöntemi

4.2.5. Kutup Yerleştirme Tasarımı İçin Benzetim Sonuçları

Bu bölümde kutup yerleştirme metodu ile elde edilen benzetim sonuçları sunulmaktadır. Kutup yerleştirme metodunda OTT denetim yapmak için 2. dereceden bir sistem modeline ihtiyaç duyulmaktadır. Denetlenen sistem 3. dereceden olduğu için Bölüm 3.4'te anlatılan şekilde SZYEKK ile sistemin 2. dereceden modeli elde edilebilir.

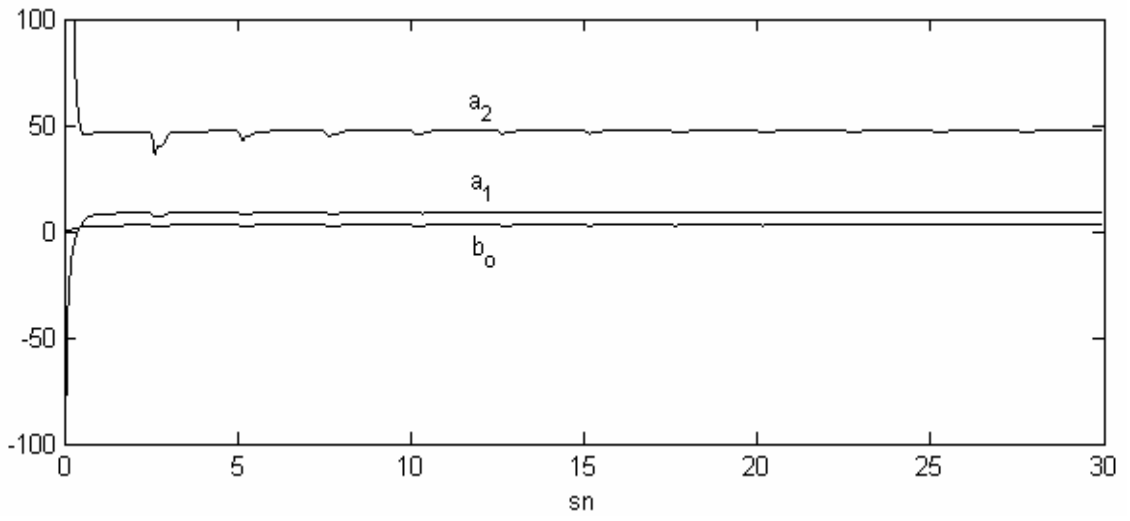
SZYEKK için parametre kestirim vektörünün başlangıç değerleri, bilgi matrisinin başlangıç değeri ve unutma çarpanı 0 olarak alınmıştır. Kestiricinin başarımını etkileyen en önemli parametre olan süzgeç çokterimlisinin seçiminde, düşük sıklıklarda süzgecin sıklık tepkisinin sistemin sıklık tepkisine yakın olmasına dikkat edilmelidir. Bölüm 2'de elde edilen sistem modellerine 30 sn süreyle 0.2 Hz sıklıkta kare dalga uygulanarak çıkış tepkileri elde edilmiştir. Uygulanan giriş ve elde edilen çıkış tepkileri Şekil 4.9'da verilmiştir. Bu giriş-çıkış verileri SZYEKK'da kullanılmıştır. Elde edilen model parametrelerine ait grafikler Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de, kullanılan süzgeç çokterimlileri ve elde edilen ikinci derece sistem modelleri Çizelge 4.5'te verilmiştir.



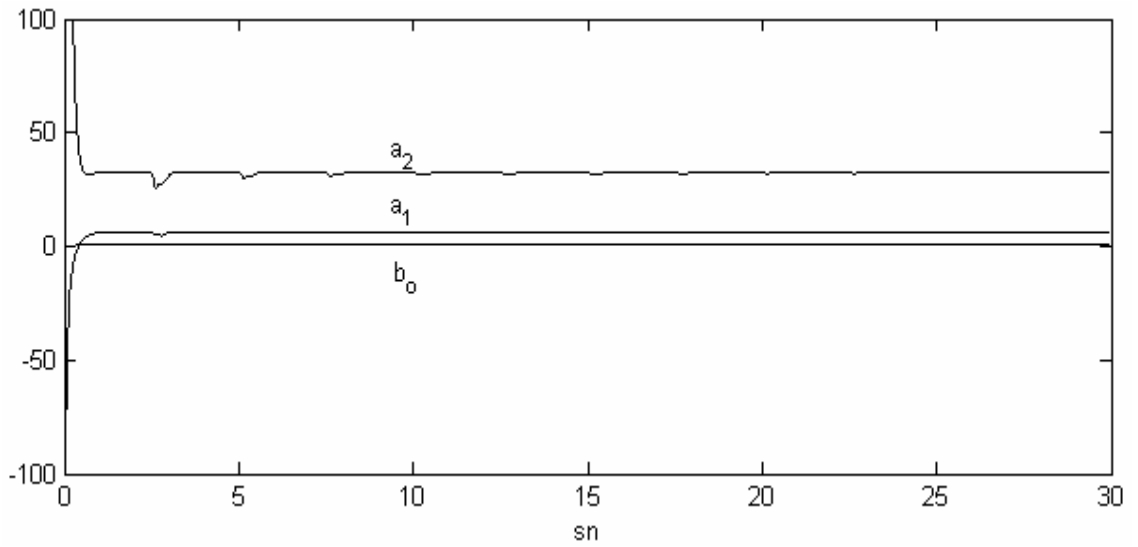
Şekil 4.9 Kullanılan giriş – çıkış sinyalleri

Çizelge 4.5 Kullanılan süzgeç çokterimlileri ve elde edilen 2.derece sistem modelleri

Eksen	Süzgeç çokterimlisi	2.derece sistem modeli
Yükseliş	$(s+12)^2$	$\frac{2.878}{s^2 + 8.828s + 47.320}$
Yan	$(s+18)^2$	$\frac{0.931}{s^2 + 6.404s + 32.631}$



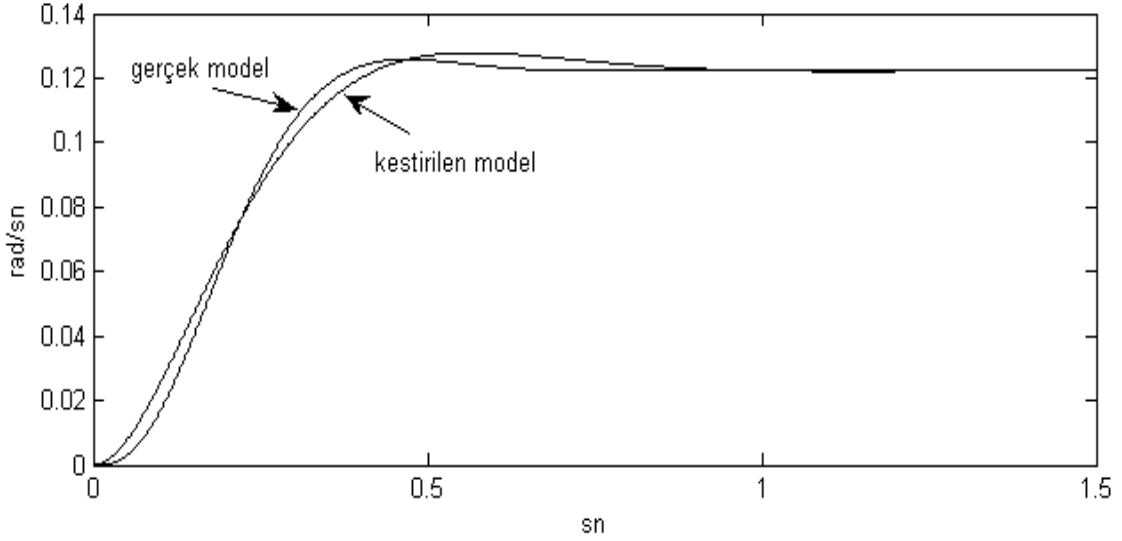
Şekil 4.10 Kesitirilen sistem modeli parametreleri (yükseliş eksen)



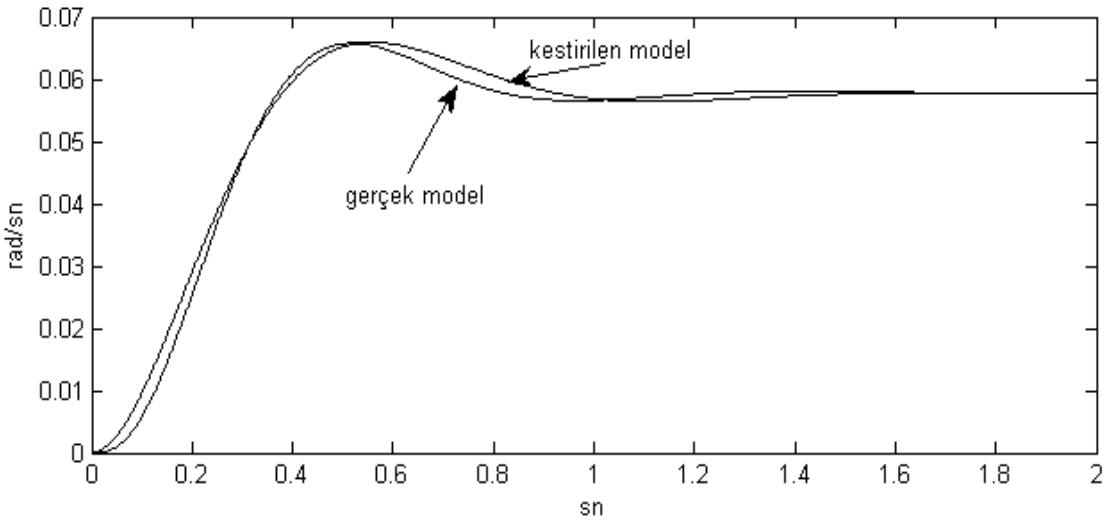
Şekil 4.11 Kesitirilen sistem modeli parametreleri (yan eksen)

2. dereceden kestirilen sistem modeline ve gerçek sistem modeline ait basamak ve sıklık tepkisi grafikleri aşağıda verilmiştir.

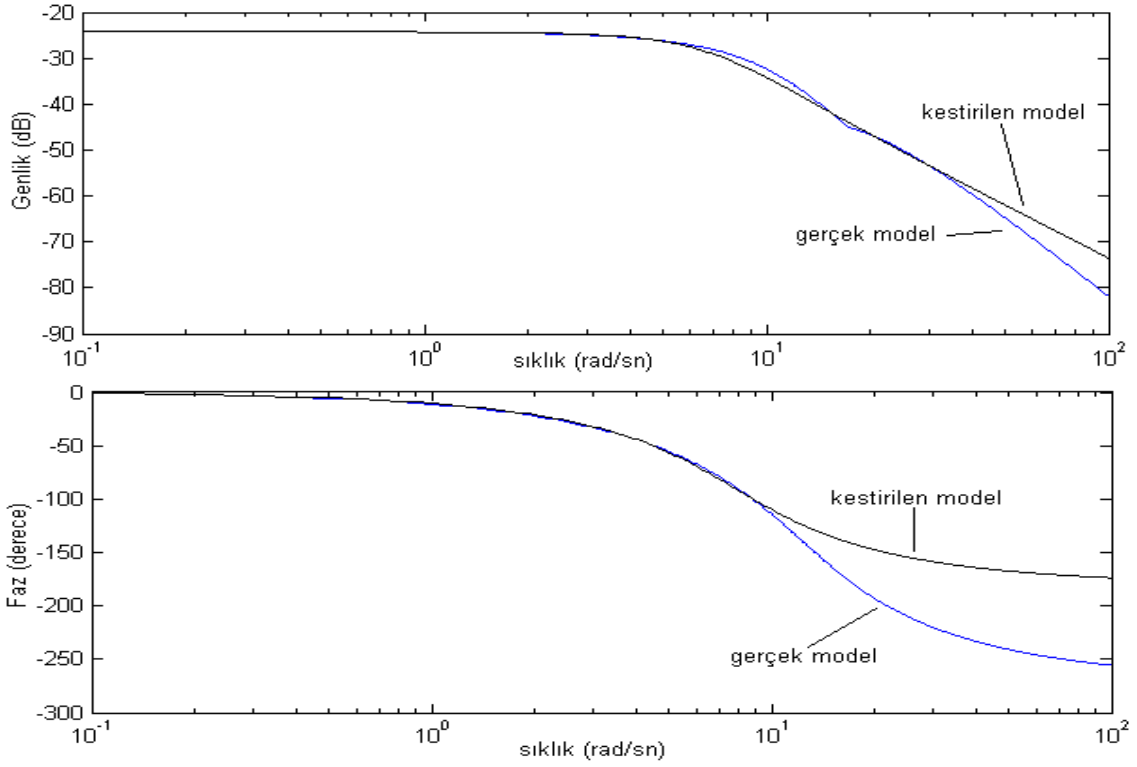
Basamak tepkisi grafiklerine baktığımızda durgun durumda gerçek sistem modeli ile kestirilen model tepkileri aynıdır. Değişim sırasında model tepkileri arasında küçük farklılıklar bulunmaktadır. Sıklık tepkisi grafiklerinde düşük sıklıklarda tepkiler aynı fakat sıklık arttığında tepkiler farklılaşmaktadır.



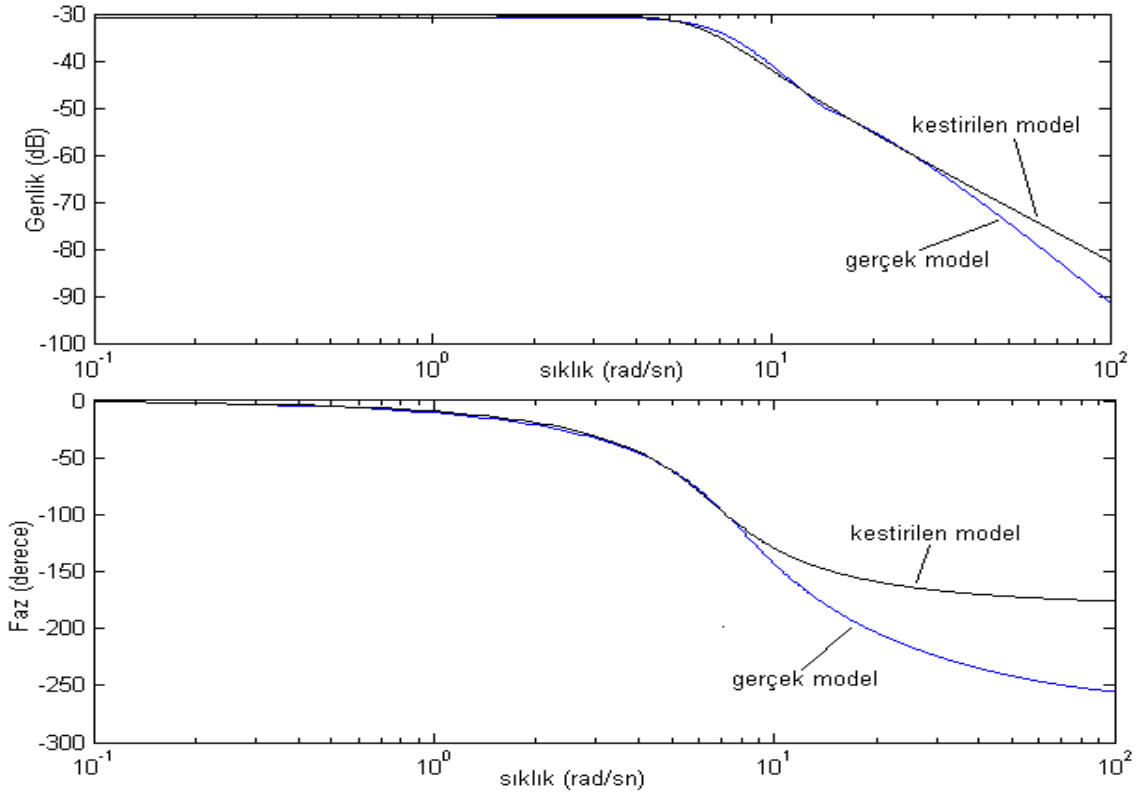
Şekil 4.12 Yükseliş ekseni basamak tepkileri



Şekil 4.13 Yan eksen basamak tepkileri



Şekil 4.14 Yükseliş eksenli sıklık tepkileri



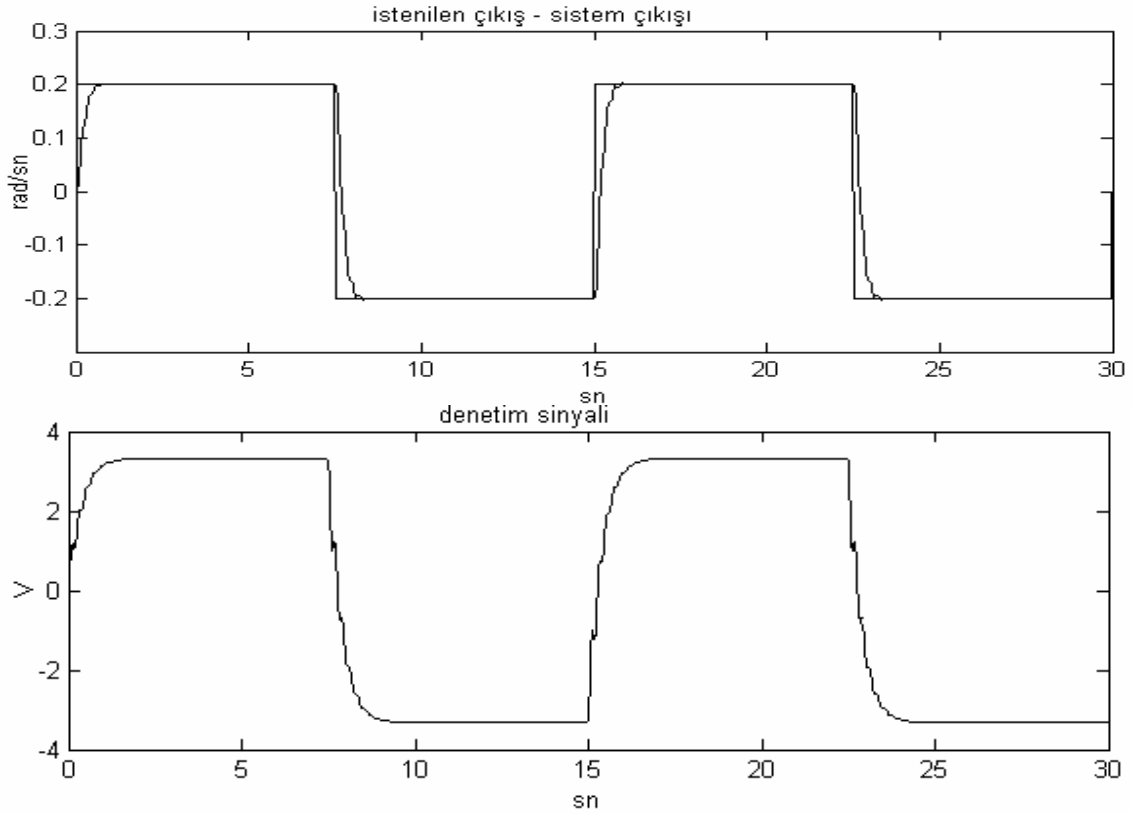
Şekil 4.15 Yan eksenli sıklık tepkileri

Yukarıda elde edilen 2. derece sistem modelleri kutup yerleştirme tasarımında kullanılacaktır. OTT denetimle üç tane kapalı döngü kutup atanabilmektedir.

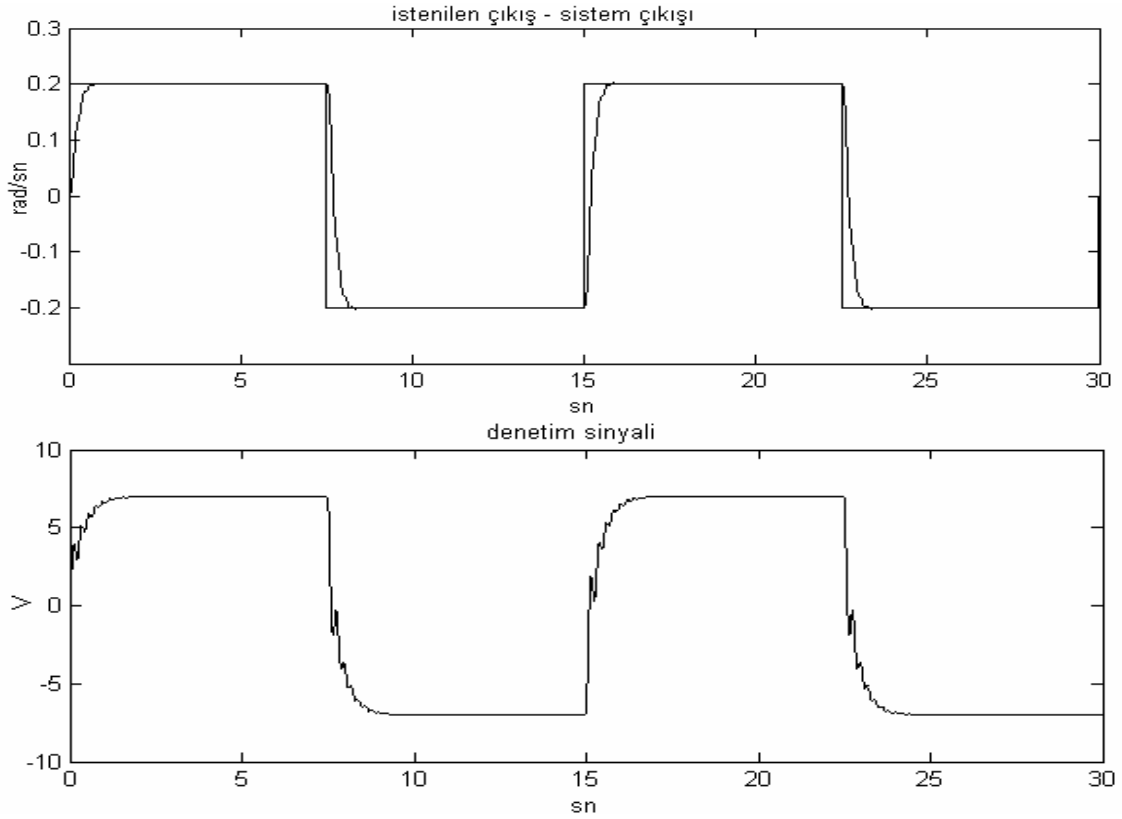
İstenilen kapalı döngü kutuplar denetleç parametrelerinin hesaplanmasında kullanılır. Çizelge 4.6'da istenilen kapalı döngü kutupları ve kutup yerleştirme tasarımı ile elde edilen OTT parametre değerleri verilmektedir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de verilmiştir.

Çizelge 4.6 Kutup yerleştirme tasarımında benzetim çalışması sonuçları

Eksen	Kapalı döngü özdenklemleri	OTT Parametreleri		
		K	T_i	T_d
Yükseliş	$(s+8.7+1.8j)(s+8.7-1.8j)(s+13)$	66.66	0.237	0.079
Yan	$(s+10)(s+12)(s+16)$	342.24	0.223	0.073



Şekil 4.16 Yükseliş eksenini için kutup yerleştirme yöntemi



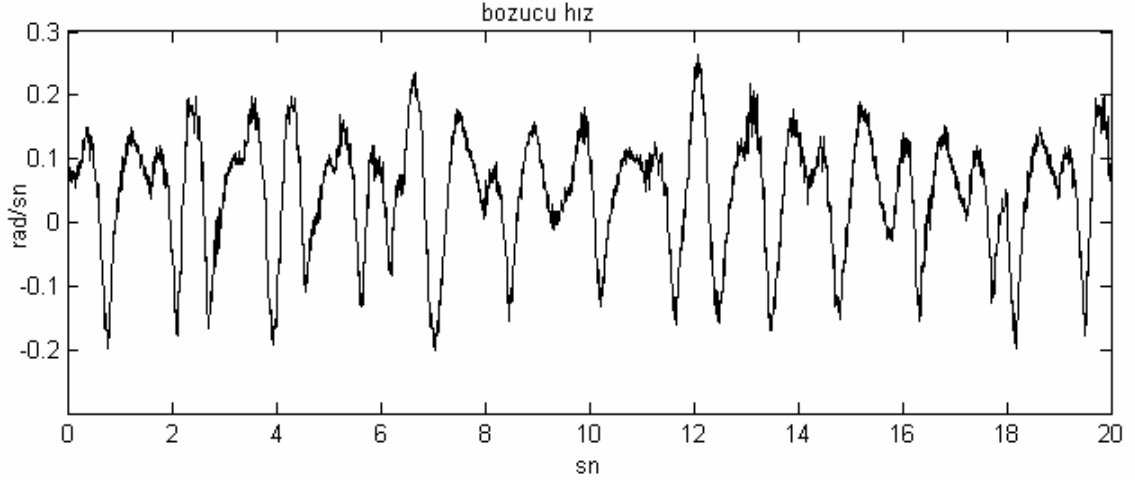
Şekil 4.17 Yan eksen için kutup yerleştirme yöntemi

Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'deki grafiklere bakıldığında oldukça hızlı tepkiler (1 sn'nin altında) elde edilmiştir. Aşma ve salınım meydana gelmemiştir. Tank silah sistemlerinde sistem çıkışının olabilecek en kısa sürede istenilen hıza ulaşması istenir. Ayrıca, tepkide salınım ve aşmaların az olması tercih edilir. Diğer OTT yöntemleri ile elde edilen sonuçlarda istenilen hıza 1 sn'nin üzerinde bir sürede ulaşıldığı için kutup yerleştirme yöntemi bu yöntemlere göre daha başarılı sayılabilir. Ayrıca, aşma ve salınımların meydana gelmemesi de bu yöntemi avantajlı hale getirmektedir.

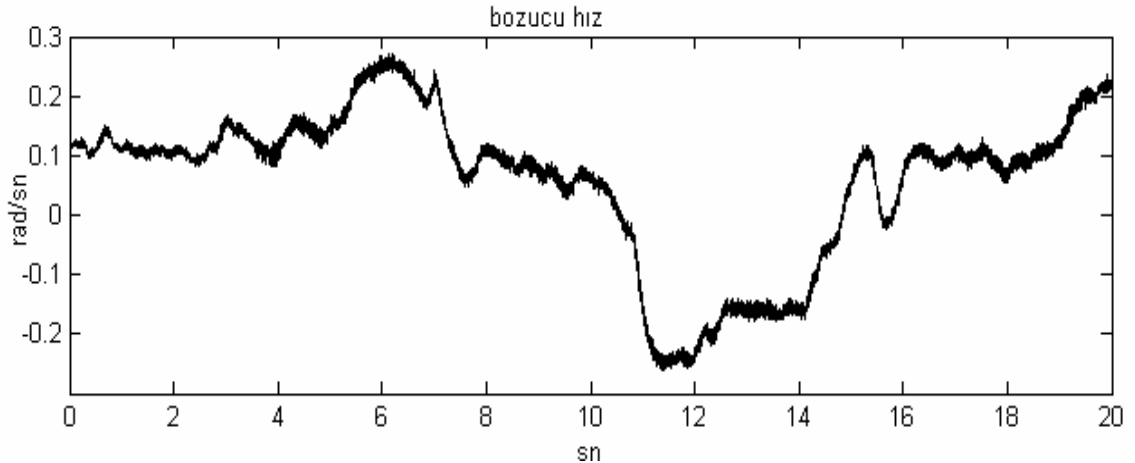
4.2.6. Bozucu Hız İle İlgili Benzetim Sonuçları

Yukarıdaki bölümlerde OTT denetleçlerin verilen hız isteklerine silahın tepkisini gösteren benzetim sonuçları verilmiştir. Verilen hız isteklerine en iyi tepki *Kutup Yerleştirme Tasarımı* ile elde edilmiştir. Bu bölümde, *Kutup Yerleştirme Tasarımı* yönteminin bozucu hızlara tepkisini gösteren benzetim çalışmaları verilmektedir. Yoldan gelebilecek temsili bir bozucu etki sisteme uygulanacak ve denetlecin bu etkiye tepkisi grafiksel olarak gösterilecek ve KO (kararlılaştırma oranı) hesaplanacaktır. Ayrıca, sistemin bozucu etki altında kullanıcı tarafından verilen hız isteklerine tepkisi de incelenecektir. Benzetim çalışmalarında kullanılan bozucu

etkiler, gerçek bir sisteme uygulanan bozucu etkilerdir. Bu çalışma kapsamında sisteme uygulanan bozucu etkiler Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'da verilmiştir. Denetleç parametreleri, Bölüm 4.2.5'te verilen parametreler ile aynıdır.



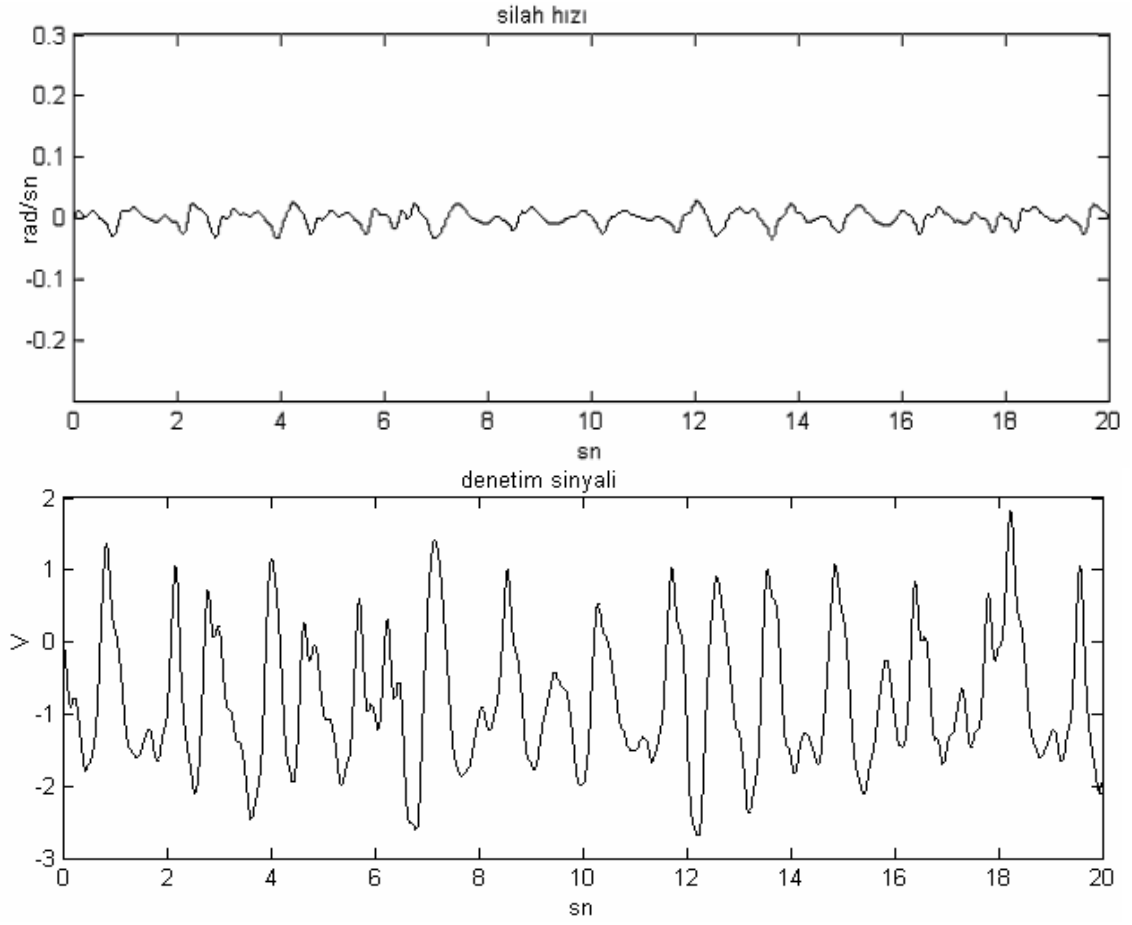
Şekil 4.18 Yükseliş eksenini bozucu etki



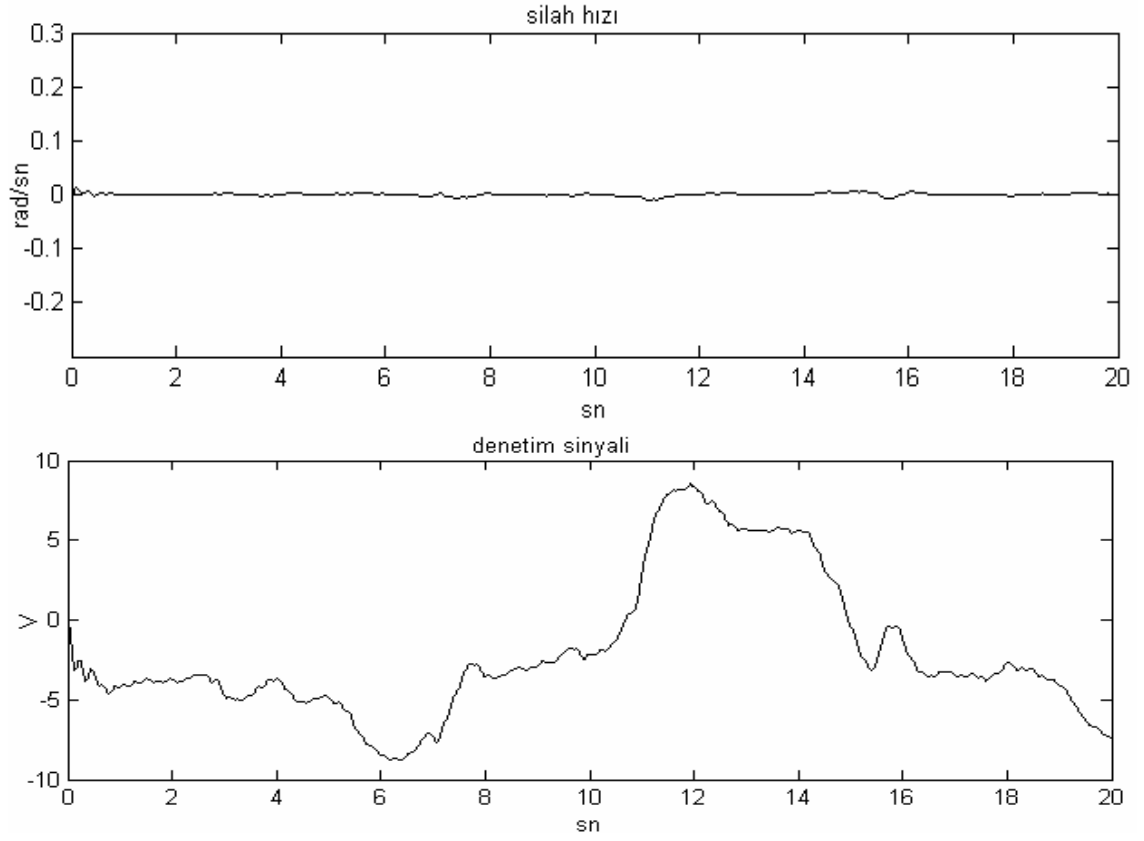
Şekil 4.19 Yan eksenini bozucu etki

Şekil 4.20 ve Şekil 4.21'de sadece bozucu etki altında kutup yerleştirme tasarımının tepkisi görülmektedir. Kararlılaştırma oranı, yükseliş eksenini için 17.2 dB, yan eksen için 25.3 dB olarak elde edilmektedir. Elde edilen sonuçlar iyi olmasına rağmen silahın hareket halinde başarımını artırmak için bu değerlerin yükseltilmesi gerekmektedir. Yükseliş eksenindeki bozucu hızın sıklığı yan eksene göre yüksek olduğu için KO daha düşük çıkmıştır. Bu değerlerin daha yüksek çıkması için bir sonraki bölümde benzetim çalışmaları verilecek olan ileribeslemeli denetimin uygulanması gerekir. Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'te bozucu etki altında kullanıcı tarafından hız isteği verildiği durumda silah hızını gösteren grafikler bulunmaktadır. Şekil 4.23'te bazı bölgelerde eyleyici doyuma ulaştığı için silah hızı

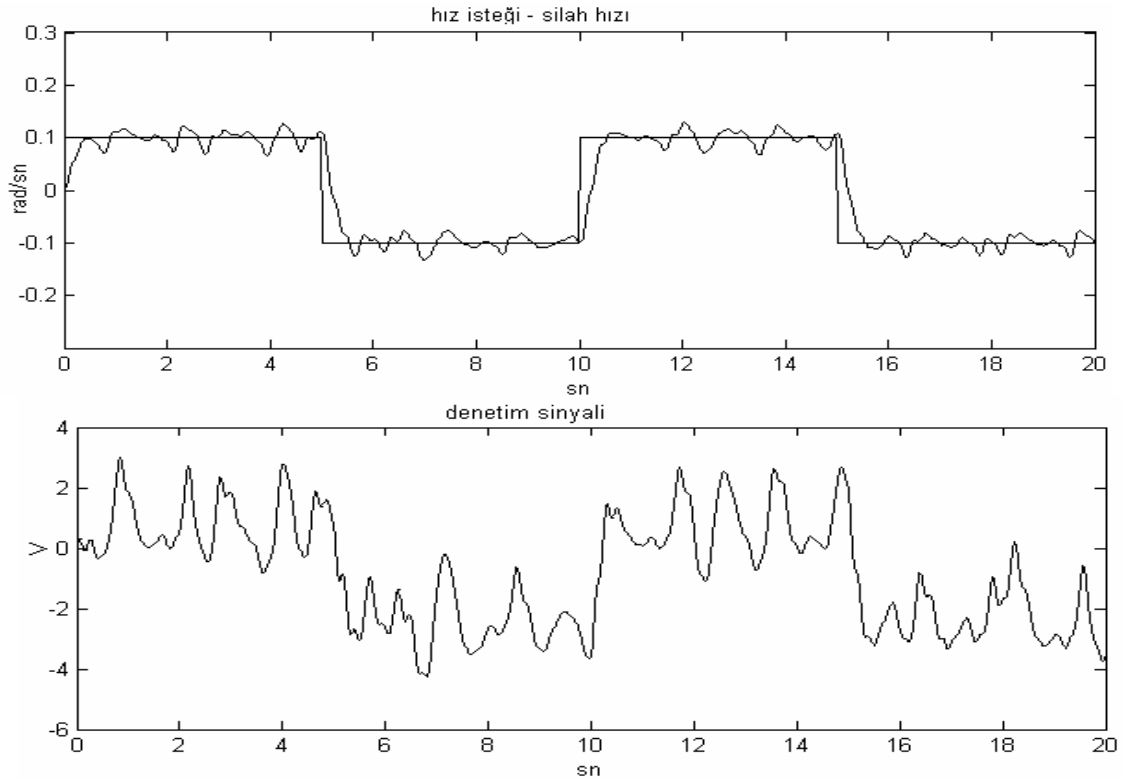
istenilen çıkışı takip edememektedir. Ancak pratikte bozucu etki altında 0.1rad/sn'lik hız isteği olmadığı için bu bir problem olarak düşünülmemektedir.



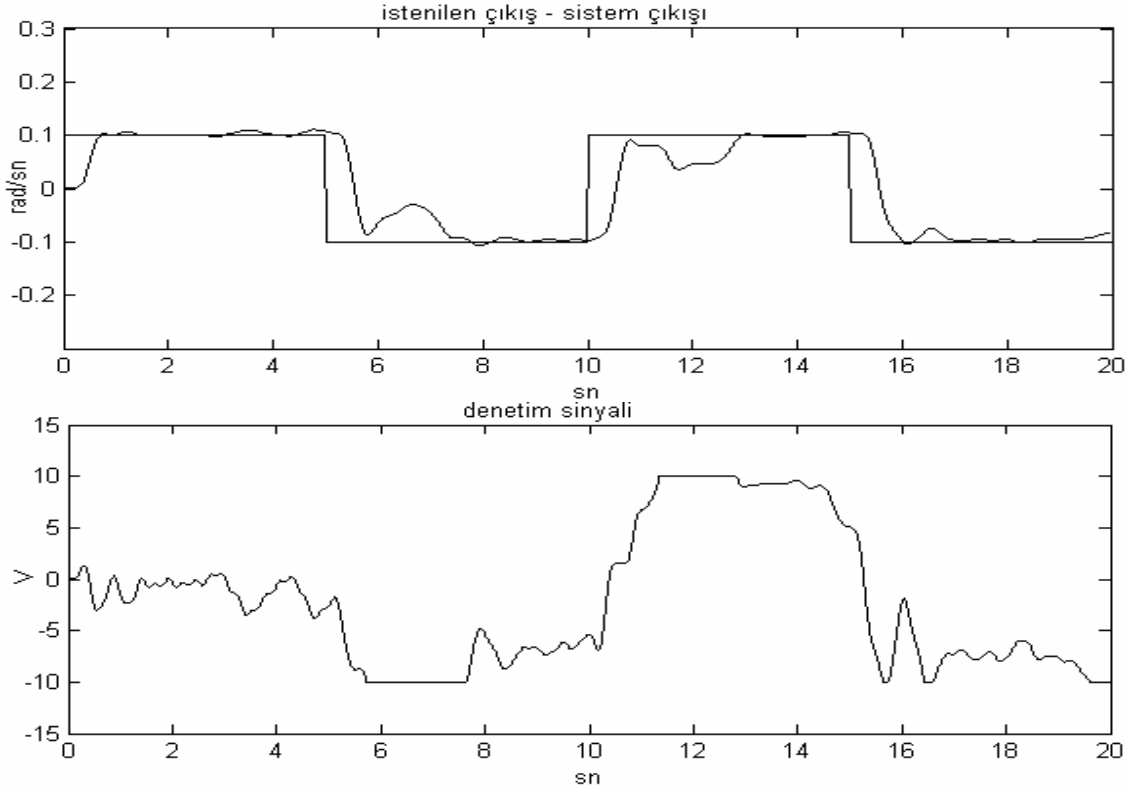
Şekil 4.20 Yükseliş eksenini için kutup yerleştirme tasarımının bozucu hıza tepkisi



Şekil 4.21 Yan eksen için kutup yerleştirme tasarımının bozucu hız tepkisi



Şekil 4.22 Yükseliş ekseni-kutup yerleştirme tasarımının bozucu hız tepkisi



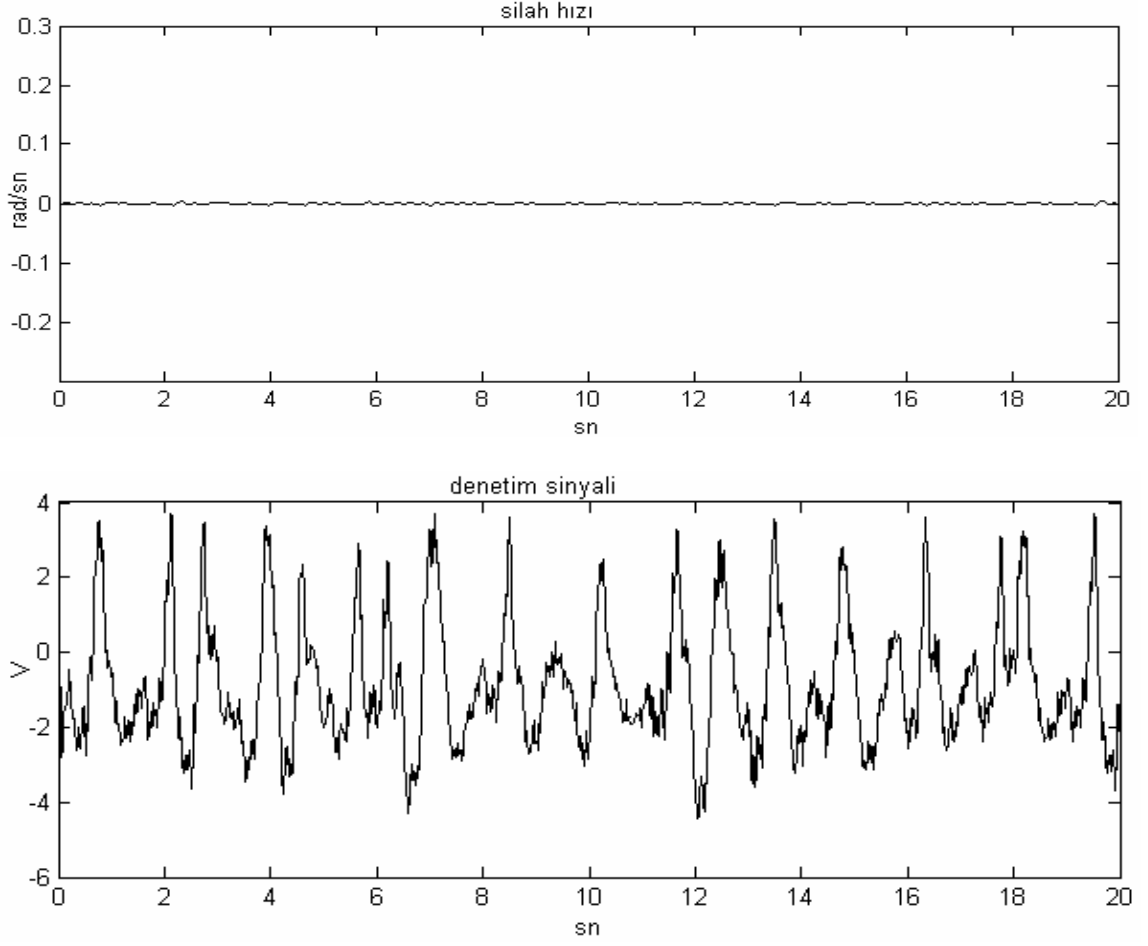
Şekil 4.23 Yan eksen-kutup yerleştirme tasarımının bozucu hıza tepkisi

4.2.7. İleri Beslemeli Denetim Benzetim Sonuçları

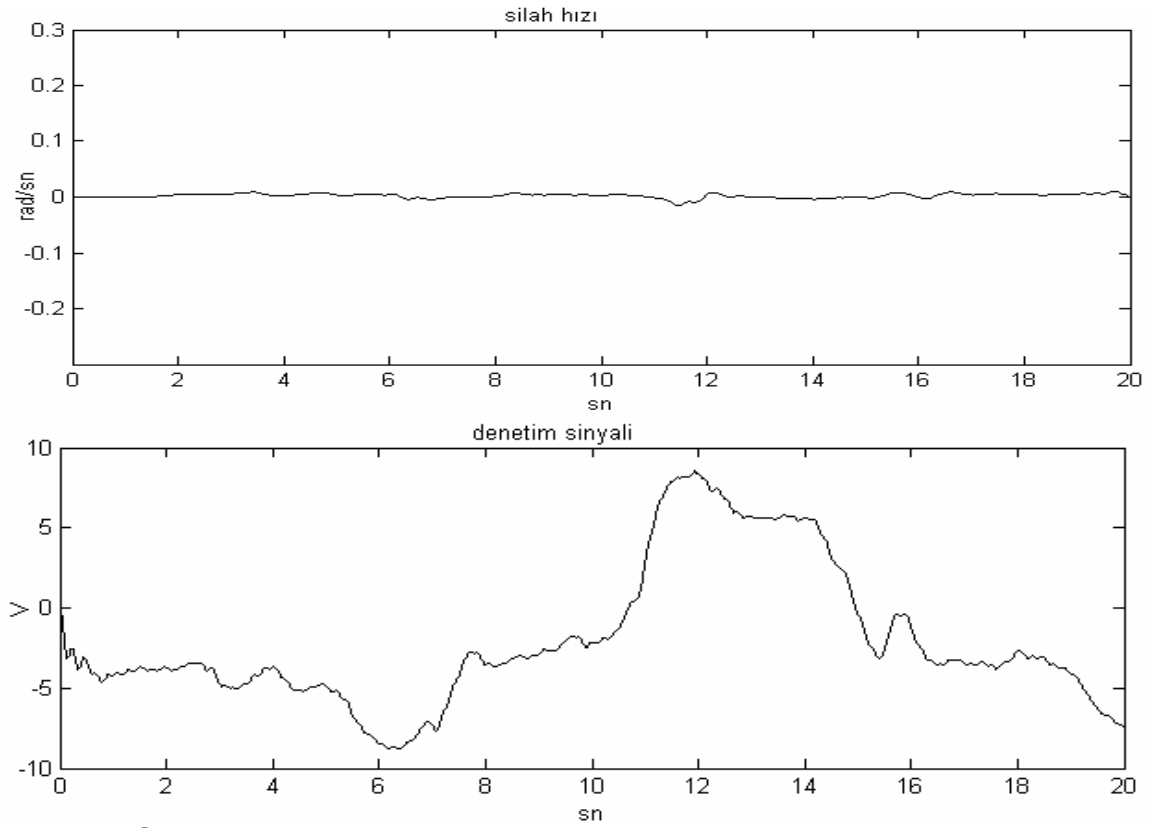
Bölüm 4.2.6'da elde edilen kararlılaştırma oranı değerlerinin yükseltilmesi için kutup yerleştirme tasarımına ek olarak ileri beslemeli denetime ait benzetim sonuçları bu bölümde verilecektir. İleri beslemeli denetimin uygulanabilmesi için sistem modeline ihtiyaç duyulmaktadır. Bölüm 2'de elde edilen sistem modelleri kullanılarak Bölüm 3.5'te anlatıldığı şekliyle ileribeslemeli denetim uygulandığında benzetim sonuçları Şekil 4.24 ve Şekil 4.25'te verilmiştir. Benzetim çalışmalarında geribeslemeli denetim olarak Bölüm 4.2.5'te elde edilen OTT kutup yerleştirme tasarım parametreleri kullanılmıştır. Benzetim çalışmalarında Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'da verilen bozucu etkiler kullanılmıştır.

Şekil 4.24 ve Şekil 4.25'teki benzetim sonuçları, kutup yerleştirme ve ileri beslemeli denetlemlerle denetlenen sadece bozucu hız altındaki sisteme aittir. Kullanıcı tarafından verilen hız istekleri sıfırdır. Denetim sonuçlarına bakıldığında kararlılaştırma oranı yükseliş eksenini için 38.2dB, yan eksen için 30.5dB olmaktadır. Özellikle yükseliş ekseninde ileri beslemeli denetim başarımı çok arttırmıştır. Bu sonuçlara bakıldığında, tank silah sistemlerinde başarımı arttırmak için ileri beslemeli denetimin gerekli olduğu görülmektedir. Şekil 4.26 ve Şekil 4.27'de bozucu etki ve hız isteği varken elde edilen benzetim çalışması sonuçları

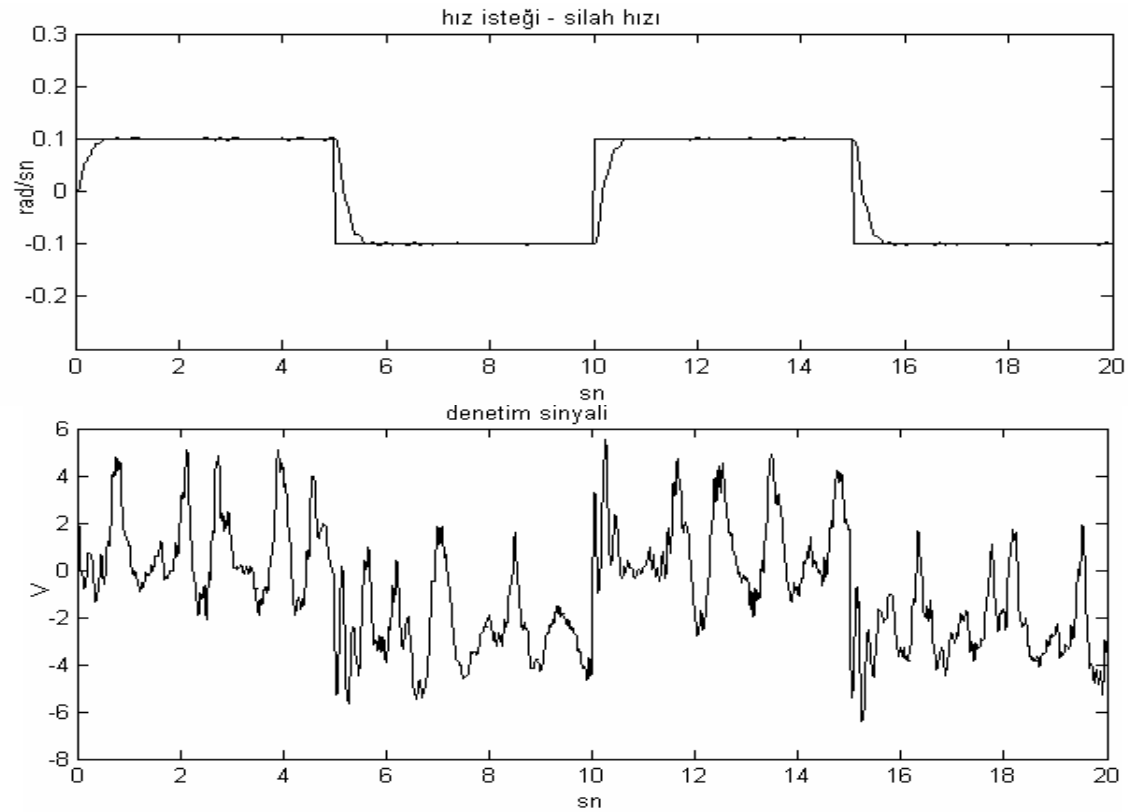
bulunmaktadır. Bu grafiklerden de görüldüğü gibi, özellikle yükseliş ekseninde, ileri beslemeli denetim tank atış sisteminin denetim başarımında büyük rol oynamaktadır.



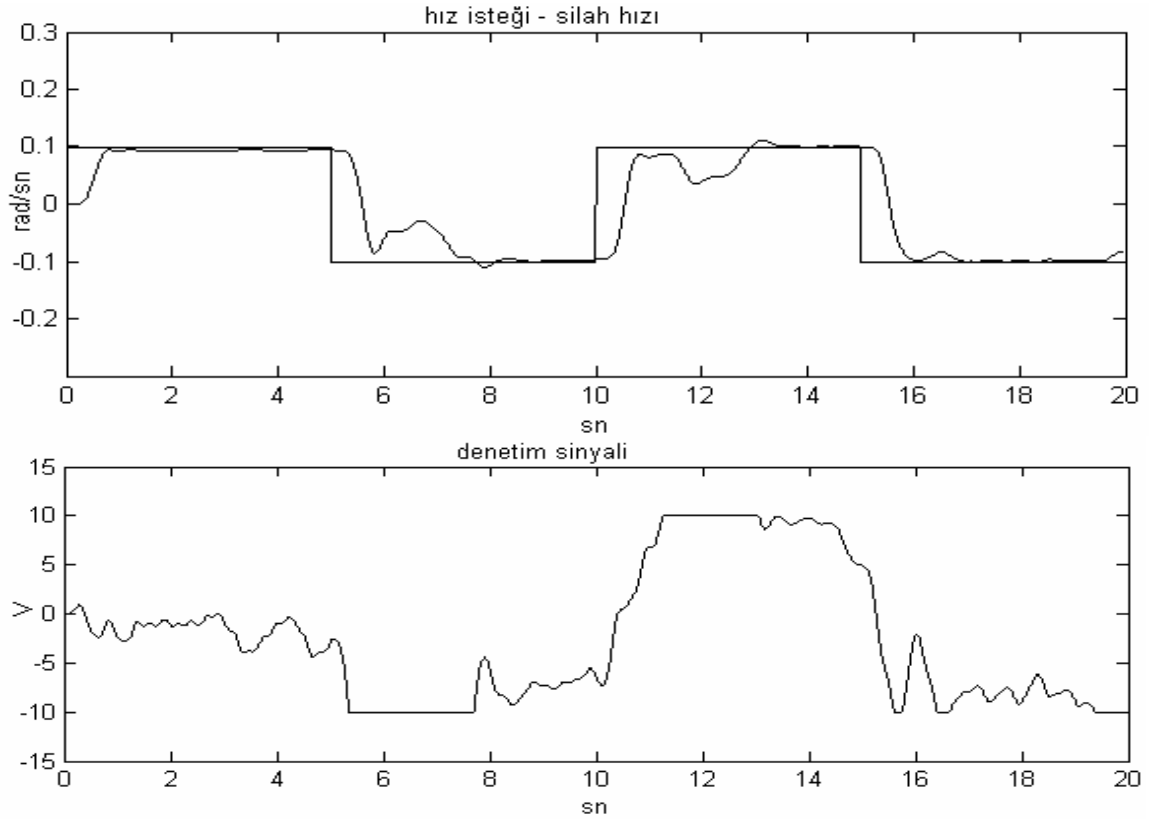
Şekil 4.24 Yükseliş eksenini için ileri beslemeli denetim (hız isteği yok)



Şekil 4.25 Yan eksen için ileri beslemeli denetim (hız isteği yok)



Şekil 4.26 Yükseliş eksenini için ileri beslemeli denetim (hız isteği var)



Şekil 4.27 Yan eksen için ileri beslemeli denetim (hız isteği var)

4.3. SÜGÖNDE Benzetim Sonuçları

Bu bölümde, SÜGÖNDE ile tank silah sisteminin yan ve yükseliş eksenlerinde denetimine ait benzetim çalışmaları bulunacaktır. Önce, sadece SÜGÖNDE ile geribeslemeli denetim yapılacaktır. Daha sonra SÜGÖNDE ile birlikte ileri beslemeli denetim uygulanacaktır. Elde edilen sonuçlar OTT denetleçlerle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılacaktır.

Tankın yan ve yükseliş eksenleri için Bölüm 3.6'da anlatılan ve Şekil 3.14'te gösterilen SÜGÖNDE yöntemi uygulanacaktır. SÜGÖNDE yöntemi için sistemin matematiksel modeline ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada, Bölüm 2'de elde edilen sistem modeli kullanılmıştır. Benzetim çalışmalarında T_f küçültüldüğünde tepkinin hızlandığı görülmüştür. Çalışmalarda Çizelge 4.7'de verilen tasarım parametreleri kullanılmıştır.

Çizelge 4.7 SÜGÖNDE tasarım parametreleri

N_y	20
N_u	1
T_f	0.2
λ	0
C	$(s + 10)^2$

Çizelge 4.7’de verilen parametreler ile denetimde kullanılan g kazancı, F_c ve G_c çokterimlileri Çizelge 4.8’da verildiği gibi elde edilmektedir.

Şekil 4.28 ve Şekil 4.29’da SÜGÖNDE benzetim sonuçları verilmiştir. Tepkiler oldukça hızlı (1 sn’nin altında), aşmasız ve salınımsız olarak elde edilmiştir. OTT-Kutup Yerleştirme yöntemi ile karşılaştırıldığında SÜGÖNDE’nin başarımı daha iyi olmuştur. Ancak hız isteğinin değiştiği yerde denetim sinyali doyuma ulaşmaktadır. Gerçek uygulamalarda basamak hız isteği olmayacağı için bu bir problem olarak düşünülmemektedir.

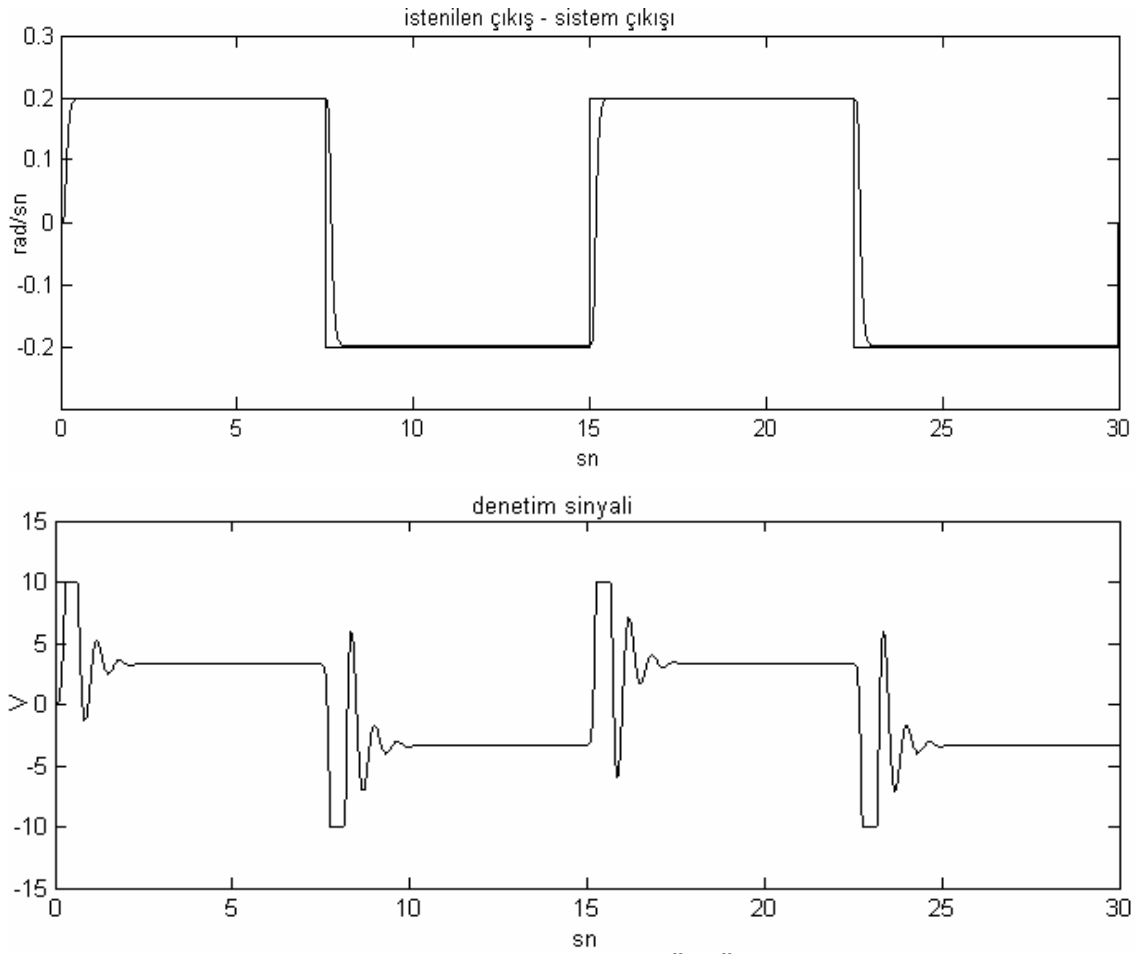
Şekil 4.30 ve Şekil 4.31’de SÜGÖNDE’nin bozucu hıza tepkisini gösteren grafikler görülmektedir. Benzetim çalışmalarında Şekil 4.18 ve Şekil 4.19’da verilen bozucu etkiler kullanılmıştır. Kararlılaştırma oranı, yükseliş eksenini için 20.43dB ve yan eksen için 24.93dB olarak elde edilmiştir. OTT-Kutup Yerleştirme yönteminde bu değerler yükseliş eksenini için 17.2dB ve yan eksen için 25.3dB olarak elde edilmişti. Bu değerler karşılaştırıldığında, SÜGÖNDE yönteminin OTT-Kutup Yerleştirme yöntemine göre bozucu hıza tepkisindeki başarımı daha iyidir.

SÜGÖNDE ile birlikte ileri beslemeli denetim uygulandığı zaman elde edilen benzetim sonuçları Şekil 4.32, Şekil 4.33, Şekil 4.34 ve Şekil 4.35’de verilmiştir. SÜGÖNDE ve ileri beslemeli denetim uygulandığında, kararlılaştırma oranı yükseliş ekseninde 39.5dB, yan ekseninde 40.3dB olarak elde edilmiştir. Kararlılaştırma oranının artırılması için ileri beslemeli denetime gerek duyulmaktadır. Hız isteklerine tepkide de SÜGÖNDE yönteminin başarımı daha iyi elde edilmişti. Oldukça hızlı, aşmasız ve salınımsız tepkiler elde edilmektedir. Bu sonuçlar çerçevesinde bir değerlendirme yapıldığında tank silah sisteminin denetiminde SÜGÖNDE ile birlikte ileri beslemeli denetim uygulandığında daha başarılı sonuçların elde edildiği görülmektedir. Şekil 4.35’de bazı bölgelerde eyleyici doyuma ulaştığı için silah hızı istenilen çıkışı takip edememektedir. Ancak

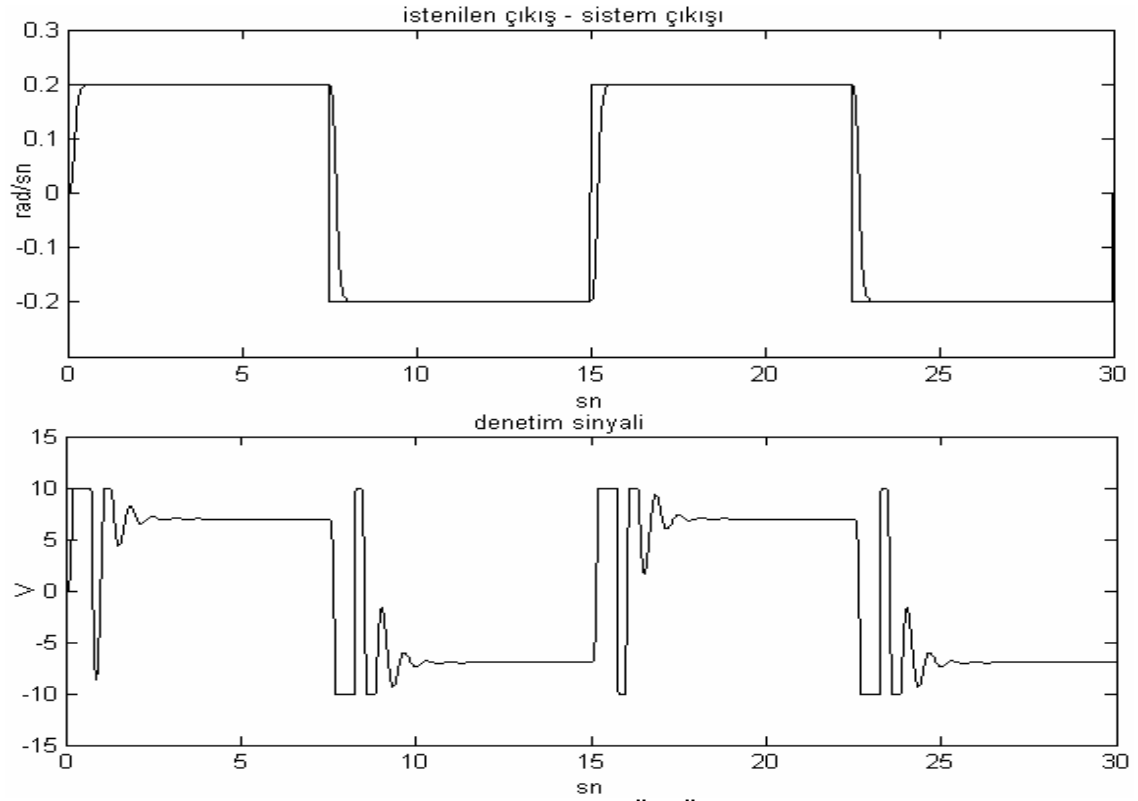
pratikte bozucu etki altında 0.1rad/sn'lik hız isteği olmadığı için bu bir problem olarak düşünülmemektedir.

Çizelge 4.8 SÜGÖNDE denetim parametreleri

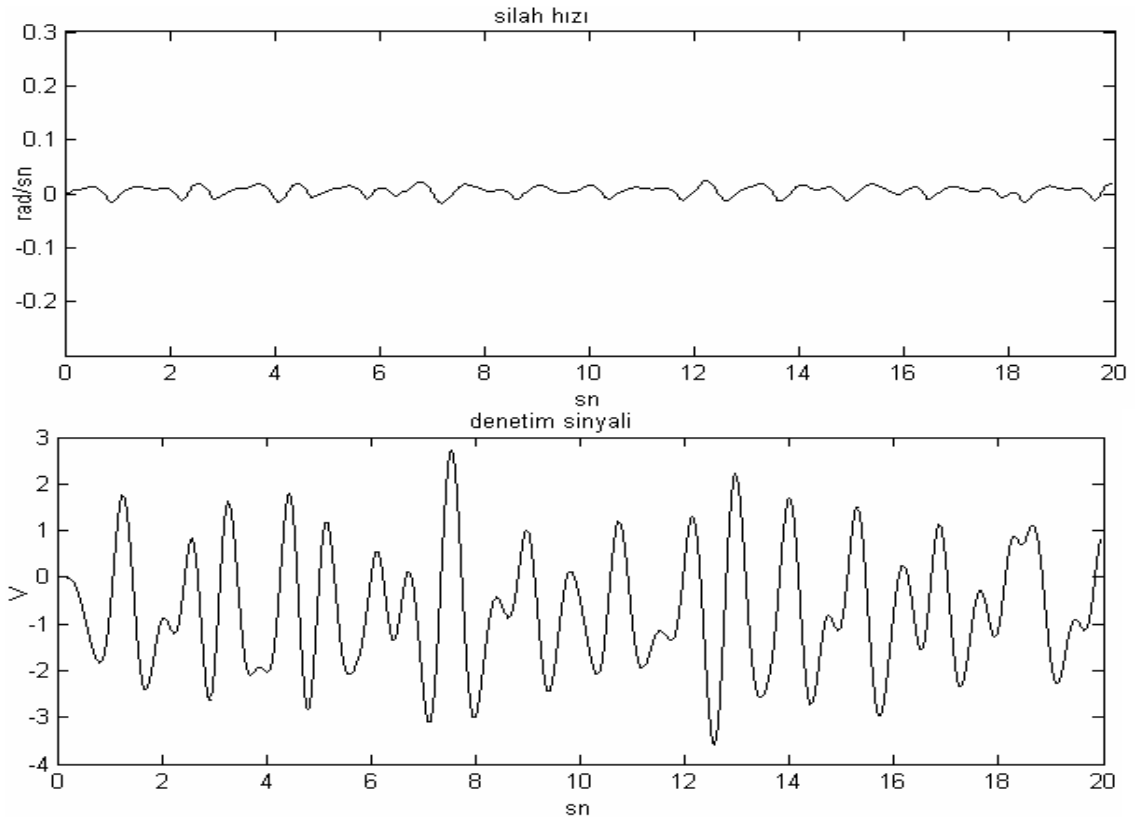
SÜGÖNDE parametreleri			
Eksen	g	F_c	G_c
Yükseliş	171.6	$-103s^2 - 2771s - 17764$	$31.6s + 990.6$
Yan	502.1	$-209s^2 - 4785s - 40560$	$32.7s + 1072.5$



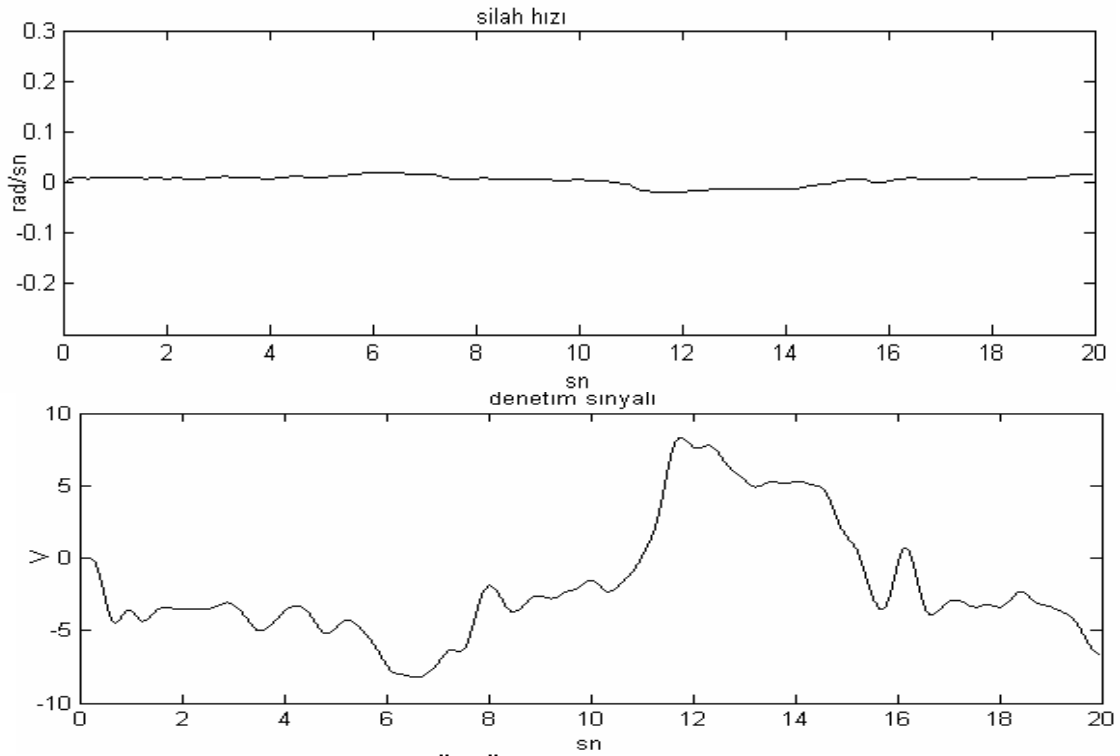
Şekil 4.28 Yükseliş eksenini için SÜGÖNDE denetimi



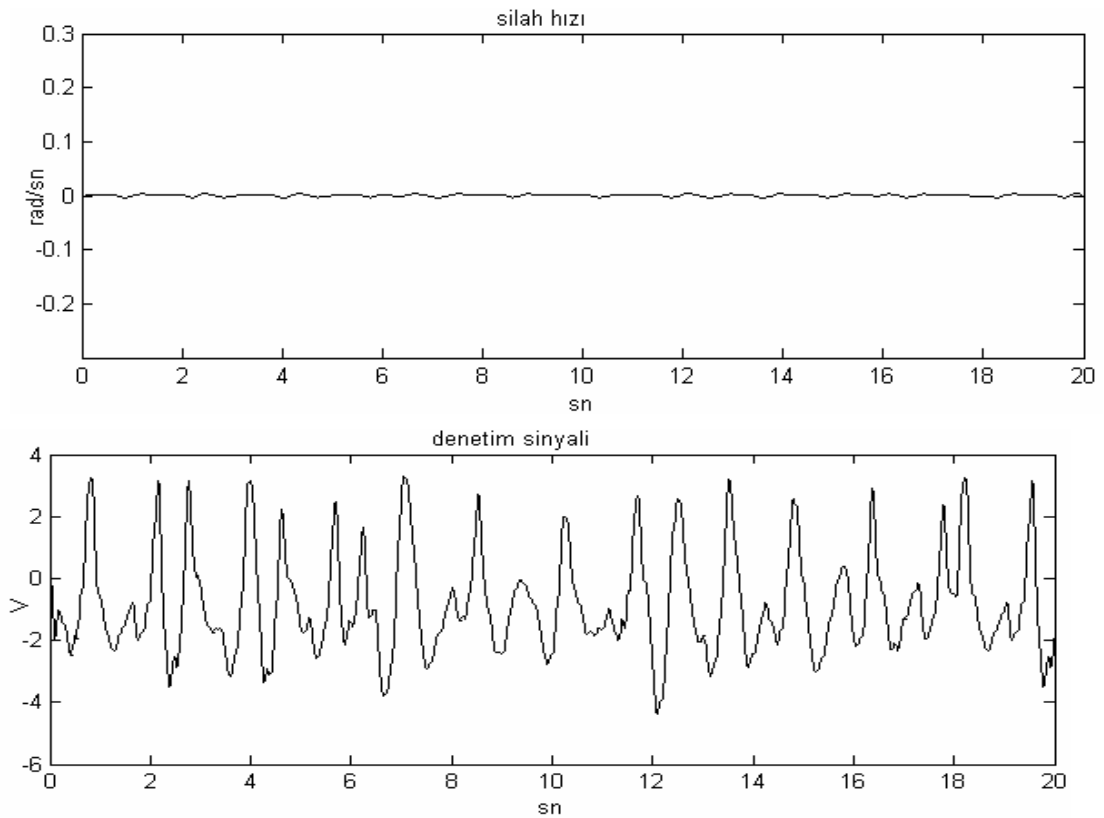
Şekil 4.29 Yan eksen için SÜGÖNDE denetimi



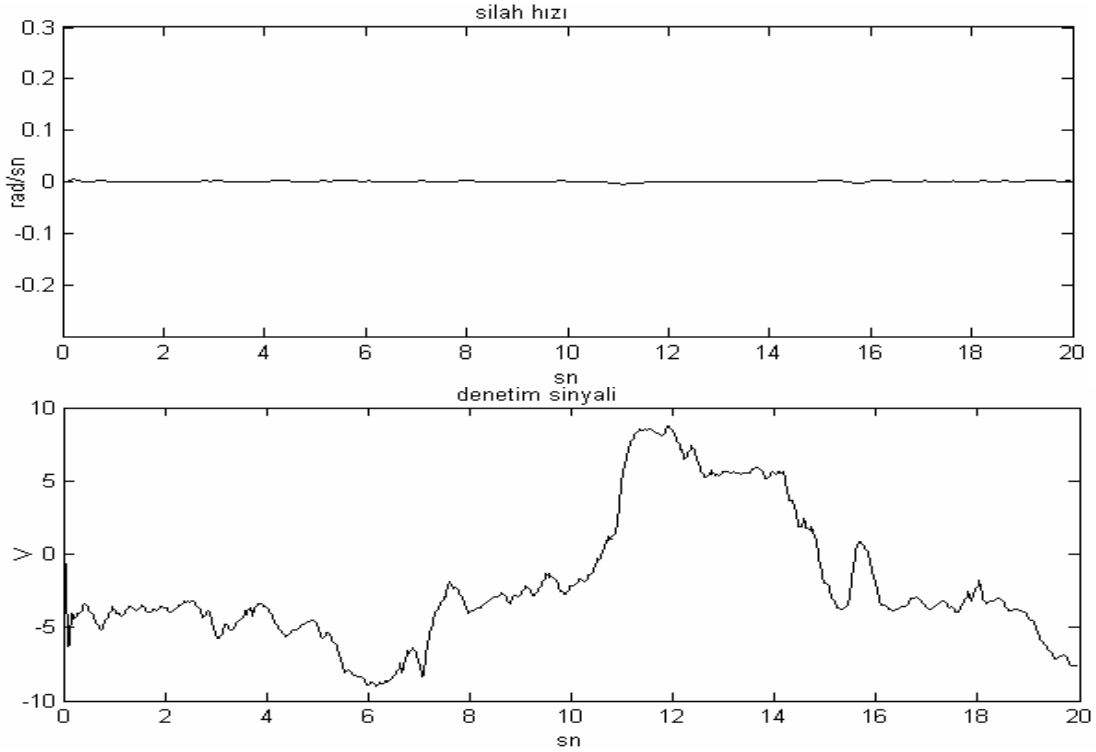
Şekil 4.30 Yükseliş eksenini için SÜGÖNDE'nin bozucu hıza tepkisi (hız isteği yok)



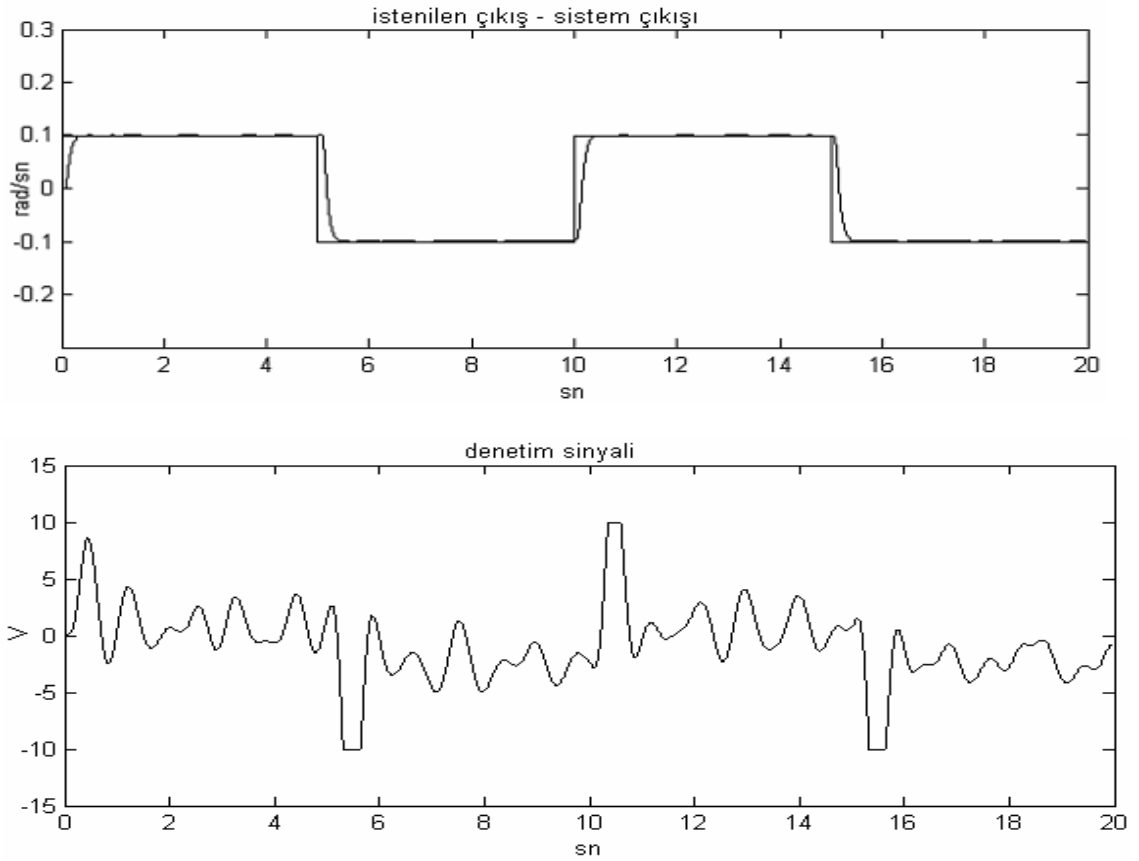
Şekil 4.31 Yan eksen için SÜGÖNDE'nin bozucu hıza tepkisi (hız isteği yok)



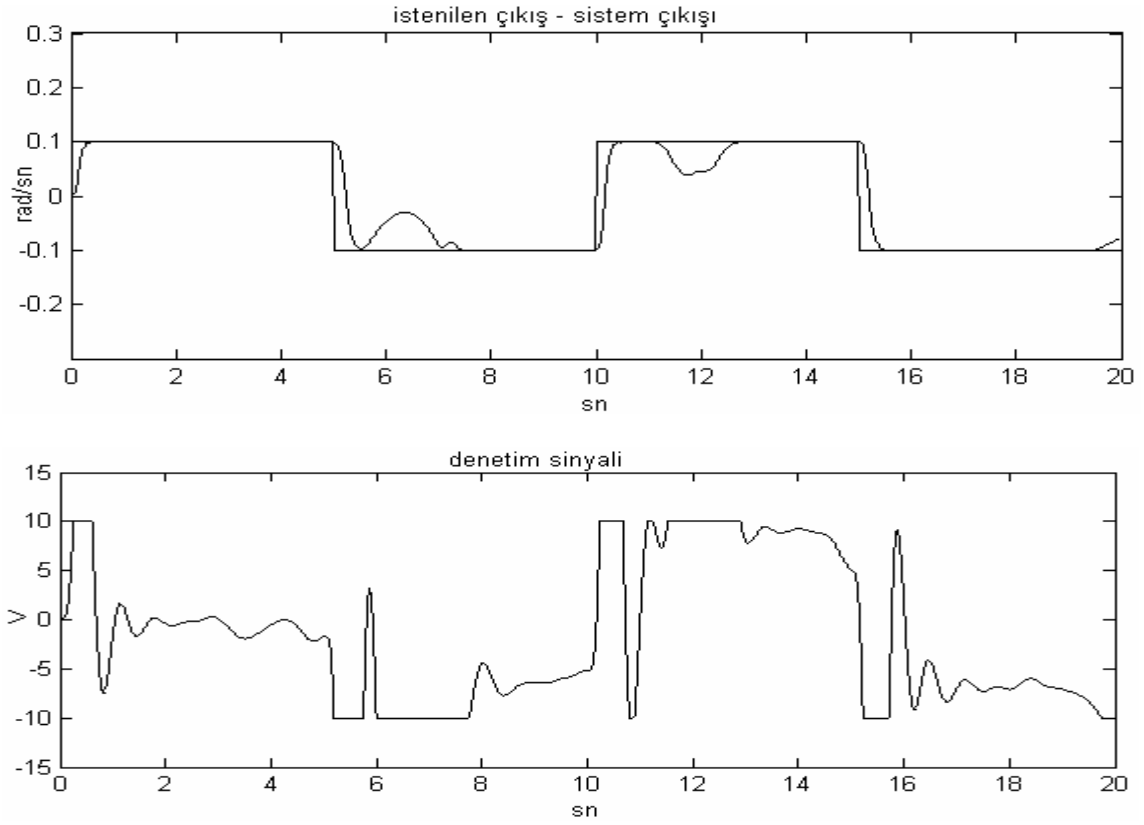
Şekil 4.32 Yükseliş eksenini için ileri beslemeli denetim (hız isteği yok)



Şekil 4.33 Yan eksen için ileri beslemeli denetim (hız isteği yok)



Şekil 4.34 Yükseliş eksenini için ileri beslemeli denetim (hız isteği var)



Şekil 4.35 Yan eksen için ileri beslemeli denetim (hız isteği var)

5. SONUÇ

Bu çalışmada tank silah sisteminin iki ekseninde modellenmesi yapılmış ve elde edilen model OTT, SÜGÖNDE ve ileribeslemeli denetim kullanılarak benzetim yoluyla denetlenmiş ve denetim başarımları karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

a) Tankın yan ve yükseliş eksenleri için kullanıcı tarafından verilen hız istekleri ve bozucu etkiye bağlı üçüncü dereceden doğrusal modelleri elde edilmiştir. Elde edilen matematiksel modellerin tüm kutupları s-süzleminde sol yarı alanda ve kararlı yapıya sahiptirler. Daha sonra doğrusal olmayan etkiler incelenmiştir. Yükseliş ekseninde silahın hareket alanı sınırlı olduğu için silah sınırlara geldiğinde istek olsa bile silahın hareket ettiremediği görülmüştür. Doğrusal ve doğrusal olmayan modelin basamak tepkileri incelenmiş ve durgun durumdaki kazaçlar karşılaştırıldığında statik sürtünmeden dolayı kazancın azaldığı görülmüştür. Ayrıca, doğrusal olmayan modelde çok küçük hız isteklerine sistemin tepki vermediği ve yön değişimlerinde boşluktan dolayı bir süre silahta hareket oluşmadığı görülmüştür.

b) OTT denetim yöntemleri ile verilen hız isteklerine sistemin tepkisi incelenmiştir. Ziegler-Nichols basamak tepkisinde oransal kazanç çok düşük çıktığı için büyük gecikme meydana gelmiş ve bu yöntemin tank silah denetimi için uygun olmadığı görülmüştür. Ziegler-Nichols sıklık tepkisi, genlik-evre payı ve baskın kutup tasarımı yöntemlerinde tepkiler Ziegler-Nichols basamak tepkisine göre daha hızlı olmuştur. Ancak tank silah sistemleri için istenen hızda tepkiler meydana gelmemiştir. Ayrıca, Ziegler-Nichols sıklık tepkisinde çok büyük salınımlar ve aşmalar meydana gelmiştir. Tank silah sistemlerinde silahın başarımları için verilen hız isteklerinin çok hızlı uygulanması gerekmektedir. Kutup yerleştirme tasarımı ile istenilen seviyede tepkiler elde edilmiştir.

c) SÜGÖNDE yöntemi ile verilen hız isteklerine sistemin tepkisi incelenmiştir. SÜGÖNDE yöntemi ile tankın yan ve yükseliş eksenleri için oldukça hızlı, aşmasız ve salınımsız tepkiler elde edilmiştir. OTT-kutup yerleştirme metodu ile karşılaştırıldığında verilen hız isteklerine SÜGÖNDE yönteminin tepkisi daha iyi olmuştur.

d) OTT-kutup yerleştirme metodu ve SÜGÖNDE yönteminin bozucu etkilere tepkisi incelenmiştir. SÜGÖNDE yönteminin bozucu etkilere tepkisindeki başarıml daha iyi olmuştur. Hız isteğine verilen tepkilerde de SÜGÖNDE yöntemi daha başarılı sonuçlar verdiği için SÜGÖNDE yönteminin kullanılması denetim başarımlını artıracaktır.

e) Kutup yerleştirme metodu ve SÜGÖNDE ile birlikte ileri beslemeli denetim uygulanmış ve toplanan veriler incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde ileri beslemeli denetimin bozucu etkilere karşı çok başarılı olduğu ve kararlılık oranının yüksek değerlere ulaştığı görölmüştür. İleri beslemeli denetim uygulandığında kutup yerleştirme metodu ve SÜGÖNDE yönteminin bozucu etkilere tepkisi benzerlik göstermektedir. SÜGÖNDE yönteminin hız isteğine tepkisinde kutup yerleştirme yöntemine göre başarımlı daha iyi olduğu için, ileri beslemeli denetim kullanıldığında geribeslemeli denetim olarak SÜGÖNDE yönteminin kullanılması denetim başarımlını artıracaktır.

Sonuç olarak, bu çalışma kapsamında yapılan benzetim çalışmalarında tank silah sistemlerinin denetiminde ileri beslemeli denetimin gerekli olduğu görölmüştür. İleri beslemeli denetim uygulandığı zaman geribeslemeli denetim olarak SÜGÖNDE'nin kullanılması başarımlı artırmaktadır.

İleriye yönelik olarak, tank silah sisteminin gelişmiş başka denetim yöntemleri ile denetimi veya tank görüş sistemlerinin modellenmesi ve çeşitli denetim yöntemleri ile denetimi konularında çalışma yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Aström, K.J., Hagglund T., 1994, PID Controllers: Theory Design and Tuning, 2nd Edition, Instrument Society of America.
- Aström, K.J., Hagglund, T., 1984, Automatic Tuning of PID Controllers Based on Dominant Pole Design, IFAC Conference on Adaptive Control and Chemical Process.
- Aström, K.J., Hagglund, T., 1984, Automatic Tuning of Simple Regulator with Specifications on Phase and Amplitude Margins, Automatica, 20(5), 645-651.
- Atherton, D.P., 1982, Nonlinear Control Engineering, Van Nonstrand Reinhold.
- Bishop, R.H., 2002, The Mechatronic Handbook, ISA-The Instrumentation Systems and Automation Society.
- Demircioğlu, H, Gawthrop, P.J., 1991, Continuous-Time Generalized Predictive Control (CGPC), Automatica, Vol. 27, 55-74.
- Demircioğlu, H, 1989, Continuous-Time Self-Tuning Algorithms, Doktora Tezi, Glasgow University.
- Ogata, K., 1997, Modern Control Engineering, 3rd Edition, Prentice Hall.
- Özcan, A., 1998, OTT Denetleçler İçin Otomatik Ayarlama Teknikleri: Uygulamalı ve Karşılaştırmalı Bir Çalışma, Yüksek Mühendislik Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara.
- Purdy, D.J., 1998, Main Battle Tank Stabilisation Ratio Enhancement Using Hull Rate Fedforward, Journal of Battlefield Technology, Vol.1, No.2.
- Purdy, D.J., 1991, Modelling and Simulation of a Weapon Control System for a Main Battle Tank, Proceedings of the Eight US Army Symposium on Gun Dynamics, 14-16.
- Ziegler, J.G., Nichols, N.B., 1942, Optimum Settings For Automatic Controllers, Transaction of ASME, 64, 759-765.

Ek – 1: İngilizce-Türkçe Terimler Sözlüğü

actuator	: eyleyici
amplitude	: genlik
backlash	: boşluk
closed-loop	: kapalı döngü
continuous-time	: sürekli zaman
controller	: denetleç
cradle	: beşik
damping factor	: sönüm oranı
discrete-time	: kesikli zaman
disturbance	: bozucu
dominant pole	: baskın kutup
emulator	: öykünücü
estimation	: kestirme
feedback	: geri besleme
feedforward	: ileri besleme
forgetting factor	: unutma çarpanı
frequency	: sıklık
function	: işlev
hysteresis	: histeresis
inertia	: dönü kütlesi
integral	: tümlev
integral wind-up	: tümlevsel yığılım
low-pass	: alçak geçirgen
open loop	: açık döngü
oscillation	: salınım

overshoot	: aşma
phase	: evre
pole	: kutup
pole placement	: kutup yerleştirme
polynomial	: çokterimli
prediction	: öngörü
proper	: uygun
recursive	: yineli
relay	: röle
response	: tepki
saturation	: doyum
set-point	: istenilen çıkış
stable	: kararlı
steady-state	: durgun durum
step	: basamak
stiffness	: esneklik
torque	: dönü kuvveti
transfer function	: aktarım işlevi
transient response	: geçici tepki
trunnion	: muylu
viscous friction	: akışkan sürtünme

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ramazan ARIK

Doğum Yeri : Doğanşehir/MALATYA

Doğum Yılı : 1978

Medeni Hali : Bekar

Eğitim ve Akademik Durumu:

Lise 1993-1996 : Fen Lisesi, MALATYA

Lisans 1996-2001 : ODTÜ Mühendislik Fakültesi Elektrik ve Elektronik
Mühendisliği Bölümü, ANKARA

Yabancı Dil : İngilizce

İş Tecrübesi:

2002 - ... : Aselsan A.Ş.